



TESIS TF092325

**STUDI NUMERIK PEMANFAATAN MAGNET
PERMANEN UNTUK PENGGERAK MOTOR**

SENANJUNG PRAYOGA

2412 201 011

DOSEN PEMBIMBING

Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T.

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN REKAYASA INSTRUMENTASI INDUSTRI

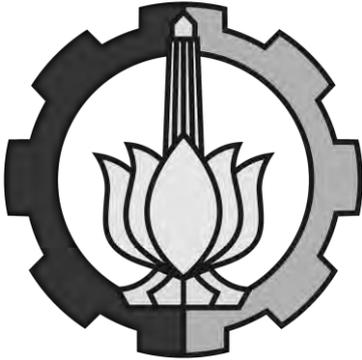
JURUSAN TEKNIK FISIKA

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2014



THESIS TF092325

**NUMERICAL STUDY THE UTILIZATION OF
PERMANENT MAGNET FOR MOTOR DRIVE**

SENANJUNG PRAYOGA

2412 201 011

SUPERVISOR

Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T.

MAGISTER PROGRAM

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS

SPECIALIZATION INDUSTRIAL INSTRUMENTATION ENGINEERING

FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2014

LEMBAR PENGESAHAN

Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Senanjung Prayoga

NRP. 2412201011

Tanggal Ujian : 15 Juli 2014

Periode Wisuda : September 2014

Disetujui oleh :

1. **Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T.**

NIP : 19771127 200212 1 002

(Pembimbing)

2. **Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.**

NIP: 19620822 198803 1 001

(Penguji)

3. **Dr. -Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.**

NIP : 19740903 199802 2 001

(Penguji)

4. **Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.**

NIP : 19600901 198701 1 001

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

19640405 199002 1 001

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, syukur penulis panjatkan kehadiran Alloh SWT., atas segala kenikmatan yang telah dilimpahkan kepada kami berupa nikmat Iman, Islam, kesehatan dan nikmat-nikmat yang tidak akan mampu untuk dihitung, khususnya atas telah selesainya masa studi S2 dan tesis penelitian kami yang berjudul **“Studi Numerik Pemanfaatan Magnet Permanen Untuk Penggerak Motor”** ini dapat diselesaikan pada waktunya. Sholawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW., yang telah menuntun umatnya untuk menuju jalan yang diridhoi Allah, dan juga sebagai sumber inspirasi tanpa batas bagi penulis. Terima kasih yang sebesar-besarnya kepada istriku tercinta Taat Endah Warni yang telah menemani dengan setia setiap perjalanan hidup saya, kepada orang tua, keluarga dan saudara-saudara atas doa, semangat dan bantuannya.

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) dalam bidang keahlian Rekayasa Instrumentasi Industri pada program studi Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam penyusunan tesis ini, penulis tidak terlepas dari bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak, untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya, kepada:

1. Bapak Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama atas segala ilmu yang tercurah, bimbingan dan arahannya sehingga tesis ini dapat selesai pada waktunya,
2. Bapak Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc., sebagai ketua penguji yang telah banyak memberikan pembelajaran sangat berharga kepada penulis melalui pertanyaan-pertanyaan kritis beliau sehingga penulis bisa memahami materi tesis lebih mendalam.
3. Ibu Dr. -Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T. sebagai dosen wali dan penguji penulis dan Bapak Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc. selaku penguji yang telah memberikan saran yang turut menambah pemahaman penulis.

4. Ibu Dr. Ir. Aulia Siti Aisyah, MT. selaku Ketua Program Pascasarjana Teknik Fisika atas dukungannya kepada penulis melalui kebijakan-kebijakan beliau.
5. Pak Anang dan mbak Zeti selaku biro administrasi program pasca sarjana teknik fisika yang telah membantu penulis dalam bidang administrasi sehingga memperlancar penulis dalam menyelesaikan studi magister dan proses tesis.
6. Seluruh dosen dan karyawan program Pascasarjana Teknik Fisika atas segala ilmu, bimbingan dan bantuannya.
7. Ibu Rida Hesti dan Pertamina Foundation yang telah mendukung penelitian penulis dengan memberikan pendanaan.
8. Mbak Ami yang telah menjadi teman diskusi sekaligus mentor penulis dalam memahami materi tesis. Dan semua teman-teman seperjuangan yang selalu bersama-sama dalam belajar, bercanda selalu memberikan semangat dan bantuannya dalam proses pengerjaan tesis yang penuh dengan liku-liku.
9. Bapak Eko, dan Mas Rendra yang turut membantu proses pengerjaan tesis.
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, yang telah membantu selesainya tesis ini.

Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses studi untuk meraih gelar master dan penulisan tesis ini. Harapan penulis, semoga tesis ini bisa memberikan kemanfaatan pada perkembangan teknologi energi terbarukan meskipun hanya sedikit. Penulis menyadari bahwa tulisan ini masih jauh dari sempurna untuk itu masukan dari pembaca senantiasa ditunggu untuk perbaikan di kemudian hari.

Surabaya, Agustus 2014

Senanjung Prayoga

DAFTAR ISI

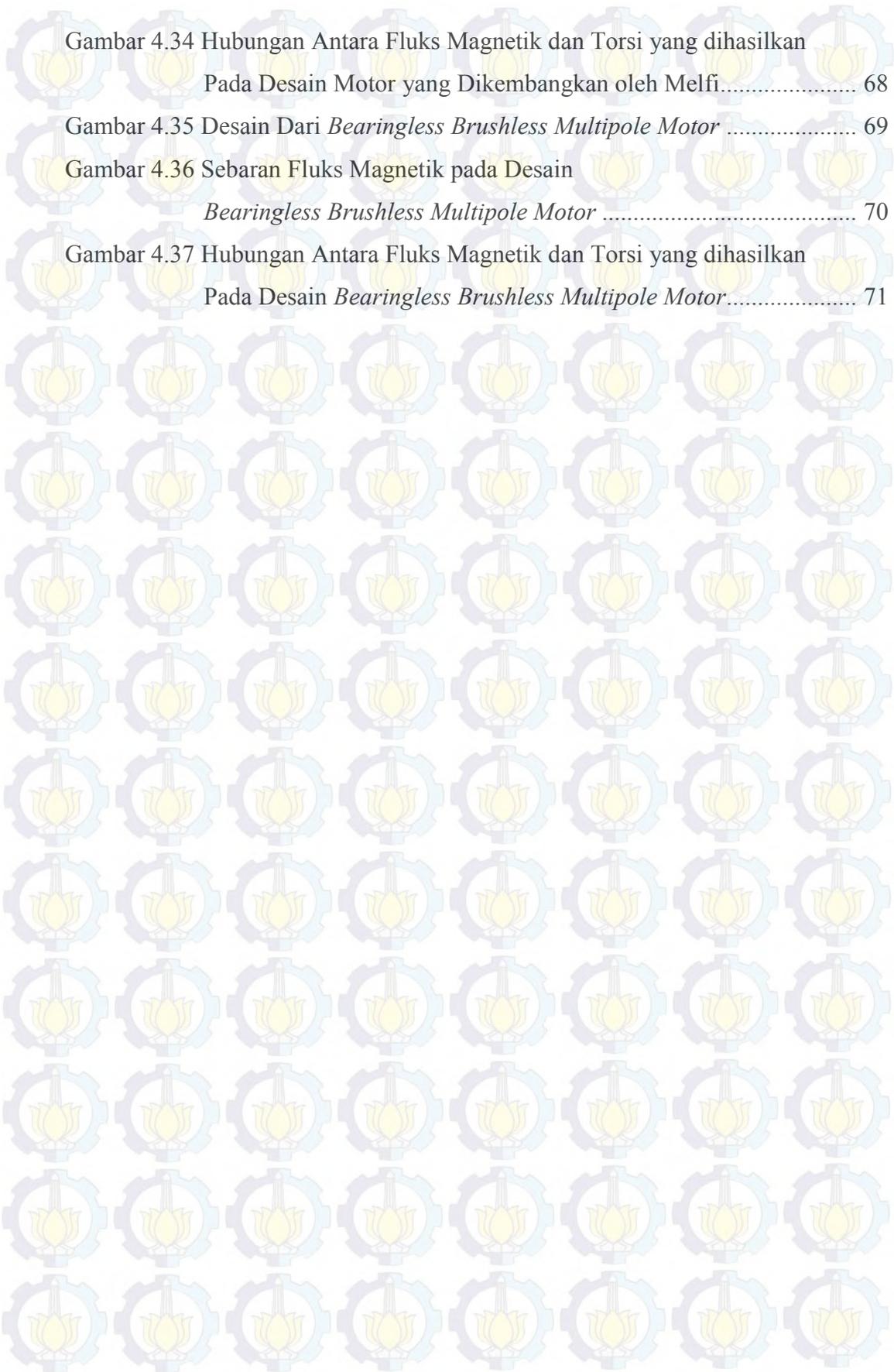
Halaman Judul	i
Halaman Pengesahan	iii
Abstrak	vii
Abstrack	viii
Kata Pengantar	ix
Daftar Isi	xi
Daftar Gambar	xiii
Daftar Tabel	xvii
Bab I Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
Bab II Kajian Pustaka dan Dasar Teori	5
2.1 Perkembangan Teknologi Motor Bertenaga Magnet Permanen	5
2.2 Karakteristik Material Magnet	11
2.2.1 Medan Magnet.....	11
2.2.2 Momen Magnetik	11
2.2.2 Induksi Magnetik.....	11
2.2.3 Kuat Medan Magnetik.....	12
2.2.4 Intensitas Kemagnetan	12
2.3 Hubungan antara Kerapatan Fluks Magnetik dan Intensitas Magnet.....	12
2.4 “Kekalnya” Energi Magnetik karena Energi Magnetostatik.....	14
2.5 Perkembangan Material Magnet Permanen	14
2.6 Tinjauan Desain Motor Magnet dengan FEMM Komputasi	16

Bab III Metode Penelitian.....	19
3.1 Formulasi Medan Magnetik.....	19
3.2 Perumusan Metode Finite Element.....	21
3.3 Pendesainan Dimensi Motor Magnet Permanen.....	25
3.4 Metode Maxwell Stress Tensor untuk Menghitung Gaya dan Torsi pada Motor	29
3.5 Simulasi Berbagai Variasi	30
3.6 Penggabungan Parameter yang Menghasilkan Torsi Maksimal.....	32
3.7 Variasi Mesh Untuk Menghasilkan Hasil / Nilai yang Konvergen	32
Bab IV Hasil dan Pembahasan.....	35
4.1 Hasil Simulasi Berbagai Variasi	35
4.1.1 Variasi Jumlah Rotor yang Digunakan.....	35
4.1.2 Variasi Jumlah Stator yang Digunakan	36
4.1.3 Variasi sudut kemiringan (α) stator dan rotor.....	37
4.1.4 Variasi Jarak Airgap antara Stator dan Rotor.....	39
4.1.5 Variasi Susunan Magnet Halbach Array	40
4.1.6 Variasi Kekuatan Magnet.....	41
4.2 Desain Akhir yang Dihasilkan.....	42
4.3 Hasil dari Variasi Mesh	43
4.4 Analisa Pemberian Magnetic Shielding menggunakan Mumetal.....	45
4.5 Analisis Gaya yang Bekerja Pada Motor.....	46
4.6 Hubungan Antara Fluks Magnetic dan Torsi yang Dihasilkan.....	61
4.7 Simulasi Pada Desain Motor Listrik	62
BAB V Kesimpulan dan Saran.....	73
5.1 Kesimpulan.....	73
5.2 Saran	73
Daftar Pustaka	75

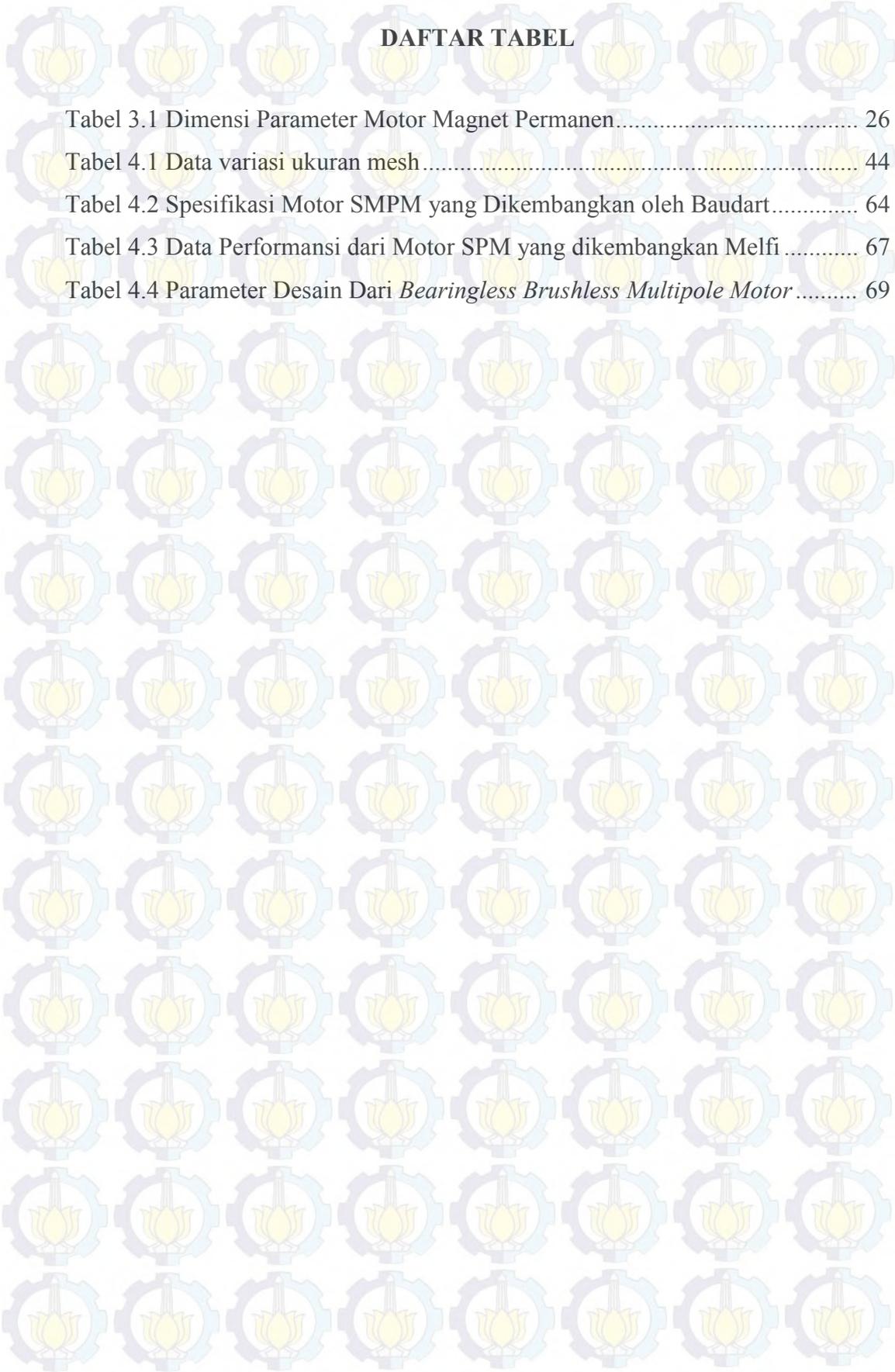
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Mechanical Opener for V-Gate Magnet Motor</i>	5
Gambar 2.2 <i>Mecsdgp Magnet Motor</i>	6
Gambar 2.3 <i>V-Track Rotary Magnet Motor</i>	6
Gambar 2.4 <i>Perendev Motor</i>	7
Gambar 2.5 Hasil Eksperimen Desain Magnet Motor Magnet Permanen Menggunakan Magnet Barium Ferite.....	8
Gambar 2.6 Hasil Eksperimen Motor Magnet Permanen Berdasarkan Paten dari Perendev Motor	8
Gambar 2.7 Hasil Eksprimen Pembuatan Motor Oleh Derito Nanda.....	9
Gambar 2.8 Desain motor magnet permanen dengan <i>surface mounted</i> <i>magnet</i>	10
Gambar 2.9 Desain dari <i>surface permanent magnet motor</i>	10
Gambar 2.10 <i>bearingless brushless multipole PM motor</i>	10
Gambar 2.11 Kurva Induksi Normal.....	13
Gambar 2.12 Kurva Histeresis	13
Gambar 2.13 (a) Produksi Energi masing-masing material magnet (b) Densitas Flux Residu masing-masing material magnet	15
Gambar 2.14 Kurva yang menunjukkan perbandingan sifat magnet dari beberapa jenis magnet permanen	16
Gambar 3.1 Elemen Segitiga.....	22
Gambar 3.2 Desain 2D Motor magnet permanen yang akan dianalisa.....	25
Gambar 3.3 Dimensi Parameter Motor Magnet Permanen.....	25
Gambar 4.1 Variasi jumlah rotor 8 buah.....	35
Gambar 4.2 Variasi jumlah rotor dan torsi yang dihasilkan	35
Gambar 4.3 Variasi jumlah stator 30 buah.....	36
Gambar 4.4 Variasi jumlah stator dan torsi yang dihasilkan	37
Gambar 4.5 Sebaran fluks magnetik pada variasi sudut 42°	38
Gambar 4.6 Variasi sudut kemiringan (α) stator dan rotor, serta torsi yang dihasilkan.....	38
Gambar 4.7 Variasi jarak airgap 1 mm	39

Gambar 4.8 Variasi jarak antara (airgap) stator dan rotor, serta torsi yang dihasilkan	40
Gambar 4.9 Variasi arah magnet halfbach array	41
Gambar 4.10 Variasi Kekuatan Magnet dan Torsi yang Dihasilkan.....	42
Gambar 4.11 Desain hasil penggabungan parameter yang optimal	43
Gambar 4.12 Hasil simulasi desain hasil penggabungan parameter yang optimal	43
Gambar 4.13 Meshing dengan ukuran mesh default	44
Gambar 4.14 Meshing dengan ukuran mesh 0,4	45
Gambar 4.15 Variasi dengan Menggunakan Pembatas Magnetik Mumetal	45
Gambar 4.16 Arus mikroskopis yang terjadi pada atom	46
Gambar 4.17 Kawat berarus listrik.....	47
Gambar 4.18. Susunan moment dipole yang terjadi pada atom	47
Gambar 4.19 Skema interaksi magnet silinder.....	49
Gambar 4.20 Penampakan gaya berdasarkan fluks magnetik hasil dari simulasi FEMM	50
Gambar 4.21 Penguraian arah vektor gaya yang bekerja pada motor	51
Gambar 4.22 Penguraian Gaya Antara Magnet A dan Magnet O	51
Gambar 4.23 Penguraian Gaya Antara Magnet B dan Magnet O	53
Gambar 4.24 Penguraian Gaya Antara Magnet C dan Magnet O	54
Gambar 4.25 Penguraian Gaya Antara Magnet D dan Magnet O	56
Gambar 4.26 Penguraian Gaya Antara Magnet E dan Magnet O	57
Gambar 4.27 Penguraian Gaya Antara Magnet F dan Magnet O.....	59
Gambar 4.28 Grafik hubungan antara B_{ri} dan $B_{\theta i}$ dengan torsi yang Dihasilkan.....	62
Gambar 4.29 Desain Motor SMPM yang dikembangkan oleh Baudart.....	64
Gambar 4.30 Sebaran Fluks Magnetik pada Desain Motor SMPM	65
Gambar 4.31 Hubungan Antara Fluks Magnetik dan Torsi yang dihasilkan Pada Motor SMPM.....	66
Gambar 4.32 Desain Dari <i>Surface Permanent Magnet Motor</i>	67
Gambar 4.33 Sebaran Fluks Magnetik pada Desain Motor yang Dikembangkan Melfi.....	68



Gambar 4.34 Hubungan Antara Fluks Magnetik dan Torsi yang dihasilkan Pada Desain Motor yang Dikembangkan oleh Melfi.....	68
Gambar 4.35 Desain Dari <i>Bearingless Brushless Multipole Motor</i>	69
Gambar 4.36 Sebaran Fluks Magnetik pada Desain <i>Bearingless Brushless Multipole Motor</i>	70
Gambar 4.37 Hubungan Antara Fluks Magnetik dan Torsi yang dihasilkan Pada Desain <i>Bearingless Brushless Multipole Motor</i>	71



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Dimensi Parameter Motor Magnet Permanen.....	26
Tabel 4.1 Data variasi ukuran mesh.....	44
Tabel 4.2 Spesifikasi Motor SMPM yang Dikembangkan oleh Baudart.....	64
Tabel 4.3 Data Performansi dari Motor SPM yang dikembangkan Melfi.....	67
Tabel 4.4 Parameter Desain Dari <i>Bearingless Brushless Multipole Motor</i>	69

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Perkembangan motor saat ini sangat pesat, dan penggunaan motor masuk ke hampir semua bidang, yaitu industri, transportasi, pertanian, komersial dan bahkan rumah tangga. Penggunaan motor listrik menghabiskan energi listrik mencapai dua kali lipat dari pencahayaan, yaitu mencapai 46% dari konsumsi listrik global. Bahkan pada bidang industri, penggunaan motor listrik mendominasi konsumsi energi listrik. Dalam aplikasi industri, motor listrik yang digunakan untuk menghidupkan pompa, kipas, kompresor, konveyor, dan penggerak mesin lainnya. Motor listrik dalam bidang industri menghabiskan energi listrik rata-rata mencapai 64% dari total konsumsi listrik (Waide, 2011).

Penggunaan motor listrik yang besar tersebut mendorong banyak peneliti untuk menciptakan motor yang lebih hemat energi listrik. Saat ini telah dilakukan penelitian untuk mengetahui motor mana yang lebih efisien untuk digunakan pada bidang industri. Motor magnet permanen ternyata memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan motor induksi. Efisiensi motor induksi pada saat beban penuh mencapai 93,6%, sedangkan motor magnet permanen dapat mencapai 96,2% (Melfi, 2008).

Perkembangan motor listrik yang menggunakan magnet permanen mengalami kemajuan yang signifikan. Dahulu, material permanen magnet yang digunakan adalah magnet alnico atau keramik. Keduanya memiliki beberapa kelemahan, sehingga saat ini material magnet yang bagus untuk digunakan adalah magnet neodmium. Magnet neodmium merupakan magnet permanen yang memiliki daya magnet paling besar dibandingkan dengan yang lain, sehingga motor yang dihasilkan pun juga bisa memiliki efisiensi yang tinggi (Melfi, 2008).

Pengembangan motor magnet permanen tidak hanya sebatas pada materialnya saja, namun pada model/ jenisnya juga. Saat ini sudah banyak model motor magnet permanen yang telah dikembangkan, baik yang sudah dikomersialkan maupun masih dalam tahap penelitian, diantaranya yaitu *surface permanen magnet (PM) motor*. Motor ini memiliki kekuatan 75,4 Horse power

(Hp) dengan full load speed 1800 rpm dan full load torsinya adalah 298 Nm. Motor ini menggunakan stator berjumlah 26 slot yang terdiri dari kumparan, sedangkan rotornya terbuat dari magnet permanen yang berjumlah 4 buah (Melfi, 2008). Ada lagi jenis bearingless brushless multipole PM motor yang memiliki torsi sebesar 10,74 Nm dengan 5000 rpm. Motor ini menggunakan 26 stator yang terbuat dari kumparan dan 24 stator yang terbuat dari magnet permanen. Diameter rotornya adalah sebesar 200 mm, sedangkan diameter statornya adalah 270 mm (Zurcher, 2012).

Pengembangan lain dari motor magnet permanen adalah perendev motor yang dikembangkan oleh Mike Brady. Mike Brady telah mematenkan penemuannya ini dengan nomer paten WO 2006/045333 AI. Namun, motor perendev ini berbeda dengan motor magnet permanen yang lainnya, yaitu motor ini tidak menggunakan tenaga listrik untuk membuatnya bisa berputar. Motor perendev ini menggunakan magnet permanen pada stator dan rotornya. Prinsip kerja motor magnet permanen ini adalah memanfaatkan sifat magnet yang akan saling tolak menolak apabila didekatkan dengan kutub yang sejenis. Berdasarkan prinsip tersebut, magnet disusun sedemikian rupa sehingga membentuk rotor dan stator pada motor, dan pada akhirnya motor magnet permanen dapat berputar tanpa menggunakan bahan bakar ataupun energi lainnya, cukup dengan mengandalkan kekuatan magnet (Brady, 2006).

Penemuan dari Mike Brady ini telah menginspirasi banyak peneliti untuk ikut berkontribusi dalam pengembangan motor bertenaga magnet permanen. Hal ini dikarenakan, jika motor ini benar-benar berhasil dibangun dan menghasilkan perputaran secara kontinyu seperti yang diharapkan, maka akan sangat berguna dalam banyak hal, khususnya pada bidang energi terbarukan. Di Indonesia telah ada yang meneliti dan mengembangkan motor perendev, yaitu Ignatius Bagus Subiantoro dari Sekolah Tinggi Teknik Angkatan Laut KOBANGDIKAL Surabaya dan Derito Nanda dari jurusan permesinan kapal Institut Teknologi Surabaya.

Ignatius Bagus Subiantoro dan Derito Nanda mengembangkan motornya berdasarkan dokumen paten dari Mike Brady secara eksperimen. Ignatius Bagus mengembangkan enam model motor. Namun keenam-enamnya tidak dapat menghasilkan perputaran yang kontinyu. Selain dia mengembangkan motornya

sendiri, Ignatius juga mereplikasi rancangan dari motor perendev, namun kenyataannya motor hasil replikasinya tersebut juga tidak bisa berputar dengan kontinyu (Subiantoro, 2011). Sedangkan Derito Nanda mengembangkan dua model dengan beberapa variasi sudut kemiringan stator dan rotornya. Dari hasil eksperimen yang telah dilakukannya, dia juga belum berhasil menghasilkan perputaran motor seperti yang diharapkan. Derito menyebutkan bahwa kegagalan pada eksperimennya disebabkan oleh tidak presisinya motor yang diciptakan, penentuan sudut yang kurang tepat, peletakan magnet yang kurang presisi dengan slotnya.

Kegagalan kedua peneliti tersebut dalam mereplikasi dan mengembangkan motor bertenaga magnet permanen berdasarkan paten dari Mike Brady mendorong penulis untuk meneliti lebih lanjut melalui studi numerik terhadap fenomena gaya-gaya apasaja yang bekerja pada motor yang telah didesain. Diharapkan dengan dilakukan analisis secara studi numerik dapat menjelaskan faktor yang menyebabkan kegagalan dan kemungkinan pemanfaatan magnet permanen untuk penggerak tunggal (tanpa menggunakan energi listrik) pada motor.

Pada penelitian ini akan dilakukan analisa sebaran fluks magnetik yang bekerja pada motor magnet tersebut secara numerik dengan menggunakan metode finite element. Metode ini dipilih karena merupakan metode numerik yang terbukti efisien dalam menyelesaikan permasalahan medan magnetik (Xia li, 2010).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka dirumuskan beberapa pokok permasalahan, yaitu; Bagaimana potensi pemanfaatan magnet permanen untuk penggerak motor?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah: Dapat menjelaskan potensi pemanfaatan magnet permanen untuk penggerak motor.

1.4 Batasan Penelitian

Untuk menghindari melebarnya fokus penelitian, ditentukan suatu batasan permasalahan. Adapun batasan permasalahan tersebut antara lain;

- a. Analisa motor magnet permanen yang dibangun ditinjau dari segi performansi, yaitu meliputi:
 - 1) Sebaran fluks magnetik yang bekerja pada motor magnet permanen.
 - 2) Besarnya kekuatan torsi (Nm) yang dihasilkan oleh motor magnet
- b. Pemodelan sistem motor dalam keadaan statis, artinya diasumsikan keadaan motor dalam keadaan diam untuk menganalisa sebaran fluks magnetnya.
- c. Desain motor yang akan disimulasikan dilakukan pada 2 dimensi karena desainnya bersifat simetris.
- d. Simulasi menggunakan software FEMM 4.2.

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan melakukan analisa berdasarkan studi numerik dengan menggunakan simulasi komputasi akan didapatkan penjelasan mengenai fenomena gaya-gaya yang terjadi pada motor. Hasil-hasil simulasi tersebut bisa digunakan untuk melakukan analisa kemungkinan pemanfaatan magnet permanen sebagai penggerak tunggal motor (tanpa menggunakan listrik).

BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Perkembangan Teknologi Motor Bertenaga Magnet Permanen

Telah banyak penemu-penemu dari luar negeri yang telah memulai mengembangkan teknologi ini, dan mereka membuka teknologinya itu untuk dikembangkan orang lain (open source). Mereka antara lain yaitu:

1. *Mechanical Opener for V-Gate Magnet Motor*. Teknologi ini diajukan oleh Robert H. Calloway. V-gate magnet motor bisa berotasi dengan menggunakan metode mekanik untuk menggerakkan magnet stator untuk mendekat dan menjauh dari magnet rotor yang disusun sedemikian rupa sehingga membentuk huruf V. Rotasi yang dihasilkan oleh alat ini relative lambat, yaitu sekitar 100 rpm. Torsi yang dihasilkan juga kecil, karena kekuatan torsi yang banyak yang terpakai untuk menggerakkan stator.



Gambar 2.1 *Mechanical Opener for V-Gate Magnet Motor*

Sumber: http://peswiki.com/index.php/Directory:_Mechanical_Opener_for_V-Gate_Magnet_Motor

2. *Mecsdgp Magnet Motor*. James P. Dunn membuat rotor kecil dengan magnet persegi di sekitar perimeter rotor. Rotornya akan mulai berputar dan kemudian semakin cepat (hingga mencapai 6000 rpm) ketika "bar reaktor" didekatkan ke rotornya.
3. *V-Track Rotary Magnet Motor*. George Soukup Nachbauer, penemu asal Jerman mengembangkan motor magnet permanen dengan tipe hampir sama *Mechanical Opener for V-Gate Magnet Motor*, namun statornya dirancang tidak bergerak/ statis dan menggunakan banyak magnet batang

sebagai statornya. Motor dengan rancangan ini mampu berputar secara terus-menerus tanpa memerlukan energi listrik maupun yang lain.



Gambar 2.2 *Mecsdgp Magnet Motor*

Sumber: http://peswiki.com/index.php/OS:Mecsdgp_Magnet_Motor



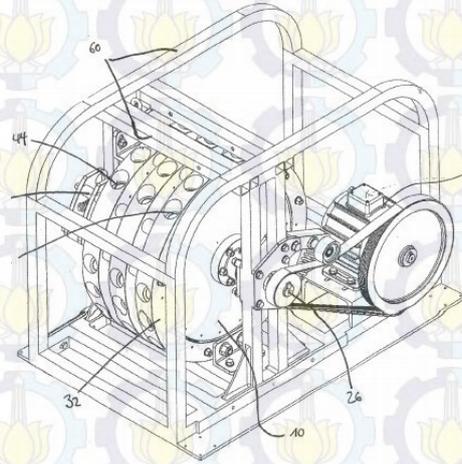
Gambar 2.3 *V-Track Rotary Magnet Motor*

Sumber: http://peswiki.com/index.php/OS:George_Soukup_V-Track_Rotary_Magnet_Motor

4. *Perendev Motor*. Teknologi ini mempunyai geometri yang paling kompleks dibandingkan dengan yang lain. Penemunya, Michael J. Brady bahkan telah membuat motor magnet ini dengan dimensi yang cukup besar dan desain ini juga menghasilkan gaya torsi yang paling besar jika dibandingkan dengan yang lainnya. Ukuran dan dimensi dari perendev motor dilampirkan pada lampiran 1, 2 dan 3 (Allan, 2013).

Motor bertenaga magnet permanen memiliki beberapa model yang berbeda, karena masing-masing penemu memiliki konsep sendiri-sendiri. Namun dari model-model yang berbeda tersebut, mereka masih menggunakan prinsip kerja yang sama, yaitu memanfaatkan gaya tolak antar kutub magnet sejenis yang didekatkan. Pada penelitian ini, penentuan desain motor ini didasarkan pada motor jenis perendev yang dikembangkan oleh Brady. Pemilihan desain motor perendev sebagai acuan pada penelitian ini dikarenakan banyak penelitian lain tentang

motor magnet permanen yang bertenaga listrik, memiliki bentuk desain seperti motor perendev, dan dengan desain seperti itu bisa menghasilkan torsi yang maksimal.



Gambar 2.4 *Perendev Motor*

Sumber: Dokumen Paten dari Mike Brady. (2006). No. Paten WO 2006/045333

Motor bertenaga magnet permanen ini juga telah menarik perhatian peneliti yang berasal dari Indonesia. Mereka mencoba mereplikasi motor-motor yang telah dikembangkan dan bahkan dipatenkan di luar negeri. Peneliti tersebut adalah Ignatius Bagus Subiantoro dari Sekolah Tinggi Teknik Angkatan Laut KOBANGDIKAL Surabaya dan Derito Nanda dari jurusan permesinan kapal Institut Teknologi Surabaya.

Ignatius telah membuat beberapa motor bertenaga magnet permanen dengan model yang berbeda-beda. Tujuan penelitiannya adalah untuk mengetahui desain mana yang bisa menghasilkan putaran. Namun berdasarkan hasil eksperimen, meskipun sudah dicoba untuk mengikuti seluruh kaidah Perendev Motor dengan sebaik-baiknya, pada kenyataannya motor bertenaga magnetnya tidak bisa menghasilkan putaran seperti yang diinginkan. Gambar 2.5 dan gambar 2.6 merupakan hasil eksperimen dari desain motor yang telah dirancang Ignatius. Ignatius menyatakan bahwa dari hasil simulasi distribusi fluks menggunakan software FEMM terdapat daerah kebocoran gaya tarik antar magnet rotor dan stator, yang pada akhirnya akan melawan gaya tolak menolak yang timbul sehingga akan mengurangi besar gaya tolak. Hal ini yang mungkin menyebabkan mengapa prototype yang dirancang tidak menghasilkan putaran (Subiantoro, 2011).



Gambar 2.5 Hasil Eksperimen Desain Magnet Motor Magnet Permanen Menggunakan Magnet Barium Ferite

Sumber: Dokumen Skripsi Ignatius Bagus Subiantoro



Gambar 2.6 Hasil Eksperimen Motor Magnet Permanen Berdasarkan Paten dari Perendev Motor

Sumber: Dokumen Skripsi Ignatius Bagus Subiantoro

Derito Nanda juga telah melakukan eksperimen pembuatan motor bertenaga magnet permanen berdasarkan pada patent dari perendev motor. Pada penelitiannya, Derito membuat motor dengan variasi sudut kemiringan stator dan rotornya. Derito membuat dua motor dengan masing-masing memiliki tiga variasi sebagai berikut:

1. Sudut magnet pada stator sebesar 45° sedangkan sudut magnet pada rotor sebesar 30°
2. Sudut magnet pada stator sebesar 30° sedangkan sudut magnet pada rotor sebesar 45°
3. Sudut magnet pada stator sebesar 25° sedangkan sudut magnet pada rotor 0° .

Dari hasil eksperimen yang telah dilakukannya, motor yang telah didesain juga tidak bisa menghasilkan putaran seperti yang diharapkan. Derito menyebutkan bahwa kegagalan pada eksperimennya disebabkan oleh tidak presisinya motor yang diciptakan, penentuan sudut yang kurang tepat, peletakan magnet yang kurang presisi dengan slotnya. Gambar 2.7 ini merupakan hasil eksperimen dari desain motor bertenaga magnet permanen yang dilakukan oleh Derito (Nanda, 2010).

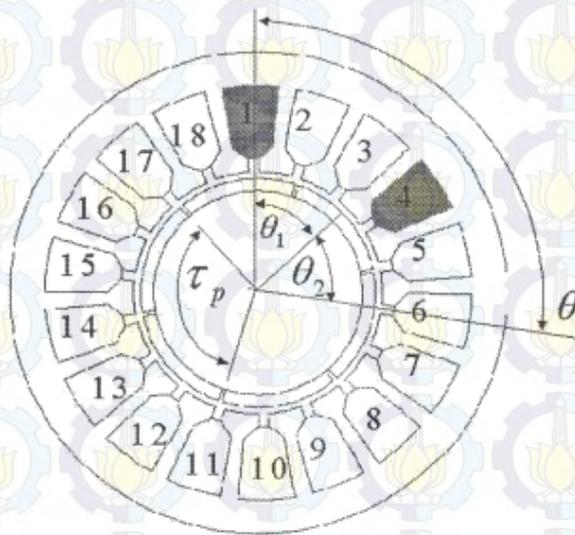


Gambar 2.7 Hasil Eksprimen Pembuatan Motor Oleh Derito Nanda

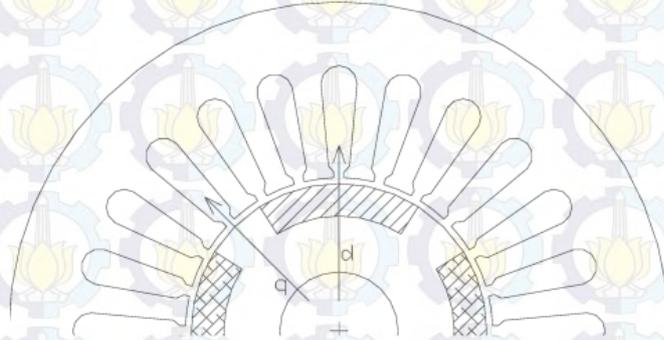
Sumber: Dokumen Skripsi Derito Nanda

Motor perendev memiliki geometri desain yang mirip dengan motor listrik yang sudah berkembang, khususnya pada jenis motor sinkron. Berikut ini adalah desain dari beberapa motor magnet permanen yang bertenaga listrik. Yang pertama adalah motor magnet permanen dengan *surface mounted magnet*. Motor ini memiliki rotor sebanyak 6 buah dan stator 18 buah. Torsi yang dihasilkan adalah sebesar 3 Nm. Dalam paper ini, tidak disebutkan ukuran dari dimensi motornya, namun Proca dalam papernya menyajikan suatu metode analisis pemodelan motor magnet permanen. Model ini hanya tergantung pada data geometrik dan bahan yang dipakai. Gambar 2.8 merupakan desain dari motor magnet permanen dengan *surface mounted magnet* (Proca, 2003).

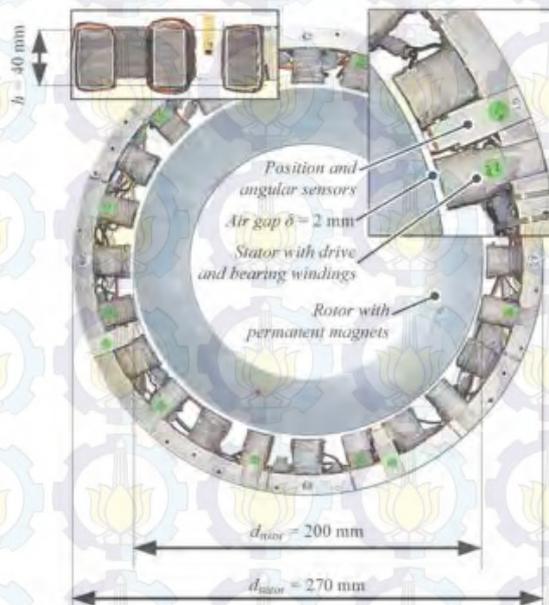
Selanjutnya ada *surface permanen magnet motor*. Motor ini memiliki kekuatan 75,4 Horse power (Hp) dengan full load speed 1800 rpm dan full load torsinya adalah 298 Nm. Motor ini menggunakan stator berjumlah 26 slot yang terdiri dari kumparan, sedangkan rotornya terbuat dari magnet permanen yang berjumlah 4 buah. Gambar 2.9 merupakan desain dari *surface permanen magnet motor* (Melfi, 2008).



Gambar 2.8 Desain motor magnet permanen dengan *surface mounted magnet*
 Sumber: Proca, Amuliu Bogdan. 2003. Jurnal IEEE



Gambar 2.9 Desain dari *surface permanent magnet motor*
 Sumber: Melfi, Michael and S.David Rogers. 2008. Jurnal IEEE



Gambar 2.10 *bearingless brushless multipole PM motor*
 Sumber: Zurcher. 2012. Jurnal IEEE.

Jenis motor listrik lain yang menggunakan magnet permanen sebagai rotornya adalah jenis *bearingless brushless multipole PM motor* yang memiliki torsi sebesar 10,74 Nm dengan 5000 rpm. Motor ini menggunakan 26 stator yang terbuat dari kumparan dan 24 stator yang terbuat dari magnet permanen. Diameter rotornya adalah sebesar 200 mm, sedangkan diameter statornya adalah 270 mm. Gambar 2.10 merupakan desain dari *bearingless brushless multipole PM motor* (Zurcher, 2012).

2.2 Karakteristik Material Magnet

2.2.1 Medan Magnet

Medan magnet adalah daerah disekitar magnet yang masih merasakan adanya gaya magnet. Arah medan magnetik di suatu titik didefinisikan sebagai arah yang ditunjukkan oleh kutub utara jarum kompas ketika ditempatkan pada titik tersebut.

2.2.2 Momen Magnetik

Bila terdapat dua buah kutub magnet yang berlawanan $+m$ dan $-m$ terpisah sejauh l , maka besarnya momen magnetiknya (\vec{M}) adalah:

$$\vec{M} = m l \hat{r} \quad (2.1)$$

dengan (\vec{M}) adalah sebuah vektor dalam arah vektor unit \hat{r} berarah dari kutub negatif ke kutub positif. Arah momen magnetik dari atom bahan non magnetik adalah acak sehingga momen magnetik resultannya menjadi nol. Sebaliknya di dalam bahan-bahan magnetik, arah momen magnetik atom-atom bahan itu teratur sehingga momen magnetik resultan tidak nol. Momen magnet mempunyai satuan dalam cgs adalah gauss.cm atau emu dan dalam SI mempunyai satuan $A.m^2$.

2.2.3 Induksi Magnetik

Suatu bahan magnetik yang diletakkan dalam medan luar \vec{H} akan menghasilkan medan tersendiri \vec{H}' yang meningkatkan nilai total medan magnetik bahan tersebut. Induksi magnetik yang didefinisikan sebagai medan total bahan ditulis sebagai:

$$\vec{H} = B + \vec{H}' \quad (2.2)$$

Hubungan medan sekunder $\vec{H}' = 4 \pi \vec{M}$, satuan B dalam cgs adalah gauss, sedangkan dalam geofisika eksplorasi dipakai satuan gamma (g) dan dalam SI adalah tesla (T) atau nanoTesla (nT).

2.2.4 Kuat Medan Magnetik

Kuat medan magnet (H) pada suatu titik yang berjarak r dari m_1 didefinisikan sebagai gaya persatuan kuat kutub magnet, dapat dituliskan sebagai:

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{m_2} = \frac{m_2}{\mu_0 r^2} \vec{r} \text{ (oersted)} \quad (2.3)$$

dengan r adalah jarak titik pengukuran dari m_1 . H mempunyai satuan A/m dalam SI sedangkan dalam cgs H mempunyai satuan oersted.

2.2.5 Intensitas Kemagnetan

Intensitas kemagnetan dapat didefinisikan sebagai tingkat kemampuan menyearahkan momen-momen magnetik dalam medan magnetik luar dapat juga dinyatakan sebagai momen magnetik persatuan volume. Satuan magnetisasi dalam cgs adalah gauss atau emu. Cm^{-3} dan dalam SI adalah Am^{-1} (Sears, 1999).

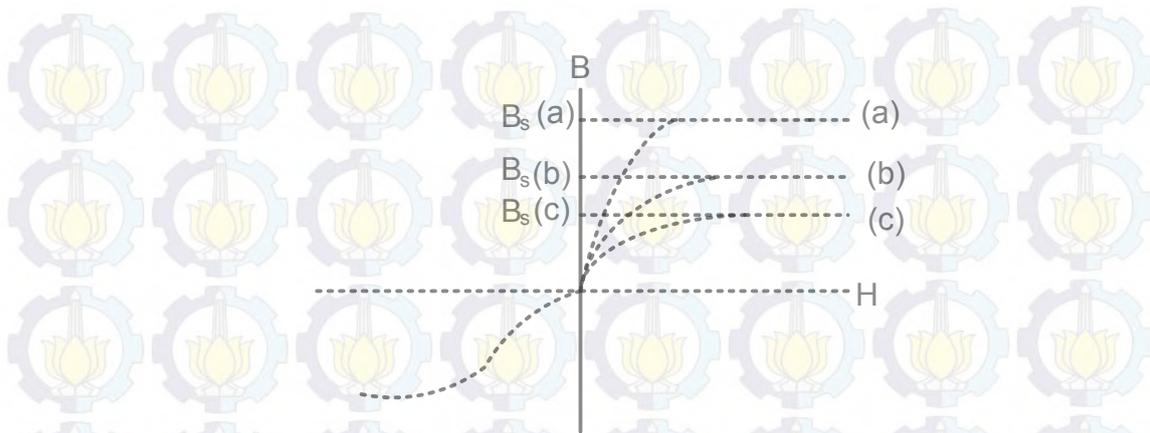
$$\vec{I} = \frac{\vec{M}}{V} = \frac{m l \hat{r}}{V} \quad (2.4)$$

Dimana I = Intensitas Kemagnetan dan V = Volume

2.3 Hubungan antara Kerapatan Fluks Magnetik dan Intensitas Magnet

Untuk bahan magnetik yaitu bahan feromagnetik, magnetisasi M tidaklah berbanding lurus dgn intensitas magnet H. Hal ini tampak bahwa harga suseptibilitas magnet X_m bergantung pada intensitas magnet H. Bentuk umum kurva induksi magnet B sebagai fungsi intensitas magnet H terlihat pada gambar 2.8.

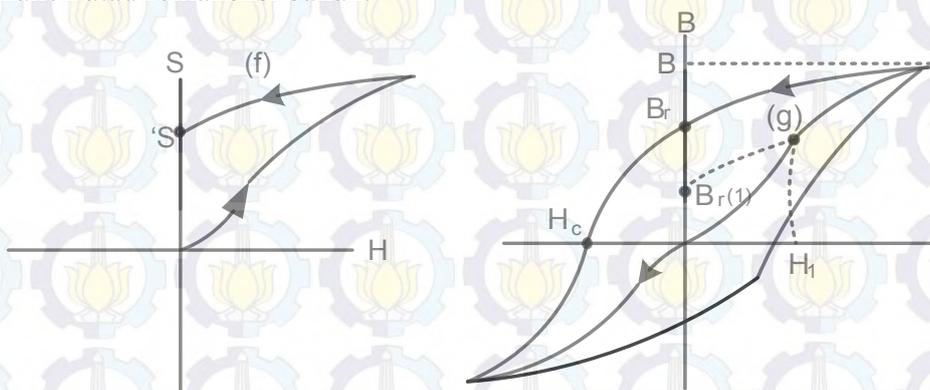
Kurva B(H) seperti ini disebut kurva induksi normal. Tampak kurva tidak berbentuk garis lurus, sehingga dikatakan hubungan B dan H tidak linier. Setelah harga intensitas magnetik tertentu, tampak harga induksi magnet tidak banyak berubah lagi. Hal ini disebut saturasi dan harga induksi magnet untuk keadaan saturasi disebut B_s atau induksi magnet saturasi.



Gambar 2.11 Kurva induksi normal

Bahan yg mencapai saturasi untuk harga H yang rendah disebut magnet lunak, ditunjukkan kurva (a). Bahan C adalah yang saturasinya terjadi pada harga yang tinggi disebut magnet keras.

Bila setelah mencapai saturasi, intensitas magnet H diperkecil, ternyata harga B tidak terletak pada kurva semula. Ini ditunjukkan pada gambar 2.9. Pada harga $H = 0$. Induksi magnet atau rapat fluks B mempunyai harga $B_r = 0$ yaitu remenensi, yg menyatakan kemagnetan remanen. Ini berlaku selama temperatur ada dibawah temperatur curie T_c , jadi bila arus pada toroida dimatikan ($I=0$) dalam bahan masih tersimpan fluks induksi harga B_r ini disebut induksi magnet remanen atau remanensi bahan.



Gambar 2.12 (a) bila harga H diperkecil harga B adalah pada kurva (f)

(b) kurva histeresis bila sampai pada $H=H_1$. H diperkecil harga B pada kurva (g) dan B_r mencapai harga B_r (i) pada $H=0$

Bila mencapai nol harga intensitas magnet H dibuat negatif (dengan membalik arah arus lilitan), kurva $B(H)$ akan memotong sumbu H pada harga H_c . Intensitas magnet H_c inilah yg diperlukan untuk membuat agar rapat fluks $B=0$

atau menghilangkan fluks dalam bahan. Intensitas magnet H_c disebut *koersivitas* bahan. Bila selanjutnya harga H positif hingga saturasi lagi, kurva $B(H)$ membentuk suatu lengkungan tertutup yg disebut *kurva histeresis*.

Bahan magnetik lunak dengan koersivitas H_c rendah dan B_r tinggi mempunyai permeabilitas maksimum yang tinggi. Bahan seperti ini terutama digunakan untuk memperbesar fluks. Dengan arus yang tidak terlalu besar, dapat dihasilkan fluks yg besar. Bahan seperti ini digunakan untuk elektro magnet, untuk keperluan generator listrik, motor listrik, transformator dan inductor (Sears, 1999).

2.4 “Kekalnya” Energi Magnetik karena Energi Magnetostatik

Energi magnetostatic adalah penyebab terbesar dari energi magnetik dengan rumusan:

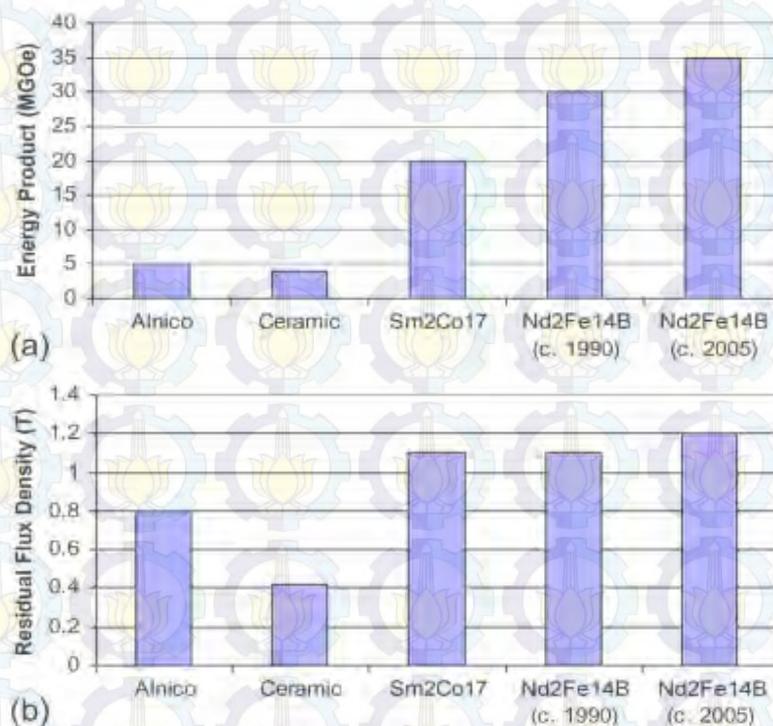
$$E_{magnetostatic} = \frac{-1}{2} \cdot \int_v H_d \cdot M dV = \frac{1}{2} \times \int (H \cdot B) dV \quad (2.5)$$

Energi ini berupa formasi domain yang menimbulkan terjadinya vektor medan magnet atau pengkutuban magnet (N-S). Persamaan ini menyatakan bahwa energi magnetostatik ditimbulkan oleh jumlahan vektor magnetisasi (M), vektor medan magnet (H), dan vektor kerapatan flux (B). Energi magnetostatik hanya ditentukan oleh konfigurasi momen dipole bahan ferromagnet tersebut. Oleh sebab itu, energi magnetik tidak akan berkurang walaupun magnet memberikan kerja, dengan ketentuan selama konfigurasi momen dipole magnet tidak berubah (Akbar, 2012).

2.5 Perkembangan Material Magnet Permanen

Permanen magnet (PM) telah digunakan secara luas dalam motor yang gerakannya terkontrol selama bertahun-tahun. Selama 35 tahun, bahan-bahan magnet telah melalui perubahan besar dalam segala hal dari struktur kimia hingga biayanya juga. Saat ini, ada bahan-bahan yang tersedia untuk memungkinkan PM motor menghasilkan kekuatan torsi yang lebih besar, namun dengan biaya lebih rendah dan efisiensi lebih tinggi.

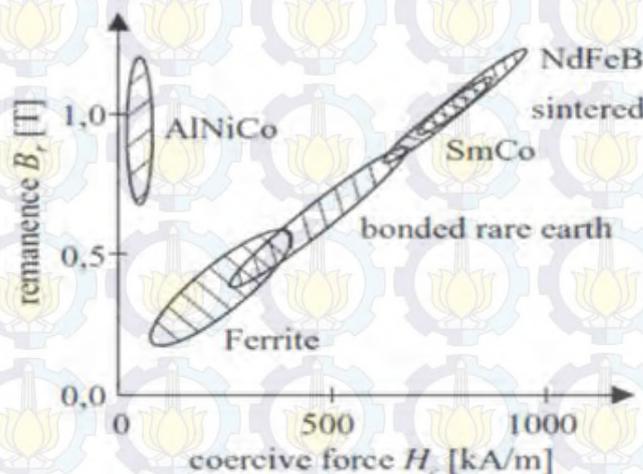
Selama tahun 1940-an hingga 1960-an, material magnet yang digunakan untuk motor adalah alnico atau keramik/ferit. Magnet keramik cukup ekonomis, tetapi densitas flux air gap yang dihasilkan tidak bisa menyamai motor induksi. Sementara itu, magnet alnico dapat mencapai densitas flux yang tinggi, akan tetapi magnet ini tidak tahan terhadap pengurangan daya magnet (demagnetisasi), sehingga magnet ini tidak banyak digunakan. Gambar 2.10(a-b) menunjukkan perbandingan properti magnet (Melfi, 2008) dan air gap motor flux density relatif yang biasanya dapat dicapai (MMPA Standard, 1990). Sedangkan pada gambar 2.11 menunjukkan perbandingan sifat magnet dari beberapa material.



Gambar 2.13 (a) Produksi Energi masing-masing material magnet
(b) Densitas Flux Residu masing-masing material magnet

Magnet neodmium iron boron ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) dikenalkan pada 1980-an. Pembuatannya memerlukan biaya lebih rendah dibandingkan dengan pembuatan magnet samarium kobalt. Bahan magnet $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ awalnya memiliki ketahanan suhu sangat terbatas untuk *demagnetization* yaitu 120°C . Selama 15 tahun kemudian, properti dari magnet neodmium telah ditingkatkan sehingga mampu mencapai 180°C . Selain itu, kemampuan fluks magnet telah meningkat. Magnet

ini juga telah dikembangkan sehingga dapat diinjeksi atau dikompresi ke dalam wadah cetakan, sehingga memungkinkan untuk mendesain rotor secara bebas (MMPA Standard, 1990).



Gambar 2.14 Kurva yang menunjukkan perbandingan sifat magnet dari beberapa jenis magnet permanen

2.6 Tinjauan Desain Motor Magnet dengan Komputasi FEMM

FEMM merupakan suatu program untuk menganalisa fenomena yang terjadi pada suatu bahan pada beberapa bidang, seperti masalah perpindahan panas, elektrostatik, arus listrik dan magnet. Software FEMM ini memudahkan perhitungan dengan menggunakan metode finite element untuk menyelesaikan permasalahan tersebut. Untuk memudahkan perancangan geometri benda yang akan dianalisa, FEMM menyediakan fitur import data DXF dari program CAD. Program ini mampu memberikan visualisasi dari fluk magnetik untuk mengetahui keadaan gaya medan magnet yang bekerja pada rotor dan stator pada motor magnet.

Untuk melakukan uji simulasi pada motor, maka perlu diketahui dahulu tentang keadaan bahan dan dimensi dari magnet yang digunakan. Hal lain yang perlu diketahui adalah dimensi dari motor, yaitu arah sudut magnetnya, jarak antar magnet, diameter motor, jumlah magnet. Untuk mengetahui sebaran fluks magnet, dibutuhkan parameter-parameter untuk inputan data yang dalam FEMM. Parameter tersebut adalah *recoil permeability*, *coersivity*, *electrical conductivity*, *source current density* dan penentuan kurva BH, apakah linear atau tidak.

Keadaan sebaran fluks magnet ini sangat membantu untuk mengetahui gaya magnet yang bekerja pada motor magnet. Dari gambaran keadaan inilah untuk selanjutnya dapat dilakukan analisa dari keadaan yang terjadi, sehingga dapat diketahui apakah penentuan susunan magnet sudah optimal atau belum (Sawitri, 2010).

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan jawaban atas pertanyaan, “Dapatkah magnet permanen digunakan untuk menggerakkan motor tanpa bantuan energi listrik seperti pada paten motor perendev?”. Pertanyaan tersebut muncul karena sudah ada peneliti yang meniru dan mengembangkan motor secara eksperimen berdasarkan paten tersebut, namun mereka masih belum berhasil mendapatkan putaran motor secara kontinyu.

Untuk menjawab pertanyaan tersebut, maka akan dilakukan penelitian dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1.1 Formulasi Medan Magnetik

Formulasi medan magnetik tersebut akan diselesaikan secara metode numerik finite element. Formulasi medan magnetik ini telah dilakukan oleh Sarma Mulukuta dalam jurnalnya yang berjudul “*Magnetostatic field computation by finite element formulation*” (Sarma, 1976). Formulasi yang telah dia lakukan sangat penting untuk penelitian-penelitian selanjutnya, termasuk dalam penelitian yang dilakukan ini. Formulasi inilah yang menjadi dasar dari analisis medan magnet dengan menggunakan metode elemen hingga.

Sarma merumuskan medan magnetik ini berawal dari hukum-hukum dasar yang mengatur medan magnetik dapat dinyatakan dengan persamaan Maxwell. Medan magnetostatik tidak menggunakan keempat persamaan Maxwell, melainkan dapat diwakili oleh dua hukum dari keempat hukum Maxwell yang diberikan di bawah ini (Sarma, 1976):

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (3.2)$$

dan hubungan antar unsurnya diberikan oleh:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.3)$$

Persamaan (3.3) disubstitusikan ke persamaan (3.2) sehingga:

$$\nabla \times \left(\frac{\vec{B}}{\mu} \right) - \vec{J} = 0 \quad (3.4)$$

dimana \bar{B} adalah induksi magnetik, \bar{H} intensitas medan magnet, J kerapatan arus, dan μ permeabilitas bahan feromagnetik. Karena efek histeresis diabaikan, maka karakteristik magnetisasi bernilai tunggal. Karena perbedaan curl, dari setiap fungsi vektor adalah nol, dapat dituliskan:

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A} \quad (3.5)$$

dimana \bar{A} adalah vektor potensial magnetik.

Kemudian, persamaan (3.5) disubstitusikan ke persamaan (3.4) sehingga:

$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times \bar{A}}{\mu} \right) - \bar{J} = 0 \quad (3.6)$$

Dimana μ merupakan permeabilitas yang merupakan kebalikan dari reluktivitas ν , sehinggadengan mengganti μ dengan ν akan didapatkan persamaan dasar potensi vector medan magnetostatik sebagai berikut:

$$\nabla \times \{ \nu (\nabla \times \bar{A}) \} - \bar{J} = 0 \quad (3.7)$$

Metode finite element adalah berdasarkan hukum konservasi energi. Hukum konservasi energi yang terjadi pada motor dapat diturunkan melalui persamaan Maxwell. Dari penurunan yang telah dilakukan oleh Gieras, didapatkan persamaan dibawah ini (Gieras, 2010):

$$\int_V \left[\int_0^B H \cdot dB \right] dV = \int_V \left[\int_0^A J \cdot dA \right] dV \quad (3.8)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa energi magnetik yang tersimpan di dalam magnet setara dengan energi listrik yang masuk.

Teknik Variasional digunakan untuk mendapatkan solusi untuk masalah medan magnet dengan meminimalkan fungsi energi F yang merupakan perbedaan antara energi yang tersimpan dan energi input dalam volume sistem. Dengan demikian, untuk sistem magnetiknya adalah:

$$F = \int_V \left[\int_0^B H \cdot dB \right] dV - \int_V \left[\int_0^A J \cdot dA \right] dV \quad (3.9)$$

Kemudian persamaan (3.9) tersebut dirubah karena ada penambahan fluks remanensi magnetik (B_r) untuk model bahan feromagnetik keras, sehingga persamaannya menjadi:

$$F = \int_V \left[\frac{B^2}{2\mu} - \frac{BB_r}{\mu} - J \cdot A + j\omega \frac{1}{2} \sigma A^2 \right] dV \quad (4.40)$$

Dimana ω adalah frekuensi angular dan σ konduktivitas elektrik (Gieras, 2010).

1.2 Perumusan Metode Finite Element

Setelah formulasi medan magnet pada suatu titik sudah didapatkan, maka langkah selanjutnya adalah perumusan persamaan finite element untuk mengetahui nilai medan magnetik pada setiap titik pada sebuah bidang tertentu. Telah banyak peneliti yang telah menurunkan perumusan persamaan finite element, salah satunya adalah Rainaldo (Rainaldo, 2007). Persamaan tersebut kemudian juga diwujudkan dalam software Finite Element Methode Magnetic (FEMM) yang dikembangkan oleh David Meeker, sehingga dalam penelitian ini menggunakan software tersebut sebagai alat bantu dalam menyelesaikan perhitungan numerik untuk membantu melakukan analisa (Meeker, 2013)

Metode finite element adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan matematika fisis. Metode ini sangat berguna untuk permasalahan yang melibatkan geometri, pembebanan dan propertis material yang kompleks dimana solusi analitis tidak dapat digunakan.

Teknik dari metode elemen hingga adalah membagi domain yang diberikan menjadi domain-domain sederhana yang dapat merepresentasikan domain aslinya, yang disebut element, sehingga memungkinkan secara sistematis membuat fungsi aproksimasi yang diperlukan dalam sebuah aproksimasi variasi atau pembobotan sisa dari solusi sebuah masalah melalui setiap elemen (Handayanu, 2006).

Fungsi aproksimasi biasanya adalah polinomial aljabar yang diturunkan menggunakan teori interpolasi. Fungsi aproksimasi bergantung tidak hanya pada geometri tetapi juga pada nomor dan lokasi titik, yang disebut node dan jumlah elemen untuk diinterpolasi. Begitu fungsi aproksimasi diturunkan, prosedur untuk mendapatkan hubungan aljabar antara koefisien yang tidak diketahui, yang memberikan harga solusi pada node elemen hingga, benar-benar sama dengan yang digunakan pada Rayleigh-Ritz dan metode pembobotan sisa.

Setelah fungsi aproksimasi diketahui, maka langkah selanjutnya adalah menyusun elemen, yang berdasarkan kekontinyuan solusi dan keseimbangan fluks dalam. Penyusunan elemen mewakili sebuah analog diskrit dari domain asli, dan sistem terasosiasi dari persamaan aljabar yang mewakili sebuah model matematik numerik dari problem yang dianalisa.

Bentuk elemen yang digunakan pada penelitian ini adalah segitiga, seperti ditunjukkan pada gambar 3.1 Lalu dipilih sebuah fungsi interpolasi linier sederhana sebagai berikut.

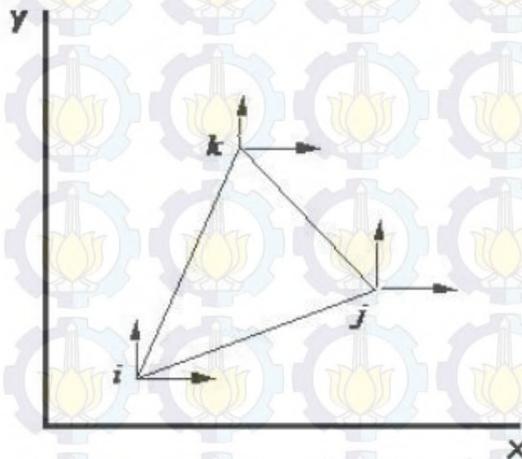
$$u^e(x, y) = c_1 + c_2x + c_3y \quad (3.41)$$

dimana $u(x,y)$ menunjukkan potensial di koordinat (x,y) di elemen. Jadi untuk menghitung potensial di setiap titik pada sebuah elemen segitiga adalah:

$$\begin{aligned} u_1 &\equiv u(x_1, y_1) = c_1 + c_2x + c_3y \\ u_2 &\equiv u(x_2, y_2) = c_1 + c_2x + c_3y \\ u_3 &\equiv u(x_3, y_3) = c_1 + c_2x + c_3y \end{aligned} \quad (3.42)$$

Bentuk diatas juga bisa ditulis dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{Bmatrix} \quad (3.43)$$



Gambar 3.1 Elemen segitiga

Dengan menginvers matriks koefisien pada persamaan (3.43), didapatkan:

$$[A]^{-1} = \frac{1}{2A_e} \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \end{bmatrix}, \quad 2A_e = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \quad (3.44)$$

Dan solusi c_i dalam u_i ,

$$\{c\} = [A]^{-1} \{u\}, \quad (3.45)$$

Didapatkan:

$$c_1 = \frac{1}{2A_e} (\alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2 + \alpha_3 u_3)$$

$$\begin{aligned} c_2 &= \frac{1}{2A_e} (\beta_1 u_1 + \beta_2 u_2 + \beta_3 u_3) \\ c_3 &= \frac{1}{2A_e} (\gamma_1 u_1 + \gamma_2 u_2 + \gamma_3 u_3) \end{aligned} \quad (3.46)$$

dimana A_e adalah luas segitiga dan α_i , β_i , dan γ_i adalah konstanta geometrik.

$$\begin{aligned} \alpha_i &= x_j y_k - x_k y_j \\ \beta_i &= y_j - y_k \\ \gamma_i &= -(x_j - x_k) \end{aligned} \quad (3.47)$$

($i \neq j \neq k$; dan i, j dan k berurutan dalam arah alami)

Dengan mensubstitusikan c_i dari persamaan (3.46) ke persamaan (3.41), didapatkan

$$\begin{aligned} U^e(x,y) &= \frac{1}{2A_e} [(\alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2 + \alpha_3 u_3) + (\beta_1 u_1 + \beta_2 u_2 + \beta_3 u_3)x + (\gamma_1 u_1 + \gamma_2 u_2 + \gamma_3 u_3)y] \\ &= \sum_{i=1}^3 u_i^e \Psi_i^e(x,y) \end{aligned} \quad (3.48)$$

dimana Ψ_i^e adalah fungsi interpolasi linier elemen segitiga,

$$\Psi_i^e = \frac{1}{2A_e} (\alpha_i^e + \beta_i^e x + \gamma_i^e y) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.49)$$

dan α_i , β_i , dan γ_i adalah konstanta yang didefinisikan di persamaan (3.47).

Ψ_i^e tidak berdimensi sehingga nilai Ψ_i^e di titik i adalah 1 dan di dua titik lainnya adalah 0 (nol). Dari metode variasi, elemen (i,j) dari matriks elemen 3×3 y_{ij} adalah sebagai berikut:

$$y_{ij} = k \iint_{\Omega} \left(\frac{\partial \Psi_i^e}{\partial x} \frac{\partial \Psi_j^e}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_i^e}{\partial y} \frac{\partial \Psi_j^e}{\partial y} \right) d\Omega \quad (3.50)$$

dimana Ω dan $d\Omega$ menunjukkan integral permukaan.

Matriks elemen untuk elemen segitiga adalah

$$y = \frac{k}{4A_e} \begin{bmatrix} \beta_1^2 + \gamma_1^2 & \beta_1 \beta_2 + \gamma_1 \gamma_2 & \beta_1 \beta_3 + \gamma_1 \gamma_3 \\ \beta_2 \beta_1 + \gamma_2 \gamma_1 & \beta_2^2 + \gamma_2^2 & \beta_2 \beta_3 + \gamma_2 \gamma_3 \\ \beta_3 \beta_1 + \gamma_3 \gamma_1 & \beta_3 \beta_2 + \gamma_3 \gamma_2 & \beta_3^2 + \gamma_3^2 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Lalu matriks elemen y disusun ke matriks utama Y ($N \times N$), N = jumlah node pada mesh elemen hingga, dengan cara berikut.

1. Merubah nilai i , dan j pada elemen segitiga menjadi sesuai dengan nomor titik tersebut di mesh elemen hingga.

2. Memasukkan nilai-nilai yang terdapat pada matriks y sesuai dengan nilai titik global ke lokasi matriks utama Y . Jika terdapat nilai pada lokasi tersebut sebelumnya, maka nilai tersebut dijumlahkan (Rainaldo, 2007).

Setelah matriks utama Y didapatkan, syarat-syarat batas yang diketahui bisa dimasukkan. Syarat-syarat batas tersebut adalah syarat batas *Dirichlet* dan syarat batas *Neumann*. Dalam masalah 2D garis fluks magnetik Badalah konstan. Dengan menggunakan batas kondisi $B = 0$, garis fluks dibatasi dengan mengikuti batas. Misalnya tepi luar plat stator, memiliki batas Dirichlet dari $B = 0$. Fluks yang akan melampaui plat stator diabaikan. Permeabilitas relatif yang tinggi dari yoke ferromagnetic akan memastikan bahwa sebagian besar fluks tetap dalam plat stator. Pembuatan kondisi batas ini adalah untuk membuat penyederhanaan. Sedangkan batas Neumann digunakan untuk motor yang berbentuk simetri dimana keberadaan fluks adalah orthogonal terhadap bidang. Hal ini terjadi hanya ketika motor dalam operasi tanpa beban (Gieras, 2010).

Sekarang persamaan sistem linier yang dapat dipecahkan secara unik sudah didapatkan.

$$Y^*B=c \quad (3.52)$$

dimana Y^* adalah matriks utama yang telah dimodifikasi dan c^* adalah vektor arus yang sudah dimodifikasi. Modifikasi Y^* dan c^* bertujuan untuk memenuhi syarat batas.

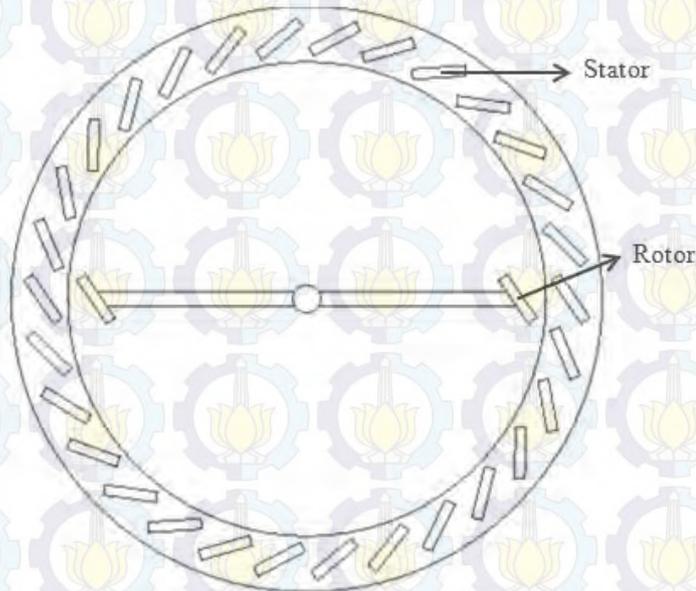
Dengan mengubah persamaan (3.52) menjadi

$$B=Y^{*-1}c \quad (3.53)$$

didapatkanlah medan magnet B sehingga nilai medan magnet di setiap titik bisa diperoleh (Rainaldo, 2007).

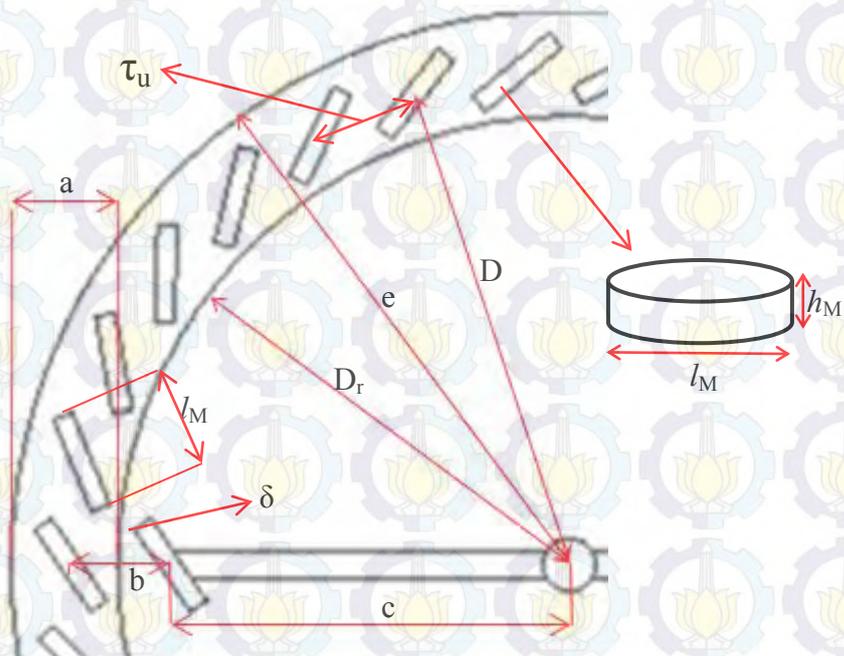
1.3 Pendesainan Dimensi Motor Magnet Permanen

Desain motor ini meliputi rotor dan stator. Untuk tahap awal, diberikan desain sementara seperti pada gambar 3.2.



Gambar 3.2. Desain 2D Motor Magnet Permanen Yang Akan Dianalisa

Ukuran dari dimensi parameter dari motor magnet permanen ini bisa dilihat pada gambar 3.3 dan nilainya tertera pada tabel 3.1.



Gambar 3.3 Dimensi Parameter Motor Magnet Permanen

Tabel 3.1 Dimensi Parameter Motor Magnet Permanen

Parameter	Simbol	Nilai (mm)
Lebar plat pada stator	a	16
Jarak pusat magnet antara stator dan rotor	b	13
Jarak titik pusat ke pusat magnet rotor	c	60
Jarak titik pusat ke plat luar	e	84
Jarak titik pusat ke plat dalam	Dr	68
Jarak titik pusat ke pusat magnet stator	D	75
Jarak air gap	δ	2
Tinggi magnet	h_M	3
Diameter magnet	l_M	15
Slot pitch	τ_u	16

Ada dua struktur rotor yang umum dari motor magnet permanen yaitu *surface permanent magnet rotor* dan *interior permanent magnet rotor*. Sedangkan motor yang diteliti pada thesis ini termasuk dalam *surface permanent magnet rotor*. Dimensi *surface permanent magnet* meliputi ketebalan magnet dan lebar magnet. Lebar magnet harus lebih kecil dari *pole pitch*. Biasanya lebar magnet adalah sekitar 0,8-0,85 kali *pole pitch*. Ketebalan magnet harus sekecil mungkin untuk menjaga jumlah bahan magnet permanen yang dibutuhkan. Namun, magnet harus cukup tebal untuk menghasilkan fluks magnetik pada airgap (Manninen, 2012). Pada penelitian ini, dimensi magnet yang digunakan adalah berbentuk silinder dengan diameter 15 mm dan tebal 3 mm.

Di dalam *surface permanent magnet motor*, ada dua dimensi mekanis yang dianggap sebagai parameter desain bebas, yaitu panjang airgap dan rasio panjang motor dengan diameter dalam stator. Persamaan untuk mendapatkan nilai-nilai khas dari parameter ini adalah sebagai berikut:

Rasio panjang stack armatur efektif dengan diameter stator adalah:

$$X = \frac{l'}{D} \quad (3.54)$$

di mana l' adalah stack armatur efektif dan D adalah diameter stator.

Untuk motor sinkron nilai X adalah:

$$X \approx \frac{\pi}{4p} \sqrt{p}, \quad p > 1 \quad (3.55)$$

$$X = 1 \dots 3, \quad p = 1 \quad (3.56)$$

Kekuatan mekanis dari motor P_{mec} adalah sebagai berikut:

$$P_{mec} = C_{mec} D^2 l' n = C_{mec} D^3 X n \quad (3.57)$$

Dimana n adalah kecepatan putar motor dan C_{mec} adalah konstanta mekanik motor.

Sehingga, diameter airgapnya bisa dihitung berdasarkan persamaan (3.57)

$$D = \sqrt[3]{\frac{P_{mec}}{C_{mec} X n}} \quad (3.58)$$

Dan panjang motor efektifnya adalah $l' = X D$ dari persamaan (3.54)

Dimensi stator dapat didefinisikan ketika konstanta motor sudah diketahui.

Dimensi stator meliputi panjang stator, diameter dalam dan luar stator dan jumlah slot pada stator dan jarak airgap.

Airgap nya dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\delta \geq \frac{1}{2} \alpha_{SM} \mu_0 \tau_p \frac{A}{\hat{B}_{\delta'}} = \gamma \tau_p \frac{A}{\hat{B}_{\delta'}} \quad (3.59)$$

di manay adalah koefisien dan A adalah rapat arus linear armature,

$\hat{B}_{\delta'}$ adalah densitas fluks puncak pada airgap dan τ_p merupakan *pole pitch*. Panjang airgap ditentukan oleh konstrain mekanik. Persamaannya yaitu:

$$\delta = \frac{0,2+0,01 P^{0,4}}{1000} \text{ (dalam m)}, \quad p = 1 \quad (3.60)$$

$$\delta = \frac{0,18+0,06 P^{0,4}}{1000} \text{ (dalam m)}, \quad p > 1 \quad (3.61)$$

Sehingga diameter inti rotor D_r dapat dihitung dari persamaan:

$$D = D_r + 2 \delta + 2h_m \quad (3.62)$$

Dimana δ adalah air gap dan h_m adalah ketebalan dari magnet permanen.

Jacek juga menyebutkan bahwa jarak air gap antara stator dan rotor disarankan untuk menjadi 0,3-1,0 mm untuk PM motor sinkron kecil. Semakin kecil air gap maka arus yang dibutuhkan saat starting awal adalah semakin rendah.

Di sisi lain, efek reaksi armatur dan torsi cogging semakin meningkat jika airgap mengecil (Gieras, 2010).

Panjang efektif motor berbeda dengan panjang motor sesungguhnya, karena dua alasan. Pertama, ada saluran ventilasi dalam mesin yang membuat panjang motor sebenarnya lebih besar dari panjang efektif motor. Pengaruh celah udara harus diperhitungkan juga.

Panjang efektif motor adalah:

$$l' \approx l_r + 2\delta - n_v b_{ve}, \quad (3.63)$$

Sedangkan panjang motor sebenarnya adalah:

$$l_r \approx l' - 2\delta + n_v b_{ve}, \quad (3.64)$$

di mana n_v adalah jumlah saluran ventilasi dan b_{ve} adalah lebar efektif dari saluran ventilasi (Manninen, 2012).

Selanjutnya adalah menentukan jumlah slot dalam stator. Berikut ini adalah persamaan untuk mencari sudut pitch slot:

$$\alpha_u = \frac{p 2 \pi}{Q} \quad (3.65)$$

Dimana q adalah jumlah slot per pole per fase, dan Q adalah jumlah slot. v dapat menjadi $v = +1 \pm 2cm$, dimana setiap bilangan bulat positif atau nol dan m adalah jumlah fase. Untuk satu lapisan kumparan, $W = \tau_p$, yang membuat faktor pitch:

$$k_{pv} = \sin\left(\frac{v\pi}{2}\right) \quad (3.66)$$

Jumlah slot stator dapat digunakan untuk mendefinisikan slot pitch:

$$\tau_u = \frac{\pi D}{Q} \quad (3.67)$$

Jumlah slot maksimum dikurangi dengan panjang keliling dalam stator. Tipikal pitch slot untuk PMSM kecil adalah 7-45 mm dan untuk PMSM besar 14-75 mm. Jumlah slot stator juga dapat ditentukan dengan mendefinisikan jumlah slot per pole per fase q .

$$q = \frac{Q}{2 p m} \quad (3.68)$$

Setelah dimensi dari stator dan rotor telah diketahui, maka langkah selanjutnya adalah mendesain magnet permanen yang akan digunakan. Karakteristik yang paling penting untuk bahan magnet permanen adalah kerapatan fluks remanen, kekuatan medan koersif, kurva hysteresis dan produksi energi (Manninen, 2012).

Magnet permanen NdFeB memiliki kurva demagnetization linear, dan kekuatan medan koersif pada suhu kamar hanya dapat dihitung atas dasar kerapatan fluks magnetic B_r dan permeabilitas recoil relatif μ_{rrec} sebagai:

$$H_c = \frac{B_r}{\mu_0 \mu_{rrec}} \quad (3.69)$$

Kerapatan fluks magnet yang dihasilkan dalam air gap δ oleh PM dengan kurva demagnetization linear dan tebal h_M ditempatkan di sirkuit magnetik dengan permeabilitas magnet tak berhingga dan airgap δ adalah:

$$B_\delta \approx \frac{B_r}{1 + \mu_{rrec} \delta / h_M} \quad (3.70)$$

Persamaan (3.70) diatas telah diturunkan dengan asumsi $h_c h_M \approx H_M h_M + H_g \delta$, H_c didapatkan dari persamaan (3.69), $H_M = B_g / (\mu_0 \mu_{rrec})$ dan $H_g = B_g / \mu_0$.

1.4 Metode Maxwell Stress Tensor untuk Menghitung Gaya dan Torsi Pada Motor

Perhitungan gaya dan torsi pada mesin elektrik dapat dilakukan dengan salah satu dari empat metode, yaitu: metode Maxwell stres tensor, metode co-energi, persamaan gaya Lorentz ($\mathbf{J} \times \mathbf{B}$), dan metode laju perubahan medan energi ($\mathbf{B} \partial \mathbf{B} / \partial \mathbf{x}$). Metode yang paling tepat untuk digunakan adalah biasanya tergantung pada permasalahannya, meskipun metode yang paling sering digunakan adalah Maxwell stres tensor dan metode co-energi. Untuk menghitung besarnya gaya dan torsi pada motor ini menggunakan metode Maxwell stress tensor. Penggunaan metode Maxwell stres tensor ini dikarenakan metode ini sederhana dari perspektif komputasi karena hanya memerlukan distribusi kerapatan fluks lokal sepanjang garis tertentu atau kontur (Gieras, 2010).

Dengan menggunakan definisi Maxwell stres tensor, kekuatan gaya (force) dapat ditentukan atas dasar kepadatan fluks magnetik, yaitu,

- Gaya total

$$F = \iint \left[\frac{1}{\mu_0} B(B * n) - \frac{1}{2\mu_0} B^2 n \right] dS \quad (3.71)$$

- Gaya normal

$$F_n = \iint \frac{L_i}{2\mu_0} \int [B_n^2 - B_t^2] dl \quad (3.72)$$

- Gaya Tangensial

$$F_t = \frac{L_i}{\mu_0} \int B_n B_t dl \quad (3.73)$$

di mana n , l , B_n dan B_t masing-masing secara berurutan adalah vektor normal terhadap permukaan S , panjang stack, kontur integrasi, komponen radial (normal) dari kerapatan fluks magnetik dan komponen tangensial dari kerapatan fluks magnetik.

Persamaan torsi adalah $T = r \times F$ dan hubungannya dengan persamaan (3.40) adalah:

$$T = \frac{L_i}{\mu_0} \oint_l r B_n B_t dl \quad (3.74)$$

dimana r adalah jari-jari lingkaran yang terletak pada air gap.

Finite grid yang digunakan pada persamaan di atas adalah untuk masing-masing elemen i . Sedangkan torsi dalam koordinat silinder merupakan jumlah torsi untuk setiap elemen i , dan dinyatakan sebagai berikut:

$$T = \frac{L_i}{\mu_0} \sum_i r^2 \oint_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} B_{ri} B_{\theta i} d\theta \quad (3.75)$$

1.5 Simulasi Berbagai Variasi

Meskipun Ignatius dan Derito Nanda telah mengembangkan motor bertenaga magnet permanen, namun mereka tidak menjelaskan pada ukuran dan parameter berapa yang bisa menghasilkan torsi maksimal pada setiap modelnya.

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dipilih satu model dengan mengikuti aturan dari patent motor perendev dan dicari desain dengan parameter yang dapat menghasilkan torsi maksimal. Untuk mendapatkan desain tersebut, dilakukan variasi pada parameter-parameter yang ada pada desain motor. Variasi tersebut diperlukan untuk mencari nilai yang paling optimal sehingga bisa menghasilkan

torsi yang tinggi. Variasi tersebut kemudian dianalisa dengan menggunakan metode perhitungan numerik finite element.

Parameter-parameter pada desain yang telah didapatkan pada sub-bab terdahulu merupakan nilai awal sebagai dasar penentuan variasi yang akan dilakukan. Sehingga nilai tersebut belum tentu menjadi nilai yang optimal. Untuk mencari nilai yang optimal dari parameter-parameter tersebut, maka dilakukan simulasi dengan variasi sebagai berikut:

1. Variabel kontrol : Dimensi magnet permanen
2. Variabel manipulasi : Sudut kemiringan α rotor dan stator ($^{\circ}$),
Jumlah stator (buah),
Jumlah rotor (buah),
Jarak antara (*airgap*) stator dan rotor (mm).
Kekuatan magnet permanen (MGOe)
3. Variabel respon : Torsi yang dihasilkan (N*m)

Variabel kontrol untuk penelitian ini adalah dimensi magnet permanen. Dimensi magnet yang digunakan dalam penelitian ini adalah berbentuk silinder pejal dengan diameter 15 mm dan tebal 3 mm.

Sudut kemiringan (α) stator dan rotor pada desain yang dibangun oleh Mike Brady adalah sebesar 34° . Untuk mengetahui sudut berapakah yang akan memberikan gaya torsi yang paling besar, maka akan divariasikan yaitu 30° , 34° , 38° , 42° dan 48° . Jumlah stator yang telah dibangun sebelumnya adalah sebanyak 30 buah, dan untuk penelitian ini akan divariasikan menjadi 10, 15, 20, 30 dan 40 buah. Untuk jumlah rotornya divariasikan sebanyak 2, 3, 4, 6 dan 8 buah rotor.

Material magnet permanen dipilih jenis magnet neodmium ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) karena magnet neodmium merupakan magnet permanen yang bisa menghasilkan medan magnet paling besar diantara material magnet permanen yang lainnya (Melfi, 2008). Sedangkan kekuatan medan magnet (H) juga divariasikan. Variasi ini diambil pada list material magnet yang sudah tersedia pada software FEMM 4.2, yaitu; 32 MGOe, 37 MGOe, 40 MGOe dan 52 MGOe (Meeker, 2013). Kekuatan magnet yang tersedia pada list tersebut merupakan yang banyak tersedia di pasaran. Hasil dari simulasi tersebut akan didapatkan variabel respon berupa nilai torsi.

1.6 Penggabungan parameter yang Menghasilkan Torsi Maksimal

Hasil dari simulasi berbagai variasi tersebut adalah nilai torsi yang dihasilkan. Dari simulasi tersebut akan diketahui pada nilai berapa dari parameter-parameter tersebut yang bisa menghasilkan torsi paling besar. Kemudian, nilai-nilai terbaik pada tiap parameter tersebut diambil untuk digabungkan membentuk suatu desain baru yang lebih optimal.

Desain baru tersebut juga akan disimulasikan untuk mengetahui torsi yang dihasilkan. Jika torsi yang dihasilkan sudah tinggi (minimal sama dengan yang dihasilkan pada tahap sebelumnya) maka dilanjutkan ke tahap selanjutnya. Namun jika torsi yang dihasilkan malah menurun, maka dicari lagi kombinasi nilai parameter yang bisa menghasilkan torsi yang tinggi.

1.7 Variasi Mesh Untuk Memperoleh Hasil / Nilai yang Konvergen

Keakuratan solusi elemen hingga tergantung pada topologi mesh. Mesh merupakan bagian penting dari model elemen hingga. Pada dasarnya, ada dua jenis generator mesh. Yang pertama adalah sebuah generator mesh analitis yang mendefinisikan masalah dengan menggunakan element geometri global. Element global ini kemudian disempurnakan sesuai dengan pengguna, biasanya secara otomatis. Jenis lain dari generator mesh adalah generator mesh sintetis di mana pengguna mendesain level mesh yang berbeda-beda pada tiap wilayah mesh yaitu dengan node-by-node sehingga model secara keseluruhannya adalah gabungan dari sejumlah daerah mesh yang berbeda.

Software finite elemen modern dapat menghasilkan mesh secara otomatis dari garis geometrik yang digambar dari software jenis CAD. Generator mesh ini biasanya membangun mesh menggunakan metode triangulasi Delaunay.

Generasi mesh yang sepenuhnya otomatis dapat dicapai hanya jika kesalahan yang timbul dari diskritisasi mesh diperhitungkan. Ini disebut self-adaptive meshing, dan bergantung pada metode yang akurat dan dapat diandalkan untuk memperkirakan kesalahan diskritisasi dalam mesh. Software elemen hingga modern yang menggunakan self-adaptive meshing biasanya menghitung perkiraan kesalahan diskritisasi dari solusi elemen hingga. Software ini biasanya membuat mesh mentah yang dipecahkan. Estimasi error dibuat dari solusi ini dan

mesh diperhalus di tempat perkiraan. Proses ini diulang sampai tingkat akurasi yang diperlukan diperoleh untuk model. Estimasi error yang digunakan dalam program ini menghitung perkiraan error mereka dari perubahan kerapatan fluks seluruh elemen tepi (Gieras, 2010).

Jika desain baru yang bisa menghasilkan torsi tinggi telah didapat, maka dilakukan variasi ukuran meshing. Variasi ukuran meshing ini bertujuan untuk memastikan bahwa nilai torsi yang dihasilkan adalah sudah konvergen, sudah tidak berbeda lagi dengan hasil meshing sebelumnya.

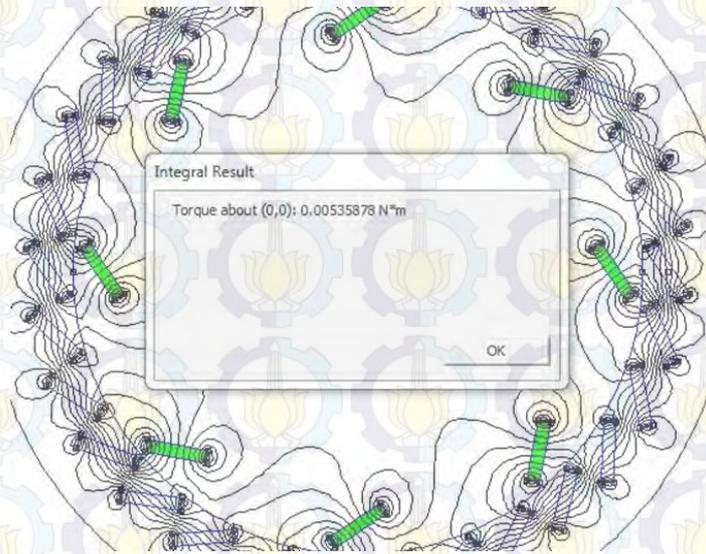
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

1.1 Hasil Simulasi Berbagai Variasi

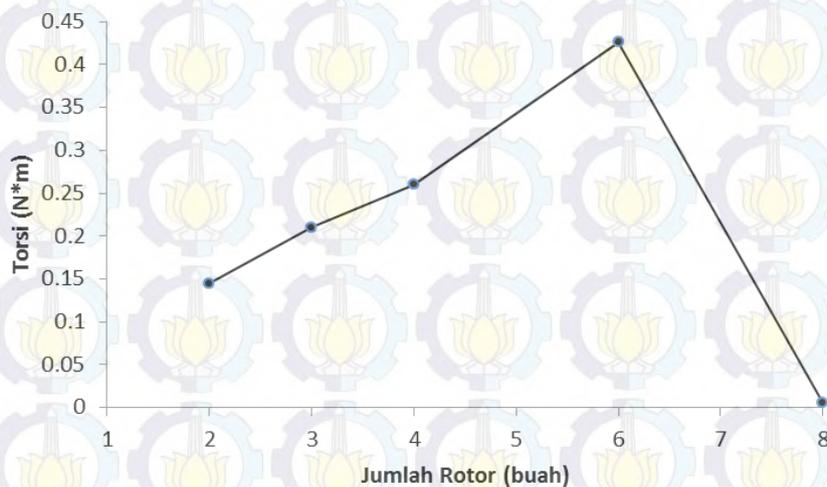
Pada penelitian ini telah dilakukan berbagai variasi. Yang merupakan variabel manipulasinya adalah sudut kemiringan α rotor dan stator ($^{\circ}$), jumlah stator (buah), jumlah rotor (buah), jarak antara (airgap) stator dan rotor (mm).

1.1.1 Variasi Jumlah Rotor yang Digunakan

Jumlah rotor divariasikan yaitu berjumlah 2, 3, 4, 6 dan 8 buah. Sedangkan parameter yang lain menggunakan parameter awal sebagai acuan, yaitu jumlah stator 30 buah, kemiringan sudut α adalah 12° , dan jarak airgapnya adalah 1 mm.



Gambar 4.1 Variasi jumlah rotor 8 buah



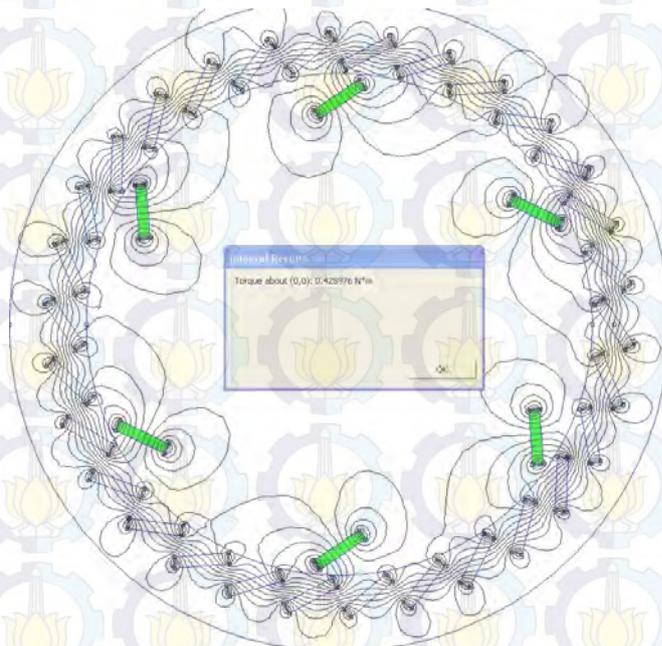
Gambar 4.2 Variasi jumlah rotor dan torsi yang dihasilkan

Gambar 4.1 merupakan sebaran fluks magnetik dengan variasi rotor berjumlah 8. Torsi yang dihasilkan adalah $0,0053 \text{ N}\cdot\text{m}$. Rotor yang berjumlah 8 buah ini menghasilkan nilai torsi yang paling kecil diantara variasi yang lainnya. Lebih jelasnya bisa dilihat pada gambar 4.2. Pada grafik 4.2 terlihat bahwa variasi rotor yang berjumlah 6 buah menghasilkan torsi paling besar, yaitu mencapai $0,426 \text{ N}\cdot\text{m}$.

1.1.2 Variasi Jumlah Stator yang Digunakan

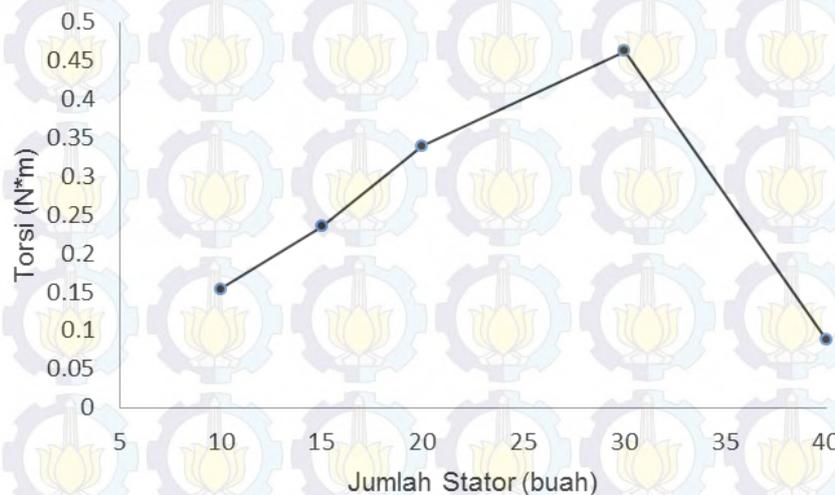
Jumlah rotor divariasikan yaitu berjumlah 10, 15, 20, 30 dan 40 buah. Rotor yang digunakan adalah sebanyak 6 buah, karena dari hasil simulasi sebelumnya diketahui bahwa jumlah inilah yang bisa menghasilkan torsi paling besar dibandingkan dengan yang lainnya. Sedangkan parameter yang lain menggunakan parameter awal sebagai acuan, yaitu kemiringan sudut α adalah 12° , dan jarak airgapnya adalah 1 mm.

Gambar 4.3 merupakan sebaran fluks magnetik dengan variasi stator berjumlah 30 buah. Jarak antar magnet pada stator ini adalah 12° . Torsi yang dihasilkan adalah $0,462 \text{ N}\cdot\text{m}$. Stator yang berjumlah 30 buah ini menghasilkan nilai torsi yang paling besar diantara variasi yang lainnya. Hal ini sesuai dengan desain yang dikembangkan terlebih dahulu oleh Brady, yaitu jarak statornya adalah 12° .



Gambar 4.3 Variasi jumlah stator 30 buah

Grafik 4.4 menampilkan hasil simulasi dari variasi jumlah stator yang telah dilakukan. Pada grafik tersebut terlihat bahwa torsi yang dihasilkan semakin bertambah seiring bertambahnya jumlah stator yang digunakan, hingga mencapai puncaknya ketika stator berjumlah 30 buah, namun setelah itu torsi yang dihasilkan menurun.



Gambar 4.4 Variasi jumlah stator dan torsi yang dihasilkan

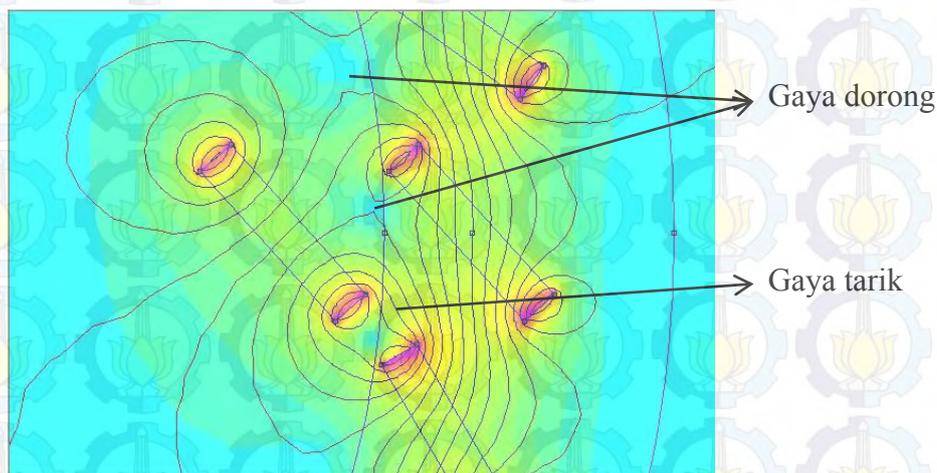
1.1.3 Variasi sudut kemiringan(α) stator dan rotor

Sudut kemiringan sangat berpengaruh kepada torsi yang dihasilkan, karena sudut kemiringan sangat berpengaruh terhadap arah gaya magnet yang dihasilkan. Jika arahnya medan magnetnya tepat, maka kekuatan medan magnet akan lebih optimal dalam menghasilkan torsi. Untuk mengetahui sudut berapa yang tepat untuk digunakan pada desain motor ini, maka perlu disimulasikan dengan berbagai variasi sudut. Pada desainnya Brady, digunakan sudut 34° pada motornya. Untuk itu, sudut kemiringan (α) stator dan rotor divariasikan mulai sudut 30° dengan interval 4° yaitu sebesar 30° , 34° , 38° , 42° dan 46° .

Untuk parameter yang lain, nilai yang digunakan adalah mengambil dari hasil simulasi sebelumnya yang bisa menghasilkan torsi paling tinggi, yaitu rotor berjumlah 6 buah dan stator berjumlah 30 buah. Dan airgap antara stator dan rotornya adalah sebesar 1 mm.

Gambar 4.5 merupakan sebaran fluks magnetik dengan variasi sudut kemiringan (α) stator dan rotor sebesar 42° . Torsi yang dihasilkan adalah 1,094 N*m. Sudut sebesar 42° ini menghasilkan nilai torsi yang paling besar diantara

variasi yang lainnya. Hal ini dikarenakan bidang magnet yang saling tolak-menolak memiliki daerah kontak yang banyak dibandingkan dengan desain dengan sudut lain. Sehingga daya tolaknya lebih optimal. Selain daya tolak, motor ini masih dipengaruhi gaya tarik, namun pada desain ini dengan sudut kemiringan 42° , bidang yang saling tarik menarik, tepat pada sisi samping magnet, sehingga daya tarik magnetnya tidak begitu kuat. Hal ini lebih mengoptimalkan torsi yang dihasilkan.



Gambar 4.5 Sebaran fluks magnetik pada variasi sudut 42°



Gambar 4.6 Variasi sudut kemiringan (α) stator dan rotor, sertatorsi yang dihasilkan

Grafik 4.6 menampilkan hasil simulasi dari variasi sudut kemiringan (α) stator dan rotor yang telah dilakukan. Pada grafik tersebut terlihat bahwa torsi yang dihasilkan semakin bertambah seiring bertambahnya sudut kemiringan,

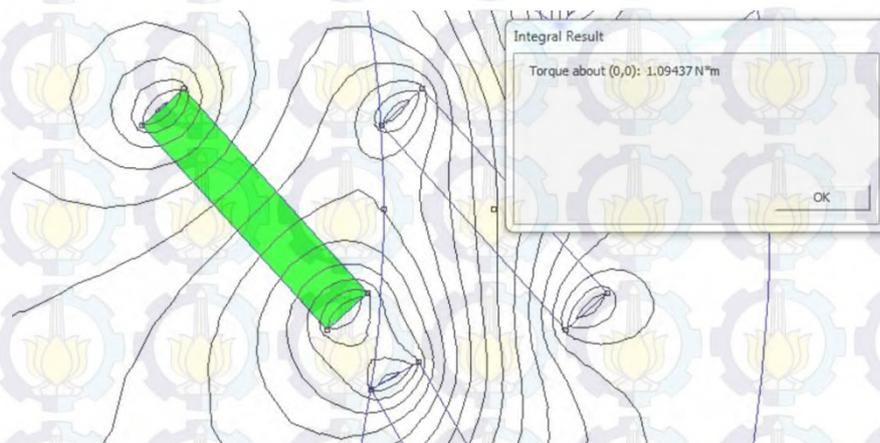
hingga mencapai puncaknya ketika sudut sebesar 42° , namun setelah itu torsi yang dihasilkan menurun.

1.1.4 Variasi jarak airgap antara stator dan rotor

Untuk mengetahui pada jarak airgap berapa tepat untuk digunakan pada desain motor ini, maka perlu disimulasikan dengan berbagai jarak airgap. Jarak airgap antara stator dan rotor divariasikan sebesar 1 mm, 2 mm dan 3 mm. Dimulai dengan jarak 1 mm karena jika lebih kecil dari 1 mm maka pembuatannya akan kesulitan, karena akan dibutuhkan peralatan dengan presisi tinggi.

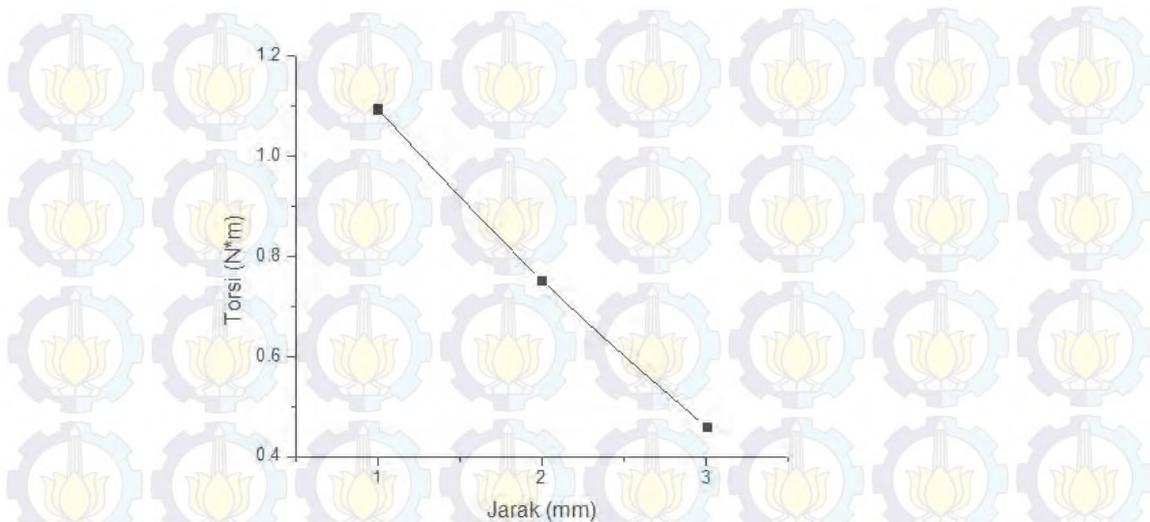
Untuk parameter yang lain, nilai yang digunakan adalah mengambil dari hasil simulasi sebelumnya yang bisa menghasilkan torsi paling tinggi, yaitu rotor berjumlah 6 buah dan stator berjumlah 30 buah, kemiringan (α) stator dan rotor sebesar 42° .

Gambar 4.7 merupakan sebaran fluks magnetik dengan variasi jarak airgap antara stator dan rotor sebesar 1 mm. Torsi yang dihasilkan adalah $1,094 \text{ N}\cdot\text{m}$. Jarak air gap sebesar 1 mm ini menghasilkan nilai torsi yang paling besar diantara variasi yang lainnya. Hal ini dikarenakan semakin dekat jarak antara stator dan rotor, maka medan magnet yang saling berinteraksi akan semakin kuat. Sehingga daya tolaknya semakin optimal.



Gambar 4.7 Variasi jarak airgap 1 mm

Grafik 4.8 menampilkan hasil simulasi dari variasi jarak airgap antara stator dan rotor yang telah dilakukan. Pada grafik tersebut terlihat bahwa semakin bertambah jarak airgapnya, maka torsi yang dihasilkan semakin berkurang.



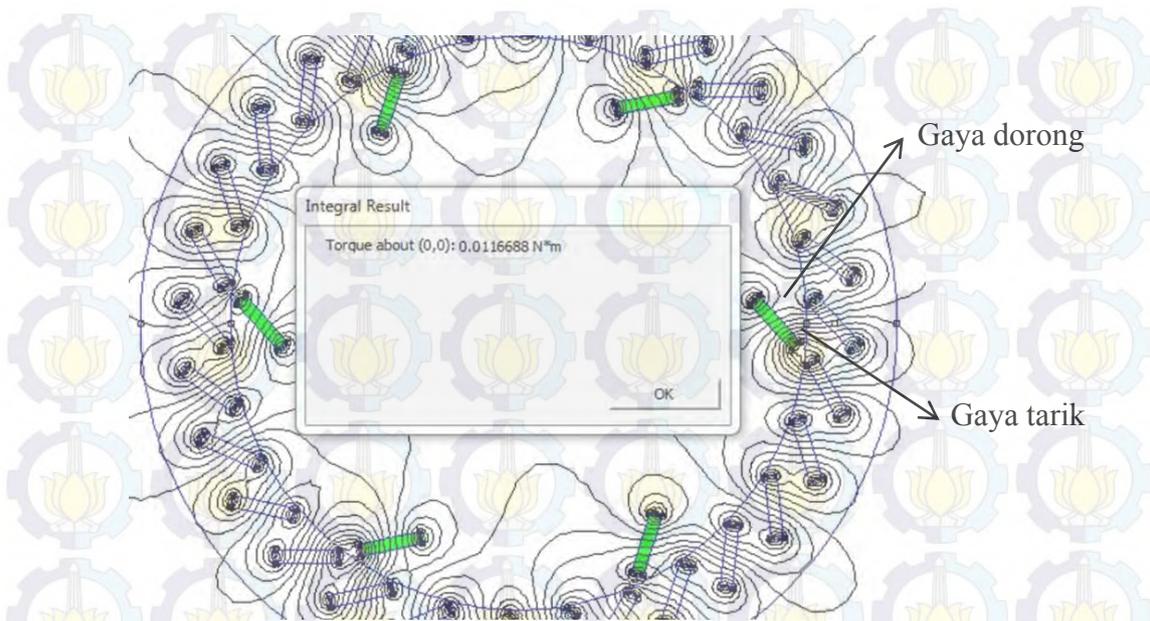
Gambar 4.8 Variasi jarak antara (airgap) stator dan rotor, serta torsi yang dihasilkan

1.1.5 Variasi Susunan Magnet Halbach Array

Susunan magnet halbach array bisa menguatkan medan magnet yang dihasilkan. Namun untuk mengetahui, apakah juga bisa meningkatkan torsi yang dihasilkan pada motor bertenaga magnet ini, maka dilakukan simulasi terhadap variasi susunan magnet halbach array, yaitu arah magnetnya berselang-seling. Simulasi dilakukan dengan menggunakan nilai-nilai parameter yang bisa menghasilkan torsi paling tinggi, yaitu:

- Sudut kemiringan α rotor dan stator ($^{\circ}$) : 42°
- Jumlah stator (buah) : 30 buah (jarak antar magnet 12°)
- Jumlah rotor (buah) : 6 buah (jarak antar magnet 6°)
- Jarak antara (airgap) stator dan rotor : 1 mm.

Setelah dilakukan simulasi, ternyata desain motor dengan menggunakan susunan magnet halbach array hanya menghasilkan torsi sebesar $0,0116 \text{ N}\cdot\text{m}$. Torsi yang dihasilkan jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan menggunakan susunan magnet yang searah dan saling berhadap-hadapan. Hal ini disebabkan karena setiap rotor dipengaruhi oleh gaya tarik dengan stator yang besar. Sehingga sangat menghambat pergerakan rotor, seperti bisa dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4.9 Variasi arah magnet halbach array

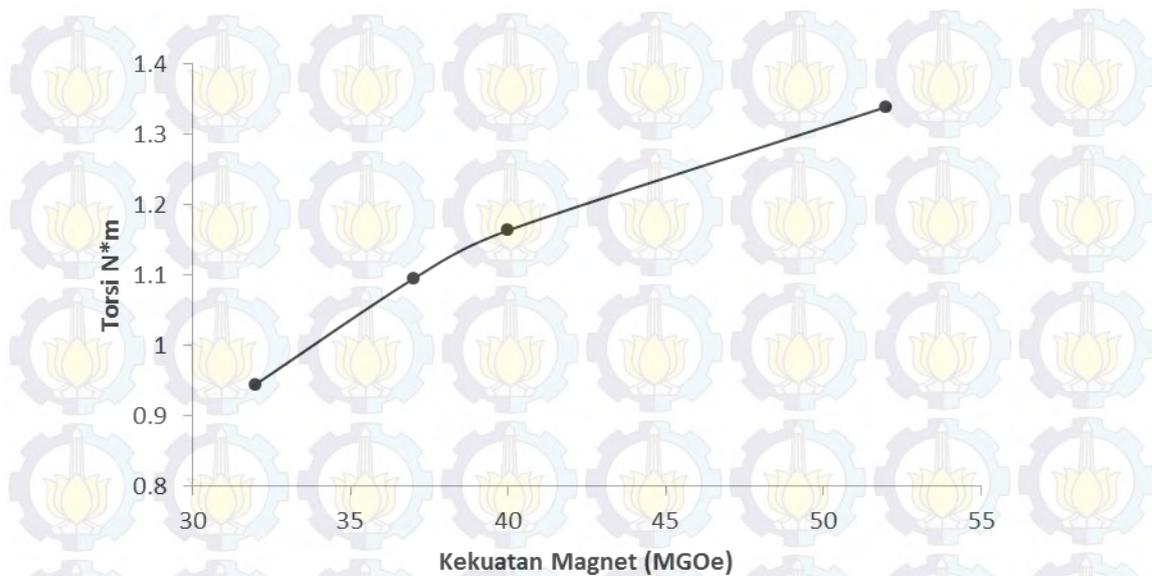
1.1.6 Variasi Kekuatan Magnet

Untuk mengetahui pengaruh kekuatan magnet (H) terhadap torsi yang dihasilkan, maka perlu disimulasikan dengan berbagai kekuatan medan magnet. Variasi ini diambil pada list material magnet yang sudah tersedia pada software FEMM 4.2, yaitu; 32 MGOe, 37 MGOe, 40 MGOe dan 52 MGOe.

Simulasi dilakukan dengan menggunakan nilai-nilai parameter yang bisa menghasilkan torsi paling tinggi, yaitu:

Sudut kemiringan α rotor dan stator ($^{\circ}$)	: 42 $^{\circ}$
Jumlah stator (buah)	: 30 buah (jarak antar magnet 12 $^{\circ}$)
Jumlah rotor (buah)	: 6 buah (jarak antar magnet 6 $^{\circ}$)
Jarak antara (airgap) stator dan rotor	: 1 mm.
Arah susunan magnet	: Searah

Setelah dilakukan simulasi, penambahan kekuatan magnet yang digunakan berbanding lurus dengan torsi yang dihasilkan, semakin besar kekuatan magnet yang digunakan, maka semakin besar torsi yang dihasilkan. Seperti terlihat pada gambar 4.10. Torsi terbesar dihasilkan oleh magnet yang berkekuatan 52 MGOe, yaitu sebesar 1,33 N*m.



Gambar 4.10 Variasi Kekuatan Magnet dan Torsi yang Dihasilkan

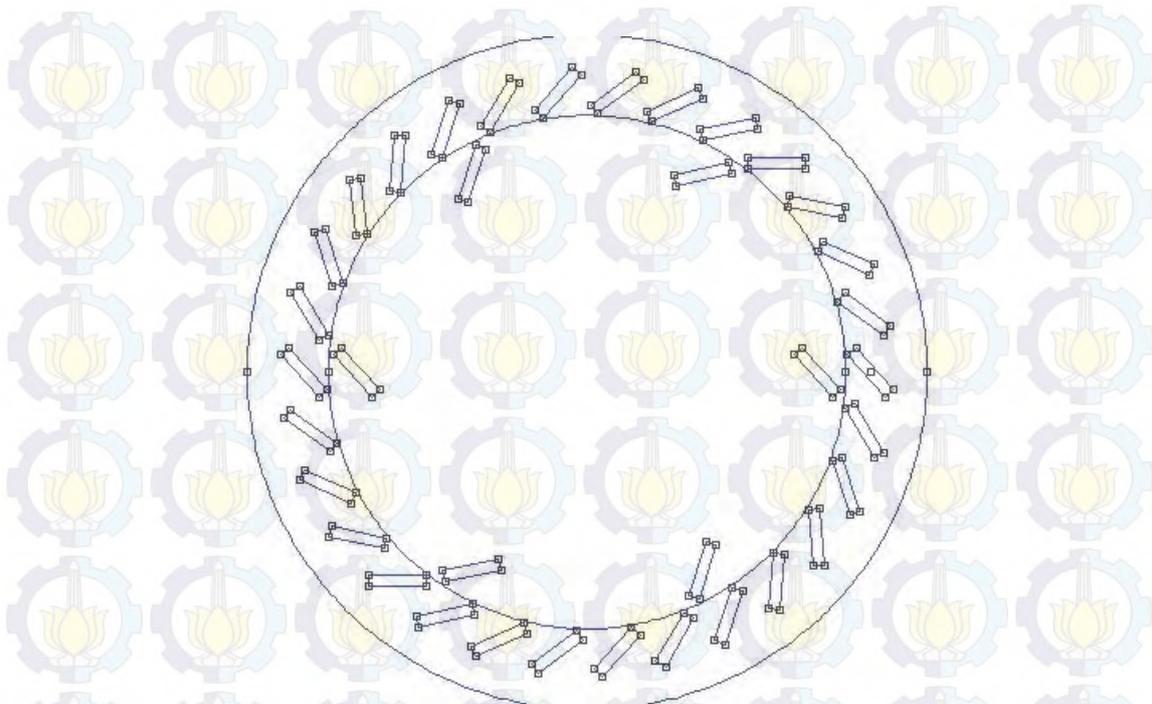
1.2 Desain Akhir yang Dihasilkan

Setelah dilakukan simulasi dengan berbagai variasi, maka didapatkan nilai-nilai dari parameter yang bisa menghasilkan torsi yang maksimal. Berikut ini merupakan nilai-nilai tersebut:

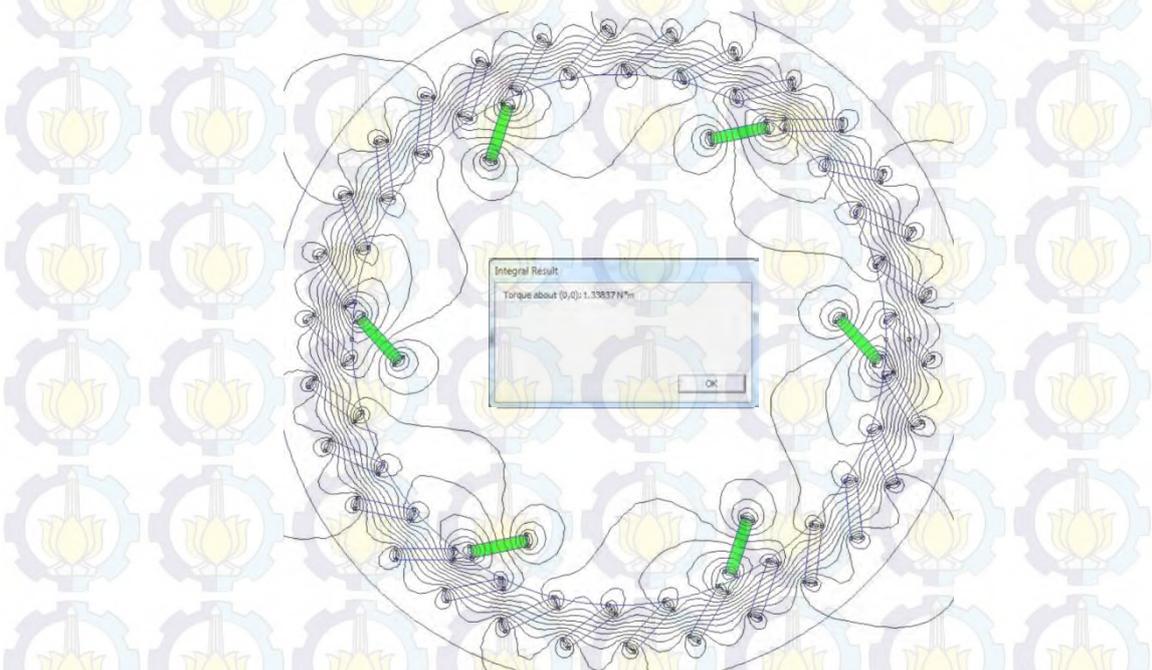
- Sudut kemiringan α rotor dan stator ($^{\circ}$) : 42°
- Jumlah stator (buah) : 30 buah (jarak antar magnet 12°)
- Jumlah rotor (buah) : 6 buah (jarak antar magnet 6°)
- Jarak antara (*airgap*) stator dan rotor : 1 mm.
- Arah magnet : Searah
- Kekuatan magnet neodymium : 52 MGOe

Nilai-nilai tersebut kemudian digabungkan menjadi satu desain dalam motor bertenaga magnet permanen. Gambar 4.10 berikut ini merupakan desain berdasarkan parameter-parameter tersebut.

Untuk mengecek apakah setelah penggabungan, torsi yang dihasilkan akan mengalami penurunan atau minimal sama dengan yang dihasilkan sebelumnya maka dilakukan simulasi kembali dengan parameter-parameter yang telah disebutkan tadi. Gambar 4.11 merupakan hasil simulasinya. Torsi yang dihasilkan ternyata tidak mengalami penurunan, yaitu sebesar 1,3383 N*m. Sehingga bisa disimpulkan bahwa nilai-nilai dari parameter-parameter tersebut merupakan nilai yang sudah optimal.



Gambar 4.11 Desain hasil penggabungan parameter yang optimal



Gambar 4.12. Hasil simulasi desain hasil penggabungan parameter yang optimal

1.3 Hasil dari Variasi mesh

Untuk mendapatkan hasil yang lebih valid, maka ukuran mesh divariasikan. Ukuran mesh dibuat lebih kecil selama komputernya masih bisa meng-iterasi-kan. Pada simulasi sebelumnya, ukuran mesh dibuat default dari

softwarentya, artinya tidak dirubah-rubah. Untuk variasi mesh ini, ukuran meshnya divariasikan dari ukuran default; 0,7; 0,5 dan 0,4. Dibawah 0,4, proses pembentukan meshing dan proses iterasi berjalan sangat lama, dan hasil torsi yang dihasilkan sudah tidak berubah secara signifikan, sehingga variasi mesh dihentikan sampai ukuran 0,4.

Tabel 4.1 Data variasi ukuran mesh

No	Ukuran Mesh	Jumlah Nodes	Jumlah Element	Torsi (N*m)
1	Default	29695	59428	1,0943
2	0,7	60318	119916	1,1158
3	0,5	120701	241040	1,1168
4	0,4	141180	281317	1.1150

Jumlah nodes dan element yang dihasilkan pada setiap variasi ukuran mesh bisa dilihat pada tabel 4.1. Pada tabel tersebut juga ditampilkan nilai torsi yang dihasilkan.

Gambar 4.12 dan gambar 4.13 merupakan proses meshing yang telah dilakukan. Gambar 4.13 merupakan meshing dengan ukuran default dari software FEMM 4.2, sedangkan gambar 4.14 merupakan meshing dengan ukuran mesh sebesar 0,4. Pada gambar 4.14, bisa dilihat bahwa ukuran mesh-nya lebih kecil dibandingkan dengan yang ukuran default. Ukuran mesh yang semakin kecil, mengakibatkan proses iterasi lebih lama namun hasil yang dihasilkan lebih teliti/kontinyu karena titik perhitungannya lebih banyak.



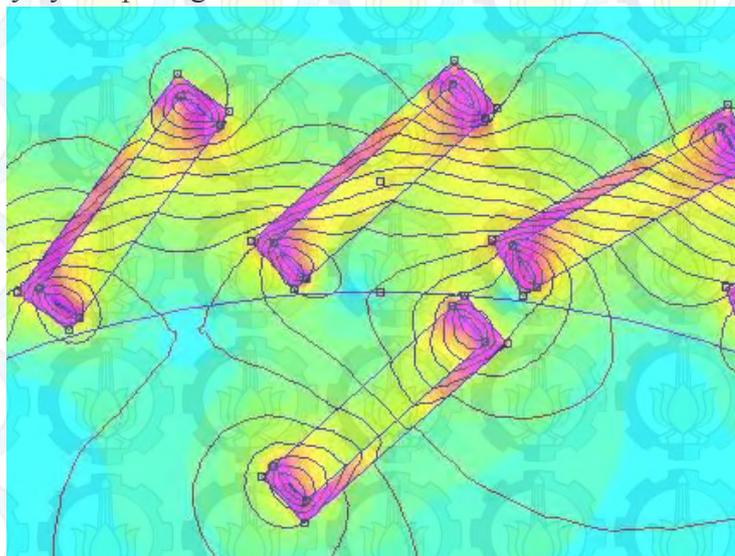
Gambar 4.13 Meshing dengan ukuran mesh default



Gambar 4.14 Meshing dengan ukuran mesh 0,4

1.4 Analisa Pemberian Magnetic Shielding menggunakan Mumetal

Di dalam patennya, Brady menyebutkan bahwa untuk mengarahkan arah gaya magnet agar tidak terjadi gaya tarik antara stator dan rotor, maka dapat digunakan bahan pembatas medan magnet yaitu mumetal (Brady, 2006). Oleh karena itu, dilakukan variasi pada desain rotor dan stator, yaitu bagian magnet yang tidak berhadapan-hadapan diberi laminasi pembatas magnet mumetal. Hasil dari simulasinya yaitu pada gambar 4.15.



Gambar 4.15 Variasi dengan Menggunakan Pembatas Magnetik Mumetal

Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa fluks magnet sebagian memang terisolir pada logam mumetal. Fluks magnetik yang terisolir ini menambah

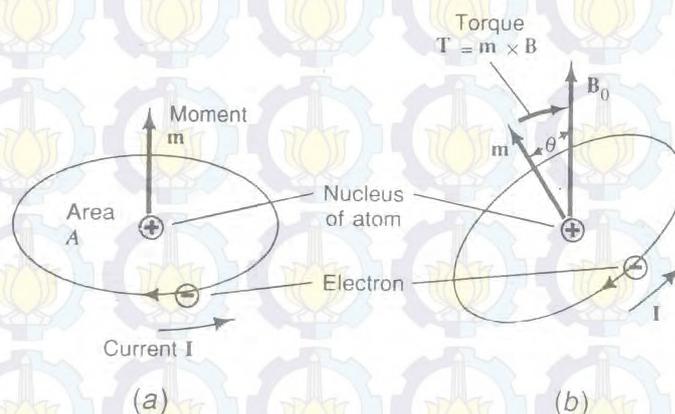
kekuatan dari material magnet permanennya. Namun, meskipun begitu ternyata masih ada gaya tarik antara magnet pada stator dan rotor, gaya tarik ini akan mengurangi atau bahkan menghilangkan gaya dorong yang terbentuk, sehingga torsi yang dihasilkanpun tidak akan maksimal. Pada desain ini, torsi yang dihasilkan adalah 0,876 N. Dengan demikian, pemberian logam mumetal untuk mengurangi terjadinya gaya tarik, tidak memberikan hasil yang signifikan.

1.5 Analisis Gaya yang Bekerja Pada Motor

Untuk menghitung medan magnet dan kekuatan gaya antara magnet salah satunya bisa menggunakan model Ampere. Di dalam model Ampere, gaya tolak maupun gaya tarik yang terdapat pada magnet disebabkan oleh arus mikroskopis dari elektron yang mengorbit inti atom dan daya tarik intrinsik partikel dasar (seperti elektron) yang membentuk materi. Electron yang mengelilingi atom tersebut ekuivalen dengan arus mikroskopis seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.16 dengan arah yang berlawanan. Pada loop tersebut mempunyai momen dipole magnetik m yang besarnya adalah (Kraus, 1991):

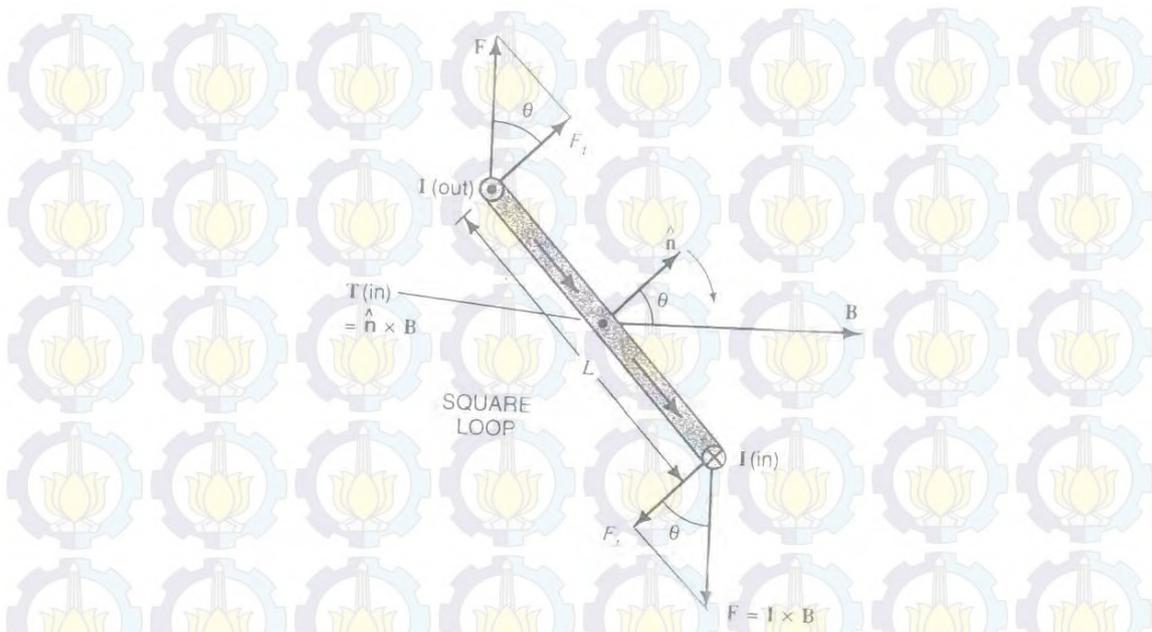
$$m = I \times A \quad (4.1)$$

Dimana I adalah arus loop dan A merupakan luasan loop.



Gambar 4.16 Arus mikroskopis yang terjadi pada atom (Kraus, 1991)

Untuk mengetahui hubungannya dengan gaya magnet yang dihasilkan, arus mikroskopis tersebut bisa diasosiasikan dengan sebuah kawat berarus listrik. Pada kawat berarus yang membentuk loop berbentuk segi empat memiliki sisi sepanjang L yang berada pada medan magnet B dan mempunyai arus I seperti pada gambar 4.17.



Gambar 4.17 Kawat berarus listrik (Kraus, 1991)

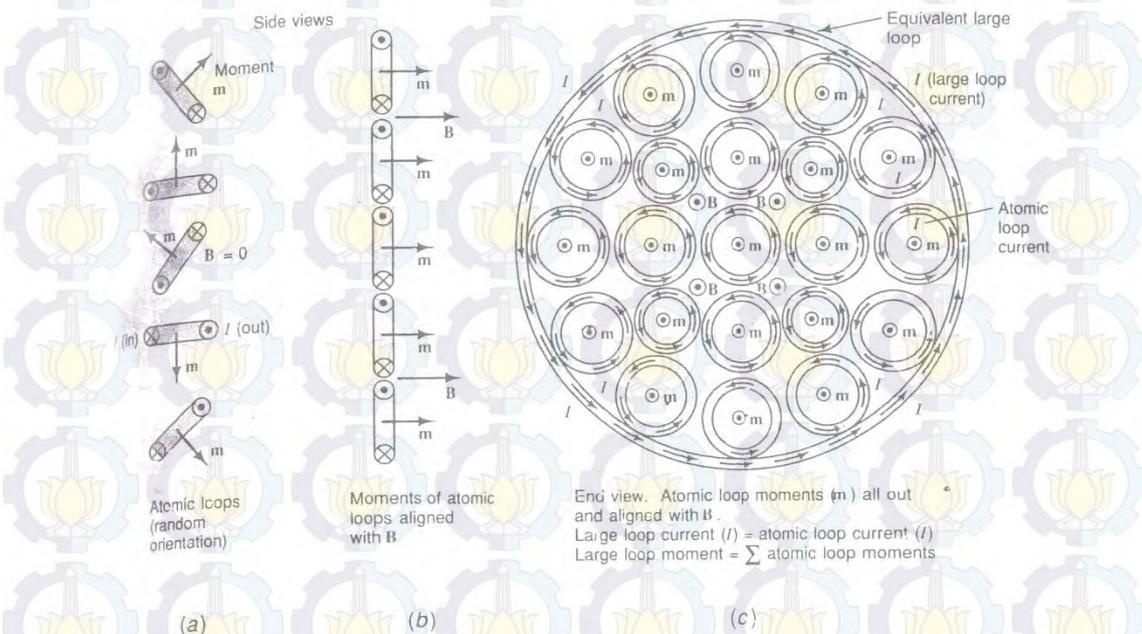
Pada kawat berarus tersebut memiliki gaya pada setiap elemen dL sebesar:

$$dF = (I \times B)dL \quad (4.2)$$

Jika unit normal \hat{n} bidang loop membentuk sudut θ terhadap B , maka gaya tangensial yang dihasilkan sebesar:

$$F_t = 2 I L B \sin \theta \quad (4.3)$$

$$F_t = 2 \frac{m}{A} L B \sin \theta \quad (4.4)$$



Gambar 4.18. Susunan moment dipole yang terjadi pada atom (Kraus, 1991)

Sebuah magnet batang terdiri dari banyak atom, sehingga jika penampakan moment dipole pada sebuah magnet dapat dilihat pada gambar 4.18. Pada gambar 4.18 bagian a tersebut memperlihatkan moment dipole yang arahnya belum diseragamkan. Pada bagian b memperlihatkan moment dipole yang sudah disejajarkan searah dengan medan magnet B. sedangkan bagian c memperlihatkan susunan atom-atom yang mempunyai moment dipole pada sebuah benda yang sudah termagnetisasi (arah moment dipolnya disearahkan). Sehingga moment dipole total yang dimiliki oleh sebuah magnet merupakan penjumlahan dari masing-masing dipole setiap atomnya.

Dari persamaan 4.4 tersebut, kemudian bisa digunakan untuk menentukan besarnya gaya interaksi antar magnet. Penurunan gaya tersebut adalah berdasarkan pada model ampere. Dalam prakteknya, hal ini biasanya sulit dilakukan karena kesulitan dalam mengukur arus ampere pada permukaan magnet. Oleh sebab itu, beberapa peneliti memilih untuk mendapatkan gaya gaya interaksi antar magnet melalui pendekatan yang lain. Salah satu yang telah melakukannya adalah Vokoun.

Vokoun dalam jurnalnya juga telah melakukan melakukan penurunan persamaan gaya interaksi yang terjadi diantara magnet silinder. Gaya magnet diturunkan dari interaksi energi magnetostatik total E pada sebuah system, yaitu (Vokoun, 2009):

$$\vec{F} = -\nabla E \quad (4.5)$$

Dimana besarnya E adalah (Bobbio, 1999):

$$E = \int_{\Omega_{\infty}} \frac{1}{2} \mu_0 H_m^2 dV \quad (4.6)$$

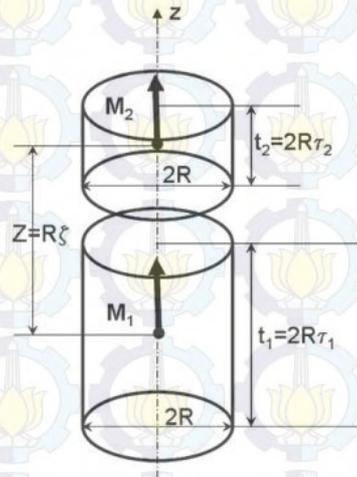
Karena besarnya H_m didefinisikan sebagai:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_0} - M \quad (4.7)$$

Maka energi magnetostatiknya adalah:

$$E = \int_{\Omega_{\infty}} \frac{1}{2} \mu_0 \left(\frac{B_m}{\mu_0} - M \right)^2 dV \quad (4.8)$$

Sistem yang dianalisis adalah seperti pada gambar 4.19.



Gambar 4.19 Skema interaksi magnet silinder(Vokoun, 2009):

Titik acuan pusat gayanya adalah terletak pada titik pusat massa pada silinder tersebut, yaitu pada titik M_1 untuk magnet silinder yang bawah dan M_2 untuk magnet silinder bagian atas. Sedangkan gaya yang akan dianalisis adalah gaya yang terjadi pada sumbu z , sehingga persamaan gayanya bisa dituliskan sebagai berikut:

$$F_z = \frac{\partial E}{\partial z} = 2 \pi \mu_0 M^2 R^3 \frac{\partial J_d}{\partial z} \quad (4.9)$$

Dimana μ_0 adalah permeabilitas vakum, J_d adalah integral coupling dipolar.

Dari persamaan tersebut, kemudian Vokoun mengembangkannya untuk mencari besarnya gaya tolak yang terjadi pada dua magnet silinder dengan jari-jari R , dan tinggi h , dengan momen dipol magnetik yang selaras dan jarak antara kedua magnet lebih besar dari batas tertentu sehingga diperoleh persamaan:

$$F(x) = \frac{\pi \mu_0}{4} M^2 R^4 \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(x+2h)^2} - \frac{2}{(x+h)^2} \right] \quad (4.10)$$

Dimana M adalah magnetisasi dari magnet dan x adalah jarak antara magnet.

Pengukuran kerapatan fluks magnetik B berkaitan erat dengan magnetisasi magnet M , hubungan antara keduanya dinyatakan pada rumus berikut ini:

$$B = \frac{\mu_0}{2} M \quad (4.11)$$

dipol magnetik efektif dapat ditulis sebagai:

$$m = M * V \quad (4.12)$$

Dimana V adalah volume dari magnet. Untuk magnet yang berbentuk silinder, volumenya adalah:

$$V = \pi R^2 h \quad (4.13)$$

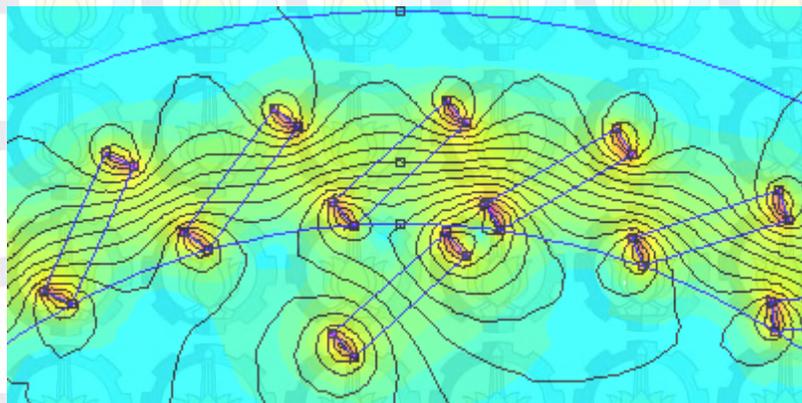
Ketika $h \ll x$ maka gaya yang bekerja pada magnet tersebut adalah sebagai berikut,

$$F(x) = \frac{3 \pi \mu_0}{2} M^2 R^4 h^2 \frac{1}{x^4} \quad (4.14)$$

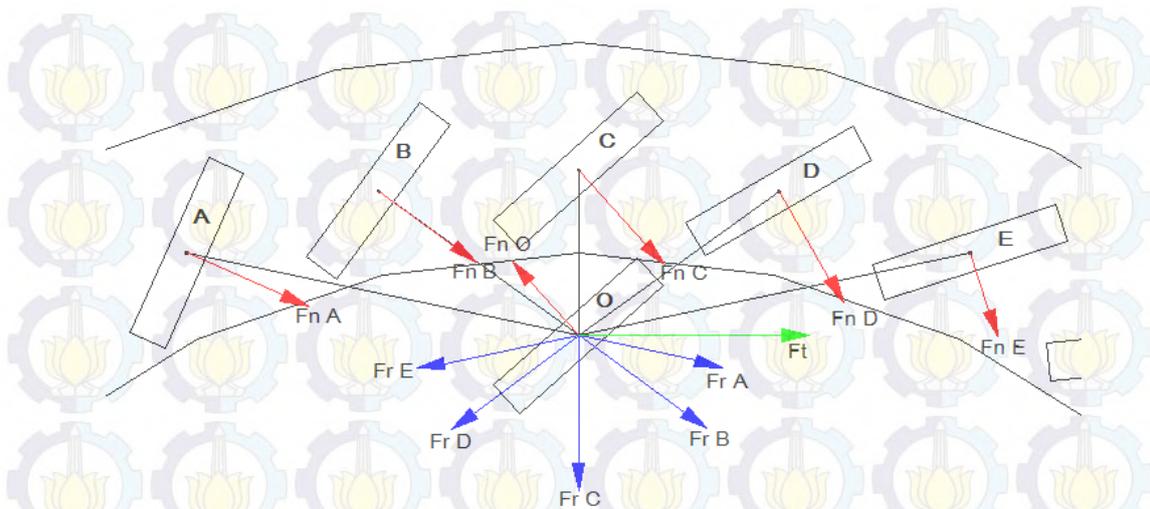
$$F(x) = \frac{3 \pi \mu_0}{2} \left(\frac{2B}{\mu_0} \right)^2 R^4 h^2 \frac{1}{x^4} \quad (4.15)$$

Berdasarkan rumus tersebut, maka gaya yang bekerja pada motor dipengaruhi oleh fluks magnetik (B), jari-jari magnet yang digunakan sebagai rotor dan stator (R), tebal magnet (h), jarak antara magnet stator dan rotor (x) dan sudut kemiringan dari stator maupun rotor (θ) (Vokoun, 2009).

Rumus tersebut akan digunakan untuk menguraikan gaya-gaya yang bekerja pada motor bertenaga magnet permanen yang telah didesain. Gambar 4.20 berikut ini merupakan penampakan pola fluks magnetik yang bisa memberikan gambaran gaya-gaya yang bekerja pada salah satu rotor dari motor ini. Pada gambar tersebut terdapat kontur dari fluks magnetic yang saling tidak menyatu, pada daerah tersebut terjadi interaksi gaya tolak antara rotor dengan statornya. Pada gambar tersebut juga terdapat garis kontur dari stator yang menyatu dengan garis kontur pada rotor. Hal ini menandakan adanya interaksi gaya yang saling tarik menarik pada stator dan rotornya. Untuk lebih jelasnya, maka akan diuraikan pula interaksi gaya yang terjadi berdasarkan arah vektor gayanya, yang diuraikan pada gambar 4.21.

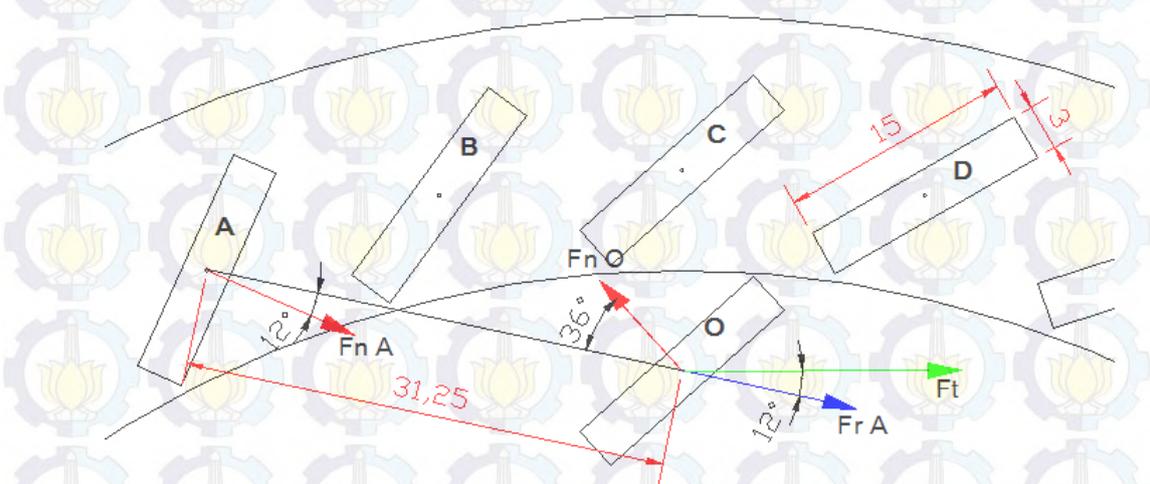


Gambar 4.20 Penampakan gaya berdasarkan fluks magnetik hasil dari simulasi FEMM



Gambar 4.21 Penguraian arah vektor gaya yang bekerja pada motor

Untuk menganalisis gaya yang bekerja pada motor, maka akan diambil sebagian dari stator dan rotor, karena desain dari motor ini bersifat simetri, sehingga bisa mewakili bagian yang lain. Pada motor ini ada dua bagian utama, yaitu magnet sebagai stator dan sebagai rotor. Rotornya berjumlah 6 buah, dan statornya berjumlah 30 buah, sehingga 1 rotor dipengaruhi oleh 5 stator. Oleh sebab itu, maka untuk mewakili analisa gayanya, akan diambil interaksi gaya yang terjadi pada 1 buah rotor dan 5 buah stator. Rotornya diberi nama O, sedangkan statornya diberi nama A, B, C, D dan E. Rotor merupakan bagian dari motor yang berputar, sehingga pada bagian rotor inilah yang akan dikenai gaya dari stator.



Gambar 4.22 Penguraian Gaya Antara Magnet A dan Magnet O

Pada gambar 4.22 merupakan penguraian interaksi gaya yang terjadi pada stator A dan rotor O. Pusat gaya di magnet A dihubungkan dengan pusat gaya di magnet O sehingga membentuk garis \overline{OA} . Magnet A memiliki gaya normal F_{nA}

dan magnet O memiliki gaya normal F_{nO} . Untuk menghitung gaya resultan antara interaksi gaya yang terjadi pada magnet A dan magnet O, maka F_{nA} dan F_{nO} harus disejajarkan dengan garis \overline{OA} . Besarnya gaya normal F_{nA} dan F_{nO} yang terjadi diantara magnet silinder yang identik, dirumuskan seperti persamaan 4.15 berikut ini (Vokoun, 2009):

$$F_{nA} = F_{nO} = \frac{3 \pi \mu_0}{2} \left(\frac{2B}{\mu_0} \right)^2 R^4 h^2 \frac{1}{x^4}$$

$$F_{nA} = F_{nO} = \frac{3 * 3,14 * 4 * 3,14 * 10^{-7}}{2} * \left(\frac{2 * 0,2}{4 * 3,14 * 10^{-7}} \right)^2 * 0,015^4 * 0,003^2 \frac{1}{0,03125^4}$$

$$F_{nA} = F_{nO} = 0,02867 \text{ N}$$

Besarnya gaya dari magnet A yang mempengaruhi magnet O dan sejajar dengan garis \overline{OA} adalah:

$$F_A = F_{nA} * \cos(12^\circ)$$

$$F_A = 0,36 * 0,97$$

$$F_A = 0,0278 \text{ N}$$

Sedangkan gaya reaksi dari magnet O terhadap magnet A dan sejajar dengan garis \overline{OA} adalah:

$$F_{OA} = F_{nO} * \cos(36^\circ)$$

$$F_{OA} = 0,36 * 0,809$$

$$F_{OA} = 0,0232 \text{ N}$$

Sehingga resultan gaya interaksi pada magnet A dan magnet O, yang digambarkan dengan anak panah berwarna biru tersebut adalah:

$$F_{rA} = F_A + F_{OA}$$

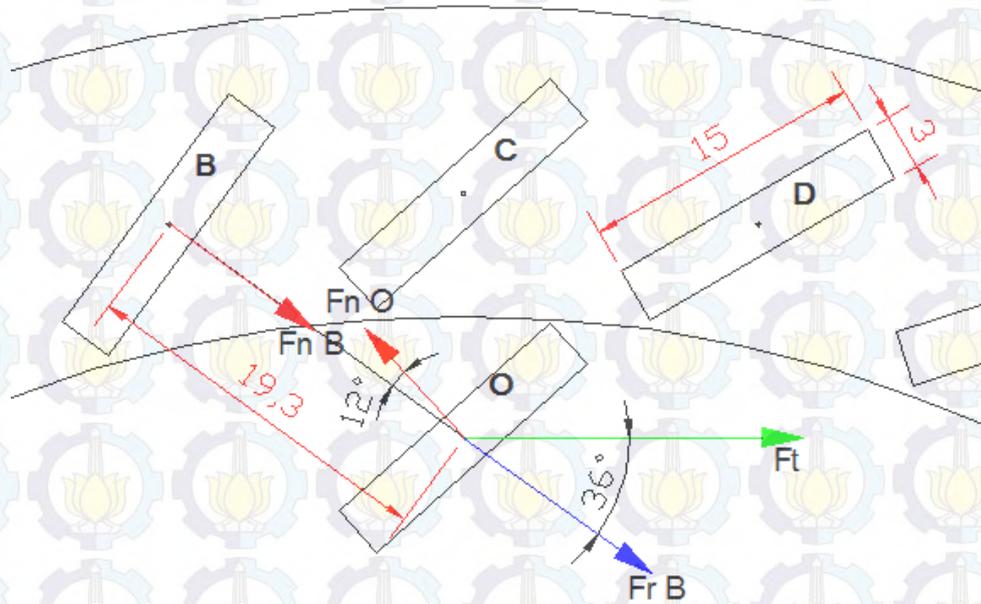
$$F_{rA} = 0,0278 \text{ N} + 0,0232 \text{ N} = \mathbf{0,0510 \text{ N}}$$

Untuk mengetahui kontribusinya pada gerakan motor, maka gaya tersebut harus diarahkan menjadi gaya tangensial F_t . Gaya tangensial yang dipengaruhi oleh magnet O dan A ini selanjutnya disebut dengan F_{tA} , yang besarnya adalah sebagai berikut:

$$F_{tA} = F_{rA} * \cos(12^\circ)$$

$$F_{tA} = 0,0510 * 0,97$$

$$F_{tA} = 0,0495 \text{ N}$$



Gambar 4.23 Penguraian Gaya Antara Magnet B dan Magnet O

Pada gambar 4.23 merupakan penguraian interaksi gaya yang terjadi pada stator B dan rotor O. Pusat gaya di magnet B dihubungkan dengan pusat gaya di magnet O sehingga membentuk garis \overline{OB} . Magnet B memiliki gaya normal F_{nB} dan magnet O memiliki gaya normal F_{nO} . Untuk menghitung gaya resultan antara interaksi gaya yang terjadi pada magnet B dan magnet O, maka F_{nB} dan F_{nO} harus disejajarkan dengan garis \overline{OB} . Besarnya gaya normal F_{nB} dan F_{nO} yang terjadi diantara magnet silinder yang identik, dirumuskan seperti persamaan 4.15 berikut ini (Vokoun, 2009):

$$F_{nB} = F_{nO} = \frac{3 \pi \mu_0}{2} \left(\frac{2B}{\mu_0} \right)^2 R^4 h^2 \frac{1}{x^4}$$

$$F_{nB} = F_{nO} = \frac{3 * 3,14 * 4 * 3,14 * 10^{-7}}{2} * \left(\frac{2 * 0,2}{4 * 3,14 * 10^{-7}} \right)^2 * 0,015^4 * 0,003^2 \frac{1}{0,0193^4}$$

$$F_{nB} = F_{nO} = 0,19703 \text{ N}$$

Besarnya gaya dari magnet B yang mempengaruhi magnet O dan sejajar dengan garis \overline{OB} adalah:

$$F_B = F_{nB} * \cos(0^\circ)$$

$$F_B = 0,19703 * 1$$

$$F_B = 0,19703 \text{ N}$$

Sedangkan gaya reaksi dari magnet O terhadap magnet B dan sejajar dengan garis \overline{OB} adalah:

$$F_{OB} = F_{nO} * \cos(12^\circ)$$

$$F_{OB} = 0,19703 * 0,97$$

$$F_{OB} = 0,1911 \text{ N}$$

Sehingga resultan gaya interaksi pada magnet B dan magnet O, yang digambarkan dengan anak panah berwarna biru tersebut adalah:

$$F_{rB} = F_B + F_{OB}$$

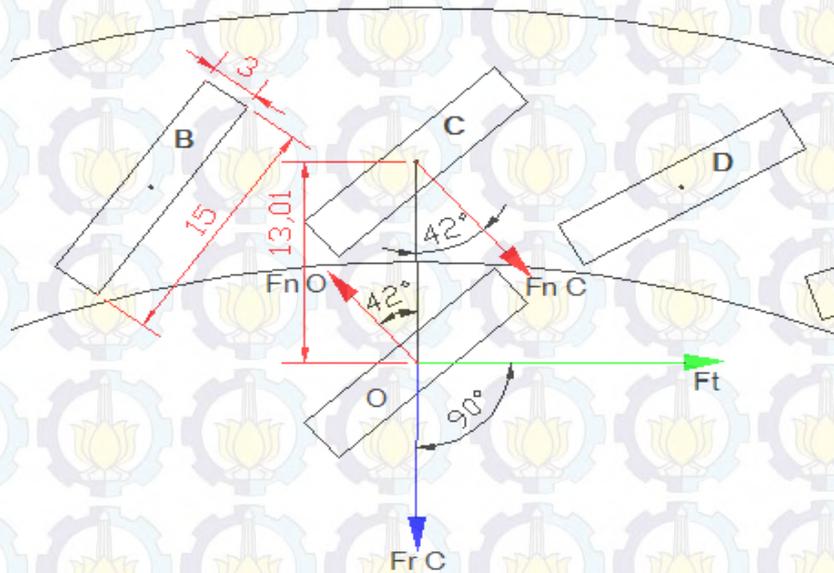
$$F_{rB} = 0,19703 \text{ N} + 0,1911 \text{ N} = \mathbf{0,3881 \text{ N}}$$

Untuk mengetahui kontribusinya pada gerakan motor, maka gaya tersebut harus diarahkan menjadi gaya tangensial F_t . Gaya tangensial yang dipengaruhi oleh magnet O dan B ini selanjutnya disebut dengan F_{tB} , yang besarnya adalah sebagai berikut:

$$F_{tB} = F_{rB} * \cos(36^\circ)$$

$$F_{tB} = 0,3881 * 0,809$$

$$F_{tB} = \mathbf{0,3140 \text{ N}}$$



Gambar 4.24 Penguraian Gaya Antara Magnet C dan Magnet O

Pada gambar 4.24 merupakan penguraian interaksi gaya yang terjadi pada stator C dan rotor O. Pusat gaya di magnet C dihubungkan dengan pusat gaya di

magnet O sehingga membentuk garis \overline{OC} . Magnet C memiliki gaya normal F_{nC} dan magnet O memiliki gaya normal F_{nO} . Untuk menghitung gaya resultan antara interaksi gaya yang terjadi pada magnet C dan magnet O, maka F_{nC} dan F_{nO} harus disejajarkan dengan garis \overline{OC} . Besarnya gaya normal F_{nC} dan F_{nO} yang terjadi diantara magnet silinder yang identik, dirumuskan seperti persamaan 4.15 berikut ini (Vokoun, 2009):

$$F_{nC} = F_{nO} = \frac{3 \pi \mu_0}{2} \left(\frac{2B}{\mu_0} \right)^2 R^4 h^2 \frac{1}{x^4}$$

$$F_{nC} = F_{nO} = \frac{3 * 3,14 * 4 * 3,14 * 10^{-7}}{2} * \left(\frac{2 * 0,2}{4 * 3,14 * 10^{-7}} \right)^2 * 0,015^4 * 0,003^2 \frac{1}{0,01301^4}$$

$$F_{nC} = F_{nO} = 0,95422 \text{ N}$$

Besarnya gaya dari magnet C yang mempengaruhi magnet O dan sejajar dengan garis \overline{OC} adalah:

$$F_C = F_{nC} * \cos(42^\circ)$$

$$F_C = 0,95422 * 0,74$$

$$F_C = 0,7061 \text{ N}$$

Sedangkan gaya reaksi dari magnet O terhadap magnet C dan sejajar dengan garis \overline{OC} adalah juga membentuk sudut 42° , sehingga nilai F_{OC} sama dengan F_C , yaitu 0,7061 N.

Sehingga resultan gaya interaksi pada magnet C dan magnet O, yang digambarkan dengan anak panah berwarna biru tersebut adalah:

$$F_{rC} = F_C + F_{OC}$$

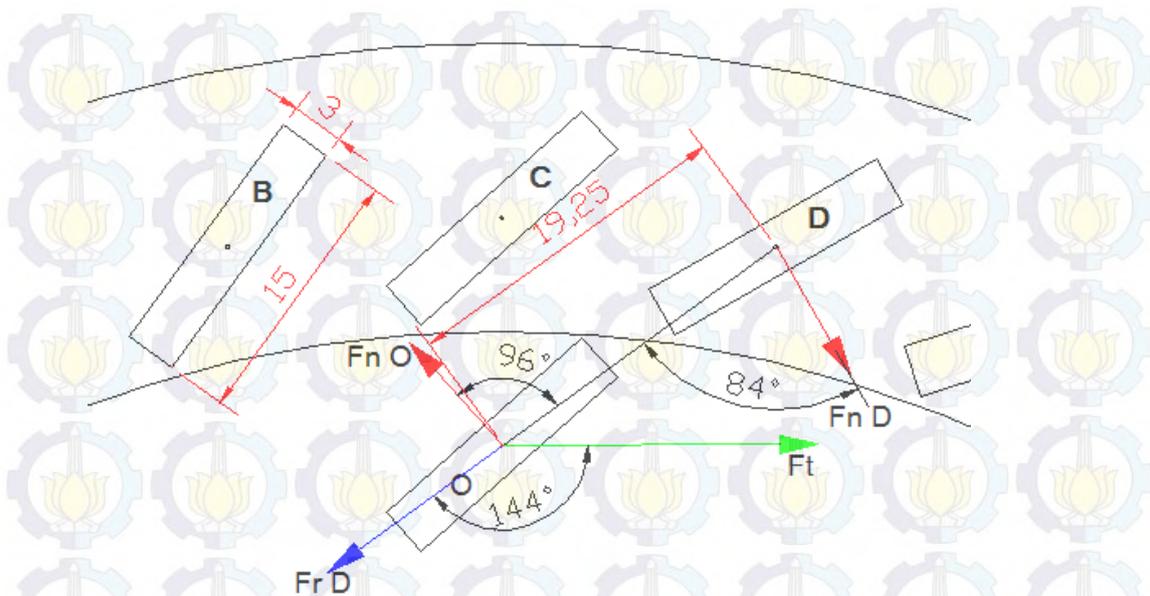
$$F_{rC} = 0,7061 \text{ N} + 0,7061 \text{ N} = \mathbf{1,4122 \text{ N}}$$

Untuk mengetahui kontribusinya pada gerakan motor, maka gaya tersebut harus diarahkan menjadi gaya tangensial F_t . Gaya tangensial yang dipengaruhi oleh magnet O dan C ini selanjutnya disebut dengan F_{tC} , yang besarnya adalah sebagai berikut:

$$F_{tC} = F_{rC} * \cos(90^\circ)$$

$$F_{tC} = \mathbf{1,4122 * 0}$$

$$F_{tC} = \mathbf{0 \text{ N}}$$



Gambar 4.25 Penguraian Gaya Antara Magnet D dan Magnet O

Pada gambar 4.25 merupakan penguraian interaksi gaya yang terjadi pada stator D dan rotor O. Pusat gaya di magnet D dihubungkan dengan pusat gaya di magnet O sehingga membentuk garis \overline{OD} . Magnet D memiliki gaya normal F_{nD} dan magnet O memiliki gaya normal F_{nO} . Untuk menghitung gaya resultan antara interaksi gaya yang terjadi pada magnet D dan magnet O, maka F_{nD} dan F_{nO} harus disejajarkan dengan garis \overline{OD} . Besarnya gaya normal F_{nD} dan F_{nO} yang terjadi diantara magnet silinder yang identik, dirumuskan seperti persamaan 4.15 berikut ini (Vokoun, 2009):

$$F_{nB} = F_{nO} = \frac{3 \pi \mu_0 (2B)^2}{2} R^4 h^2 \frac{1}{x^4}$$

$$F_{nD} = F_{nO} = \frac{3 * 3,14 * 4 * 3,14 * 10^{-7}}{2} * \left(\frac{2 * 0,2}{4 * 3,14 * 10^{-7}} \right)^2 * 0,015^4 * 0,003^2 \frac{1}{0,01925^4}$$

$$F_{nD} = F_{nO} = 0,19908 \text{ N}$$

Besarnya gaya dari magnet D yang mempengaruhi magnet O dan sejajar dengan garis \overline{OD} adalah:

$$F_D = F_{nD} * \cos(82^\circ)$$

$$F_D = 0,19908 * 0,13$$

$$F_D = 0,0259 \text{ N}$$

Sedangkan gaya reaksi dari magnet O terhadap magnet D dan sejajar dengan garis \overline{OD} adalah:

$$F_{OD} = F_{nO} * \cos(96^\circ)$$

$$F_{OD} = 0,19908 * -0,104$$

$$F_{OD} = -0,0207\text{N}$$

Sehingga resultan gaya interaksi pada magnet D dan magnet O, yang digambarkan dengan anak panah berwarna biru tersebut adalah:

$$F_{rD} = F_D + F_{OD}$$

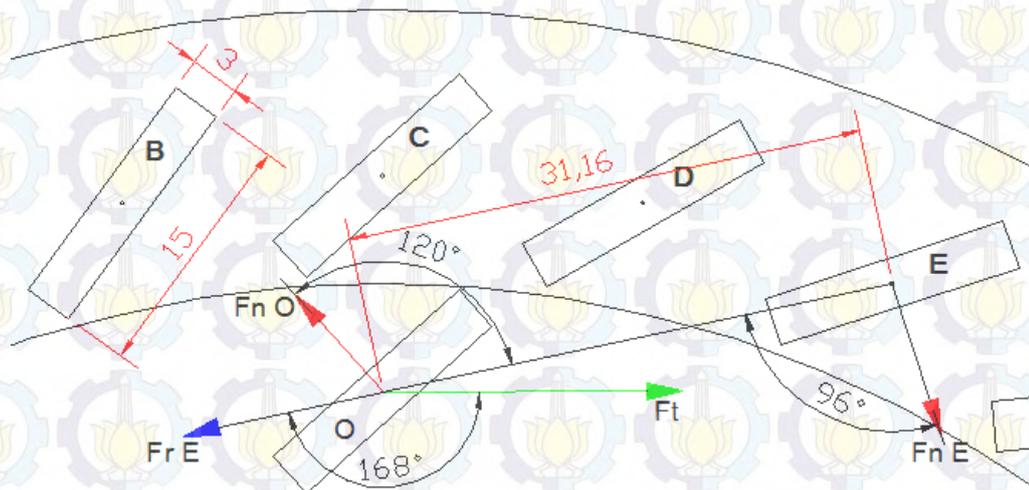
$$F_{rD} = 0,0259\text{ N} + (-0,0207)\text{ N} = \mathbf{0,0052\text{ N}}$$

Untuk mengetahui kontribusinya pada gerakan motor, maka gaya tersebut harus diarahkan menjadi gaya tangensial F_t . Gaya tangensial yang dipengaruhi oleh magnet O dan D ini selanjutnya disebut dengan F_{tD} , yang besarnya adalah sebagai berikut:

$$F_{tD} = F_{rD} * \cos(144^\circ)$$

$$F_{tD} = \mathbf{0,0052 * -0,809}$$

$$F_{tD} = \mathbf{-0,0042\text{ N}}$$



Gambar 4.26 Penguraian Gaya Antara Magnet E dan Magnet O

Pada gambar 4.26 merupakan penguraian interaksi gaya yang terjadi pada stator E dan rotor O. Pusat gaya di magnet E dihubungkan dengan pusat gaya di magnet O sehingga membentuk garis \overline{OE} . Magnet E memiliki gaya normal F_{nE} dan

magnet O memiliki gaya normal F_{nO} . Untuk menghitung gaya resultan antara interaksi gaya yang terjadi pada magnet E dan magnet O, maka F_{nE} dan F_{nO} harus disejajarkan dengan garis \overline{OE} . Besarnya gaya normal F_{nE} dan F_{nO} yang terjadi diantara magnet silinder yang identik, dirumuskan seperti persamaan 4.15 berikut ini (Vokoun, 2009):

$$F_{nB} = F_{nO} = \frac{3 \pi \mu_0}{2} \left(\frac{2B}{\mu_0} \right)^2 R^4 h^2 \frac{1}{x^4}$$

$$F_{nE} = F_{nO} = \frac{3 * 3,14 * 4 * 3,14 * 10^{-7}}{2} * \left(\frac{2 * 0,2}{4 * 3,14 * 10^{-7}} \right)^2 * 0,015^4 * 0,003^2 \frac{1}{0,03116^4}$$

$$F_{nE} = F_{nO} = 0,029N$$

Besarnya gaya dari magnet E yang mempengaruhi magnet O dan sejajar dengan garis \overline{OE} adalah:

$$F_E = F_{nE} * \cos(96^\circ)$$

$$F_E = 0,029 * (-0,104)$$

$$F_E = -0,0030N$$

Sedangkan gaya reaksi dari magnet O terhadap magnet E dan sejajar dengan garis \overline{OE} adalah:

$$F_{OE} = F_{nO} * \cos(120^\circ)$$

$$F_{OE} = 0,029 * (-0,5)$$

$$F_{OE} = -0,0145N$$

Sehingga resultan gaya interaksi pada magnet E dan magnet O, yang digambarkan dengan anak panah berwarna biru tersebut adalah:

$$F_{rE} = F_E + F_{OE}$$

$$F_{rE} = -0,0030N + (-0,0145) N = -0,0175N$$

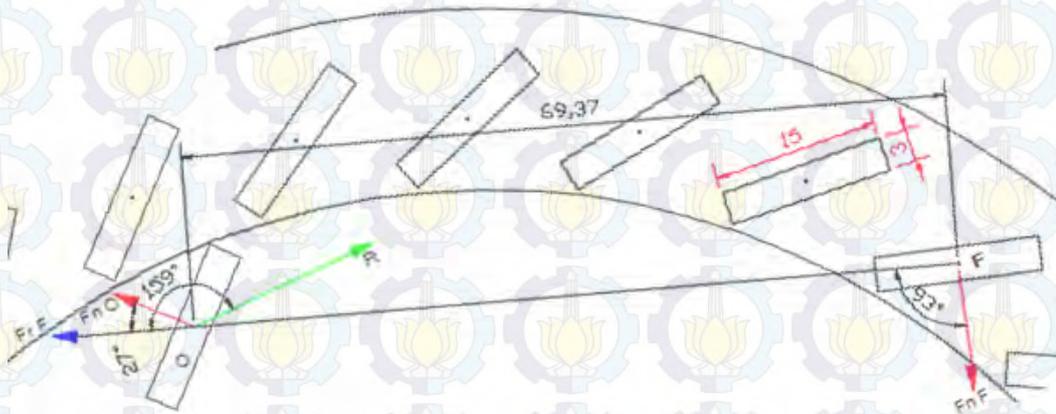
Untuk mengetahui kontribusinya pada gerakan motor, maka gaya tersebut harus diarahkan menjadi gaya tangensial F_t . Gaya tangensial yang dipengaruhi oleh magnet O dan E ini selanjutnya disebut dengan F_{tE} , yang besarnya adalah sebagai berikut:

$$F_{tE} = F_{rE} * \cos(168^\circ)$$

$$F_{tE} = -0,0175 * (-0,97)$$

$$F_{tE} = 0,0170 \text{ N}$$

Selain menghitung gaya interaksi magnet pada 5 magnet stator (A, B, C, D dan E) yang saling berdekatan terhadap magnet rotor O, juga akan dihitung gaya interaksi magnet stator (F) yang jaraknya berjauhan dengan magnet rotor O. Arah gaya yang ditimbulkan oleh kedua magnet tersebut diperlihatkan pada gambar 4.27.



Gambar 4.27 Penguraian Gaya Antara Magnet F dan Magnet O

Pada gambar 4.27 merupakan penguraian interaksi gaya yang terjadi pada stator F dan rotor O. Pusat gaya di magnet F dihubungkan dengan pusat gaya di magnet O sehingga membentuk garis \overline{OF} . Magnet F memiliki gaya normal F_{nF} dan magnet O memiliki gaya normal F_{nO} . Untuk menghitung gaya resultan antara interaksi gaya yang terjadi pada magnet F dan magnet O, maka F_{nF} dan F_{nO} harus disejajarkan dengan garis \overline{OF} . Besarnya gaya normal F_{nF} dan F_{nO} yang terjadi diantara magnet silinder yang identik, dirumuskan seperti persamaan 4.15 berikut ini (Vokoun, 2009):

$$F_{nF} = F_{nO} = \frac{3 \pi \mu_0 \left(\frac{2B}{\mu_0}\right)^2 R^4 h^2}{2} \frac{1}{x^4}$$

$$F_{nF} = F_{nO} = \frac{3 * 3,14 * 4 * 3,14 * 10^{-7}}{2} * \left(\frac{2 * 0,2}{4 * 3,14 * 10^{-7}}\right)^2 * 0,015^4 * 0,003^2 \frac{1}{0,06937^4}$$

$$F_{nF} = F_{nO} = 0,00118 \text{ N}$$

Besarnya gaya dari magnet F yang mempengaruhi magnet O dan sejajar dengan garis \overline{OF} adalah:

$$F_F = F_{nF} * \cos(93^\circ)$$

$$F_F = 0,00118 * (-0,05)$$

$$F_F = -0,0001 \text{ N}$$

Sedangkan gaya reaksi dari magnet O terhadap magnet F dan sejajar dengan garis \overline{OF} adalah:

$$F_{OF} = F_{nO} * \cos(27^\circ)$$

$$F_{OF} = 0,00118 * 0,89$$

$$F_{OF} = 0,0011 \text{ N}$$

Sehingga resultan gaya interaksi pada magnet F dan magnet O, yang digambarkan dengan anak panah berwarna biru tersebut adalah:

$$F_{rF} = F_F + F_{OF}$$

$$F_{rF} = -0,0001 \text{ N} + 0,0011 \text{ N} = \mathbf{0,0010 \text{ N}}$$

Untuk mengetahui kontribusinya pada gerakan motor, maka gaya tersebut harus diarahkan menjadi gaya tangensial F_t . Gaya tangensial yang dipengaruhi oleh magnet O dan F ini selanjutnya disebut dengan F_{tF} , yang besarnya adalah sebagai berikut:

$$F_{tF} = F_{rF} * \cos(159^\circ)$$

$$F_{tF} = 0,0010 * (-0,93)$$

$$F_{tF} = \mathbf{-0,0009 \text{ N}}$$

Nilai tersebut sangat kecil jika dibandingkan dengan gaya tangensial yang dihasilkan oleh interaksi masing-masing kelima magnet stator yang saling berdekatan dengan magnet rotor O. Oleh sebab itu, maka gaya interaksi yang disebabkan oleh magnet stator yang letaknya berjauhan dengan magnet rotor O bisa diabaikan. Sehingga di dalam satu grup magnet stator dan rotor, satu magnet rotor hanya akan dipengaruhi oleh lima magnet stator yang saling berdekatan.

Oleh sebab itu, maka seluruh gaya tangensial yang mempengaruhi rotor oleh kelima stator tersebut besarnya adalah sebagai berikut:

$$F_{t\text{-total}} = F_{tA} + F_{tB} + F_{tC} + F_{tD} + F_{tE}$$

$$F_{t\text{-total}} = 0,0495 + 0,3140 + 0 + (-0,0042) + 0,0170$$

$$F_{t\text{-total}} = \mathbf{0,3763 \text{ N}}$$

Nilai tersebut adalah untuk satu grup magnet stator dan rotor yang terdiri lima magnet stator dan 1 magnet rotor, padahal dalam motor ini terdiri dari enam

magnet rotor. Karena geometri pada motor ini bersifat simetri, sehingga besarnya gaya tangensial yang terjadi pada setiap rotor adalah sama. Sehingga besarnya gaya tangensial pada motor secara keseluruhan adalah sebagai berikut:

$$F_{t-motor} = 6 \times F_{t-total}$$

$$F_{t-motor} = 6 \times 0,3763$$

$$F_{t-motor} = 2,25 \text{ N}$$

1.6 Hubungan Antara Fluks Magnetic dan Torsi yang Dihasilkan

Dalam penelitian ini, yang diberikan perhatian lebih adalah fluks magnetik dan torsi yang dihasilkan sebagai akibat dari berbagai variasi terhadap desain motor bertenaga magnet permanen yang telah dilakukan. Torsi yang dihasilkan dianalisis dengan menggunakan *maxwell stress method*, yaitu dengan menggunakan persamaan 3.42 Berikut ini:

$$T = \frac{L_i}{\mu_0} \sum_i r^2 \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} B_{ri} B_{\theta i} d\theta$$

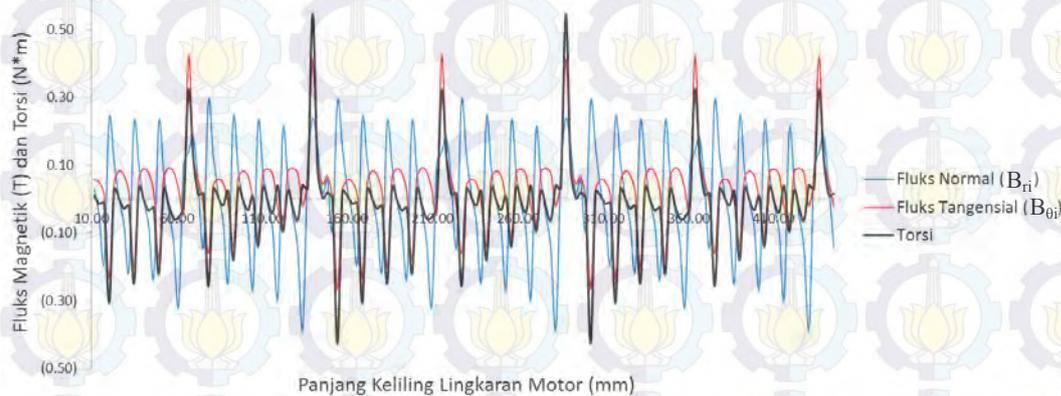
Persamaan tersebut menunjukkan bahwa torsi yang dihasilkan akan beragam pada setiap pergeseran sudut θ pada sepanjang keliling motor. Dan torsi dari seluruh sistem adalah total pejumlahan dari besaran torsi yang dihasilkan pada setiap titiknya. Persamaan tersebut jika diselesaikan menjadi solusi numerik adalah sebagai berikut:

$$T = \frac{L_i}{\mu_0} \sum_i r^2 B_{ri} B_{\theta i} (\theta_{i+1} - \theta_i)$$

Dari persamaan tersebut, diketahui bahwa besarnya torsi akan dipengaruhi oleh panjang armature L_i yang dalam motor ini merupakan diameter dari magnet, yaitu 15 mm, permeabilitas relatif μ_0 yang besarnya adalah $4\pi * 10^{-7}$, jari-jari motor $r = 68$ mm dan fluks magnetik yang nilainya berubah-ubah sesuai dengan posisinya terhadap jari-jari B_{ri} dan terhadap sudut $B_{\theta i}$.

Grafik 4.28 Menunjukkan hubungan antara B_{ri} dan $B_{\theta i}$ dengan torsi yang dihasilkan. Pada grafik tersebut terlihat torsi yang dihasilkan sangat beragam, mengikuti besarnya B_{ri} dan $B_{\theta i}$. Fluks magnetik pada sekitar rotor yang berjumlah enam tersebut mengalami peningkatan karena jarak interaksi antara

magnet rotor dan stator cukup dekat. Peningkatan jumlah fluks ini menghasilkan torsi yang besar pula. Pada motor yang didesain ini juga menghasilkan torsi yang besarnya negatif, ini merupakan gaya torsi yang mengurangi kekuatan torsi yang dihasilkan atau bahkan menghilangkannya. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa torsi yang besarnya negatif malah lebih banyak daripada torsi yang bernilai positif. Hal ini akan sangat menyulitkan bagi motor untuk dapat berputar dengan lancar.



Gambar 4.28 Grafik hubungan antara B_{r_i} dan B_{θ_i} dengan torsi yang dihasilkan

1.7 Simulasi Pada Desain Motor Listrik

Pada sub-bab sebelumnya telah dilakukan berbagai simulasi dan analisa untuk mendapatkan desain dari motor bertenaga magnet permanen berdasarkan patent dari perendev motor. Dari hasil simulasi dan analisa tersebut, didapatkan bahwa meskipun sudah didapatkan desain yang menghasilkan torsi maksimal pada desain tersebut, namun torsi yang dihasilkan masih terlalu kecil sehingga belum mampu untuk menghasilkan perputaran motor secara kontinyu. Hal ini menguatkan hasil penelitian Ignatius dan Derito Nanda bahwa beberapa desain yang dikembangkan dan telah diuji secara eksperimen berdasarkan prinsip perendev motor tidak bisa menghasilkan perputaran seperti yang diharapkan.

Selanjutnya akan dilakukan simulasi dan analisa pemanfaatan magnet permanen menggantikan peran kumparan pada motor bertenaga listrik yang telah banyak digunakan dan terus dikembangkan oleh peneliti-peneliti. Yang menjadi objek pada simulasi ini adalah motor magnet permanen yang masih menggunakan energi listrik sebagai sumber tenaganya. Namun kemudian pada bagian

kumparannya diganti dengan magnet permanen. Sehingga antara stator dan rotornya merupakan magnet permanen semua. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui bagaimana efek yang terjadi setelah penggantian kumparan tersebut menjadi magnet permanen. Sehingga bisa diketahui apakah bisa desain yang sudah dikembangkan tersebut, digunakan untuk motor bertenaga magnet permanen tanpa dialiri listrik.

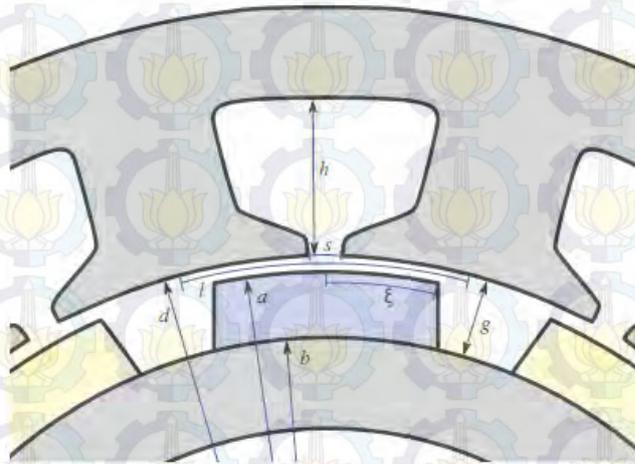
Desain dari motor perendev adalah mirip dengan motor listrik jenis *surface mounted permanen magnet motor* (SMPM). Oleh sebab itu, maka motor listrik yang akan disimulasikan pada penelitian ini adalah jenis tersebut. Kemudian ditambahkan jenis *bearingless brushless multipole motor* sebagai pembandingan.

Untuk motor jenis SMPM akan diambil desain motor yang sudah dikembangkan oleh Baudart (Baudart, 2011) dan Melfi (Melfi, 2008). Motor listrik SMPM ini adalah termasuk dalam jenis motor sinkron. Pada motor sinkron, membutuhkan suplai listrik arus bolak-balik (AC) tiga fasa untuk membangkitkan fluks medan putar stator (B_s) dan suplai listrik arus searah (DC) untuk membangkitkan medan rotor (B_r), namun sekarang sudah banyak dikembangkan motor sinkron yang rotornya sudah digantikan dengan magnet permanen, sehingga hanya statornya saja yang masih menggunakan kumparan untuk menghasilkan medan rotor (B_r).

Pada saat kumparan pada stator dihubungkan dengan sumber tegangan tiga fasa maka akan menghasilkan medan putar homogen (B_s). Sedangkan rangkaian rotor mendapat suplai dari sumber DC yang dihubungkan melalui slip ring dan sikat. Arus DC pada rotor ini menghasilkan medan magnet rotor (B_r) yang tetap. Kutub medan rotor mendapat tarikan dari kutub medan putar stator hingga turut berputar dengan kecepatan yang sama (sinkron).

Pada saat awal penyalaan motor sinkron, motor ini membutuhkan *prime-mover* yang memutar rotor hingga kecepatan sinkron agar terjadi coupling antara medan putar stator (B_s) dan medan rotor (B_r) karena motor sinkron menghasilkan torsi awal yang rendah. *Prime-mover* pada motor sinkron biasanya disuplai oleh arus searah (DC), dan ketika motor mencapai kecepatan sinkron, maka arus DC digantikan oleh arus AC dan diberikan kepada belitan stator (Klempner, 2004).

Gambar 4.29 berikut ini merupakan desain dari motor SMPM yang telah dikembangkan oleh Baudart:



Gambar 4.29 Desain motor SMPM yang dikembangkan oleh Baudart

Sumber: (Baudart, 2011)

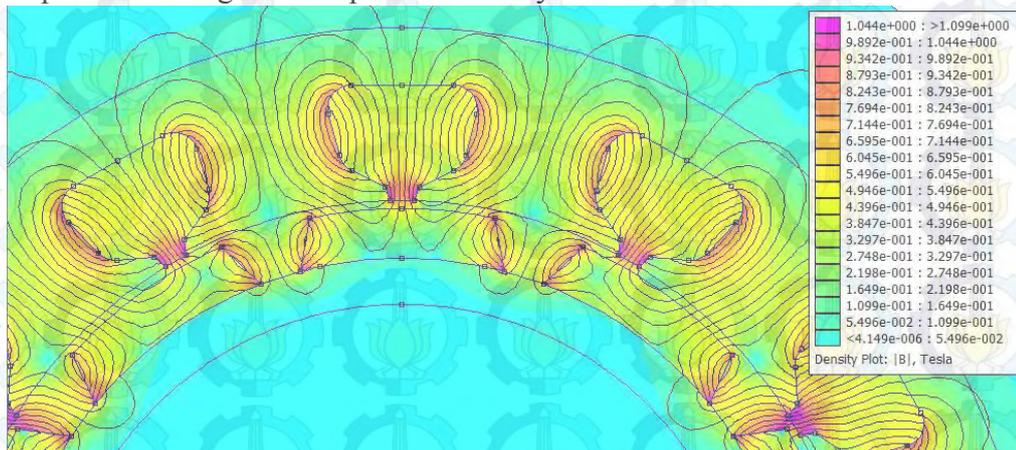
Sedangkan tabel 4.2 berikut ini merupakan parameter desainnya. Pada motor sinkron ini, rotornya tidak menggunakan kumparan lagi, melainkan sudah digantikan oleh magnet permanen. Untuk mengetahui apakah konsep dari motor perendev bisa diterapkan pada motor sinkron ini, yaitu dengan memanfaatkan gaya tolak dari magnet yang disusun sebagai stator dan rotornya sekaligus, maka kumparan stator pada motor ini diganti dengan magnet permanen juga. Sehingga didapatkan desain motor yang stator dan rotornya menggunakan magnet permanen semua, dan sudah tidak lagi menggunakan kumparan.

Tabel 4.2 Spesifikasi Motor SMPM yang dikembangkan oleh Baudart

Parameter design	symbol	value
Airgap outer radius	d	39 mm
Reel airgap inner radius	a	38,3 mm
Apparent airgap inner radius	b	34 mm
Magnet width	2	24°
Slot opening	s	2 mm
Slot depth	h	10 mm
Apparent gap	g	5 mm
Rotor pole pitch	l	20,4 mm

Sumber: (Baudart, 2011)

Setelah dilakukan perhitungan numerik dengan bantuan software FEMM 4.2 didapatkan distribusi fluks magnetik yang bekerja pada motor seperti dapat dilihat pada gambar 4.30. Torsi yang dihasilkan oleh desain ini adalah sebesar 0,0028 N*m. Dengan torsi yang kecil seperti itu, maka motor ini tidak akan mampu untuk menghasilkan putaran kontinyu.



Gambar 4.30 Sebaran Fluks Magnetik pada Desain Motor SMPM

Kecilnya torsi yang dihasilkan tersebut, dikarenakan oleh perbedaan prinsip kerja pada motor perendev dan motor sinkron. Berdasarkan Mike Brady, perputaran motor akan terjadi dikarenakan magnet pada rotor akan tertolak oleh magnet pada stator dengan membentuk sudut kemiringan tertentu (Brady, 2006). Sedangkan motor sinkron akan berputar karena medan magnet rotor tertarik dengan medan magnet pada stator, sehingga keduanya terkunci. Karena medan magnet pada statornya membentuk medan putar, akibat dari arus AC tiga fasa, maka rotor yang sudah terkunci pada stator akan ikut putaran medan magnet tanpa mengalami slip (Klempner, 2004). Oleh karena itu, pada desain motor SMPM ini, arah sudut stator dan rotornya tidak perlu membentuk sudut tertentu, cukup hanya mengarah kearah pusat lingkaran.

Pada gambar 4.31 berikut ini merupakan grafik hubungan antara fluks magnetik dengan torsi yang dihasilkan. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa fluks magnetik yang timbul pada sepanjang keliling motor tidak beraturan, hal ini dikarenakan rumitnya geometri dari magnet pada stator. Sedangkan torsi yang dihasilkan lebih banyak yang bernilai negatif, hal ini dikarenakan desain motor ini dirancang untuk menghasilkan gaya tarik menarik antara stator dan rotor sehingga keduanya akan saling mengunci. Ketika sudah terkunci, apabila terjadi

medanmagnet putar pada statornya, maka secara otomatis rotornya akan ikut berputar. Medan putar pada stator hanya akan terbentuk ketika stator dialiri arus AC tiga fasa, sedangkan pada simulasi yang telah dilakukan ini, tidak menggunakan arus AC, melainkan menggunakan magnet permanen. Akibatnya tidak terbentuk medan magnet putar, sehingga rotornya terkunci dengan statornya yang diam, sehingga rotornya tidak akan berputar.



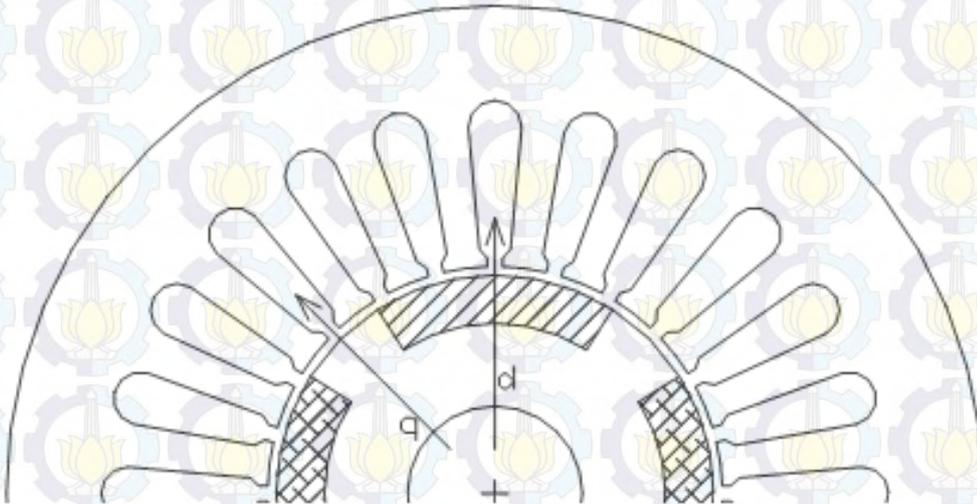
Gambar 4.31 Hubungan antara Fluks Magnetik dan Torsi yang dihasilkan pada motor SMPM

Untuk memastikan hasil analisa perhitungan numerik dengan simulasi yang telah didapatkan, maka dilakukan simulasi lagi dengan jenis motor yang sama namun dengan desain yang berbeda. Motor yang akan disimulasikan lagi adalah motor SMPM yang dikembangkan oleh Melfi (Melfi, 2008). Desain motornya diperlihatkan pada gambar 4.31.

Pada gambar tersebut, diketahui bahwa secara desain hampir sama dengan motor SMPM yang dikembangkan oleh Baudart. Tabel 4.3 merupakan spesifikasi dari motor SMPM yang dikembangkan oleh Melfi:

Setelah dilakukan simulasi, diketahui bahwa torsi yang dihasilkan adalah sebesar 0,00217 N*m. Nilai tersebut sangat kecil bila dibandingkan dengan torsi aslinya jika menggunakan suplai energi listrik, yaitu sebesar 298 Nm. Hal ini menguatkan hasil simulasi sebelumnya bahwa konsep dari perendev motor tidak bisa diterapkan pada motor listrik yang sudah berkembang saat ini karena perbedaan prinsip kerja. Gambar 4.33 merupakan penampakan distribusi fluks

magnetik yang terjadi pada motor. Distribusi fluks magnetik tersebut bisa memberikan gambaran terhadap gaya-gaya yang bekerja. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa terdapat gaya dorong di kanan kiri rotor yang sifatnya mengunci rotor pada posisinya semula. Sehingga gaya-gaya tersebut tidak dapat menghasilkan perputaran pada rotornya karena bersifat saling menghilangkan.

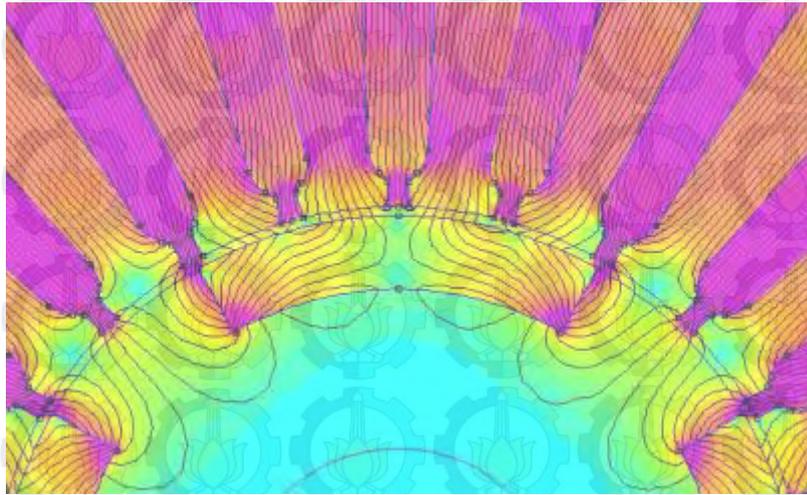


Gambar 4.32 Desain dari *surface permanent magnet motor*
 Sumber: Melfi, Michael and S. David Rogers. 2008. Jurnal IEEE

Tabel 4.3 Data Performansi dari motor SMPM yang dikembangkan Melfi

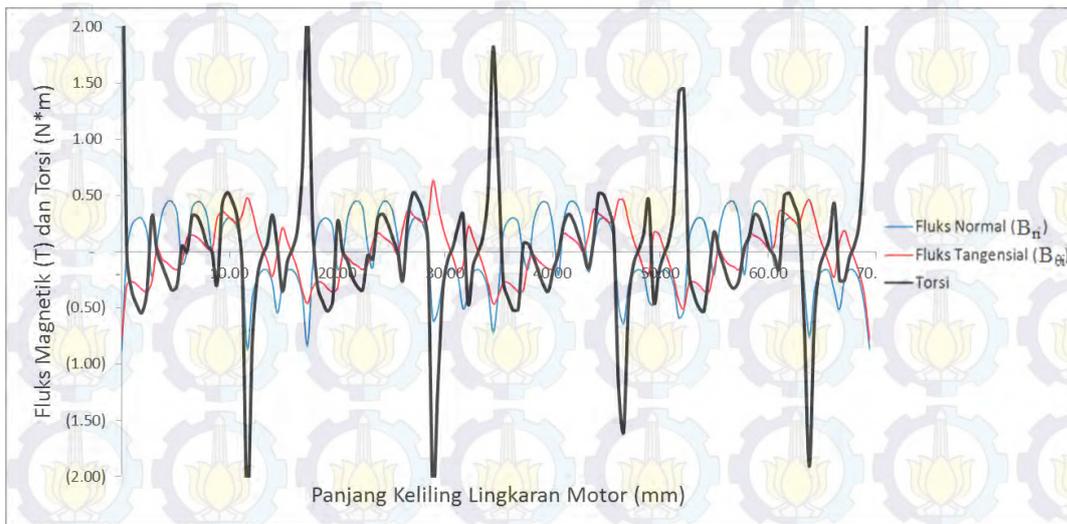
Performansi	Nilai
Horsepower (heat run)	75,4 Hp
Volts	405 v
Base frequency	120 Hz
Full load amps	85 a
Full load speed	1800 rpm
Full load efficiency	96,2%
Full load power factor	98,1%
Full load torque	220 lb-ft (298 Nm)
Total motor losses	2,23 kW
Temperature rise by resistance	70,7°C

Sumber: Melfi, Michael and S. David Rogers. 2008. Jurnal IEEE



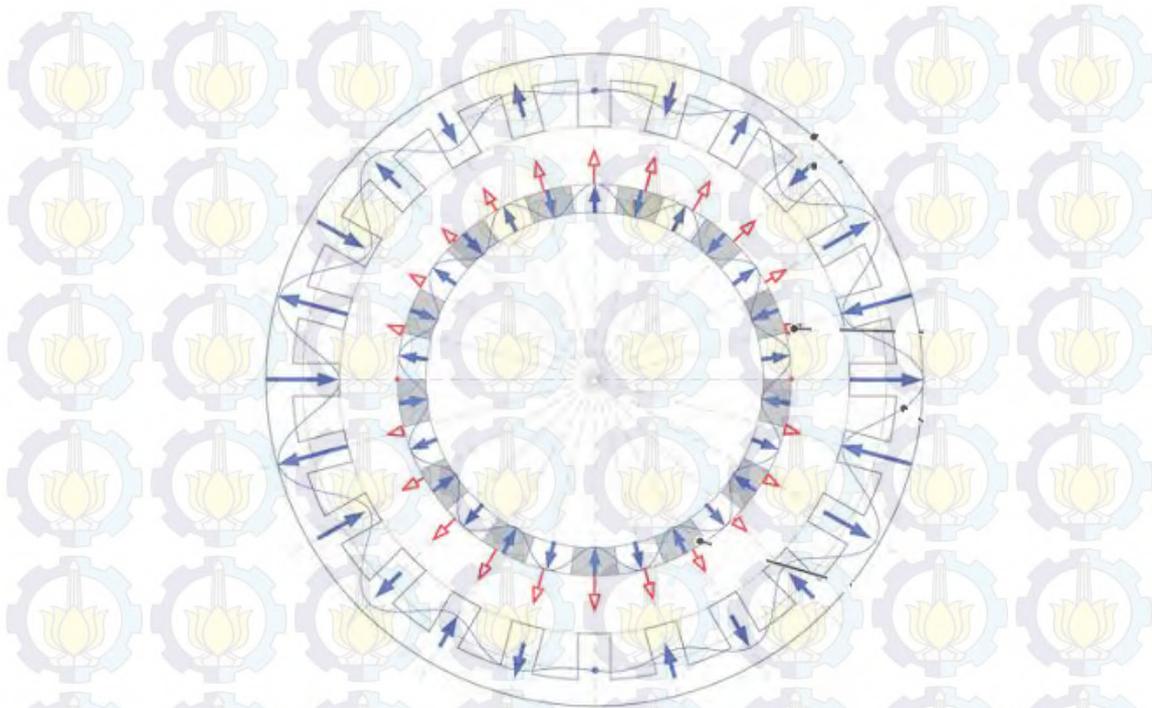
Gambar 4.33 Sebaran Fluks Magnetik Pada Desain Motor yang Dikembangkan Melfi

Pada gambar 4.34 berikut ini merupakan grafik hubungan antara fluks magnetik dengan torsi yang dihasilkan. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa torsi-torsi yang terbentuk pada sepanjang keliling lingkaran saling menghilangkan satu dengan yang lainnya, sehingga resultan dari torsinya menjadi sangat kecil.



Gambar 4.34 Hubungan fluks magnetik dan torsi yang dihasilkan pada desain motor yang dikembangkan oleh Melfi

Sedangkan untuk jenis *bearingless brushless multipole motor* diambil desain motor yang telah dikembangkan oleh Zurcher (Zurcher, 2009). Gambar 4.35 merupakan desain dari *bearingless brushless multipole motor*:



Gambar 4.35 Desain dari *bearingless brushless multipole motor*.

Sumber: Zurcher, 2012

Tabel 4.4 Parameter Desain dari *Bearingless Brushless Multipole Motor*

Parameter of Design	Symbol	Value
Number of stator teeth / slot	q	24
Number of drive teeth	q_{drv}	12
Number of bearing teeth	q_{brg}	12
Number of rotor poles	$2 \cdot p$	26
Number of drive phases	m_{brg}	3
Number drive phases	m_{drv}	3
Target maximum rotational speed	$n_{r,max}$	5000 rpm
Permanen magnet length	l_{magnet}	10 mm
Stator iron height	h_{stator}	40 mm
Stator outer diameter	d_{stator}	270 mm
Rotor outer diameter	d_{rotor}	200 mm
Mechanical airgap	δ	2
Torque max	T_{max}	10,74 Nm

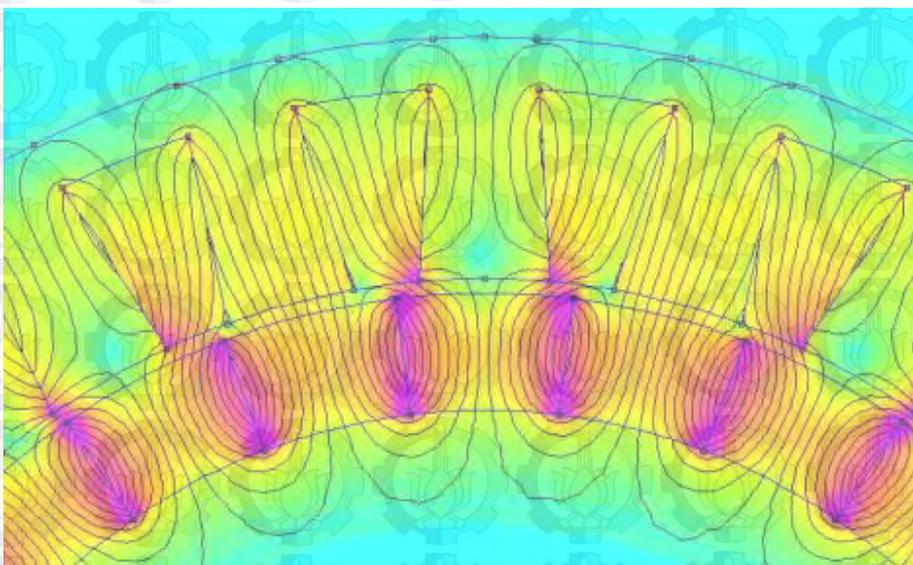
Sumber: Zurcher, 2012

Pada desain tersebut, rotornya menggunakan magnet permanen yang arah magnetnya disusun berselang-seling seperti terlihat pada gambar 4.25. Sedangkan statornya menggunakan kumparan. Pada *bearingless brushless multipole motor*,

kumparannya bertugas untuk menghasilkan gaya torsi yang akan memutar motor dan gaya suspensi radial yang berguna untuk menggantikan fungsi bearing (Zurcher, 2009).

Seperti pada simulasi sebelumnya, maka kumparan yang terdapat pada stator digantikan dengan magnet permanen. Setelah dilakukan simulasi, diketahui bahwa torsi yang dihasilkan adalah sebesar $0,096 \text{ N}\cdot\text{m}$. Nilai tersebut juga sangat kecil bila dibandingkan dengan torsi aslinya jika menggunakan suplai energi listrik, yaitu sebesar $10,74 \text{ Nm}$. Hal ini juga senada dengan hasil simulasi sebelumnya, yaitu bahwa konsep dari perendev motor tidak bisa diterapkan pada *bearingless brushless multipole motor*. Hal ini juga dikarenakan oleh perbedaan prinsip kerja.

Gambar 4.36 merupakan penampakan distribusi fluks magnetik yang terjadi pada motor. Sedangkan pada gambar 4.37 berikut ini merupakan grafik hubungan antara fluks magnetik dengan torsi yang dihasilkan. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa torsi-torsi yang terbentuk pada sepanjang keliling lingkaran banyak yang bernilai negatif sehingga akan menghilangkan gaya torsi yang terbentuk, sehingga resultan dari torsinya menjadi sangat kecil.



Gambar 4.36 Sebaran Fluks Magnetik Pada Desain *Bearingless Brushless Multipole Motor*



Gambar 4.37 Hubungan fluks magnetik dan torsi yang dihasilkan pada desain *Bearingless Brushless Multipole Motor*

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dalam penelitian ini adalah:

1. Telah dilakukan simulasi terhadap desain motor bertenaga magnet permanen dengan berbagai variasi parameter pada satu model motor bertenaga magnet permanen berdasarkan patent dari motor perendev. Berdasarkan simulasi tersebut, didapatkan desain motor bertenaga magnet permanen yang bisa menghasilkan torsi sebesar 1,3383 N*m. Berdasarkan analisa yang telah dilakukan, torsi tersebut tidak mampu untuk menghasilkan putaran secara kontinyu pada motor.
2. Telah dilakukan simulasi kepada desain motor listrik, dengan mengganti kumparan pada stator dengan magnet permanen. Berdasarkan hasil simulasi dan analisa yang telah dilakukan, torsi yang dihasilkan pada motor tersebut juga sangat kecil sehingga tidak bisa menghasilkan putaran pada motor. Hal tersebut terjadi dikarenakan perbedaan prinsip kerja antara motor perendev dan motor listrik yang telah banyak digunakan dan dikembangkan.
3. Berdasarkan hal tersebut, maka didapatkan sebuah kesimpulan bahwa magnet permanen tidak bisa digunakan untuk menggerakkan motor jika tidak mendapatkan suplai sumber tenaga dari arus listrik, baik diterapkan pada desain motor seperti pada konsep motor perendev maupun pada desain motor listrik yang telah banyak digunakan dan dikembangkan.

5.2 Saran

Saran ini khususnya ditujukan kepada peneliti yang tertarik untuk meneruskan penelitian ini, yaitu disarankan bahwa; Simulasi dalam penelitian ini masih terbatas pada desain motor yang bisa sifatnya simetris sehingga bisa dianalisis dalam 2D. Sedangkan masih banyak konsep motor yang serupa dengan perendev motor yang bentuknya tidak simetris sehingga simulasi harus dilakukan dalam 3D. Desain yang memerlukan simulasi dalam 3D yaitu desain yang menggunakan model v-gate seperti yang dikembangkan oleh George Soukup.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, Ahmad Radikal. *Analysis of Magnetik Energi on Permanent Magnets as Mecha-Magnetik Treatment*. Seminar Nasional Fisika 2011. Pusat Penelitian Fisika-LIPI. Serpong, 12-13 Juli 2011.
- Allan, D. Sterling. 2013. *Magnet Motor*. New Energy System Trust. <http://peswiki.com/index.php/Directory:MotorMagnet>. Diakses tanggal 10 Maret 2013.
- Bobbio, S. 1999. *Electrodynamics of Materials*, Academic Press, San Diego.
- Brady, Mike. (2006). Patent No. WO 2006/045333 AI. Germany.
- Gieras, Jacek F. 2010. *Permanent Magnet Technology, Design and Application*. United States: CRC Press.
- Halliday, David; Robert Resnick; Jearl Walker. 2011. *Fundamentals of Physics Extended, 9th Edition*. Wiley.
- Handayanu. 2006. *Pengantar Metode Elemen Hingga*. Diktat Mata Kuliah. Jurusan Teknik Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- K. Hono and H. Sepehri-Amin. *Strategy For High-Coercivity Nd-Fe-B Magnets*. Elsevier Scripta Materialia, vol. 67, pp. 530-535. July 2012.
- Klemptner, Geoff. 2004. *Operation and Maintenance of Large Turbo Generators, Chapter I Principles Of Operation Of Synchronous Machines*. ISBN 0-471-61447-5. John Wiley & Sons, Inc.
- Kraus, John D. 1991. *Electromagnetics, Fourth Edition*. Mc Graw Hill. New York, USA.
- Manninen, Aino. 2012. *Evaluation of the effects of design choices on surface mounted permanent magnet machines using an analytical dimensioning tool*. Master's Thesis in the Aalto-University School Of Electrical Engineering.
- Meeker, D.C. *Finite Element Method Magnetics, Version 4.2 32 bit (15Nov2013Build)*

- Melfi, Michael and S. David Rogers. *Permanent-Magnet Motors for Energy Savings in Industrial Applications*. IEEE Transactions On Industry Applications, vol. 44, no. 5, pp. 1360-1366, Sept./Oct. 2008. Standard
- MMPA Standard. *Specifications for Permanent Magnet Materials*. 100-00, Aug. 1990.
- Nanda, Derito. 2010. *Pembuatan Motor Magnet Dengan Memanfaatkan Energi Pada Magnet Permanent Sebagai Penggerak*. Skripsi Tidak Dipublikasikan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya
- Proca, Amuliu Bogdan. 2003. *Analytical Model for Permanent Magnet Motors With Surface Mounted Magnets*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18, No. 3, September 2003.
- Rainaldo. 2007. *Pemodelan Objek Dua Dimensi Dengan Metode Elemen Hingga Untuk Tomografi Optik*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Fisika ITB. Bandung.
- Sarma, Mulukutla S. 1976. *Magnetostatic field computation by finite element formulation*. Electrical and Computer Engineering Faculty Publications. Northeastern University.
- Sawitri, Dyah. *Design Of Radial Flux Magnetics (RFM) Type Low Round Dc Generator Made Of Barrium Ferite Using Finite Element Methode Magnetics (FEMM) Software*. Article of journal Teknik Fisika Vol. 5 No. 2, Juni 2010.
- Sears, Zemansky and Young. 1999. *University Physics*, 12th Ed
- Soukup, George (2008). Request Patent No. 10 2008 056 399. Germany.
- Subiantoro, Ignatius Bagus. 2011. *Rancang Bangun Magnetik Power Motor Sebagai Penggerak Mula Sistem Charging Pada Kendaraan Tempur Bawah Air*. Skripsi Tidak Dipublikasikan. STTAL KOBANGDIKAL. Surabaya.
- Vokoun, David, Marco Beleggia, Ludek Heller, Petr Sittner. *Magnetostatic interactions and forces between cylindrical permanent magnets*. Elsevier. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 321, Issue 22, November 2009, Pages 3758-3763.
- Waide, Paul. 2011. *Energy Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor Driven Systems*. France: International Energy Agency.
- Xia Li, Ling Xia, Wufan Chen, Feng Liu, Stuart Crozier, Dexin Xie. *Finite element analysis of gradient z-coil induced eddy currents in a permanent*

MRImagnet. Elsevier Journal of Magnetic Resonance, vol. 208, pp. 148–155. November 2010.

Yildiz, Muammer (2009). Patent No. WO2009019001 A3. Germany.

Zurcher, F. *Motor Torque and Magnetic Levitation Force Generation in Bearingless Brushless Multipole Motors*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 17, No. 6, pp. 1088-1097, December 2012.

Zurcher, F. *Principles of Magnetic Levitation Force and Motor Torque Generation by Superposition of Harmonics in Bearingless Brushless Motors*. IECON 2009 Proceedings.