



UNIVERSITAS INDONESIA

**DISAIN MAP EFFISIENSI PMSM MENGGUNAKAN
METODE QUASI STATIK**

SKRIPSI

ARYO BODROSENO

1206314705

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

DEPOK

DESEMBER 2015



UNIVERSITAS INDONESIA

**DISAIN MAP EFFISIENSI PMSM MENGGUNAKAN
METODE QUASI STATIK**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik

ARYO BODROSENO

1206314705

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

KEKHUSUSAN KENDALI

DEPOK

DESEMBER 2015

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Aryo Bodroseno

NPM : 1206314705

Tanda Tangan :



Tanggal : Desember 2015

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Aryo Bodroseno
NPM : 1206314705
Program Studi : Sarjana Teknik Elektro
Judul Skripsi : Disain Map Efisiensi PMSM Menggunakan
Metode Quasi Statik

Telah berhasil dipertahankan di hadapan dewan penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Abdul Halim, B.Eng.,M.Eng.

Penguji 1 : Dr. Ir. Feri Yusivar, M.Eng

Penguji 2 : Dr. Ir. Ridwan Gunawan, M.T..

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 17 Desember 2015

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala limpahan rahmat, inayah, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi dengan judul “Disain Map Effisiensi PMSM Menggunakan Metode Quasi”. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Skripsi ini dapat diselesaikan karena adanya berbagai bantuan dari banyak pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Dr. Abdul Halim M.Eng, selaku dosen pembimbing yang menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya hingga skripsi ini dapat diselesaikan.
2. Orangtua yang selalu mendoakan agar skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik dan lancar.
3. semua teman-teman yang banyak membantu selama menjalani penyusunan skripsi.

Mohon maaf atas kekurangan dalam skripsi ini. Semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas kebaikan semua pihak yang tulus membantu menyelesaikan skripsi ini. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi terutama di Indonesia.

Depok, Desember 2015

Aryo Bodroseno

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Aryo Bodroseno
NPM : 1206314705
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**“DISAIN MAP EFFISIENSI PMSM MENGGUNAKAN METODE QUASI
STATIK ”**

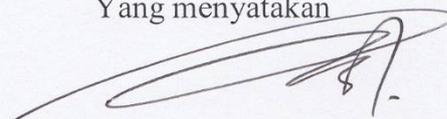
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada tanggal: Desember 2015

Yang menyatakan



(Aryo Bodroseno)

Disain map..., Aryo Bodroseno, FT UI, 1015

ABSTRAK

Motor listrik merupakan sebuah mesin yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Ada banyak jenis motor, salah satunya adalah PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*). PMSM merupakan motor listrik yang menggunakan permanen magnet sebagai penghasil medan magnet di rotor, sehingga medan magnet yang ada di rotor pun cenderung konstan. Salah satu ukuran kinerja dari PMSM adalah efisiensi. Efisiensi PMSM dapat digambarkan dalam bentuk map efisiensi. Ada beberapa cara untuk membuat map efisiensi motor. Dalam penelitian ini akan digunakan metode quasi statik. Penggunaan metode ini didasarkan pada alasan kemudahannya. Hasil map efisiensi yang didapat dari metode quasi statik akan dibandingkan dengan map efisiensi yang didapat dengan perangkat lunak FEM. Hasil dari kedua metode ini akan dibandingkan dengan map efisiensi yang didapat dari pengujian motor. Untuk membuktikan efektivitas metode quasi statik akan diambil contoh PMSM yang digunakan di mobil Toyota Prius. Dari map efisiensi yang didapat metode quasi statik memiliki tingkat akurasi yang tidak berbeda dengan FEM.

Kata Kunci : PMSM, Map Efisiensi, quasi statik, FEM

ABSTRACT

Electric motor is a machine to convert electric energy become mechanic energy. There are many type of electric motor, one of them is PMSM (permanent magnet synchronous motor). PMSM is electrical motor which using permanent magnet as magnetic field producer in rotor, so as the values of magnetic field on rotor has tended to fix. One of the method to evaluate performance of permanent magnet motor is efficiency, efficiency of PMSM can be created in map efficiency map. Some method has been using to create efficiency map of motor. In this research will use quasi static method. The election of this method for the simplicity. Result of efficiency which gotten from quasi static method will be compared with efficiency map that resulted by FEM software. And then the result of them will be compare with real testing of the motor. Toyota prius IPM will be use as a PMSM example to prove the effectivity of the quasi static method. Base on the result, quasi static method has not be different accuracy than FEM.

Keyword : PMSM, Efficiency, quasi static, FEM

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	
HALAMAN PENGESAHAN	
KATA PENGANTAR	
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	
SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	
ABSTRAK	
ABSTRACT	
DAFTAR ISI	
DAFTAR GAMBAR	
DAFTAR TABEL	
DAFTAR SIMBOL dan NOTASI	
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	1
1.3. Pembatasan Masalah	2
1.4. Metode Penelitian	2
a. Studi Literatur	2
b. Simulasi Percobaan	2
1.5. Sistematika Penulisan	2
BAB II DASAR TEORI	4
2.1. Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)	4
2.1.1. Konstruksi PMSM	6
2.1.2. Prinsip Kerja PMSM	7
2.2. Pemodelan PMSM	8
2.3. Fenomena Elektromagnetik	12
2.3.1. Fluks Magnet	12
2.3.2. <i>Flux Linkage dan BEMF</i>	12
2.4. <i>Map Efficiency</i>	13

2.5. Rugi Rugi	14
2.5.1. Rugi elektromagnetik	15
2.5.2 Rugi daya mekanik	18
2.6. Maksimum Torsi per Ampere (MTPA)	20
2.7. Finite Element Method (FEM)	21
2.7. 1. Diskretasi.....	21
2.7. 2. Perhitungan FEM	23
2.7. 3. Perhitungan Numerik Elemen Segitiga	24
2.7. 4. Penyatuan Elemen Segitiga	26
BAB III SIMULASI	27
3.1. Map Effisiensi Menggunakan Software <i>Finite Element Analysis</i>	28
3.1.1. Rotor	29
3.1.2. Stator	30
3.2. Map Effisiensi Menggunakan Metode Quasi-static	31
3.2.1. Pemodelan PMSM berdasarkan metode <i>Quasi Static</i>	31
3.2.2. Perhitungan rugi – rugi daya	32
3.2.3. Daerah kerja PMSM	34
3.2.4. Pembuatan program map efisiensi	34
BAB IV ANALISA	36
4.1. Torsi	36
4.2. Rugi – rugi daya	39
4.3. Map efisiensi	41
BAB V KESIMPULAN.....	49
DAFTAR PUSTAKA.....	50

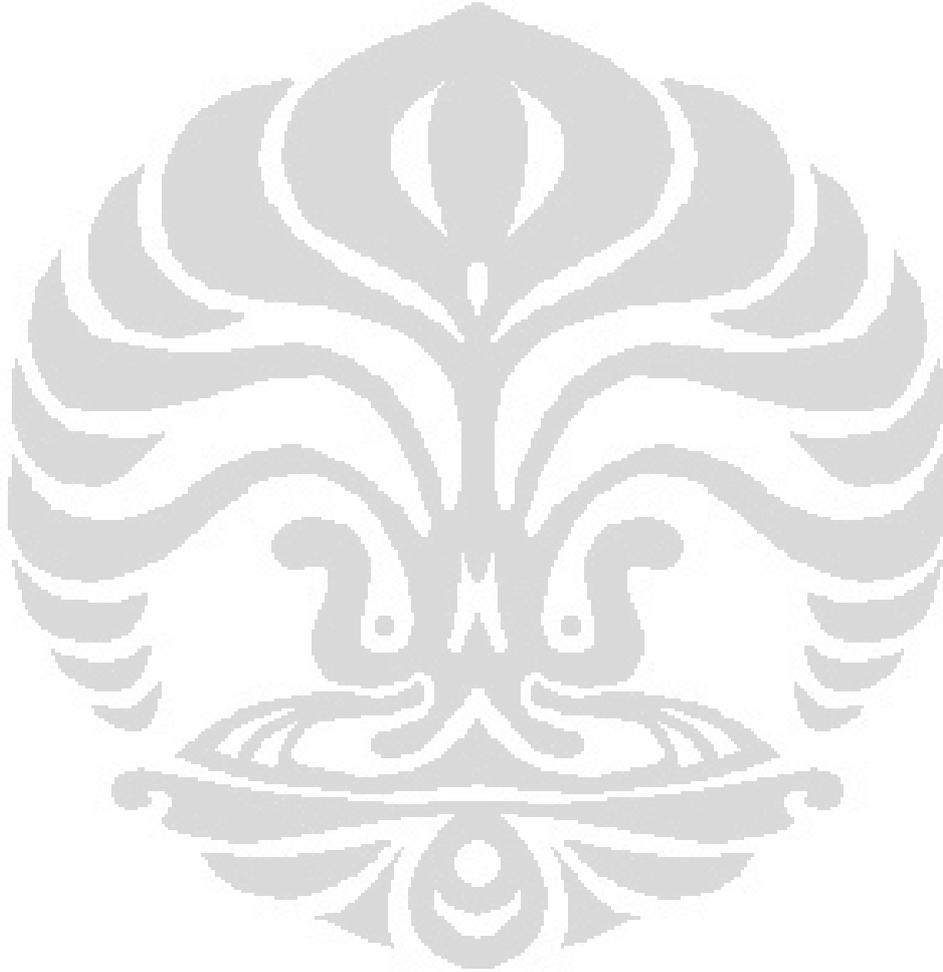
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klasifikasi motor secara umum	5
Gambar 2.2: Jenis PMSM a). SM-PMSM b). IPMSM	6
Gambar 2.3. Konstruksi PMSM	7
Gambar 2.4. Hukum BLI, BLV, dan aturan tangan Flemming	7
Gambar 2.5. a). <i>Direct axis</i> b). <i>Quadrature axis</i>	9
Gambar 2.6. Hubungan daya masukan, rugi – rugi daya, serta daya keluaran	14
Gambar 2.7 Diskretisasi keliling lingkaran (a) Diskretisasi keliling lingkaran menjadi 8 nodal dan 8 garis. (b) Diskretisasi keliling lingkaran menjadi 16 nodal dan 16 garis	21
Gambar 2.8 Diskretisasi garis lengkung dengan elemen kotak (a) Diskretisasi menghasilkan 5 elemen segi empat (b) Diskretisasi menghasilkan 10 elemen segi empat.....	21
Gambar 2.9 Diskretisasi Menurut Kelengkungan domain	22
Gambar 2.10 Diskretisasi Menurut Kelengkungan domain	25
Gambar 2.11. Penyatuan Elemen Segitiga, a) dua elemen segitiga yang belum terhubung (dua elemen, 6 nodal) (b) dua elemen segitiga yang saling terhubung (dua elemen 4 nodal)	26
Gambar 3.1. Geometri Prius Permanen Magnet	28
Gambar 3.2. Geometri Rotor	29
Gambar 3.3. Geometri slot	30
Gambar 3.4. Rangkaian ekuivalen dq-axis pada PMSM	31
Gambar 3.5. flowchart progam.....	35

Gambar 4.1. Grafik perbandingan torsi <i>quasi static</i> dengan keluaran FEM	36
Gambar 4.2. Perbedaan besar torsi	37
Gambar 4.3. Selisih torsi.....	38
Gambar 4.4. Perbandingan daya rugi rugi antara quasi static dengan FEM	39
Gambar 4.5. Selisih rugi – rugi daya	40
Gambar 4.6. Map riil efisiensi motor IPM.....	41
Gambar 4.7. Map efisiensi <i>quasi static</i>	42
Gambar 4.8. Map efisiensi <i>software</i> FEM	42
Gambar 4.9. Perbedaan efisiensi pada Map untuk torsi 117 N.m dengan kecepatan 2125 Rpm	44
Gambar 4.10. Perbedaan efisiensi pada Map untuk torsi 103 N.m dengan kecepatan 1235 Rpm	45
Gambar 4.11. Perbedaan efisiensi pada Map untuk torsi 367 N.m dengan kecepatan 167 Rpm	46
Gambar 4.12. Perbandingan luas kontur	47

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Spesifikasi Mesin	28
Tabel 3.2. Spesifikasi Rotor	29
Tabel 3.3. Spesifikasi Stator	30
Tabel 3.4. Komponen dq-axis	32
Tabel 4.1. Hasil Map Efisiensi	41



DAFTAR SIMBOL dan NOTASI

a, b	Konstanta yang berhubungan dengan inti & rugi mekanik [-]
A_H	Luas are histerisis [Jm ²]
A_e	Daerah elemen e yang fungsinya diintegrasikan
\bar{B}, B	Medan Magnet [T]
d	Diameter bahan [m]
D_m / k_f	Koefisien rugi friksi [Watt]
D	Kerapatan fluks listrik (coloumb/meter)
E	Intensitas medan listrik (volt/meter)
E	Elemen segitiga
\bar{F}	Force / Gaya [N]
f_m / f	Frekuensi kerja bahan [Hz]
f_ω	koefisien <i>coreloss per units</i> [-]
f_T	koefisien <i>conduction loss per units</i> [-]
f_{sc}	Gaya static dan coulomb [N.m]
\bar{i}	Arus Listrik [A]
i_{sd}	Arus stator <i>direct – axis</i> [A]
i_{sq}	Arus stator <i>quadrature – axis</i> [A]
i_s	Arus stator [A]
i_{Fed}	Arus rugi besi <i>direct – axis</i> [A]
i_{Feq}	Arus rugi besi <i>quadrature – axis</i> [A]
i_{Fe}	Arus rugi besi [A]

i_{md}	Arus magnetasi <i>direct – axis</i> [A]
i_{mq}	Arus magnetasi <i>quadrature – axis</i> [A]
i_m	Arus magnetasi [A]
i_a	Arus fasa a [A]
i_b	Arus fasa b [A]
i_c	Arus fasa c [A]
i_{PM}	Arus permanen magnet [A]
i_{max}	Arus maksimum [A]
J_m	Momen inersia [Kg. m ²]
k_w	koefisien celah udara [Watt]
K_{cu}	Koefisien tembaga [-]
K_{iron_h}	Koefisien besi histerisis [-]
K_{iron_e}	Koefisien besi <i>excess</i> [-]
L	Panjang Efektif Konduktor [m]
L_{sd}	Induktansi stator <i>direct – axis</i> [Vs/A]
L_{sq}	Induktansi stator <i>quadrature – axis</i> [Vs/A]
L_s	Induktansi stator [Vs/A]
L_{md}	Induktansi magnetasi <i>direct – axis</i> [Vs/A]
L_{mq}	Induktansi magnetasi <i>quadrature – axis</i> [Vs/A]
L_m	Induktansi magnetasi [Vs/A]
$L_{s\sigma}$	Induktansi <i>leakage</i> stator [Vs/A]
N	Jumlah lilitan [-]

N_e	Jumlah total elemen segitiga
p	Jumlah pasangan kutub [-]
P_m	Daya mekanik [Watt]
P_l	Daya rugi – rugi [Watt]
P_{cu}	Daya tembaga [Watt]
P_{hys}	Daya histerisis [Watt]
P_{class}	Daya <i>class</i> [Watt]
P_{exc}	Daya <i>excess</i> [Watt]
P_{mec}	Daya mekanik [Watt]
P_{friksi}	Daya friksi [Watt]
P_{wind}	Daya celah udara [Watt]
R_s	Tahanan stator [Ohm]
R_a	Tahanan phasa a [Ohm]
R_b	Tahanan phasa b [Ohm]
R_c	Tahanan phasa c [Ohm]
R_{Fe}	Tahanan besi [Ohm]
t	Waktu [s]
T_{em} / T_m	Torsi elektrik [N.m]
T_{mag}	Torsi magnetasi [N.m]
$T_{reluc\ tan\ ce}$	Torsi reluktansi [N.m]
T	Torsi [N.m]
S	Daerah yang akan didiskretisasi (domain)

u_{sd}	Tegangan stator <i>direct – axis</i> [V]
u_{sq}	Tegangan stator <i>quadrature – axis</i> [V]
u_s	Tegangan stator [V]
\bar{v}	Kecepatan [m/s]
V	Potensial listrik (volt)
V_s	Volume bahan [m ³]
W_E	Energi pada medan elektrostatik

HURUF YUNANI

$\bar{\epsilon}$	Tegangan Induksi [V]
ϵ_r	Permitivitas relatif
ϵ_0	Permitivitas ruang hampa = $8,854 \times (\text{farad/m})$
φ_δ	Fluks celah udara [Wb / Vs]
φ_{md}	Fluks magnetasi <i>direct – axis</i> [Wb / Vs]
φ_{mq}	Fluks magnetasi <i>quadrature – axis</i> [Wb / Vs]
φ_{sd}	Fluks stator <i>direct – axis</i> [Wb / Vs]
φ_{sq}	Fluks stator <i>quadrature – axis</i> [Wb / Vs]
φ_{PM}	Fluks permanen magnet [Wb / Vs]
ω_r	Kecepatan angular rotor [rad/s]
ω_s	Kecepatan angular stator [rad/s]
ω/n	Kecepatan angular motor [rad/s]
η	Efisiensi [%]
σ	Konduktansi elektrik [Siemens]

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Motor listrik merupakan alat untuk mengkonversi energi listrik ke energi mekanik pada motor PMSM memiliki karakteristik yang sama dengan BLDC hanya perbedaannya ada pada sumber arus yang mengalir pada stator. Pada motor BLDC menggunakan arus DC sebagai sumber dimana pada penerapannya motor BLDC membutuhkan inverter untuk mengubah arus tersebut menjadi arus AC. Sedangkan pada PMSM arus yang masuk merupakan arus AC sehingga dapat langsung digunakan sebagai sumber daya atau tenaga motor.

Salah satu penerapan motor permanen magnet ini adalah dalam mobil listrik ataupun mobil hibrida yaitu mobil dengan dua mesin yaitu mesin yang menggunakan bahan bakar minyak sebagai sumber tenaga dan mesin yang menggunakan listrik sebagai sumber tenaganya. Sehingga dibutuhkan suatu perhitungan serta pendesign yang baik pada motor permanen magnet agar energi yang dihasilkan tidak terbuang dengan percuma atau terjadi pemborosan energi. Oleh karena itu dibutuhkan map efisiensi untuk memetakan kinerja mesin terhadap torsi dan kecepatan .

Pada skripsi ini akan membahas tentang metode pembuatan dan pencarian nilai efisien dari suatu motor permanen magnet. Metode yang digunakan adalah metode quansi dan keluaran *software* FEM. Hasil dari kedua metode tersebut akan dibandingkan untuk diketahui metode mana yang memiliki tingkat akurasi dan ketepatan dalam menentukan kinerja dari suatu motor permanen magnet.

1.2. Tujuan Penelitian

Walaupun PMSM dapat memberikan keuntungan lebih dibanding dengan motor biasa, tetapi menentukan nilai kerja dari suatu design motor permanen magnet sangat penting. Dikarenakan dari nilai kerja tersebut dapat menghasilkan perbaikan – perbaikan serta peningkatan dalam struktur design motor permanen magnet. Salah satu penentuan nilai kerja tersebut adalah melalui melihat nilai efisiensi dari suatu motor permanen magnet. Efisiensi ini dilihat dari perbandingan torsi yang dihasilkan dengan kecepatan yang diinginkan.

Metode - metode dalam penentuan efisiensi telah banyak ditentukan dan diteliti sehingga banyak cara dalam menentukan kerja dari suatu design motor permanent magnet. Oleh karena itu dibutuhkan suatu penelitian yang membandingkan hasil – hasil dari metode – metode tersebut sehingga didapatkan hasil dari efisiensi yang akurat, sehingga hasil kinerja tersebut dapat dijadikan parameter dalam perbaikan design dari motor permanen magnet.

1.3.Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah yang dilakukan ini dapat berupa bentuk dari struktur motor yang digunakan pada skripsi ini menggunakan motor *permanent magnet synchronous motor* dengan struktur magnet yang tertanam didalam rotor atau *interior permanent magnet* (IPM). Dari disain struktur tersebut akan didapatkan hasil berupa torsi, kecepatan, rugi – rugi daya, efisiensi, serta map efisiensi berdasarkan kecepatan terhadap torsi. Untuk metode yang digunakan membentuk map efisiensi digunakan metode *quasi static* dan map efisiensi hasil dari *software* FEM, yang kemudian dari hasil tersebut akan dibandingkan untuk melihat hasil mendekati nilai sesungguhnya.

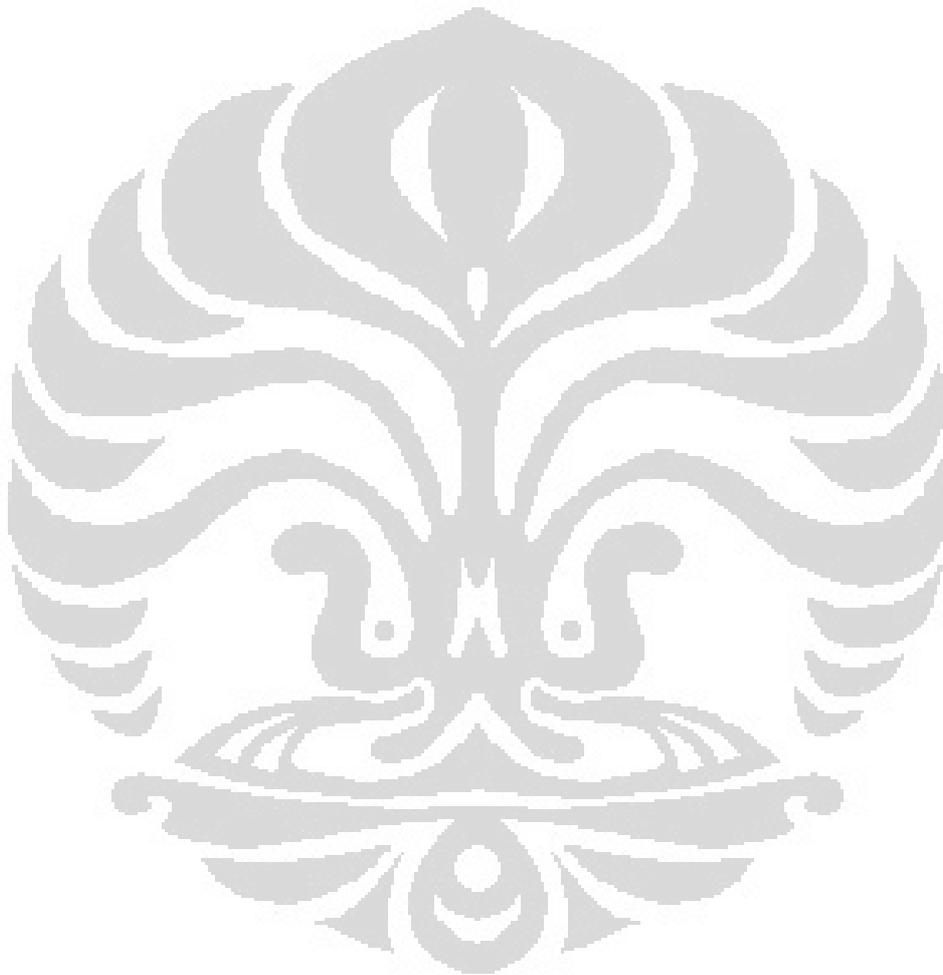
1.4.Metode Penelitian

Penelitian dilakukan dengan melakukan kajian literatur berupa jurnal – jurnal dan buku – buku yang berkaitan dengan optimasi, efisiensi PMSM, dan nilai yang mempengaruhi terhadap kinerja motor. Simulasi dilakukan dengan menerapkan persamaan – persamaan yang dibutuhkan untuk mendapatkan hasil dari metode - metode tersebut. Walaupun dibutuhkan juga pembuatan ulang design motor dikarenakan ketika menggunakan perangkat lunak dengan basis *finite element analysis* dibutuhkan struktur motor secara dua dimensi.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan akan menjelaskan bagaimana menyusun buku laporan ini, dimulai dari bab pertama, bab pertama akan dibahas tentang latar belakang, tujuan, pembatasan masalah, metode penelitian serta sistematika penulisan dari laporan dan percobaan yang akan dilakukan. Dari hal tersebut akan didukung oleh teori teori yang berhubungan dengan percobaan, simulasi, dan perngalisaan yang akan dibahas pada bab kedua. Proses simulasi, percobaan akan dilakukan di bab ketiga dengan menyertakan cara simulasi serta komponen -

komponen yang digunakan dalam simulasi ini baik nilai yang diberikan oleh laporan – laporan yang terkait dengan simulasi atau percobaan dan nilai yang dihitung sendiri untuk mendukung proses simulasi tersebut. Pada bab keempat akan dibahas tentang hasil yang didapatkan dari simulasi yang kemudian akan dibuat analisa dari hasil tersebut sehingga dapat diambil suatu kesimpulan yang nantinya akan dibahas pada bab kelima



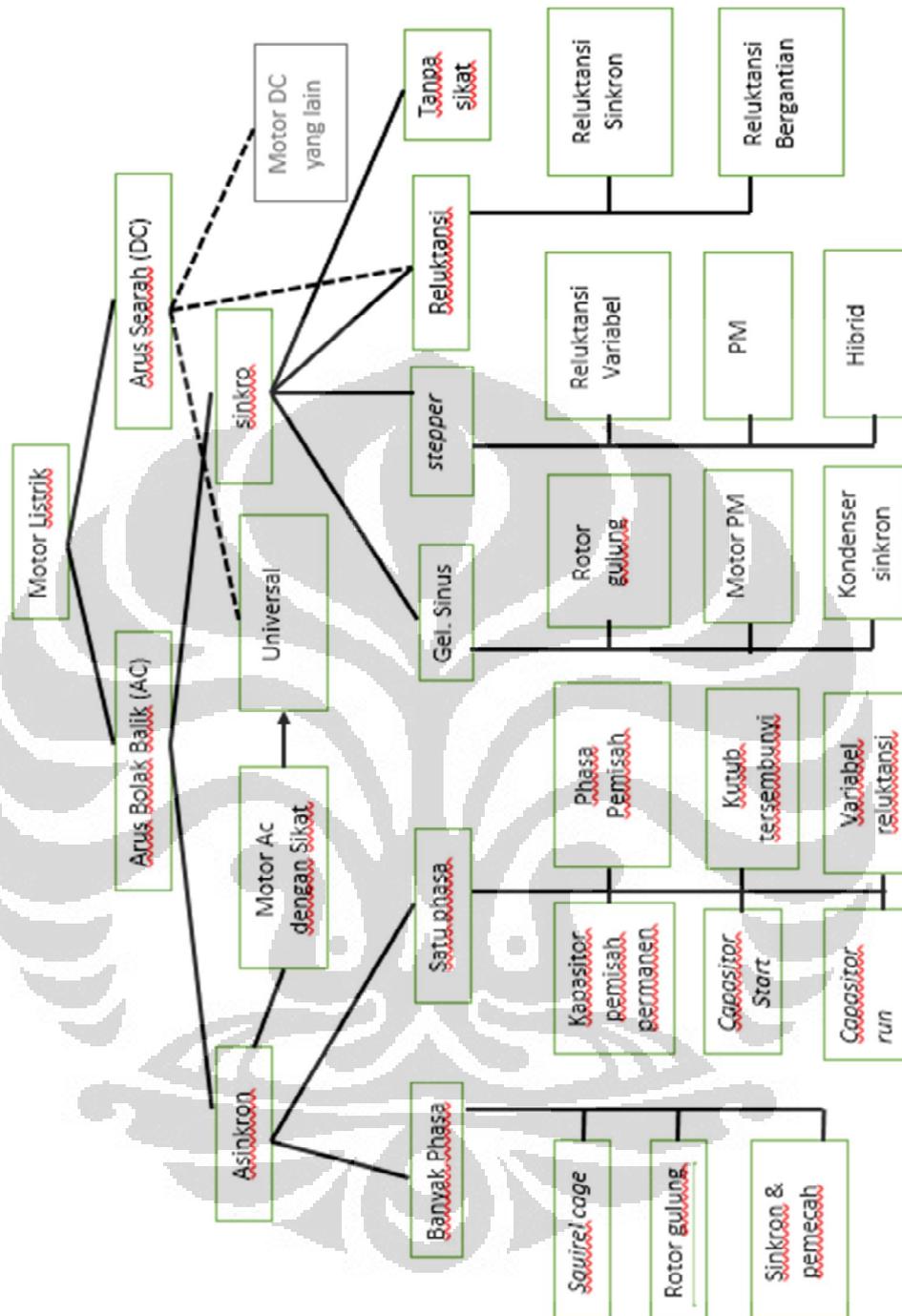
BAB II

DASAR TEORI

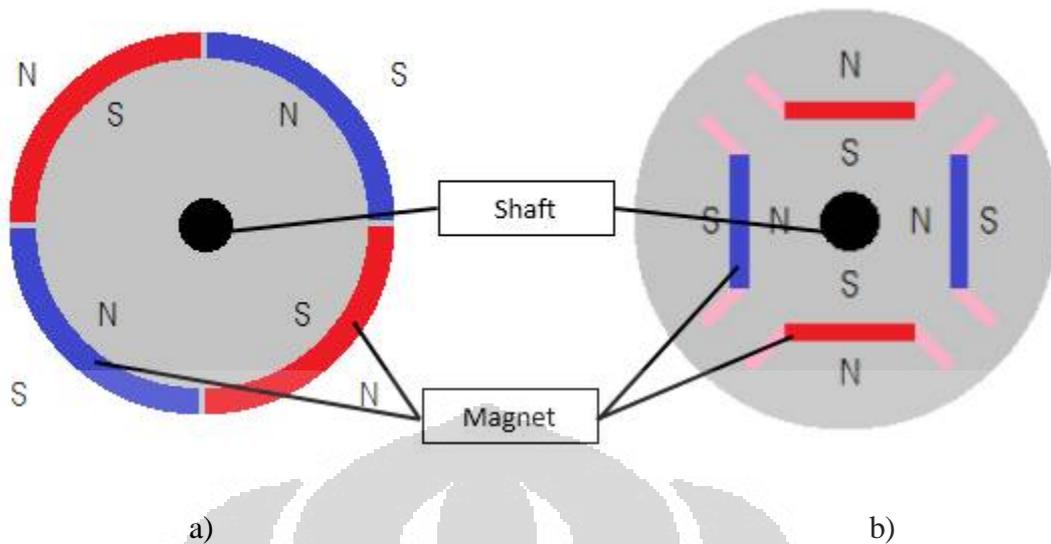
Motor listrik merupakan perangkat yang digunakan untuk mengkonversi Energi Listrik ke Energi Mekanik. Secara umum motor dibagi menjadi dua yaitu motor DC dan motor AC. Pada aplikasinya motor AC lebih banyak digunakan karena lebih murah, perawatannya tidak begitu rumit dan metode pengendaliannya beragam. Motor AC sendiri terdiri dari motor sinkron dan motor tidak sinkron. Untuk lebih jelasnya mengenai klasifikasi motor dapat dilihat gambar 2.1

2.1. Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)

Motor sinkron dengan magnet permanen atau dikenal dengan PMSM merupakan sebuah motor AC dengan stator berupa kumparan dan rotornya berupa magnet permanen. Motor PMSM memiliki dua kategori jika dilihat dari BMF, yaitu motor PMSM yang memiliki BMF sinusoidal dan motor DC tanpa sikat (*brushless*) yang memiliki BMF trapezoidal. Sedangkan struktur motor PMSM dibagi menjadi SM-PMSM (*Surface Mounted PMSM*) dan IPMSM (*Interior PMSM*) seperti gambar 2.2. PMSM dikenal tidak hanya memiliki nilai efisiensi yang tinggi tetapi juga perawatan yang mudah, hal ini lah yang menjadi dasar pengembangan PMSM sebagai motor untuk mobil listrik ataupun kendaraan hibrid. Selain kelebihan – kelebihan tersebut PMSM juga memiliki kelebihan lainnya untuk digunakan pada mobil listrik antara lain menghasilkan torsi yang besar pada kecepatan yang rendah, kebisingan dan getaran yang rendah dibandingkan dengan mesin berbahan bakar, memiliki efisiensi yang tinggi untuk merubah energi listrik menjadi energi gerak, dimana efisiensi tersebut dapat melebihi 90%.



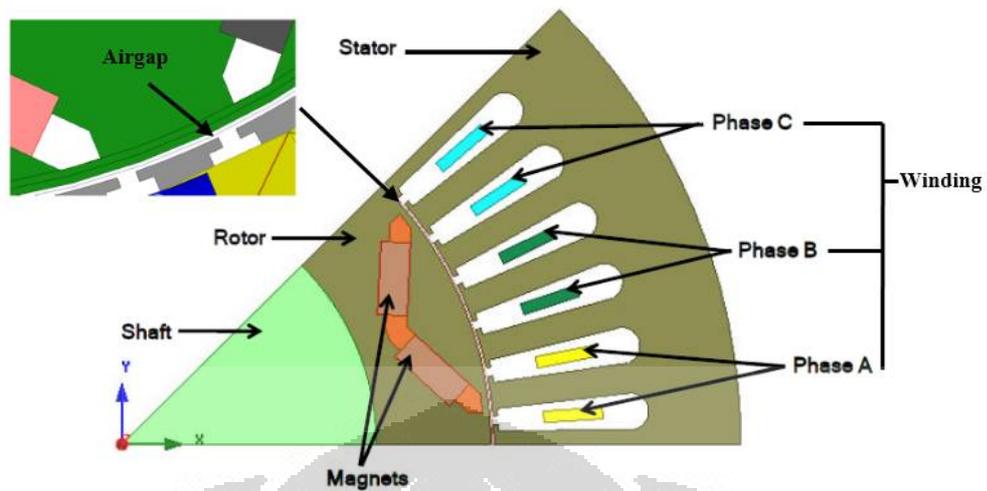
Gambar 2.1 Klasifikasi motor secara umum



Gambar 2.2: a). SM-PMSM b). IPMSM

2.1.1. Konstruksi PMSM

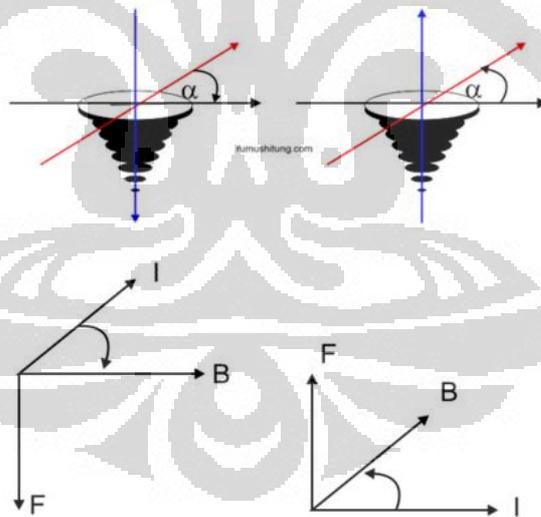
Komponen utama penyusun motor listrik adalah rotor, stator, dan airgap. Stator merupakan bagian yang diam pada motor, rotor merupakan bagian bergerak pada motor listrik sedangkan airgap merupakan celah udara antara stator dan rotor untuk mencegah adanya gaya gesek mekanik. Perputaran motor dan torsi yang dihasilkan merupakan fenomena elektomagnetik yang terjadi antara stator dan rotor. Salah satu metode untuk membangkitkan medan magnet pada motor adalah mengalirkan arus listrik pada kawat konduktor. Metode lainnya yaitu menggunakan material magnet permanen sebagai pembangkit medan magnet. Pada motor PMSM ataupun BLDC menggunakan permanen magnet sebagai pembangkit medan magnetnya yang terletak pada rotor, sedangkan stator tempat melilitkan kawat konduktor.



Gambar 2.3. Konstruksi PMSM

2.1.2. Prinsip Kerja PMSM

Prinsip kerja mesin listrik dapat dipahami dengan menggunakan prinsip aturan tangan *Flemming* dan hukum *BLI*.



Gambar 2.4. Hukum BLI, BLV, dan aturan tangan Fleming

Aturan tangan kiri menjelaskan tentang hukum Lorentz, sedangkan aturan tangan kanan menjelaskan tentang fenomena tegangan induksi.

$$\vec{F} = \vec{B} \times \vec{i}L \quad (2.1)$$

$$\bar{\varepsilon} = \bar{B} \times \bar{v}L \quad (2.2)$$

di mana :

F = gaya (newton N)

B = medan magnet (tesla T)

I = arus listrik (ampere A)

ε = tegangan induksi (volt V)

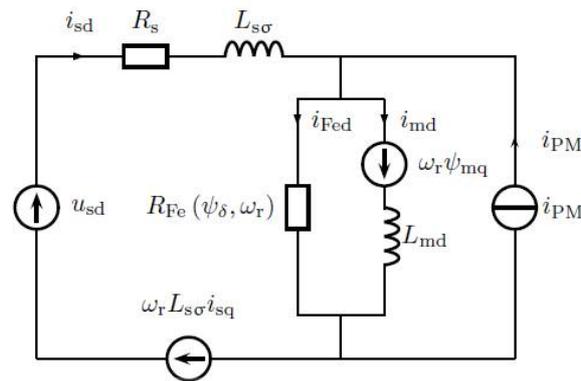
L = panjang efektif konduktor (meter m)

v = kecepatan (meter per second)

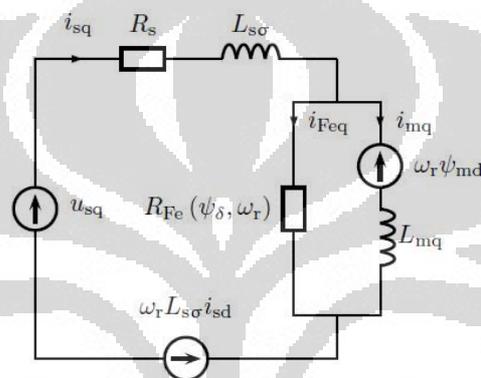
Motor BLDC dapat berputar dan menghasilkan torsi karena adanya aliran energi listrik dari baterai ke konduktor yang dililitkan pada stator. Arus yang mengalir pada kawat konduktor menimbulkan medan magnet. Sedangkan material magnet permanen dengan arah magnet tertentu disusun pada rotor. Interaksi antara magnet rotor dan stator akan menghasilkan aksi dan reaksi sehingga rotor akan memiliki gerakan berputar[4].

2.2. Pemodelan PMSM

Pemodelan *permanent magnet synchronous motor* dengan menerapkan teori vektor ruang / *space vector theory*, sehingga akan didapatkan model dari motor tersebut dan dapat disimulasikan untuk kondisi *transient state*. Biasanya pada pemodelan PMSM menggunakan teori vektor ruang, *iron losses* akan diabaikan untuk mempermudah dalam mencari nilai – nilai pada saat *transient state*, tetapi pada pemodelan ini *iron losses* akan diikutkan dalam perhitungan. Pada pemodelan ini akan menggunakan rotor sebagai koordinat dari sistem. Pada gambar 2.5 merupakan ekuivalen sirkuit vektor dari *direct and quadrature axis* dari PMSM tanpa *damp winding* tetapi dengan memasukkan nilai *iron losses*.



(a) Direct axis



(b) Quadrature axis

Gambar 2.5. a). Direct axis b). Quadrature axis

Pada rangkaian ekuivalen PMSM seperti gambar 2.5. u_{sd} dan u_{sq} adalah tegangan stator pada *direct* dan *quadrature axis*, i_{sd} dan i_{sq} merupakan arus *direct-quadrature axis*, i_{Fed} dan i_{Feq} merupakan rugi arus di besi yang terjadi pada *direct* dan *quadrature axis*. i_{md} dan i_{mq} adalah *magnetizing current*, R_s adalah tahanan yang ada di stator, R_{Fe} adalah resistansi *iron losses*, $L_{s\sigma}$ adalah *stator leakage inductance*, L_{md} dan L_{mq} adalah induktansi pada axis *direct* dan *quadrature* ϕ_{md} dan ϕ_{mq} flux linkage dari *quadrature* dan *direct axis*, ω_r adalah kecepatan angular rotor, i_{PM} adalah arus yang dihasilkan oleh permanen magnet yang nantinya akan menjadi sumber *permanent magnet flux linkage* pada induksi magnet.

Ketika pada rangkaian ekuivalen tersebut dimasukkan *iron losses* maka *iron losses* dimodelkan dengan resistor yang berhubungan paralel dengan induktansi magnet. Sehingga arus yang masuk kedalam *iron losses* harus terpisah

dari arus yang melewati induktansi magnet ataupun arus yang menghasilkan *flux linkage* yang dapat menghasilkan torsi. Sehingga dari rangkaian tersebut akan didapatkan persamaan tegangan [21] :

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + \omega_r \varphi_{sq} \quad (2.3)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \omega_r \varphi_{sd} \quad (2.4)$$

Flux linkage magnet dan stator [21] :

$$\varphi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + L_{md} i_{fed} + \varphi_{PM} \quad (2.5)$$

$$\varphi_{sq} = L_{sq} i_{sq} - L_{mq} i_{feq} \quad (2.6)$$

$$\varphi_{md} = L_{md} (i_{sd} - i_{fed}) + \varphi_{PM} \quad (2.7)$$

$$\varphi_{mq} = L_{mq} (i_{sq} - i_{feq}) \quad (2.8)$$

Dimana induktansi axis d adalah $L_{sd} = L_{s\sigma} + L_{md}$ dan induktansi axis q sama dengan $L_{sq} = L_{s\sigma} + L_{mq}$

Lalu berdasarkan flux linkage equation maka akan didapatkan persamaan untuk mencari arus *iron losses* dan stator [21] :

$$i_{sd} = \frac{\varphi_{sd} - \varphi_{PM} + L_{md} i_{fed}}{L_{sd}} \quad (2.9)$$

$$i_{sq} = \frac{\varphi_{sq} + L_{mq} i_{feq}}{L_{sq}} \quad (2.10)$$

$$i_{fed} = \frac{\varphi_{md} - \frac{L_{md}}{L_{sd}} \varphi_{sd} + \left(\frac{L_{md}}{L_{sd}} - 1\right) \varphi_{PM}}{\frac{L_{md}}{L_{sd}}} \quad (2.11)$$

$$i_{feq} = \frac{\varphi_{mq} - \frac{L_{mq}}{L_{sq}} \varphi_{sq}}{\frac{L_{mq}}{L_{sq}}} \quad (2.12)$$

Fluks di *air gap* dapat diselesaikan dengan *iron loss current* dari persamaan tegangan *air gap* [21] :

$$u_{md} = \frac{d\varphi_{md}}{dt} = R_{fe} i_{fed} + \omega_r \varphi_{mq} \quad (2.13)$$

$$u_{mq} = \frac{d\varphi_{mq}}{dt} = R_{fe} i_{feq} + \omega_r \varphi_{md} \quad (2.14)$$

Lalu berdasarkan hukum gaya Lorent maka torsi elektromagnetik dapat dihitung dengan persamaan [21] :

$$T_{em} = \frac{3p}{2} (\varphi_{sd} i_{mq} - \varphi_{sq} i_{md}) + \varphi_{PM} i_{mq} \quad (2.15)$$

Dengan memasukkan persamaan untuk φ_{sd} dan φ_{sq} maka akan didapatkan [21] :

$$T_{em} = \frac{3p}{2} [(L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq} + \varphi_{PM} i_{sq}] \quad (2.16)$$

2.3. Fenomena Elektromagnetik

2.3.1. Fluks Magnet

Fluks pada PMSM bersumber dari magnet permanen pada rotor. Fluks sangatlah berperan penting terhadap parameter kecepatan dan torsi motor. Stator berperan sebagai *fluxguide* yang menghantarkan pergerakan fluks. Fluks pada motor ditujukan agar terhubung dengan kumparan pada stator. Fluks yang bergerak dari kutub positif menuju kutub negatif namun tanpa melewati kumparan seperti yang seharusnya, disebut *leakage* [1].

Flux leakage adalah fluks dari kutub rotor yang bergerak menuju udara dimana seharusnya fluks ini bergerak menuju kearah kumparan. Sedangkan *fringing* adalah fluks seharusnya mengikuti jalur *flux guide* atau *core*, justru ke luar jalur menuju udara [2]. *Leakage* dan *fringing* adalah masalah yang berasal dari desain geometri motor. Fenomona *leakage* dan *fringing* dapat menambah nilai rugi-rugi dan mengurangi efisiensi motor.

Material memiliki batas kemampuan dalam menghantarkan fluks. Jika nilai fluks telah melebihi batas kemampuan material *fluxguide*, maka kondisi ini disebut saturasi. Saat saturasi, kemampuan *fluxguide* untuk menghantarkan fluks akan berkurang.

2.3.2. Flux Linkage dan BEMF

Flux Linkage adalah hasil perkalian dari fluks yang menembus kumparan pada motor dengan jumlah lilitan. Pembangkitan tegangan pada mesin listrik merupakan fenomena yang dijelaskan dengan hukum Faraday yang menyatakan bahwa tegangan induksi pada suatu rangkaian dihasilkan dari perubahan nilai *flux linkage* pada setiap perubahan waktu. Perubahan nilai *flux linkage* bisa berasal dari gerakan rotasi dari magnet atau dari perubahan polaritas arus listrik yang membangkitkan fluks [1]. Tegangan induksi pada motor BLDC yang dihasilkan dari gerakan rotasi magnet adalah BEMF (*Back Electromotive Force*) atau juga disebut tegangan rangkaian terbuka. Pada hukum Faraday, tegangan induksi dinyatakan sebagai [10]:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\psi}{dt} \quad (2.17)$$

di mana :

$\Psi = \text{Flux linkage (weber } W)$

$\varepsilon = \text{Tegangan induksi (volt } V)$

$\phi = \text{Fluks magnet (tesla } T)$

$N = \text{Jumlah lilitan}$

2.4. Map Efisiensi

Efisiensi pada motor listrik didefinisikan sebagai perbandingan antara daya mekanik P_m terhadap daya listrik P_e sesaat yang diberikan kepada motor. Daya listrik P_e dapat didefinisikan sebagai penjumlahan antara daya mekanik P_m ditambah dengan kehilangan daya di dalam motor P_l . Sehingga efisiensi motor listrik dapat dinyatakan dalam persamaan berikut .

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} = \frac{P_m}{P_m + P_l} \quad (2.18)$$

karena $P_m = T\omega$ dan P_l juga merupakan fungsi di T dan ω , maka

$$\eta(T, \omega) = \frac{1}{1 + \frac{P_l}{T\omega}} \quad (2.19)$$

Jika $P_l = a\omega^2 + bT^2$ sehingga efisiensi dapat dinyatakan sebagai[3]

$$\eta(T, \omega) = \frac{1}{1 + \frac{a\omega}{T} + \frac{bT}{\omega}} \quad (2.20)$$

lebih didefinisikan $\omega = \omega_0 \omega_N$ and $T = T_0 T_N$ maka efisiensi dapat dinyatakan sebagai

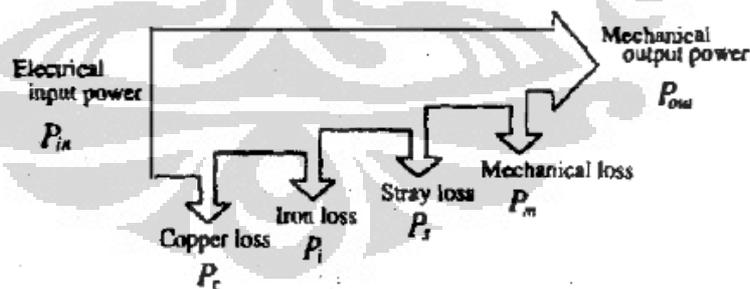
$$\eta(T, \omega) = \frac{1}{1 + f_\omega \frac{\omega_N}{T_N} + f_T \frac{T_N}{\omega_N}} = \frac{\omega_N T_N}{\omega_N T_N + f_\omega \omega_N^2 + f_T T_N^2} \quad (2.21)$$

dimana f_ω per-unit losses karena core loss dan f_T per unit losses karena conduction loss, dalam “Modeling of the Efficiency MAP of Surface Permanent Magnet Machine for Electrical Vehicles”. efisiensi dihitung sebagai:

$$\eta(T_m, n) = \frac{1}{k_{cu} T_m^2 + T_m n + k_{iron_h} n + k_{iron_e} n^2} \quad (2.22)$$

2.5. Rugi Rugi

Menurut kenjo dan nagamori[4] rugi-rugi pada motor listrik dapat diklasifikasikan menjadi beberapa bagian yaitu rugi – rugi elektromagnetik, rugi – rugi – rugi mekanik dan rugi – rugi lainnya yang dapat berasal dari motor atau dari luar motor, hal tersebut dapat dilihat dari gambar 2.6.



Gambar 2.6. Hubungan daya masukan, rugi – rugi daya, serta daya keluaran.

Dari gambar 2.6 dapat dikatakan bahwa daya masukan akan mengalami pengurangan daya atau lebih kecil akibat dari adanya rugi – rugi yang dapat berupa rugi mekanik, rugi elektromagnetik, serta rugi – rugi lainnya. Sehingga penentuan dan pemahaman tentang rugi – rugi sangat diperlukan dalam membuat analisis

suatu disain motor, berikut penjelasan mengenai rugi – rugi yang terdapat didalam suatu motor listrik.

2.5.1. Rugi elektromagnetik

Rugi electromagnetik merupakan rugi – rugi yang diakibatkan oleh beberapa hal antara lain akibat adanya rugi dari besi, tembaga. Dari hal tersebut dapat didiartikan bahwa rugi elektromagnetik ini lebih dikarenakan sifat atau karakteristik dari bahan dalam menyalurkan konduktifitas ataupun tahanan yang dimilikinya sehingga akan menimbulkan rugi – rugi.

- a. Rugi Tembaga atau *Copper loss* adalah rugi - rugi daya akibat sifat dari bahan tembaga dimana sebagian energi listrik yang dialirkan pada kawat konduktor akan berubah menjadi panas akibat dari resistansi kawat konduktor, istilah rugi tembaga tidak hanya merujuk pada bahan tembaga saja tetapi dapat juga merujuk bahan yang lain sebagai bahan yang digunakan untuk lilitan contohnya alumunium. Rugi daya tembaga merupakan rugi rugi terbesar yang timbul padaa suatu motor. Rugi tembaga ini berhubungan erat dengan resistansi yang terdapat di lilitan, oleh karena itu ketika arus kontinu yang mengalir pada lilitan yaitu i_a , i_b , i_c , maka akan memiliki resistensi pada setiap kawat yaitu R_a , R_b , R_c . Sehingga akan didapatkan persamaan untuk mencari daya tembaga.

$$P_{cu} = i_a^2 R_a + i_b^2 R_b + i_c^2 R_c \quad (2.23)$$

Untuk mencari nilai tahanan dari tembaga dapat dilakukan dengan cara mengukur secara konvensional ataupun dengan perhitungan. Perhitungan ini dapat dilakukan ketika melakukan disain dari motor, dimana pada disain tersebut dapat ditentukan dari ukuran dan panjang kabel yang digunakan sesuai dengan temperatur kerja dari motor. Tetapi resistansi dari tembaga dapat disamakan dengan nilai reistansi dari stator maka akan membentuk suatu persamaan yaitu[10]:

$$P_{cu} = 3R_s i_s^2 \quad (2.24)$$

nilai $i_a = i_b = i_c = i_s$ dan nilai resistansi pada tembaga akan setara dengan yang ada di stator maka $R_a = R_b = R_c = R_s$ [10]. Hal ini dikarenakan nilai R_s adalah resistansi di stator dan I_s adalah arus di stator. Penggunaan tahanan stator sebagai tahanan tembaga dikarenakan tahanan tembaga yang sangat kecil jika dibandingkan dengan tahanan stator sehingga tahanan tembaga akan dianggap sama dengan tahanan stator.

- b. *Iron loss* adalah jumlah rugi – rugi daya akibat sifat magnet dari suatu bahan berdasarkan *classical model* [5].

$$P_{loss} = P_{hys} + P_{class} + P_{exs} \quad (2.24)$$

Dari persamaan 2.24 didapatkan bahwa rugi besi didapatkan dari rugi histerisis, rugi *class*, dan rugi excess sedangkan pada separation losses rugi besi merupakan penjumlahan dari rugi histerisis dengan rugi dinamik atau rugi akibat efek eddy (*eddy current loss*). Daya class (P_{class}) adalah kehilangan daya yang berhubungan dengan tingkah laku dari struktur medan magnet pada skala besar atau nilai daya class akan sama dengan daya dynamic pada persamaan *separation losses*. [5] tetapi pada persamaan *classical model* ini *skin effect* diabaikan sehingga daya class akan mempunyai persamaan [5]

$$P_{class} = \frac{\pi^2 \sigma d^2 i_{max}^2 f_m^2}{6} \quad (2.25)$$

Pada persamaan 2.25, σ merupakan konduktivitas elektrik dari material bahan i_{max} merupakan arus yang mengalir di bahan tersebut yang nantinya akan berhubungan dengan diameter/d dari bahan dan frekuensi kerja elektromagnetik. Untuk daya *excess* untuk

menentukannya menggunakan model yang di buat oleh pry and bean [6] dimana daya excess akan memiliki persamaan [5]

$$P_{exc} = (1.63 \frac{2L}{d} - 1) P_{class} \quad (2.26)$$

Dengan syarat $2L/D \gg 1$, dimana L merupakan panjang dari bahan, d merupakan diameter bahan. Rugi histerisis adalah rugi-rugi akibat dari adanya besar fluks magnetik yang terus bervariasi dikarenakan karakteristik histeresis dari material yang non linear, volume dari stator dan frekuensi kerja dari motor sehingga dari hal tersebut akan didapatkan persamaan[4]

$$P_H = V_s A_H f \quad (2.27)$$

Dari persamaan 2.27 dibentuk dari V_s yang merupakan volume dari inti stator (m^3), A_H merupakan hysteresis area ($J m^{-3}$), dan f adalah frekuensi dari magnetic (s^{-1}). Daya hysteresis ini dihasilkan ketika medan magnetic dari permanen magnet yang ada di rotor melewati stator sehingga frekuensi yang didapatkan dari motor permanen magnet akan sama dengan kecepatan motor yang dikalikan dengan jumlah pasangan kutub[4].

$$f = (\frac{\omega}{2\pi}) p \quad (2.28)$$

Sehingga daya hysteresis akan didapatkan[4]

$$P_H = V_s A_H (\frac{\omega}{2\pi}) p \quad (2.30)$$

rugi arus eddy (*Eddy current loss*) adalah munculnya arus listrik pada material inti motor yang disebabkan adanya induksi. Pada umumnya setiap material laminasi motor diberi lapisan insulasi untuk mencegah mengalirnya *eddy current*. Perubahan arus eddy ini diakibatkan oleh adanya tegangan induksi yang dihasilkan oleh inti motor, tegangan induksi ini terjadi akibat perubahan dari fluktuasi magnetasi pada inti motor, tegangan induksi ini akan memiliki hubungan proposional dengan frekuensi dari perubahan fluks yang nantinya tegangan induksi ini akan memberikan kenaikan dari arus eddy yang muncul sehingga akan menyebabkan rugi rugi daya. Karena rugi arus eddy (P_e) yang dihasilkan dapat dicari dengan membagi kuadrat tegangan induksi dengan resistansi material sehingga dari pernyataan tersebut kecepatan motor akan memiliki hubungan yang propotional atau nilai kecepatan motor akan sama dengan kuadrat kecepatan motor. Sementara itu tegangan induksi akan mengakibatkan hubungan yang proposional dengan kerapatan fluks B dari permanen magnet, dan volume akan dinotasikan dengan V_s sehingga rugi daya arus eddy akan didapatkan dengan persamaan[4] :

$$P_{eddy} \approx V_s B^2 \omega^2 \quad (2.31)$$

2.5.2 Rugi daya mekanik

Rugi daya mekanik adalah rugi daya yang diakibatkan adanya greakan mekanik dari motor sehingga rugi daya mekanik akan sangat berkaitan dengan friksi atau gaya gesek, dimana gaya gesek ini terdiri dari beberapa jenis yaitu gesekan *viscous*, gesekan statis, gesekan coulomb. Gesekan *viscous* (*viscous friction*) adalah rugi mekanik yang disebabkan adanya gaya pengereman yang proporsional yang diakibatkan adanya cairan atau oli pada motor terhadap kecepatan motor. Gaya gesek static adalah gaya gesek yang menghambat perputaran motor ketika pertama kali baru mau bergerak, ketika gaya gesek statik telah tidak lagi menjadi penghalang dari gerak motor maka gaya gesek tersebut berubah menjadi gaya coulomb. Gaya coulomb adalah gaya torsi yang memiliki

amplitude yang konstan dan bukan suatu fungsi dari kecepatan, dari hal – hal tersebut maka akan didapatkan persamaan[4] :

$$P_{frikasi} = J_m \frac{d\omega}{dt} + D_m \omega + f_{sc}(\omega) \quad (2.32)$$

Dimana pada persamaan diatas J_m adalah moment inersia dari motor, D_m koefisien friksi dari sistem motor, f_{sc} adalah gaya static dan coulomb dari motor. Selain rugi yang terjadi akibat adanya gaya gesek, pada rugi daya mekanik terdapat juga rugi yang diakibatkan oleh *windage* / celah udara antara rotor dengan stator. Hal ini diakibatkan oleh ketika rotor bergerak maka udara yang berada di celah akan terganggu lalu akan mengakibatkan gaya pengereman. Rugi daya pada celah udara merupakan hasil dari torsi yang digunakan untuk melawan daya pengereman tersebut terhadap kecepatan motor. Berdasarkan penelitian yang dilakukan kenjo dan nakamori[4] maka rugi daya celah udara memiliki persamaan[4]

$$P_{wind} \approx \omega^3 \quad (2.33)$$

Hal ini berdasarkan pengamatan pada kipas angin yang memiliki gaya pengereman yang proposional dengan kuadrat dari kecepatan putar motor, lalu untuk rugi daya di celah udara di motor akan sama dengan mengalikan gaya gesek di kipas angin tadi dengan kecepatan motor. Sehingga rugi daya mekanik dapat dikatakan merupakan gabungan dari daya meknik dengan daya windage sehingga akan membentuk persamaan

$$P_{mec} = P_{frikasi} + P_{wind} \quad (2.34)$$

Dengan memasukkan persamaan 2.32 dan 2.33 maka akan didapatkan

$$P_{mec} = J_m \frac{d\omega}{dt} + D_m \omega + f_{sc}(\omega) + \omega^3 \quad (2.35)$$

2.6. Maksimum Torsi per Ampere (MTPA)

Pada PMSM torsi dihasilkan dari beberapa fungsi yaitu L_{sd} , L_{sq} , i_{md} , i_{mq} , φ_{PM} seperti yang diperlihatkan pada persamaan 2.16. Dari parameter – parameter tersebut nilai yang dapat berubah – ubah hanya nilai i_{md} dan i_{mq} sehingga akan terjadi kombinasi yang tak terhingga dari kedua parameter tersebut untuk menghasilkan suatu torsi elektromagnetik pada motor.

Torsi pada PMSM dapat dibagi menjadi 2 yaitu torsi yang dibangkitkan oleh permanent magnet flux yang disebut torsi reactansi atau torsi magnetasi yang diekspresikan dengan persamaan[8]

$$T_{mag} = \frac{3p}{2} \varphi_{PM} i_{mq} \quad (2.36)$$

Dan torsi yang lain adalah torsi reluktansi yang memiliki persamaan[8]

$$T_{reluctance} = \frac{3p}{2} (L_{sd} - L_{sq}) i_{md} i_{mq} \quad (2.37)$$

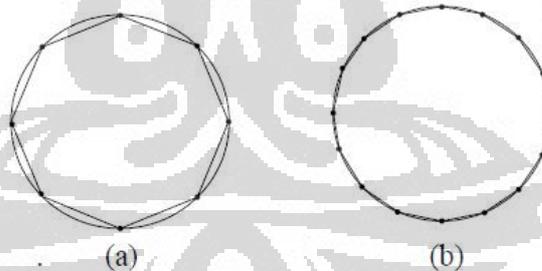
Permanent magnet memiliki reluktansi yang lebih tinggi atau permeability yang lebih rendah dari besi maka biasanya induktansi dari d-axis akan lebih rendah dari q-axis [7]. Sehingga nilai L_d akan lebih kecil dari L_q . ini membuat nilai i_{md} harus bernilai negatif agar menghasilkan torsi yang positif. Dengan nilai i_{md} yang negatif maka nilai tersebut akan mengurangi torsi yang bisa i_{mq} capai karena nilai i_{md} akan memperbesar nilai torsi reluktansi, nilai positif dari i_{md} tidak diinginkan karena nilai positive dari *direct axis* akan berlawanan dengan torsi magnetik, rugi tahanan yang terjadi pada stator hanya bergantung pada magnitude arus fasa sehingga diinginkan motor harus bekerja dengan pasangan nilai i_{md} , i_{mq} yang besarnya hampir sama [8]. Dari penjelasan tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa MTPA adalah sebuah control yang menginginkan keluaran torsi maksimum dari sebuah motor merupakan kombinasi tertentu nilai arus.

2.7. Finite Element Method (FEM)

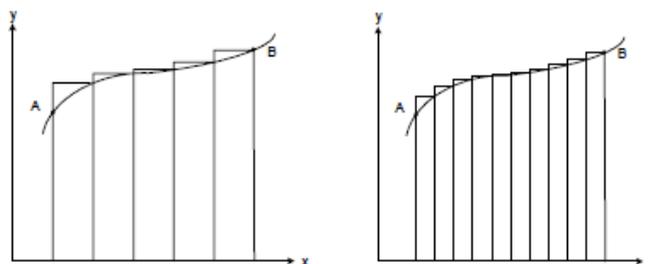
Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan problem matematika dari suatu gejala fisika. Tipe masalah yang dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga terbagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok analisis struktur dan kelompok analisis non-struktur.

2.7. 1. Diskretisasi

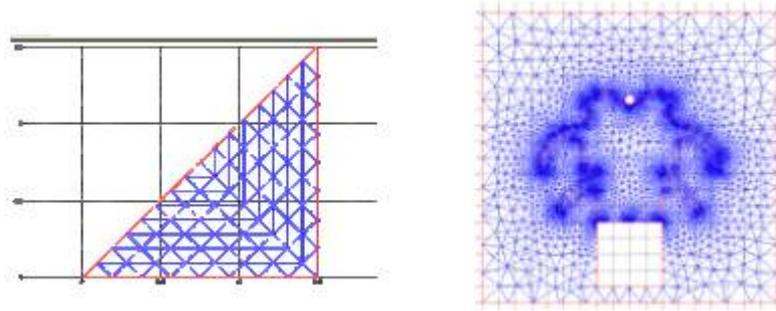
Elemen adalah kumpulan titik (nodal) yang saling terhubung. Sedangkan kumpulan nodal dan elemen didefinisikan sebagai mesh. Proses pembentukan mesh ini disebut diskretisasi atau metode pemisahan (*discretization*). Diskretisasi adalah proses pembentukan suatu benda/body dengan memisahkannya kedalam sebuah sistem yang ekuivalen dari bagian terkecil atau unit (elemen) yang saling berhubungan antar nodal sehingga menjadi dua atau lebih element dengan garis batas dan permukaan[22]. Ide dasar dari FEM adalah membagi struktur, badan (*body*), atau daerah yang dianalisis menjadi jumlah yang sangat besar dari suatu elemen hingga (*finite element*). Dengan kata lain ide dasar dari FEM adalah proses diskretisasi. Elemen ini bisa dalam bentuk satu, dua, atau tiga dimensi.



Gambar 2.7 Diskretisasi keliling lingkaran (a) Diskretisasi keliling lingkaran menjadi 8 nodal dan 8 garis. (b) Diskretisasi keliling lingkaran menjadi 16 nodal dan 16 garis.



Gambar 2.8 Diskretisasi garis lengkung dengan elemen kotak (a) Diskretisasi menghasilkan 5 elemen segi empat (b) Diskretisasi menghasilkan 10 elemen segi empat



Gambar 2.9 Diskretisasi Menurut Kelengkungan domain

2.7. 2. Perhitungan FEM

Pada mode elektrostatik, potensial listrik (V) berkaitan erat dengan medan listrik (\mathbf{E}) yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (2.38)$$

Dengan menggunakan persamaan Maxwell,

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad (2.39)$$

dan hubungan,

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (2.40)$$

dimana polarisasinya dianggap nol, sehingga diperoleh persamaan :

$$-\nabla \cdot (\nabla V \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0) = -\nabla \cdot (\epsilon \cdot \nabla V) = \rho_v \quad (2.41)$$

atau

$$\nabla \cdot \nabla V = -\rho_v / \epsilon_{r0} \quad (2.42)$$

Persamaan 2.42 merupakan persamaan *Poisson*, Gradien potensial listrik ganda pada persamaan 2.42 dapat diuraikan menjadi persamaan berikut ini:

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\rho_v/\epsilon \quad (2.43)$$

Jika ρ_v merupakan kerapatan muatan ruang sama dengan nol dengan kondisi bahwa muatan titik dan kerapatan muatan permukaan sebagai kondisi batas dan sebagai sumber medan, maka:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.44)$$

Persamaan 2.44 merupakan persamaan *Laplace*. Pada koordinat kartesius, bentuk persamaan *Laplace* adalah:

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (2.45)$$

Dengan menerapkan persamaan *Laplace* pada daerah yang mempunyai kerapatan muatan ruang nol, persamaan tersebut menyatakan bahwa konfigurasi konduktor akan menimbulkan medan yang memenuhi persamaan $\nabla^2 V = 0$. masing-masing medan tersebut berbeda menurut potensial dan laju perubahan terhadap koordinat. Tiap medan listrik memenuhi persamaan *Laplace* jika $\rho_v = 0$. yang digunakan untuk mendapatkan nilai potensial listrik dan medan listrik.

2.7. 3. Perhitungan Numerik Elemen Segitiga

Metode numerik ini dengan memperkirakan potensial listrik (V) di dalam tiap-tiap elemen yang telah didiskretisasi. Setelah itu, dengan menghubungkan distribusi potensial pada elemen-elemen dalam suatu daerah dan membatasi distribusi potensial yang terjadi pada kondisi batas yang telah ditetapkan. Bentuk dua dimensi dari energi dapat diuraikan menjadi:

$$W_E = \iint_s \frac{1}{2} \varepsilon_o \varepsilon_r \iint [(\frac{\partial V}{\partial x})^2 + (\frac{\partial V}{\partial y})^2] ds \quad (2.46)$$

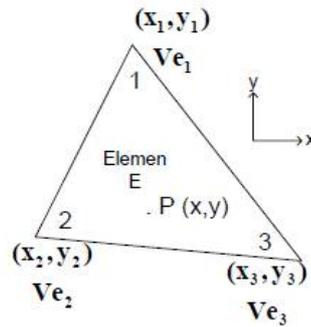
FEM, domain s didiskretisasi menjadi segitiga-segitiga kecil. Tiap segitiga kecil ini disebut sebagai elemen. Sehingga diperoleh rumus :

$$W_E = \sum_{e=1}^{N_e} \iint_{A_s} \frac{1}{2} \varepsilon_o \varepsilon_r \iint [(\frac{\partial V}{\partial x})^2 + (\frac{\partial V}{\partial y})^2] ds \quad (2.47)$$

2.7. 4. Elemen Segitiga Sebagai Potensial Listrik

Untuk menyelesaikan suatu solusi dengan FEM yang sederhana, domain dibagi kedalam bentuk elemen segitiga. Pokok dari metode ini terletak pada waktu pertama kali memperkirakan potensial listrik (V) pada tiap elemen segitiga dan pada setiap nodal dalam segitiga dalam suatu aplikasi. Nilai potensial listrik pada dasarnya terletak pada nodal yang terdapat di sudut-sudut segitiga. Setelah itu potensial listrik yang berada pada elemen segitiga dihubungkan antara satu dengan yang lain dengan bentuk dan ukuran segitiga yang berbeda sehingga dapat diketahui potensial listrik pada tiap-tiap nodal. Fungsi V di titik $P(x,y)$ dalam sebuah segitiga dapat diperkirakan sebagai masalah linear:

$$V = a + bx + cy \quad (2.48)$$



Gambar 2.10 Diskretisasi Menurut Kelengkungan domain

Oleh karena $i, i1$ dan $i2$ adalah siklus permutasi dari 1, 2, dan 3, maka didapatkan persamaan berikut :

$$V = \sum_{i=1}^3 V_i \alpha_i(x, y) \quad (2.49)$$

$$\alpha_i = \frac{1}{2A_E} \{ (x_2 y_3 + x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y \} \quad (2.50)$$

Energi yang bersesuaian dengan sebuah segitiga pada gambar 2.5 dapat diaplikasikan pada persamaan 2.49 dalam area lokal (hanya sebuah segitiga). Gradien potensial listrik dapat diaplikasikan pada persamaan 2.47 pada sebuah segitiga yaitu:

$$W_E = \frac{1}{2} \epsilon_o \epsilon_r \int |\nabla V|^2 ds$$

Energi menjadi :

$$W_E = \frac{1}{2} \epsilon_o \epsilon_r \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 V_i \int \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j ds V_j \quad (2.51)$$

Dengan $S_{i,j}$ merupakan matriks pada sebuah elemen :

$$S_{i,j} = \int \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j ds \quad (2.52)$$

Persamaan 2.51 dapat ditulis sebagai matriks kuadrat dalam bentuk energi:

$$W_E = \frac{1}{2} \varepsilon_o \varepsilon_r V^T S V \quad (2.53)$$

Keterangan :

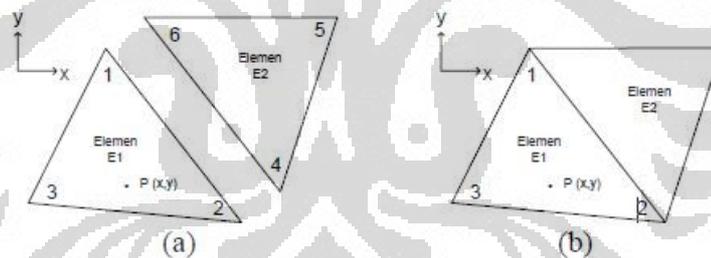
V adalah matriks kolom dari potensial listrik pada titik V_{e1} , V_{e2} , V_{e3}

T adalah transpose matriks V

Untuk setiap elemen segitiga lain, matriks S dapat diaplikasikan dengan mensubstitusi persamaan 2.49 ke dalam persamaan 2.52. Sebagai contoh yaitu koneksi antara nodal 1 dan nodal 2 menghasilkan S_{12} :

$$\frac{1}{4A} \{(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)\} \quad (2.54)$$

2.7. 4. Penyatuan Elemen Segitiga



Gambar 2.11 Penyatuan Elemen Segitiga, a) dua elemen segitiga yang belum terhubung (dua elemen, 6 nodal) b) dua elemen segitiga yang saling terhubung (dua elemen, 4 nodal)

Energi pada elemen yang saling terhubung adalah:

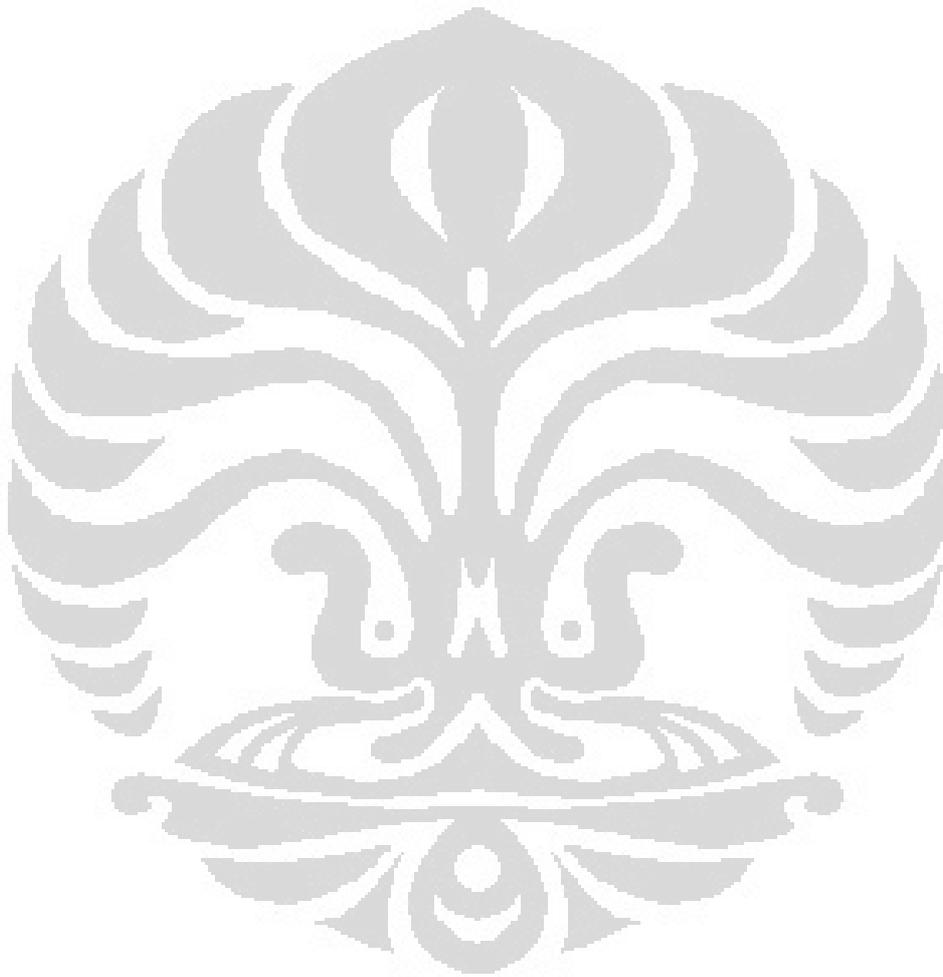
$$W_E = \frac{1}{2} \varepsilon_o \varepsilon_r V_{con}^T S V_{con} \quad (2.55)$$

Dengan

$$S = C^T S_{dis} C \quad (2.56)$$

yang merupakan matriks koefisien dari segitiga yang saling terhubung. Untuk penggabungan pada gambar 2.10, maka matriks koefisiennya adalah:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11}^{(1)} + S_{66}^{(2)} & S_{12}^{(1)} + S_{64}^{(2)} & S_{13}^{(1)} & S_{65}^{(2)} \\ S_{21}^{(1)} + S_{46}^{(2)} & S_{22}^{(1)} + S_{44}^{(2)} & S_{23}^{(1)} & S_{45}^{(2)} \\ S_{31}^{(1)} & S_{32}^{(1)} & S_{33}^{(1)} & 0 \\ S_{56}^{(2)} & S_{54}^{(2)} & 0 & S_{55}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$



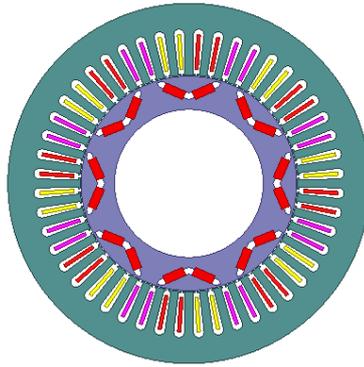
BAB III

SIMULASI, PERHITUNGAN, dan

PEMBUATAN MAP EFFISIENSI

Pada simulasi ini digunakan disain motor PMSM dari salah satu kendaraan hybrid yang telah ada. Pada kendaraan hybrid ini mesin permanen magnet akan bekerja sebagai generator ataupun motor sinkron karena pada skripsi ini hanya membahas tentang map efisiensi dari motor maka mesin permanen magnet yang bekerja sebagai generator akan diabaikan. Pemilihan motor PMSM dari kendaraan hybrid ini sebagai bahan simulasi dikarenakan telah banyak dilakukan percobaan dan simulasi baik secara software ataupun riil. Sehingga proses validasi dapat dengan mudah dilakukan.

Mesin kendaraan menggunakan jenis motor PMSM dengan type *Interior Permanent Magnet* (IPM). IPM merupakan motor permanen magnet yang magnetnya tertanam didalam rotor. Motor ini memiliki delapan pasang magnet yang berbeda sudut sebesar 45 derajat dan jumlah slot sebanyak 48 slot dengan arus reference sebesar 200 ampere dan tegangan reference 300 V. Sedangkan untuk referensi kecepatannya motor ini bekerja pada kecepatan 1500 Rpm. Untuk kerja dari motor merupakan constan power dengan kata lain motor ini bekerja pada tegangan yang tetap tetapi nilai arus yang diubah – ubah untuk menentukan kecepatan yang diinginkan.



Gambar 3.1. Geometri Prius Permanen Magnet

Tabel 3.1. Spesifikasi Mesin

Nama	Nilai	Units
Tipe Mesin	Interior Permanent Magnet	
Daya Referensi	20	kW
Kecepatan Referensi	1500	Rpm
Tegangan Referensi	300	Voltage
Arus referensi	200	Ampere
Jumlah Pole	8	
Jumlah Slot	48	
Bahan stator dan rotor	SiFe	
Jenis Magnet	N36Z-20C	
Type of Load	Daya konstan	
Friction loss coeficient (kf)	560	W
Windage loss coeficient (kw)	580	W
Temperatur operasi	75	°C

3.1. Map Efisiensi Menggunakan Software *Finite Element Analysis*

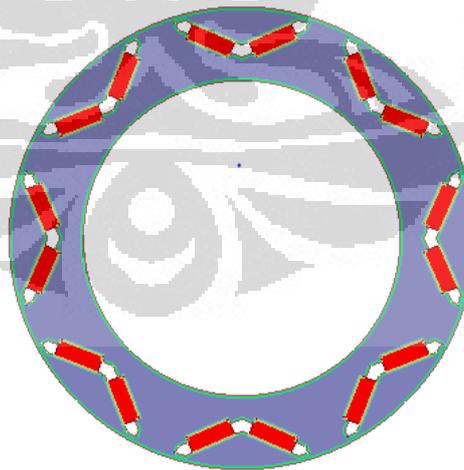
Pada simulasi menggunakan software FEM ini dibutuhkan beberapa parameter agar simulasi dapat berjalan diantaranya adalah spesifikasi rotor, stator, magnet. Proses simulasi ini dilakukan selama lima belas detik untuk setiap langkah dimana langkah tersebut diatur sesuai dengan rpm yang ingin diambil nilainya dan pengambilan sample nilai akan dilakukan setiap 5 milisecond, simulasi ini dilakukan secara no load.

3.1.1. Rotor

Pada rotor ini bahan yang digunakan adalah besi dengan jenis SiFe. Rotor ini akan tertanam pada polenya permanen magnet yang berjenis N36Z-20C dengan nilai flux magnet sebesar 0.22 Vs. Setiap pole yang ada pada rotor ini terdiri dari sepasang magnet yang memiliki perbedaan 90 derajat antara satu dengan yang lainnya dan memiliki perbedaan sebesar 45 derajat antara pasangan magnet yang satu dengan yang lainnya. Perbedaan yang terjadi di dalam magnet di suatu pasangan dimaksudkan untuk mendapatkan medan magnet yang sangat kecil pada bagian tengah pasangan magnet tersebut sehingga gaya tarik dan lontar yang dihasilkan akibat adanya medan magnet tersebut mendapatkan nilai maksimum. Berikut spesifikasi rotor dari motor tersebut

Tabel 3.2. Spesifikasi Rotor

Nama	Nilai	Units
Diameter luar	160.4	mm
Diameter dalam	110.64	mm
Poles	8	
Tebal magnet	6.48	mm
Jarak pisah magnet	4.5	mm
Panjang magnet	32	mm
Stacking factor	0.95	



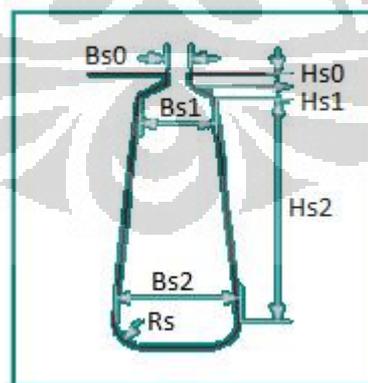
Gambar 3.2. Geometri Rotor

3.1.2. Stator

Pada stator ini bahan yang digunakan untuk membuat stator sama dengan rotor yaitu SiFe. Pada bagian stator ini terdapat slot tempat untuk menaruh konduktor yang akan menghasilkan medan magnet. Pada slot ini terdapat slot dengan jumlah 48 buah dengan tipe single layer atau satu buah slot hanya untuk satu buah phase konduktor. Slot ini memiliki tipe seperti balon yang ditarik dimana bagian yang dekat dengan rotor akan menyempit dan bagian di ujung yang lain akan melebar membentuk setengah lingkaran.

Tabel 3.3. Spesifikasi Stator

Nama	Nilai	Units
Diameter Luar	269.24	mm
Diameter Dalam	161.9	mm
Jumlah slot	48	
Hs0	1.03	mm
Hs1	0	mm
Hs2	29.5	mm
Bs0	1.93	mm
Bs1	5	mm
Bs2	8	mm
Rs	5	mm

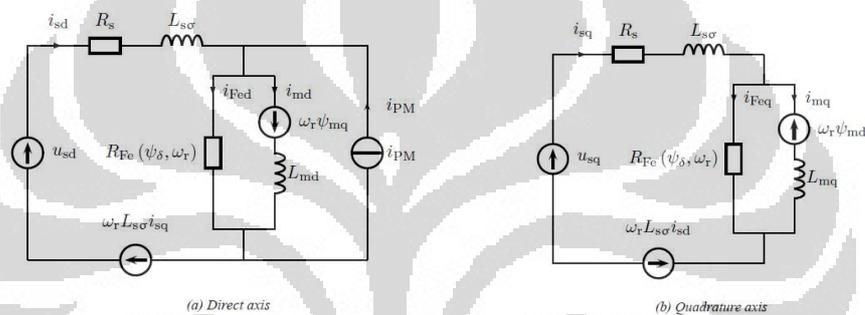


Gambar 3.3. Geometri slot

3.2. Map Effisiensi Menggunakan Metode Quasi-static

3.2.1. Pemodelan PMSM berdasarkan metode *Quasi Static*

Pada *Quasi static* pemodelan berdasarkan sirkuit ekuivalen pada gambar 3.4. Pemodelan tersebut menggunakan teori vektor ruang untuk menggambarkan komponen – komponen yang bekerja pada sistem PMSM. Tetapi pada *quasi static* model kerja yang menggunakan perubahan nilai yang diakibatkan oleh waktu akan dihilangkan. Dikarenakan *quasi static* menggunakan iterasi pada komponen – komponen PMSM sehingga perubahan terhadap waktu akan berbentuk diskrit.



Gambar 3.4. Rangkaian ekuivalen untuk a). *Direct axis* b). *Quadrature axis* pada PMSM

Pada quasi static model ini membutuhkan nilai torsi maksimum dan kombinasi maksimum dari arus *direct* dan *quadrature* axis (Perhitungan maksimum torsi dan kombinasi i_q dan i_d akan dibahas pada bagian selanjutnya) untuk mendapatkan kurva map efisiensi yang sesuai dengan kerja dari sistem. Dengan melihat gambar 3.4 maka akan didapatkan persamaan tegangan untuk *direct-axis* (U_{sd}) dan *quadrature-axis* (U_{sq}) yaitu[21]

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \omega_r \varphi_{sq} \quad (3.1)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} - \omega_r \varphi_{sd} \quad (3.2)$$

Dengan R_s merupakan tahanan pada stator i_{sd} dan i_{sq} adalah arus *direct* dan *quadrature-axis*, ω_r adalah kecepatan angular elektrik, dan φ_{sq} , φ_{sd} merupakan

fluks *direct dan quarature-axis* yang perhitungannya dapat menggunakan persamaan (2.5) dan (2.6), seperti dijelaskan pada paragraph sebelumnya pada *quasi static* ini menggunakan kombinasi arus id dan iq sehingga dengan nilai induktansi yang konstan akan menghasilkan *error* yang besar pada torsi – torsi tinggi. Nilai komponen – komponen penyusun pemodelan tersebut dapat dilihat pada tabel 3.4. Nilai – nilai tersebut didapatkan dari laporan Roger A. Susan [9].

Tabel 3.4. Komponen dq-axis

Nama	Nilai	Units
Stator direct-axis inductance (Ld)	1,92	mH
Stator Quadrature-axis inductance (Lq)	5	mH
Stator leakage inductance	1	mH
Friction loss coefisient (kf)	560	W
Windage loss coefisient (kw)	580	W
Permanent Magnet flux linkage	0.33	Vs
Stator resistance	3.72	Ohm
Rated speed	1500	Rpm
Maximum power	50	Kw

3.2.2. Perhitungan rugi – rugi daya

Pada metode *quasi static* akan dipertimbangkan beberapa loss diantaranya rugi besi, rugi tembaga, serta rugi mekanik. Rugi mekanik terjadi akibat adanya gaya gesekan dan rugi- rugi di airgap akibat perputaran antara rotor dengan stator yang menyebabkan adanya resistansi pada daerah tersebut sehingga akan menimbulkan panas pada motor. Sehingga rugi daya mekanik yang timbul merupakan penjumlahan dari daya akibat gesekan dan daya yang ada di airgap perputaran sudut dari rotor dan stator, oleh karena itu pada perhitungannya dibutuhkan koefisien gesek serta *koefisien windage*. Berdasarkan persamaan 2.35 maka akan didapatkan rugi daya mekanik tetapi karena pada *quasi static* tidak ada perubahan berdasarkan waktu maka pada persamaan 2.35 fungsi yang mengandung $d\omega/dt$ akan menjadi nol (0) dan gaya gesek static dan coulomb ditiadakan sehingga rugi daya mekanik akan memiliki persamaan[21] :

$$P_{mec} = K_f \frac{\omega_{mec}}{\omega_{mec,n}} + K_w \left(\frac{\omega_{mec}}{\omega_{mec,n}} \right)^3 \quad (3.3)$$

Untuk nilai koefisien gesek (K_f) dan *windage* (k_w) pada persamaan model ini adalah 560W dan 580W. $\omega_{mec,n}$ adalah kecepatan sudut mekanik dari motor apada saat *rated speed*. Kecepatan sudut mekanik ini merupakan pembagian dari kecepatan sudut electric motor dengan jumlah pole sehingga untuk mencari kecepatan sudut mekanika adalah[21]

$$\omega_{mec} = \omega_r / p \quad (3.4)$$

untuk $\omega_{mec,n}$ adalah kecepatan sudut mekanik dari motor pada setiap n kecepatan sudut electric.

Rugi besi adalah jumlah rugi – rugi daya akibat sifat magnet dari suatu bahan. Berdasarkan persamaan 2.24 maka akan didapatkan daya besi silicone sebesar 3.81 [5]. Dengan diketahuinya daya maksimum dari jenis besi silikon maka nilai resistansi akan dapat diketahui yaitu dengan menggunakan persamaan

$$R_{fe} = U_{mq} / P_{fe} \quad (3.5)$$

Dari persamaan tersebut maka dapat dicari nilai i_{Fe} yaitu dengan persamaan

$$i_{fed} = U_{md} / R_{fe} \quad (3.6)$$

$$i_{feq} = U_{mq} / R_{fe} \quad (3.7)$$

$$i_{fe} = \sqrt{i_{fed}^2 + i_{feq}^2} \quad (3.8)$$

Sehingga rugi daya besi pada setiap kecepatan dapat dicari menggunakan persamaan[5]

$$P_{fe} = R_{fe} i_{fe}^2 \quad (3.10)$$

3.2.3. Daerah kerja PMSM

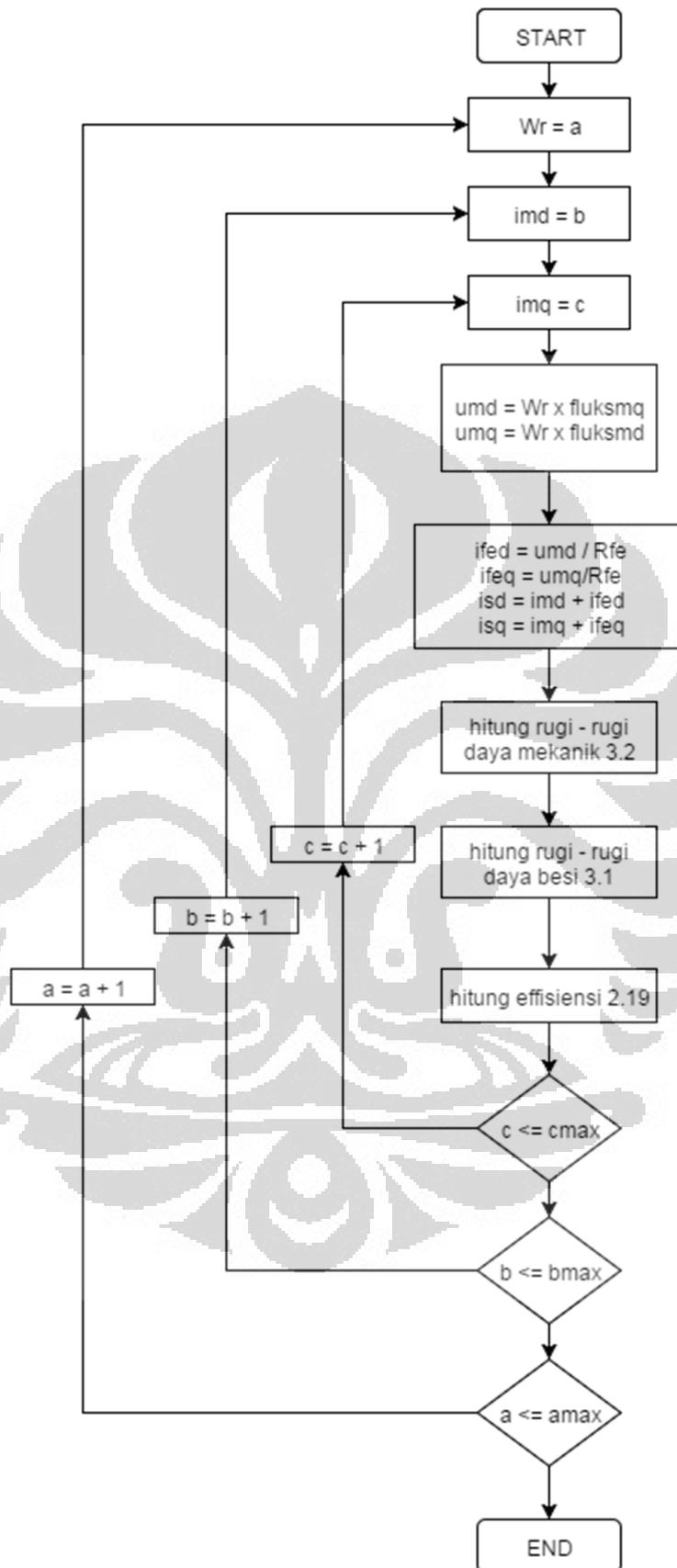
Untuk mendapat map efisiensi maka dibutuhkan daerah kerja dari motor. Daerah kerja ini merupakan perbandingan antara torsi dengan kecepatan sehingga akan didapatkan grafik antara kecepatan dengan torsi. Penentuan torsi merupakan kombinasi dari nilai i_{md} dan i_{mq} . Nilai maksimal dari i_{md} dan i_{mq} didapatkan dari *software* FEM yaitu 101 dan 208. Sedangkan untuk torsi didapatkan dari persamaan daya keluaran yaitu[2]

$$P_{out} = Torque \times \omega_{em} \quad (3.12)$$

Maka dengan P_{out} didapatkan dari perkalian arus referensi dengan tegangan referensi yaitu 60000VA. Karena pada motor ini memiliki kecepatan referensi sebesar 1500 Rpm maka torsi untuk kecepatan sebelum 1500 Rpm akan maksimal dan torsi yang sesudah 1500 Rpm akan mengalami penurunan.

3.2.4. Pembuatan *flowchart* map efisiensi

Simulasi program yang akan dibuat untuk map efisiensi berdasarkan metode *quasi static* dengan kontrol MTPA ini sangat bertautan dimana pada MTPA merupakan metode kontrol dengan mengkombinasikan antara arus i_{md} dan i_{mq} sedangkan pada metode *quasi static* merupakan metode mencari map efisiensi dengan cara iterasi, sehingga proses iterasi yang dilakukan pada pembuatan map efisiensi ini dapat didasarkan pada kombinasi setiap i_{md} dan i_{mq} pada setiap kecepatan. Kecepatan yang digunakan adalah kecepatan sudut electric sehingga diperlukan konversi kecepatan terlebih dahulu pada program. Maka program akan memiliki flowchart seperti gambar 3.5



Gambar 3.5 flowchart program

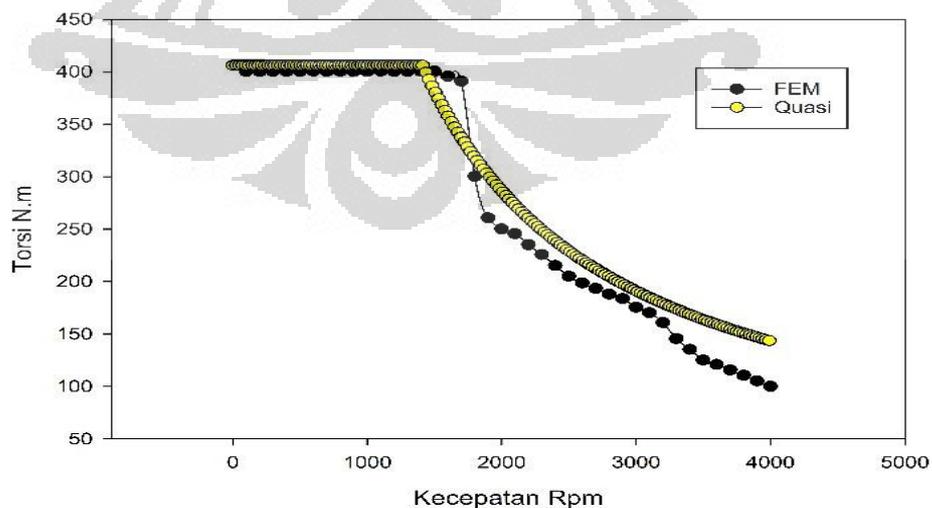
BAB IV

ANALISA

Pada bab ini akan dijelaskan tentang perbedaan map efisiensi antara metode *quasi static* dengan map efisiensi yang dikeluarkan oleh *software* FEM. Bagian yang menjadi pembanding adalah daerah kerja torsi, rugi - rugi yang terjadi dan map efisiensi yang dihasilkan. Torsi menjadi penting untuk menjadi bahan perbandingan karena daerah kerja torsi pada disain dapat menentukan apakah motor tersebut dapat bekerja pada kecepatan referensi yang diinginkan. Rugi - rugi daya akan menjadi bahan pembanding selanjutnya karena rugi- rugi akan mempengaruhi daya keluaran motor sehingga nilai efisiensi pun akan terpengaruh. Selanjutnya map efisiensi juga menjadi bagian utama yang dibandingkan karena dengan map efisiensi akan diketahui persebaran dari efisiensi berdasarkan torsi dan kecepatan.

4.1. Torsi

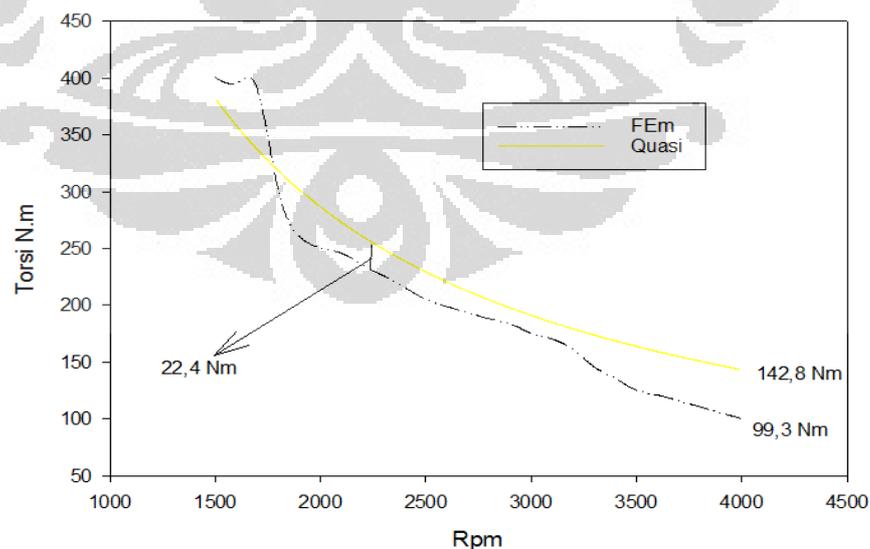
Pada perbandingan torsi ini akan melihat bagaimana besar kecilnya torsi berdasarkan kecepatan sehingga akan diketahui daerah kerja torsi untuk suatu motor. Untuk lebih lanjut dapat melihat Gambar 4.1



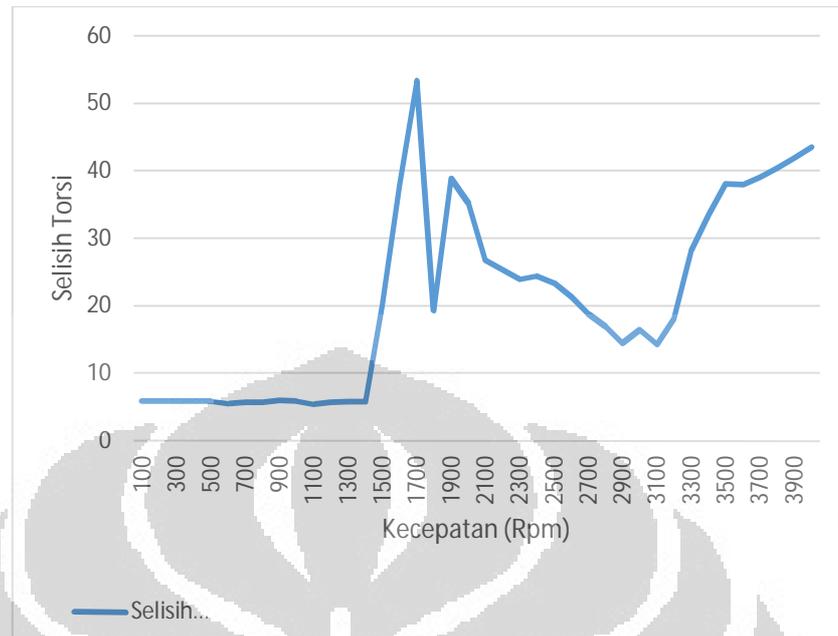
Gambar 4.1. Grafik perbandingan torsi *quasi static* dengan keluaran FEM

Pada Gambar 4.1 merupakan grafik perbandingan antara torsi yang dikeluarkan oleh metode FEM dengan *quasi static*. Untuk keluaran *software* FEM pada grafik tersebut digambarkan dengan hubungan garis dan titik yang berwarna hitam sedangkan untuk *quasi static* yang berwarna kuning. Dari grafik dapat dilihat bahwa garis torsi yang dikeluarkan oleh metode *quasi static* lebih halus atau titik yang dibentuk lebih rapat dan *slope* yang dibentuk pun lebih sempurna dari pada garis torsi yang dibentuk oleh *software* FEM hal ini disebabkan oleh jumlah iterasi yang dilakukan oleh kedua metode tersebut. Hal ini terjadi karena pada *quasi static* jumlah iterasi untuk mencari torsi dilakukan berdasarkan perubahan per satu kecepatan sudut electric. Sedangkan pada keluaran *software* FEM jumlah iterasi dilakukan berdasarkan kecepatan sudut mekanik dari motor dan tidak dapat ditentukan perulangan iterasi yang dilakukan. Sebagai contoh pada *software* FEM ini yang dijadikan sebagai input bukan berapa rentang iterasi yang ingin dilakukan tetapi jumlah iterasi yang ingin dilakukan sehingga *software* akan bebas melakukan perulangan untuk iterasi hingga mencapai jumlah yang diinginkan.

Pada Gambar 4.1, juga dapat dilihat bahwa grafik *quasi static* memiliki nilai yang lebih besar pada torsi yang dihasilkan daripada grafik yang dihasilkan *software* FEM. Untuk lebih lanjut perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.2



Gambar 4.2. Perbedaan besar torsi



Gambar 4.3. Selisih torsi

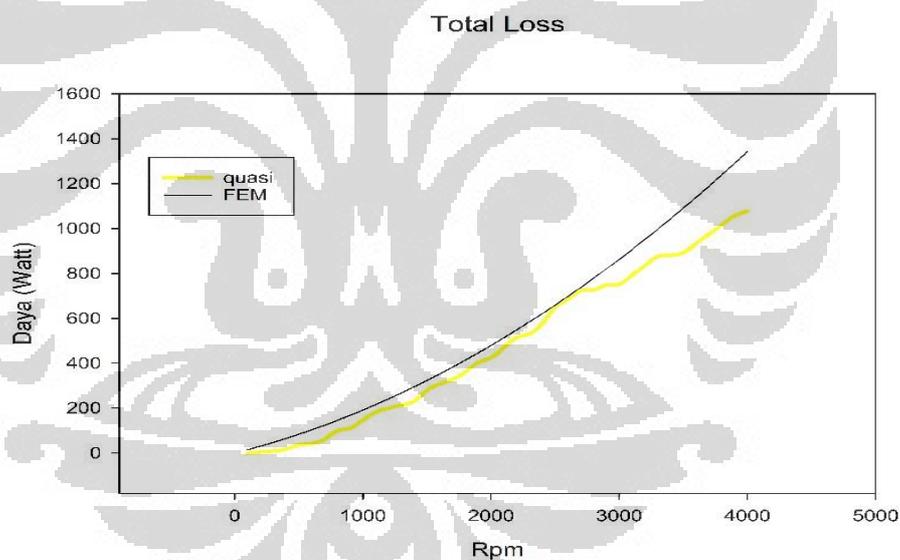
Dari Gambar 4.2 didapatkan nilai selisih torsi antara metode FEM dengan *quasi static* terjadi perbedaan, itu dapat dilihat pada kecepatan 2238 dan 4000 atau daerah saturasinya. Hal ini dapat terjadi karena perbedaan rumus atau persamaan yang dipakai dalam mencari torsi dimana pada *software* FEM walaupun *software* ini berbasis FEM tetapi untuk mencari map efisiensi pun menggunakan dq-axis, pada persamaan dq axisnya mengikutsertakan komponen yang berubah secara waktu sedangkan pada *quasi static* tidak hal ini juga akan mempengaruhi nilai arus yang akan menghasilkan torsi serta pada *software* FEM ini mengabaikan rugi besi pada perhitungan torsi tetapi untuk perhitungan daya tidak. Secara keseluruhan selisih dari nilai torsi antara *quasi static* dengan *software* FEM dapat dilihat pada Gambar 4.3.

Gambar 4.3 didapatkan bahwa grafik selisih absolut dari torsi akan memiliki selisih yang kecil dan konstan ketika kecepatan lebih kecil atau sama dengan kecepatan referensi, tetapi ketika kecepatan lebih besar dari kecepatan referensi terjadi perbedaan yang signifikan pada torsi terutama ketika kecepatan diatas 3000 Rpm dimana selisih absolut torsi cenderung terus naik. Hal ini disebabkan ketika

kecepatan kurang atau sama dengan kecepatan referensi maka perhitungan simulasi akan menggunakan arus maksimum dan daya maksimum sehingga akan terbentuk torsi kinerja dengan hasil selisih absolut yang kecil dan konstan. Tetapi pada kecepatan lebih besar dari kecepatan referensi maka selisih absolut torsi pun akan fluktuatif walaupun menggunakan persamaan yang sama (2.16) untuk menentukan torsi. Dikarenakan pada *quasi static* menggunakan persamaan yang berbeda untuk merumuskan arus *direct* dan *quadrature*-nya. Pada *quasi static* arus i_d dan i_q dibentuk dengan memperhatikan arus besi sedangkan pada *software* FEM tidak. Sehingga i_d dan i_q yang dihasilkan akan lebih besar, sehingga torsi yang dihasilkan pun akan meningkat sesuai dengan besarnya arus.

4.2. Rugi – rugi daya

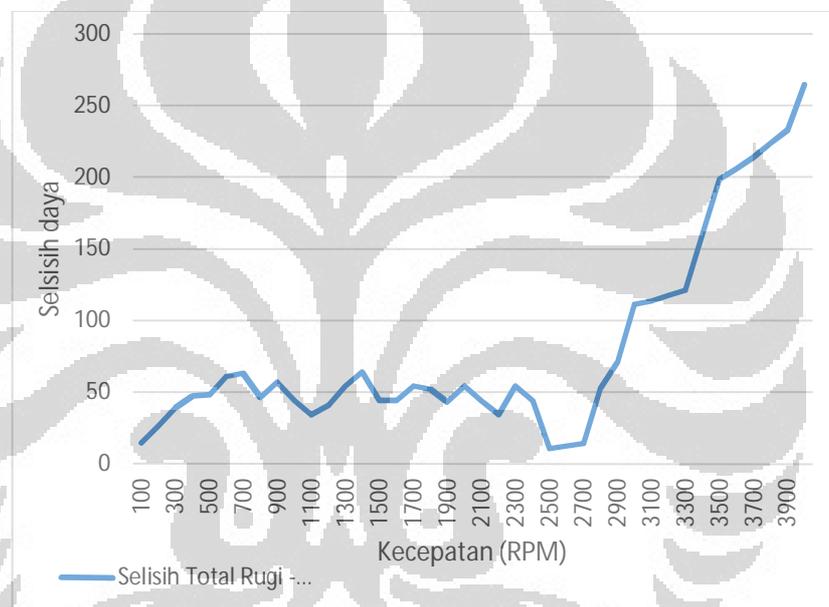
Perbandingan rugi - rugi daya pada kedua metode akan bisa dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.4. Perbandingan daya rugi rugi antara quasi static dengan FEM

Rugi – rugi daya pada Gambar 4.4. dimana total rugi – rugi daya untuk quasi static digambarkan dengan garis kuning dan untuk metode dengan garis biru. Rugi – rugi total daya ini dibentuk dari rugi daya mekanik, rugi daya besi, dan rugi daya tembaga. Dari Gambar 4.4 Dapat dilihat bahwa rugi – rugi total daya untuk metode *quasi static* berbeda dengan rugi – rugi daya yang dikeluarkan oleh *software*

FEM, dimana rugi daya pada *FEM* lebih besar. Hal ini bisa disebabkan oleh penetapan metode yang digunakan untuk mencari nilai masing – masing rugi - rugi daya berbeda. Sebagai contoh untuk rugi daya besi, pada *quasi static* digunakan persamaan dimana nilai rugi besi akan sama dengan daya histerisis dijumlahkan dengan daya excess ditambah dengan daya klasik tetapi pada *software FEM* rugi daya besi akan berdasarkan daya histerisis dijumlahkan dengan *eddy current loss(dynamic loss)*, *dynamic loss* itu akan selalu lebih besar dari pada daya klasik [5]. Hal itu dapat tercermin dari total rugi daya yang dihasilkan.



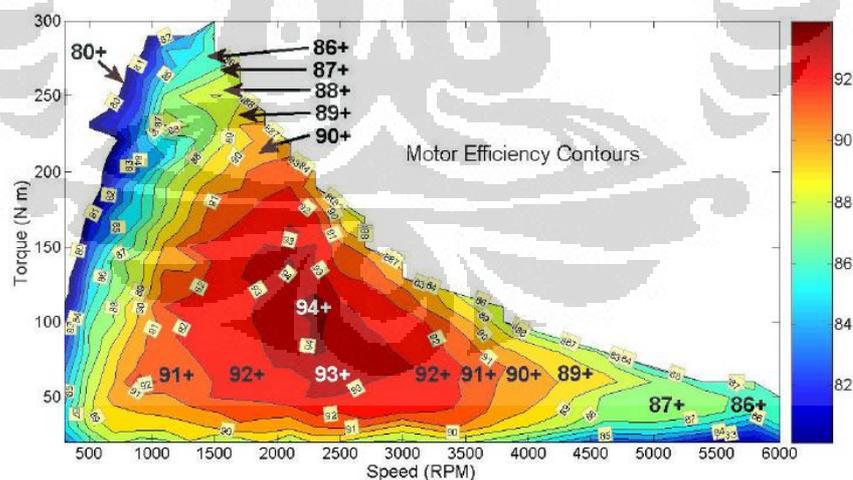
Gambar 4.5. Selisih rugi – rugi daya

Dari grafik 4.5 dapat dilihat bahwa selisih rugi – rugi absolut membentuk kurva yang pada awal – awal, selisih berada pada rentang 40 hingga 60 untuk kecepatan 300 – 2700 Rpm, sedangkan pada kecepatan diatas 2700 Rpm selisih yang terjadi semakin meningkat. Hal ini sebabkan penggunaan persamaan dimana untuk rugi daya elektrik nya pada *quasi static* menggunakan persamaan 2.24 sedangkan pada *software FEM* untuk persamaan 2.24, daya *class* dan *excess* diganti dengan *eddy current loss* atau rugi dinamik. Pada daya *class dan excess* komponen yang menjadi perhitungan daya merupakan frekuensi (persamaan 2.25 dan 2.26) sedangkan pada daya dinamik yang menjadi komponen adalah kecepatan

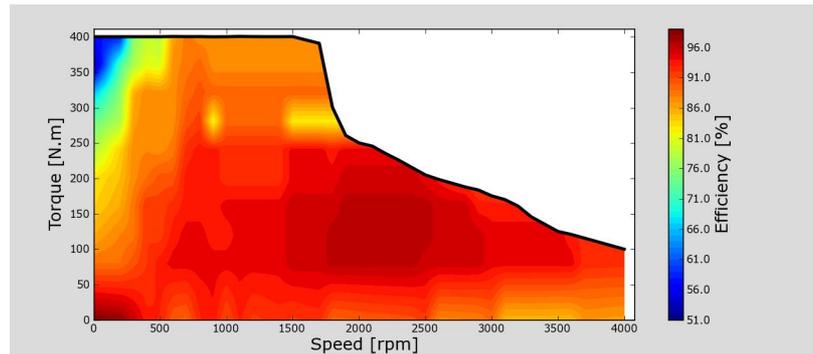
(persamaan 2.31). Dari hal tersebut didapatkan bahwa pada rentang kecepatan 300 – 2700 Rpm daya *class* dan *excess* masih dapat mengejar atau menyamai daya yang dihasilkan oleh daya dinamik tetapi setelah di kecepatan 2700 Rpm frekuensi yang dipakai sebagai perhitungan daya *class* dan *excess* sudah tidak dapat menyamai kecepatan daya dinamik. Selain itu hal ini juga dapat dipengaruhi oleh daya mekanik dimana pada daya mekanik yang dipakai pada perhitungan *quasi static* kecepatan angular yang dipakai merupakan perbandingan antara kecepatan *reference* dengan kecepatan anglura yang diinginkan sehingga hasilnya pun akan berbeda dengan *software* FEM yang murni menggunakan kecepatan angular tanpa perbandingan.

4.3. Map efisiensi

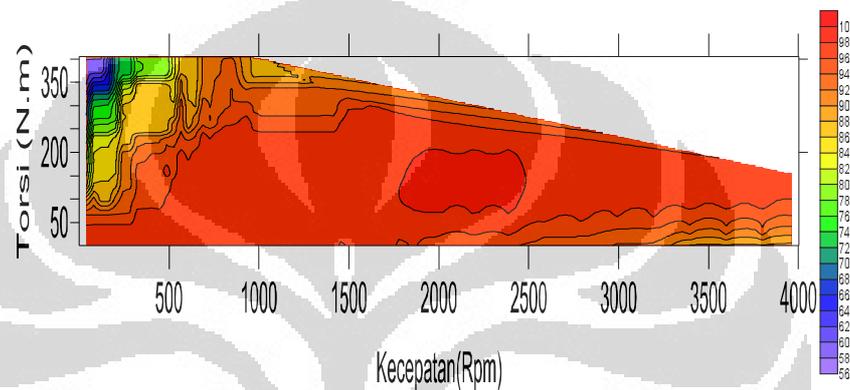
Map efisiensi yang terbentuk merupakan map kinerja motor terhadap kecepatan dan torsi. Nilai efisiensi ini akan diGambarkan dengan perubahan warna yang terjadi pada setiap torsi dan kecepatan, untuk lebih lanjutnya dapat melihat map efisiensi antara *quasi static* dengan map efisiensi keluaran *software* FEM, dan riil motor IPM pada Gambar 4.6, 4.7, 4.8



Gambar 4.6. Map riil efisiensi motor IPM



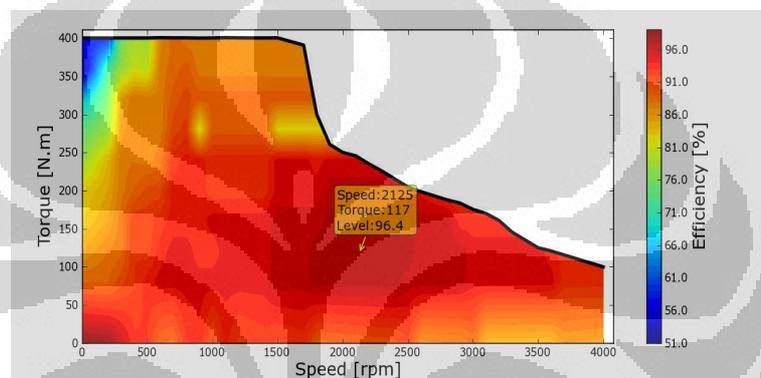
Gambar 4.7. Map efisiensi *quasi static*



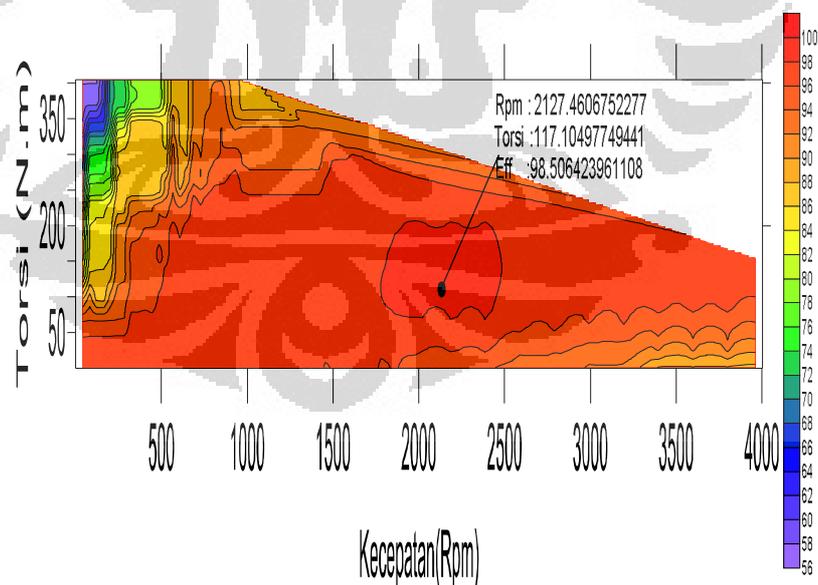
Gambar 4.8. Map efisiensi *software FEM*

Dari Gambar 4.6, 4.7, 4.8 dapat dilihat bahwa terdapat kontur efisiensi yang dimiliki oleh masing – masing map, dimana map yang dihasilkan oleh *software FEM* lebih banyak kontour dibandingkan map yang dihasilkan oleh *quasi static* dengan kata lain sebaran nilai yang terjadi pada map *software FEM* lebih banyak atau beraneka ragam dan hasil map efisiensinya pun lebih menyerupai dari hasil yang dikeluarkan pengujian motor secara riil, perbedaan antara hasil yang dikeluarkan oleh *software FEM* dengan metode *quasi static* terjadi akibat adanya pengambilan nilai dibelakang koma pada perhitungan serta pembulatan yang terjadi. Pembulatan dan pengambilan nilai di belakang koma terjadi akibat adanya toleransi yang bisa diakomodir oleh perangkat lunak terhadap data dari hasil *quasi static* untuk pembentukan map kontur. Sehingga dapat dilihat pada Gambar 4.8 bahwa hasil mapnya lebih seragam pada torsi 0-200 N.m dengan kecepatan 1000 Rpm sampai 2000 Rpm. Selain itu ada perbedaan lainnya yang mendasar yaitu perbedaan nilai efisiensi pada pada setiap masing masing pasang torsi dengan

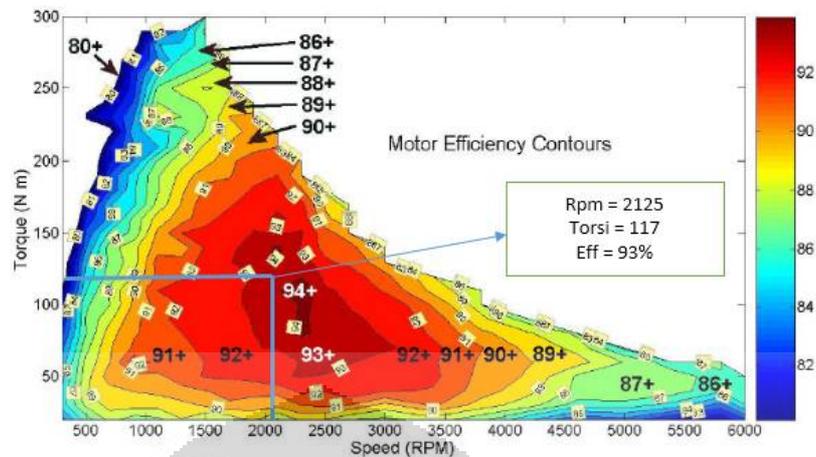
kecepatan hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.9. Pada hasil yang dikeluarkan oleh pengujian riil mesin torsi maksimum yang dikeluarkan adalah 300 N.m sedangkan torsi dari metode *quasi static* dan *Software FEM* didapatkan torsi maksimum sekitar 400 N.m, hal ini dikarenakan pada pengujian riil menggunakan daya masukan *reference* yaitu sebesar 20 Kw sedangkan pada metode *quasi static* dan *software FEM* daya yang digunakan 60 Kw atau daya maksimum yang dapat diakomodir oleh motor, sehingga akan terjadi perbedaan dalam nilai torsi yang akan dipakai. Hal ini sesuai dengan persamaan 2.16 dimana torsi akan dipengaruhi oleh arus yang masuk kedalam motor.



(a. FEM)



(b. Quasi static)

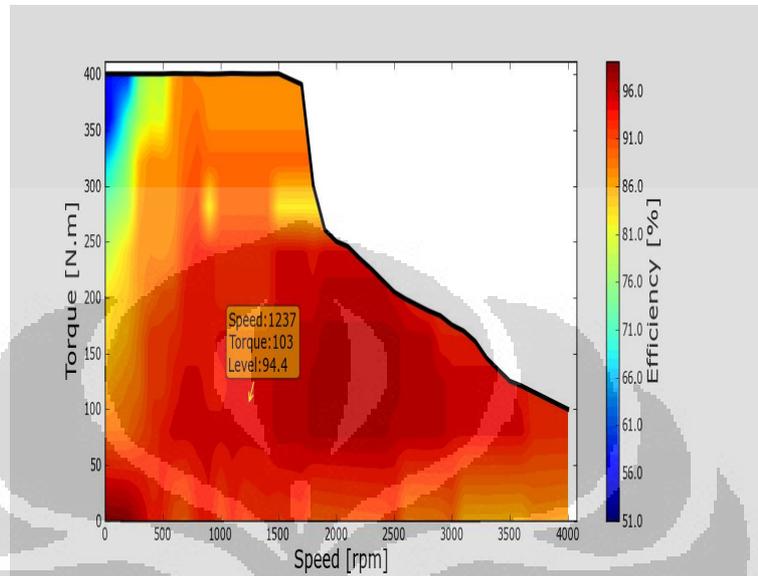


(c. Map efisiensi riil motor IPM

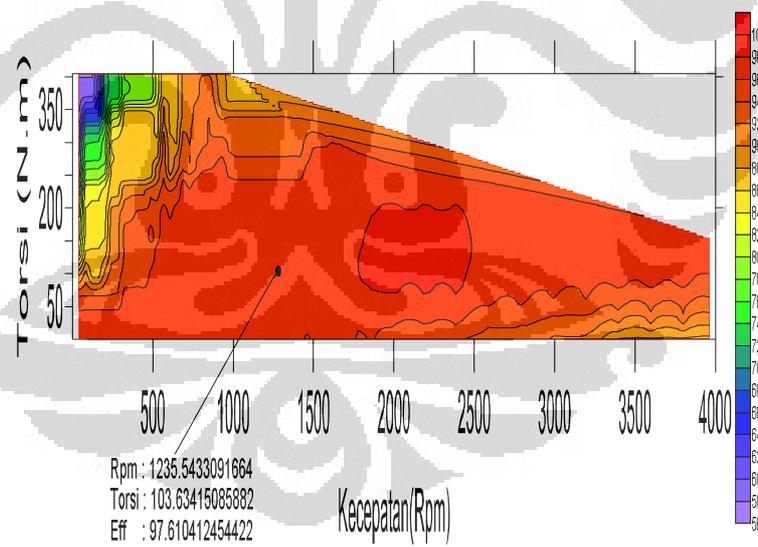
Gambar 4.9. Perbedaan efisiensi pada map untuk torsi 117 N.m dengan kecepatan 2125 Rpm (a. FEM (b. *quasi static* (c. Map riil motor IPM

Dari Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan efisiensi pada torsi 117 N.m dengan kecepatan 2125 Rpm. Pada map efisiensi *quasi static* nilai efisiensi menunjukkan angka 98% sedangkan pada hasil FEM mendapatkan angka 96% dan hasil yang dikeluarkan oleh pengujian riil sebesar 93%, ini pun terjadi pada torsi 103 N.m dengan kecepatan 1237 Rpm dimana saat itu akan dihasilkan efisiensi sebesar 97,6% untuk *quasi static* dan 94,4% untuk FEM dan untuk pengujian riil sebesar 92%(Gambar 4.10) dari hal tersebut dapat di analisa bahwa perhitungan efisiensi dari metode *quasi static* memiliki nilai toleransi sekitar 2% - 3%. Hal ini bisa terjadi akibat dari perbedaan rugi – rugi daya yang dihasilkan seperti dijelaskan pada bagian 4.2 di bab IV. Tetapi hal ini tidak merubah struktur secara keseluruhan dari map efisiensi dikarenakan map efisiensi yang dihasilkan masih serupa, sebagai contoh ketika torsi 367 N.m dengan kecepatan 167 Rpm maka akan didapatkan nilai efisiensi yang hampir serupa yaitu 65% hal ini akan ditunjukkan Gambar 4.11. untuk pengukuran dengan nilai torsi 367 N.m dengan kecepatan 167 Rpm tidak dapat ditampilkan dikarenakan untuk nilai torsi tersebut tidak dapat diakomodir oleh data yang ada tetapi bila memperhatikan tingkah laku map yang dihasilkan maka pada torsi 367 N.m dan kecepatan 167 Rpm maka akan dihasilkan efisiensi yang tidak jauh berbeda karena pada pengujian riil dengan torsi diatas 300 N.m dengan kecepatan 0 – 1000 Rpm efisiensi berada di bawah 80%

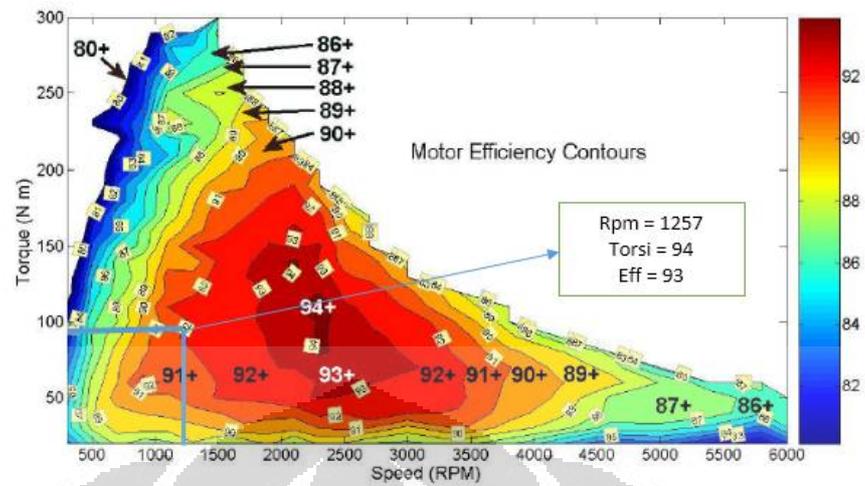
dan terus berkurang sesuai dengan peningkatan torsi. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 4.1



(a. FEM)

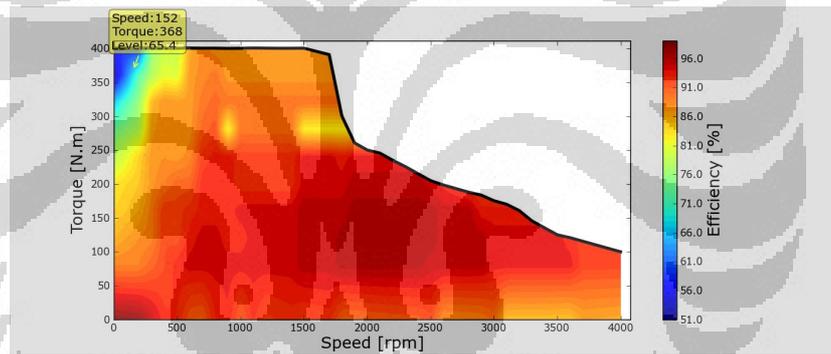


(b. Quasi static)

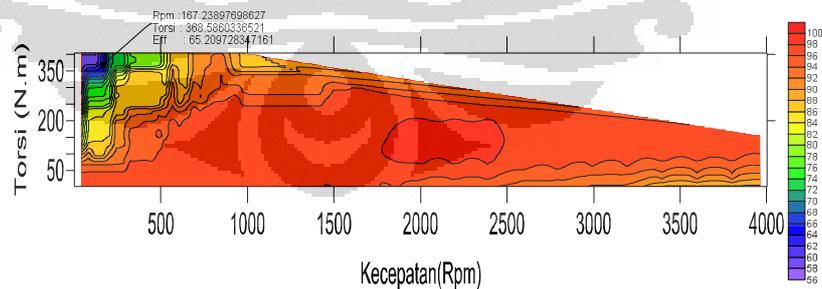


(c. Map riil motor IPM)

Gambar 4.10. Perbedaan efisiensi pada map untuk torsi 103 N.m dengan kecepatan 1235 Rpm (a. FEM (b. *quasi static* (c. Map riil motor IPM)



(a. FEM)



(b. *Quasi static*)

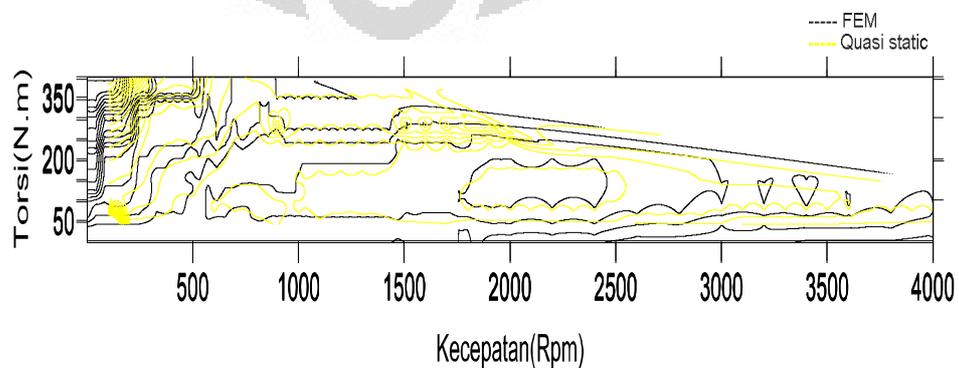
Gambar 4.11. Perbedaan efisiensi pada map untuk torsi 367 N.m dengan kecepatan 167 Rpm (a. FEM (b. *quasi static*)

Jika dilihat maka pada kedua map membentuk suatu region efisiensi yang nilainya dibawah 70% pada torsi diatas 300 N.m dan kecepatan kurang dari 200 Rpm. Perbedaan lainnya adalah luas region suatu nilai efisiensi pada map hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.12

Tabel 4.1. Hasil Map Efisiensi

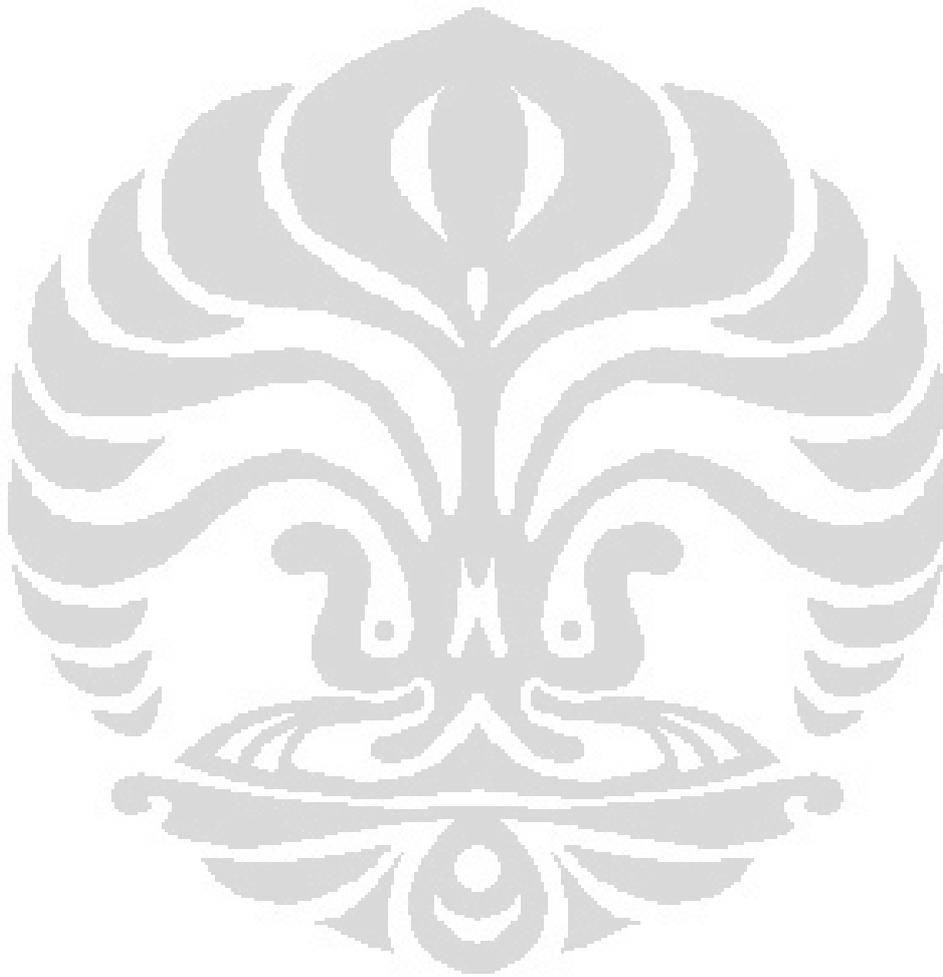
Torsi (N.m)	Kecepatan (Rpm)	Efisiensi Fem (%)	Efisiensi Quasi Static (%)	Efisiensi riil (%)
117	2125	96	98.2	93
94	1237	94.4	96.1	93
367	152	65.4	65.2	< 80

Dari Tabel 4.1 didapatkan bahwa perbedaan efisiensi metode *quasi static* dengan hasil pengujian riil sekitar 4% - 5%, metode FEM dengan pengujian riil 1% - 3%, dan metode FEM dengan *quasi static* 1% - 2%. Dari Tabel 4.1 juga didapatkan sebuah pola untuk metode *quasi static*, dimana semakin rendah kecepatan maka tingkat keakuratan nilai efisiensi semakin tinggi hal ini dapat terjadi akibat pengaruh komponen – komponen perhitungan yang digunakan tidak dapat mengakomodir untuk kecepatan tinggi khususnya dalam perhitungan rugi – rugi daya.



Gambar 4.12. Perbandingan luas kontur

Pada Gambar 4.9. dapat dilihat bahwa hasil map efisiensi yang dibentuk dengan menumpuk kedua map efisiensi memiliki bentuk yang tidak jauh berbeda untuk luas kontur. Dimana map efisiensi yang dibuat dengan *quasi static* menggunakan garis kuning dan map yang dibuat dengan *software FEM* menggunakan garis hitam, perbedaan hanya terjadi pada beberapa daerah cakupan atau luasan yang di tempati oleh suatu efisiensi. Walaupun berbeda, luas wilayah dari kontur efisiensi untuk *quasi static* masih berada di wilayah kerja dari motor.



BAB V

KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Daerah kerja yang didapatkan dengan menggunakan metode *quasi static* dan hasil *software* FEM hampir sama. Hal ini dapat dilihat dari nilai maksimum torsi yaitu 400 Nm dan saturasi pada kecepatan yang lebih besar dari 1500 Rpm atau pada kecepatan referensi.
2. Rugi – rugi daya yang didapatkan menggunakan kedua metode akan berada pada nilai konstan ketika berada di bawah region kerja terbaiknya dapat dilihat pada bagian 4.3 dan cenderung meningkat ketika melewati region kerja terbaiknya.
3. Metode FEM didapatkan hasil yang cenderung baik dan mendekati nilai riil untuk kecepatan rendah hal ini dapat dilihat dari Tabel 4.1. dimana untuk kecepatan tinggi selisih absolut yang dihasilkan sekitar 3% sedangkan ketika berada di kecepatan yang lebih rendah maka selisih absolut menjadi 1% sedangkan untuk metode *quasi static* jika diasumsikan nilai riil sama dengan nilai metode FEM karena nilai pengujian riil untuk kecepatan rendah tidak ditampilkan, maka metode *quasi static* juga memiliki keakuratan yang bagus untuk mencari nilai efisiensi pada kecepatan rendah dikarenakan hasil yang didapatkan sama dengan metode FEM yaitu 65% atau dengan selisih absolut 0.2%

DAFTAR REFERENSI

- [1]. Miller, T., & Hendershot, J. (1994). *Design Of Brushless permanent-magnet Motors*. New York: Oxford university Press Inc.
- [2]. Edwards, J. (2004). *Course in Electromagnetics Year1*. University of Sussex.
- [3]. James L. Kirtley Jr.(2010).Massachusetts Institute of Technology
- [4]. Kenjo, T., & Nagamori, S. (2003). *Brushless Motor Advanced Theory and Modern Applications*. Tokyo : Sogo Electronic Press
- [5]. Bertotti, Giorgio. (1988). *General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Material*. IEEE Transaction on Magnetics
- [6]. R.H. Pry and C.P.Bean, “ calculation of the energy loss in megnetic sheet material using a domain model” J.Appl. phys. Vol29, pp.532-533,1998
- [7]. J. Kang, *General purpose permanent magnet motor drive without speed and position sensor*. Yaskawa Electric Corp., Japan, Yaskawa aplication note Wp. AFD.
- [8]. A. Adeeb, *Maximum Torque Per Ampere Control for Permanent Magnet Synchronous Machine Drive System*. University of akron, Turkey.
- [9]. Roger A. Susan, “*Evaluation of 2004 Prius Hybrid Electrical System*”, Oak Ridge National Laboratory, 2006.
- [10]. Monteiro. J.R.B.A, Oliveira A.A, Sanagiotti, *electronic torque ripple and copper losses reduction in permanent magnet synchronous machine”*, *European Transaction on Electrical Power*, Wiley online library, DOI : 10.1002/etep594,2011.
- [11]. Chapman, S. J. (2012). *Electric Machine Fundamentals 5th Ed*. New York: McGraw-Hill.
- [12]. Cros, J., & Viarouge, P. (1999). *Synthesis of High Performance PM Motors With Concentrated Windings*. IEEE, 725-727.
- [13]. El-Refaie, A. M. (2010). *Fractional-slot Concentrated Winding Synchronous Permanent Magnet Machines: Oppurtinities and Challenges*. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 107-121.

- [14]. Ferreira, F. J., Baoming, G., & Almeida, A. T. (2014). *Stator Winding Connection-Mode Management in Line-Start Permanent Magnet Motors to Improve Their Efficiency and Power Factor*. IEEE Transaction on Energy Conversion, 523-533.
- [15]. Gieras, J. F. (2010). *Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications*. USA: CRC Press.
- [16]. Hanselman, D. (2003). *Brushless Permanent Magnet Motor Design Second Edition*. Ohio: Magna Physics Publishing.
- [17]. Hanselman, D. C. (1994). *Brushless Permanent-Magnet Motor Design*. Orono, Maine: McGraw-Hill, Inc.
- [18]. Jones, D. (n.d.). *The Impact of Different Winding Configurations on Brushless PM Motor Performance*. Thousand Oaks, CA: Incremotion Associates.
- [19]. Kenjo, T., & Nagamori, S. (1985). *Permanent-Magnet and Brushless DC Motors*. New York: Oxford University Press.
- [20]. Nehl, T., Demerdash, N., & Fouad, F. (1985). *Impact of Winding Inductances and Other Parameters on The Design and Performance of Brushless DC Motors*. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 2206-2213.
- [21]. Immonen, Paula. (2013). *Energy Efficiency of a Diesel - Electrical Mobile Working Machine*. Thesis for the degree of Doctoral of Science (Technology). Lappeenranta : Lappeenranta University of Technology, Finland.
- [22]. Logan Darly L., *A First Course In The Finite Element Method*, PWS-KENT Publishing Company, Boston, 1992.
- [23]. Azmi, Safarul. *Penggunaan FEM dalam Memetakan Medan Listrik*, L2F002609. Semarang : Universitas Diponegoro