



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - Te141599**

**ANALISA DAN PENGEMBANGAN AXIAL FLUX INDUCTION  
MOTOR (AFIM) SINGLE STATOR SINGLE ROTOR  
DENGAN 3D FEM**

**Kamal Habibi Bagar  
NRP 2210100010**

**Dosen Pembimbing  
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.  
Heri Suryoatmojo, ST, MT, Ph.D.**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015**



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE 141599**

**ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF AXIAL FLUX  
INDUCTION MOTOR (AFIM) SINGLE STATOR-SINGLE  
ROTOR WITH 3D FEM**

**Kamal Habibi Bagar**  
NRP 2210100010

**Counsellor Lecturer**  
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.  
Heri Suryoatmojo, ST, MT, Ph.D.

**ELECTRICAL ENGINEERING**  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2015

**ANALISA DAN PENGEMBANGAN AXIAL FLUX INDUCTION  
MOTOR (AFIM) SINGLE STATOR SINGLE ROTOR DENGAN 3D  
FEM**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

**Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

  
**Dedet Candra Riawan ST., M.Eng., Ph.D.**

  
**Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.**

**NIP. 197311192000031001**

**NIP. 198006032006041003**

**SURABAYA  
JANUARI, 2015**

# **ANALISA DAN PENGEMBANGAN AXIAL FLUX INDUCTION MOTOR (AFIM) SINGLE STATOR SINGLE ROTOR DENGAN 3D FEM**

**Nama : Kamal Habibi Bagar**  
**Pembimbing I : Dedet Candra Riawan ST., M.Eng., Ph.D.**  
**Pembimbing II : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.**

## **ABSTRAK**

Sebuah motor induksi aksial yang telah dibuat sebelumnya dijadikan sebagai referensi pengerjaan tugas akhir ini. Jika dibandingkan dengan motor induksi aksial secara umum performa motor ini masih kurang memuaskan. Oleh karena itu diperlukan pemodelan secara kusus dalam menjelaskan kurangnya performa dari motor tersebut.

Buku tugas akhir ini akan menganalisa hal tersebut dengan metode 3D *finite element* dan menggunakan software 3D FEM seperti EM Solidwork, CST, atau ANSYS Maxwell. Dan dari hasil simulasi program tersebut akan diberikan penjelasan dan solusi sebagai referensi pengembangan motor induksi aksial berikutnya.

**Kata kunci : Motor induksi aksial, kurangnya performa, 3D-FEMsimulasi**

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

# **ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF AXIAL FLUX INDUCTION MOTOR (AFIM) SINGLE STATOR-SINGLE ROTOR WITH 3D FEM**

**Name : Kamal Habibi Bagar**  
**Supervisor I : Dedet Candra Riawan ST., M.Eng., Ph.D.**  
**Supervisor II : Heri Suryoatmojo , ST., MT., Ph.D.**

## **ABSTRACT**

An axial induction motor which is assembled by previous final project has been chosen becoming the reference for this book. Comparing with other axial induction motor, generally, the mechanical and electrical characteristic of this motor is not showing good performance. Therefore, it needs a specific modeling to describe why this lack of performance happened.

This final project will analyze this fact with 3D finite-element method by using 3D FEM software such as EM Solidwork, CST, or ANSYS Maxwell. And from the result of the simulation, it will not only be explained but also will be given solution to overcome better performance as reference and development in the next axial induction motor.

**Keywords : Axial induction motor, lack of performance, 3D-FEM simulation**

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## **KATA PENGANTAR**

Puji sukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul :

### **ANALISA DAN PENGEMBANGAN AXIAL FLUX INDUCTION MOTOR (AFIM) SINGLE STATOR SINGLE ROTOR DENGAN 3D FEM**

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Keluarga yang telah banyak memberikan dorongan dan doa untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dr. Dedet Candra Riawan ST., M.Eng., PhD. dan Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D., selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingan.
3. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST, MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS, serta Bapak Ir. Teguh Yuwono selaku Koordinator Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga.
4. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah banyak memberi ilmu selama penulis menempuh kuliah.
5. Rekan-rekan mahasiswa e-50 Jurusan Teknik Elektro ITS.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini belum sempurna, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga buku Tugas Akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, Januari 2015

Penulis

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	1
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN .....	5
HALAMAN PENGESAHAN.....	7
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Metodologi .....	2
1.5 Sistematika Penulisan.....	2
1.6 Relevansi .....	3
BAB 2 MOTOR INDUKSI 3-FASA RADIAL DAN AXIAL FLUX .....	5
2.1 Motor Induksi 3-Fasa Tipe Radial Flux.....	5
2.1.1 Konstruksi Motor Radial .....	5
2.1.2 Stator .....	5
2.1.3 Rotor.....	6
2.1.4 Prinsip Kerja.....	6
2.1.5 Frekuensi dan Slip Motor .....	7
2.1.6 Rangkaian Ekuivalen.....	7
2.2 Motor Induksi 3-Fasa Tipe Axial Flux .....	7
2.2.1 Konstruksi Motor Axial .....	8
2.2.2 Stator .....	10
2.2.3 Rotor.....	10
2.3 Konstruksi Motor Referensi Sebelumnya.....	11
2.3.1 Konstruksi Stator.....	11
2.3.2 Konstruksi Rotor .....	11
BAB 3 METODE FINITE-ELEMENT DAN PARAMETERISASI MOTOR INDUKSI AKSIAL .....	13
3.1 Perbandingan Hasil Simulasi Dengan Referensi Lain .....	13
3.2 Penggunaan CST Dengan Parameterisasi Untuk Simulasi Non-Transien.....	14
3.2.1 Parametric Sweep.....	14

3.3	Software ANSYS Maxwell Untuk Simulasi Transien.....	15
3.3.1	Magnetic-Transient Solver.....	15
3.3.2	3D Transient Excitation (Sumber).....	15
3.3.3	Penggantian Materi .....	17
BAB 4	HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA .....	19
4.1	Pergerakan Medan Magnet Pada Motor Induksi Aksial .....	19
4.2	Karakteristik Lock Rotor .....	20
4.3	<i>Parametric Sweeping</i> .....	21
4.3.1	Simulasi Parametrik Untuk Jumlah Lilitan Yang Berbeda .....	22
4.3.2	Lock-rotor Karakteristik.....	25
4.3.3	Torsi Vs Slip Untuk Jumlah Lilitan Yang Berbeda.....	25
4.4	Perbandingan Performa Redesain Terhadap Eksisting .....	30
4.5	Alasan Mengapa Nilai Resistansi dan Induktansi Inti Besi Cukup Kecil.....	31
4.5.1	Core Loss Material dari Beberapa Macam Tipe Besi.....	31
BAB 5	PENUTUP .....	39
5.1	Kesimpulan.....	39
5.2	Saran.....	39
DAFTAR PUSTAKA	.....	41
RIWAYAT HIDUP	.....	43
LAMPIRAN	.....	45

## **DAFTAR TABEL**

Tabel 3.1 Desain geometri dari paper lain [5].....	13
Tabel 4.5 Parameter yang dimasukkan dalam proses simulasi dengan CST .....	23
Tabel 4.16 Contoh data core loss untuk beberapa tipe besi listrik .....	33
Tabel 4.17 Hasil pengukuran dari percobaan AFIM paper [1] tanpa beban ....	34
Tabel 4.18 Referensi simulasi awal [5] : (a) kurva torsi (b) kurva RPM vs waktu .....	34

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Motor induksi, sumber : <a href="http://www.directindustries.com">www.directindustries.com</a> .....	5
Gambar 2.2 Macam jenis rotor pada motor induksi : (a) rotor belit (b) sangkar tupai .....	6
Gambar 2.3 Medan putar yang dihasilkan oleh kumparan stator .....	6
Gambar 2.4 Bagian-bagian dari motor induksi aksial dan susunan konstruksi fundamental dari AFIM single stator dan double stator .....	8
Gambar 2.5 Beberapa kemungkinan susunan tumpukan dari beberapa motor AFIM, atas : dua single stator, tengah : dua double stator, bawah : dua modified single stator .....	9
Gambar 2.6 Bentuk stator pada AFIM secara umum .....	10
Gambar 2.7 Contoh lilitan dasar : terdistribusi dan terpusat .....	10
Gambar 2.8 Komponen rotor pada AFIM : alumunium bar dan plat rotor .....	10
Gambar 2.9 Konstruksi praktikal pada referensi AFIM sebelumnya .....	11
Gambar 2.10 Konstruksi rotor pada referensi sebelumnya .....	11
Gambar 3.2 Referensi simulasi awal [5] : (a) kurva torsi (b) kurva RPM vs waktu .....	13
Gambar 3.3 Contoh parameter yang dapat dimasukkan dalam simulasi CST .....	14
Gambar 3.4 Desain motor AFIM yang akan disimulasikan sesuai referensi paper [1] .....	15
Gambar 4.1 Pergerakan medan magnet pada stator dari simulasi CST pada AFIM 2 Pole .....	19
Gambar 4.2 Hasil simulasi torsi dan besar arus untuk nilai slip yang berbeda dengan CST .....	20
Gambar 4.3 Rangkaian ekuivalen dari hasil pengujian paper [1] sebelumnya .....	21
Gambar 4.4 Kurva karakteristik motor CST dibandingkan dengan hasil MATLAB dengan spesifikasi sesuai rangkaian ekuivalen paper [1] .....	21
Gambar 4.6 (a) Karakteristik impedansi motor versus jumlah lilitan (b) hubungan non-linier resistansi rotor dengan jumlah lilitan .....	24
Gambar 4.7 Kurva arus awal versus jumlah lilitan .....	25
Gambar 4.8 Kurva ampere-turn versus slip untuk jumlah lilitan berbeda .....	26
Gambar 4.9 Kurva torsi versus slip untuk jumlah lilitan yang berbeda .....	27
Gambar 4.10 Torsi pada saat pembebanan penuh versus jumlah lilitan .....	28
Gambar 4.11 Kisaran yang rasional dan optimal untuk pembebanan .....	28
Gambar 4.12 Arus nominal pada pembebanan penuh .....	29

Gambar 4.13 Efisiensi AFIM secara simulasi.....	29
Gambar 4.14 Perbandingan performa antara eksisting dengan redesain .....	30
Gambar 4.15 Kurva B-H untuk beberapa material besi menunjukkan kesamaan antara satu sama lain .....	32
Gambar 4.19 Desain geometri secara detail dari stator AFIM yang dibuat .....	35
Gambar 4.20 Konsep rugi eddy pada inti besi .....	35
Gambar 4.21 Input kurva B-H (magnetisasi) dan B-P (Core loss) pada ANSYS Maxwell .....	36
Gambar 4.22 (a) Hasil simulasi rugi inti besi dengan laminasi radial (koordinat silindris), (b) Setting laminasi pada ANSYS Maxwell.....	37
Gambar 4.23 Orientasi laminasi pada stator sebagai solusi dari core loss yang terjadi .....	37

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Axial Flux Induction Motor (AFIM) saat ini telah menjadi tren perkembangan motor induksi kedepannya. Secara umum, AFIM memiliki banyak keuntungan, seperti : densitas daya, densitas torsi, dan efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan tipe lainnya, yaitu radial flux motor [5]. Hal ini didukung dengan bentuknya yang ramping dan lebih fleksibel daripada RFM untuk rating daya yang sama. Kelebihan yang lain yaitu mudah dalam mengatur jarak air gap antara stator dan rotor untuk mendapatkan performa torsi dan efisiensi yang berbeda.

AFIM memiliki beberapa macam struktur dilihat dari susunan rotornya. AFIM dan RFM dapat dibedakan secara sekilas hanya dengan melihat bentuk stator dan rotor sebagai plat yang radial. Tiga konfigurasi stator rotor yang populer adalah : double stator-single rotor, double rotor-single stator, single rotor-single stator.

Sebelumnya telah dibuat AFIM single rotor-single stator [1] yang dirancang untuk pembuatan mobil listrik. Desain yang dibuat berupa AFIM dengan empat kutub pada 50 Hz. Dimana motor tersebut menghasilkan torsi maksimum sebesar 0.79 Nm pada saat 0.07 slip. Tetapi dengan desain ini arus nominal tercapai jauh sebelum mencapai tegangan nominal. Dan dapat dibuktikan pula bahwa efisiensi motor tersebut termasuk lebih kecil dibandingkan dengan motor lain dengan desain geometri yang sama. Hal ini menunjukkan ketidaksesuaian atas penelitian-penelitian yang bahwa AFIM secara umum memiliki efisiensi yang lebih besar daripada RFM [2].

Maka motivasi utama dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah untuk dapat merencanakan pemodelan AFIM kedepannya dan menjelaskan mengapa motor AFIM tersebut memiliki performa yang sangat rendah. Sangat dibutuhkan parameter identifikasi dan rangkaian ekuivalen yang dapat mendiskripsikan secara mudah respon kerja dari AFIM. Lalu nantinya, melalui pemodelan desain yang telah dibuat, dapat disimulasikan untuk mencapai performa yang lebih baik.

## **1.2 Permasalahan**

1. AFIM yang dibuat [1] tidak memiliki performa yang tinggi, baik dari efisiensi dan torsi, jika dibandingkan dengan AFIM pada jurnal-jurnal lain dengan spesifikasi desain yang sama.
2. Kondisi arus nominal tercapai di saat jauh sebelum nominal tegangan tercapai
3. Variabel apa saja yang menentukan spesifikasi performa pada motor AFIM?

## **1.3 Tujuan**

Proposal tugas akhir ini memiliki tujuan antara lain:

1. Pengaruh dari pemilihan beberapa variabel dan parameter, seperti jumlah lilitan pada lilitan, core material, dll, pada motor AFIM dapat difahami
2. Memperbaiki parameter dan desain AFIM dalam perbaikan performa

Hasil yang diperoleh dari proposal tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain:

1. Respon dinamis pada single-stator single rotor AFIM dapat dianalisa
2. Pengembangan aplikasi praktikal dan konseptual pada proyek mobil listrik nasional dan berbagai proses di industri

## **1.4 Metodologi**

1. Analisa dan perbandingan parameter elektris antar AFIM dan RFM [3]
2. Pembuatan model motor AFIM melalui software simulasi 3D FEM
3. Simulasi dan analisa pengaruh jumlah lilitan pada motor AFIM
4. Simulasi dan analisa pengaruh pemilihan core material (Kurva B-H) [4], pada :
  - a. Hysterysis Loss
  - b. Eddy Loss
5. Perbaikan parameter untuk mencari performa maksimum
6. Simulasi dinamis FEM

## **1.5 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan laporan Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan masing-masing bab diuraikan sebagai berikut:

1. BAB 1 merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.
2. BAB 2 berisi teori penunjang yang membahas tentang motor induksi 3-fasa dengan tipe radial flux (RFIM) dan axial flux (AFIM), baik dari segi konstruksi, rangkaian ekivalen, dan lilitan.
3. BAB 3 berisi tentang uraian perencanaan dan pembuatan simulasi pemodelan untuk tiap komponen serta penentuan parameter untuk setiap komponen.
4. BAB 4 berisi tentang hasil pengujian sistem dan analisis terhadap simulasi yang dilakukan.
5. BAB 5 berisi tentang kesimpulan dan saran-saran.

### **1.6 Relevansi**

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Dapat menjadi referensi bagi peneliti selanjutnya untuk mendapatkan performa motor yang lebih baik dari sebelumnya
2. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa selanjutnya dalam perencanaan pembuatan motor induksi tipe AFIM dan perbaikan performa motor AFIM

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## **BAB 2**

# **MOTOR INDUKSI 3-FASA RADIAL DAN AXIAL FLUX**

### **2.1 Motor Induksi 3-Fasa Tipe Radial Flux**

#### *2.1.1 Konstruksi Motor Radial*

Motor induksi tiga fasa merupakan motor listrik arus bolak-balik yang paling banyak digunakan dalam dunia industri. Dinamakan motor induksi karena pada kenyataannya arus rotor motor ini bukan diperoleh dari suatu sumber listrik, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar yang dihasilkan oleh arus stator.



**Gambar 2.1** Motor induksi, sumber : [www.directindustries.com](http://www.directindustries.com)

Kecepatan putaran motor induksi dipengaruhi oleh frekuensi, dengan demikian pengaturan kecepatan tidak dapat dengan mudah dilakukan terhadap motor ini. Walaupun demikian, motor induksi tiga fasa memiliki beberapa keuntungan, yaitu sederhana, konstruksinya kokoh, harganya relatif murah, mudah dalam melakukan perawatan, dan dapat diproduksi dengan karakteristik yang sesuai dengan kebutuhan industri. Tetapi kerugian utama pada motor ini adalah susahnya pengontrolan kecepatan dikarenakan ketergantungan oleh frekuensi.

Motor induksi tiga fasa memiliki konstruksi yang hampir sama dengan motor listrik jenis lainnya. Motor ini memiliki dua bagian utama, yaitu stator dan rotor.

#### *2.1.2 Stator*

Stator terdiri atas tumpukan laminasi inti yang memiliki alur yang menjadi tempat kumparan dililitkan yang berbentuk silindris. Alur pada tumpukan laminasi inti diisolasi dengan kertas. Tiap elemen laminasi inti dibentuk dari lempengan besi dimana tiap lempengan besi tersebut memiliki beberapa alur dan beberapa lubang pengikat untuk menyatukan inti. Tiap kumparan tersebar dalam alur yang disebut

belitan fasa dimana untuk motor tiga fasa, belitan tersebut terpisah secara listrik sebesar  $120^\circ$ . Kawat kumparan yang digunakan terbuat dari tembaga yang dilapis dengan isolasi tipis. Kemudian tumpukan inti dan belitan stator diletakkan dalam cangkang silindris.

### 2.1.3 Rotor

Berdasarkan jenis rotornya, motor induksi tiga fasa dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu rotor belitan (*wound rotor*) dan rotor sangkar tupai (*squirrel cage rotor*).

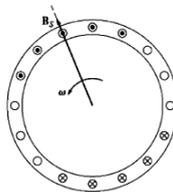


**Gambar 1.2** Macam jenis rotor pada motor induksi : (a) rotor belit (b) sangkar tupai

Jenis rotor belitan terdiri dari satu set lengkap belitan tiga fasa yang merupakan bayangan dari belitan pada statornya. Belitan tiga fasa pada rotor belitan biasanya terhubung Y, dan masing-masing ujung dari tiga kawat belitan fasa rotor tersebut dihubungkan pada slip ring yang terdapat pada poros rotor. Belitan-belitan rotor ini kemudian dihubungkan singkatkan melalui sikat (*brush*) yang menempel pada slip ring dengan menggunakan sebuah perpanjangan kawat untuk tahanan luar

### 2.1.4 Prinsip Kerja

Prinsip kerja dari motor induksi tiga fasa adalah berdasar proses induksi yang terjadi pada bagian rotor dimana arus yang mengalir disebabkan akibat adanya perbedaan antara putaran rotor dengan medan putar stator. Secara singkat prinsip kerja motor induksi tiga fasa adalah sebagai berikut [6] :



**Gambar 2.3** Medan putar yang dihasilkan oleh kumparan stator

Ketika sumber tegangan disuplai pada kumparan stator, akan timbul medan putar dengan kecepatan rotor (rotasi per menit). Besarnya nilai kecepatan rotor dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$n_{sync} = \frac{120 \cdot f}{p} \dots\dots\dots(2.1)$$

$n_{sync}$  : kecepatan sinkron (RPM)

$f$  : frekuensi (Hz)

$p$  : jumlah kutub

### 2.1.5 Frekuensi dan Slip Motor

Bila beban bertambah, maka kopel motor akan naik sehingga arus induksi pada rotor akan membesar. Pada saat motor belum berputar, nilai kecepatan medan putar rotor sama dengan kecepatan medan putar stator. Berubah-ubahnya kecepatan motor induksi ( $n_r$ ) mengakibatkan berubahnya harga slip dari 100% - 0%. Hubungan frekuensi dengan slip dapat dilihat sebagai berikut:

$$f_{slip \text{ rotor}} = s \cdot f_{stator} \dots\dots\dots(2.2)$$

### 2.1.6 Rangkaian Ekuivalen

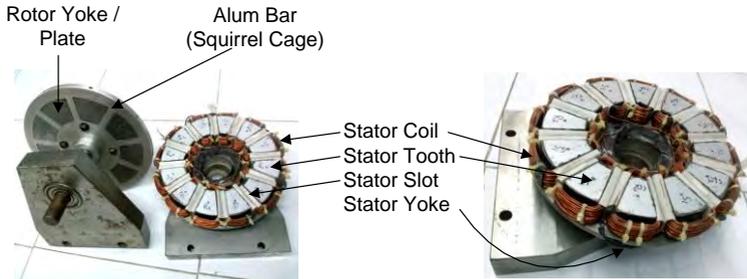
Analisis motor induksi dapat diekivalenkan dengan menggunakan rangkaian transformer, lebih dahulu ditinjau dimana stator merupakan rangkaian primer dan rotor sebagai rangkaian sekunder. Diasumsikan tegangan sumber adalah sinusoidal dan dalam keadaan tunak.

## 2.2 Motor Induksi 3-Fasa Tipe Axial Flux

Meskipun mesin pertama yang Faraday ditemukan adalah mesin fluks aksial, desain ini segera dilupakan karena kesulitan manufaktur. Namun saat ini, kelemahan ini dapat diatasi dengan menggunakan bahan-bahan baru dan teknik konstruksi. Jadi induksi aksial-fluks motor (AFIM) semakin digunakan dalam aplikasi industri. Dalam daya kecil aplikasi domestik seperti kipas, pompa dan pengolah makanan, motor aksial induksi memiliki keuntungan yang berbeda. Pertama, bentuknya datar diinginkan untuk aplikasi ini. Kedua, rotor mereka dapat diintegrasikan dengan bagian yang berputar dari beban mekanik, misalnya, bilah kipas, impeller pompa dan lain-lain. Beberapa lainnya keuntungan dari mesin fluks aksial adalah planar dan celah udara (air-gap) mudah dikontrol, rasio daya-berat dan diameter-panjang yang lebih baik, begitu juga konstruksi padat dan efisiensi yang lebih baik.

### 2.2.1 Konstruksi Motor Axial

Terdapat dua susunan fundamental dalam mendesain motor induksi aksial-fluks. Salah satunya adalah dengan desain satu stator dan satu rotor, yang disebut secara umum dengan motor induksi aksial fluks *single stator*. Dan alternatif berikutnya adalah dengan menyusun dua stator dan satu rotor di antara keduanya.

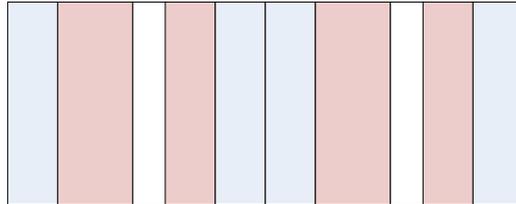


Stator Yoke	Stator Yoke
Stator Coil	Stator Coil
Air Gap	Air Gap
Squirrel Cage	Squirrel Cage
Stator Yoke	Stator Coil
	Air Gap
	Stator Yoke

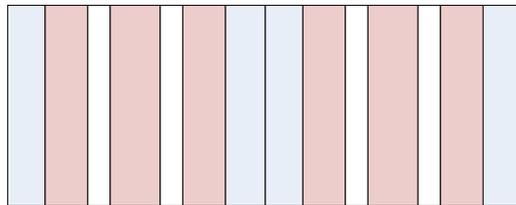
Gambar 2.4 Bagian-bagian dari motor induksi aksial dan susunan konstruksi fundamental dari AFIM single stator dan double stator

Dengan mengasumsikan torsi mekanik yang sama antara kedua desain, keduanya memiliki keuntungan masing-masing. Keuntungan dari motor induksi aksial fluks single-stator dibandingkan dengan double-stator adalah kemudahan dalam konstruksi dikarenakan hanya terdapat satu air-gap. Sedangkan keuntungan pada motor induksi double-stator adalah momen inersia yang kecil pada bagian rotornya. Hal ini dikarenakan tidak dibutuhkannya rotor yoke yang materinya biasanya terbentuk oleh besi/metal ferromagnetik. Sehingga menyebabkan karakteristik dinamis yang lebih tinggi. Tetapi dengan adanya dua air-gap diantara sistem mesin, hal ini memberikan efek transien yang lebih kompleks.

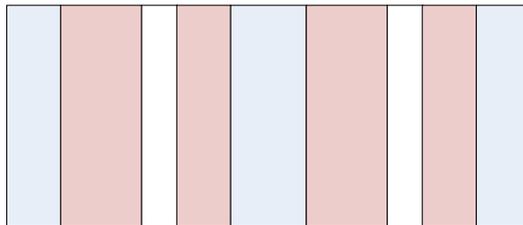
Untuk mendapatkan keuntungan maksimum dalam desain motor induksi aksial hal hanya dimungkinkan jika keuntungan dari masing-masing tipe tersebut disatukan ke dalam satu motor. Dengan kata lain yaitu menggunakan tumpukan dari beberapa motor dalam satu mesin.



(a)



(b)



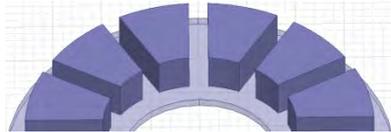
(c)

Gambar 2.5 Beberapa kemungkinan susunan tumpukan dari beberapa motor AFIM (a) dua single stator (b) dua double stator (c) dua modified single stator

Pada gambar sebelumnya ditunjukkan gambar dari susunan fundamental motor induksi aksial, dimana terdiri dari single-stator saja, atau double-stator saja. Pada kasus tumpukan motor induksi aksial, terdapat tiga kemungkinan susunan yang dapat direalisasikan. Pertama dengan menumpuk dua motor single-stator. Secara umum konstruksi ini adalah yang paling umum dilakukan karena kemudahan dalam proses penumpukan. Tetapi kekurangan utama adalah besarnya momen inersia yang ada pada bagian rotor, karena terdiri dari dua rotor yoke yang

berdempetan. Konstruksi kedua adalah dengan menumpuk dua motor double-stator. Konstruksi yang ketiga mengkombinasikan keuntungan dari kecilnya momen inersia pada rotor diikuti juga dengan konstruksi yang mudah.

### 2.2.2 Stator

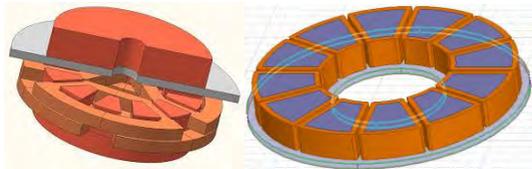


Gambar 2.6 Bentuk stator pada AFIM secara umum

Gambar diatas menunjukkan sebagian potongan dari stator motor aksial yang terdiri dari lima slot dengan enam gigi stator. Konstruksi dari rotor sebetulnya juga hampir sama, hanya berbeda pada ukuran dimensi dari slot dan giginya.

Belitan yang diterapkan pada motor induksi aksial dapat berupa dua tipe, yaitu :

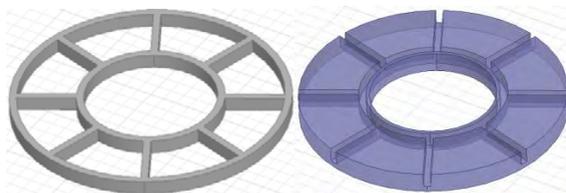
1. Lilitan terdistribusi (*fractional pitch*)
2. Lilitan terpusat (*concentrated pitch*)



Gambar 2.7 Contoh lilitan dasar : terdistribusi dan terpusat

Skematik belitan pun juga dapat dibedakan menjadi Wye atau Delta. Dan jumlah lilitan per gulungan tembaga dapat dikombinasikan secara seri dan paralel.

### 2.2.3 Rotor



Gambar 2.8 Komponen rotor pada AFIM : aluminium bar dan plat rotor

## 2.3 Konstruksi Motor Referensi Sebelumnya

Buku tugas akhir ini menggunakan referensi motor induksi yang telah dibuat pada tahun sebelumnya. Dimana motor tersebut telah didesain dengan spesifikasi sebagai berikut :

### 2.3.1 Konstruksi Stator

Dalam proses pembuatan stator, stator dibentuk dari dua komponen : stator plat dan gigi stator. Gigi stator terbentuk dari tiga lapisan yang masing-masingnya memiliki ketebalan 20 mm. Tiga lapisan tersebut disatukan dengan stator plat. Sebelum proses pemasangan, laminasi dilakukan terlebih dahulu pada core. Proses laminasi ini menggunakan beberapa cara seperti lapisan stainless, cat thermostable, dan lem besi yang memiliki material epoxy. Semua material ini merupakan bagian isolator yang berfungsi dalam mengurangi rugi eddy.



Gambar 2.9 Konstruksi praktikal pada referensi AFIM sebelumnya

Setelah proses konstruksi stator selesai belitan dimasukkan ke dalam slot. Spesifikasi dari belitan yaitu empat kutub dimana setiap gulungannya terdiri dari 50 lilitan. Sebelum belitan dimasukkan ke tempatnya, slot terlebih dahulu dilapisi dengan kertas film yang berfungsi untuk menginsulasi antara belitan dengan inti besi. Resin akan dituangkan setelah belitan dimasukkan ke dalam slot.

### 2.3.2 Konstruksi Rotor

Konstruksi rotor hampir sama dengan konstruksi stator. Memiliki dua bagian utama yaitu rotor plat dan aluminium bar. Material besi yang digunakan dalam proses konstruksi motor ini adalah ST37



Gambar 2.10 Konstruksi rotor pada referensi sebelumnya

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## BAB 3

### METODE FINITE-ELEMENT DAN PARAMETERISASI MOTOR INDUKSI AKSIAL

#### 3.1 Perbandingan Hasil Simulasi Dengan Referensi Lain

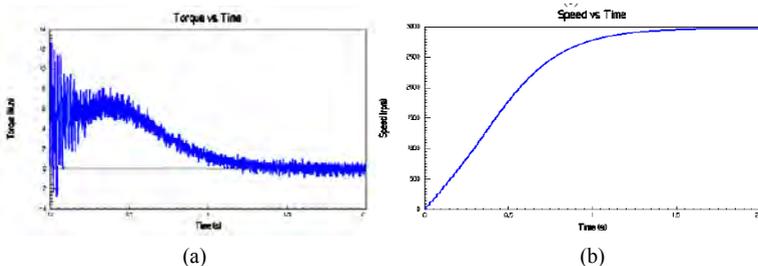
Untuk memastikan bahwa data simulasi CST sesuai atau setidaknya mendekati hasil sebenarnya maka diperlukan simulasi yang sederhana dan berbasis pada satu paper tertentu. Untuk penyederhanaan perbandingan maka dirujuk model AFIM yang telah dibuat pada paper [5]. Desain model AFIM referensi dapat dilihat dari tabel berikut.

**Tabel 3.1** Desain geometri dari paper lain [5]

No. of Poles	1
No. of Slots	6
Outer diameter of stator	130 mm
Inner diameter of stator	76 mm
No. of turns per phase	416
Air gap length	0.5 mm
Slot width	28 mm
Slot depth	22 mm
Stator yoke thickness	18 mm
Permanent magnets length	2.5 mm
No. of induction rotor bars	11
Moment of inertia	0.0158

Ada beberapa ekspektasi hasil yang diharapkan untuk setidaknya dapat membuktikan kedekatan simulasi antara CST dengan AFIM yang dirujuk, seperti berikut :

1. Pergerakan medan magnet (khususnya pada arah vektor Y) seperti gelombang magnet yang berputar sesuai urutan fasa RST.
2. Di dalam paper [5], ditunjukan bahwa data yang diperoleh adalah sebagai berikut :



**Gambar 3.2** Referensi simulasi awal [5] : (a) kurva torsi (b) kurva RPM vs waktu

## 3.2 Penggunaan CST Dengan Parameterisasi Untuk Simulasi Non-Transien

### 3.2.1 Parametric Sweep

Analisis parametrik memungkinkan untuk mensimulasikan beberapa variasi desain menggunakan model tunggal. Dengan mendefinisikan serangkaian nilai-nilai variabel dalam kisaran tertentu, akan dihasilkan solusi untuk setiap variasi yang ada. Kemudian dapat dibandingkan hasil untuk menentukan bagaimana setiap variasi desain mempengaruhi kinerja desain.

Parameter desain dapat divariasikan yang didefinisikan sebagai kuantitas, seperti geometri, sifat material, dan batas dan sifat eksitasi. Variabel yang dapat diparameterisasi juga dapat berupa non-geometri seperti slip, frekuensi, tegangan, arus, sudut fasa, dan lain-lain. Jumlah variasi yang dapat didefinisikan dalam parametrik sweep hanya dibatasi oleh sumber daya komputer.

Analisis parametrik sering juga digunakan sebagai optimasi karena memungkinkan untuk menentukan berbagai nilai variabel untuk analisis optimasi.

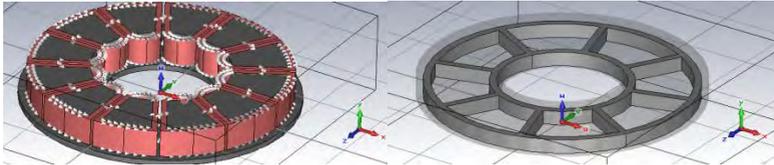
Untuk melakukan analisis parametrik, pertama kali harus dibuat desain nominal. Sebuah desain nominal dibuat seperti desain lainnya, kecuali bahwa variabel diterapkan pada aspek-aspek dari model yang ingin diubah. Semua variabel harus didefinisikan sebelum memulai analisis parametrik. Meskipun tidak diharuskan untuk menjalankan simulasi dari desain nominal sebelum melakukan analisis parametrik, hal ini membantu memastikan bahwa model yang dibuat sudah beroperasi sebagaimana diinginkan. Jika hal ini tidak dilakukan maka setidaknya cek validasi pada desain nominal harus dijalankan sebelum melakukan analisis parametrik.

Untuk kasus penyelesaian masalah pada kasus motor induksi aksial kali ini parameter yang akan diterapkan adalah sebagai berikut :

Name	Value	Description	Type
R1	1.14	Stator Resistance (Ohm)	None
RPM	0	RPM (revolution per minute)	None
air_gap	0.5	Air Gap >= 0	None
current	6	current (A)	None
freq	50	frequency (Hz)	None
rotate_Y	0	rotation over Y axis	None
			Undefined

**Gambar 3.3** Contoh parameter yang dapat dimasukkan dalam simulasi CST

Setelah dapat dibuktikan bahwa simulasi CST menunjukkan kesesuaian dengan data dari paper [5] maka langsung dibuat model AFIM 4 kutub sesuai dengan motor yang dibuat pada referensi sebelumnya. Model dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



**Gambar 3.4** Desain motor AFIM yang akan disimulasikan sesuai referensi paper [1]

### **3.3 Software ANSYS Maxwell Untuk Simulasi Transien**

#### *3.3.1 Magnetic-Transient Solver*

Simulator transien medan menghitung medan magnet secara 2D maupun 3D dengan berdasarkan domain waktu. Sumber yang mempengaruhi medan magnet dapat berupa :

1. Arus dan tegangan yang berubah secara waktu baik pada kondisi bergerak maupun tidak bergerak
2. Magnet permanen yang bergerak atau tidak bergerak
3. Kopling dengan sirkuit eksternal yang bergerak maupun tidak bergerak

Kuantitas yang dicari penyelesaian masalahnya oleh *magnetic-transient solver* adalah medan magnet ( $H$ ), distribusi arus ( $J$ ), persebaran magnet fluks ( $B$ , terhitung secara otomatis melalui medan  $H$ ). Dimana kuantitas yang berupa penurunan dapat dicari dari kuantitas dasar dengan contoh seperti gaya, torsi, energi, kecepatan, posisi, hubungan fluks antar lilitan tembaga, dan tegangan yang terinduksi pada lilitan.

#### *3.3.2 3D Transient Excitation (Sumber)*

Pada kondisi 3D transien (domain waktu) gerakan (baik translasi maupun silindris/non-silindris) diperbolehkan, eksitasi seperti arus dan tegangan dapat dibentuk secara bebas yang merupakan fungsi waktu, ketergantungan dengan kurva non-linier BH dari material juga diperbolehkan.

Dukungan pada eksitasi tegangan untuk sebuah lilitan memiliki konsekuensi bahwa arus yang mengalir adalah tidak diketahui, maka formulanya harus sedikit dimodifikasi agar membuat Maxwell dapat memperhitungkan sumber medan yang disebabkan oleh arus yang tidak

diketahui. Pada kasus seperti ini konduktor solid akan diperhitungkan pula efek eddy-nya, sedangkan pada konduktor lilitan akan diabaikan efek eddy-nya (efek skin & proximity).

Untuk perhitungan sederhana dimana gerakan juga ikut berperan, Maxwell menggunakan konvensi standar dan menggunakan koordinat sistem yang tetap untuk model.

Perhitungan yang digunakan pada modul transien juga memperbolehkan batasan *Master-Slave* dan arus eddy yang terinduksi dibagian manapun dari model, bahkan dapat didefinisikan di bagian yang stasioner dan juga di bagian yang bergerak dari model. Persamaan mekanik yang terpasang pada bagian pejal dari komponen yang bergerak dapat diformulasikan secara kompleks dengan sirkuit elektrik yang terkopel dengan bagian *finite element* atau juga terkopel dengan elemen mekanik kapanpun fenomena transien mekanik dimasukkan oleh pengguna pada bagian solusinya. Pada kasus ini gaya/torsi elektromagnetik diperhitungkan dengan menggunakan pendekatan *Virtual Work*. Untuk tipe transien dari analisa medan elektromagnet (dengan atau tidak dengan gerakan) pengguna harus membuat mesh yang dapat “menangkap” semua fenomena fisika yang terjadi seperti efek skin dan proximity, jika hadir dalam medan yang dihasilkan.

Berikut adalah tiga persamaan Maxwell yang digunakan dalam aplikasi perhitungan transien (untuk frekuensi rendah):

$$\nabla \times H = \sigma(E) \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\nabla \times E = \frac{\partial B}{\partial t} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \dots\dots\dots(3.3)$$

Sehingga dua persamaan yang dapat dihasilkan dari persamaan diatas :

$$\nabla \times \frac{1}{\sigma} \nabla \times H + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots(3.4)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \dots\dots\dots(3.5)$$

Persamaan medan terkopel dengan persamaan sirkuit baik untuk konduktor solid maupun lilitan disebabkan karena, pada kasus suplai tegangan, arus tidak diketahui. Untuk kasus tegangan driven konduktor solid, berikut persamaan yang digunakan untuk mencari ohmic drop terhadap loop konduktor yang ke-i :

$$V_{Ri} = \int_{R_{C(i)}} \iint J_{0i}(E + v \times B) dR \dots \dots \dots (3.6)$$

Dimana  $J_{0i}$  merepresentasikan densitas arus dan tegangan yang terinduksi dapat diturunkan dari persamaan berikut:

$$e_{i_{RC(i)}} = - \iiint H_i \cdot B dR \dots \dots \dots (3.7)$$

Dimana integrasi dilakukan pada seluruh bagian konduktor. Untuk non-linieritas yang terjadi, Newton-Raphson klasik digunakan.

### 3.3.3 *Penggantian Materi*

Penggantian materi pada software 3D FEM dapat dengan mudah dilakukan dikarenakan user-interface yang telah disediakan. Di dalam fitur penggantian materi terdapat beberapa hal yang dapat diinputkan secara manual yaitu :

1. Kurva magnetisasi (B-H)
2. Kurva core loss (B-P)
3. Bulk modulus
4. Permittivitas Listrik
5. Permittivitas Magnetisasi
6. Permeabilitas

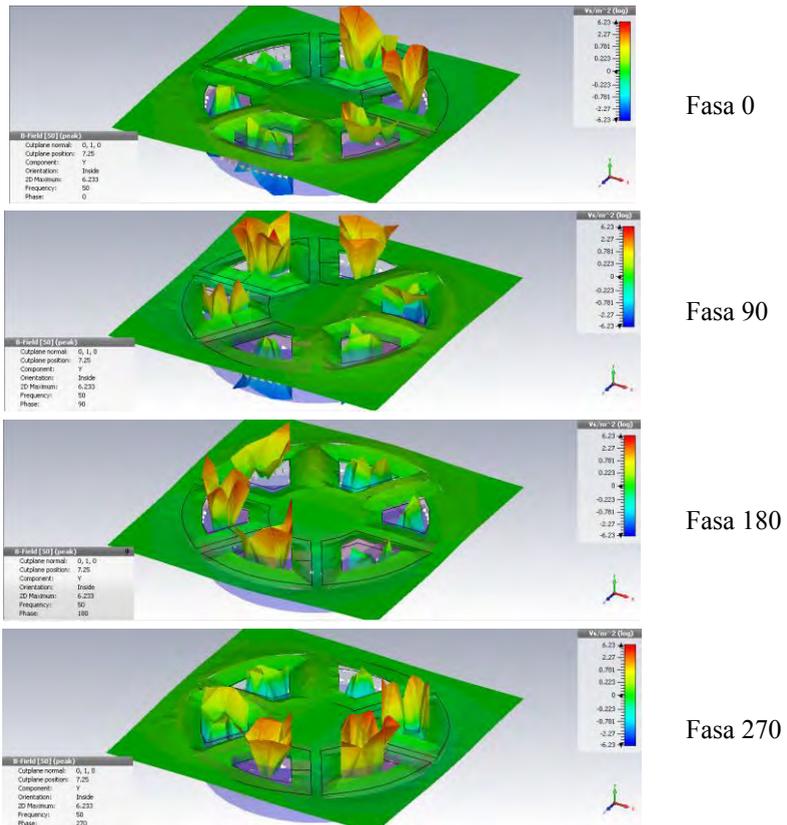
Dan masih banyak lagi hal yang dapat diganti secara manual. Melihat batasan kerja pada buku TA ini, maka beberapa hal saja yang perlu dispesifikasi untuk pengetesan pada penggantian material.

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA

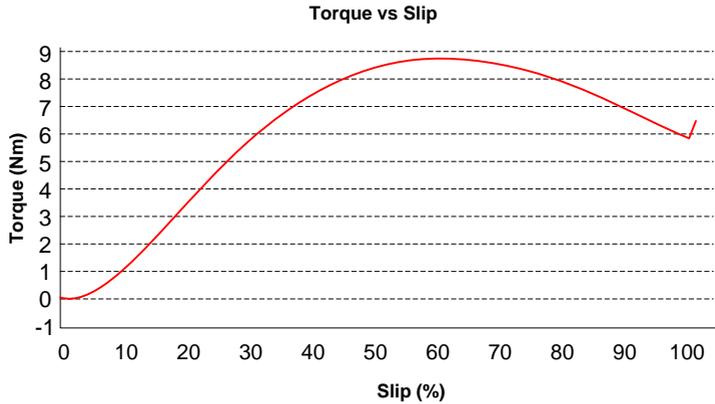
### 4.1 Pergerakan Medan Magnet Pada Motor Induksi Aksial

Pergerakan medan magnet pada AFIM berbeda dibandingkan dengan RFM. Secara teori dapat diperkirakan bahwa medan putar pada kondisi motor aksial berputar seperti gelombang air di bagian permukaan statornya. Berikut hasil simulasi yang diperoleh melalui CST terlihat bahwa pergerakan medan berputar sesuai urutan fasa RST (putaran jarum jam).

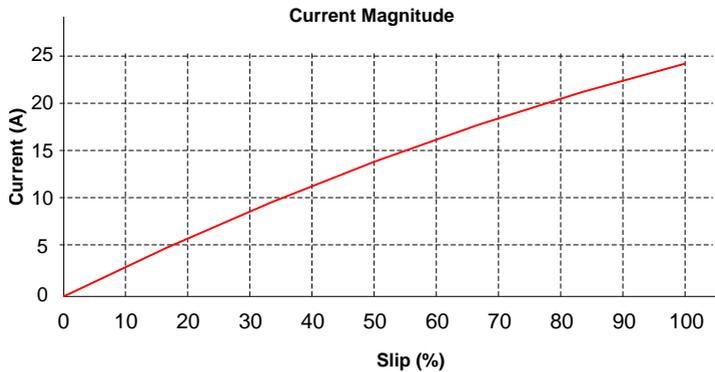


**Gambar 4.1** Pergerakan medan magnet pada stator dari simulasi CST pada AFIM 2 Pole

Begitu juga dengan data torsi vs speed yang sesuai dengan grafik dari paper tersebut. Terlihat bahwa error antara kedua simulasi tersebut tidak lebih dari 10%.



(a)



(b)

**Gambar 4.2** Hasil simulasi (a) torsi dan (b) besar arus untuk nilai slip yang berbeda dengan CST

## 4.2 Karakteristik Lock Rotor

Studi pada saat kondisi lock rotor dapat menunjukkan karakteristik impedansi internal yang dirasakan oleh stator. Dengan parameter dibawah ini menghasilkan data impedansi sebagai berikut :

Parameter lilitan pada frekuensi [50.000 Hz] (load system):

1. Current :  $1.659646e+002 - i 3.303160e+001$  A (rms)
2. Tegangan :  $2.200471e+002 + i 1.370352e-001$  V (rms)
3. Impedance:  $1.275191e+000 + i 2.546243e-001$  Ohm

Dengan melihat hasil impedansi (simulasi CST) dari tabel diatas dapat dihitung bahwa :

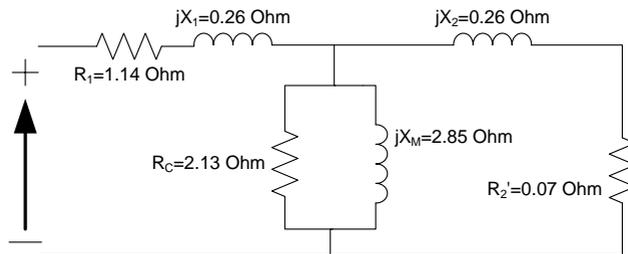
$$R_1 = 1.14 \text{ Ohm} \dots\dots\dots (4.1)$$

$$R_2 = 1.275 - 1.14 = 0.135 \text{ Ohm} \dots\dots\dots (4.2)$$

$$X_{total} = X_1 + X_2 = 0.2546 \text{ Ohm} \dots\dots\dots (4.3)$$

$$X_{core} \gg X_{total} \dots\dots\dots (4.4)$$

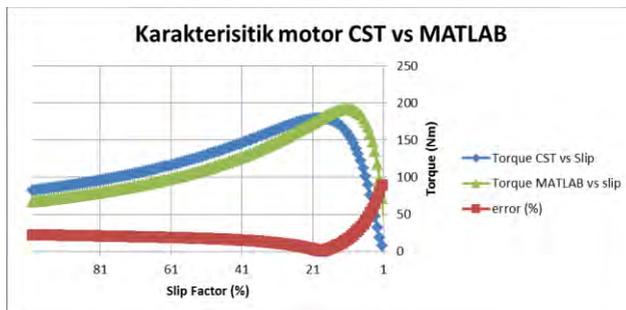
Jika dibandingkan dengan parameter berdasarkan rangkaian ekivalen pada paper [1] hal ini juga menunjukan hasil yang mendekati sama.



**Gambar 4.3**Rangkaian ekivalen dari hasil pengujian paper [1] sebelumnya

### 4.3 Parametric Sweeping

Dengan *parametric sweeping* pada software CST didapatkan hasil sebagai berikut:



**Gambar 4.4** Kurva karakteristik motor CST dibandingkan dengan hasil MATLAB dengan spesifikasi sesuai rangkaian ekivalen paper [1]

#### 4.3.1 Simulasi Parametrik Untuk Jumlah Lilitan Yang Berbeda

Setelah simulasi dapat dibuktikan mendekati hasil simulasi pada referensi paper lain, kali ini penulisan ditujukan untuk menunjukkan efek pada penggunaan jumlah lilitan yang berbeda terhadap performa kurva torsi-RPM motor induksi AFIM. Metode yang dilakukan untuk mendapatkan kurva torsi-RPM adalah dengan berikut :

1. Membuat studi statik parametrik untuk jumlah lilitan ( $N$ ) pada software CST
2. Dari studi parametrik jumlah lilitan dapat diketahui beberapa hal, yaitu :
  - a. karakteristik impedansi (Resistansi dan Reaktansi ekivalen)
  - b. Arus penyalaaan
  - c. Medan magnet (Ampere-turn) pada kondisi awal
3. Dari tabel impedansi VS lilitan, dengan bantuan MATLAB & Excel akan menghasilkan kurva torsi-RPM untuk lilitan yang berbeda

Secara singkat variabel yang harus diperhitungkan dalam parametrik ini adalah :

1. **N** : Jumlah lilitan tiap coil (turns)
2. **R<sub>1</sub>** : Resistansi stator (Ohm), bergantung pada panjang tembaga yang dililitkan pada tiap coil. Dimana terdapat hubungan semakin banyak lilitan, semakin besar pula besar R stator
3. **Freq** : Frekuensi sistem motor (Hz)
4. **V** : Tegangan input sistem (Volt)
5.  **$\rho$**  : Kerapatan resistansi dari kawat tembaga (mOhm/m), dimana bergantung dengan diameter kawat

Terdapat asumsi yang harus diberikan dalam studi ini. Desain model dari lebar slot (slot pitch) memberikan keterbatasan pada jumlah lilitan maksimum yang dapat dimasukkan untuk diameter kawat tembaga yang berbeda. Jika batasan ini dipaksakan, maka satu-satunya solusi adalah dengan membuat variabel diameter bergantung dengan  $N$  (jumlah lilitan). Atau dengan kata lain bahwa  $\rho$  merupakan fungsi dari jumlah lilitan, dimana satu diameter memiliki nilai  $\rho$  yang unik. Hal ini tidak dimungkinkan dapat dilakukan, karena nilai  $\rho$  bukanlah variabel kontinyu, melainkan variabel diskrit [3]. Oleh karena itu asumsi yang digunakan dalam kasus studi parametrik ini adalah :

“lebar slot (slot pitch) tidak memberikan batasan pada jumlah lilitan maksimum untuk kawat dengan nilai diameter berapapun”

Secara kasat mata dan pengukuran dengan jangka sorong dari desain motor AFIM yang ada, lilitan menggunakan kawat tembaga diameter 0.7 mm. Untuk lebih menguatkan fakta bahwa kawat tersebut menggunakan ukuran tersebut, dilakukan perhitungan dari besaran resistansi stator yang ada dari paper sebelumnya [2].

Hasil pengujian DC test pada motor sebelumnya menunjukkan bahwa resistansi tiap fasa adalah 1.44 Ohm (dapat dilihat dari gambar dibawah). Karena konstruksi lilitan motor adalah rangkaian Wye seri dari empat coil tiap fasa, maka dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$R_1 = \frac{4.N.l.\rho}{1000} \text{ Ohm} \dots\dots\dots (4.5)$$

$N$  : jumlah lilitan (turns) = 50 turns

$l$  : keliling pada coil slot (m) = 0.1335 m

$\rho$  : kerapatan resistansi (mOhm/m)

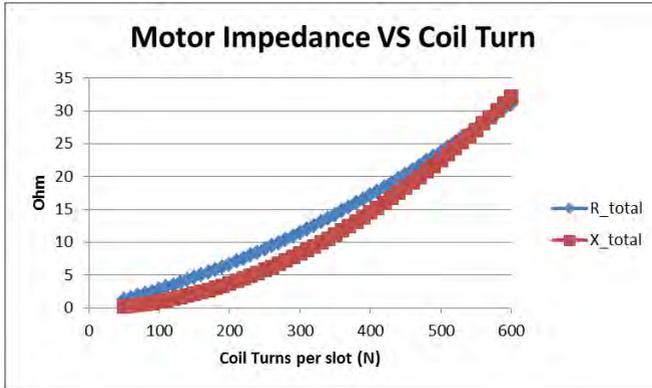
Maka akan didapatkan besar nilai  $\rho = \frac{1000.R_1}{4.N.l} \cong 42.7 \text{ mOhm/m}$ .

Jika nilai ini dicocokkan dengan tabel pada referensi [3], maka akan didapat bahwa kawat tembaga menggunakan ukuran diameter 0.7 mm. Besar nilai  $\rho$  dan fungsi  $R_1(N)$  dimasukkan ke studi parametrik CST.

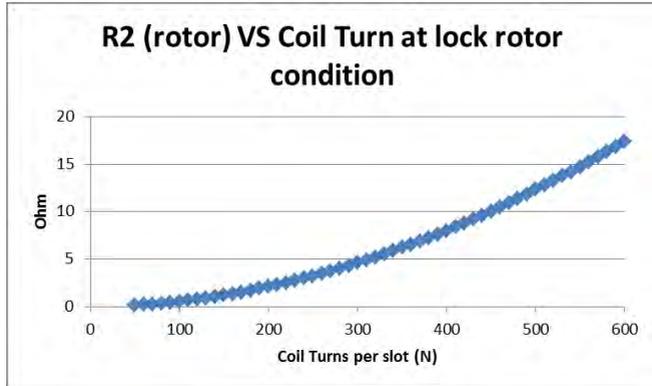
**Tabel 4.5** Parameter yang dimasukkan dalam proses simulasi dengan CST

Name	Value	Description	Type
N	50	Number of coil turns per slot	None
R1	$N*4*0.1335*\rho/1000$	Frequency	Resistance
V	220	Voltage (V)	Voltage
air_gap	0.34	mm	Length
current	5	Ampere (A)	Current
freq	50	Hz	Frequency
rho	42.7	mOhm/m	Resistance

Setelah nilai  $\rho$  diketahui maka studi parametrik untuk lilitan berbeda diikuti dengan ukuran diameter kawat tembaga yang berbeda dapat disimulasikan. Karakteristik impedansi yang didapatkan setelah simulasi dapat dilihat pada gambar berikut.



(a)

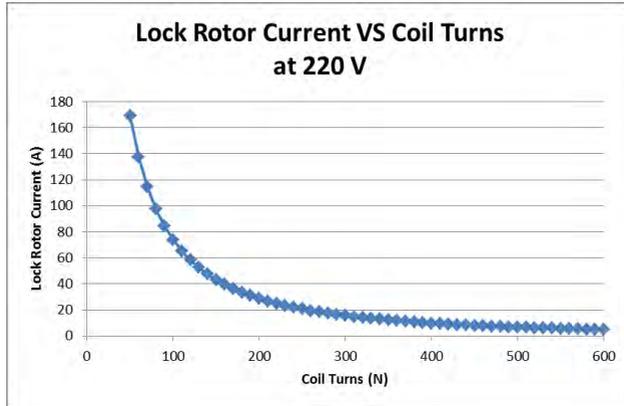


(b)

**Gambar 4.6** (a) Karakteristik impedansi motor versus jumlah lilitan  
 (b) hubungan non-linier resistansi rotor dengan jumlah lilitan

Satu hal yang diperhatikan dalam kasus ini adalah hubungan non-linier antara resistansi rotor dengan jumlah lilitan. Terlihat semakin besar jumlah lilitan per slot, semakin besar pula nilai resistansi pada rotor. Hal inilah yang menjadi dasar mengapa saat lilitan sangat banyak kecenderungan sebuah kurva torsi-RPM dari motor berubah menjadi kelas lain. Perubahan ini disebabkan karena relasi konstanta induksi antara rotor dengan stator.

#### 4.3.2 Lock-rotor Karakteristik



**Gambar 4.7** Kurva arus awal terhadap jumlah lilitan

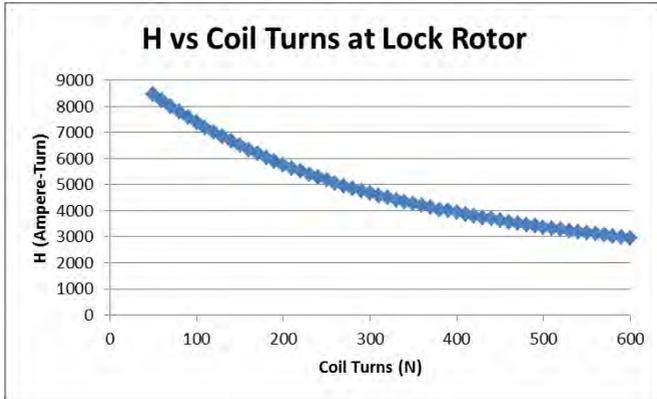
Kondisi yang menggagalkan pencapaian target nominal pada pembuatan model sebelumnya adalah arus awal yang sangat tinggi. Dari grafik diatas, terlihat dengan 50 lilitan/slot menghasilkan arus awal yang sangat tinggi yaitu pada 160 Ampere. Dimana untuk diatas 150 lilitan/slot akan memberikan arus awal kurang dari 40 Ampere.

#### 4.3.3 Torsi Vs Slip Untuk Jumlah Lilitan Yang Berbeda

Sangat sesuai dengan ekspektasi simulasi yang diharapkan pada bab sebelumnya, yaitu :

1. Arus awal berkurang drastis
2. Torsi awal yang tinggi, tetapi terjadi trade-off dengan torsi maksimum yang ada
3. Kurva karakteristik torsi-RPM mendekati motor induksi kelas D

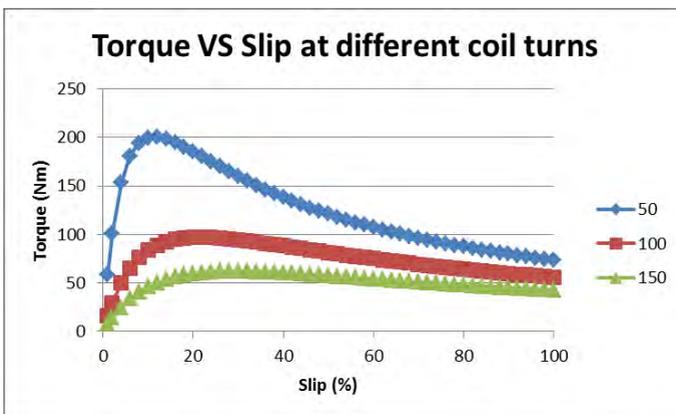
Hanya saja disini tidak terjadi kondisi trade-off antara torsi maksimum dengan torsi awal. Dugaan sebelumnya adalah dengan menaikkan jumlah lilitan maka besar nilai medan magnet  $H$  (Ampere-turn) akan sangat drastis naik pada saat lock-rotor. Tetapi setelah dibuktikan dengan melihat besar  $H \approx$  (Ampere-turn) vs jumlah lilitan, maka dapat ditunjukkan bahwa semakin besar lilitan, maka semakin berkurang pula nilai medan magnet  $H$  saat kondisi lock-rotor.

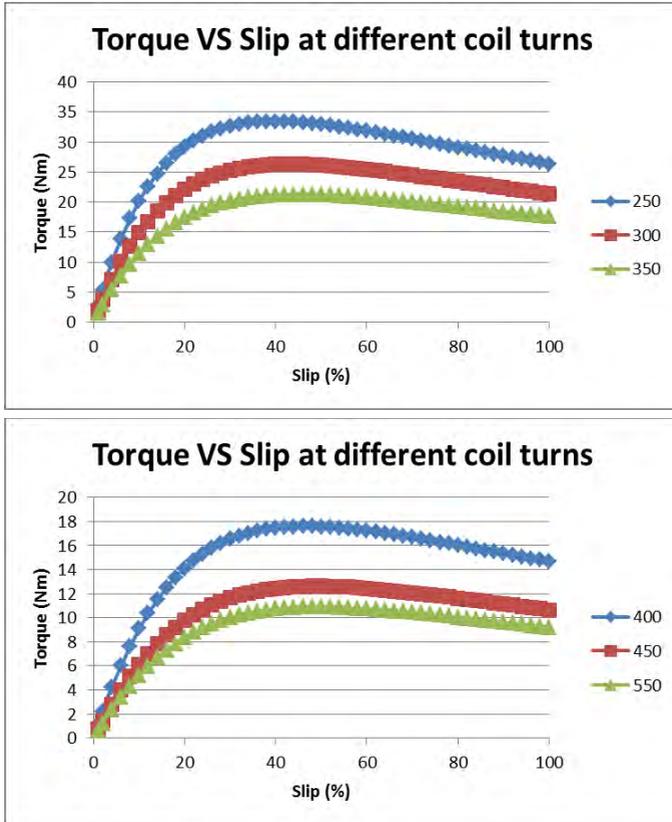


**Gambar 4.8** Kurva ampere-turn versus slip untuk jumlah lilitan berbeda

Dari list grafik kurva torsi-slip dengan jumlah lilitan dapat dipilih yang performa yang paling optimal. Dimana pada simulasi berikutnya perlu dilakukan pencarian arus beban penuh versus jumlah lilitan sehingga menghasilkan target yang ingin dicapai yaitu arus nominalnya sekitar 5 Ampere.

Hal pertama yang menjadi kendala dalam simulasi kali ini adalah asumsi lilitan tanpa batas untuk nilai lebar slot (*slot pitch*) berapapun. Meskipun dapat ditentukan bahwa performa yang paling optimal adalah dengan menggunakan 250 lilitan/slot, bukan berarti hal ini dapat diimplementasikan kedepannya, karena asumsi sebelumnya memaksa dengan menggunakan kawat tembaga 0.7 mm.





**Gambar 4.9** Kurva torsi versus slip untuk jumlah lilitan yang berbeda

Dari data diatas dapat diolah untuk mencari nilai torsi dan arus pada saat beban penuh. Dalam kasus ini penentuan beban penuh didefinisikan dengan rating motor pada saat slip 5%.

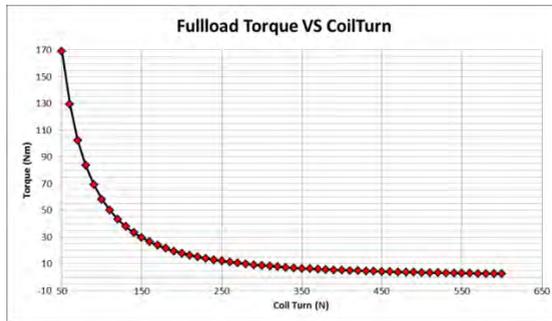
$$\tau_{ind} = \frac{3V^2 \frac{R_2}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2} \dots\dots\dots (4.6)$$

$$Eff_{biasa} = \frac{P_{converted}}{P_{in}} = \frac{\tau\omega}{S_{in} \cos(\theta)} \dots\dots\dots (4.7)$$

$$S_{in} = 3 \cdot V_{LN} \cdot I^* \dots\dots\dots (4.8)$$

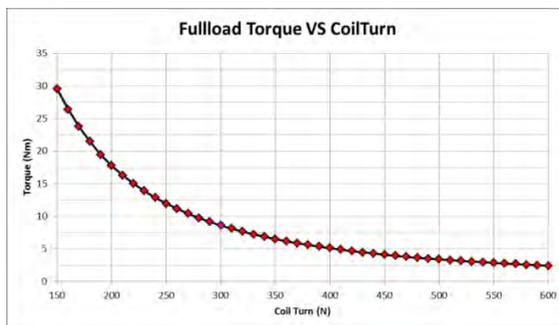
Secara definisi hal ini sebenarnya terlalu kaku untuk menentukan bahwa pembebanan penuh dihitung pada saat slip 5% dikarenakan,

melihat kondisi pada motor sebelumnya, telah dilakukan secara praktikal bahwa saat motor diberikan tegangan input 15 V keluar arus nominal sebesar 5.1 A putaran rotor sebesar 1406 rpm dimana slip yang ada sebesar 6.2%. Tetapi seiring dengan pertambahan pada tegangan input maka slip pada saat tanpa beban pun juga berkurang.



**Gambar 4.10** Torsi pada saat pembebanan penuh versus jumlah lilitan

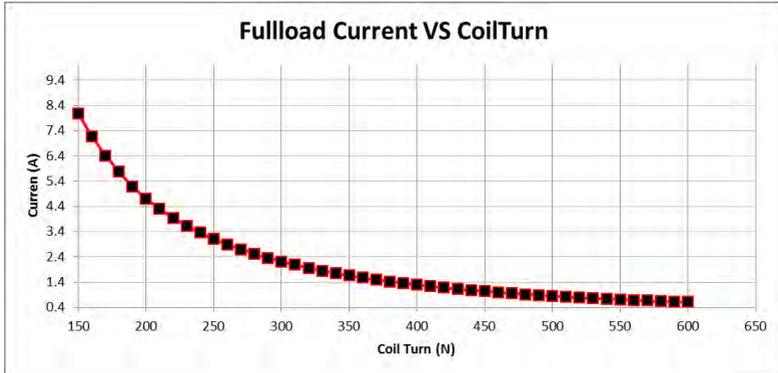
Dengan tegangan input sebesar 220 V kurva torsi pada saat pembebanan penuh dapat dilihat pada gambar diatas. Dari grafik tersebut terlihat bahwa dengan lilitan dengan 50 putaran akan menghasilkan torsi yang sangat besar disebabkan karena sangat kecilnya nilai impedansi sistem menyebabkan over current pada kumparan. Daerah kisaran jumlah lilitan yang paling mungkin untuk diimplementasikan sesuai rating tegangan ini adalah mulai dari 150-450 lilitan. Untuk lebih jelasnya lihat gambar dibawah.



**Gambar 4.11** Kisaran yang rasional dan optimal untuk pembebanan

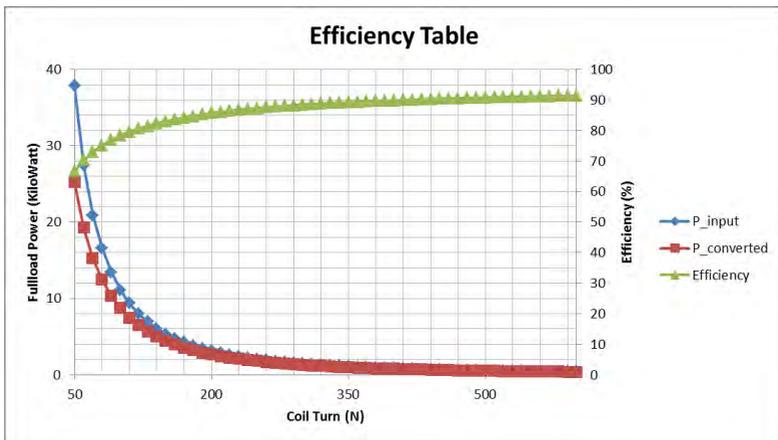
Begitu juga dengan melihat grafik arus versus jumlah lilitan pada kondisi pembebanan penuh (dari definisi slip 5%), didapatkan kurva

seperti diatas. Dengan melihat kekuatan rating dari kawat kumparan 0.7 mm, sama seperti melihat pada torsi, maka lilitan yang memungkinkan untuk diimplementasikan adalah lilitan dengan kisaran 150-450 lilitan (lihat gambar dibawah).



**Gambar 4.12** Arus nominal pada pembebanan penuh

Jika dibandingkan dengan data pada paper [1], hasil ini sangat sesuai dan menunjukkan bahwa rugi daya disebabkan oleh kesalahan konstruksi dan susunan tumpukan laminasi dari inti besi (gigi stator).



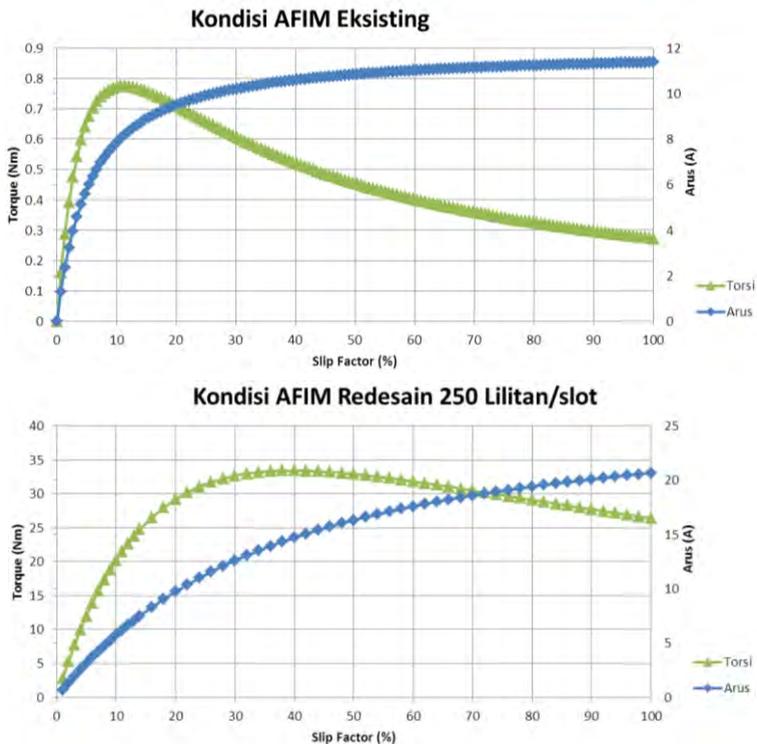
**Gambar 4.13** Efisiensi AFIM secara simulasi

Dari list grafik kurva torsi-slip dengan jumlah lilitan dapat dipilih yang performa yang paling optimal. Dimana pada simulasi berikutnya

perlu dilakukan pencarian arus beban penuh versus jumlah lilitan sehingga menghasilkan target yang ingin dicapai yaitu arus nominalnya sekitar 5 Ampere.

#### 4.4 Perbandingan Performa Redesain Terhadap Eksisting

Dengan menggunakan jumlah lilitan optimal 250 lilitan/slot, melihat hasil simulasi parametrik sebelumnya, maka performa motor akan meningkat kususnya dari segi torsi, arus beban penuh, arus lock rotor. Disini akan dibandingkan performa lilitan tersebut dibandingkan dengan kondisi eksisting.



**Gambar 4.14** Perbandingan performa antara eksisting dengan redesain

Berdasarkan fakta yang ada pada paper sebelumnya [1] kondisi nominal motor eksisting terjadi pada saat pemberian tegangan input sebesar 15 V per fasa, berbeda dengan kondisi level tegangan pada simulasi sebesar 220 V per fasa. Meskipun dengan perbedaan level

tegangan antara simulasi dengan eksisting, kita tetap dapat membandingkan performa mereka secara langsung untuk menunjukkan performa maksimum dari masing-masing motor. Maka dapat dilihat pada grafik diatas perbedaan performa sebelum dan sesudah redesain.

Jika dibandingkan dengan kondisi AFIM eksisting, performa AFIM yang telah didesain dengan pilihan 250 lilitan/slot menunjukkan peningkatan performa secara drastis. Yaitu dengan spesifikasi arus mula sebesar 20.66 A, torsi maksimum 33.43 Nm dan torsi beban penuh 11.98 Nm. Dengan lilitan sebesar ini maka diperlukan teknik penyalaan motor yang benar agar tidak terjadi kerusakan pada saat penyalaan motor. Melihat arus preece kawat tembaga yang terpasang, kawat enamel tembaga 0.7 mm, sebesar 49 A-10 s maka dapat digunakan teknik penyalaan Direct Online (DOL).

Hal pertama yang menjadi kendala dalam simulasi ini adalah asumsi lilitan tanpa batas untuk nilai lebar slot (*slot pitch*) berapapun. Meskipun dapat ditentukan bahwa performa yang paling optimal adalah dengan menggunakan 250 lilitan/slot, bukan berarti hal ini dapat diimplementasikan kedepannya, karena asumsi sebelumnya memaksa dengan menggunakan kawat tembaga AWG 21 atau kawat dengan diameter 0.7 mm. Pembatasan asumsi seperti ini dilakukan untuk mempermudah simulasi dimana relasi antara kerapatan resistansi pada kawat tembaga linier proporsional terhadap panjang kawat (jumlah lilitan tiap slotnya).

## **4.5 Alasan Mengapa Nilai Resistansi dan Induktansi Inti Besi Cukup Kecil**

### *4.5.1 Core Loss Material dari Beberapa Macam Tipe Besi*

Fenomena yang terjadi pada transformer, motor, generator selalu tidak lepas dari pemilihan material inti besi yang digunakan. Untuk menganalisa kesalahan pemilihan material maka disini akan ditunjukkan beberapa karakteristik rugi inti dari tiap tipe besi yang berbeda sesuai dengan data dari manufaktur yang diambil dari internet.

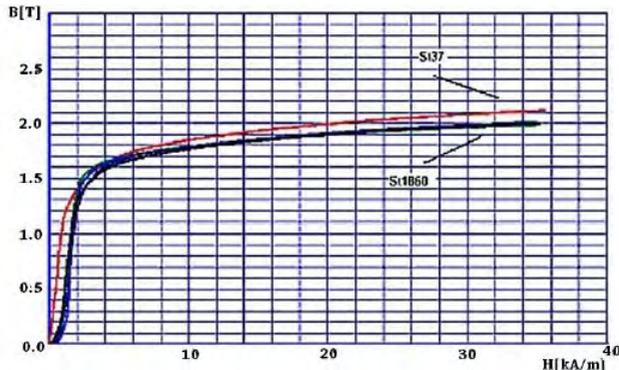
Jika diperhatikan dengan teliti, perbedaan material tidak terlalu memberikan perbedaan rugi inti besi. Dari sebagian besar material electrical sheet steel, besi dengan tipe M19-M47 merupakan tipe yang paling populer untuk diaplikasikan pada transformer karena menggunakan teknologi doping silicon. Tetapi hal ini membatasi

penerapan besi dengan tipe lain, seperti ST37, AK26, dll, yang mungkin dikarenakan faktor biaya dan kesediaan barang pada lokasi tertentu.

Jika dilihat untuk setiap material di lembar berikut, rata-rata setiap tipe besi memiliki core loss dengan kisaran antara 2.0 – 4.0 Watt/kg untuk frekuensi 50 – 60 Hz.

*“Therefore steel type St37 is used because of easy to obtain in market and affordable. This material is classified as the type of low carbon steel. St37 is often used as structural steel for the manufacture of machined parts. This material may not be as good as the M19 or Fe52 in the form of magnetic flux”*

Berdasarkan fakta yang diperoleh dari paper sebelumnya, tertulis bahwa pemilihan material inti besi motor menggunakan tipe ST37, dengan kurva B-H seperti berikut :



**Gambar 4.15** Kurva B-H untuk beberapa material besi menunjukkan kesamaan antara satu sama lain

Sebelumnya ekspektasi kecilnya nilai dari resistansi dan induktansi inti besi adalah disebabkan oleh kesalahan pemilihan material. Tetapi setelah didalami sekali lagi mengenai sifat elektis dari suatu bahan besi dari beberapa manufaktur yang ada melalui internet, didapatkan bahwa hampir seluruh materi besi listrik (khusus yang digunakan untuk aplikasi motor dan transformer) rata-rata memiliki nilai dari kurva B-P coreloss yang mendekati sama antara satu sama lain. Dari pemahaman inilah dugaan ini dialihkan pada kesalahan konstruksi motor.

**Tabel 4.16** Contoh data core loss untuk beberapa tipe besi listrik, sumber : JFE Steel Datasheet

Grade	Thickness in. (mm)	Max. Core Loss at 1.5T			
		Watts per kilogram		Watts per pound	
		50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
M-15	0.014 (0.36)	2.53	3.20	1.15	1.45
M-19		2.75	3.48	1.25	1.58
M-22		2.93	3.70	1.33	1.68
M-27		3.13	3.97	1.42	1.80
M-36		3.31	4.19	1.50	1.90
M-15	0.0185 (0.47)	2.93	3.70	1.33	1.68
M-19		3.03	3.83	1.37	1.74
M-22		3.22	4.08	1.46	1.85
M-27		3.31	4.19	1.50	1.90
M-36		3.57	4.52	1.62	2.05
M-43		4.01	5.07	1.82	2.30
M-45		5.31	6.72	2.41	3.05
M-47	6.96	8.82	3.16	4.00	
M-19	0.025 (0.64)	3.62	4.58	1.64	2.08
M-22		3.80	4.80	1.72	2.18
M-27		3.92	4.96	1.78	2.25
M-36		4.18	5.29	1.90	2.40
M-43		4.70	5.95	2.13	2.70
M-45		6.27	7.93	2.84	3.60
M-47		8.53	10.80	3.87	4.90

Grade	Thickness mm (in.)	Assumed Density kg/dm <sup>3</sup>	Max. Core Loss								Min. Magnetic Flux Density at 5000A/m T	Min. Lamination Factor %
			Watts per kilogram				Watts per pound					
			50Hz		60Hz		50Hz		60Hz			
			1.0T	1.5T	1.0T	1.5T	1.0T	1.5T	1.0T	1.5T		
35JN210	0.35 (0.0138)	7.60	0.90	2.10	1.15	2.65	0.41	0.95	0.52	1.20	1.62	95.0
35JN230		7.60	0.95	2.30	1.20	2.90	0.43	1.04	0.54	1.32	1.62	
35JN250		7.60	1.00	2.50	1.25	3.20	0.45	1.13	0.57	1.45	1.62	
35JN270		7.65	1.10	2.70	1.40	3.45	0.50	1.22	0.64	1.56	1.62	
35JN300		7.65	1.20	3.00	1.50	3.80	0.54	1.36	0.68	1.72	1.62	
35JN360		7.65	1.45	3.60	1.85	4.55	0.66	1.63	0.84	2.06	1.63	
35JN440		7.70	1.80	4.40	2.30	5.60	0.82	2.00	1.04	2.54	1.65	
50JN230	0.50 (0.0197)	7.60	1.00	2.30	1.30	2.95	0.45	1.04	0.59	1.34	1.62	96.0
50JN250		7.60	1.05	2.50	1.35	3.20	0.48	1.13	0.61	1.45	1.62	
50JN270		7.60	1.10	2.70	1.40	3.45	0.50	1.22	0.64	1.56	1.62	
50JN290		7.60	1.15	2.90	1.45	3.70	0.52	1.32	0.66	1.68	1.62	
50JN310		7.65	1.25	3.10	1.60	3.95	0.57	1.41	0.73	1.79	1.62	
50JN350		7.65	1.50	3.50	1.90	4.45	0.68	1.59	0.86	2.02	1.62	
50JN400		7.65	1.70	4.00	2.15	5.10	0.77	1.81	0.98	2.31	1.63	
50JN470		7.70	2.00	4.70	2.55	5.95	0.91	2.13	1.16	2.70	1.64	

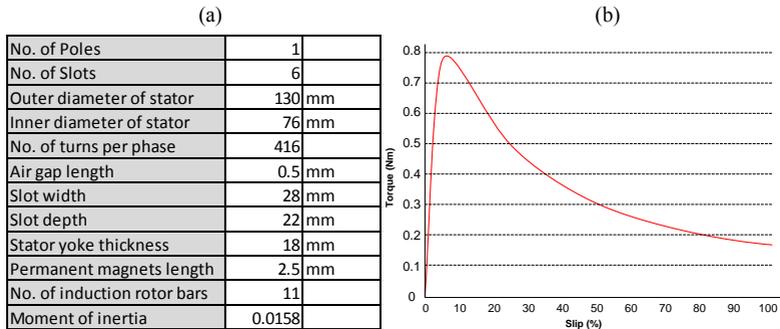
Penjelasan diatas dapat diikuti dengan fenomena dan fakta yang terjadi berdasarkan data yang ada dari paper sebelumnya, dengan detail sebagai berikut :

**Tabel 4.17** Hasil pengukuran dari percobaan AFIM paper [1] tanpa beban

Voltage (V)	Current (A)	PF	RPM	Slip (%)
10	4.7	0.9	1245	16.4
15	5.1	0.8	1406	6.2
20	6.6	0.78	1433	4.4
24	7.8	0.8	1443	3.8
30	9.6	0.8	1450	3.3

Menurut data yang ada di paper [1], rating yang ditetapkan pada motor adalah tercapainya kondisi arus nominal yaitu  $I_{nominal} = 5 A$ , tercapai pada saat input 15 V dimasukkan.

**Tabel 4.18** (a) Desain geometri yang direncanakan sebelumnya (b) kurva torsi vs slip dari motor AFIM referensi [1]



“Depending of characteristic curve torque vs velocity, it gained the maximum torque 0,79Nm at slip 0,07 or 7%. The determined curve from measuring is with nominal tegangan per-phase 15 Volt, maximum current 7A. Thus power input and output in this motor can be compared”

$$P_{in} = 3 \cdot V_{in(L-N)} \cdot I_{in} \cdot \cos\phi = 3 \times 15V \times 5.1A \times 0.8 = 183.6 W \dots\dots\dots (4.9)$$

$$P_{out} = \tau_{max} \cdot \omega_{rotation} = 0.79Nm \times (1 - 0.07) \times \frac{1500rpm}{60} \cdot 2\pi = 115.4 W \dots\dots\dots (4.10)$$

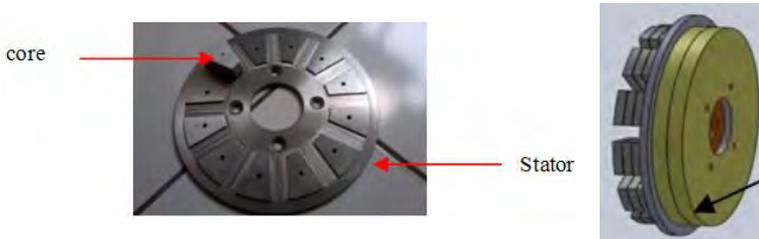
$$Eff = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = 62.85 \% \dots\dots\dots (4.11)$$

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} = 68.2 W \dots\dots\dots (4.12)$$

Dari perhitungan diatas didapatkan rugi dayanya sebesar 68.2 W. Dengan ukuran arus yang mengalir 7 A dengan input tegangan per-

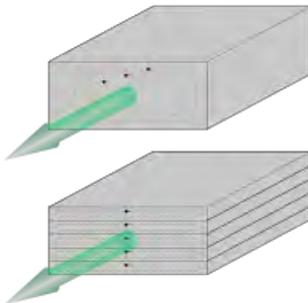
fasanya 15 V, hal ini menunjukkan bahwa kesalahan bukan pada kesalahan pemilihan material. Maka kesalahan lain yang paling mungkin dapat menjelaskannya adalah rugi inti besi (eddy dan histerisis).

*“In the process of making the stator, stator is divided into two parts : stator plate and core. These two parts are made separately. Core is made in three layers, total density of each layer are equal to 20mm. All of this three layers are attached to stator plate as shown in figure”*



**Gambar 4.19** Desain geometri secara detail dari stator AFIM yang dibuat

Rugi inti sangat berhubungan sekali dengan konstruksi besi. Dari kutipan dan gambar konstruksi diatas terlihat bahwa inti besi terbentuk dari tiga lapis yang arah orientasinya paralel terhadap arah vektor medan dari lilitan. Tentu saja hal ini bertentangan dengan konsep rugi eddy. Arus eddy selalu bergerak dengan arah memutar vektor medan magnet yang hadir pada inti besi. Untuk mengurangi rugi eddy maka diperlukan susunan laminasi yang arah vektor tegak lurus dengan arah vektor medan.

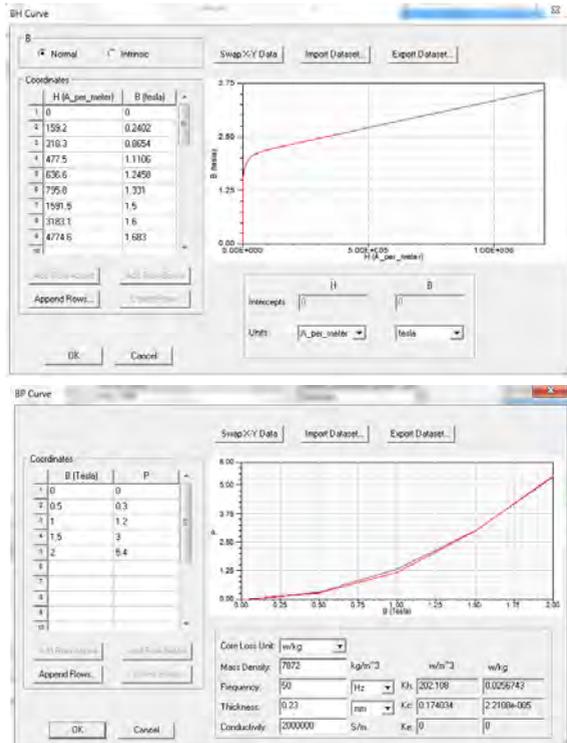


**Gambar 4.20** Konsep rugi eddy pada inti besi

Dari sini dapat beberapa dugaan kuat yang dapat disimulasikan untuk memastikan kebenarannya :

1. Kesalahan sebesar 68.2 W disebabkan secara dominan oleh rugi eddy dan histerisis.
2. Rugi inti besi (eddy dan histerisis) disebabkan oleh kesalahan konstruksi besi yaitu orientasi dan segmen laminasi yang salah.

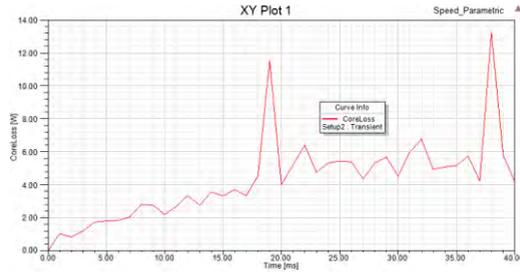
Berikut setting dari kurva B-H bahan steel yang digunakan dalam simulasi :



**Gambar 4.21** Input kurva B-H (magnetisasi) dan B-P (Core loss) pada ANSYS Maxwell

Dengan melihat data yang ada pada datasheet dari besi dengan tipe M19 lalu dimasukkan ke dalam interface ANSYS Maxwell untuk kurva B-P coreloss, didapatkan dari hasil simulasi coreloss yang diperoleh sebesar kisaran 30-40 Watt. Jika dibandingkan dengan dugaan awal bahwa terjadi kesalahan material, maka secara teori dapat

dibuktikan bahwa akan terjadi coreloss tidak lebih besar dari 25 W. Hal ini mendekati kesesuaian dengan besar perhitungan  $P_{loss}$  sebelumnya.



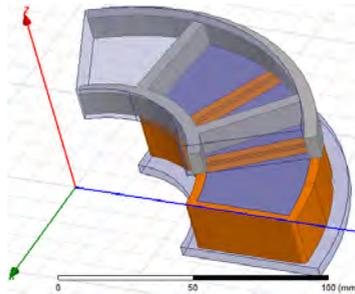
(a)

Mass Density	Simple	7872	kg/m <sup>3</sup>
Composition		Lamination	
- Stacking Factor	Simple	0.93	
- Stacking Direction		V(1)	

(b)

**Gambar 4.22** (a) Hasil simulasi rugi inti besi dengan laminasi radial (koordinat silindris), (b) Setting laminasi pada ANSYS Maxwell

Jika konstruksi gigi stator dilaminasi dengan arah orientasi radial [V(1)], didapatkan besar rugi inti besi dengan kisaran 5 Watt. Dari seluruh data diatas telah terbukti bahwa rugi daya sebesar 68.2 W bukan disebabkan oleh kesalahan pemilihan material, melainkan kesalahan pada konstruksi laminasi pada inti besi (gigi stator) AFIM.



**Gambar 4.23** Orientasi laminasi pada stator sebagai solusi dari core loss yang terjadi

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dalam tugas akhir ini disimulasikan sebuah motor AFIM yang sebelumnya telah dibuat. Dari pengujian beban penuh yang telah dilakukan sebelumnya didapatkan bahwa motor tersebut memiliki torsi yang kecil, efisiensi rendah, dan terjadinya arus berlebih pada tegangan nominal. Simulasi dengan software 3D FEM digunakan untuk mencari tahu kesalahan dan solusi dari permasalahan motor tersebut. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa untuk mendapatkan performa optimal dapat dipilih jumlah lilitan sebanyak 250 lilitan/slot sedemikian hingga menghasilkan torsi beban penuh 11.98 Nm, arus beban penuh 3.11 A, dan arus awal 20.66 A. Dengan arus awal sebesar ini maka diperlukan teknik penyalaan motor yang benar agar tidak terjadi kerusakan pada saat penyalaan motor. Dengan melihat ampasitas kawat enamel 0.7 mm maka dapat digunakan teknik penyalaan sederhana yaitu *direct online* (DOL).

Sedangkan solusi dalam mengurangi efek rugi daya yang besar pada inti besi terdapat beberapa hal yang harus dilakukan yaitu perubahan konstruksi laminasi dengan arah tumpukan vertikal atau secara radial. Solusi kedua dapat menggunakan campuran resin dan serbuk besi, agar orientasi dari elemen besi dapat secara random teracak di dalam campuran resin itu sendiri, sesuai dengan implementasi pada motor YASA.

#### **5.2 Saran**

1. Agar simulasi ini dapat diimplementasikan kedepannya pada AFIM yang telah didesain sebelumnya.
2. Pemilihan lilitan dari hasil simulasi tetap harus disesuaikan dengan kondisi mekanik motor AFIM, khususnya pada lebar slot yang didesain.

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## LAMPIRAN

Running-Code program MATLAB motor induksi :

```
% M-file: torque_speed_curve.m
% M-file create a plot of the torque-speed curve
of the

% First , initialize the values needed in this
program.
r1 = 1.14;           % Stator resistance
x1 = 0.26;           % Stator reactance
r2 = 0.07;           % Rotor resistance
x2 = 0.26;           % Rotor reactance
xm = 2.85;           % Magnetization
branch reactance
v_phase = 15;        % Phase tegangan
n_sync = 1500;       % Synchronous speed
( r / min )
w_sync = n_sync*2*pi/60; % Synchronous speed
(rad /s)

% Calculate the Thevenintegangan and impedance
from Equations
v_th= v_phase * (xm /sqrt(r1^2 +(x1 + xm )^2 ))
;
z_th = ((xm*1i) * (r1 +x1*1i )) / (r1 + (x1 +
xm)*1i)
r_th = real (z_th);
x_th = imag (z_th);

% Now calculate the torque-speed characteristic
for many
% slips between 0 and 1. Note that the first
slip value
% is set to 0.001 instead of exactly 0 to avoid
divide
% by-zero problems.

s = (0:1:50)/50;     % Slip
```

```

s(1) = 0.001;
nm = (1 - s) * n_sync; % Mechanical speed

t_ind1=0:1:50;          % Variable Initialization

% Calculate torque for original rotor resistance
for aa = 1:51
    t_ind1(aa) =
    (3*v_th^2*r2/s(aa))/(w_sync*((r_th+r2/s(aa))^2+(
x_th+x2 )^2 ) ) ;
end

% Plot the torque-speed curve
nm_plot = (nm/n_sync)*100;

%plot (nm,t_ind1)
plot (nm,t_ind1)

```

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ashari, M., Dedet, C. R., Suryoatmojo, H., Fahmi, D., & Bani, K. (2011). Design and Implementation of Single Stator Single Rotor Axial Flux Induction Motor for Electric Vehicle. *Paper EE ITS*, 8.
- [2] Aydin, M. H. (2010). Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines. *IEEE*, 11.
- [3] Chapman, S. J. (2005). *Electric Machinery Fundamental*. New York: McGraw-Hill.
- [4] Woolmer, T., & McCulloch, M. (2011). Analysis of the Yokeless and Segmented Armature Machine. *IEEE*, 7.
- [5] Zhang, C., Tseng, K., & Nguyen, T. (2010). Analysis and Comparison of Axial Flux PM Synchronous Motor and Induction Motor. *IEEE*, 6.

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## RIWAYAT HIDUP



**Kamal Habibi Bagar** dilahirkan di Surabaya, tanggal 12 Mei 1992. Penulis memulai jenjang pendidikan di SDN Klampis Ngasem 1 Surabaya, SMPN 1 Surabaya, dan SMAN 5 Surabaya hingga lulus pada tahun 2010. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan dengan program beasiswa prestasi ke jenjang perguruan tinggi dan diterima di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada Jurusan Teknik Elektro. Bidang studi sistem tenaga merupakan jurusan yang ditekuni oleh Penulis. Semasa kuliah, penulis juga aktif sebagai pengurus di organisasi ekstrakurikuler. Dalam bidang karya tulis, penulis pernah mendapat dana hibah dari Dikti melalui kegiatan PKM.

**Halaman ini sengaja dikosongkan**