

**SIMULASI MAGNETOSTATIK PADA MOTOR INDUKSI
TIGA FASA MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

(Skripsi)

Oleh

UJANG FATUROHMAN



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2015**

ABSTRACT

MAGNETOSTATIC SIMULATION ON THREE PHASE INDUCTION MOTOR USING FINITE ELEMENT METHOD

By

UJANG FATUROHMAN

Induction motors are the motors of the most widely used in various applications. Based on the principle works, the induction motor is highly dependent on a rotating magnetic field generated by the stator currents. Thus, in the manufacture of induction motors is very important to determine the magnetic field strength generated. Given the magnitude of the role of induction motors in the industrial world, it is necessary to study to map and determine magnetostatic phenomena at the three phase induction motor. Magnetostatic simulation is performed using the finite element method simulated with the aid of software Ansys 13. Objek research is a model of a three-phase induction motor with stator construction of 36 slots, 24 slots and 12 slots. as well as the type of squirrel cage rotor and windings used type is the type meshes with a single layer. The simulation process consists of preprocessing (made of modeling and meshing), analysis by incorporating parameters are required, and post-processing is a process performance simulation results displayed in the form of surface conditions and the direction of the magnetic flux density distribution.

Results of the research showed that the total value of the maximum magnetic flux density occurs at the induction motor stator and of the three models were simulated, three-phase induction motor 36 slots have a total maximum flux density is greater compared with the induction motor 24 slots and 12 slots. From the research results can also be seen towards the magnetic flux density distribution in accordance with the rules of the right hand. In addition magnetostatic phenomena which magnetic flux lines indicate a closed path so that no load magnet. dan an electric current can cause magnetic fields as shown in results of the research.

Keywords: magnetostatic, magnetic flux density, finite element method, Ansys 13, three phase induction motor.

ABSTRAK

SIMULASI MAGNETOSTATIK PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASA MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Oleh

UJANG FATUROHMAN

Motor induksi merupakan motor yang paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi. Berdasarkan prinsip kerjanya, motor induksi sangat bergantung pada medan magnet putar yang ditimbulkan oleh arus stator. Sehingga dalam pembuatan motor induksi sangat penting untuk menentukan kuat medan magnet yang ditimbulkan. Mengingat begitu besarnya peranan motor induksi di dunia industri, maka perlu dilakukan studi untuk memetakan dan mengetahui fenomena magnetostatik pada motor induksi tiga fasa tersebut. Simulasi magnetostatik ini dilakukan menggunakan metode elemen hingga yang disimulasikan dengan bantuan perangkat lunak *Ansys 13*. Objek penelitian berupa model motor induksi tiga fasa dengan konstruksi stator 36 slot, 24 slot dan 12 slot. serta rotor jenis sangkar tupai dan tipe lilitan yang digunakan adalah tipe jerat dengan single layer. Proses simulasi terdiri dari *preprocessing* (dibuat pemodelan dan meshing), *analysis* dengan memasukkan parameter – parameter yang dibutuhkan, dan *post-processing* yang merupakan proses penampilan hasil simulasi yang ditampilkan dalam bentuk kondisi permukaan dan arah distribusi kerapatan fluks magnet.

Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa nilai total kerapatan fluks magnet maksimum terjadi pada bagian stator motor induksi dan dari ketiga model yang disimulasikan, motor induksi tiga fasa 36 slot memiliki total kerapatan fluks maksimum lebih besar di banding dengan motor induksi 24 slot dan 12 slot. Dari hasil penelitian juga dapat dilihat arah distribusi kerapatan fluks magnet sesuai dengan kaidah tangan kanan. Selain itu, fenomena magnetostatik yaitu garis-garis fluks magnet menunjukkan lintasan tertutup sehingga tidak ada muatan magnet dan suatu arus listrik dapat menimbulkan medan magnet seperti yang ditunjukkan hasil penelitian ini.

Kata kunci : magnetostatik, kerapatan fluks magnet, metode elemen hingga, *Ansys 13*, motor induksi tiga fasa.

**SIMULASI MAGNETOSTATIK PADA MOTOR INDUKSI
TIGA FASA MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

Oleh

UJANG FATUROHMAN

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2015**

Judul Skripsi

: **SIMULASI MAGNETOSTATISTIK PADA MOTOR INDUKSI
TIGA FASA MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

Nama Mahasiswa

: **Ujang Faturohman**

Nomor Pokok Mahasiswa : 0815031030

Program Studi

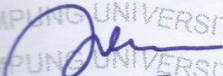
: **Teknik Elektro**

Fakultas

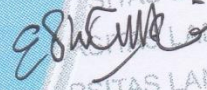
: **Teknik**

MENYETUJUI

1. **Komisi Pembimbing**



Muhamad Komarudin, S.T., M.T.
NIP 19681207 199703 1 006



Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T.
NIP 19730215 199903 2 003

2. **Ketua Jurusan Teknik Elektro**



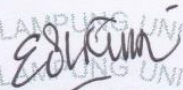
Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc.
NIP 19731128 199903 1 005

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

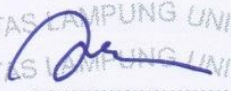
Ketua

: Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T.



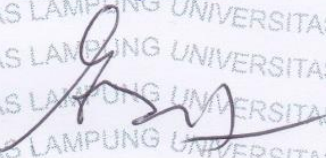
Sekretaris

: Muhamad Komarudin, S.T., M.T.

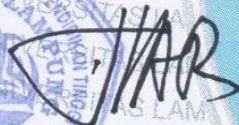


Penguji

Bukan Pembimbing : Ir. Abdul Haris, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



Prof. Dr. Suharno, M.Sc., Ph.D.

NIP. 19620717 198703 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 21 Desember 2015

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan disuatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali disebutkan di dalam daftar pustaka. Selain itu saya menyatakan juga bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya ini tidak benar, saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Bandar Lampung) Desember 2015



METERAI
TEMPEL
PAJAK MEMBANGUN BANGSA
TGL
20
D9A25AAF368805750
ENAM RIBU RUPIAH
6000 DJP

Ujang Faturohman
NPM 0815031030

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Serang pada hari Senin tanggal 6 November 1989, sebagai anak ketiga dari lima bersaudara dari pasangan bapak Suhaimi dan Ibu Suryati.

Pendidikan yang pernah ditempuh penulis adalah Sekolah Dasar pada tahun 1996 di SD Negeri 1 Tamanbaru dan selesai pada tahun 2002, Sekolah Menengah Pertama Negeri 2 Cilegon yang diselesaikan pada tahun 2005 dan Sekolah Menengah Atas Negeri 1 Cilegon yang diselesaikan pada tahun 2008. Pada tahun 2008 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur Penelusuran Kemampuan Akademik dan Bakat (PKAB).

Selama menjadi mahasiswa penulis berpartisipasi aktif di beberapa organisasi kemahasiswaan baik intra maupun ekstra kampus diantaranya adalah: Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) diamanahkan sebagai Kepala Divisi Pendidikan (2010 – 2011), Anggota Departemen Kajian Islam FOSSI FT (2010-2011) dan Sekretaris Umum Himpunan Mahasiswa Serang dan Cilegon (HIMSAC) Bandarlampung pada periode tahun 2011-2012. Penulis juga pernah menjadi Asisten Praktikum Rangkaian Listrik dan Praktikum Instrumentasi dan Pengukuran di Laboratorium Pengukuran Besaran Elektrik.

Pada semester lima, penulis mulai memfokuskan pada konsentrasi Sistem Energi Elektrik (SEE). Pada tahun 2011, penulis melaksanakan Kerja Praktek (KP) di PT. Indonesia Power Unit 1 – 4 UBP Suralaya, Cilegon. Dalam melaksanakan Kerja Praktek, penulis ditempatkan di bagian Pemeliharaan khususnya Proteksi Listrik dan menyelesaikan Kerja Praktek dengan menulis laporan yang berjudul “Proteksi Generator Tranformer dengan Rele Differensial Tipe HUB – 2-D pada PT. Indonesia Power Unit 1 – 4 UBP Suralaya. Pada tahun 2012, penulis melakukan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Peniangan Kecamatan Marga Sekampung Kabupaten Lampung Timur.

PERSEMBAHAN

Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang
Kupersembahkan skripsi ini untuk:

Bapak dan Emak Tercinta

Saudara – saudaraku Terhebat
(Kang Ijal, Kang Ilik, Lilis dan Ummu)

Guru – guru, Dosen dan Almamater Tercinta

MOTTO

Usaha tebaik untuk hasil terbaik

Lakukanlah

*Demi waktu. Sesungguhnya manusia itu benar-benar berada dalam kerugian.
Kecuali orang-orang yang beriman dan mengerjakan amal saleh, dan saling
nasehat-manasehati supaya menaati kebenaran dan saling nasehat-menasehati
supaya menetapi kesabaran*

(Q.S. Al-Ashr : 1-3)

*...Sesungguhnya Allah tidak akan merubah nasib suatu kaum, kecuali kaum
itu sendiri yang merubah nasibnya...*

(Q.S. Ar-Ra'ad : 11)

*Sesungguhnya sesudah kesulitan pasti ada kemudahan, maka apabila kamu
sudah selesai dalam suatu urusan, laksanakanlah dengan sungguh-sungguh urusan
yang lain. Dan hanya kepada Tuhanmulah hendaknya kamu berharap*

(Q.S. Al-Insyiroh : 6-8)

.....Jagalah dirimu dan keluargamu dari api neraka.....

(Q.S. At-Tahrim : 6)

Sebaik-baik manusia adalah yang memberikan manfaat bagi orang lain

(Nabi Muhammad SAW)

SANWACANA

Alhamdulillahirobbil'alamin. Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan kekuatan, kesabaran dan kemampuan berpikir kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul “ Simulasi Magnetostatik pada Motor Induksi Tiga Fasa menggunakan Metode Elemen Hingga” yang merupakan salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung. Shalawat serta salam senantiasa tersampaikan kepada Nabi Muhammad Rasulullah SAW yang kita nantikan syafa'atnya di akhirat kelak..

Melalui penulisan Sanwacana ini, dengan segala ketulusan dan kerendahan hati penulis sampaikan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah berkenan membantu dalam proses penyelesaian skripsi ini yang penulis tunjukkan kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Hasriadi Mat Akin, M.P., selaku Rektor Universitas Lampung beserta paraWakil Rektor dan jajaran perangkat kerjanya.
2. Bapak Prof. Dr. Suharno, M.Sc., Ph.D., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung
3. Bapak Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Herman H Sinaga, S.T., M.T., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.

5. Ibu Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama yang telah sabar memberikan arahan, solusi, motivasi, saran dan kritik yang membangun kepada penulis dalam pelaksanaan dan penyelesaian skripsi ini.
6. Bapak Muhamad Komarudin, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Pendamping yang telah memberikan motivasi, keyakinan, solusi, nasihat dan kritik pendobrak perilaku kepada penulis.
7. Bapak Ir. Abdul Haris, M.T., selaku Dosen Penguji Utama yang telah memberikan saran – saran dan kritik yang membangun kepada penulis dalam pelaksanaan skripsi.
8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro yang telah menjadi perantara bagi penulis untuk mendapatkan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang Teknik Elektro. Membimbing dan memberikan pesan – pesan moral serta motivasi kepada penulis selama menjadi mahasiswa.
9. Mbak Ning serta anggota staf administrasi lainnya di Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam pelaksanaan dan penyelesaian administrasi – administrasi kuliah, khususnya administrasi penulis saat penyelesaian Skripsi.
10. Teristimewa kepada keluargaku : Bapak dan emak tercinta, terima kasih telah mendo'akan, memberikan hidup, membiayai pendidikan, memberikan tauladan, kepercayaan, kebebasan bersikap, dan begitu sabar terhadap penulis. Kakak-kakaku penuh kasih, inspirasi, dorongan, dan kebanggaan: Kang Ijal, Teh Ati dan Kang Ilik. Serta Adik – adikku tersayang (Lilis dan Ummu) yang penuh keceriaan dan penghiburan setiap saat. Terima kasih sebesar-besarnya. Mari bersama kita kerja keras mengangkat derajat dan martabat keluarga ini.

11. Keluarga besar Bapak Salman (Mame, Ibu, Teh ende, Kang Rahmat, Kang ende, Teh Mut, Teh Ilik, Kang Andi, Kang Aji, Teh Aji, Teh Yuyun, Selamat, dan Dayu) Terima kasih atas perhatian dan dukungannya.
12. Keluarga besar Buwe Siti (Buwe, Teh Ipah, Teh Iqoh, Mas Rosad, Kang Babay, dan Teh Een). Terima kasih atas kebaikan yang diberikan kepada penulis.
13. Teman – teman seperjuangan Elektro 2008 : Sigit, Firman, Rahmat, Ridho, , Novia, Palupi, Anisa, Agus, Sogiara, Bayu, Ferdi, Koko, Jeni, Bembeng, Oka, Lia, Prativi, Dana, Rizky, Reza, Anas, Hasron, Endi, Edo, Kiting, Yoga, Yogie, Yuly, Aryanto, Insan, Pujo, Fegi, Ade wahyu, Ayu, Adi, Dinan, Tuntas, Ridolf, Andre, Komedi, Giri, Yuday, Aris, Adam, Dimas, Cing, Use, Ayub, Una, Cipo, Mang Syu, Abi, Sate, Felix, Nora, Olil, Kakek, Uli, Novri, Kang Eko, Matul, Dapot, Habibi, Dedi, Topik, Marwanto dan Gigih. yang telah saling menghibur, saling membantu, saling bertukar pikiran dan saling menguatkan. Terima kasih teman-teman, kalian memang unik dan LUAR BIASA. Sukses selalu untuk kita semua.
14. Keluarga besar HiMSAC, keluarga pertamaku di perantauan yang selalu memberi tawa, keceriaan , kepedulian dan kebersamaan : Kang Rohmat, Kang Lukman, A Chepi, Kang dr. Rifqi, Teh Ratna Ka Iman, Ka Dika, A Tebe, Kang Pay, A Rizky, Teh Uyun, Teh Sinta, Teh Rara, Kang Ade, Kang Muhajir dan Kakang Tete semua. Terima kasih telah mengayomi penulis.
Temen – temen Kepengurusan 2011/2012: Ubung Syueb, Ina, Umi, Widi, Isa, Rangga, Meilina, Ismail, Marlinton, Ari, Syafira, Rista, Heri, Weni, Nisa, Asep, Bayu.

Para generasi baru: Nico, Imas, Aida, Mila, Putri, Lina, Pupu, Adi, Irvan, Lutfi, Hesti, Nisa, Aziz, Angga, Ilham, Dessy, Murti, Heni, Nining, Devi, Ika, Anggun, Idris, Endang, Ega, Ario, Thomi, Lia, Donny, Aulia, Amirah, Aziz, Icil, Ulfi, Ponco, Elsa, Anggita, Zeita, Bayu, Asep, Jihan, Cici, Rifqi, Shabrine, Silvi, Fikri, Akbar, Merita, Rosy, Intan, Beky, Rita, Ova, Febi, Rekhy, Ulfa, dll. *Apapun namanya, tetap Semangat, Jaga martabat Banten di Lampung.*

15. Keluarga besar Ibu Maemunah, Teh Iyul, Kang Iin, Dafa, Teh Iyam, Kang Aan, Icha, Arif, Akbar, Teh Lena, Ka Hendri, Gulam, Rafa – Rafi, Teh Yayoh, Apiz, Kang Deu, Kang Bahri, Teh Anah, Wawan, Daus, Pipit, Endi, Indah, dll., Keluarga Kang Habiby, Keluarga Abah halimi, Keluarga ende Emah, dan tetangga – tetangga yang tidak tersebut namanya. Terima kasih atas kebersamaan dan segala bantuannya.

16. Keluarga Way Halim, Bapak H. Sugianto, Ibu Hj. Reni, Mbak Ria, mbak Wulan, Ka Agung, dan Yulia.

17. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam proses penyelesaian skripsi ini yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Penulis berharap semoga Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa membalas semua kebaikan kalian dan akhir kata semoga skripsi ini bermanfaat bagi kelangsungan proses pembelajaran, penelitian, kemajuan teknologi dan informasi di Universitas Lampung.

Bandarlampung, Desember 2015
Penulis

Ujang Faturhman

DAFTAR ISI

	Halaman
SANWACANA	i
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR SIMBOL	x
I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Tujuan Penelitian	3
C. Manfaat Penelitian	3
D. Rumusan Masalah	3
E. Batasan Masalah	4
F. Hipotesis	4
G. Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	
A. Magnetostatik.....	7
1. Fluks Magnet	7
2. Kerapatan Fluks Magnet	8
3. Permeabilitas	9
4. Persamaan – persamaan Medan Magnetostatik	10

B. Motor Induksi Tiga Fasa	15
1. Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa	15
2. Medan Magnetik Putar	19
3. Prinsip Kerja.....	21
III. METODE PENELITIAN	
A. Waktu dan Tempat Penelitian	25
B. Alat dan Bahan	25
C. Metode Penelitian	25
D. Pelaksanaan Penelitian	30
E. Diagram Alir Penelitian	32
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
A. Simulasi Motor induksi 3 Fasa	34
1. Pre-processing.....	34
2. Analysis	37
3. Post-processing	39
B. Data Hasil Simulasi	42
C. Analisis Hasil Simulasi	44
V. KESIMPULAN DAN SARAN	
A. Keimpulan	46
B. Saran	46

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

TABEL	Halaman
Tabel 2.1. Nilai Permeabilitas Relatif μ_r beberapa bahan.....	10
Table 2.2. Persamaan Medan Magnetostatik	11
Tabel 4.1. Jumlah Node dan Elemen	35
Tabel 4.2. Nilai Total Kerapatan Fluk Magnet Maksimum (B) Pada Motor Induksi Tiga Fasa.....	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1. Penampang Rotor dan Stator Motor Induksi.....	16
Gambar 2.2. Komponen Stator Motor Induksi Tiga Fasa.....	17
Gambar 2.3a. Rotor Sangkar.....	17
Gambar 2.3b. Konstruksi Motor Induksi Rotor Sangkar.....	17
Gambar 2.4a. Rotor Belitan.....	18
Gambar 2.4b. Konstruksi Motor Induksi Rotor Belitan.....	18
Gambar 2.5a. Diagram Phasor Fluksi Tiga Fasa.....	19
Gambar 2.5b. Arus Tiga Fasa Setimbang.....	19
Gambar 2.6. Medan Putar Pada Motor Induksi Tiga Fasa.....	20
Gambar 2.7. Arah Fluks yang ditimbulkan oleh arus yang mengalir dalam suatu lingkar.....	20
Gambar 2.8. Diagram Vektor untuk Fluks Total pada Keadaan t_1, t_2, t_3, t_4 .	21
Gambar 2.9. Proses Induksi Medan Putar Stator pada Kumparan Rotor.....	23
Gambar 3.1. Elemen Satu Dimensi.....	29
Gambar 3.2. Elemen Dua Dimensi.....	29
Gambar 3.3. Elemen Tiga Dimensi.....	30
Gambar 3.4. Diagram Alir.....	32
Gambar 4.1. Model Motor Induksi 3 Fasa 36 slot.....	34
Gambar 4.2. Model Motor Induksi 3 Fasa 24 slot.....	34

Gambar 4.3. Model Motor Induksi 3 Fasa 12 slot	35
Gambar 4.4. Meshing pada Motor Induksi 3 Fasa 36 slot	36
Gambar 4.5. Meshing pada Motor Induksi 3 Fasa 24 slot	36
Gambar 4.6. Meshing pada Motor Induksi 3 Fasa 12 slot	37
Gambar 4.7. Simulasi Magnetostatik Motor Induksi 3 Fasa 36 slot.....	38
Gambar 4.8. Simulasi Magnetostatik Motor Induksi 3 Fasa 24 slot.....	38
Gambar 4.9. Simulasi Magnetostatik Motor Induksi 3 Fasa 12 slot	39
Gambar 4.10. Solution Total Magnetic Flux Density (B) Motor Induksi Tiga Fasa 36 slot	40
Gambar 4.11. Solution Total Magnetic Flux Density (B) Motor Induksi Tiga Fasa 24 slot	40
Gambar 4.12. Solution Total Magnetic Flux Density (B) Motor Induksi Tiga Fasa 12 slot	41
Gambar 4.13. Grafik Kerapatan Fluks Magnet pada Motor induksi 3 Fasa	44

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
Φ_m	Fluks magnet	Weber
B	Kerapatan fluks magnet	Tesla (T)
A	Luas penampang	m ²
μ_0	Permeabilitas ruang hampa	H/m
H	Kuat medan magnet	A/m
μ_r	Permeabilitas relative	H/m
J	Kerapatan arus	A/m ²
$\nabla \cdot$	Operator divergensi	-
$\nabla \times$	Operator curl	-
\oint_C	Integral batas	-
N _s	Kecepatan sinkron	rpm
f	Frekuensi	Hz
p	Jumlah Kutub	-
E	ggl induksi	Volt
S	Slip	-
F	Gaya	N
I	Arus	A
L	Panjang Konduktor	m

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Motor induksi merupakan motor yang paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi mulai dari lingkungan rumah tangga sampai industri besar. Dinamakan motor induksi karena arus pada rotor motor ini bukan diperoleh dari suatu sumber listrik, tetapi merupakan arus yang terinduksi akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar.

Bila sumber tegangan tiga fasa dipasang pada kumparan stator motor induksi, maka pada kumparan stator akan timbul medan putar yang kemudian akan memotong kumparan rotor yang diam. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan relatif antara kecepatan fluksi yang berputar dengan kumparan rotor yang diam. Akibatnya, pada kumparan rotor akan timbul tegangan induksi (\mathcal{E}). Karena kumparan rotor merupakan rangkaian tertutup, maka arus akan mengalir pada kumparan rotor. Karena kumparan rotor yang mengalirkan arus ditempatkan di dalam daerah medan magnet yang dihasilkan stator, sehingga terbentuklah gaya mekanik (gaya Lorentz) pada konduktor-konduktor rotor dan motor dapat berputar.

Berdasarkan prinsip kerja tersebut, maka dapat dikatakan bahwa bekerjanya motor induksi sangat bergantung pada medan magnet putar yang ditimbulkan oleh arus

stator, sehingga dalam pembuatan motor induksi sangat penting untuk menentukan kuat medan magnet yang ditimbulkan. Mengingat begitu besarnya peranan motor induksi di dunia industri, maka perlu dilakukan studi untuk memetakan dan mengetahui fenomena magnetostatik pada motor induksi tiga fasa.

Simulasi magnetostatik dilakukan menggunakan metode elemen hingga atau *Finite Element Method (FEM)* yang disimulasikan dengan bantuan *software*. Dasar dari metode elemen hingga adalah membagi benda kerja menjadi elemen – elemen kecil yang jumlahnya berhingga dan dapat menghitung reaksi akibat beban pada kondisi batas yang diberikan. Ide ini sangat membantu ketika perhitungan analisis differensial sangat sulit dilakukan karena berbagai faktor, misal karena geometri, variasi benda, dan waktu yang simultan.

Dari elemen – elemen tersebut dapat disusun persamaan – persamaan matrik yang bisa diselesaikan secara numerik dan hasilnya menjadi jawaban dari beban pada kondisi beban yang diberikan pada benda kerja tersebut. Salah satu alat perhitungan dengan metode hingga adalah *software Ansys* yang bisa digunakan untuk evaluasi berbagai model desain mekanik, termal, maupun model aliran fluida. Sehingga dengan memanfaatkan *tools* yang ada maka akan dianalisa hasil simulasi penyebaran dan nilai kerapatan fluks magnet dari hasil pemodelan motor induksi tiga fasa. Oleh karena itu, penelitian ini diberi judul simulasi magnetostatik pada motor induksi tiga fasa menggunakan metode elemen hingga.

B. Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah

1. Membuat pemodelan motor induksi tiga fasa untuk memberikan gambaran atau simulasi aliran fluks magnet yang timbul pada motor induksi tiga fasa.
2. Mendapatkan nilai kerapatan fluks magnet yang ditimbulkan, lokasi dan arah rapat fluks magnet yang timbul pada motor induksi tiga fasa tersebut.

C. Manfaat

Manfaat yang bisa didapatkan dari penelitian ini adalah:

1. Dapat memvisualisasikan aliran magnetik dan kerapatan fluks magnet pada motor induksi tiga fasa dari pemodelan yang dilakukan.
2. Dapat mengetahui pengaruh jumlah slot terhadap kerapatan fluks magnet pada motor induksi tiga fasa.

D. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang dikemukakan diatas dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut :

1. Bagaimana melakukan simulasi magnetostatik pada motor induksi tiga fasa menggunakan metode elemen hingga.
2. Bagaimana hasil simulasi magnetostatik yang diperoleh dengan jumlah slot yang berbeda-beda.

E. Batasan Masalah

Pada penelitian tugas akhir ini akan lebih terarah, jika pembahasan penulisan ini dibatasi pada ruang lingkup pembahasan sebagai berikut :

1. Simulasi magnetostatik menggunakan metode elemen hingga.
2. Simulasi magnetostatik dilakukan pada motor induksi tiga fasa.
3. Objek penelitian adalah motor induksi tiga fasa dengan konstruksi rotor sangkar tupai dan konstruksi stator tipe belitan jerat dengan jumlah slot yang bervariasi yaitu 36 slot, 24 slot dan 12 slot.
4. Dalam hal ini objek penelitian hanya membahas bagian stator dan rotor.
5. Hanya menganalisa arah , lokasi dan nilai kerapatan fluks magnet yang terjadi.

F. Hipotesis

- 1) Dengan menggunakan metode elemen hingga dapat dilakukan simulasi untuk memetakan kerapatan fluks magnet pada model motor induksi tiga fasa.
- 2) Dengan melakukan pemodelan geometri motor induksi tiga fasa maka akan diketahui arah dan nilai kerapatan fluks magnet pada motor induksi tiga fasa.

G. Sistematika Penulisan

Penulisan laporan tugas akhir ini dibagi ke dalam lima bab dengan sistematika sebagai berikut :

I. PENDAHULUAN

Bab ini berisikan tentang latar belakang dan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, serta sistematika penulisan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan teori pendukung yang digunakan dalam penulisan laporan tugas akhir ini.

III. METODE PENELITIAN

Bab ini berisikan tentang waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam menyelesaikan tugas akhir ini, metode penelitian, langkah-langkah penelitian dan diagram penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang hasil simulasi magnetostatik pada motor induksi tiga fasa menggunakan metode elemen hingga.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab terakhir ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian dan saran yang disampaikan berdasarkan hasil dan pembahasan dari penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Berisikan literatur-literatur atau referensi-referensi yang diperoleh penulis untuk menunjang penyusunan laporan tugas akhir ini.

LAMPIRAN

Berisikan beberapa hal yang mendukung proses simulasi magnetostatik pada motor induksi tiga fasa.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Magnetostatik

Magnetostatik adalah studi tentang medan magnet pada suatu sistem dimana arusnya yang stabil (tidak berubah terhadap waktu). Persamaan magnetostatik dapat digunakan untuk memprediksi peristiwa perubahan medan magnet yang cepat yang terjadi pada skala waktu nanodetik atau kurang. Sehingga magnetostatik merupakan pendekatan yang baik ketika arus tidak statis atau selama arus tidak bergantian dengan cepat. Magnetostatik banyak digunakan dalam aplikasi mikromagnetik seperti model perangkat pengukur medan magnet.^[1]

1. Fluks Magnet

Fluks magnet (sering disimbolkan Φ_m), adalah ukuran atau jumlah medan magnet B yang melewati luas penampang tertentu, misalnya kumparan kawat (hal ini sering pula disebut "kerapatan medan magnet"). Satuan fluks magnet dalam satuan internasional adalah weber (Wb) yang merupakan satuan turunan dari volt-detik.

Fluks magnet yang melalui bidang tertentu sebanding dengan jumlah medan magnet yang melalui bidang tersebut. Jumlah ini termasuk pengurangan atas

medan magnet yang berlawanan arah. Jika medan magnet seragam melalui bidang dengan tegak lurus, maka nilai fluks magnet didapat dari perkalian antara medan magnet dan luas bidang yang dilaluinya. Fluks magnet yang datang dengan sudut tertentu diperoleh dengan menggunakan perkalian titik antara medan magnet dan vektor luas A .

$$\Phi_m = B \cdot A = B \cdot A \cos \theta \quad (1)$$

diamana θ adalah sudut datang B menurut vektor A (vektor A adalah vektor normal, yaitu tegak lurus dengan bidang).

Umumnya, fluks magnet yang melalui bidang S dinyatakan sebagai integral dari medan magnet atas luas bidang.

$$\Phi_m = \iint_S B \cdot dS \quad (2)$$

di mana Φ_m adalah fluks magnet, B adalah medan magnet, dan S adalah luas bidang. Tanda "." menunjukkan operasi perkalian titik, dan dS adalah vektor *infinitesimal* (kecil tak berhingga), yang magnitudonya adalah elemen luas diferensial dari S , yang arahnya adalah tegak lurus dengan bidang. ^[2]

2. Kerapatan Fluks Magnet

Kerapatan fluks magnet adalah fluks magnet per satuan luas pada bidang yang tegak lurus dengan fluks magnet tersebut. Kerapatan fluks magnet dapat dinyatakan dengan:

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (3)$$

Dimana B adalah kerapatan fluks magnet dalam Weber/m² (Wb/ m²) atau Tesla (T), Φ adalah fluks magnet dalam Weber (Wb), A = luas penampang dalam meter persegi (m²).

Kerapatan fluks magnet B di dalam ruang hampa didefinisikan sebagai

$$B = \mu_0 H \quad (4)$$

Konstanta μ_0 bukan merupakan besaran tanpa dimensi, dan memiliki sebuah nilai yang terdefinisi untuk ruang hampa, yang dinyatakan dalam satuan henry per meter (H/m), yaitu

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (5)$$

Yang disebut sebagai permeabilitas ruang hampa. Dan H yang menyatakan kuat medan magnet dalam satuan ampere per meter.^[3]

3. Permeabilitas

Permeabilitas (*permeability*) adalah kemampuan suatu benda untuk dilewati garis gaya magnet. Permeabilitas dinyatakan dengan simbol μ (myu). Benda yang mudah dilewati garis gaya magnet disebut memiliki permeabilitas tinggi. Untuk menentukan besarnya permeabilitas suatu benda ditentukan dengan perbandingan terhadap udara atau ruang hampa, didapatkan permeabilitas relatif (*relative permeability*). Nilai permeabilitas untuk udara adalah $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ atau 1,26 x

10^{-6} . Untuk menghitung μ , nilai permeabilitas relatif μ_r harus dikalikan dengan permeabilitas udara μ_0 , sebagaimana rumus di bawah ini.^[3]

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (6)$$

Tabel. 2.1. Nilai Permeabilitas relatif μ_r beberapa bahan.^[3]

Bahan	μ_r	Bahan	μ_r
Bismut	0,9999986	Khlorida Nikel	1,00004
Paraffin	0,9999942	Sulfat Mangan	1,0001
Kayu	0,9999995	Nikel	50
Perak	0,9999981	Besi tuang	60
Aluminium	1,00000065	Kobalt	60
Berlium	1,00000079	Besi bubuk	100
Ferit (tipikal)	1000	Baja mesin	300
Permaloy 45	2500	Mumetal	20000
Besi Trafo	3000	Sendust	30000
Besi silicon	3500	Supermaloy	100000
Besi (murni)	4000		

4. Persamaan – Persamaan Medan Magnetostatik

Medan magnetostatik berada di dalam dan diluar konduktor dan di sekeliling magnet permanen. Medan magnetostatik merupakan *source-free*, karena tidak ada muatan magnet, sehingga

$$\nabla \cdot B(r) = 0 \quad (7)$$

Medan magnetostatik disebabkan oleh perpindahan muatan atau persamaan arus searah (*vortices*) dengan suatu kerapatan putaran.

$$\nabla \times H(r) = J_c(r) \quad (8)$$

Dalam daerah tanpa arus, di luar atau diantara konduktor, medan magnetostatik merupakan *vortex-free* dan *source-free*. Medan magnetostatik diatur oleh suatu sistem persamaan berikut.

Tabel 2.2. Persamaan medan magnetostatik^[4]

Persamaan medan magnetostatik	
Bentuk Integral	Bentuk diferensial
$\oint_C H \cdot dr = I$ $\oint_S B \cdot dS = 0$	$\nabla \times H = J$ $\nabla \cdot B = 0$
$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$	$\nabla^2 \varphi_m = 0$ $\nabla^2 A = -\mu J$

Perhitungan medan magnetostatik diselesaikan secara langsung dengan hukum ampere atau secara tidak langsung melalui suatu fungsi besaran skalar $\varphi_m(r)$ atau suatu fungsi besaran vektor $A(r)$ dan turunan selanjutnya.

$$H = -grad \varphi_m \text{ dan } B = \mu H = \nabla \times A \quad (9)$$

Fungsi besaran skalar dievaluasi baik dari suatu distribusi arus ataupun dari persamaan besaran skalar $\nabla^2 \varphi_m = 0$ (diterapkan hanya diluar konduktor). Fungsi besaran vektor $A(r)$ (besaran vektor magnet) dievaluasi baik dari suatu distribusi arus yang diberikan ataupun dari persamaan besaran vektor medan magnet.

Bahasan selanjutnya dimulai dengan membahas bentuk integral dari hukum ampere.

$$\oint_C H \cdot dr = I = \oint_S J \cdot dS \quad (10)$$

Dengan menggunakan pemikiran yang sama seperti yang dilakukan pada hukum induksi faraday dapat diambil batas dari perbandingan *vortex strength* pada area permukaan dan diperoleh :

$$\nabla \times H = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} n_{\Delta S} \frac{\oint H \cdot dr}{\Delta S} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} n_{\Delta S} \frac{\oint_{\Delta S} J \cdot dS}{\Delta S} = J \quad (11)$$

$$\nabla \times H = J \quad (12)$$

Pada setiap titik medan, *vortex density* sama dengan total kerapatan arus lokal. Secara formal dianalogikan dengan komponen medan listrik yang memberikan hasil

$$\nabla \times H = \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) a_x + \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) a_y + \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) a_z \quad (13)$$

Selain itu, semua pernyataan lain yang dibuat pada akhir bagian sebelumnya menerapkan cara yang hampir sama pada kerapatan vortex dari medan magnet.

Untuk meringkasnya, dapat dinyatakan bahwa sisi kiri dari kedua persamaan diferensial sebagian untuk kerapatan vortex dari medan listrik dan magnet vortex memiliki pengaruh yang sama besar. Dan pengertian ini juga dijumpai pada bentuk yang sama pada beberapa disiplin. Secara umum medan vektor X :

$$\text{curl } X = \nabla \times X \left\{ \begin{array}{l} \text{kerapatan vortex} \\ \text{curl} \\ \text{vorticity} \\ \text{rot} \end{array} \right\} \quad (14)$$

Fungsi $X(x,y,z)$ menjelaskan suatu medan vektor dan kemudian dilakukan curl pada fungsi X tersebut. Jika hasilnya identik dengan nol sepanjang ruang medan vektor X maka fungsi tersebut adalah *vortex-free*, dengan kata lain, X adalah suatu *source field*. Pernyataan $\text{curl } X(x_v, y_v, z_v) = 0$ mengindikasikan bahwa medan tertentu di titik $P(x_v, y_v, z_v)$ adalah *vortex-free*.

Selain itu, $\text{curl } X = 0$ pada suatu medan tertentu di titik $P(x_v, y_v, z_v)$ atau di dalam suatu daerah yang terbatas tidak perlu menunjukkan bahwa suatu *source field* sebagai ganti dari suatu *vortex field*, hanya saja daerah yang dipertimbangkan tidak bermuatan *vortices*. Jika suatu masalah tidak menandakan suatu *source field* $X_s(r)$ murni maka $\text{curl } X_s(r) = 0$.

Selanjutnya bentuk integral dari hukum gauss untuk medan magnet.

$$\oint_S B \cdot dS = 0 \quad (15)$$

Persamaan ini mengklaim bahwa di dalam suatu medan magnet banyaknya garis fluks yang masuk dan keluar suatu permukaan tertutup adalah sama. Ini

menunjukkan bahwa garis fluks yang melalui suatu permukaan tertutup adalah selalu nol. Permukaan tertutup tidak mengandung sumber medan magnet. Garis-garis medan magnet adalah solenoidal, dengan kata lain, tidak ada muatan magnet monopole dari garis-garis medan dalam segala arah.

Jika ada yang berniat untuk menunjukkan tidak adanya suatu sumber pada suatu titik tertentu dari suatu medan magnet, diperbolehkan untuk memperkecil volume sampai nol, maka berbagai kesulitan yang sama akan muncul seperti pada bagian sebelumnya. Oleh karena itu, dibentuk lagi perbandingan fluks terhadap volume dan menentukan limitnya ΔV mendekati nol. Kemudian didapat hasil untuk *source density* atau divergensi dari medan magnet.

$$\nabla \cdot B = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\oint_{\Delta S} B \cdot dS}{\Delta V} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{0}{\Delta V} = 0 \quad (16)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (17)$$

Dalam bentuk koordinat kartesian diperoleh

$$\nabla \cdot B = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

Divergensi $\nabla \cdot B$ dari medan magnet selalu sama dengan nol. Medan magnet adalah *source-free*; garis-garis medan magnet adalah solenoidal.^[4]

B. Motor Induksi Tiga Fasa

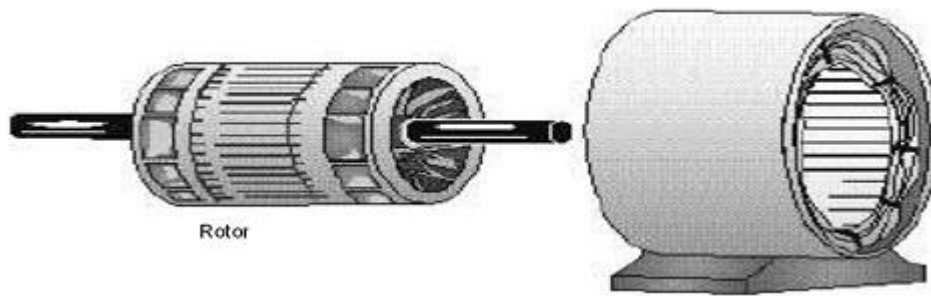
Motor induksi merupakan motor arus bolak – balik (AC) yang paling banyak digunakan karena kesederhanaannya, konstruksinya yang kuat dan karakteristik kerjanya yang baik. Motor induksi terdiri dari dua bagian : stator atau bagian yang diam dan rotor atau bagian yang berputar, dimana kedua bagian ini dipisahkan oleh celah udara. Bagian stator dihubungkan ke catu tegangan bolak-balik (AC), sedangkan bagian rotor tidak dihubungkan secara listrik ke pencatu tegangan tetapi mempunyai arus yang diinduksikan ke dalamnya oleh kerja transformator dari stator. Oleh sebab itu, stator kadang-kadang dianggap sebagai primer dan rotor sebagai sekunder motor.^[5]

Motor induksi tiga fasa berputar pada kecepatan yang pada dasarnya adalah konstan, mulai dari tidak berbeban sampai mencapai keadaan beban penuh. Kecepatan putaran motor ini 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.^[6]

1. Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa

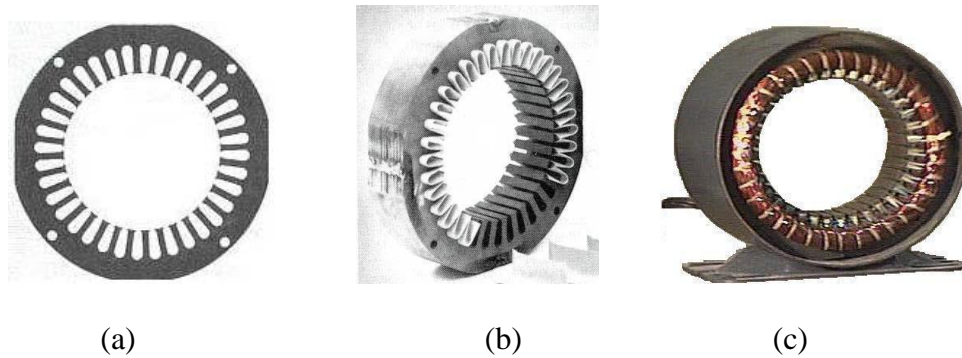
Motor induksi terdiri dari dua bagian utama, yaitu stator atau bagian yang diam dan rotor atau bagian yang berputar. Terdapat dua tipe motor induksi tiga fasa yaitu motor induksi sangkar tupai (*squirrel-cage motor*) dan motor rotor-lilitan

(*wound-rotor motor*). Sebagaimana terlihat pada gambar 2.1. Kedua motor tersebut bekerja pada prinsip dasar yang sama dan mempunyai konstruksi stator yang sama tetapi berbeda dalam konstruksi rotor.^[5]



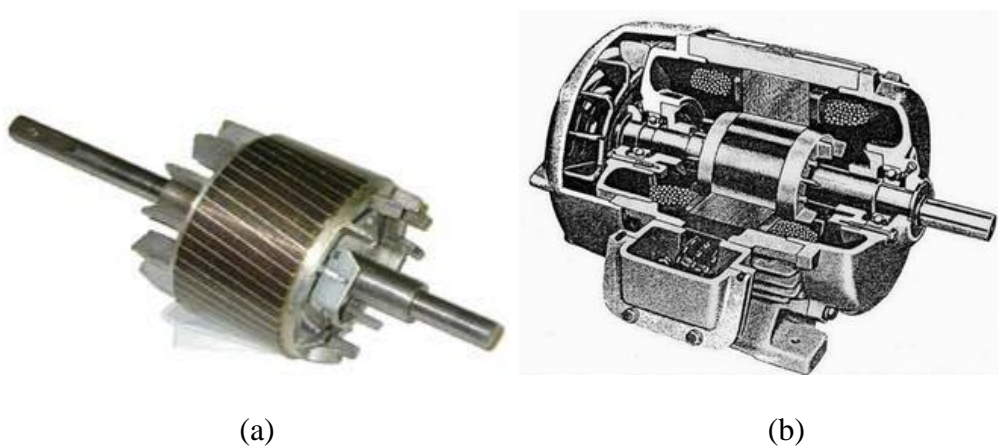
Gambar 2.1. Penampang rotor dan stator motor induksi.^[6]

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 (Gambar 2.2.(b)). Tiap elemen laminasi inti dibentuk dari lembaran besi (Gambar 2.2.(a)). Tiap lembaran 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° . Kawat kumparan yang digunakan terbuat dari tembaga yang dilapis dengan isolasi tipis. Kemudian tumpukan inti dan belitan stator diletakkan dalam cangkang silindris (Gambar 2.2.(c)). Berikut ini contoh lempengan laminasi inti, lempengan inti yang telah disatukan, belitan stator yang telah dilekatkan pada cangkang luar untuk motor induksi tiga fasa.^[6]



Gambar 2.2. Komponen stator motor induksi tiga fase.^[6]
 (a) Lempengan inti (b) Tumpukan inti dengan kertas isolasi pada beberapa alurnya (c) Tumpukan inti dan kumparan dalam cangkang stator.

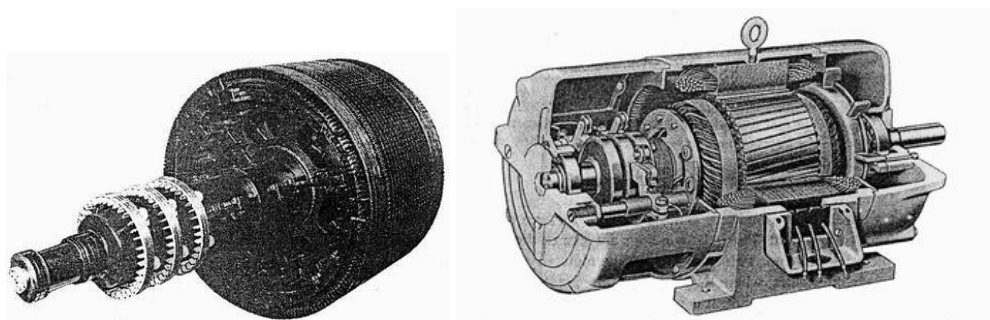
Rotor dari motor sangkar-tupai adalah rotor dengan konstruksi yang tersusun dari inti berlapis dengan konduktor yang dipasangkan paralel, atau kira-kira paralel dengan poros dan mengelilingi permukaan inti. Konduktornya tidak terisolasi dari inti, karena arus rotor secara alamiah akan mengalir melalui tahanan yang paling kecil, yaitu konduktor rotor. Pada setiap ujung rotor, konduktor rotor semuanya dihubungkan dengan cincin-ujung. Konduktor rotor dan cincin-ujung serupa dengan sangkar-tupai yang berputar sehingga dinamakan demikian.



Gambar 2.3. (a) Rotor sangkar. (b) Konstruksi motor induksi rotor sangkar.^[6]

Batang rotor dan cincin-ujung motor sangkar-tupai yang lebih kecil adalah coran tembaga atau aluminium dalam satu lempeng pada inti rotor. Dalam motor yang lebih besar, batang rotor tidak dicor melainkan ditenamkan ke dalam alur rotor dan kemudian dilas dengan kuat ke cincin-ujung. Batang rotor motor sangkar-tupai tidak selalu ditempatkan parallel terhadap poros motor tetapi kerap kali dimiringkan. Hal ini menghasilkan torsi yang lebih seragam dan juga mengurangi derau dengung magnetik sewaktu motor sedang berputar.

Motor rotor-lilitan atau motor cincin-slip berbeda dengan motor sangkar-tupai dalam hal konstruksi rotornya. Seperti namanya, rotor dililit dengan lilitan terisolasi serupa dengan lilitan stator. Lilitan fase rotor dihubungkan secara Y dan masing-masing fase ujung terbuka dikeluarkan ke cincin-slip yang terpasang pada poros rotor. Motor rotor-lilitan kurang banyak digunakan dibanding dengan motor sangkar-tupai karena harganya mahal dan biaya pemeliharaannya lebih besar.^[5]



(a)

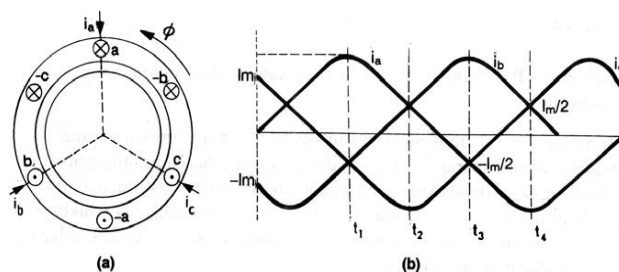
(b)

Gambar 2.4. (a) Rotor belitan.
(b) Konstruksi motor induksi tiga fasa dengan rotor belitan.^[6]

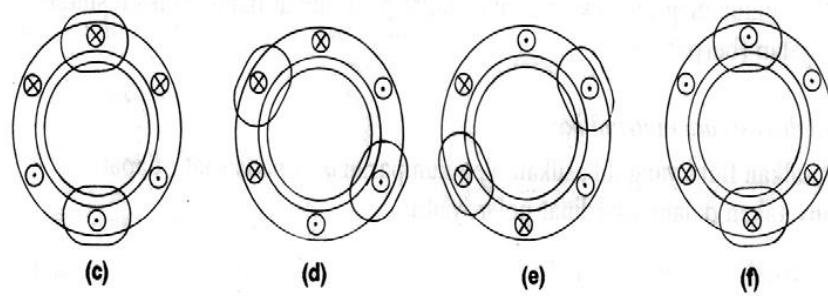
2. Medan Magnetik Putar

Perputaran motor pada mesin arus bolak – balik ditimbulkan oleh adanya medan putar (fluks yang berputar) yang dihasilkan dalam kumparan statornya. Medan putar ini terjadi apabila kumparan stator dihubungkan dalam fasa banyak, umumnya fasa 3. Hubungan dapat berupa hubungan bintang atau delta. Misalkan kumparan $a - a$; $b - b$; $c - c$ dihubungkan 3 fasa, dengan beda fasa masing – masing 120° (Gambar 2.5. (a)) dan dialiri arus sinusoidal. Distribusi arus i_a , i_b , i_c sebagai fungsi waktu adalah seperti Gambar 2.5. (b). Pada keadaan t_1 , t_2 , t_3 , dan t_4 , fluks resultan yang ditimbulkan oleh kumparan tersebut masing – masing adalah seperti Gambar 2.6. (c), (d), (e), dan (f).

Pada t_1 fluks resultan mempunyai arah sama dengan arah fluks yang dihasilkan oleh kumparan $a - a$; sedangkan pada t_2 , fluks resultannya mempunyai arah sama dengan arah fluks yang dihasilkan oleh kumparan $c - c$; dan untuk t_3 fluks resultan mempunyai arah sama dengan fluks yang dihasilkan oleh kumparan $b - b$. Untuk t_4 , fluks resultannya berlawanan arah dengan fluks resultan yang dihasilkan pada saat t_1 keterangan ini akan lebih jelas pada analisa vektor.



Gambar 2.5.(a) Diagram phasor fluksi tiga fasa.(b) Arus tiga fasa setimbang.^[6]



Gambar 2.6. Medan putar pada motor induksi tiga phase.^[6]

Dari gambar 2.6. *c, d, e,* dan *f* tersebut terlihat fluks resultan ini akan berputar satu kali. Oleh karena itu untuk mesin dengan jumlah kutub lebih dari dua, kecepatan sinkron dapat diturunkan sebagai berikut :

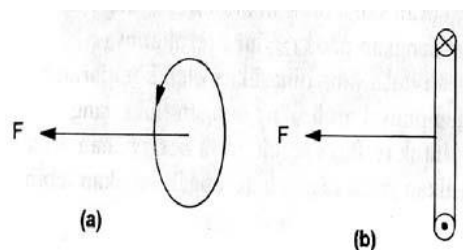
$$n_s = \frac{120f}{p} \text{ (rpm) ,} \quad (19)$$

dimana, f = frekuensi (Hz)

p = jumlah kutub

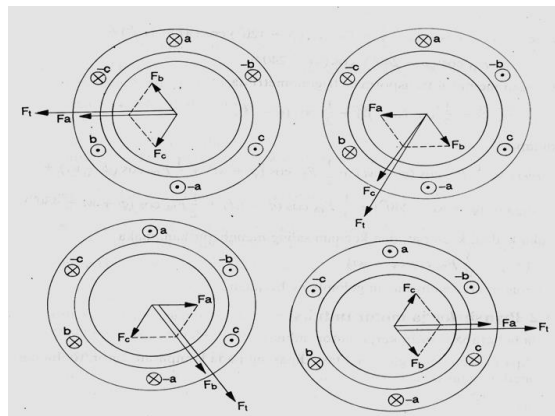
Analisis secara vektor didapatkan atas dasar :

1. Arah fluks yang ditimbulkan oleh arus yang mengalir dalam suatu lingkaran sesuai dengan perputaran sekrup (Gambar 2.7).



Gambar 2.7. Arah fluks yang ditimbulkan oleh arus yang mengalir dalam suatu lingkaran.^[6]

2. Kebesaran fluks yang ditimbulkan ini sebanding dengan arus yang mengalir. Notasi yang dipakai untuk menyatakan positif atau negatifnya arus yang mengalir pada kumparan $a - a$, $b - b$, dan $c - c$ pada Gambar 2.5. (a) yaitu: harga positif, apabila tanda silang (\otimes) terletak pada pangkal konduktor tersebut (titik a , b , c), sedangkan negatif apabila tanda titik (\odot) terletak pada pangkal konduktor tersebut (Gambar 2.6). Maka diagram vektor untuk fluks total pada keadaan t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Diagram vektor untuk fluks total pada keadaan t_1 , t_2 , t_3 , t_4 . Dari semua diagram vektor di atas dapat pula dilihat bahwa fluks resultan berjalan (berputar).^[6]

3. Prinsip Kerja

Pada saat terminal tiga fasa stator motor induksi diberi suplai tegangan tiga fasa setimbang, maka akan mengalir arus pada konduktor di setiap belitan fasa stator dan akan menghasilkan fluksi bolak-balik. Amplitude fluksi per fasa yang dihasilkan berubah secara sinusoidal dan menghasilkan fluksi resultan (medan putar) dengan magnitude yang nilainya konstan yang berputar dengan kecepatan sinkron.

Medan putar akan terinduksi melalui celah udara menghasilkan ggl induksi (ggl lawan) pada belitan fasa stator sebesar :

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (20)$$

$$E_1 = 4,44 f_1 N_1 \phi_m \quad (21)$$

Dimana, e_1 = ggl induksi sesaat stator/fasa (Volt)

E_1 = ggl induksi efektif stator/fasa (Volt)

f_1 = frekuensi saluran (Hz)

N_1 = jumlah lilitan kumparan stator/fasa

ϕ_m = fluks magnetic maksimum (Weber)

Medan putar tersebut juga akan memotong konduktor-konduktor belitan rotor yang diam sebagaimana terlihat pada gambar 2.9. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan relatif antara kecepatan fluksi yang berputar dengan konduktor rotor yang diam, yang disebut juga dengan slip (s).

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (22)$$

Akibat adanya slip, maka ggl (gaya gerak listrik) akan terinduksi pada konduktor-konduktor rotor sebesar :

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (23)$$

$$E_2 = 4,44 f_2 N_2 \phi_m \quad (24)$$

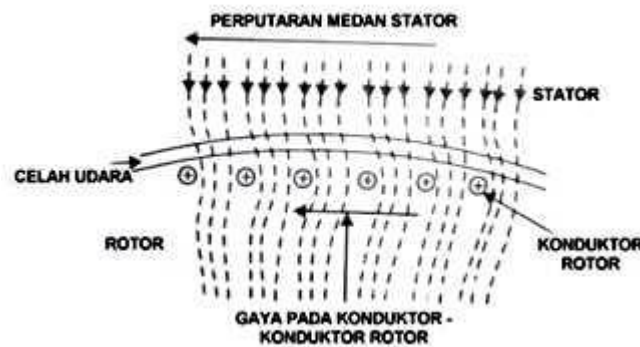
Dimana, $e_2 =$ ggl induksi sesaat rotor diam/fasa (Volt)

$E_2 =$ ggl induksi efektif rotor diam/fasa (Volt)

$f_2 =$ frekuensi arus rotor (Hz)

$N_2 =$ jumlah lilitan kumparan rotor/fasa

$\Phi_m =$ fluks magnetic maksimum (Weber)



Gambar 2.9 Proses induksi medan putar stator pada kumparan rotor.^[6]

Karena belitan rotor merupakan rangkaian tertutup, baik melalui cincin ujung ataupun tahanan luar, maka arus akan mengalir pada konduktor-konduktor rotor. Karena konduktor-konduktor rotor yang mengalirkan arus ditempatkan di dalam daerah medan magnet yang dihasilkan stator, maka akan terbentuklah gaya mekanik (gaya Lorentz) pada konduktor-konduktor rotor. Hal ini sesuai dengan hukum gaya Lorentz. Yaitu bila suatu konduktor yang dialiri arus berada dalam suatu kawasan medan magnet, maka konduktor tersebut akan mendapat gaya elektromagnet (gaya Lorentz) sebesar :

$$F = B \cdot i \cdot l \cdot \sin \theta \quad (25)$$

Dimana, F = gaya yang bekerja pada konduktor (Newton)

B = kerapatan fluks magnetik (Wb/m^2)

i = besar arus pada konduktor (A)

l = panjang konduktor (m)

θ = sudut antara konduktor dan vector kerapatan fluks magnetik

Gaya F ini adalah hal yang sangat penting karena merupakan dasar dari bekerjanya suatu motor listrik. Arah dari gaya elektromagnetik tersebut dapat dijelaskan oleh kaidah tangan kanan. Kaidah tangan kanan menyatakan, jika jari telunjuk menyatakan arah dari vektor arus i dan jari tengah menyatakan arah dari vektor kerapatan fluks B , maka ibu jari akan menyatakan arah gaya F yang bekerja pada konduktor tersebut. Gaya F yang dihasilkan pada konduktor-konduktor rotor tersebut akan menghasilkan torsi (τ). Bila torsi mula yang dihasilkan pada rotor lebih besar daripada torsi beban ($\tau_0 > \tau_b$), maka rotor akan berputar searah dengan putaran medan putar stator.

Seperti yang telah disebutkan di atas, motor akan tetap berputar bila kecepatan medan putar lebih besar daripada kecepatan putaran rotor ($n_s > n_r$). Apabila $n_s = n_r$, maka tidak ada perbedaan relatif antara kecepatan medan putar (n_s) dengan putaran rotor (n_r), atau dengan kata lain slip (s) adalah nol. Hal ini menyebabkan tidak adanya ggl terinduksi pada kumparan rotor sehingga tidak ada arus yang mengalir, dengan demikian tidak akan dihasilkan gaya yang dapat menghasilkan kopel untuk memutar rotor.^[6]

III. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Pengerjaan tugas akhir ini bertempat di Laboatorium Terpadu Teknik Elektro Universitas Lampung pada bulan November 2012 sampai dengan Desember 2015.

B. Alat dan Bahan

Adapun peralatan dan bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Motor induksi tiga fasa sebagai objek penelitian.
2. Perangkat lunak Ansys 13.0.
3. Perangkat komputer.

C. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan terhadap motor induksi tiga fasa dengan jenis rotor sangkar tupai dan menggunakan tipe belitan jerat pada belitan statornya, kemudian memodelkannya dan mensimulasikannya menggunakan perangkat lunak Ansys berbasis metode elemen hingga (*Finite Element Method*). Metode ini merupakan sebuah cara umum untuk memecahkan persamaan diferensial, dikembangkan oleh para insinyur bangunan untuk analisa tegangan dan regangan dalam sistem kompleks.

Solusi masalah teknik elektro menggunakan metode elemen hingga diperkenalkan pada tahun 1960. Sedangkan aplikasinya dimulai pada tahun 1965. Barulah pada tahun 1968 metode ini mulai digunakan pada pemecahan soal – soal medan elektromagnetik. Metode elemen hingga menyediakan pemecahan di sebuah susunan titik –titik kisi dalam daerah yang ditinjau dan sangat sesuai untuk daerah yang batasnya memiliki bentuk yang tidak teratur.

Dasar dari metode elemen hingga adalah membagi area kerja menjadi elemen – elemen kecil yang jumlahnya berhingga sehingga dapat dihitung reaksi akibat beban pada kondisi batas yang diberikan. Dari elemen – elemen tersebut, dapat disusun persamaan – persamaan matrik yang dapat diselesaikan secara numerik dan hasilnya menjadi jawaban dari kondisi beban yang diberikan pada area kerja tersebut. Pemilihan jenis elemen segitiga untuk membagi area kerja menjadi elemen – elemen kecil sangat cocok digunakan dalam lingkup area dua dimensi. Penggunaan elemen segitiga sendiri digunakan karena untuk area dengan bentuk yang tidak teratur, batasnya dapat dilakukan pendekatan yang lebih baik.^[7]

Tipe masalah yang dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga terbagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok analisis struktur dan kelompok analisis non-struktur. Tipe permasalahan struktur meliputi analisa tegangan/stress, buckling dan analisis getaran. Sedangkan tipe permasalahan non-struktur meliputi perpindahan panas, perpindahan massa, mekanika fluida, distribusi potensial listrik dan potensial magnet, dan elektromagnetik.^[8]

Prosedur pemecahan menggunakan metode elemen hingga terdiri dari empat langkah, yaitu:

1. Mendeskritisasi daerah yang ditinjau menjadi elemen-elemen hingga.
2. Menurunkan persamaan pengatur masing-masing elemen hingga.
3. Menghubungkan masing-masing elemen hingga menjadi rangkaian elemen-elemen.
4. Penyelesaian sistem persamaan-persamaan.

Pada penggunaannya, secara umum perangkat lunak berbasis metode elemen hingga memiliki tiga tahapan utama yakni :

2. *Preprocessing*, pada tahap ini pengguna membuat model yang menjadi bagian untuk dianalisis yang mana geometri tersebut dibagi-bagi menjadi sub-bagian-sub-bagian yang terdiskritisasi atau disebut elemen dihubungkan pada titik diskritisasi yang disebut *node*. *Node* tertentu akan ditetapkan sebagai bagian melekat yang kaku (*fix displacement*) dan bagian lain ditentukan sebagai bagian kena beban (*load*).
3. *Analysis*, pada tahap ini data-data yang dimasukkan pada tahap pre-processing sebelumnya akan digunakan sebagai input pada *code* elemen hingga untuk membangun dan menyelesaikan sistem aljabar linier atau non linier.
4. *Post-processing*, menampilkan hasil akhir setelah penganalisisan oleh modul penganalisis dengan menampilkan data *displacement* dan tegangan pada posisi bagian yang terdiskritisasi pada model geometri. *Post-processing* biasanya menampilkan grafis dengan kontur warna yang menggambarkan tingkatan tegangan yang terjadi pada model geometri.^[9]

Kelebihan dan kekurangan dalam penggunaan elemen hingga.

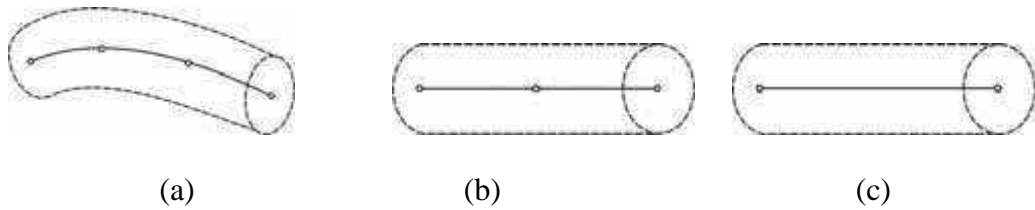
1. Benda dengan bentuk yang tidak teratur dapat dengan mudah dianalisa.
2. Tidak terdapat kesulitan dalam menganalisa beban pada suatu struktur.
3. Pemodelan dari suatu benda dengan komposisi materi yang berlainan dapat dilakukan karena tinjauan yang dilakukan secara individu untuk setiap elemen.
4. Dapat menangani berbagai macam syarat batas dalam jumlah yang tak terbatas.
5. Variasi dalam ukuran elemen memungkinkan untuk memperoleh detail analisa yang diinginkan.
6. Dapat memecahkan masalah-masalah dinamik (*time dependent*).

Kekurangan yang terdapat dalam penggunaan metode ini adalah diperlukannya komputer sebagai sarana hitung yang lebih cepat dan akurat.^[8]

Terdapat berbagai tipe bentuk elemen dalam metode elemen hingga yang dapat digunakan untuk memodelkan kasus yang akan dianalisis, yaitu :

1. Elemen satu dimensi

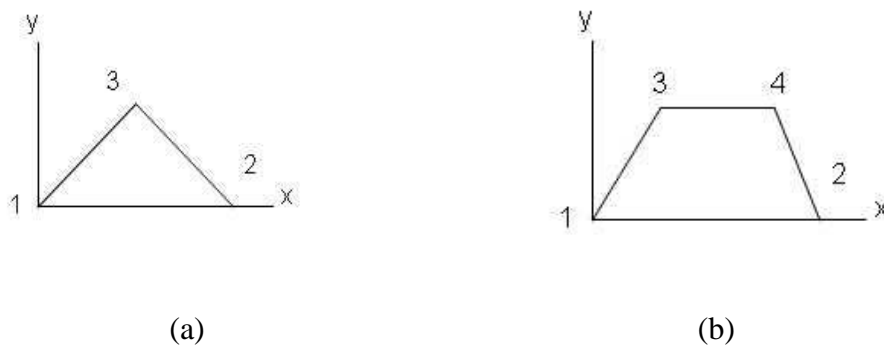
Elemen satu dimensi terdiri dari garis (*line*). Tipe elemen ini yang paling sederhana, yakni memiliki dua titik *nodal*, masing-masing pada ujungnya, disebut elemen garis linier. Dua elemen lainnya dengan orde yang lebih tinggi, yang umum digunakan adalah elemen garis kuadratik dengan tiga titik *nodal* dan elemen garis kubik dengan empat buah titik *nodal*.



Gambar 3.1. Elemen satu dimensi : (a) Kubik ; (b) Kuadratik ; (c) Linier. ^[10]

2. Elemen dua dimensi

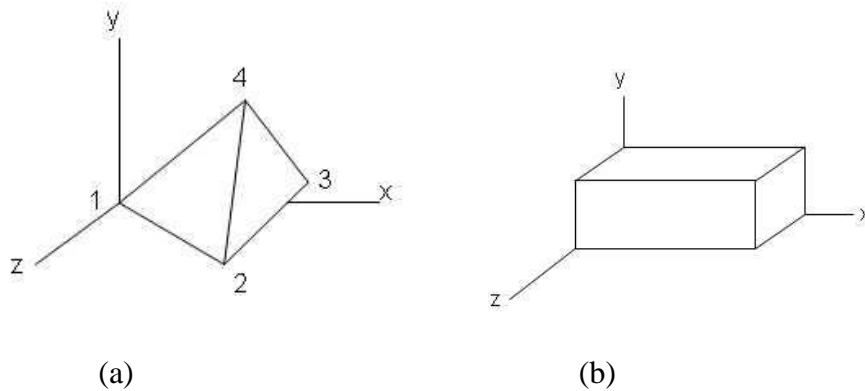
Elemen dua dimensi terdiri dari elemen segitiga (*triangle*) dan elemen segiempat (*quadrilateral*). Elemen orde linier pada masing-masing tipe ini memiliki sisi berupa garis lurus, sedangkan untuk elemen dengan orde yang lebih tinggi dapat memiliki sisi berupa garis lurus, sisi yang berbentuk kurva ataupun dapat pula berupa kedua-duanya.



Gambar 3.2. Elemen dua dimensi : (a) Segitiga; (b) Segiempat. ^[10]

3. Elemen tiga dimensi

Elemen tiga dimensi terdiri dari elemen *tetrahedron*, dan elemen balok seperti terlihat pada gambar berikut : ^[10]



Gambar 3.3. Elemen tiga dimensi: (a) Tetrahedron; (b) Elemen Balok.^[10]

D. Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan dengan cara sebagai berikut:

1. Pengumpulan Data – Data Pendukung

Pengumpulan data – data pendukung analisis berupa data teknis, propertis, dan geometri hasil pemodelan motor induksi tiga fasa. Objek penelitian adalah motor induksi tiga fasa dengan jenis rotor sangkar tupai dan tipe belitan jerat pada belitan statornya. Pada penelitian ini dibuat berbagai model motor induksi tiga fasa dengan jumlah slot belitan yang berbeda yaitu 36 slot, 24 slot dan 12 slot.

2. Preprocessing

Dalam tahap ini dilakukan pemodelan yang geometrinya akan didiskritisasi menjadi elemen – elemen yang akan digunakan untuk analisis. Proses preprocessing terbagi menjadi beberapa tahapan sebagai berikut :

a. Pemodelan

Tahapan pemodelan dapat dilakukan dengan menggunakan *software CAD* kemudian di *import* pada jendela simulasi *software Ansys*.

b. Meshing

Tahapan meshing dilakukan pada komponen – komponen yang akan disimulasi dengan menggunakan *sizing*. Option ini dipilih karena dapat menentukan besarnya mesh menyesuaikan dengan geometri.

3. Analisis

Pada tahap ini data-data yang dimasukkan pada tahap preprocessing sebelumnya akan digunakan sebagai *input code* elemen hingga untuk membangun dan menyelesaikan persamaan aljabar linier dan non linier. Objek yang telah dimodelkan, dapat disimulasikan menggunakan *software Ansys* dengan cara meng-*import* filenya ke lembar kerja *software* tersebut.

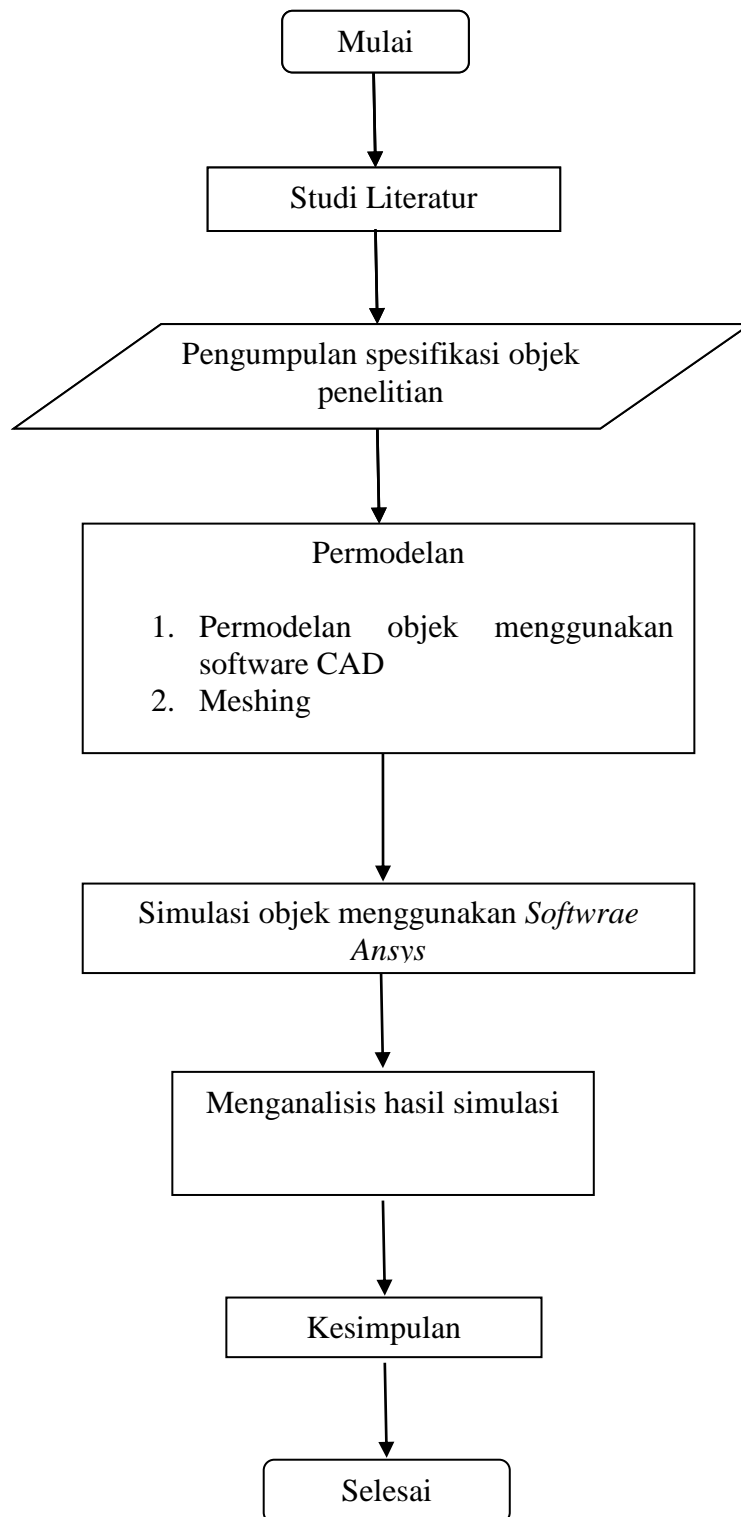
4. Post-processing

Menampilkan hasil akhir penganalisan oleh modul penganalisis dengan menampilkan data distribusi dan nilai kerapatan fluks magnet berupa visualisasi dalam bentuk kontur permukaan dan arah distribusi kerapatan fluks magnet.

5. Analisis Hasil Simulasi

Hasil simulasi yang diperoleh berupa distribusi kerapatan fluks magnet pada motor induksi tiga fasa, kemudian dibandingkan dengan hipotesa awal, menganalisisnya dan menarik kesimpulan dari penelitian yang dilakukan.

E. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.4. Diagram alir.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dan hasil penelitian yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa :

1. Nilai total kerapatan fluks magnet B maksimum terjadi pada bagian stator motor induksi tiga fasa yang dimodelkan.
2. Dari ketiga model motor induksi yang disimulasikan, nilai kerapatan fluks magnet terbesar terjadi pada model motor induksi tiga fasa dengan konstruksi stator 36 slot.
3. Arah pergerakan medan magnet sesuai dengan kaidah tangan kanan.
4. Terdapat pengulangan tiap setengah cycle gelombang dari frekuensi listrik yang digunakan.

B. Saran

Penelitian ini membahas simulasi Magnetostatik pada motor induksi tiga fasa menggunakan Ansys 13 berbasis Metode Elemen Hingga. Penelitian terkait dengan simulasi magnetostatik pada motor induksi untuk kedepannya dapat menggunakan perangkat lunak dan metode lainnya seperti comsol multiphysic dan *finite difference methode*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Magnetostatics. (Oktober 2015) available at :
<https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetostatics>. Diakses pada 29 Desember 2015.
- [2] Fluks Magnetik. (Januari 2016) available at :
https://id.wikipedia.org/wiki/Fluks_magnetik. Diakses pada 29 Desember 2015.
- [3] Hayt, H. William. Buck, A. John. 2006. *Engineering Electromagnetics. Seventh Edition*. Alih bahasan oleh irzami harmaein, s.T.2006.
Elektromagnetika. Edisi ke tujuh, Erlangga. Jakarta.
- [4] Schwab, Adolf. 1988. *Field Theory Concepts*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg.
- [5] Lister, Eugene C. 1984. *Electric Circuit And Machines*. McGraw Hill. New York.
- [6] Motor Induksi Tiga Fasa. (2010). Available at :
<http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/28692/3/Chapter%20II.pdf>. Diakses pada 2 Juni 2015.
- [7] Rao, Narayana, Nannapaneni. 2000. *Element of Engineering Electromagnetic. fifth Edition*. alih bahasa oleh Prof. Pantur Silaban,

- Ph.D.2001. Elemen-elemen Elektromagnetika Teknik. Edisi kelima jilid 2. Erlangga. Jakarta.
- [8] Susatio, Yerri. 2004. Dasar-dasar Metode Elemen Hingga. Edisi I. Andi. Yogyakarta.
- [9] Roylance, David. 2001. Finite Element Analysis. Cambridge, MA 02139.
- [10] Ramadhan, Rahmat. 2012. Analisis Thermal dan Pegangan Pada Perancangn Bejana Tekan untuk Limbah Kelapa Sawit dengan Kapasitas 10000Ton per Bulan. Universitas Lampung : Bandarlampung.