



UNIVERSITAS INDONESIA

**METODE PERHITUNGAN EFISIENSI MOTOR INDUKSI
YANG SEDANG BEROPERASI**

SKRIPSI

**RIZAL ANGGA GHAZALI
07 06 26 7950**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**METODE PERHITUNGAN EFISIENSI MOTOR INDUKSI
YANG SEDANG BEROPERASI**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**RIZAL ANGGA GHAZALI
07 06 26 7950**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS

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



Nama : Rizal Angga Ghazali
NPM : 0706267950
Tanda tangan :
Tanggal : 24 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Rizal Angga Ghazali
NPM : 0706267950
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Metode Perhitungan Efisiensi Motor Induksi Yang
Sedang Beroperasi

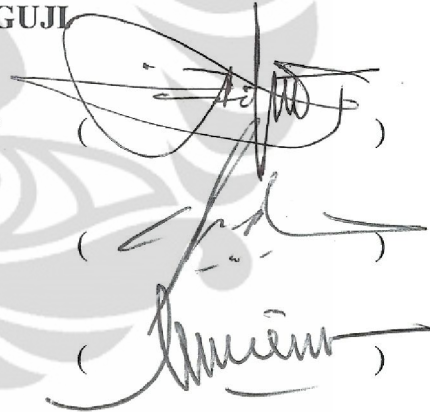
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Ridwan Gunawan, M.T

Penguji : Ir. I Made Ardita Y, M.T

Penguji : Ir. Amien Rahardjo, M.T



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 24 Juni 2011

LEMBAR PERSETUJUAN

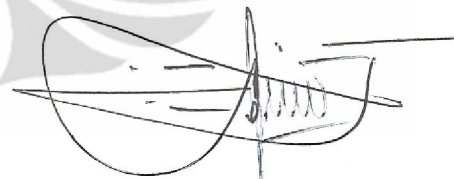
Skripsi dengan judul :

METODE PERHITUNGAN EFISIENSI MOTOR INDUKSI YANG SEDANG BEROPERASI

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam sidang ujian Skripsi.

Depok, 24 Juni 2011

Dosen Pembimbing



Dr. Ir. Ridwan Gunawan, MT

NIP: 195102131980031002

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah membimbing setiap detik hidup saya sehingga saya dapat menyelesaikan Skripsi ini yang merupakan salah satu syarat mencapai gelar Sarjana Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya sangat menyadari bahwa, tanpa bantuan dari berbagai pihak, sangatlah sulit untuk menyelesaikan Skripsi ini dengan baik dan tepat waktu. Oleh karena itu, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Ridwan Gunawan, MT selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu beliau untuk memberikan saran, bimbingan dan diskusi sehingga Skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
2. Orang tua dan seluruh anggota keluarga yang telah membantu dan memberikan motivasi dan dukungan.
3. Sahabat dan rekan mahasiswa yang telah ikut membantu memberi segala dukungan.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga Skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 24 Juni 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Rizal Angga Ghazali
NPM : 0706267950
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

**METODE PERHITUNGAN EFISIENSI MOTOR INDUKSI YANG
SEDANG BEROPERASI**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada Tanggal : 24 Juni 2011
Yang Menyatakan

(Rizal Angga Ghazali)

ABSTRAK

Nama : Rizal Angga Ghzali
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Metode Perhitungan Efisiensi Motor Induksi Yang Sedang Beroperasi

Dengan naiknya harga energi sangat penting untuk mengganti motor yang tidak efisien dengan motor yang efisien. Lebih-lebih, motor listrik mengkonsumsi lebih dari 60 % energi listrik yang digunakan di sektor industri. Untuk mencapai tujuan ini harus diestimasi efisiensi motor yang ada. Akan tetapi, tidak mungkin untuk melepas suatu motor induksi dari penggerakannya dan mengukur efisiensinya karena hal ini sangat mengganggu proses operasi.

Skripsi ini membahas “metode torsi induksi” untuk mengukur efisiensi motor induksi yang sedang bekerja. Metode ini menawarkan sebuah cara untuk mengukur efisiensi motor tanpa harus melepas motor dan tanpa harus mengukur daya keluaran atau torsi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode ini mempunyai tingkat akurasi lebih dari 97%. Metode ini selanjutnya dapat dijadikan sebagai bahan masukan untuk mengevaluasi manajemen energi sehingga dapat dihemat sejumlah uang dengan mengganti motor yang tidak efisien.

Kata kunci : efisiensi, motor induksi, parameter rangkaian, rugi-rugi motor induksi, kurva kinerja motor

ABSTRACT

Name : Rizal Angga Ghazali
Study Program : Electrical Engineering
Title : Induction Motor Efficiency Calculation Method While the Motor is in Operation

As the cost of energy is growing at a high rate it is important to replace inefficient motor with efficient ones. Moreover, electric motors consume more than 60% of the electric energy used by the industry sector. To achieve this goal it must be estimated the existing motor's efficiencies. However it's impossible to remove an induction motor from driven equipment by means efficiency estimation because it can disturb process operation.

This final assignment discuss about "induction torque method" to determine on-line induction motor efficiency This method offer a way to measure the motor efficiency without the need for removing the motors and without the need for measuring the output power or torque. Test results indicate that this method has an accuracy of over 97%. Next, this method could be information for evaluating energy management so it can be saved amount of money by replacing inefficient motors.

Key words : efficiency, induction motors, circuit parameters, induction motor losses, motor performance curves

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
KATA PENGANTAR.....	v
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penulisan	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Metode Penelitian	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
BAB II LANDASAN TEORI.....	4
2.1 Pendahuluan Motor Induksi.....	4
2.1.1 Umum.....	4
2.1.2 Klasifikasi Motor Induksi.....	4
2.1.3 Konstruksi Motor Induksi	6
2.2 Dasar-Dasar Motor Induksi.....	8
2.2.1 Cara Kerja Motor Induksi.....	8
2.2.2 Slip Motor Induksi	11
2.2.3 Karakteristik Torsi-Kecepatan.....	12
2.2.4 Rangkaian Ekivalen	13
2.3 Efisiensi Motor Induksi	14
2.3.1 Perhitungan Efisiensi	14
2.3.2 Diagram Aliran Daya	16
2.3.3 Rugi-Rugi Motor Induksi	17
2.3.4 Faktor Daya	22
2.3.5 Faktor-Faktor Efisiensi Motor Induksi.....	23
2.3.5 Analisa Efisiensi Motor Induksi	24
BAB III PROSES PENGUJIAN.....	29
3.1 Peralatan Pengujian	32
3.2 Rangkaian Pengujian	34
3.1 Prosedur Pengujian.....	37
3.2 Pengolahan Data Hasil Pengujian	39
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	45
4.1 Data Hasil Pengukuran	45
4.2 Data Hasil Pengolahan.....	49
4.3 Grafik Kinerja Motor.....	60
BAB V KESIMPULAN.....	71
DAFTAR REFERENSI	72
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi Motor Induksi	5
Gambar 2.2	Bagian Motor Induksi	6
Gambar 2.3	Konstruksi Lilitan 3 Fasa Pada Stator.....	7
Gambar 2.4	Rotor Sangkar Tupai Motor Induksi.....	8
Gambar 2.5	Gelombang Sinusoidal Tegangan Arus Bolak-Balik 3 Fasa Pada Stator.....	8
Gambar 2.6	Nilai Sesaat Gaya Gerak Magnet Stator	9
Gambar 2.7	Grafik Torsi-Kecepatan Motor Induksi.....	13
Gambar 2.8	Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi	13
Gambar 2.9	Rangkaian Sederhana Motor Induksi.....	14
Gambar 2.10	Blok Diagram Daya dan Rugi Motor Induksi	14
Gambar 2.11	Grafik Efisiensi Motor Terhadap Beban Motor	18
Gambar 2.12	Kurva Hysterisis	20
Gambar 2.13	Persentase Penyebab Rugi-Rugi Stray Pada Motor 75 HP	21
Gambar 2.14	Faktor Daya Dan Efisiensi Motor Induksi Terhadap Beban.....	23
Gambar 2.15	Grafik Efisiensi Motor Sebagai Fungsi Beban.....	26
Gambar 3.1	Diagram Alir Daya Motor Induksi	29
Gambar 3.2	Motor Induksi	32
Gambar 3.3	DC Exciter.....	32
Gambar 3.4	NE7010 Machine Test Set.....	33
Gambar 3.5	(a) Rangkaian Pengujian	34
Gambar 3.5	(b) Diagram Blok Rangkaian Pengujian	34
Gambar 3.6	Rangkaian Pengukuran Pada NE7010 Machine Test Set	36
Gambar 3.7	Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi	40
Gambar 3.8	Diagram Alir Proses Pengujian	43
Gambar 4.1	Contoh Hasil Salah Satu Simulasi MATLAB.....	53
Gambar 4.2	Grafik Perbandingan Efisiensi 200 Volt	58
Gambar 4.3	Grafik Perbandingan Efisiensi 210 Volt	58
Gambar 4.4	Grafik Perbandingan Efisiensi 220 Volt	59
Gambar 4.5	Grafik Perbandingan Efisiensi 230 Volt	59
Gambar 4.6	Grafik Arus Masukan vs Daya Keluaran 200 Volt.....	61
Gambar 4.7	Grafik Efisiensi vs Daya Keluaran 200 Volt.....	62
Gambar 4.8	Grafik Faktor Daya vs Daya Keluaran 200 Volt	64
Gambar 4.9	Rangkaian Sederhana Motor Induksi.....	65
Gambar 4.10	Diagram Fasa Arus dan Tegangan Stator.....	66
Gambar 4.11	Grafik Kecepatan vs Daya Keluaran 200 Volt	68
Gambar 4.12	Grafik Torsi Motor vs Kecepatan 200 Volt	69
Gambar 4.13	Grafik Torsi-Kecepatan Motor Induksi.....	70

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Metode Pengukuran Efisiensi Motor Induksi IEEE.....	16
Tabel 2.2	Persentase Rugi-Rugi Stray Terhadap Daya Keluaran.....	21
Tabel 2.3	Ringkasan Rugi-Rugi Motor Induksi	22
Tabel 4.1	Spesifikasi Motor Induksi.....	45
Tabel 4.2	Data Hasil Pengukuran Lab 200 Volt.....	46
Tabel 4.3	Data Hasil Pengukuran Lab 210 Volt.....	46
Tabel 4.4	Data Hasil Pengukuran Lab 220 Volt.....	47
Tabel 4.5	Data Hasil Pengukuran Lab 230 Volt.....	47
Tabel 4.6	Data Hasil Perhitungan MATLAB 200 Volt	54
Tabel 4.7	Data Hasil Perhitungan MATLAB 210 Volt	55
Tabel 4.8	Data Hasil Perhitungan MATLAB 220 Volt	55
Tabel 4.9	Data Hasil Perhitungan MATLAB 230 Volt	56
Tabel 4.10	Perbandingan Efisiensi 200 Volt	57
Tabel 4.11	Perbandingan Efisiensi 210 Volt.....	57
Tabel 4.12	Perbandingan Efisiensi 220 Volt.....	57
Tabel 4.13	Perbandingan Efisiensi 230 Volt.....	57

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor induksi tiga fasa merupakan motor yang paling banyak digunakan di industri karena ketahanannya, keandalannya, harganya yang murah, mudah konstruksinya, dan bebas perawatannya. Di Amerika, motor listrik mengkonsumsi listrik sekitar 60% dari daya listrik yang dihasilkan. Populasi motor di Amerika sekitar 1 miliar motor dengan konsumsi 1700×10^9 kWh per tahun dan tiap tahunnya 140 juta motor baru terjual. Ini menandakan bahwa motor induksi sangat berperan penting dalam penggunaan energi.¹

Di masa depan, biaya bahan bakar akan meningkat karena masalah lingkungan dan sumber energi yang terbatas. Oleh karena itu istilah “efisiensi” mulai menonjol terutama dalam masalah keterbatasan energi saat ini. Para ahli teknik sekarang ini, selain harus menemukan sebuah inovasi baru pada alat-alat listrik, mereka juga dituntut untuk meningkatkan efisiensi kerja dari alat-alat listrik tersebut.

Tiap peningkatan 1% efisiensi motor itu artinya dapat menghemat biaya energi sebesar \$1 miliar per tahun, dapat mengurangi 6-10 juta ton batubara, dan emisi gas karbon dioksida sebesar 15-20 juta ton.¹

Di Amerika, motor hemat energi telah dikembangkan selama dua dekade ini untuk menggantikan motor-motor lama yang efisiensinya sangat rendah. Sebagian riset dilakukan pada motor yang berukuran 1 kW sampai 110 kW. Motor ini sangat penting baik di industri maupun di komersial sebagai pompa, kompresor, kipas, alat-alat mesin, dan perlengkapan ac. Perkembangan motor hemat energi ini menjadi pilihan utama terutama setelah krisis energi di awal tahun 70-an.

Efisiensi motor listrik sangat penting sekarang ini, karena motor listrik merupakan pengguna utama listrik di industri modern. Dengan menggunakan motor yang hemat energi diharapkan dapat mengurangi pemakaian bahan bakar, mengurangi produksi gas rumah kaca, dan mengurangi biaya pembangkitan

listrik. Selain itu, dengan motor hemat energi diharapkan dapat mengurangi biaya perawatan dan meningkatkan operasinya.

Sebelum menentukan apakah motor lama perlu diganti dengan motor hemat energi atau tidak, perlu dilakukan perhitungan nilai efisiensi motor lama tersebut. Setelah didapat nilai efisiensi motor lama, kemudian kedua nilai efisiensi motor lama dan motor baru (motor hemat energi) dibandingkan untuk mendapatkan nilai ekuivalen rupiah yang dapat dihemat.

Di beberapa negara telah dilakukan standarisasi motor-motor listrik ke dalam beberapa kelas berdasarkan efisiensinya, misalnya persetujuan antara komisi Eropa dan CEMEP (the European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics) untuk mengklasifikasikan motor AC frekuensi rendah berdasarkan efisiensinya ke dalam 3 kelas, yaitu dari Eff3 (paling rendah) sampai Eff1 (paling tinggi).²

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penulisan Skripsi ini adalah :

1. Untuk membuktikan keakuratan metode perhitungan efisiensi motor induksi yang menggunakan metode perhitungan torsi induksi dengan metode IEEE 841.
2. Untuk memberikan kemudahan dalam melakukan pengukuran efisiensi motor induksi yang sedang beroperasi.
3. Untuk membantu permasalahan penghematan energi di pabrik.

1.3 Batasan Masalah

Laporan Skripsi yang dibuat ini terbatas pada :

1. Motor induksi tiga fasa squirrel cage dengan ukuran 1,1-1,32 kW.
2. Pengukuran dilakukan untuk 4 level tegangan yang berbeda yaitu 200 Volt, 210 Volt, 220 Volt, dan 230 Volt.
3. Error antara pengukuran efisiensi IEEE 841 dengan metode perhitungan efisiensi yang menggunakan perhitungan torsi induksi.

1.4 Metode Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan adalah dengan studi literatur, pengukuran, dan pengolahan data.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan pada Skripsi ini dibagi ke dalam beberapa bab. Bab pertama adalah pendahuluan yang berisi latar belakang, tujuan penelitian, batasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan. Bab kedua adalah landasan teori yang menguraikan tentang motor induksi tiga fasa yang terbagi menjadi pendahuluan motor induksi, dasar-dasar motor induksi, dan efisiensi motor induksi. Bab ketiga adalah pembahasan yang meliputi proses-proses pengujian pengukuran efisiensi motor induksi yang menggunakan metode perhitungan torsi induksi. Bab keempat akan menguraikan tentang pengolahan hasil pengujian, perbandingan kedua metode pengukuran efisiensi, dan analisisnya. Bab kelima adalah kesimpulan dari pengujian yang dilakukan.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Pendahuluan Motor Induksi

2.1.1 Umum

Nama motor induksi berasal dari keadaan bahwa arus yang timbul pada rotor disebabkan oleh tegangan yang diinduksikan fluks medan magnet stator ke rotor. Dinamakan juga motor tak serempak karena kecepatan putar rotornya tidak sama dengan kecepatan putar medan magnet statornya. Motor induksi dan generator induksi merupakan satu jenis mesin induksi yang sama yang menggunakan prinsip induksi elektromagnetik. Namun bila dioperasikan sebagai generator, mesin ini memiliki banyak kekurangan dan diperlukan suatu metode pengaturan agar motor itu berfungsi sebagai generator sehingga umumnya mesin induksi dioperasikan sebagai motor.

Pada aplikasi industri dan pertambangan, motor induksi 3 fasa adalah penggerak utama bagi sebagian besar mesin. Di negara-negara industri modern, lebih dari setengah total energi listrik yang digunakan diubah ke energi mekanik melalui motor induksi AC 3 fasa. Motor ini diaplikasikan hampir di semua bagian proses dan produksi. Aplikasi motor induksi juga diperluas ke lingkungan domestik dan bangunan komersil. Motor digunakan sebagai penggerak pompa, kipas, kompresor, mixer, conveyor, crane, dan lain-lain. Motor induksi merupakan motor yang paling umum digunakan pada berbagai peralatan industry karena rancangannya yang sederhana, murah, kokoh, mudah didapat, dan dapat langsung dihubungkan ke sumber daya AC.

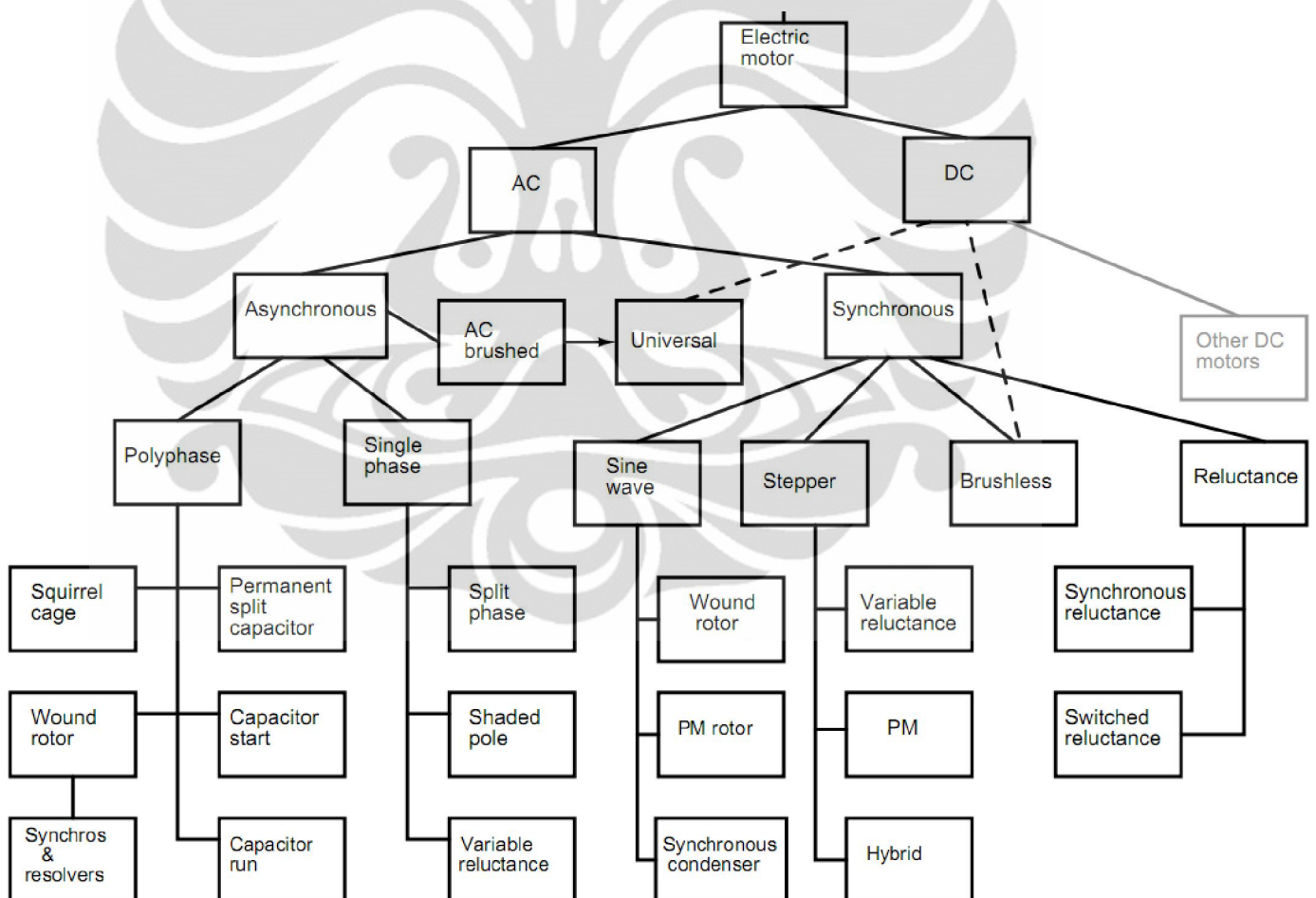
2.1.2 Klasifikasi Motor Induksi

Motor induksi dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama yaitu motor induksi satu fasa dan motor induksi tiga fasa atau polyphase seperti yang terlihat pada gambar 2.1³

Motor induksi satu fasa hanya memiliki satu gulungan stator, beroperasi dengan pasokan daya satu fase, memiliki sebuah rotor sangkar tupai, dan

memerlukan sebuah alat untuk mengoperasikan motornya. Sejauh ini motor ini merupakan jenis motor yang paling umum digunakan di dalam peralatan rumah tangga, seperti kipas angin, mesin cuci dan pengering pakaian, dengan ukurannya antara 3 sampai 4 Hp.

Motor induksi tiga fasa mempunyai medan magnet putar yang dihasilkan oleh pasokan tiga fase yang seimbang. Motor tersebut memiliki kemampuan daya yang tinggi, rotornya berbentuk sangkar tupai atau wound rotor (walaupun 90% memiliki rotor sangkar tupai), dan memiliki penyalaan sendiri. Diperkirakan bahwa sekitar 70% motor di industri menggunakan motor jenis ini, sebagai pompa, kompresor, belt conveyor, jaringan listrik, dan grinder. Motor ini tersedia dalam ukuran 1/3 Hp hingga ratusan Hp.



Gambar 2.1 Klasifikasi Motor Induksi

2.1.3 Konstruksi Motor Induksi

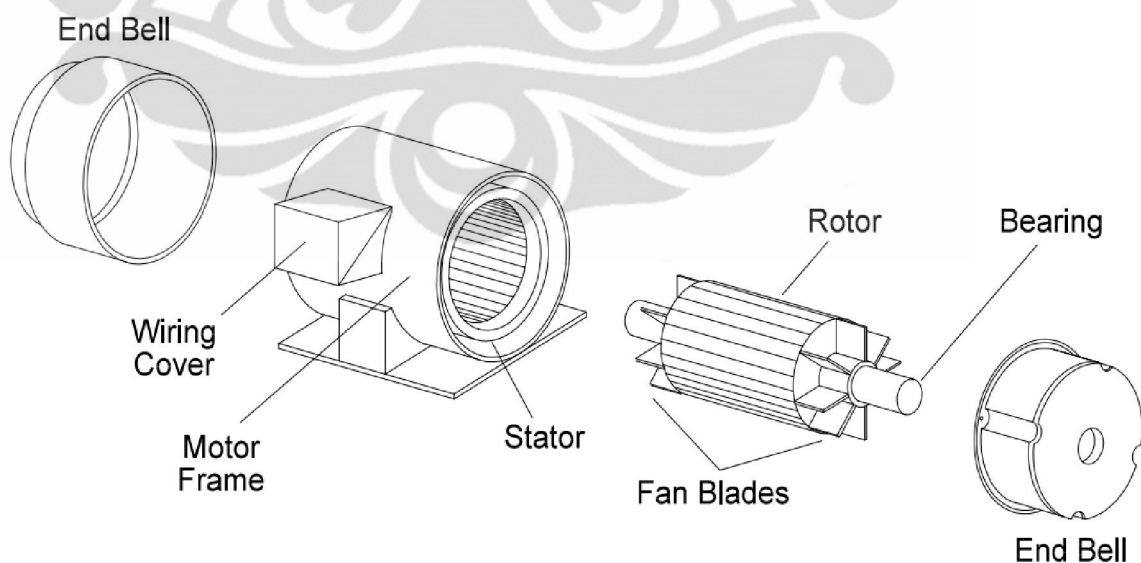
Motor induksi memiliki dua komponen utama yaitu :

1. Stator merupakan bagian mesin yang tidak bergerak.
2. Rotor merupakan bagian mesin yang bergerak.

Baik stator maupun rotor dibentuk dari :

1. Rangkaian listrik, biasanya dibuat dari tembaga maupun aluminium yang diisolasi untuk mengalirkan arus.
2. Rangkaian magnet, biasanya dibuat dari baja yang dilaminasi untuk mengalirkan fluks magnetik.

Motor induksi kadang-kadang disebut sebagai transformer berputar karena stator pada dasarnya adalah sisi primer trafo dan rotor adalah bagian sekunder trafo. Rotor dan stator dipisahkan melalui celah udara yang membuat rotor dapat berputar. Stator dan rotor disusun dari lempengan bahan yang dilaminasi menjadi bentuk stator maupun rotor. Gambar 2.2 di bawah ini menggambarkan bagian-bagian motor induksi. Gambar lengkap bagian-bagian motor induksi dapat dilihat pada lampiran E

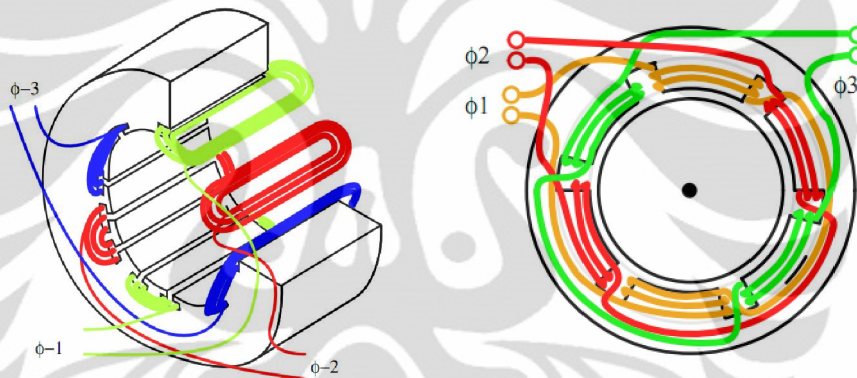


Gambar 2.2 Bagian Motor Induksi

A. Stator

Stator terdiri dari :

1. Silinder terluar motor, yang terbuat baik dari baja, besi atau campuran aluminium yang dibentuk menjadi silinder.
2. Jalur magnetik yang terdiri dari satu set slot laminasi baja yang dipres ke ruang dalam silinder. Jalur magnetik tersebut dilaminasi untuk mengurangi rugi arus eddy.
3. Satu set lilitan listrik yang diisolasi yang diletakkan di dalam slot jalur magnetik yang terlaminasi. Untuk motor 3 fasa, 3 set lilitan diperlukan untuk tiap fasanya. Gulungan ini dilingkarkan ke sejumlah kutub tertentu seperti yang terlihat pada gambar 2.3 di bawah ini.

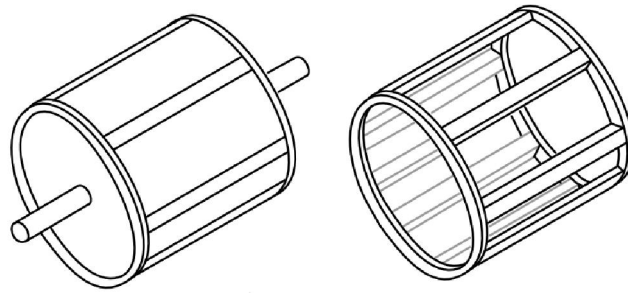


Gambar 2.3 Konstruksi Lilitan 3 Fasa Pada Stator

B. Rotor

Rotor merupakan bagian mesin yang bergerak. Rotor terdiri dari satu set laminasi baja yang dipres bersama di dalam jalur magnetik silinder dan rangkaian listrik. Motor induksi menggunakan dua jenis rotor yaitu :

1. Rotor sangkar tupai yang terdiri dari satu set batang penghantar tembaga atau aluminium yang dilekatkan dalam alur slot paralel. Batang-batang tersebut dihubungkan pendek pada kedua ujungnya dengan cincin hubungan pendek. Dengan konstruksinya yang menyerupai sangkar tupai, rotor ini disebut rotor sangkar tupai. Rotor sangkar tupai ini merupakan jenis rotor yang paling banyak digunakan. Gambar 2.4 menunjukkan rotor sangkar tupai motor induksi



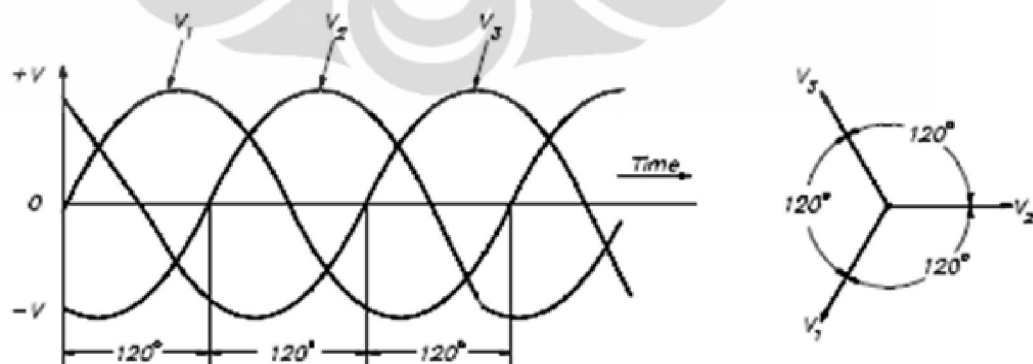
Gambar 2.4 Rotor Sangkar Tupai Motor Induksi

2. Wound rotor adalah rotor yang memiliki gulungan tiga fase, lapisan ganda dan terdistribusi secara merata. Dibuat melingkar sebanyak kutub stator. Tiga fase digulungi kawat pada bagian dalamnya dan ujung yang lainnya dihubungkan ke cincin kecil yang dipasang pada batang as dengan sikat yang menempel padanya. Fitur utama cincin geser ini adalah resistor yang diseri dengan rangkaian rotor untuk membatasi arus starting.

2.2 Dasar-Dasar Motor Induksi

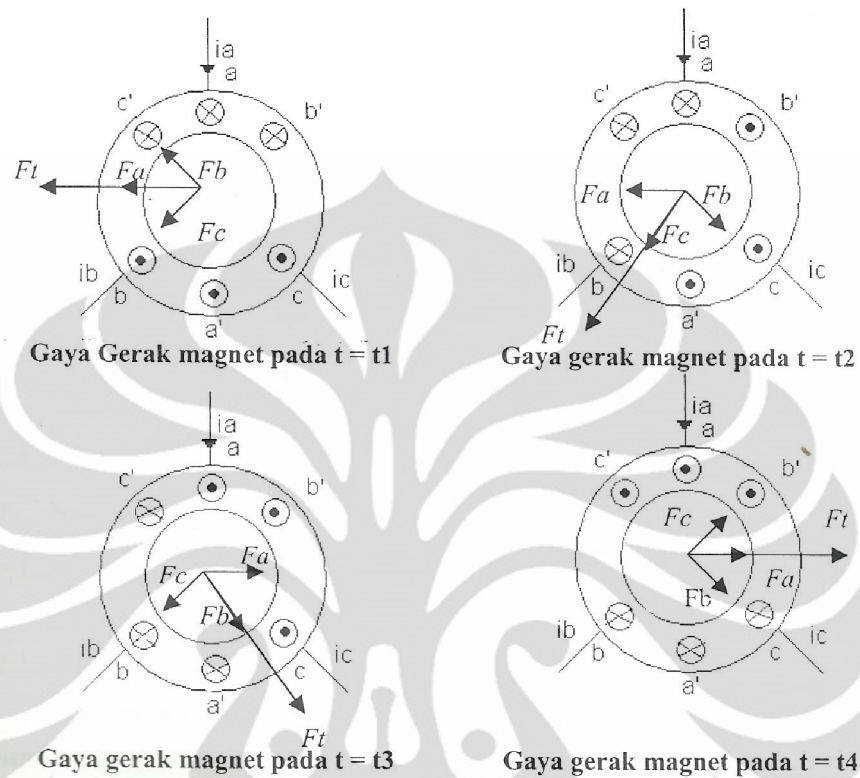
2.2.1 Cara Kerja Motor Induksi

Motor induksi terdiri dari stator dan rotor. Stator terdiri dari tiga fasa lilitan yang mempunyai hambatan yang sangat kecil dan disusun secara seimbang dengan beda fasa 120° . Pada mulanya tegangan 3 fasa diberikan pada stator dengan bentuk gelombang seperti terlihat pada gambar 2.5 di bawah ini.



Gambar 2.5 Gelombang Sinusoidal Tegangan Arus Bolak-Balik 3 Fasa Pada Stator

Saat tegangan dan arus diberikan di stator, medan magnet akan dihasilkan di dalam kumparan stator.



Gambar 2.6 Nilai Sesaat Gaya Gerak Magnet Stator

Pada gambar 2.6 di atas terlihat bagaimana medan magnet putar stator dapat dihasilkan. Medan magnet ini akan berotasi di dalam stator. Kecepatan rotasi medan magnet ini sinkron dengan frekuensi daya listrik sehingga disebut kecepatan sinkron dan besar kecepatannya

$$n_{sync} = \frac{120f_e}{p} \quad (2.1)$$

dengan :

n_{sync} = kecepatan medan magnet stator (rpm)

f_e = frekuensi listrik (Hz)

p = jumlah kutub

Kemudian rotasi flux medan magnet yang dihasilkan di stator ini akan melewati celah udara di antara stator dan rotor dan akan menembus batang rotor sehingga menginduksi tegangan emf pada batang rotor. Besarnya tegangan induksi pada rotor

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad (2.2)$$

dengan :

e_{ind} = tegangan induksi (Volt)

v = kecepatan rotor terhadap kecepatan medan magnet stator (m/s)

B = kerapatan fluks magnet (Tesla)

l = panjang konduktor dalam medan magnet (m)

Dengan adanya tegangan induksi ini ditambah konduktor rotor yang merupakan rangkaian tertutup maka arus akan dihasilkan dalam batang rotor dan cincin penghubung. Dengan timbulnya arus pada rotor, akan diinduksikan medan magnet pada rotor yang arahnya berlawanan dengan medan magnet stator. Sesuai dengan hukum Lenz, arah gaya cenderung untuk mengurangi perubahan fluks itu sendiri, yang berarti bahwa rotor akan berakselerasi mengikuti arah rotasi fluks. Medan magnet stator akan berinteraksi dengan medan magnet rotor untuk menghasilkan gaya rotasi. Gaya rotasi ini berasal dari torsi induksi pada rotor sebesar

$$\tau_{ind} = kB_R \times B_S \quad (2.3)$$

dengan :

τ_{ind} = torsi induksi (Nm)

k = konstanta torsi

B_R = kerapatan fluks magnet rotor (Tesla)

B_S = kerapatan fluks magnet stator (Tesla)

Torsi induksi inilah yang akan menyebabkan rotor berakselerasi dan berputar mencapai nilai kecepatan ratingnya. Namun ada batas kecepatan motor yang tidak boleh dilewati. Jika kecepatan motor sama dengan kecepatan sinkronnya, maka

batang rotor akan dianggap diam terhadap medan magnet stator akibatnya tidak akan timbul tegangan induksi. Jika e_{ind} sama dengan nol, maka tidak akan timbul arus pada rotor, dan rotor tidak akan menghasilkan medan magnet. Dengan tidak adanya medan magnet pada rotor ini, maka torsi induksi yang dihasilkan juga akan nol, dan rotor akan berhenti berputar karena adanya gesekan. Motor induksi hanya dapat mencapai kecepatan sedikit di bawah kecepatan sinkronnya, namun tidak pernah sama dengan kecepatan sinkronnya.

2.2.2 Slip Motor Induksi

Tegangan induksi pada rotor motor bergantung pada kecepatan rotor relatif terhadap medan magnet statornya. Pada motor induksi kecepatan rotor selalu tidak pernah sama dengan kecepatan medan magnet statornya. Terjadinya perbedaan antara dua kecepatan tersebut disebabkan adanya “slip/geseran” yang meningkat dengan meningkatnya beban. Slip ini hanya terjadi pada motor induksi dan besarnya slip dirumuskan sebagai berikut.

$$\%slip = \frac{n_{slip}}{n_{sync}} \times 100\% = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \times 100\% \quad (2.4)$$

dengan :

n_{sync} = kecepatan sinkron (rpm)

n_m = kecepatan motor (rpm)

n_{slip} = kecepatan slip (rpm)

Jika rotor berputar sama dengan kecepatan sinkronnya, maka $s = 0$, sedangkan jika rotor diam, maka $s = 1$. Semua motor induksi nilai slipnya berkisar antar dua batas nilai tersebut. Slip saat beban penuh biasanya bernilai 5% atau lebih kecil.

Jika rotor motor dikunci sehingga rotor tidak dapat berputar, maka rotor akan mempunyai frekuensi yang sama dengan stator. Namun sebaliknya, jika rotor berputar pada kecepatan sinkronnya, frekuensi rotor akan sama dengan nol. Dari hubungan tersebut dapat didapat nilai frekuensi rotor.

$$f_r = sf_e = \frac{p}{120}(n_{sync} - n_m) \quad (2.5)$$

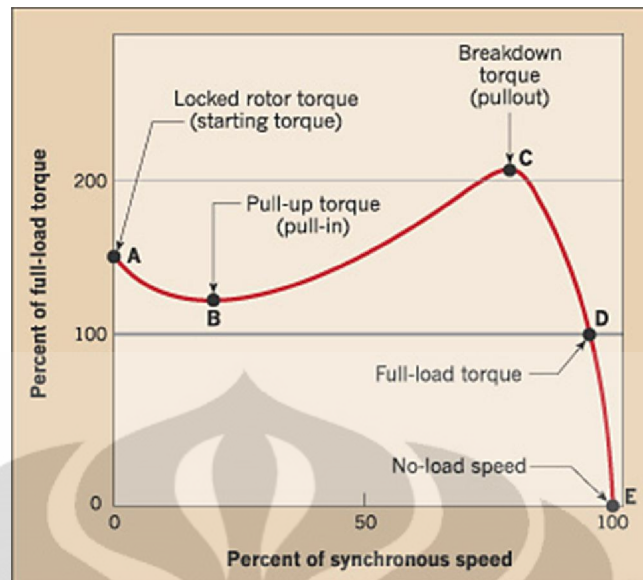
dengan :

$$\begin{array}{ll} f_r & = \text{frekuensi rotor (Hz)} & n_{sync} & = \text{kecepatan sinkron (rpm)} \\ f_e & = \text{frekuensi sistem (Hz)} & n_m & = \text{kecepatan motor (rpm)} \\ s & = \text{slip} & p & = \text{jumlah kutub mesin} \end{array}$$

2.2.3 Karakteristik Torsi-Kecepatan

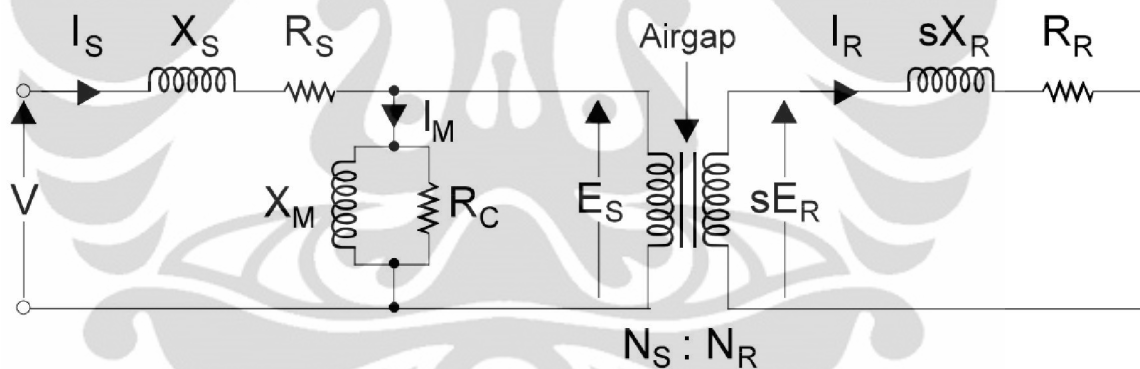
Karakteristik torsi-kecepatan sebuah motor induksi merupakan parameter yang penting untuk menentukan kinerja motor. Gambar 2.7 menunjukkan grafik torsi-kecepatan motor induksi AC tiga fase.⁴ Grafik ini menggambarkan apa yang terjadi pada keluaran motor dan kecepatan saat motor di start dengan kecepatan penuh.

Motor pada mulanya diam dengan kecepatan nol dan mulai menghasilkan torsi locked rotor (titik A) yang biasanya bernilai 175% dari torsi full load. Saat motor mulai bereselerasi, torsi motor akan berkurang sejenak pada titik B yang disebut sebagai torsi pull-up. Ini adalah torsi yang paling kecil saat masa start motor. Dengan bertambahnya kecepatan, maka bertambah pula torsi, hingga mencapai suatu titik C di mana torsi tidak dapat bertambah lagi. Torsi ini disebut breakdown torque atau pull-out torque yang nilainya sekitar 2-3 kali torsi full loadnya. Pada saat itu, arus akan berkurang secara drastis. Akhirnya, saat motor dibebani dengan torsi full-loadnya, kecepatan motor mulai stabil (titik D) dan baik torsi maupun arus akan berkurang secara substansial. Jika motor tidak dihubungkan dengan beban, maka kecepatannya akan bertambah mencapai kecepatan beban nolnya atau mendekati kecepatan sinkronnya (titik E). Contohnya, sebuah motor 4 kutub dengan frekuensi 60 Hz, kecepatan beban nolnya sekitar 1799 RPM dengan kecepatan sinkronnya 1800 RPM.



Gambar 2.7 Grafik Torsi-Kecepatan Motor Induksi

2.2.4 Rangkaian Ekivalen

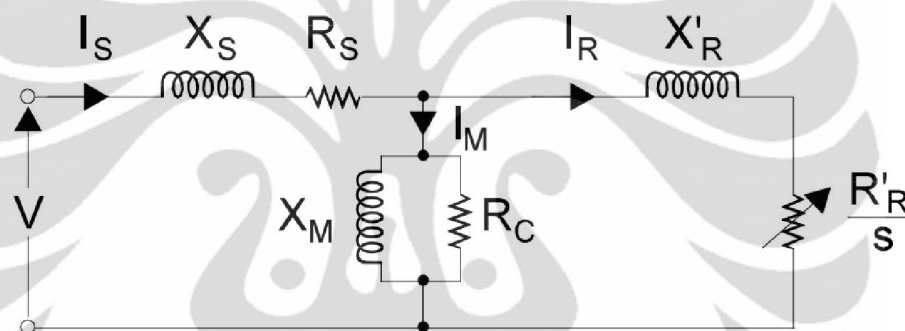


Gambar 2.8 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi

V	= tegangan suplai stator	I_S	= arus stator
E_S	= tegangan induksi stator	I_R	= arus rotor
E_R	= tegangan induksi rotor	I_M	= arus magnetisasi
N_S	= lilitan stator	R_C	= rugi-rugi inti
N_R	= lilitan rotor	X_M	= reaktansi magnetisasi
R_S	= hambatan stator	R_R	= hambatan rotor
X_S	= reaktansi bocor stator	X_R	= reaktansi bocor rotor

Gambar 2.8 di atas merupakan gambar rangkaian ekuivalen dari sebuah fasa motor induksi. Motor induksi merupakan mesin dengan konstruksi yang terdiri dari lilitan-lilitan dan inti besi yang memiliki resistansi dan induktansi. Motor induksi operasinya hampir sama dengan operasi transformer, sehingga rangkaian ekuivalen motor induksi pada dasarnya juga sama dengan rangkaian ekuivalen transformer, seperti pada gambar 2.8 di atas.

Gambar 2.8 di atas sangat kompleks untuk dianalisa karena trafo di antara stator dan rotor mempunyai rasio yang berubah jika slip berubah. Rangkaian dapat disederhanakan secara matematis dengan mengganti nilai reaktansi dan hambatan rotor terhadap rasio lilitan $N^2 = (N_S/N_R)^2$ terhadap stator. Rangkaian dapat disederhanakan sebagai gambar 2.9 di bawah ini.

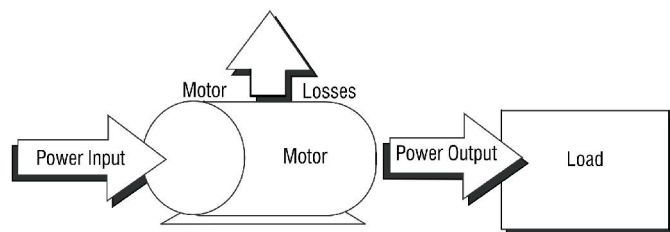


Gambar 2.9 Rangkaian Sederhana Motor Induksi

2.3 Efisiensi Motor Induksi

2.3.1 Perhitungan Efisiensi

Efisiensi sebuah mesin adalah suatu ukuran seberapa baik mesin dapat mengubah energi masukan listrik ke energi keluaran mekanik. Efisiensi berhubungan langsung dengan rugi-rugi motor induksi terlepas dari desain mesin itu sendiri.



Gambar 2.10 Blok Diagram Daya dan Rugi Motor Induksi

Dari gambar 2.10 di atas efisiensi didefinisikan sebagai perbandingan antara daya keluaran dengan daya masukannya. Daya keluaran sama dengan daya masukan dikurangi dengan semua rugi-rugi yang ada. Oleh karena itu, jika dua dari tiga variabel (keluaran, masukan, atau rugi-rugi) telah didapatkan nilainya, nilai efisiensi dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{P_{in} - P_{losses}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.6)$$

dengan :

- η = efisiensi (%)
- P_{out} = daya keluaran (Watt)
- P_{in} = daya masukan (Watt)
- P_{losses} = total rugi-rugi (Watt)

Bila dilihat dari gambar rangkaian seperti pada gambar 2.9, nilai P_{in} dan P_{out} dapat dicari melalui persamaan di bawah ini.

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos \theta \quad (2.7)$$

dengan :

- P_{in} = daya masukan (Watt)
- V_L = tegangan line (Volt)
- I_L = arus line (Ampere)
- $\cos \theta$ = faktor daya

$$P_{out} = \tau_{load} \times \omega_m \quad (2.8)$$

dengan :

- P_{out} = daya keluaran (Watt)
- τ_{load} = torsi beban (Nm)
- ω_m = kecepatan motor (rpm)

IEEE juga mempunyai standar metode tersendiri dalam menghitung efisiensi seperti yang terlihat pada tabel 2.1.⁵ Tiap standar ini pengukurannya berbeda-beda karena metode yang digunakan dalam perhitungan juga berbeda-beda.

Tabel 2.1 Metode Pengukuran Efisiensi Motor Induksi IEEE

No	Metode	Keterangan
1	A	Pengukuran langsung pada masukan dan keluaran
2	B	Pengukuran langsung pada masukan dan keluaran dengan menghitung tiap rugi-rugi dan pengukuran tak langsung pada rugi-rugi stray
3	C	Menduplikat mesin dengan tiap rugi-rugi dan pengukuran tak langsung pada rugi-rugi stray
4	E	Pengukuran daya listrik saat ada beban dengan tiap rugi-rugi yang ada dan pengukuran langsung rugi-rugi stray
5	E1	Pengukuran daya listrik saat ada beban dengan tiap rugi-rugi yang ada dan asumsi nilai rugi stray
6	F	Rangkaian ekuivalen dengan pengukuran langsung pada rugi-rugi stray
7	F1	Rangkaian ekuivalen dengan asumsi rugi-rugi stray
8	C/F	Rangkaian ekuivalen yang dikalibrasikan per titik beban metode C dengan pengukuran tak langsung rugi-rugi stray
9	E/F	Rangkaian ekuivalen yang dikalibrasikan per titik beban Metode E dengan pengukuran langsung rugi-rugi stray
10	E1/F1	Rangkaian ekuivalen yang dikalibrasikan per titik beban Metode E dengan asumsi nilai rugi-rugi stray

2.3.2 Diagram Aliran Daya

Daya masukan motor induksi berasal dari tegangan dan arus tiga fasa. Pada dasarnya motor induksi sama seperti transformator. Pada transformator, daya masukannya berasal dari arus dan tegangan tiga fasa, dan daya keluaran listrik transformator digunakan pada lilitan sekunder. Pada motor induksi, lilitan sekundernya dihubungkan pada kedua ujungnya, sehingga daya keluaran listriknya tidak ada, namun daya keluarannya berbentuk energi mekanik.

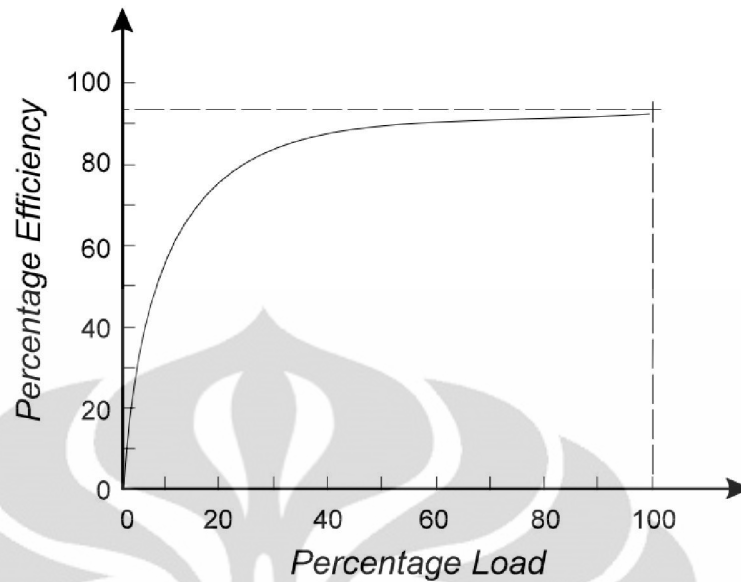
Rugi-rugi yang pertama kali timbul yaitu rugi-rugi pada lilitan stator I^2R_s dan biasa disebut stator copper loss P_{SCL} . Kemudian rugi-rugi yang timbul berikutnya berasal dari inti besi P_{core} yaitu rugi-rugi hysteresis dan arus eddy. Daya yang tersisa kemudian akan ditransfer ke rotor melalui celah udara di antara stator dan rotor. Dengan adanya celah udara ini, maka daya yang ditransfer dari stator ke rotor tidak 100%, rugi-rugi inilah yang disebut air-gap power P_{AG} . Sama halnya pada stator, pada rotor juga terdapat rugi-rugi tembaga P_{RCL} sebesar I^2R_r . Setelah daya ditransfer ke rotor dan dikurangi dengan rugi-rugi tembaga, maka sisanya akan diubah dari listrik menjadi mekanik (P_{conv}). Akhirnya, rugi-rugi gesekan dan angin serta rugi-rugi lainnya mengurangi daya mekanik. Sisa daya kemudian menjadi keluaran motor P_{out} .

2.3.3 Rugi-Rugi Motor Induksi

Berdasarkan rangkaian ekuivalen dari motor induksi, rugi-rugi terdiri dari 2 sifat yaitu :

1. Rugi-rugi yang bergantung nilainya terhadap beban. Rugi-rugi ini sebagian besar merupakan rugi-rugi tembaga yang diakibatkan oleh arus beban yang mengalir melalui kumparan stator dan rotor. Rugi-rugi ini sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir.
2. Rugi-rugi konstan. Rugi-rugi ini sebagian besar merupakan rugi-rugi karena gesekan, udara dan rugi-rugi besi. Rugi-rugi ini tidak bergantung dengan berapa besar beban yang ditarik.

Karena rugi-rugi konstan tidak bergantung terhadap beban, sedangkan rugi-rugi stator dan rotor bergantung dengan kuadrat arus beban, maka efisiensi motor induksi akan turun secara signifikan saat level beban rendah seperti gambar 2.11 di bawah ini.



Gambar 2.11 Grafik Efisiensi Motor Terhadap Beban Motor

Sedangkan bentuk rugi-rugi motor induksi terbagi menjadi beberapa bentuk yaitu rugi-rugi resistif, rugi-rugi magnetik, rugi-rugi mekanik, dan rugi-rugi stray

2.3.3.1 Rugi-Rugi Resistif

Rugi-rugi ini merupakan rugi-rugi utama yang menghasilkan panas di dalam motor induksi. Rugi-rugi ini juga merupakan rugi-rugi dasar yang selalu ada pada kawat konduktor (aluminium atau tembaga) dan menghasilkan disipasi daya dalam bentuk panas sesuai dengan persamaan 2.9 di bawah ini.

$$P_f = RI^2 \quad (2.9)$$

dengan :

P_f = rugi-rugi resistif (Watt)

R = hambatan (Ohm)

I = arus (Ampere)

Nilai resistansi juga dipengaruhi oleh perubahan suhu konduktor yang sesuai dengan koefisien suhu seperti persamaan 2.10 di bawah ini

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_1 \Delta T} \quad (2.10)$$

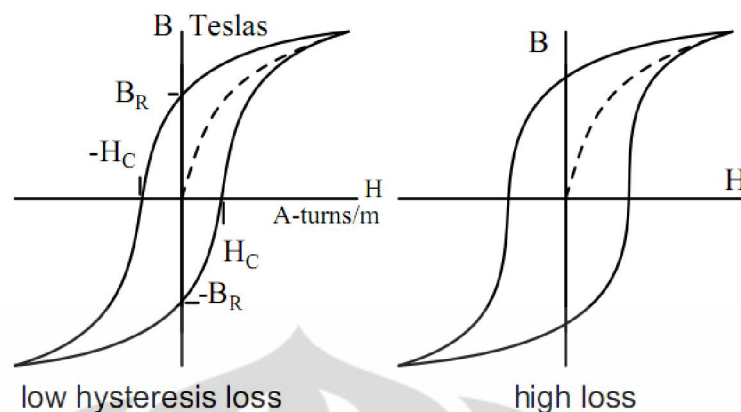
dengan :

- α = koefisien muai linear (K^{-1})
- ΔR = besar perubahan hambatan (Ohm)
- R_1 = hambatan awal (Ohm)
- ΔT = besar perubahan suhu (K)

Faktor lain yang mempengaruhi nilai resistansi kumparan motor induksi adalah skin effect dan proximity effect. Keduanya berhubungan dengan distribusi arus yang tidak seragam pada penampang melintang konduktor. Yang pertama, skin effect disebabkan oleh distribusi yang tidak teratur dari garis-garis fluks magnet pada konduktor yang dapat menambah induktansi di tengah-tengah konduktor akibatnya arus akan berkurang di daerah ini. Sedangkan proximity effect disebabkan oleh kedekatan antara dua konduktor yang menyebabkan gangguan pada kerapatan arus.

2.3.3.2 Rugi-Rugi Magnetik

Rangkaian magnet motor induksi terdiri dari bahan-bahan feromagnetik yang terdapat pada stator, rotor dan celah udara. Kerapatan fluks dipengaruhi oleh arus, saat arus ac naik, maka fluks pada inti juga bertambah dan akan mencapai saturasi, namun saat siklus arus berkurang menuju nol, fluks yang dihasilkan, garisnya tidak sama seperti garis awal, karena adanya fluks sisa pada inti. Hal ini dapat digambarkan pada gambar 2.12 kurva hysteresis di bawah ini.³



Gambar 2.12 Kurva Hysterisis

Dengan adanya hysteresis pada bahan akan menyebabkan rugi-rugi karena dibutuhkan energi untuk menyelesaikan reorientasi domain selama tiap siklus arus ac pada inti.

Tipe rugi-rugi lain yang timbul pada inti yang disebabkan oleh perubahan medan magnet pada inti yaitu rugi-rugi arus eddy. Rugi-rugi magnetik ini disebabkan oleh arus yang berputar-putar pada inti besi. Rugi-rugi ini sebanding dengan kuadrat tegangan pada stator. Baik rugi hysteresis maupun rugi arus eddy akan menyebabkan panas di material inti. Karena kedua rugi-rugi ini terjadi pada inti besi. Kedua rugi ini dijadikan satu dan biasa disebut rugi-rugi inti.

2.3.3.3 Rugi-Rugi Mekanik

Rugi-rugi ini tidak bergantung pada kondisi operasi mesin namun disebabkan oleh gesekan pada bagian yang berputar pada rotor. Rugi-rugi ini menyebabkan panas sehingga dibutuhkan ventilasi untuk membuang panas dari mesin.

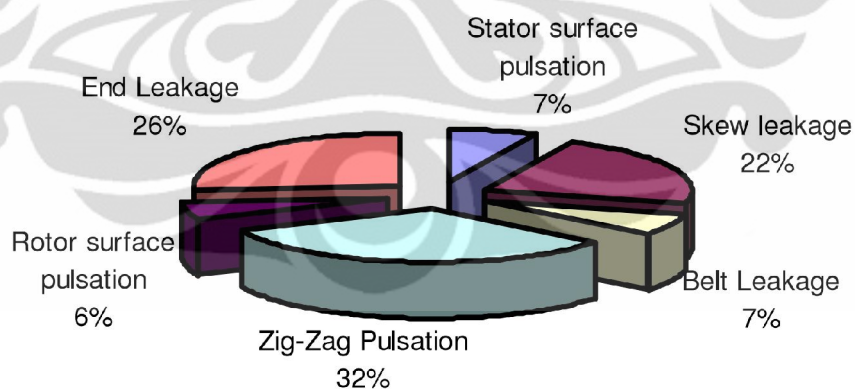
2.3.3.4 Rugi-Rugi Stray

Rugi rugi ini tidak dapat diklasifikasikan dengan rugi-rugi yang telah disebutkan sebelumnya. Rugi-rugi ini sulit untuk diukur dan bahkan sampai hari ini merupakan tantangan bagi para peneliti untuk mengukurnya. Namun IEEE telah menetapkan standar besarnya rugi-rugi stray seperti pada tabel 2.2 ⁵

Tabel 2.2 Persentase Rugi-Rugi Stray Terhadap Daya Keluaran

Rating Mesin		Persentase Rugi Stray Terhadap Total Rugi
1-125 hp	1-90 kW	1,8 %
126-500 hp	91-375 kW	1,5%
501-2499 hp	376-1850 kW	1,2%
2500 hp ke atas	1851 kW ke atas	0,9%

Rugi-rugi ini disebabkan karena tidak sempurnanya konstruksi mesin. Tidak sempurnanya konstruksi ini menyebabkan diskontinu pada komponen medan magnet khususnya daerah celah udara, yang menghasilkan rugi-rugi tambahan dengan ditandai timbulnya arus parasit pada inti magnet dan menambah rugi-rugi resistif pada konduktor. Rugi-rugi ini besarnya sekitar 2% dari daya keluaran mesin. Gambar 2.13 di bawah ini menunjukkan distribusi rugi-rugi stray pada motor induksi 75 hp.⁶

**Gambar 2.13** Persentase Penyebab Rugi-Rugi Stray Pada Motor 75 HP

Dari semua penjelasan tentang rugi-rugi motor induksi yang telah diberikan sebelumnya dapat dibuat ringkasannya seperti pada tabel 2.3 di bawah ini.⁷

Tabel 2.3 Ringkasan Rugi-Rugi Motor Induksi

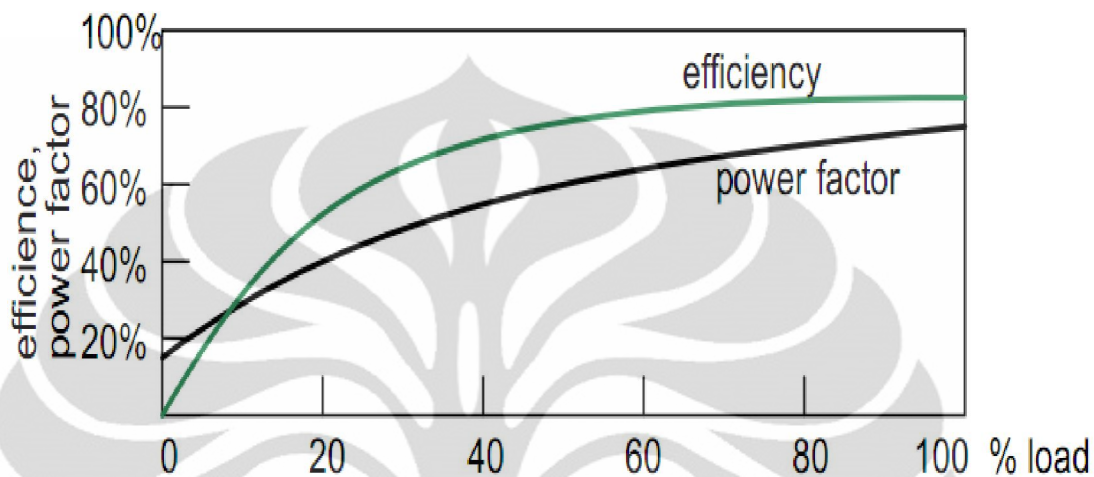
No	Jenis Rugi-Rugi	Persentase Rugi Total	Penyebab	Nilainya	Peningkatan Efisiensi
1	Stator	25 – 40 %	Panas karena arus yang mengalir di kumparan stator	Berubah-ubah	Menggunakan lebih banyak tembaga dan konduktor yang lebih besar untuk meningkatkan luas penampang konduktor Memperbesar slot stator Menggunakan isolator yang lebih tipis
2	Rotor	15 – 25 %	Panas akibat arus pada rotor	Berubah-ubah	Menggunakan batang konduktor dan cincin rotor yang lebih besar untuk memperbesar luas penampang
3	Besi	15 – 20 %	Energi yang dibutuhkan untuk magnetisasi inti	Tetap	Memperbesar permeabilitas baja Memperpanjang inti untuk mengurangi rugi-rugi karena massa jenis flux operasi yang lebih rendah Menggunakan laminasi yang lebih tipis pada inti untuk mengurangi arus eddy
4	Gesekan	5 – 15 %	Akibat gesekan bearing dan hambatan udara yang disebabkan oleh kipas	Tetap	Menggunakan rancangan fan dengan kehilangan yang rendah Mendisain aliran udara Menggunakan bearing yang gesekannya kecil
5	Stray	10 – 20 %	Fluks bocor akibat induksi arus beban dan macam-macam rugi kecil lainnya	Berubah-ubah	Menggunakan rancangan yang sudah dioptimalkan dan prosedur pengendalian kualitas yang ketat.

2.3.4 Faktor daya

Motor induksi menarik arus lagging terhadap tegangan lininya. Faktor daya saat beban penuh untuk motor kecepatan tinggi ukuran besar biasanya mencapai 90%. Saat beban $\frac{3}{4}$ full load, motor kecepatan tinggi ukuran besar dapat mencapai

faktor daya 92%. Sedangkan faktor daya untuk motor kecepatan rendah ukuran kecil hanya mencapai 50%.

Saat starting motor, faktor daya berada di nilai 10% - 25%, dan naik saat kecepatan rotor bertambah seperti gambar 2.14 di bawah ini.



Gambar 2.14 Faktor Daya Dan Efisiensi Motor Induksi Terhadap Beban

Faktor daya bervariasi nilainya sesuai dengan beban mekaniknya. Motor yang sedang tidak dibebani dianalogikan seperti sebuah trafo yang sisi sekundernya tidak dihubungkan dengan beban. Hanya hambatan kecil yang direfleksikan dari sekunder (rotor) ke primer (stator). Sehingga catu daya melihat beban reaktif dengan faktor daya yang rendah yaitu 10%. Saat rotor dibebani komponen resistif yang direfleksikan dari rotor ke stator bertambah menyebabkan faktor daya juga bertambah.

2.3.5 Faktor-Faktor Efisiensi Motor Induksi

Motor mengubah energi listrik menjadi energi mekanik untuk melayani beban tertentu. Tentunya besar energi mekanik ini pasti lebih rendah dari energi listrik. Besar efisiensi motor ditentukan oleh kehilangan dasar yang dapat dikurangi hanya oleh perubahan pada rancangan motor dan kondisi operasi. Kehilangan dapat bervariasi dari kurang lebih dua persen hingga dua puluh persen. Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi adalah:

1. Usia. Motor baru lebih efisien.
2. Kapasitas. Sebagaimana pada hampir kebanyakan peralatan, efisiensi motor meningkat dengan laju kapasitasnya.
3. Kecepatan. Motor dengan kecepatan yang lebih tinggi biasanya lebih efisien.
4. Jenis. Motor sangkar tupai biasanya lebih efisien daripada motor cincin-geser.
5. Suhu. Motor yang didinginkan oleh fan dan tertutup total (TEFC) lebih efisien daripada motor screen protected drip-proof (SPDP)
6. Penggulangan ulang motor dapat mengakibatkan penurunan efisiensi.

2.3.6 Analisa Efisiensi Motor Induksi

2.3.6.1 Analisa Biaya Pengembalian

Masalah berikut yang harus dipikirkan juga adalah menghitung berapa banyak rupiah yang dapat kita hemat dengan mengganti motor. Metode “simple payback” digunakan untuk menentukan berapa tahun dapat mengembalikan biaya pembelian motor baru.⁸

$$\text{Penghematan tahunan} = 0,746 \times HP \times L \times C \times U \times \left(\frac{100}{\eta_B} - \frac{100}{\eta_A} \right) \quad (2.11)$$

dengan :

- HP = daya (Watt)
 L = persentase beban
 C = biaya energi (Rp/kWh)
 U = jam operasi tahunan (jam)
 η_B = efisiensi motor lama (%)
 η_A = efisiensi motor baru (%)

Setelah analisa di atas dilakukan, maka jumlah tahun untuk menutup biaya pembelian motor baru dapat dihitung. Periode pengembalian dirumuskan dengan selisih biaya dua motor dikurangi dengan penghematan tahunan. Analisa di atas mempunyai beberapa kekurangan di antaranya tidak melibatkan biaya modal dan inflasi. Untuk itu digunakan Analisa Present Worth Life Cycle. Misalnya, jika nilai bunga menyebabkan pembayaran bunga tahunan kurang dari penghematan,

maka penggantian motor perlu dilakukan. Pertama harus dihitung nilai bunga efektifnya berdasarkan inflasi biaya energi dan pengembalian yang diharapkan.

$$i = \frac{100 + r_1}{100 + r_2} - 1 \quad (2.12)$$

$$\text{Penghematan tahun ke- } n = \text{Penghematan tahunan} \times \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (2.13)$$

dengan :

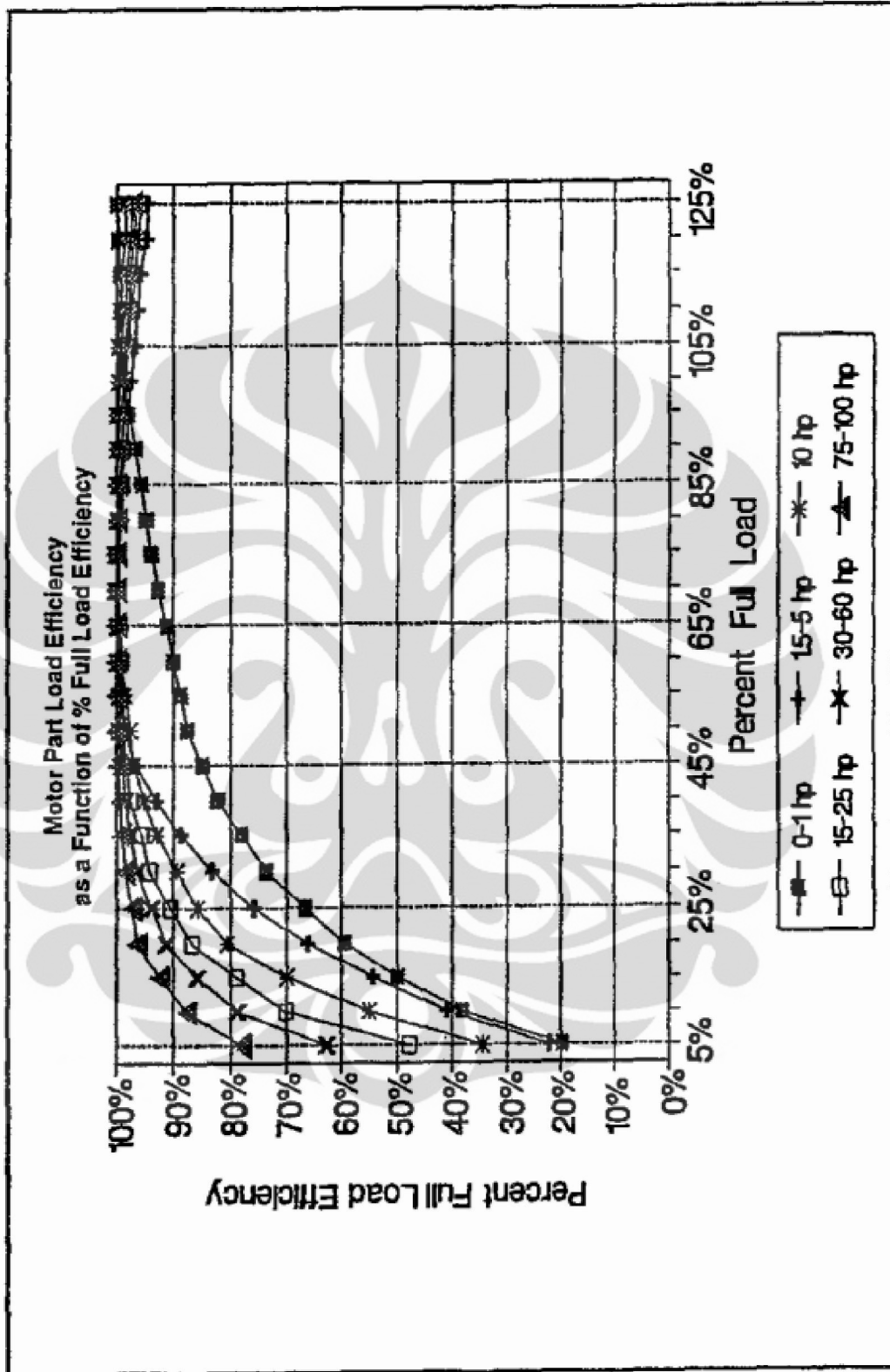
i = bunga efektif (%)

r_1 = inflasi biaya energi (%)

r_2 = nilai pengembalian yang diharapkan (%)

2.3.6.2 Analisa Penentuan Ukuran Motor

Oversizing merupakan salah satu cara untuk menjamin umur motor yang lebih panjang selama fluktuasi beban tiba-tiba maupun penambahan beban yang akan datang. Menggerakkan beban konstan 25 HP dengan motor 50 HP akan menghasilkan kenaikan panas yang lebih rendah daripada menggerakkan beban konstan 25 HP dengan motor 25 HP. Hal ini juga dapat menambah umur motor dan isolasi. Akan tetapi, pentingnya masalah energi sekarang membuat para pembeli motor tidak lagi memperhatikan oversizing. Perhatian ini tidaklah selalu benar, karena efisiensi kerja motor antar 50%-100% relatif sama untuk motor di atas 1 HP. Hal ini ditunjukkan pada gambar 2.15 di bawah ini.⁹



Gambar 2.15 Grafik Efisiensi Motor Sebagai Fungsi Beban.

Selain itu, motor yang lebih besar memang lebih efisien ketimbang motor ukuran kecil. Motor 50 HP yang bekerja dengan beban 50% lebih kecil mengkonsumsi energi ketimbang motor 25 HP yang bekerja pada beban full 100%. Berikut perhitungannya.⁹

Karakteristik Kinerja Motor 25 HP dan 50 HP

230 VAC

	50 HP @ 1/2 Load	25 HP @ Full Load
Arus (A)	75	64
Faktor daya	0,7	0,827
Efisiensi	89%	88,50%

$$\text{Konsumsi Energi (kW)} = \sqrt{3} \times E \times I \times PF \div 1000$$

$$50 \text{ HP kW} = \sqrt{3} \times 230 \times 75 \times 0,70 \div 1000 = 20,91 \text{ kW}$$

$$25 \text{ HP kW} = \sqrt{3} \times 230 \times 64 \times 0,827 \div 1000 = 21,08 \text{ kW}$$

Namun di lain sisi, di dalam aplikasinya sebuah motor juga membutuhkan waktu istirahatnya (idle time) baik untuk maintenance maupun untuk perbaikan kerusakan. Waktu idle untuk motor 50 HP membutuhkan biaya energi yang lebih besar dengan konsumsi energi 70% lebih banyak.

	50 HP @ Idle	25 HP @ Idle
Arus (A)	47,8	25,0
Faktor daya	0,08	0,09

$$\text{Konsumsi Energi (kW)} = \sqrt{3} \times E \times I \times PF \div 1000$$

$$50 \text{ HP kW} = \sqrt{3} \times 230 \times 47,8 \times 0,08 \div 1000 = 1,523 \text{ kW}$$

$$25 \text{ HP kW} = \sqrt{3} \times 230 \times 25,0 \times 0,09 \div 1000 = 0,896 \text{ kW}$$

Dengan menganggap kedua motor bekerja selama 4000 jam per tahun dengan pembagian 2000 jam kerja dan 2000 jam istirahat, dan biaya per kWh sebesar \$0,06, maka penghematan energi motor 25 HP lebih besar \$54 ketimbang motor 50 HP.

$$\text{Biaya Energi} = kW \times \text{total jam} \times \$/\text{kWh}$$

Saat dibebani

$$\text{Biaya motor 50 HP} = 20,91 \times 2000 \times 0,06 = \$2509$$

$$\text{Biaya motor 25 HP} = 21,08 \times 2000 \times 0,06 = \$2530$$

Motor 50 HP lebih hemat \$21

Saat istirahat

$$\text{Biaya motor 50 HP} = 1,523 \times 2000 \times 0,06 = \$183$$

$$\text{Biaya motor 25 HP} = 0,896 \times 2000 \times 0,06 = \$108$$

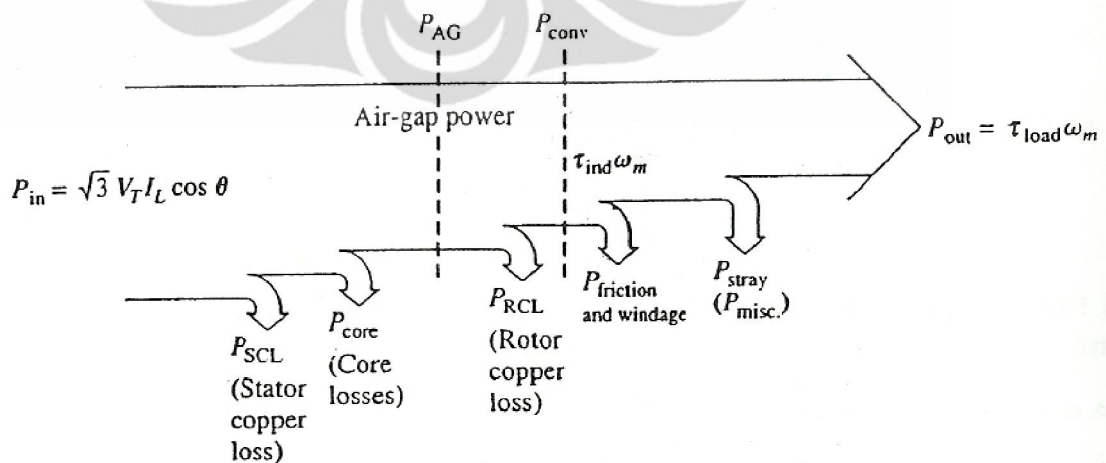
Motor 25 HP lebih hemat \$75

(\$75 - \$21 = \$ 54 penghematan per tahun motor 25 HP dibanding motor 50 HP)

BAB III PROSES PENGUJIAN

Pengujian yang dilakukan dalam Skripsi ini yaitu untuk menentukan keakuratan perhitungan nilai efisiensi suatu motor induksi dengan menggunakan metode perhitungan torsi induksi. Metode ini akan dibandingkan dengan metode perhitungan efisiensi IEEE 841. Perhitungan efisiensi IEEE 841 merupakan perhitungan efisiensi secara langsung yang biasa digunakan untuk mengukur efisiensi suatu motor induksi, sedangkan perhitungan efisiensi metode torsi induksi merupakan metode perhitungan efisiensi secara tidak langsung yang mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan pengukuran secara langsung.. Kedua nilai efisiensi ini didapat dari data-data yang terukur di lab yang kemudian akan dicari nilai erornya untuk didapatkan suatu kesimpulan apakah perhitungan efisiensi yang diusulkan pada Skripsi ini mempunyai tingkat akurasi yang cukup tinggi atau tidak.

Pengukuran IEEE 841 secara langsung yang banyak digunakan orang untuk mengukur suatu nilai efisiensi motor induksi ini, merupakan salah satu dari beberapa jenis pengukuran efisiensi yang dijelaskan pada IEEE. Metode ini mengukur nilai P_{in} dengan memonitor data masukan dan mengukur nilai P_{out} dengan menghubungkan poros motor dengan dinamometer untuk beban yang berbeda-beda.



Gambar 3.1 Diagram Alir Daya Motor Induksi

Pada gambar 3.1 di atas merupakan gambar diagram aliran daya motor induksi. Dari gambar 3.1 di atas, nilai P_{in} didapatkan dari nilai-nilai yang terukur seperti arus masukan, tegangan masukan, dan faktor daya. Sedangkan nilai P_{out} didapat dari nilai torsi beban τ_{load} dan kecepatan motor ω_m . Pada pengukuran secara langsung nilai efisiensi suatu motor induksi dapat dihitung dengan persamaan 3.1 di bawah ini.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{\tau_{load} \times \omega_m}{\sqrt{3} \times V \times I \times \cos \theta} \times 100\% \quad (3.1)$$

dengan :

η	= efisiensi (%)	τ_{load}	= torsi beban (Nm)
P_{in}	= daya masukan (Watt)	ω_m	= kecepatan motor (rpm)
P_{out}	= daya keluaran (Watt)	V	= tegangan stator (Volt)
$\cos \theta$	= faktor daya	I	= arus masukan (Ampere)

Meskipun metode tersebut sangat akurat, namun hal itu tidak sesuai dengan evaluasi di lapangan karena harus melibatkan pelepasan motor dari operasi yang kemudian motor ditempatkan di tempat pengujian dan menghubungkannya dengan dinamometer. Hal ini sangat kompleks, tidak praktis, mahal, dan dapat menghambat proses produksi. Pada setiap pabrik, setiap proses yang satu dengan proses yang lain saling berkaitan satu sama lain, sehingga jika satu proses terhenti maka proses yang lain juga dapat berhenti. Untuk itulah tidak mungkin untuk melepas beban dari motor dan menghubungkannya dengan dinamometer untuk diukur nilai τ_{load} .

Seperti yang telah dijelaskan di atas, pada pengukuran secara langsung nilai P_{out} didapatkan dari perkalian antara torsi beban τ_{load} dengan kecepatan motor ω_m . Namun nilai torsi beban τ_{load} tidak mungkin diukur, untuk itu dalam Skripsi ini, diajukan pengukuran nilai P_{out} secara tidak langsung tanpa harus mengukur nilai torsi beban τ_{load} . Pada pengukuran secara tidak langsung ini, nilai P_{out} didapat dari perkalian antara torsi induksi τ_{ind} dengan kecepatan motor ω_m .

kemudian dikurangi dengan rugi-rugi gesekan angin $P_{friction\&windage}$ dan rugi-rugi stray P_{stray} seperti pada persamaan 3.2 di bawah ini.

$$P_{out} = \tau_{ind} \times \omega_m - P_{F\&W} - P_{SLL} \quad (3.2)$$

dengan

$$\begin{aligned} \tau_{ind} &= \text{torsi induksi (Nm)} & P_{F\&W} &= \text{rugi-rugi gesekan dan angin (Watt)} \\ \omega_m &= \text{kecepatan motor (rpm)} & P_{SLL} &= \text{rugi-rugi stray (Watt)} \end{aligned}$$

Metode perhitungan torsi induksi ini membutuhkan data-data parameter model rangkaian ekuivalen dan spesifikasi motor induksi. Data parameter rangkaian didapatkan dengan pengukuran lapangan seperti arus masukan, tegangan masukan, dan daya masukan. Setelah semua data baik dari pengukuran maupun dari data motor induksi itu sendiri didapat, kemudian akan dilakukan pengolahan data dengan beberapa persamaan untuk mendapatkan nilai efisiensi motor induksi.

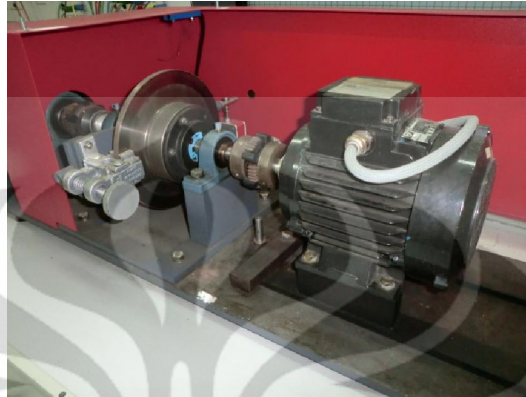
Dengan metode perhitungan torsi induksi ini, sangat membantu khususnya pada pabrik-pabrik yang banyak menggunakan motor induksi. Hal ini disebabkan karena metode ini sederhana, tidak membutuhkan waktu, dan tidak harus melepas beban.

Pengujian dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Listrik Departemen Teknik Elektro FTUI. Untuk menghasilkan data yang akurat, pengujian akan dilakukan beberapa tahap yaitu dengan beban yang berbeda-beda, untuk setiap level tegangan yang berbeda-beda. Sedangkan ukuran motor induksi yang digunakan dalam pengujian yaitu 1,1 - 1,32 kW.

3.1 Peralatan Pengujian

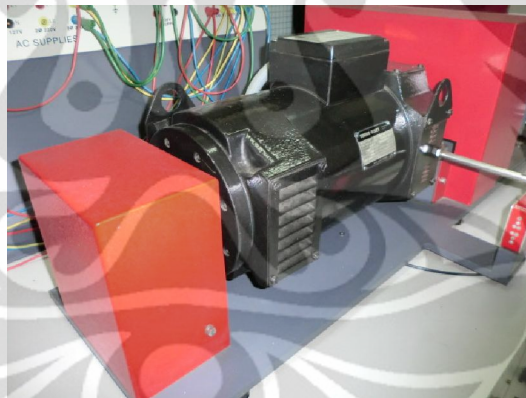
Beberapa peralatan yang digunakan dalam pengujian ini adalah :

1. Motor Induksi Squirrel Cage 1,1 – 1,32 kW, 220 V, 50 Hz, 4 pole.



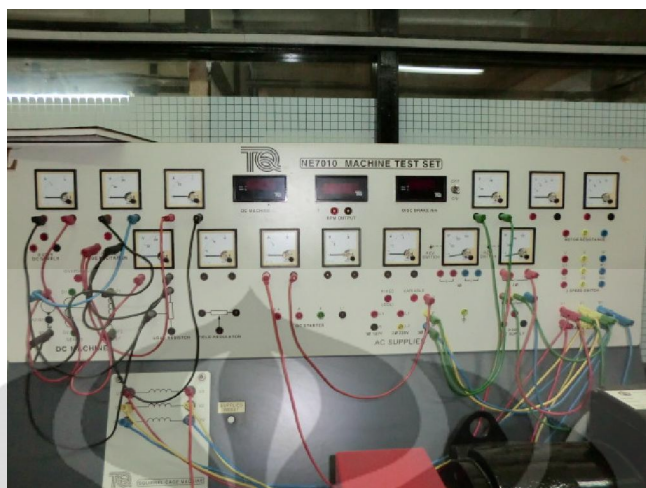
Gambar 3.2 Motor Induksi

2. DC Exciter, sebagai beban yang dikopel dengan motor induksi.



Gambar 3.3 DC Exciter

3. NE7010 Machine Test Set, sebagai alat pengukur yang meliputi :
 - Tachometer untuk mengukur kecepatan motor.
 - Wattmeter untuk mengukur daya masukan.
 - Voltmeter untuk mengukur tegangan masukan.
 - Amperemeter untuk mengukur arus masukan.



Gambar 3.4 NE7010 Machine Test Set

4. Sumber tegangan AC 220 V sebagai sumber daya NE7010 Machine Test Set.
5. Kabel penghubung, sebagai penghubung rangkaian pada alat pengukur.

Sedangkan peralatan tambahan yang digunakan dalam proses pengujian yaitu :

1. Laptop untuk mengumpulkan data.
2. Program untuk pengolahan data.

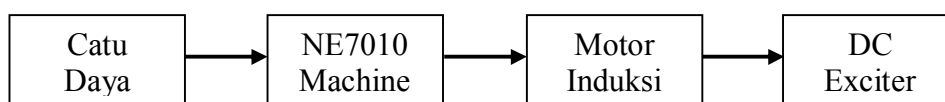
3.2 Rangkaian Pengujian

Dalam pengujian ini, dibutuhkan motor induksi yang akan diukur nilai efisiensinya, serta beban yang dikopel dengan motor induksi. Beban motor induksi itu sendiri adalah DC Exciter yang dapat diatur nilai arus eksitasinya. Dengan mengubah-ubah nilai arus eksitasi ini maka nilai torsi beban juga ikut berubah. Berubahnya nilai torsi beban ini juga akan diikuti dengan perubahan nilai arus masukan stator. Dengan arus stator yang berbeda-beda ini menandakan berubah juga level beban motor induksi. Untuk setiap level beban yang berbeda akan dihitung nilai efisiensi motor induksi.

Untuk mengukur nilai arus stator ini, motor induksi harus dihubungkan dengan NE7010 Machine Test Set sebelum dihubungkan ke catu daya. Selain arus masukan stator, NE7010 Machine Test Set juga dapat digunakan untuk mengukur nilai-nilai seperti tegangan masukan, daya masukan, kecepatan motor, dan torsi motor. Gambar 3.5 di bawah ini menunjukkan rangkaian dan diagram blok rangkaian pengujian.



(a)

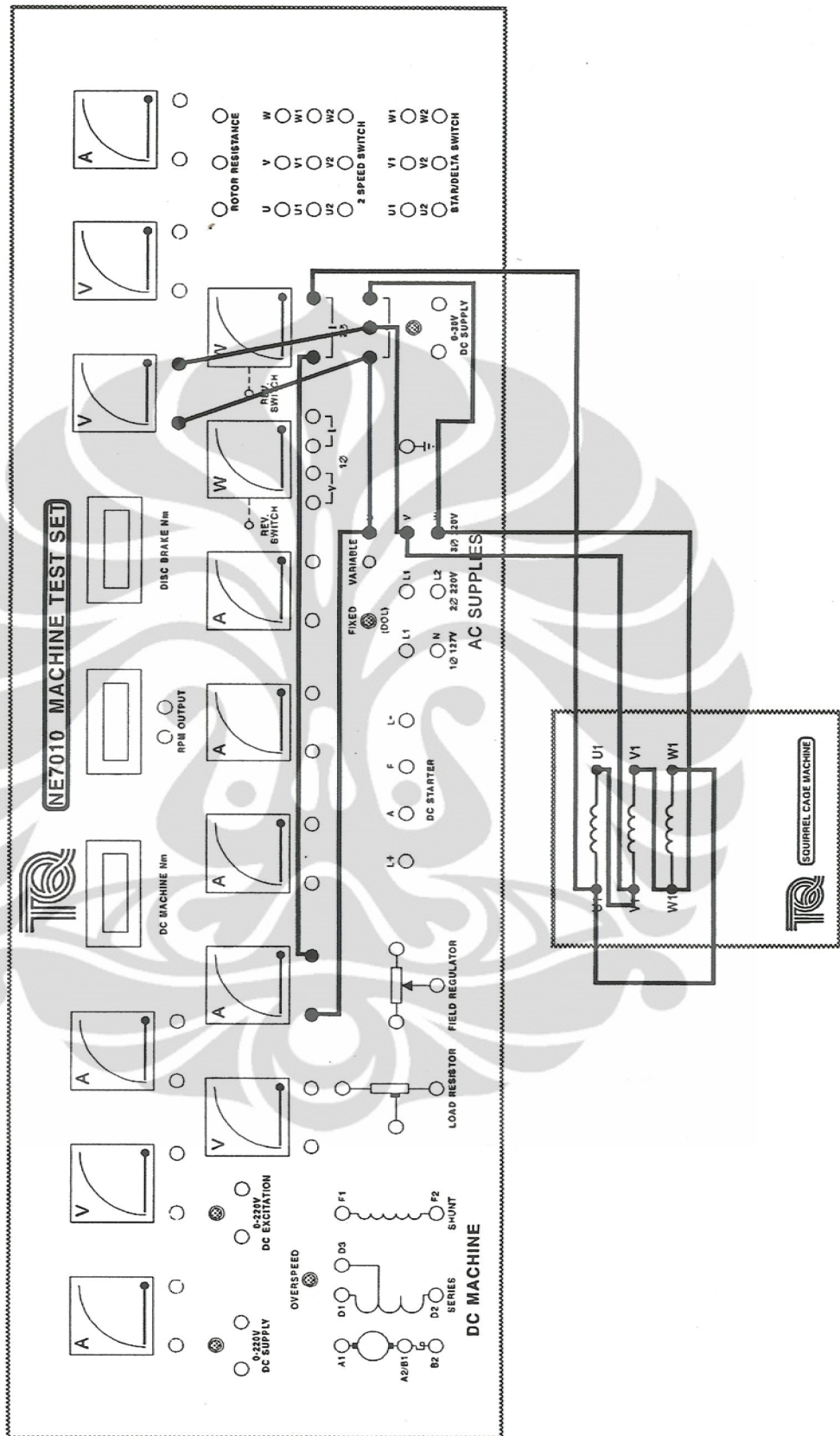


(b)

Gambar 3.5 (a) Rangkaian Pengujian (b) Diagram Blok Rangkaian Pengujian

Pada gambar 3.5 di atas terlihat bahwa rangkaian pengujian merupakan rangkaian terbuka yang artinya tidak ada feedback yang digunakan sebagai masukan. Masukan hanya berasal dari sumber 3 fasa, sedangkan keluaran merupakan kecepatan motor dan torsi motor. Pada pengujian ini, pada setiap nilai beban motor, akan diukur nilai arus masukan, tegangan masukan, daya masukan, dan kecepatan motor. Pengambilan data akan difokuskan pada level beban kinerja motor yaitu antara 50% -100% beban penuhnya, karena pada daerah beban tersebut, nilai efisiensinya cukup tinggi.

NE7010 Machine Test Set digunakan untuk mengukur nilai-nilai parameter motor induksi seperti arus masukan, tegangan, daya masukan, dan lain-lain. Untuk mendapatkan nilai-nilai tersebut maka NE7010 Machine Test Set harus dirangkai sedemikian rupa dengan menggunakan kabel penghubung. Pada voltmeter, harus dipasang paralel dengan rangkaian motor induksi, sedangkan pada amperemeter, harus dipasang seri dengan rangkaian motor induksi. Gambar 3.6 di bawah ini menunjukkan rangkaian pengukuran pada NE7010 Machine Test Set.¹⁰



Gambar 3.6 Rangkaian Pengukuran Pada NE7010 Machine Test Set

3.3 Prosedur Pengujian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam proses pengujian adalah sebagai berikut.

A. Menjalankan Motor Induksi :

1. Merangkai rangkaian percobaan seperti pada gambar 3.6.
2. Memastikan bahwa semua peralatan telah siap dan aman untuk dilakukan percobaan.
3. Memastikan bahwa tahanan rotor terpasang dalam sirkuit dengan cara memutar berlawanan arah jarum jam.
4. Memilih “overload selector” ke 3 ϕ Low.
5. Memilih “supplies selector” ke posisi “variable”.
6. Menjalankan motor dengan cara menaikkan pemutus rangkaian catu daya (MCB) ke posisi “ON”.
7. Meneekan tombol “Supply Reset” pada NE7010 Machine Test Set untuk mereset semua nilai pada pengukur NE7010 Machine Test Set.
8. Meneekan tombol “Start” pada NE7010 Machine Test Set untuk memulai menjalankan motor.
9. Menaikkan perlahan-lahan level tegangan pada auto trafo hingga mencapai level tegangan yang diinginkan.
10. Setelah motor induksi mencapai kecepatan stabil, ubah hubung motor induksi dari hubung wye ke hubung delta.
11. Tunggu sampai mencapai kondisi normal beban.

B. Menjalankan Generator DC :

1. Menekan tombol “DC Supply Excitation CBE” ke posisi 1 (posisi “ON”) yang menghubungkan catu daya ke stator.
2. Mengatur besarnya Excitation Supply sesuai petunjuk (Jangan Melebihi Batas Rating yang diijinkan).

C. Pengambilan Data :

1. Mengukur hambatan line to line pada stator.
2. Mengukur suhu kabel dan motor dengan Infra Red meter.
3. Mencatat nilai tegangan masukan, arus masukan, daya masukan, dan kecepatan motor.
4. Menaikkan torsi beban dengan mengubah arus penguat atau arus eksitasi sesuai petunjuk.
5. Mencatat kembali nilai tegangan masukan, arus masukan, daya masukan, dan kecepatan motor.
6. Torsi yang diberikan tidak melebihi nominal beban penuh (arus eksitasi diusahakan tidak melebihi rating yang diberikan).
7. Masukkan semua data ke dalam tabel data masukan motor seperti pada lampiran B, kemudian lakukan perhitungan.

D. Mematikan Generator DC :

1. Menurunkan arus eksitasi sampai harga minimum.
2. Matikan suplai sumber DC dengan menekan tombol “DC supply Excitation CBE” ke posisi 0 (posisi “OFF”).

E. Mematikan Motor Induksi :

1. Menurunkan nilai tegangan terminal sampai harga minimum dan motor akan berhenti.
2. Menekan saklar “Stop” pada NE7010 Machine Test Set untuk mematikan motor.
3. Menurunkan saklar pemutus catu daya (MCB) ke posisi “OFF”.

3.4 Pengolahan Data Hasil Pengujian

Dalam Skripsi ini akan diajukan sebuah metode yang praktis, murah, sederhana, dan dapat dilakukan kapanpun. Metode ini selanjutnya dapat membantu dalam menganalisa penggantian motor maupun membandingkan motor yang satu dengan yang lain setelah didapatkan nilai efisiensinya.

Metode ini mengukur nilai tegangan masukan, arus masukan, daya masukan, hambatan stator, dan kecepatan motor. Biasanya nilai hambatan stator berubah-ubah sesuai dengan perubahan suhu, persamaan 3.3 di bawah ini dapat digunakan untuk menghitung besar hambatan stator pada suhu tertentu.

$$R_1 = \frac{234,5 + T_o}{234,5 + T_{ref}} R_{ref} \quad (3.3)$$

dengan :

$$\begin{array}{ll} R_1 & = \text{hambatan stator (Ohm)} & R_{ref} & = \text{hambatan referensi stator (Ohm)} \\ T_o & = \text{suhu stator (}^{\circ}\text{C)} & T_{ref} & = \text{suhu referensi stator (}^{\circ}\text{C)} \end{array}$$

Metode ini menitikberatkan pada pemodelan rangkaian ekivalen motor induksi. Nilai parameter model motor induksi didapatkan dengan menggunakan variabel terukur saat tanpa beban maupun di dua nilai beban yang berbeda-beda. Setelah didapat parameter model rangkaiannya, maka nilai τ_{ind} dapat didapatkan, kemudian nilai P_{out} didapat dari τ_{ind} yang dikalikan dengan kecepatan motor ω_m dikurangi rugi-rugi gesekan angin $P_{friction\&windage}$ dan rugi-rugi stray P_{stray} . Nilai rugi-rugi didapatkan dengan asumsi sebagai berikut.¹¹

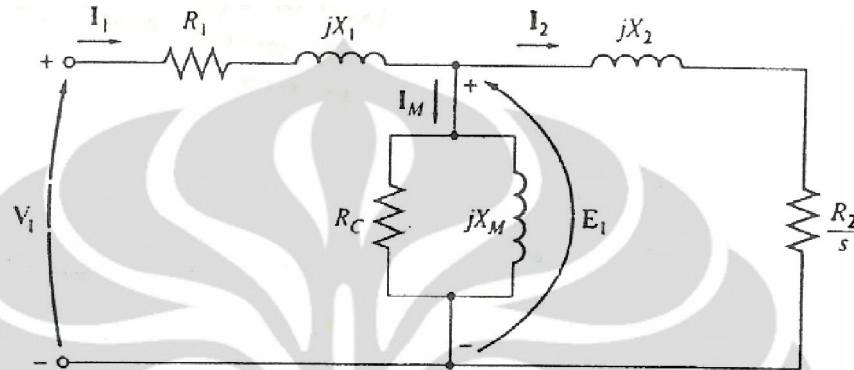
Rugi-rugi tanpa beban dianggap 3,5% dari rating daya keluarannya.

Rugi-rugi gesekan dan angin dianggap 1,2% dari daya keluarannya.

Rugi-rugi stray didapat dari tabel standar IEEE seperti pada tabel 2.2

Daya keluaran P_{out} ini kemudian dibagi dengan daya masukan P_{in} untuk didapatkan nilai efisiensi motor induksinya. Dengan menghitung nilai torsi induksi ini, motor tidak perlu dilepaskan dari bebannya, karena nilai τ_{ind} didapat

dari parameter rangkaian ekivalen motor induksi dan pengukuran di lapangan. Sedangkan nilai-nilai parameter model rangkaian motor induksinya didapat variabel terukur saat tanpa beban maupun saat nilai beban yang berbeda-beda. Gambar 3.7 di bawah ini merupakan parameter model rangkaian ekivalen salah satu fasa dari motor induksi.



Gambar 3.7 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi

Gambar 3.7 di atas melibatkan hambatan rugi inti R_c karena dengan mengabaikannya maka error yang didapatkan pada pengukuran ini cukup signifikan. Model menunjukkan bagian stator mempunyai hambatan stator R_1 dan induktansi bocor L_1 . Pada bagian tengah menggambarkan hambatan rugi inti R_c dan induktansi magnetisasi L_m . Bagian kanan yaitu bagian rotor menunjukkan induktansi bocor L_2 dan hambatan yang berubah-ubah terhadap slip R_2/s .

Dari gambar di atas nilai arus rotor I_2 dapat ditulis seperti 2 persamaan di bawah ini.

$$I_2 = \frac{E_1}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \quad (3.4)$$

$$I_2 = I_1 - I_M \quad (3.5)$$

dengan :

E_1	= tegangan induksi rotor (Volt)	R_2/s	= hambatan rotor (Ohm)
I_1	= arus stator (Ampere)	X_2	= reaktansi rotor (Ohm)
I_2	= arus rotor (Ampere)	I_M	= arus magnetisasi (Ampere)

Persamaan nilai arus rotor I_2 di atas dapat diubah ke fungsi nilai tegangan masukan dan nilai-nilai parameter motor di bawah ini.

$$I_M = \frac{E_1}{R_C} + \frac{E_1}{jX_1} \quad (3.6)$$

$$E_1 = V_1 - I_1(R_1 + jX_1) \quad (3.7)$$

$$I_2 = I_1 - \frac{V_1 - I_1(R_1 + jX_1)}{R_C} - \frac{V_1 - I_1(R_1 + jX_1)}{jX_M} \quad (3.8)$$

dengan :

V_1	= tegangan fasa (Volt)	R_1	= hambatan stator (Ohm)
I_1	= arus stator (Ampere)	X_1	= reaktansi stator (Ohm)
X_M	= reaktansi magnetisasi (Ohm)	R_C	= hambatan inti (Ohm)

Setelah didapat nilai arus rotor I_2 , maka nilai torsi induksi τ_{ind} dapat didapat dari persamaan 3.9 di bawah ini.

$$\tau_{ind} = \frac{3 \times I_2^2 \times R_2}{\omega_{sync} \times s} \quad (3.9)$$

dengan :

τ_{ind}	= torsi induksi (Nm)	ω_{sync}	= kecepatan sinkron (rpm)
I_2	= arus rotor (Ampere)	s	= slip
R_2	= hambatan rotor (Ohm)		

Setelah semua nilai didapat maka nilai efisiensi dapat dihitung dengan persamaan 3.10 di bawah ini.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{\tau_{ind} \times \omega_m - P_{F\&W} - P_{SLL}}{\sqrt{3} \times V \times I \times \cos \theta} \times 100\% \quad (3.10)$$

dengan :

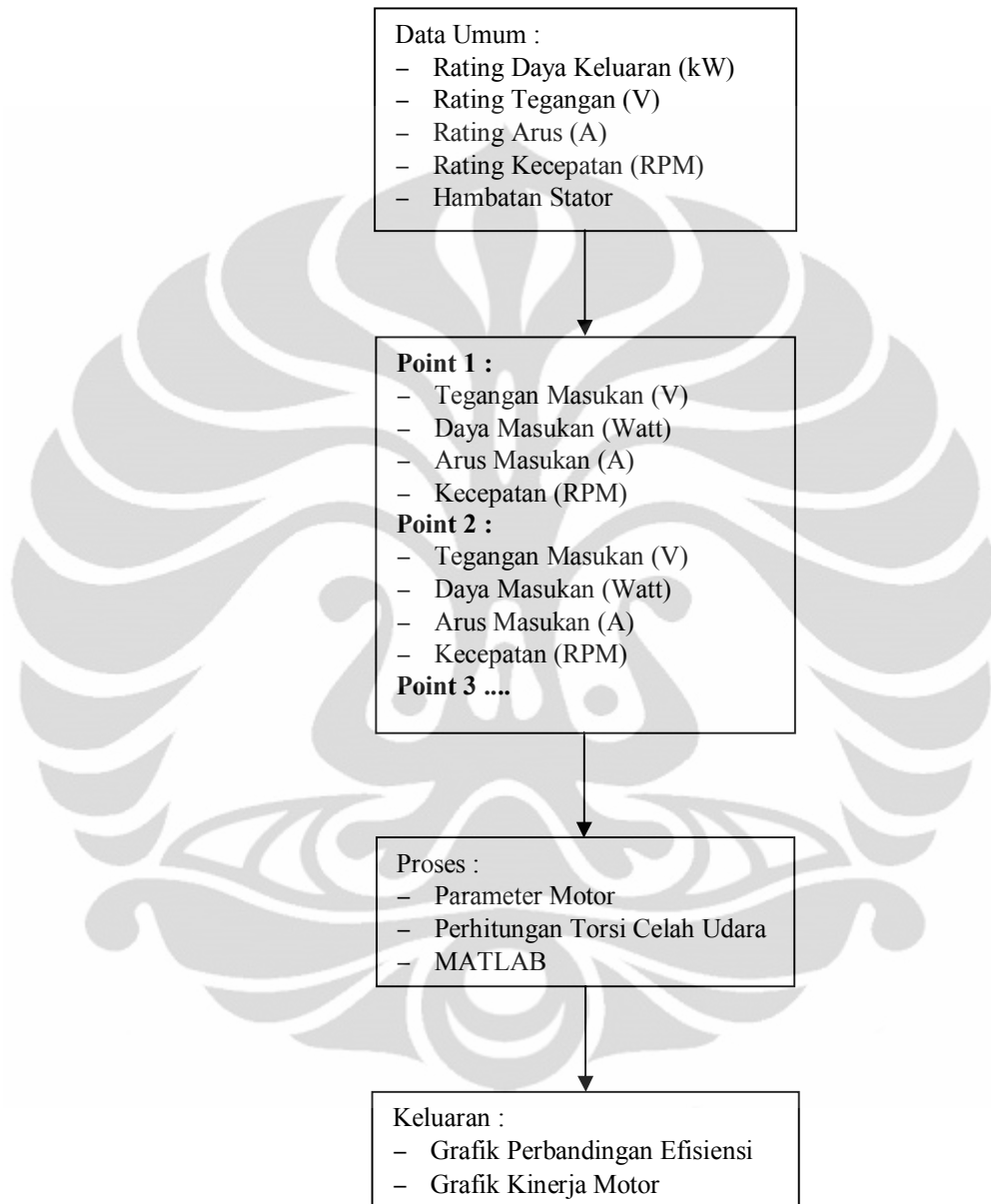
P_{in}	= daya masukan (Watt)	τ_{load}	= torsi induksi (Nm)
P_{out}	= daya keluaran (Watt)	ω_m	= kecepatan motor (rpm)
P_{SLL}	= rugi-rugi stray (Watt)	$P_{F\&W}$	= rugi-rugi gesekan dan angin (Watt)
V	= tegangan stator (Volt)	I	= arus masukan (Ampere)
$\cos \theta$	= faktor daya		

Semua proses perhitungan di atas ini telah dialgoritmakan ke dalam program MATLAB pada lampiran C untuk membantu proses perhitungan. Di dalam program itu, semua nilai parameter model rangkaian dan spesifikasi motor induksi harus dimasukkan. Program itu meminta masukan data seperti besar arus masukan, tegangan masukan, daya masukan, kecepatan motor, dan torsi keluaran.

Setelah memasukkan semua nilai tersebut, program secara otomatis akan melakukan perhitungan dan semua nilai keluaran akan dimunculkan pada layar seperti besar nilai arus rotor, torsi induksi, dan efisiensi.

Pengukuran yang dilakukan pada penelitian ini pada dasarnya sama dengan IEEE metode E1 di mana pengukuran dilakukan saat motor dibebani dan dengan mengasumsikan rugi-rugi stray. Selain itu metode yang digunakan untuk pengukuram motor induksi ini yaitu metode perhitungan torsi induksi. Jadi dapat dikatakan metode pengukuran efisiensi pada proses ini merupakan gabungan antara metode pengukuran efisiensi motor induksi IEEE metode E1 dengan metode perhitungan torsi induksi.

Semua proses pengolahan data hasil percobaan dapat disederhanakan seperti diagram alir pada gambar 3.8 di bawah ini.

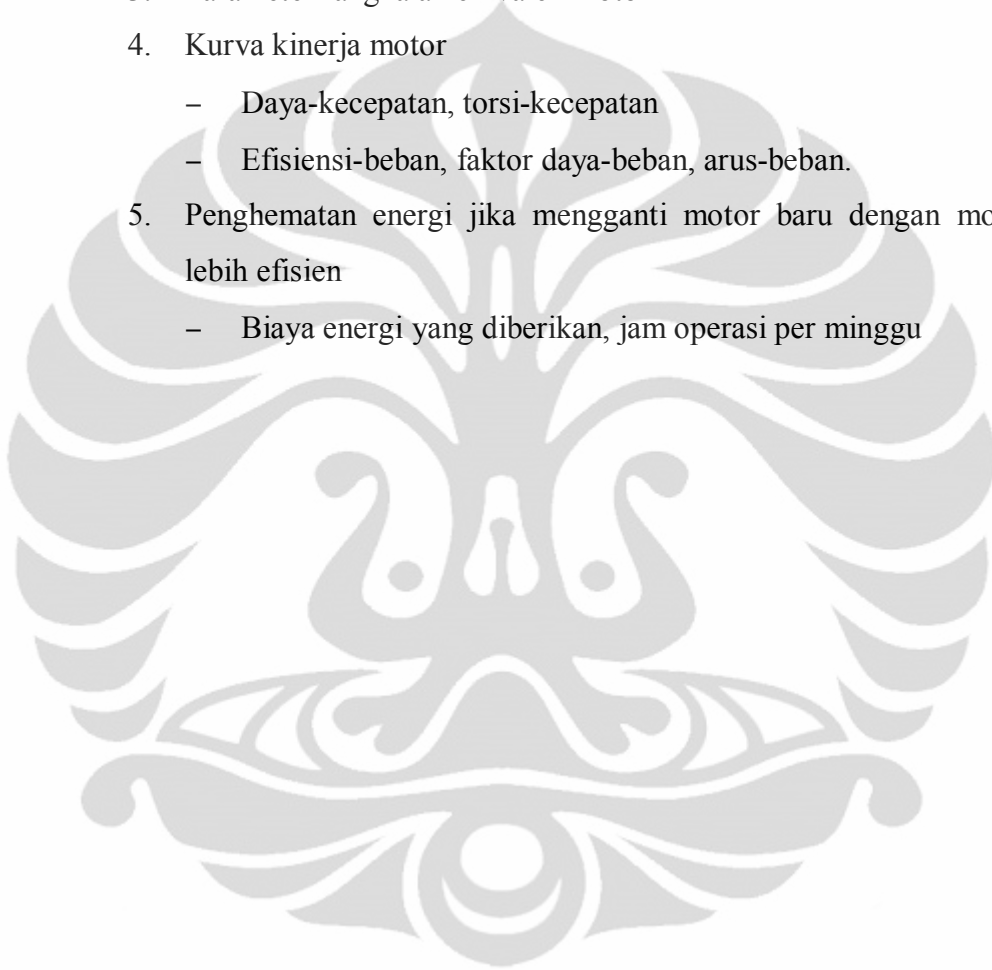


Gambar 3.8 Diagram Alir Proses Pengujian

Setelah data hasil pengujian motor diolah akan didapatkan nilai efisiensi dan semua data hasil perhitungan dimasukkan ke dalam tabel seperti pada lampiran B. Dari data-data tersebut dapat juga didapatkan grafik perbandingan dua metode

pengukuran efisiensi yang berbeda. Selain itu, informasi lain yang dapat diambil dari perhitungan ini yaitu sebagai berikut.

1. Torsi keluaran motor dan daya pada dua titik beban.
2. Efisiensi motor di dua titik beban
 - Termasuk rugi-rugi I^2R , inti, gesekan dan angin, serta beban stray.
3. Parameter rangkaian ekivalen motor
4. Kurva kinerja motor
 - Daya-kecepatan, torsi-kecepatan
 - Efisiensi-beban, faktor daya-beban, arus-beban.
5. Penghematan energi jika mengganti motor baru dengan motor yang lebih efisien
 - Biaya energi yang diberikan, jam operasi per minggu



BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengukuran

Setelah melakukan pengujian di Laboratorium Konversi Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro, dengan menggunakan peralatan penguji seperti dijelaskan pada bab 3, didapatkan sekumpulan data berupa kecepatan motor, daya masukan, torsi keluaran untuk level arus masukan yang berbeda-beda dan tegangan yang berbeda-beda. Berikut ini spesifikasi motor yang digunakan dalam proses pengujian.

Tabel 4.1 Spesifikasi Motor Induksi

Pada pengujian kali ini dilakukan dengan beberapa kali proses pengujian. Proses pengujian ini terdiri dari 4 level tegangan yang berbeda-beda yaitu 200 Volt sampai 230 Volt. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal, sehingga tingkat akurasinya dapat dipercaya. Selain itu, pada kenyataannya level tegangan juga dapat berubah sewaktu-waktu karena fluktuasi beban. Tiap level tegangan tersebut terdiri dari beberapa level beban motor

induksi yaitu antara 25 % sampai 100 % beban penuhnya. Berikut ini data yang diambil dari proses pengujian.

Tabel 4.2 Data Hasil Pengukuran Lab 200 Volt

Tabel 4.3 Data Hasil Pengukuran Lab 210 Volt

Tabel 4.4 Data Hasil Pengukuran Lab 220 Volt

Tabel 4.5 Data Hasil Pengukuran Lab 230 Volt

Dari data di atas, motor induksi diperlakukan berbeda-beda level bebannya. Beban diubah-ubah dengan ditandai adanya perubahan arus masukan dan daya masukan. Dari data di atas, rata-rata diambil sampel pengambilan data sebanyak 10 level beban yang berbeda-beda. Beban yang paling rendah yaitu saat arus masukan motor induksi dan daya masukannya bernilai paling rendah atau berada di urutan teratas. Sedangkan beban yang paling tinggi ditandai dengan besar nilai arus masukan dan daya masukannya paling tinggi atau berada di urutan paling bawah pada tabel tersebut.

Pengambilan data dilakukan secara berurutan dari level beban yang rendah kemudian naik ke level beban yang lebih tinggi. Data pertama yaitu untuk level beban yang paling rendah, didapatkan nilai hasil pengukuran seperti arus masukan, daya masukan, dan kecepatan motor. Kemudian perlahan-lahan level beban dinaikkan, kemudian dicatat lagi nilai seperti arus masukan, daya masukan, dan kecepatan motor. Pencatatan nilai ini dilakukan secara berurutan dari level beban yang paling rendah hingga mencapai nilai level beban yang paling tinggi.

Tabel di atas juga terdapat sebuah kolom yang berisi faktor daya. Faktor daya ini didapatkan bukan dari pengukuran, namun dari perhitungan. Faktor daya dapat didapat dari nilai terukur tegangan masukan, arus masukan, dan daya masukan seperti pada rumus 4.1 di bawah ini.

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \theta \quad (4.1)$$

dengan :

$$\begin{array}{ll} P_{in} & = \text{daya masukan (Watt)} & V & = \text{tegangan stator (Volt)} \\ \cos \theta & = \text{faktor daya} & I & = \text{arus masukan (Ampere)} \end{array}$$

Nilai rating kecepatan motor (spesifikasi motor pada halaman 45) bernilai 1380 rpm, sedangkan rating faktor daya berkisar antara nilai 0,79-0,81. Pada keempat tabel data di atas, terdapat sebuah baris yang berwarna kuning, yang merepresentasikan sebagai nilai rating motor. Pada keempat nilai rating tersebut nilai kecepatan motor dan faktor dayanya tidak sama dengan rating motor yang sebenarnya. Meskipun demikian, nilainya tidak berbeda jauh, sehingga dapat dikatakan eror pengukuran ini cukup kecil.

Jika dilihat dari data yang telah kita ambil, semua nilai baik daya masukan, kecepatan motor, dan faktor daya nilainya berubah-ubah seiring dengan perubahan level beban motor induksi. Semua perubahan nilai seperti arus masukan, daya masukan, faktor daya, dan kecepatan motor terhadap perubahan beban motor induksi akan dianalisa selanjutnya nanti pada bagian terakhir bab ini.

4.2 Data Hasil Pengolahan

Jika semua data di atas telah dimasukkan semua nilainya, kemudian data-data tersebut akan dimasukkan ke dalam program MATLAB untuk dihitung nilai-nilai seperti efisiensinya, daya keluarannya, dan torsi keluarannya. Program MATLAB ini merepresentasikan semua rumus-rumus yang digunakan dalam perhitungan nilai efisiensi motor induksi seperti yang telah dijelaskan pada bab 3 bagian pengolahan data hasil pengujian. Pada perhitungan tersebut akan dijumpai operasi-operasi bilangan kompleks, sehingga program MATLAB ini sangat membantu perhitungan karena sangat praktis, mudah, dan tidak memakan banyak waktu. Dari hasil perhitungan MATLAB tersebut dapat juga didapatkan nilai seperti arus rotor, torsi induksi, slip, efisiensi dan lain-lain. Semua hasil perhitungan tersebut nantinya akan dianalisa untuk mengetahui kinerja motor induksi. Berikut ini program MATLAB untuk menghitung efisiensi sebuah motor induksi

```

disp('
disp('!-----!')
disp('!           MENENTUKAN NILAI EFISIENSI MOTOR INDUKSI           !')
disp('!           DENGAN METODE TORSI CELAH UDARA           !')
disp('!-----!')
disp('

% First, initialize the values needed in this program.
R1 = 2.76;
L1 = 0.02349;
Rc = 773.4942;
Lm = 0.2279;
L2 = 0.02349;
R2 = 2.9;

Power = 1.3;
Frek = 50;
N_sync = 1500;
V_rat = 220;
I_rat = 5;

V_line = 210;
V_phase = 210 / sqrt(3);
P_fw = 30;

disp(['R1 = ' num2str(R1), ', ' ' Ohm '])
disp(['L1 = ' num2str(L1), ', ' ' Ohm '])
disp(['Rc = ' num2str(Rc), ', ' ' Ohm '])
disp(['Lm = ' num2str(Lm), ', ' ' Ohm '])
disp(['L2 = ' num2str(L2), ', ' ' Ohm '])
disp(['R2 = ' num2str(R2), ', ' ' Ohm '])

```

```

disp('')
disp('          NILAI-NILAI SPESIFIKASI MOTOR INDUKSI          ')
disp('!-----!')
disp('!      Power      ! Frekuensi ! Kecepatan ! Rating Tegangan! Rating Arus !')
disp('!      kW         !      Hz     !      RPM  !      Volt      ! Ampere     !')
disp('!-----!')

fprintf('!%8.0f      ! %6.0f      !%8.0f      ! %7.0f      ! %6.0f      !\n', Power,
Frek, N_sync, V_rat, I_rat );
disp('!-----!')
disp('')

I_line = input('MASUKAN NILAI INPUT ARUS (AMPERE) = ');
P_in = input('MASUKAN NILAI DAYA (WATT) = ');
N_m = input('MASUKAN NILAI KECEPATAN MOTOR (RPM) = ');

W_sync = N_sync * 2 * pi / 60;
W_m = N_m * 2 * pi / 60;

%Calculate The Input Power
pf = P_in / ( sqrt(3) * V_line * I_line );

%Calculate slip
s = (W_sync - W_m) / W_sync;

%Calculate rotor current I2
I1 = I_line * cos (acos(pf)) + j * I_line * sin (-acos(pf));
V1 = V_phase;
X1 = 2 * pi * Frek * L1;
Xm = 2 * pi * Frek * Lm;
X2 = 2 * pi * Frek * L2;
I2 = I1 - ( (V1 - I1 * (R1 + j * X1)) / Rc ) - ( (V1 - I1 * (R1 + j * X1)) / (j *
Xm) );

%Calculate induced vltage
V_ind = I2 * ( R2 / s + j * X2 );

%Calculate magnetizing current Im
Im = V_ind / ( Rc + j * Xm);

%Calculate Induction Torque
T_ind = 3 * I2^2 * R2 / (W_sync * s);
r_tind = real(T_ind);
x_tind = imag(T_ind);
T_ind = sqrt(r_tind ^ 2 + x_tind ^ 2);

%Calculate The Output Power
P_out = ( T_ind * W_m - P_fw - 0.018 * P_in )/0.982;
P_sll = T_ind * W_m - P_fw - P_out;
To = P_out / W_m;

%Calculate The Induction Motor Efficiency
E = P_out / P_in * 100;

disp('')
disp(['| ', 'Faktor Daya          = ' num2str(pf), '|', ' '])
disp(['| ', 'Slip                    = ' num2str(s), '|', ' '])
disp(['| ', 'Arus Rotor              = ' num2str(I2), '|', ' Ampere '])
disp(['| ', 'Tegangan Induksi       = ' num2str(V_ind), '|', ' Volt '])
disp(['| ', 'Arus Magnetisasi      = ' num2str(Im), '|', ' Ampere '])
disp(['| ', 'Torsi Induksi         = ' num2str(T_ind), '|', ' Nm '])
disp('')
disp(['| ', 'Rugi Stray              = ' num2str(P_sll), '|', ' Watt '])
disp('')
disp(['| ', 'Torsi Keluaran         = ' num2str(To), '|', ' Watt '])
disp('')
disp(['| ', 'Daya Keluaran          = ' num2str(P_out), '|', ' Watt '])
disp('')
disp(['| ', 'Efisiensi Motor Induksi = ' num2str(E), '|', ' % '])
disp('')

```

Pada baris yang paling awal merupakan nilai-nilai parameter motor seperti hambatan stator, hambatan rotor, dan lain-lain. Nilai-nilai ini didapatkan dari dua data level beban yang berbeda.

Parameter model ini yang nantinya akan digunakan untuk menghitung nilai arus rotor dan torsi celah udara. Selain itu parameter ini juga dapat digunakan untuk menghitung nilai rugi-rugi seperti rugi-rugi panas di stator dan rotor.

Dari program di atas terlihat nilai hambatan stator R1, induktansi stator L1, hambatan inti besi Rc, induktansi magnetisasi Lm, hambatan rotor R2, dan induktansi rotor L2 yang mempunyai nilai masing-masing seperti di bawah ini.

```
R1 = 2.76;
L1 = 0.02349;
Rc = 773.4942;
Lm = 0.2279;
L2 = 0.02349;
R2 = 2.9;
```

Selain nilai parameter model rangkaian motor induksi, di program MATLAB tersebut, nilai-nilai spesifikasi motor induksi juga harus dimasukkan seperti rating tegangan, rating arus, dan lain-lain. Nilai-nilai ini dimasukkan hanya untuk ditampilkan ke layar agar user mengetahui spesifikasi motor induksi yang digunakan dalam proses pengujian. Berikut ini nilai-nilai spesifikasi motor induksi yang ada pada program MATLAB tersebut.

```
Power = 1.3;
Frek = 50;
N_sync = 1500;
V_rat = 220;
I_rat = 5;
```

Setelah semua data dimasukkan pada program MATLAB, sekarang tinggal melakukan penginputan data. Program MATLAB akan meminta inputan kepada user yang berupa arus masukan, daya masukan, dan kecepatan motor. Nilai-nilai ini sangat penting, karena digunakan dalam perhitungan untuk mendapatkan nilai-nilai seperti arus rotor, torsi celah udara, dan efisiensi. Berikut ini perintah-perintah pada MATLAB untuk meminta inputan.

```
I_line = input('MASUKAN NILAI INPUT ARUS (AMPERE) = ');
P_in = input('MASUKAN NILAI DAYA (WATT) = ');
N_m = input('MASUKAN NILAI KECEPATAN MOTOR (RPM) = ');
```

Pada bagian selanjutnya merupakan kumpulan dari rumus-rumus yang dibutuhkan dalam perhitungan efisiensi motor induksi. Rumus-rumus tersebut

telah dijelaskan pada bab 3. Rumus-rumus ini digunakan untuk menghitung nilai-nilai seperti faktor daya, slip, arus rotor, torsi celah udara, dan lain-lain. Berikut ini kumpulan rumus-rumus yang telah diprogramkan ke dalam MATLAB.

```
%Calculate The Input Power
pf = P_in / ( sqrt(3) * V_line * I_line ) ;

%Calculate slip
s = (W_sync - W_m) / W_sync;

%Calculate rotor current I2
I1 = I_line * cos (acos(pf)) + j * I_line * sin (-acos(pf));
V1 = V_phase;
X1 = 2 * pi * Frek * L1;
Xm = 2 * pi * Frek * Lm;
X2 = 2 * pi * Frek * L2;
I2 = I1 - ( (V1 - I1 * (R1 + j * X1)) / Rc ) - ( (V1 - I1 * (R1 + j * X1)) / (j * Xm) );

%Calculate induced vltage
V_ind = I2 * ( R2 / s + j * X2 );

%Calculate magnetizing current Im
Im = V_ind / ( Rc + j * Xm);

%Calculate Induction Torque
T_ind = 3 * I2^2 * R2 / (W_sync * s);
r_tind = real(T_ind);
x_tind = imag(T_ind);
T_ind = sqrt(r_tind ^ 2 + x_tind ^ 2);

%Calculate The Output Power
P_out = ( T_ind * W_m - P_fw - 0.018 * P_in )/0.982;
P_sll = T_ind * W_m - P_fw - P_out;
To = P_out / W_m;

%Calculate The Induction Motor Efficiency
E = P_out / P_in * 100;
```

Bagian terakhir dari program MATLAB ini merupakan bagian yang berisi perintah untuk menampillkan semua hasil perhitungan ke dalam layar. Pada layar nantinya akan ditampilkan semua nilai-nilai hasil perhitungan seperti arus rotor, tegangan induksi, slip, efisiensi, dan lain-lain.

```
disp('
disp(['| ', 'Faktor Daya' = ' num2str(pf),'', ' '])
disp(['| ', 'Slip' = ' num2str(s),'', ' '])
disp(['| ', 'Arus Rotor' = ' num2str(I2),'', ' Ampere '])
disp(['| ', 'Tegangan Induksi' = ' num2str(V_ind),'', ' Volt '])
disp(['| ', 'Arus Magnetisasi' = ' num2str(Im),'', ' Ampere '])
disp(['| ', 'Torsi Induksi' = ' num2str(T_ind),'', ' Nm
'])
disp(['| ', 'Rugi Stray' = ' num2str(P_sll),'', ' Watt
'])
disp(['| ', 'Torsi Keluaran' = ' num2str(To),'', ' Watt
'])
disp(['| ', 'Daya Keluaran' = ' num2str(P_out),'', ' Watt
'])
disp(['| ', 'Efisiensi Motor Induksi' = ' num2str(E),'', ' %
'])
```


The screenshot shows the MATLAB Command Window with the following output:

```

=====
                MENENTUKAN NILAI EFISIENSI MOTOR INDUKSI
                DENGAN METODE TORSI CELAH UDARA
=====

| R1 = 2.76      Ohm      |
| L1 = 0.02349  Ohm      |
| Rc = 773.4942 Ohm      |
| Lm = 0.2279   Ohm      |
| L2 = 0.02349  Ohm      |
| R2 = 2.9      Ohm      |

                NILAI-NILAI SPESIFIKASI MOTOR INDUKSI
|-----|-----|-----|-----|
| Power  | Frekuensi | Kecepatan | Rating Tegangan | Rating Arus |
|  kW    | Hz        | RPM       | Volt             | Ampere      |
|-----|-----|-----|-----|
| 1      | 50        | 1500      | 220              | 5           |
|-----|-----|-----|-----|

MASUKAN NILAI INPUT ARUS (AMPERE) = 3
MASUKAN NILAI DAYA (WATT)          = 740
MASUKAN NILAI KECEPATAN MOTOR (RPM) = 1400

| Faktor Daya          = 0.71207
| Slip                 = 0.066667
| Arus Rotor           = 2.1536-0.78015i Ampere
| Tegangan Induksi     = 99.43938-18.04358i Volt
| Arus Magnetisasi    = 0.12533-0.034928i Ampere
| Torsi Induksi        = 4.3589 Nm
| Rugi Stray           = 2.4004 Watt
| Torsi Keluaran       = 4.1379 Watt
| Daya Keluaran        = 606.6455 Watt
| Efisiensi Motor Induksi = 81.9791 %
>>

```

Gambar 4.1 Contoh Hasil Salah Satu Simulasi MATLAB

Program MATLAB yang lengkap dapat dilihat pada lampiran C. Pada lampiran C tersebut, program MATLAB digunakan untuk mengolah data 210 Volt. Jika akan digunakan untuk menghitung data tegangan yang lain, maka tegangan line V_{line} pada MATLAB harus diubah sesuai dengan tegangan yang digunakan. Jika program MATLAB tersebut dijalankan maka pada layar monitor akan muncul hasil dari program MATLAB seperti gambar 4.1 di atas. Gambar 4.1

Tabel 4.7 Data Hasil Perhitungan MATLAB 210 Volt

Tabel 4.8 Data Hasil Perhitungan MATLAB 220 Volt

Tabel 4.9 Data Hasil Perhitungan MATLAB 230 Volt

Dari semua hasil perhitungan di atas, kemudian akan dibandingkan dengan perhitungan yang dilakukan sesuai dengan prosedur IEEE 841. Dengan membandingkan kedua nilai ini akan terlihat seberapa besar eror yang terjadi. Eror inilah yang nantinya akan digunakan dalam membuat kesimpulan apakah metode perhitungan efisiensi yang diusulkan pada Skripsi ini akurat terhadap pengukuran standar IEEE 841 atau tidak.

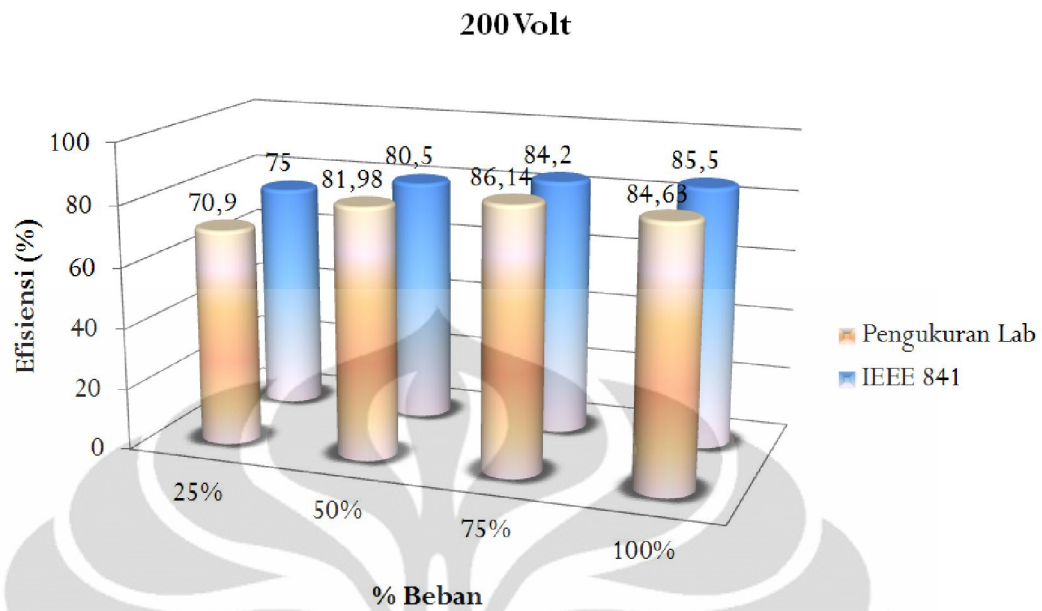
Perbandingan kedua efisiensi ini akan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Digunakannya grafik adalah untuk memudahkan dalam melihat eror yang terjadi. Pada tabel 4.10 sampai tabel 4.13 disajikan semua eror yang terjadi dari level tegangan 200 Volt sampai level tegangan 230 Volt. Namun pada tiap level tegangan hanya beberapa data level beban yang diambil yang kemudian akan dibandingkan nilai efisiensinya, yaitu untuk level beban 25%, 50%, 75%, dan 100%. Berikut ini tabel dan grafiknya.

Tabel 4.10 Perbandingan Efisiensi 200 Volt

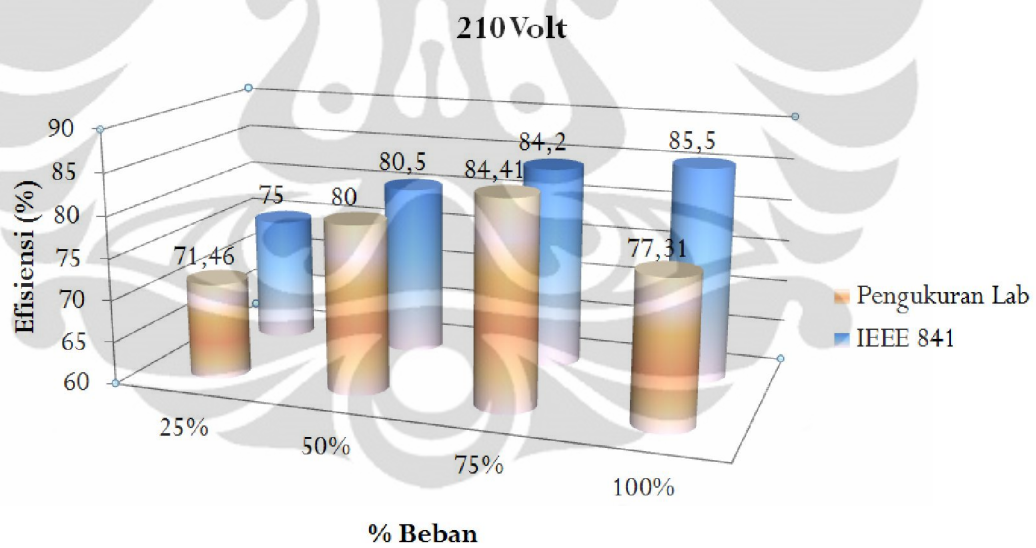
Tabel 4.11 Perbandingan Efisiensi 210 Volt

Tabel 4.12 Perbandingan Efisiensi 220 Volt

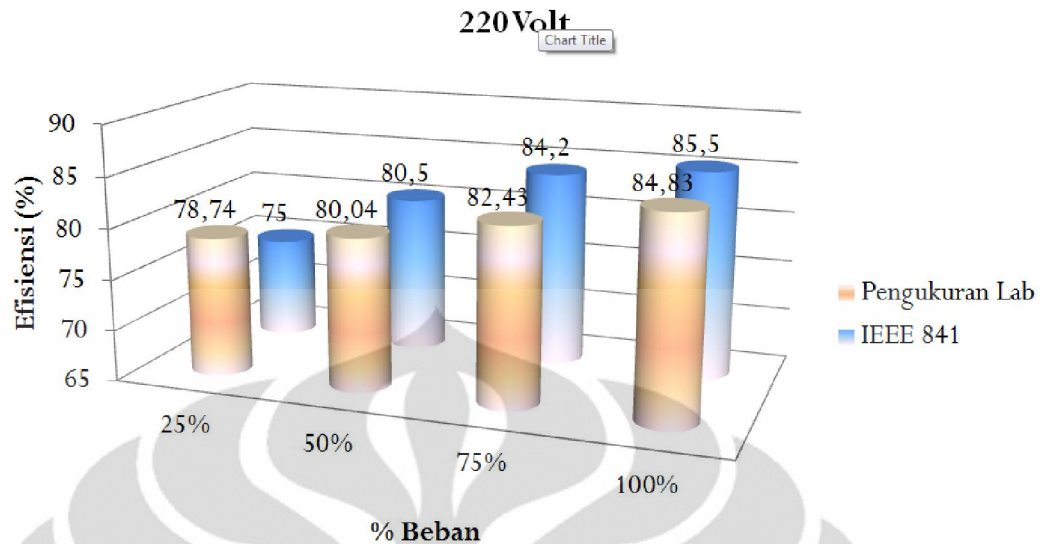
Tabel 4.13 Perbandingan Efisiensi 230 Volt



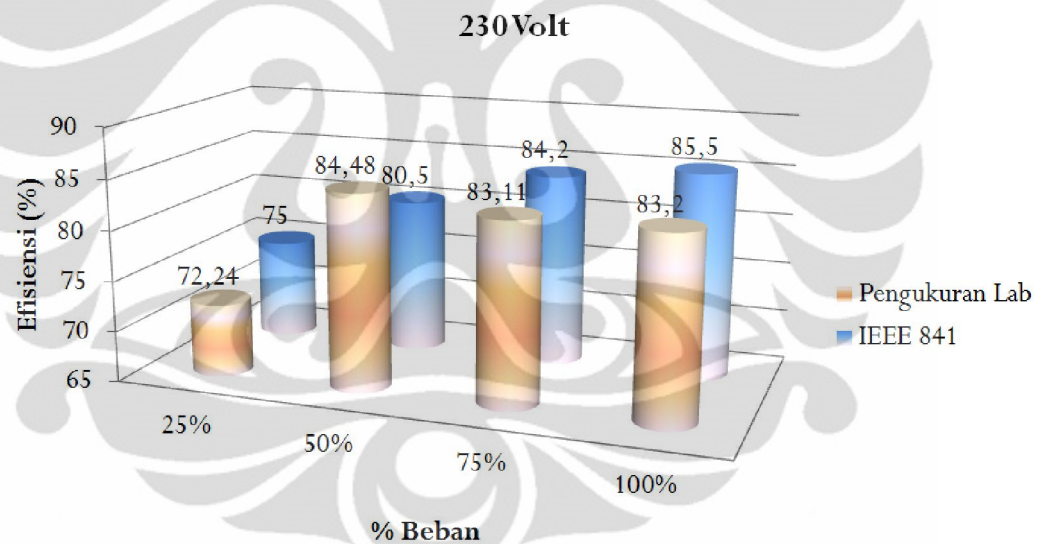
Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Efisiensi 200 Volt



Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Efisiensi 210 Volt



Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Efisiensi 220 Volt



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Efisiensi 230 Volt

Jika dilihat dari tabel dan grafik di atas, dapat disimpulkan bahwa metode yang diusulkan dalam Skripsi ini cukup akurat. Error yang paling kecil terjadi saat data 210 Volt ketika motor induksi dibebani 75% beban penuhnya yaitu dengan nilai error sebesar 0,25%. Sedangkan error yang paling besar terjadi pada saat 210 Volt ketika motor induksi dibebani 100% beban penuhnya, yaitu dengan nilai efisiensi sebesar 9,58%.

Jika dihitung nilai eror rata-rata untuk setiap level tegangan didapatkan data sebagai berikut.

1. Data untuk tegangan 200 Volt, eror rata-ratanya sebesar 2,6575%
2. Data untuk tegangan 210 Volt, eror rata-ratanya sebesar 3,792 %
3. Data untuk tegangan 220 Volt, eror rata-ratanya sebesar 2,11%
4. Data untuk tegangan 230 Volt, eror rata-ratanya sebesar 3,15%

Dari keempat data di atas, dapat didapatkan eror keseluruhan yaitu sebesar 2,93 % dan akurasi sebesar 97,07%. Dengan eror rata-rata yang cukup kecil ini, dapat dikatakan bahwa metode ini cukup akurat. Meskipun demikian, eror yang terjadi juga dikarenakan oleh beberapa kesalahan seperti kesalahan paralaks, maupun rugi-rugi yang tidak dimasukkan dalam perhitungan.

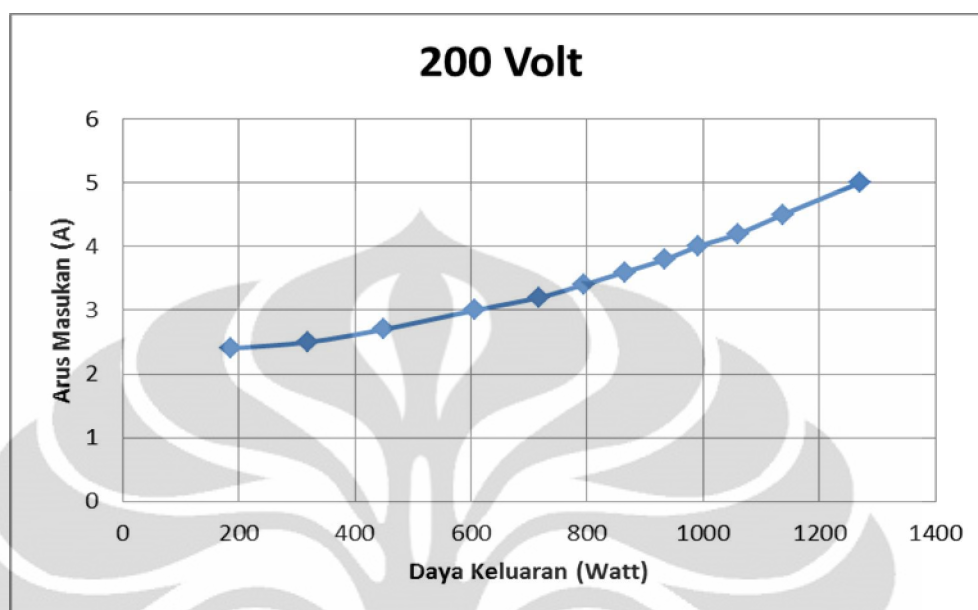
4.3 Grafik Kinerja Motor

Seperti yang telah dijelaskan pada bab 3 sebelumnya, selain membandingkan kedua nilai efisiensi dari kedua metode yang berbeda, dalam Skripsi ini juga dijelaskan mengenai kinerja motor. Kinerja motor ini didapatkan dari hasil tabel keluaran, kemudian data-data keluaran tersebut disajikan ke dalam grafik untuk dianalisa kinerja motornya. Data-data keluaran tersebut disajikan kedalam lima bentuk grafik yaitu :

1. Grafik Arus Masukan vs Daya Keluaran
2. Grafik Efisiensi vs Daya Keluaran
3. Grafik Faktor Daya vs Daya Keluaran
4. Grafik Kecepatan vs Daya Keluaran
5. Grafik Torsi Keluaran vs Kecepatan

Pada analisa kali ini hanya diambil data untuk tegangan 200 Volt saja, karena pada dasarnya, semua grafik baik untuk tegangan 200 Volt sampai 230 Volt bila dilihat hampir sama. Untuk keseluruhan lima grafik dengan beban 200 Volt sampai 230 Volt dapat dilihat pada lampiran D.

1. Grafik Arus Masukan vs Daya Keluaran



Gambar 4.6 Grafik Arus Masukan vs Daya Keluaran 200 Volt

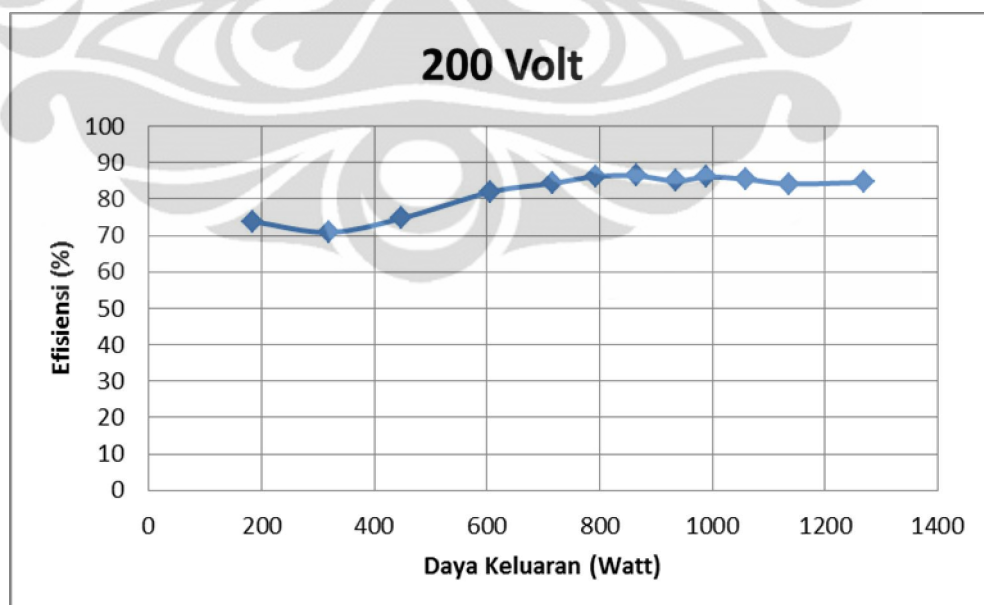
Dari grafik di atas terlihat bahwa semakin besar daya keluaran maka makin besar arus masukan yang ditarik. Hal ini sesuai dengan kenyataan bahwa semakin besar beban motor induksi maka makin besar daya masukan yang ditarik motor induksi. Semakin besar daya masukan makin besar juga arus masukan yang harus diambil dari sistem.

Namun bila dicermati grafik tersebut, hubungan antara daya keluaran dengan arus masukan tidaklah benar-benar linear, namun cenderung membentuk hubungan kuadratik. Artinya besar penambahan daya keluaran tidak sebanding dengan besar penambahan arus masukan. Dari grafik tersebut terlihat dengan sedikit saja menambah beban motor induksi maka penambahan pada arus masukan akan terlihat bertambah secara signifikan daripada penambahan bebannya. Hal ini disebabkan karena makin besar arus masukan, makin besar juga fluks bocor pada inti. Dengan membesarnya fluks bocor pada inti ini akan menyebabkan rugi-rugi motor induksi semakin besar, sehingga arus yang seharusnya digunakan untuk magnetisasi tidak banyak bertambah dan menyebabkan daya keluaran tidak bertambah secara signifikan.

Selain itu, faktor-faktor lain seperti usia motor, perawatan, pemasangan motor juga berpengaruh pada masalah ini. Grafik ini juga sebenarnya hampir sama dengan generator sinkron di mana hubungan antara daya keluaran dengan biaya bahan bakar yang digunakan membentuk hubungan yang kuadratik. Hal ini artinya bahwa jika kita menambah beban sedikit saja pada generator, maka rupiah yang harus dikeluarkan untuk penambahan daya sangat signifikan jumlahnya. Jadi dapat dikatakan bahwa generator dan motor induksi mempunyai hubungan masukan dengan keluaran yang sama, yaitu sama-sama membentuk hubungan kuadratik. Namun bedanya masukan pada generator berupa biaya bahan bakar, sedangkan pada motor induksi masukannya berupa arus.

Grafik ini nantinya dapat digunakan sebagai acuan untuk menentukan rentang nilai arus untuk daerah operasi kerja motor induksi. Selain itu grafik arus masukan vs daya keluaran ini dapat dihubungkan dengan grafik yang lain seperti grafik efisiensi vs daya keluaran maupun grafik faktor daya vs daya keluaran untuk didapatkan nilai arus masukan agar kinerja motor induksi optimal.

2. Grafik Efisiensi vs Daya Keluaran



Gambar 4.7 Grafik Efisiensi vs Daya Keluaran 200 Volt

Dari grafik di atas terlihat bahwa semakin besar daya keluaran motor induksi maka makin besar pula efisiensi motor induksi. Pada gambar tersebut terlihat pada daerah beban 800-1300 Watt atau pada 60%-100% beban penuhnya, nilai efisiensi motor induksi cenderung bertahan di satu titik nilai, namun di daerah di bawah 60% beban penuhnya, nilai efisiensi motor induksi cenderung menurun secara drastis. Hal ini mengindikasikan bahwa untuk daerah beban di bawah 60% beban penuhnya, motor induksi bekerja tidak terlalu efisien, dan untuk daerah kerja beban 60%-100% beban penuhnya, motor induksi beroperasi secara efisien. Hal ini sesuai dengan kenyataan di lapangan bahwa semua motor induksi biasanya beroperasi pada nilai beban 60%-100% beban penuhnya agar didapatkan nilai efisiensi motor yang cukup tinggi. Nilai efisiensi yang kecil pada beban yang rendah ini disebabkan oleh rugi-rugi motor induksi.

Seperti yang telah dijelaskan pada bab 2 sebelumnya, bahwa pada motor induksi terdapat dua jenis rugi yaitu rugi yang berubah-ubah nilainya sesuai dengan beban, dan rugi yang konstan. Karena rugi-rugi konstan tidak bergantung dengan perubahan beban, sedangkan rugi-rugi yang berasal dari kumparan stator dan rotor berbanding lurus dengan kuadrat arus, akan menyebabkan efisiensi motor induksi jatuh secara signifikan pada beban yang rendah.

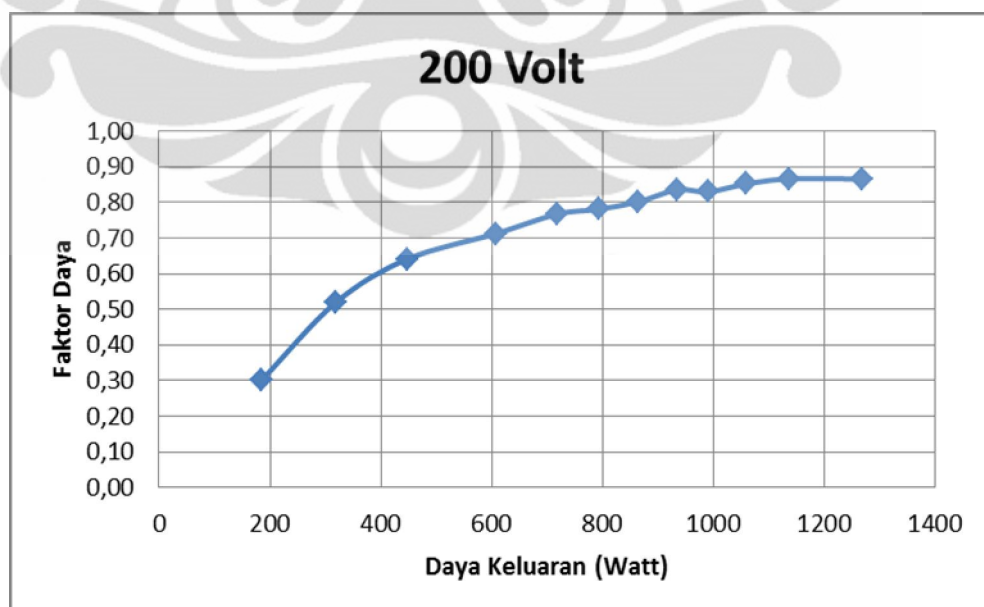
Hal lain yang perlu diperhatikan yaitu tentang magnetisasi pada motor induksi. Rangkaian ekuivalen motor induksi mempunyai sifat induktif yang artinya semua energi yang dihasilkan tidak semuanya diubah ke dalam energi mekanik namun juga dapat diubah ke energi magnetik. Saat tanpa beban, nilai slip sangatlah kecil, atau dapat dikatakan mendekati nol, hal ini akan menyebabkan nilai hambatan rotor R_R/s akan menjadi tak terhingga. Oleh karena itu, motor akan menggunakan semua arus masukan hanya untuk diubah ke dalam bentuk energi magnetik. Dengan tidak adanya energi mekanik ini, menyebabkan nilai efisiensinya nol. Dengan bertambahnya beban sedikit demi sedikit, maka slip juga akan makin bertambah. Bertambahnya slip ini akan menyebabkan nilai hambatan rotor efektif R_R/s akan berkurang, sehingga akan menyebabkan timbulnya arus pada rotor. Arus masukan sekarang tidak hanya diubah ke bentuk energi magnetik, namun juga diubah ke dalam bentuk energi mekanik. Dengan semakin

bertambahnya energi mekanik dengan energi magnet yang nilainya tetap, menyebabkan motor lebih efisien atau dapat dikatakan nilai efisiensi motor meningkat.

Jika dilihat dari keempat grafik pada grafik efisiensi vs daya keluaran dapat disimpulkan bahwa nilai optimal efisiensi motor induksi yang diuji berkisar antara nilai 82%-86% dengan pembebanan di daerah antara 60%-100% beban penuhnya. Sedangkan untuk nilai efisiensi maksimum keempat grafik berbeda-beda dengan data sebagai berikut.

1. Untuk data 200 Volt, efisiensi maksimumnya 86,49% pada saat beban 864,90 Watt atau saat 66,5% beban penuhnya.
2. Untuk data 210 Volt, efisiensi maksimumnya 86,57% pada saat beban 1211,98 Watt atau saat 93,2% beban penuhnya.
3. Untuk data 220 Volt, efisiensi maksimumnya 84,83% pada saat beban 1272,45 Watt atau saat 97,9% beban penuhnya.
4. Untuk data 230 Volt, efisiensi maksimumnya 85,58% pada saat beban 1001,29 Watt atau saat 77% beban penuhnya.

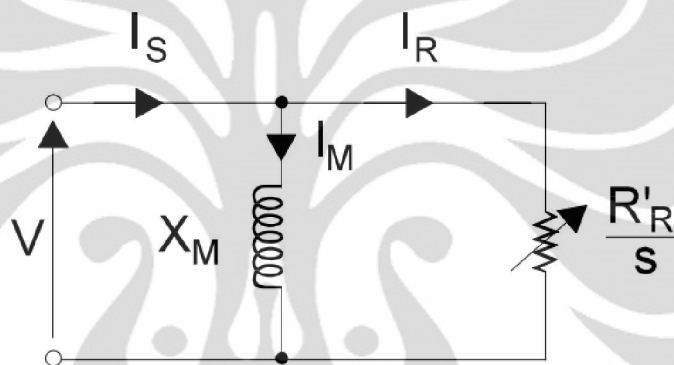
3. Grafik Faktor Daya vs Daya Keluaran



Gambar 4.8 Grafik Faktor Daya vs Daya Keluaran 200 Volt

Dari grafik di atas terlihat bagaimana hubungan antara daya keluaran dengan faktor daya. Saat starting motor, faktor daya biasanya berada di nilai 10%-25%, dan naik saat kecepatan rotor bertambah seperti gambar di atas. Faktor daya akan bertambah dengan bertambahnya beban. Pertambahan faktor daya ini sama dengan penambahan efisiensi motor induksi, di mana saat beban rendah, perubahannya sangat signifikan, sedangkan saat beban tinggi perubahannya tidaklah terlalu signifikan.

Namun secara keseluruhan dapat disimpulkan dari grafik di atas tersebut, bahwa semakin besar beban maka semakin besar pula faktor dayanya. Hal ini sebenarnya telah dijelaskan pada bab 3.



Gambar 4.9 Rangkaian Sederhana Motor Induksi

Pada gambar 4.9 di atas merupakan rangkaian motor induksi yang telah disederhanakan, terlihat bahwa nilai I_S merupakan penjumlahan vektor antara I_M dengan I_R

Arus reaktif magnetisasi I_M adalah arus yang digunakan untuk menghasilkan medan magnet putar dan besar nilai arus ini tidak bergantung terhadap besar beban. Arus ini ketinggalan 90° terhadap tegangan stator dan besarnya bergantung pada tegangan stator dan frekuensinya. Untuk menjaga fluks yang konstan pada motor, maka arus I_M juga harus dijaga konstan dengan menjaga konstan nilai rasio V/f .

$$X_M = j\omega L_M = j(2\pi f)L_M \quad (4.2)$$

$$I_M = \frac{V}{j(2\pi f)L_M} \quad (4.3)$$

$$I_M = k\left(\frac{V}{f}\right) \quad (4.4)$$

di mana k = konstanta

dengan :

V = tegangan stator (Volt)

X_M = reaktansi magnetisasi (Ohm)

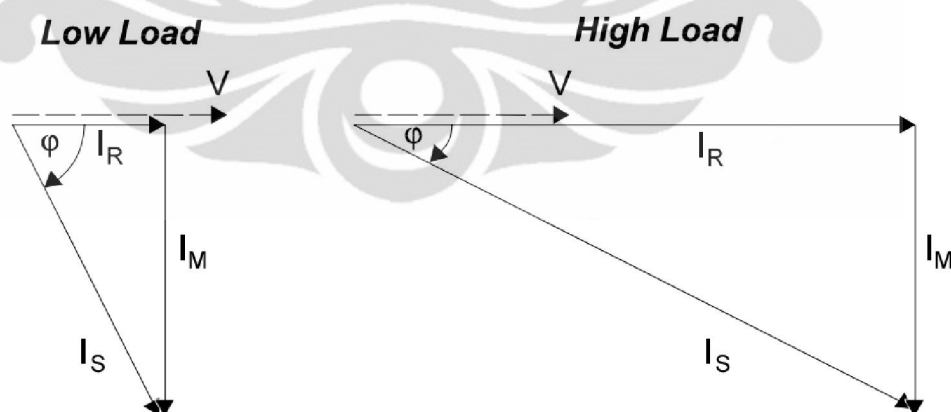
I_M = arus magnetisasi (Ampere)

L_M = induktansi magnetisasi (Henry)

f = frekuensi (Hz)

Sedangkan arus aktif I_R adalah arus yang menghasilkan torsi rotor dan nilainya bergantung pada beban mekaniknya dan sebanding dengan slip. Saat tanpa beban, di mana nilai slip s kecil, arus ini akan kecil. Semakin besar beban dan nilai slip bertambah maka arus ini juga akan bertambah secara proporsional. Arus ini fasanya sama dengan tegangan stator.

Kedua arus I_M dan I_R dapat dijelaskan pada gambar 4.10 di bawah ini dengan jenis beban yang berbeda yaitu beban rendah dan beban tinggi.



Gambar 4.10 Diagram Fasa Arus dan Tegangan Stator

Dari kedua gambar di atas terlihat bahwa saat beban rendah nilai arus aktif I_R lebih kecil dibandingkan saat beban tinggi. Dengan nilai arus magnetisasi yang

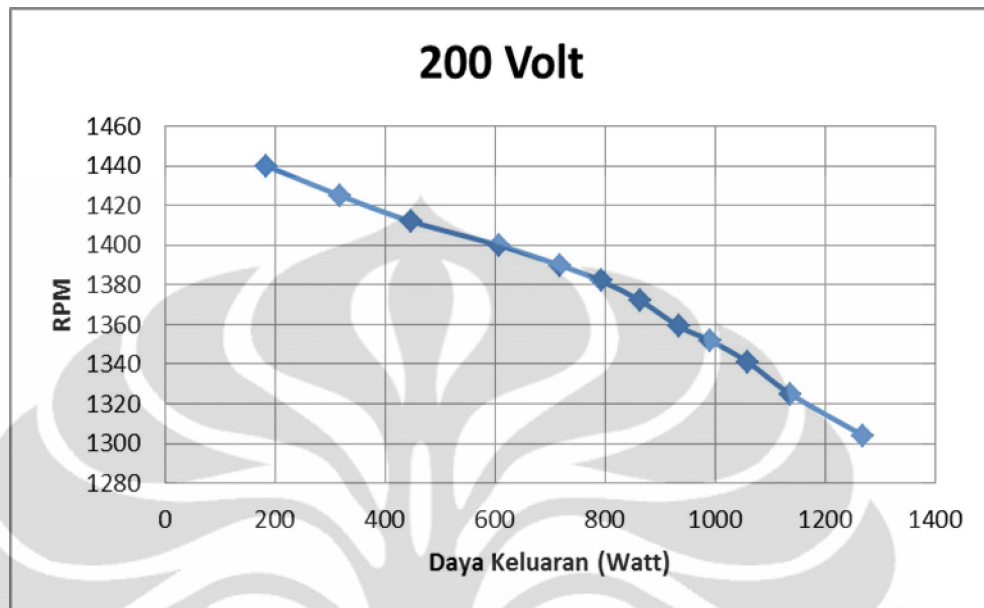
konstan I_M maka besar arus stator I_S saat beban rendah juga lebih kecil dibandingkan dengan arus stator I_S saat beban tinggi. Dari gambar di atas terlihat bahwa baik saat beban rendah maupun saat beban tinggi arus rotor I_R satu fasa dengan tegangan stator dan arus magnetisasi I_M ketinggalan 90° terhadap tegangan stator. Namun fasa arus stator I_S terhadap tegangan stator berbeda fasanya saat beban rendah dan saat beban tinggi. Dari gambar di atas terlihat bahwa semakin besar beban maka makin kecil sudut fasa ϕ , hal ini akan menyebabkan nilai faktor daya $\cos \phi$ makin bertambah.

Hal ini juga dapat dianalogikan sebagai berikut. Motor yang sedang tidak dibebani dianalogikan seperti sebuah trafo yang sisi sekundernya tidak dihubungkan dengan beban. Hanya hambatan kecil yang direfleksikan dari sekunder (rotor) ke primer (stator). Sehingga catu daya melihat beban reaktif dengan faktor daya yang rendah yaitu 10%. Saat rotor dibebani, komponen resistif yang direfleksikan dari rotor ke stator mulai bertambah sehingga menyebabkan faktor daya juga bertambah.

Pada grafik faktor daya vs daya keluaran untuk keempat grafik dapat dikatakan hampir sama. Nilai faktor daya akan semakin naik jika beban motor induksi juga bertambah. Meskipun penambahannya tidak sama, namun dapat disimpulkan bahwa faktor daya pada suatu nilai beban akan lebih tinggi dari faktor daya pada beban yang lebih rendah. Nilai faktor daya maksimumnya untuk keempat grafik hampir sama yaitu bernilai maksimum untuk data beban yang paling tinggi.

Selain itu, grafik ini juga dapat dijadikan sebagai ukuran untuk menentukan batas aman memasang beban motor induksi. Dengan data ini, dapat dilihat batas nilai beban motor agar faktor daya tidak melewati batas minimum yang diterapkan PLN, sehingga tidak terkena penalti.

4. Grafik Kecepatan vs Daya Keluaran



Gambar 4.11 Grafik Kecepatan vs Daya Keluaran 200 Volt

Gambar di atas menjelaskan bagaimana hubungan antara kecepatan dengan perubahan daya keluaran. Pada gambar di atas, terlihat bahwa semakin besar daya keluaran maka kecepatan motor akan semakin kecil. Hal ini berarti bahwa hubungan kecepatan dengan daya keluaran berbanding terbalik, namun hal ini tidak sesuai dengan fakta bahwa kecepatan berbanding lurus dengan daya keluaran sesuai dengan persamaan 4.5 di bawah ini.

$$P_{out} = \tau_{load} \times \omega_m \quad (4.5)$$

dengan :

P_{out} = daya keluaran (Watt)

τ_{load} = torsi beban (Nm)

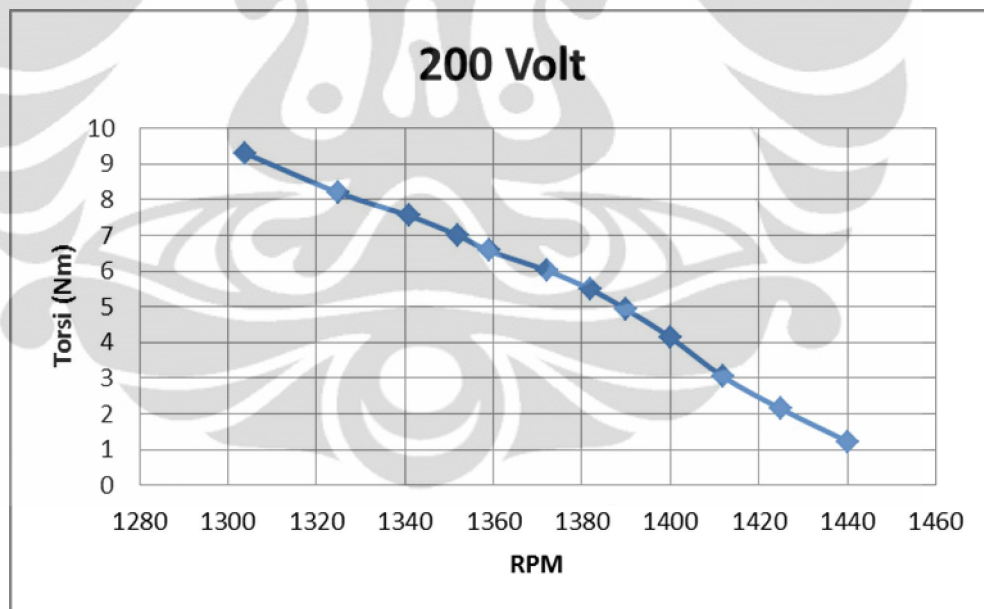
ω_m = kecepatan motor (rpm)

Ketidakesuain grafik dengan rumus tersebut karena alasan sebagai berikut.

1. Nilai τ_{load} juga ikut berubah-ubah untuk perubahan nilai P_{out} .
2. Besar kenaikan τ_{load} lebih cepat daripada besar kenaikan P_{out} .

Grafik ini nantinya dapat digunakan sebagai masukan untuk menentukan rentang daerah nilai kecepatan motor induksi. Jika dilihat dari keempat grafik dapat disimpulkan bahwa motor induksi yang diuji mempunyai rentang kecepatan antara 1300-1440 rpm. Sama seperti grafik arus masukan vs daya keluaran, grafik kecepatan vs daya keluaran ini juga dapat dijadikan sebagai sumber informasi mengenai penentuan kecepatan motor induksi agar motor induksi dapat bekerja secara optimal

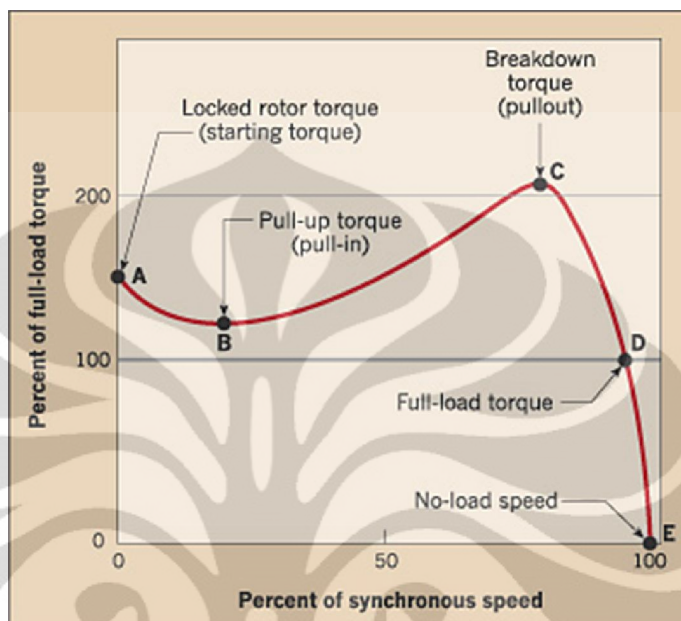
5. Grafik Torsi Motor vs Kecepatan



Gambar 4.12 Grafik Torsi Motor vs Kecepatan 200 Volt

Gambar di atas menjelaskan tentang bagaimana hubungan antara torsi motor dengan kecepatan. Dari gambar di atas terlihat bahwa semakin besar kecepatan motor maka torsi motor akan semakin kecil, sehingga dapat dikatakan hubungan

antara torsi motor dengan kecepatan berbanding terbalik. Grafik ini sebenarnya sama dengan grafik karakteristik torsi vs kecepatan motor induksi seperti yang telah dijelaskan pada bab 2.



Gambar 4.13 Grafik Torsi-Kecepatan Motor Induksi

Dari kurva karakteristik torsi-kecepatan di atas, terlihat bahwa daerah kerja motor induksi berada pada titik D hingga titik E. Jika dilihat garis DE tersebut, dapat disimpulkan bahwa hubungan torsi induksi berbanding terbalik dengan kecepatan. Hal ini sama dengan apa yang terjadi pada grafik proses pengujian. Grafik pada proses pengujian merupakan bagian garis dari kurva karakteristik torsi-kecepatan motor induksi, yaitu pada garis DE (sebelah kanan titik breakdown torsi).

Grafik torsi motor vs kecepatan ini dapat digunakan sebagai sumber informasi untuk menentukan nilai kecepatan motor agar motor bekerja secara baik. Grafik ini dapat menentukan berapa batas aman torsi motor agar motor induksi tetap berada pada batas amannya. Jika motor induksi melewati torsi batas amannya, maka dapat membuat motor bekerja secara tidak normal, dan dapat merusak motor itu sendiri.

BAB V KESIMPULAN

1. Metode perhitungan torsi induksi membutuhkan data-data spesifikasi motor induksi, parameter rangkaian model motor induksi, pengukuran di lapangan, dan mempunyai eror antara 0,25% sampai 9,58% dengan tingkat akurasi sebesar 97,07%.
2. Nilai optimal efisiensi motor induksi berada di antara nilai 60%-100% beban penuhnya, dan faktor daya bernilai maksimum saat berada pada 100% beban penuhnya.
3. Perhitungan efisiensi dari data pengukuran tegangan, arus, daya dan putaran rotor sangat sederhana, murah, dan tidak perlu melepas motor dari bebannya sehingga tidak akan mengganggu kelancaran proses produksi.
4. Metode perhitungan torsi induksi dapat digunakan nantinya dalam mengevaluasi pemakaian energi listrik di dalam sebuah pabrik.

DAFTAR REFERENSI

1. Turner M.W., McCornick V.E., Cleland J.G., *Efficiency Optimization Control of AC Induction Motors: Initial Laboratory Results*. National Risk Management, United States.
2. Corino, S., Romero, E., Mantilla, L.F. *How the efficiency of induction motor is measured?*. Department of Electrical Engineering and Energy Universidad de Cantabria, Spain.
3. R. Kuphaldt, Tony (2006). *Lessons In Electric Circuits, Volume II – AC*.
4. Cowem, Ed (2004). *Understanding Induction Motor Nameplate Information*. Baldor Electric Co.
http://ecmweb.com/mag/electric_understanding_induction_motor/
5. Electric Machines Committee. *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. American National Standards Institute.
6. Ricardo, Andrade, Pontes T. *Three-Phase Induction Motors Energy Efficiency Standards—A Case Study-*. Brazil
7. Bureau of Energy Efficiency (2004). *Energy Efficiency in Electrical Utilities*. Ministry of Power, India.
8. El-Ibiary, Yehia (2003). *An Accurate Low-Cost Method for Determining Electric Motor's Efficiency for the Purpose of Plant Energy Management*. IEEE Transactions on Industry Applications Vol 39.
9. P. Bloch, Heize. (1998). *Improving Machinery Reliability*. Oxford : Elsevier's Science & Technology Rights Department.
10. TecQuipment Limited. *NE 7010 Electrical Machine Test Bench*. Nottingham, England.
11. Chapman, Stephen J. (2002). *Electric Machinery and Power System Fundamentals*. New York: McGraw-Hill.
12. Schiferl, Rich. *An Accurate Method to Determine Electric Motor Efficiency While the Motor is in Operation*. Rockwell Automation.



LAMPIRAN A

Efisiensi Motor Standar IEEE 841

Output P_n [HP]	Frame	Full load speed n_n [min ⁻¹]	Full load torque T_n [Lb·Ft]	Locked rotor torque T_L/T_n [-]	Breakdown torque T_b/T_n [-]	Full load current I_n at nom. voltage					Efficiency η [%]			Power factor $\cos\phi$ [-]			Design Code letter	Service factor SF [-]	Moment of inertia Wk^2 [Lb·Ft ²]	Weight foot mounted motor [Lbs]
											2/4 P_n	3/4 P_n	nominal 4/4 P_n	2/4 P_n	3/4 P_n	nominal 4/4 P_n				
						[A] _{460V}	[A] _{575V}	[A] _{208V}	[A] _{460V}	[A] _{575V}										
0,8	143T	1155	3,6	1,95	3,30	1,2	1,0	2,5	6,2	5,0	76,0	79,3	80,0	0,50	0,63	0,71	B H	1,40	0,12	49
	143T	1755	3,0	2,95	3,10	1,5	1,2	3,1	12,0	9,6	76,8	81,0	82,5	0,53	0,66	0,75	B L	1,40	0,08	51
	145T	1155	4,6	1,80	2,90	1,6	1,3	3,3	8,1	6,5	76,8	79,7	80,0	0,52	0,65	0,73	B H	1,40	0,13	52
	182T	875	6,0	1,70	2,70	2,0	1,6	4,5	8,4	6,7	65,7	71,7	74,0	0,42	0,55	0,64	B H	1,40	0,29	68
1,5	143T	3500	2,2	2,75	3,02	2,0	1,6	4,2	16,4	13,1	77,5	81,4	82,5	0,72	0,81	0,87	B K	1,30	0,06	51
	145T	1745	4,4	2,65	3,70	2,1	1,7	4,6	15,9	12,7	80,0	83,2	84,0	0,59	0,71	0,79	B K	1,40	0,09	54
	182T	1175	6,6	2,55	3,50	2,3	1,8	5,2	16,4	13,1	80,5	84,2	85,5	0,49	0,63	0,72	B K	1,40	0,34	79
	184T	875	8,9	1,70	2,40	2,6	2,1	5,9	12,0	9,6	72,4	76,1	77,0	0,48	0,61	0,70	B H	1,40	0,35	79
2,0	145T	3505	4,1	2,80	3,25	2,6	2,0	5,3	22,2	17,8	81,4	83,8	84,0	0,72	0,82	0,87	B K	1,40	0,06	57
	145T	1735	6,1	2,40	3,30	2,7	2,2	5,8	18,4	14,7	82,0	84,0	84,0	0,65	0,76	0,82	B J	1,40	0,11	56
	184T	1165	9,1	2,10	2,70	2,9	2,3	6,4	17,6	14,1	85,8	87,1	86,5	0,55	0,67	0,74	B H	1,30	0,40	93
	213T	875	12,1	2,30	3,40	3,2	2,6	6,7	20,2	16,2	78,3	81,7	82,5	0,47	0,61	0,70	B K	1,40	0,94	128
3,0	182T	3510	4,4	2,20	2,80	3,8	3,1	8,9	27,6	22,1	82,1	84,8	85,5	0,71	0,80	0,86	B J	1,40	0,12	75
	182T	1745	8,9	2,60	3,80	3,9	3,1	8,8	30,8	24,6	85,1	87,3	87,5	0,64	0,76	0,82	B K	1,30	0,24	86
	213T	1170	13,3	2,30	3,50	4,2	3,4	9,3	31,0	24,8	84,3	86,9	87,5	0,56	0,68	0,76	B K	1,30	0,66	127
	215T	860	18,0	2,20	2,90	4,4	3,5	9,4	25,0	20,0	82,3	84,5	84,0	0,54	0,67	0,76	B H	1,30	0,94	137
5,0	184T	3500	7,4	2,25	2,80	6,2	4,9	13,4	44,0	35,2	86,3	87,8	87,5	0,75	0,85	0,87	B H	1,40	0,20	101
	184T	1735	15,0	2,50	3,20	6,2	5,0	13,8	45,0	36,0	86,9	88,7	87,5	0,70	0,81	0,86	B J	1,30	0,34	103
	215T	1155	22,6	1,90	2,50	6,6	5,2	14,4	40,0	32,0	87,2	88,4	87,5	0,66	0,76	0,82	B H	1,30	0,82	148
	254T	880	29,7	1,60	2,40	7,2	5,8	16,2	36,1	28,9	84,2	85,8	85,5	0,57	0,69	0,76	B G	1,30	2,10	208
7,5	213T	3500	11,1	2,20	3,50	8,6	6,9	18,6	56,0	44,8	88,2	89,0	88,5	0,83	0,89	0,92	B G	1,30	0,36	138
	213T	1750	22,1	2,00	2,80	9,0	7,2	19,8	61,8	49,4	89,5	90,2	89,5	0,75	0,84	0,87	B H	1,30	0,72	146
	254T	1180	32,8	2,60	2,20	9,2	7,3	20,8	59,2	47,4	88,4	89,7	89,5	0,73	0,82	0,86	B G	1,30	3,27	256
	256T	875	44,3	1,45	2,20	10,8	8,6	23,7	48,2	38,6	83,9	86,1	85,5	0,57	0,70	0,76	B F	1,20	2,10	225
10	215T	3495	15,1	2,35	2,60	11,4	9,1	25,1	79,9	63,9	89,9	90,3	89,5	0,84	0,90	0,92	B H	1,30	0,43	161
	215T	1745	30,2	1,80	2,20	11,9	9,5	26,3	78,5	62,8	90,7	90,8	89,5	0,77	0,86	0,88	B H	1,30	0,87	165
	256T	1175	45,0	2,55	2,70	12,3	9,8	27,5	75,2	60,2	89,5	90,1	89,5	0,73	0,81	0,85	B G	1,20	3,27	269
	284T	880	60,0	1,65	2,20	13,4	10,7	28,9	70,7	56,6	88,4	89,1	88,5	0,64	0,75	0,79	B G	1,40	4,57	344

Output P_n [HP]	Frame	Full load speed n_n [min ⁻¹]	Full load torque T_n [Lb·Ft]	Locked rotor torque T_L/T_n [-]	Breakdown torque T_b/T_n [-]	Full load current			Locked rotor current at nom. voltage		Efficiency η [%]			Power factor $\cos\phi$ [-]			Design Code letter	Service factor SF [-]	Moment of inertia Wk^2 [Lb·Ft ²]	Weight foot mounted motor m [Lbs]
						I_n at nom. voltage			I_b		2/4 P_n	3/4 P_n	nominal 4/4 P_n	2/4 P_n	3/4 P_n	nominal 4/4 P_n				
						[A] _{460V}	[A] _{575V}	[A] _{208V}	[A] _{460V}	[A] _{575V}										

15	254T	3540	21,9	2,30	2,40	18,2	14,5	38,8	104,0	83,2	89,4	90,4	90,2	0,74	0,82	0,86	B	F	1,30	1,15	256
	254T	1760	44,0	2,20	2,65	17,2	13,7	37,5	106,0	84,8	90,5	91,0	91,0	0,82	0,87	0,90	B	G	1,30	2,52	265
	284T	1175	65,9	2,65	2,10	18,1	14,5	40,0	113,6	90,9	90,3	90,8	90,2	0,75	0,83	0,86	B	G	1,20	4,75	351
	286T	880	88,1	1,80	2,10	20,3	16,3	43,5	111,2	89,0	88,3	89,2	88,5	0,62	0,73	0,78	B	G	1,20	4,57	359
20	256T	3540	29,9	2,35	2,60	23,9	19,1	50,5	132,0	105,6	90,9	91,1	90,2	0,79	0,85	0,87	B	F	1,30	1,47	304
	256T	1755	60,2	2,20	2,40	22,7	18,1	49,3	137,9	110,3	92,1	91,9	91,0	0,85	0,89	0,91	B	F	1,20	3,06	331
	286T	1175	89,9	2,50	2,10	24,1	19,3	53,8	144,7	115,8	90,3	91,0	90,2	0,76	0,84	0,86	B	G	1,20	5,17	368
25	284TS	3525	37,0	2,60	2,30	29,5	23,7	65,2	178,0	142,4	91,5	91,8	91,0	0,79	0,86	0,87	B	G	1,15	1,63	335
	284T	1760	74,1	2,30	2,30	28,0	22,3	61,7	173,0	138,4	93,2	93,2	92,4	0,84	0,89	0,91	B	F	1,15	3,19	357
	324T	1185	110,0	1,70	2,30	30,5	24,4	67,5	182,0	145,6	92,1	92,6	92,4	0,74	0,81	0,83	B	G	1,15	10,20	534
30	286TS	3535	43,8	2,45	2,90	35,1	28,1	76,1	200,0	160,0	90,5	91,3	91,0	0,82	0,86	0,88	B	F	1,15	1,92	388
	286T	1755	88,3	2,35	2,30	33,2	26,4	75,2	212,0	169,6	93,4	93,3	92,4	0,85	0,90	0,92	B	G	1,15	3,59	395
	326T	1185	130,8	1,70	2,05	37,0	29,6	81,8	200,0	160,0	92,3	92,6	91,7	0,74	0,82	0,83	B	F	1,15	11,35	562
	364T	885	177,9	1,90	2,00	38,5	30,5	84,0	217,5	174,0	89,2	90,1	90,2	0,66	0,76	0,80	B	G	1,15	13,24	625
40	324TS	3560	59,4	1,90	2,20	45,6	36,5	100,8	290,0	232,0	92,2	93,2	93,0	0,79	0,87	0,88	B	G	1,15	3,66	538
	324T	1770	119,4	2,10	3,20	46,5	37,2	102,8	290,0	232,0	93,2	93,7	93,0	0,75	0,84	0,86	C	G	1,15	6,88	558
50	326TS	3560	73,2	2,10	2,20	55,0	44,0	121,6	362,0	289,6	93,6	94,2	94,1	0,83	0,89	0,90	C	G	1,15	4,05	604
	326T	1770	147,2	2,20	3,50	56,5	45,2	125,0	360,0	288,0	94,0	94,3	94,1	0,79	0,86	0,88	C	G	1,15	8,20	640
60	364TS	3565	88,9	1,90	2,50	66,5	53,2	147,1	435,0	348,0	93,5	94,3	94,1	0,83	0,89	0,90	B	G	1,15	5,85	730
	364T	1780	178,1	2,20	3,50	56,5	45,2	125,0	360,0	288,0	94,0	94,3	94,1	0,79	0,87	0,88	C	G	1,15	10,4	734
75	365TS	3555	108,9	1,70	2,40	83,5	66,8	184,7	493,0	394,4	94,0	94,2	93,6	0,86	0,90	0,90	B	F	1,15	6,65	780
	365T	1780	217,7	2,10	2,00	84,5	67,6	186,9	542,0	433,6	94,5	94,9	94,5	0,80	0,87	0,89	C	G	1,15	12,80	794
100	405TS	3570	148,0	2,10	2,20	108	86,4	238,8	725,0	580,0	95,2	95,6	95,4	0,86	0,90	0,91	C	G	1,15	9,7	976
	405T	1780	296,8	2,20	2,10	109	87,2	241,1	720,0	576,0	95,0	95,2	94,5	0,86	0,90	0,91	C	G	1,15	21,6	1027
125	444TS	3570	177,6	1,60	2,05	135	108,0	-	820,0	656,0	95,3	95,7	95,4	0,88	0,91	0,91	B	F	1,15	18,2	1305
	444T	1785	355,1	1,40	2,00	136	108,8	-	865,0	692,0	94,8	95,3	95,4	0,85	0,89	0,90	B	F	1,15	35,9	1410
150	445TS	3570	220,8	1,80	2,05	160	128,0	-	1040	832,0	95,7	96,0	95,4	0,90	0,92	0,92	B	G	1,15	21,7	1500
	445T	1785	441,6	1,60	2,05	164	131,2	-	1040	832,0	95,2	95,7	95,4	0,86	0,90	0,90	B	G	1,15	40,2	1570

LAMPIRAN B

1. Data-data Masukan Motor

Tabel B1.1 Data Motor

Data Motor	REL S.O.	Frame	kW	Type	Hertz	RPM
	xxxxxxx		1,1 / 1,32		50 / 60	1380
	Volt	Amp	Duty	AMB C/INSUL.	S.F.	Nema Design
	220 / 240	5	CONT			B
	Code Letter	Enclosure	E/S	Rotor	kg	Tanggal Pengujian
	G				11,5	6/6/11

Item	RPM	Daya Masukan (Watt)	N Pole	Frekuensi	VL 12	VL 13	VL23
Test Point 1 "High Load"	1410	620	6	50	210	210	210
Test Point 2 "Low Load"	1358	1200	6	50	210	210	210

Item	I1	I2	I3	Temperatur Stator	Temperatur Kabel	F&W Watt
Test Point 1 "High Load"	4	4	4	60	39	30
Test Point 2 "Low Load"	2,9	2,9	2,9	56	39	30

Temperatur & Hambatan Stator **	R12 total	R13 total	R23 total	Temperatur Stator	Temperatur Kabel
Hambatan	8,28	8,28	8,28	51	24

**Measure the resistance of the stator and record the temperature at the time of measurement		Motor HP	SLL % of Keluaran		
		1-125			
		126-500			
SLL % Factor	1,8	501-2499			
Rating Kerja Tegangan	220		Cable Gauge	Panjang Kabel	Kabel / phase
Rating Kerja Frekuensi	50				
Design Factor					
Hours per Week					
kW hour cost in dollars					
Motor application					
XEX Motor Efficiency					

2. Data-data Keluaran Motor

Tabel B1.2 Data Motor

Data Motor	REL S.O.	Frame	kW	Type	Hertz	RPM
	xxxxxxx	0	1,1 / 1,32		50 / 60	1380
	Volt	Amp	Duty	AMB C/INSLII	S.F.	Nema Design
	220 / 240	5	CONT			B
	Code Letter	Enclosure	E/S	Rotor	kg	Tanggal Pengujian
	G				11,5	6/6/11

Item	Daya Keluaran (Watt)	Arus Masukan (A)	Kecepatan (rpm)	Torsi Keluaran (Nm)	Faktor Daya	Efisiensi
Test Point 1 "High Load"	620	2,9	1410	321.6	0.85	90.6
Test Point 2 "Low Load"	1200	4	1358	170.5	0.72	88.4

Motor Parameters	Phase Resistance R1&Cable	Stator Inductance L1	Core Resistance Rc	Magnetizing Inductance Lm	Rotor Inductance L2	Rotor Resistance R2
	2,76	0,02349	773,4942	0,2279	0,02349	2,9

Daya Keluaran (Watt)	Masukan Current	Faktor Daya	Efisiensi	Kecepatan (rpm)	Torsi Keluaran (Nm)
480	2,7	0,49	71,46	1420	3,16
720	3,1	0,64	79,62	1402	3,90
850	3,3	0,71	80	1390	4,67
960	3,5	0,75	82,11	1381	5,45
1050	3,7	0,78	84,02	1373	6,14
1100	3,8	0,80	84,94	1369	6,52
1400	4,6	0,84	86,57	1335	8,67

XEX Motor Efficiency	
\$ Savings Per Year	
Annual KWH Saving	

LAMPIRAN C

Program MATLAB

```
disp('')
disp('!=====!')
disp('!           MENENTUKAN NILAI EFISIENSI MOTOR INDUKSI           !')
disp('!           DENGAN METODE TORSI CELAH UDARA                       !')
disp('!=====!')
disp('')

% First, initialize the values needed in this program.
R1 = 2.76;
L1 = 0.02349;
Rc = 773.4942;
Lm = 0.2279;
L2 = 0.02349;
R2 = 2.9;

Power = 1.3;
Frek = 50;
N_sync = 1500;
V_rat = 220;
I_rat = 5;

V_line = 210;
V_phase = 210 / sqrt(3);
P_fw = 30;

disp(['R1 = ' num2str(R1), ' Ohm'])
disp(['L1 = ' num2str(L1), ' Ohm'])
disp(['Rc = ' num2str(Rc), ' Ohm'])
disp(['Lm = ' num2str(Lm), ' Ohm'])
disp(['L2 = ' num2str(L2), ' Ohm'])
disp(['R2 = ' num2str(R2), ' Ohm'])

disp('')
disp('!           NILAI-NILAI SPESIFIKASI MOTOR INDUKSI           !')
disp('!-----!')
disp('!   Power ! Frekuensi ! Kecepatan ! Rating Tegangan! Rating Arus !')
disp('!   kW    !   Hz      !   RPM    !   Volt      !   Ampere   !')
disp('!-----!')

fprintf('!%8.0f ! %6.0f ! %8.0f ! %7.0f ! %6.0f !\n', Power,
Frek, N_sync, V_rat, I_rat );
disp('!-----!')
disp('')
```

```

I_line = input('MASUKAN NILAI INPUT ARUS (AMPERE) = ');
P_in = input('MASUKAN NILAI DAYA (WATT) = ');
N_m = input('MASUKAN NILAI KECEPATAN MOTOR (RPM) = ');

W_sync = N_sync * 2 * pi / 60;
W_m = N_m * 2 * pi / 60;

%Calculate The Input Power
pf = P_in / ( sqrt(3) * V_line * I_line );

%Calculate slip
s = (W_sync - W_m) / W_sync;

%Calculate rotor current I2
I1 = I_line * cos (acos(pf)) + j * I_line * sin (-acos(pf));
V1 = V_phase;
X1 = 2 * pi * Frek * L1;
Xm = 2 * pi * Frek * Lm;
X2 = 2 * pi * Frek * L2;
I2 = I1 - ( (V1 - I1 * (R1 + j * X1)) / Rc ) - ( (V1 - I1 * (R1 + j * X1)) / (j * Xm) );

%Calculate induced vltage
V_ind = I2 * ( R2 / s + j * X2 );

%Calculate magnetizing current Im
Im = V_ind / ( Rc + j * Xm);

%Calculate Induction Torque
T_ind = 3 * I2^2 * R2 / (W_sync * s);
r_tind = real(T_ind);
x_tind = imag(T_ind);
T_ind = sqrt(r_tind ^ 2 + x_tind ^ 2);

%Calculate The Output Power
P_out = ( T_ind * W_m - P_fw - 0.018 * P_in )/0.982;
P_sll = T_ind * W_m - P_fw - P_out;
To = P_out / W_m;

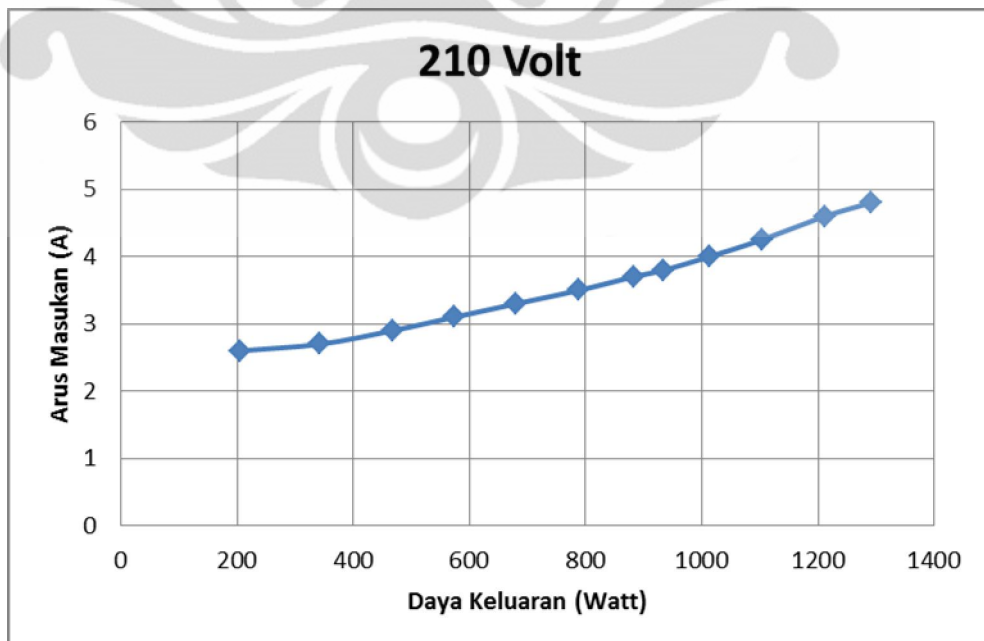
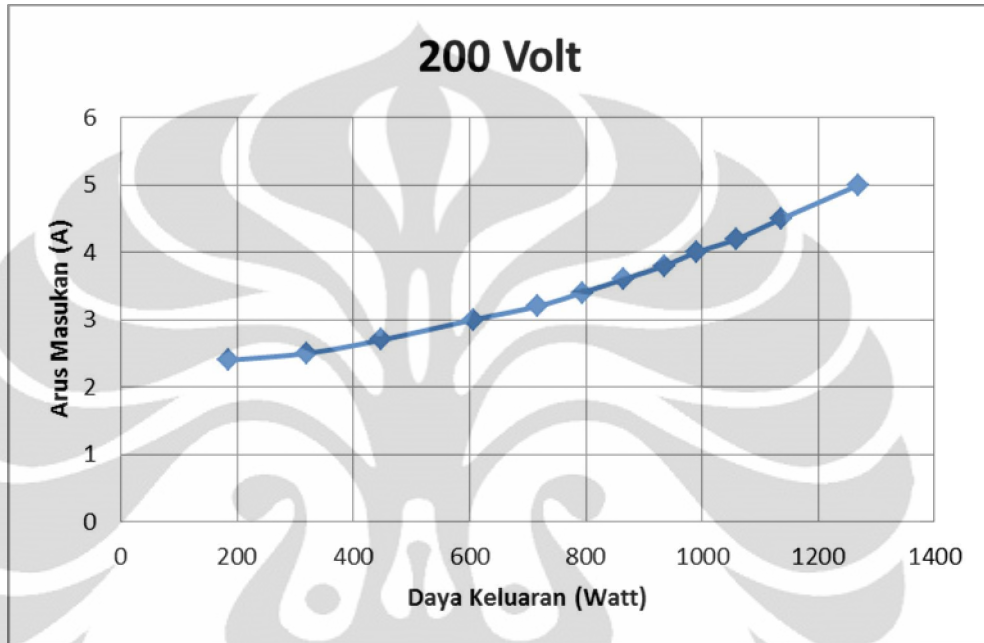
%Calculate The Induction Motor Efficiency
E = P_out / P_in * 100;

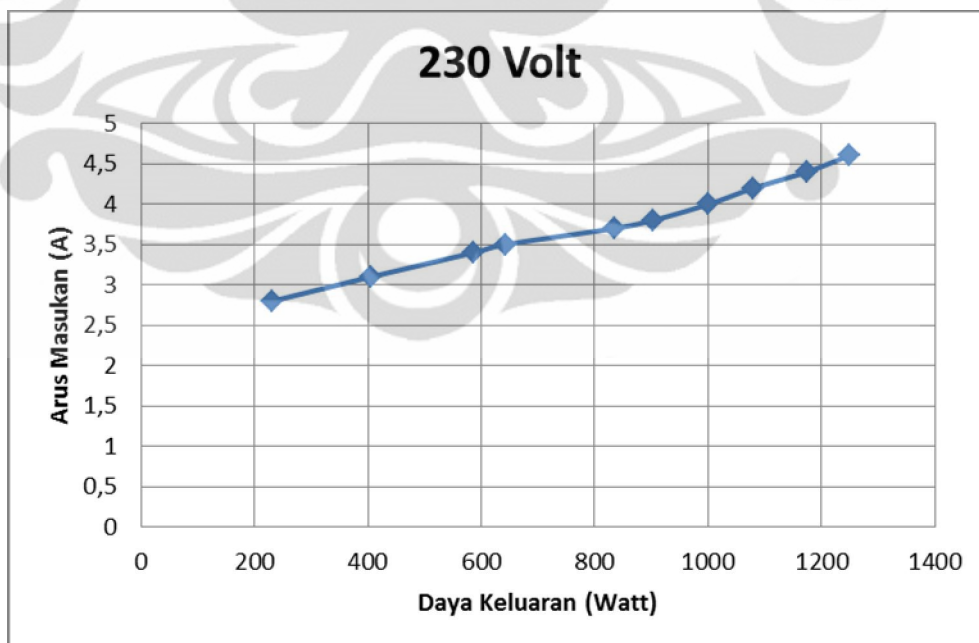
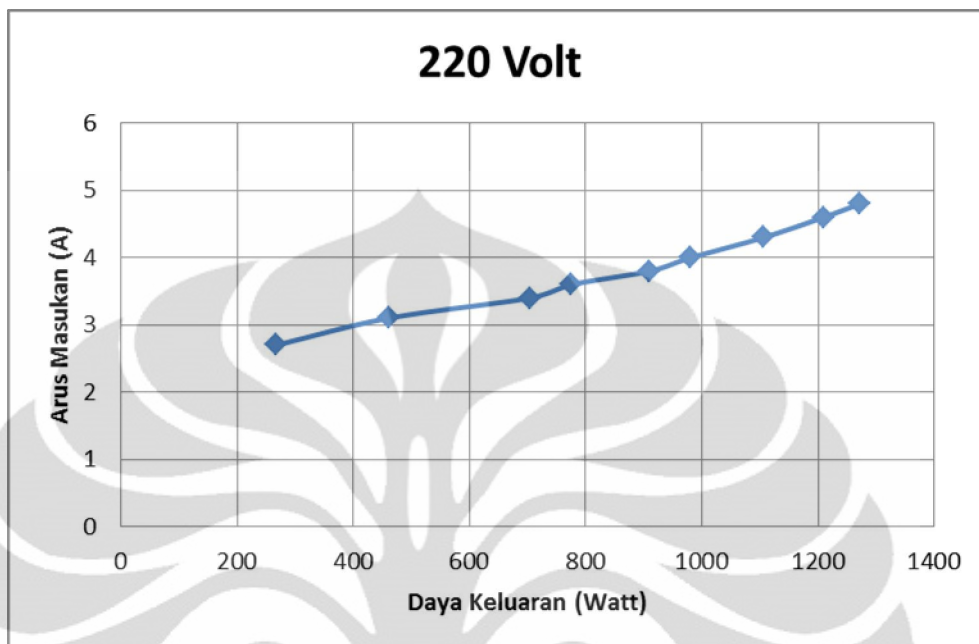
disp('')
disp(['', 'Faktor Daya = ' num2str(pf), ', ', ''])
disp(['', 'Slip = ' num2str(s), ', ', ''])
disp(['', 'Arus Rotor = ' num2str(I2), ', ', ' Ampere '])
disp(['', 'Tegangan Induksi = ' num2str(V_ind), ', ', ' Volt '])
disp(['', 'Arus Magnetisasi = ' num2str(Im), ', ', ' Ampere '])
disp(['', 'Torsi Induksi = ' num2str(T_ind), ', ', ' Nm '])
disp('')
disp(['', 'Rugi Stray = ' num2str(P_sll), ', ', ' Watt '])
disp('')
disp(['', 'Torsi Keluaran = ' num2str(To), ', ', ' Watt '])
disp('')
disp(['', 'Daya Keluaran = ' num2str(P_out), ', ', ' Watt '])
disp('')
disp(['', 'Efisiensi Motor Induksi = ' num2str(E), ', ', ' % '])
disp('')

```

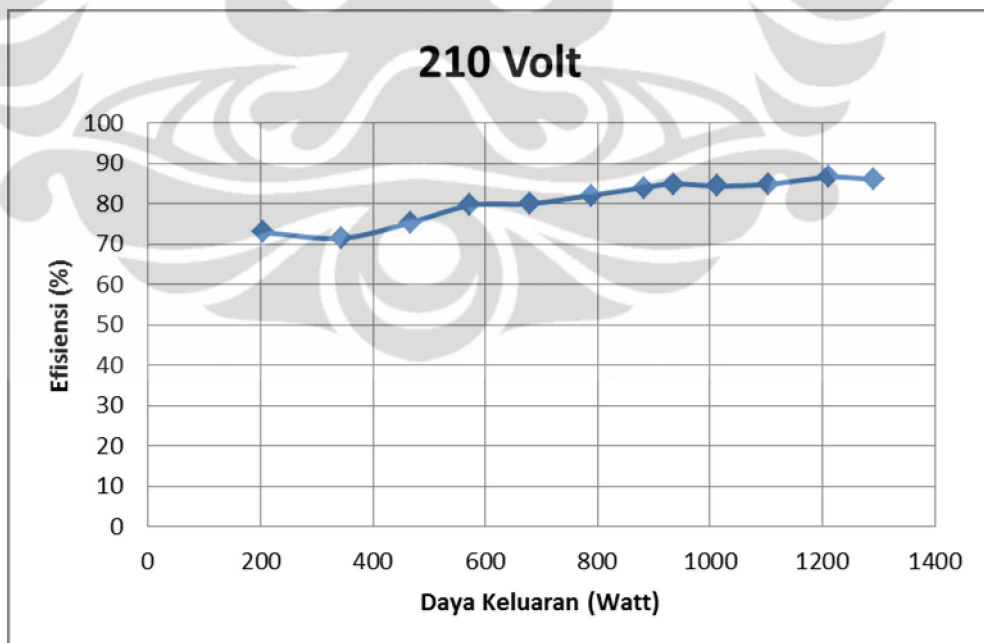
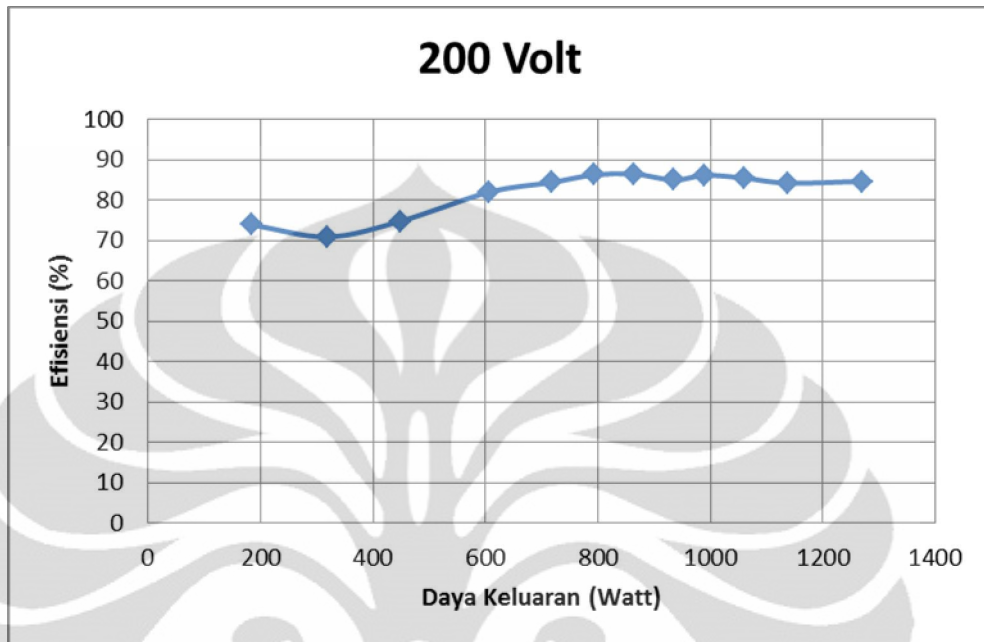
LAMPIRAN D

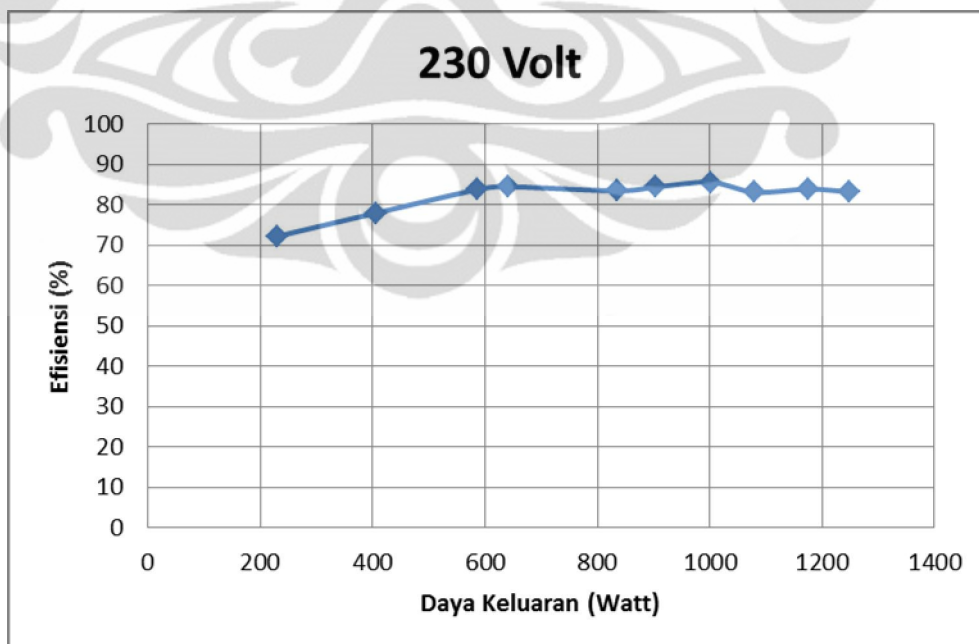
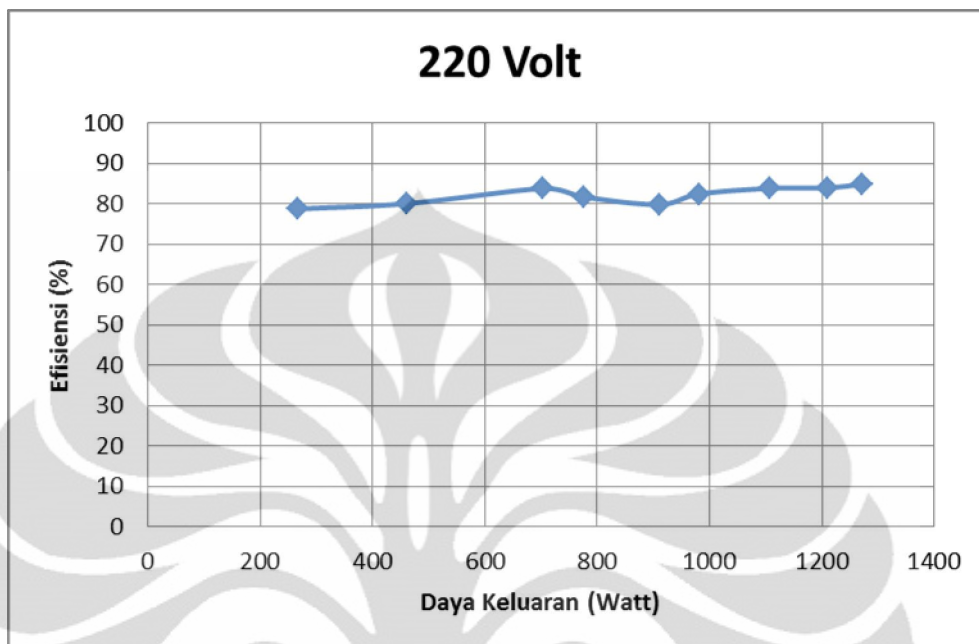
1. Grafik Arus Masukan vs Daya Keluaran



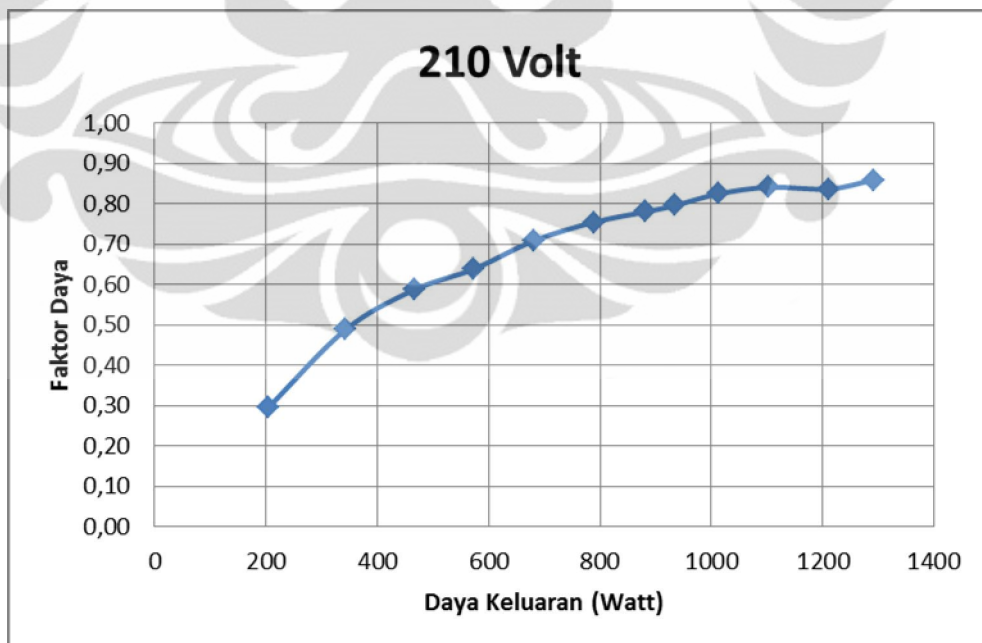
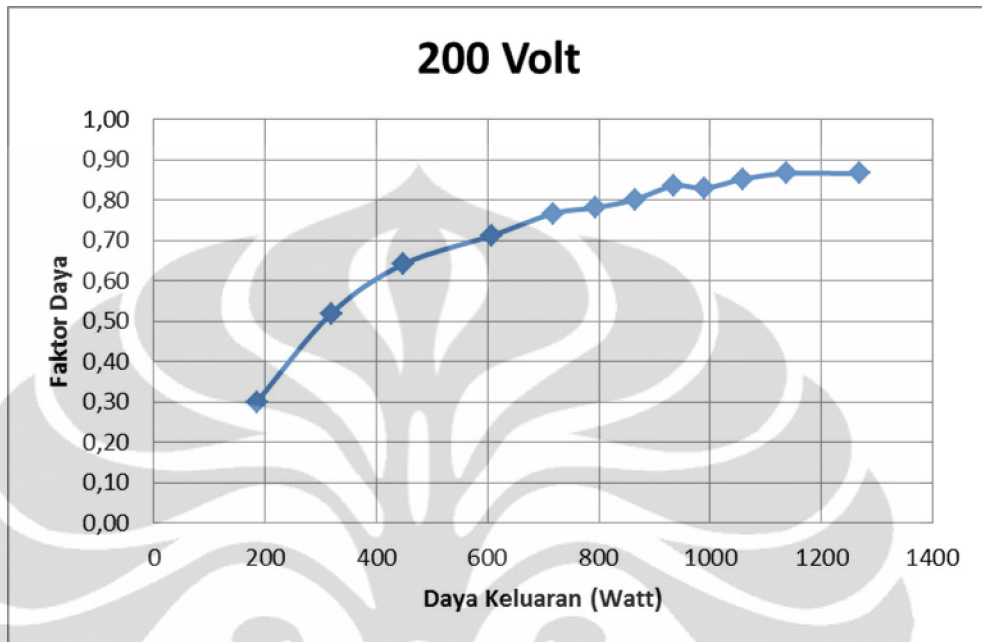


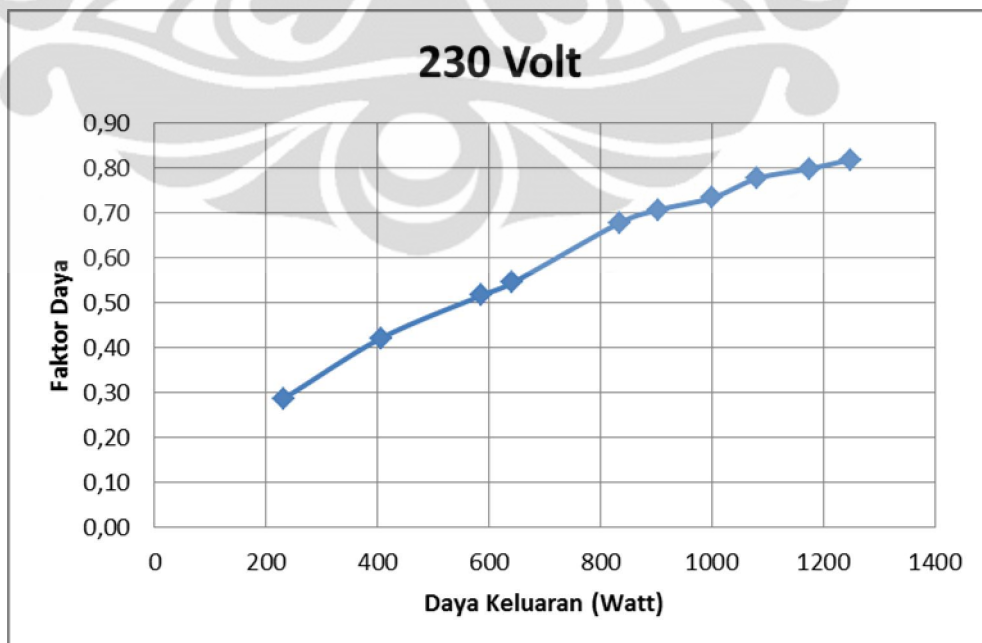
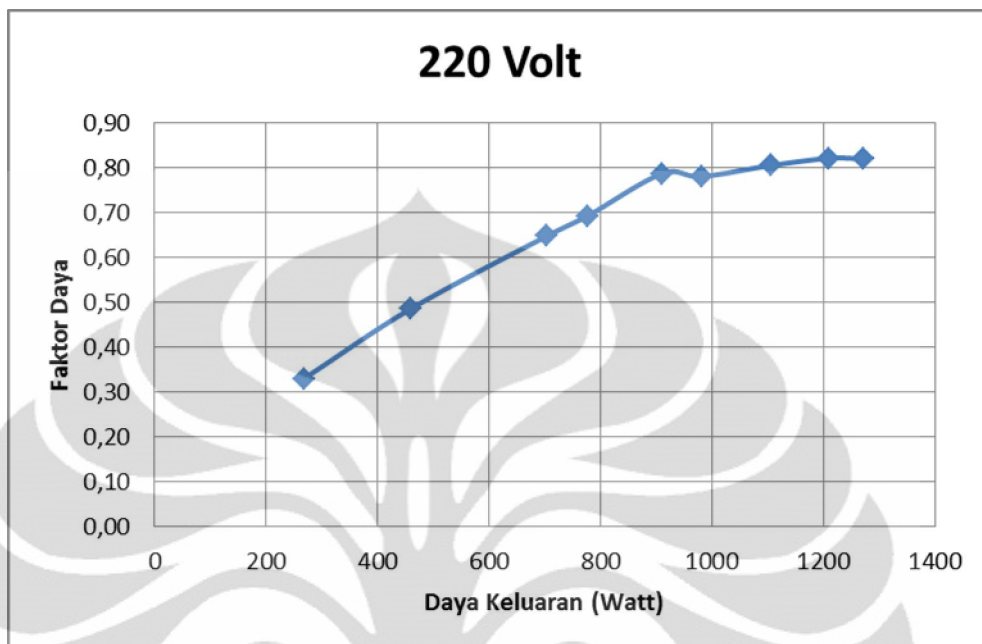
2. Grafik Efisiensi vs Daya Keluaran



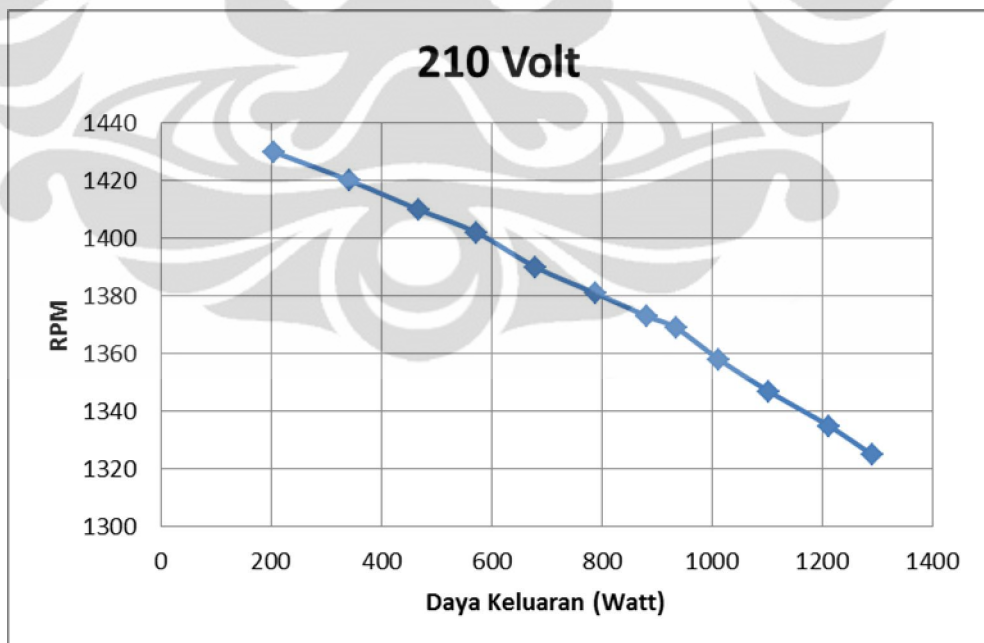
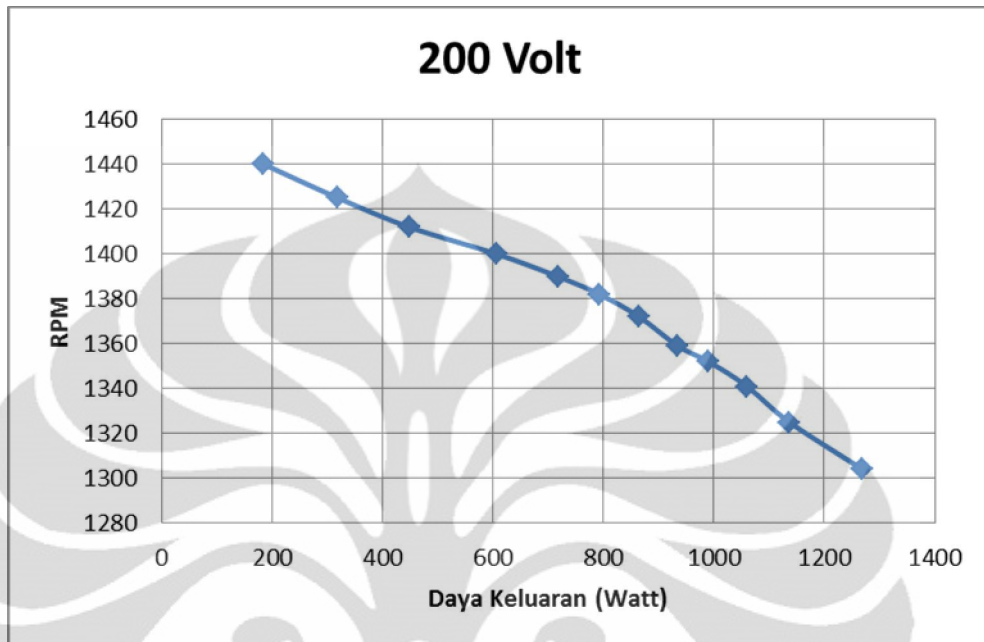


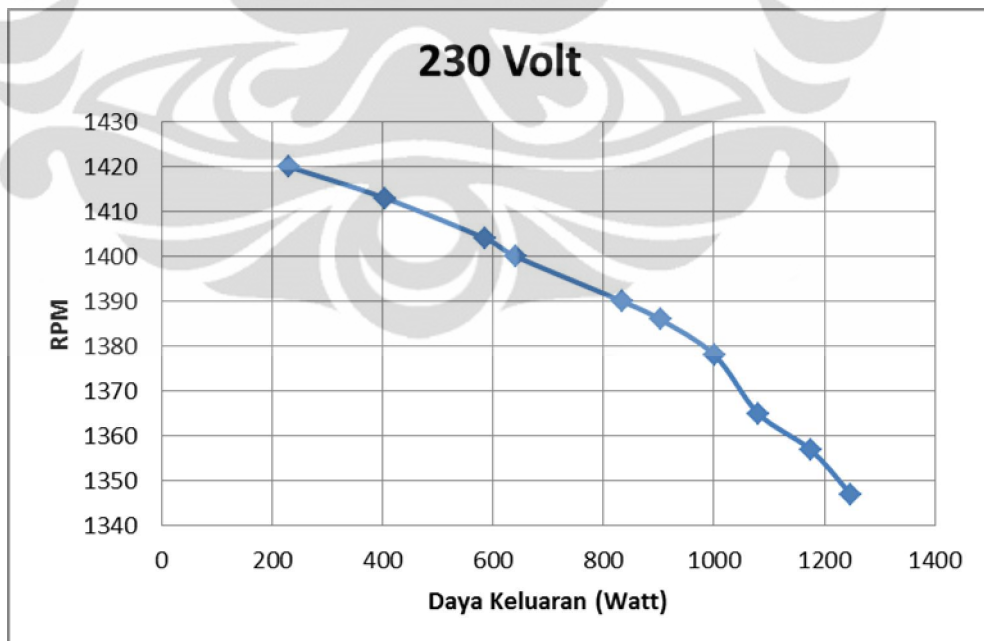
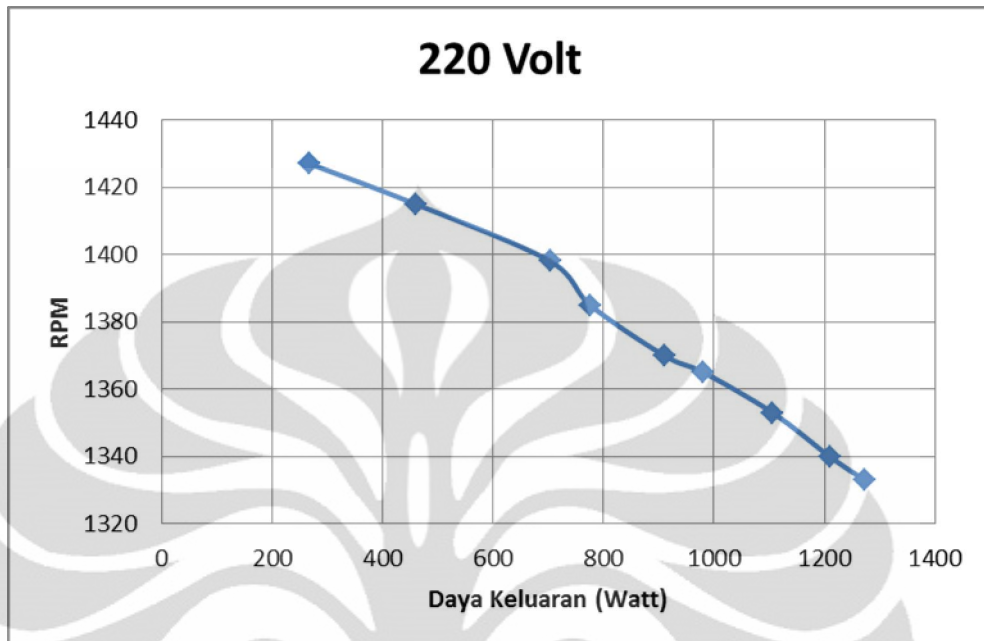
3. Grafik Faktor Daya vs Daya Keluaran



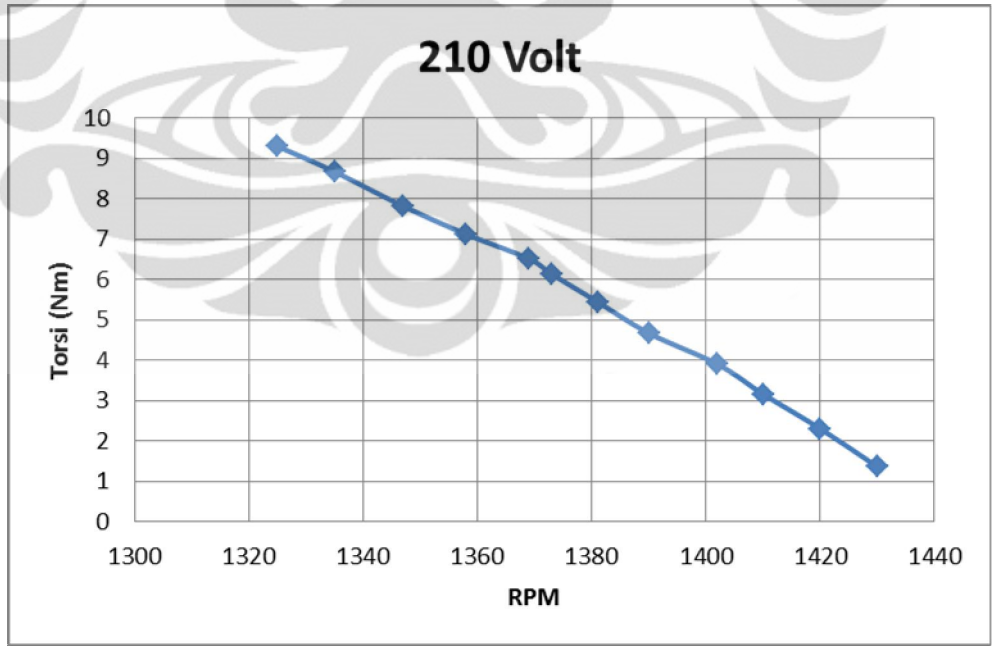
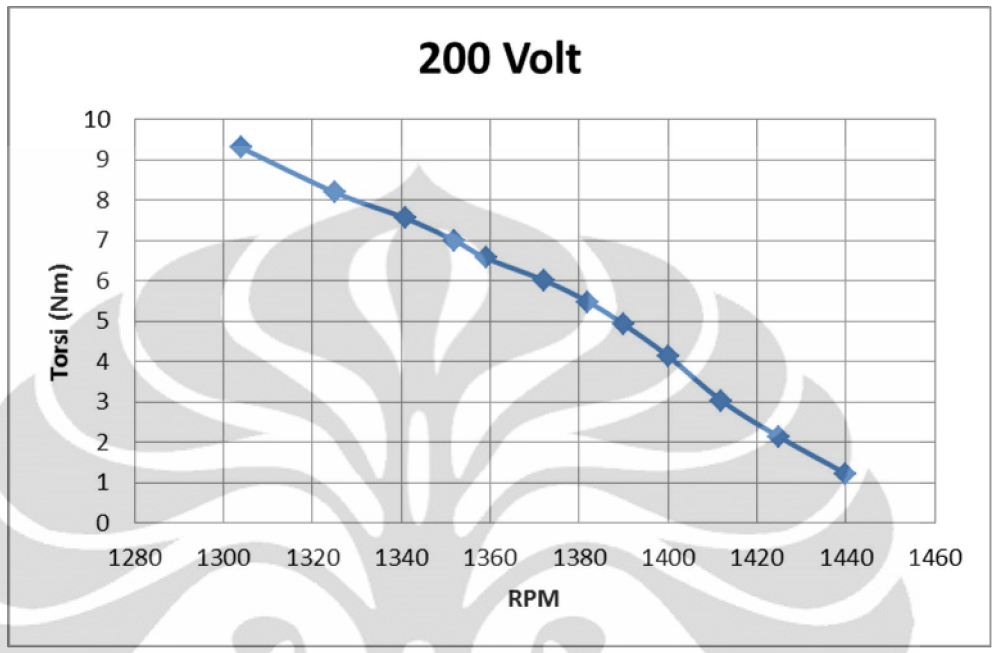


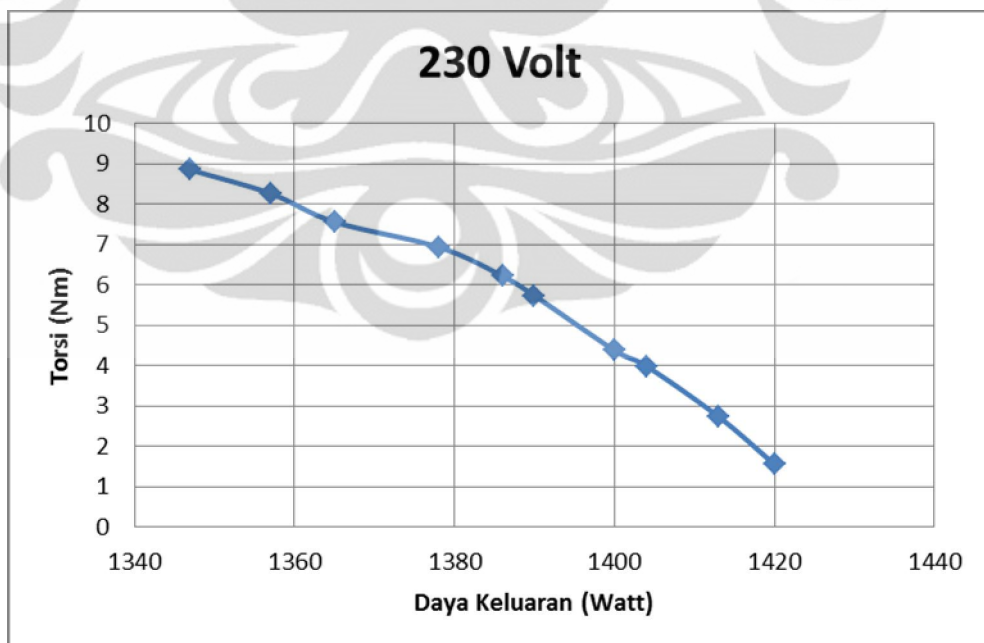
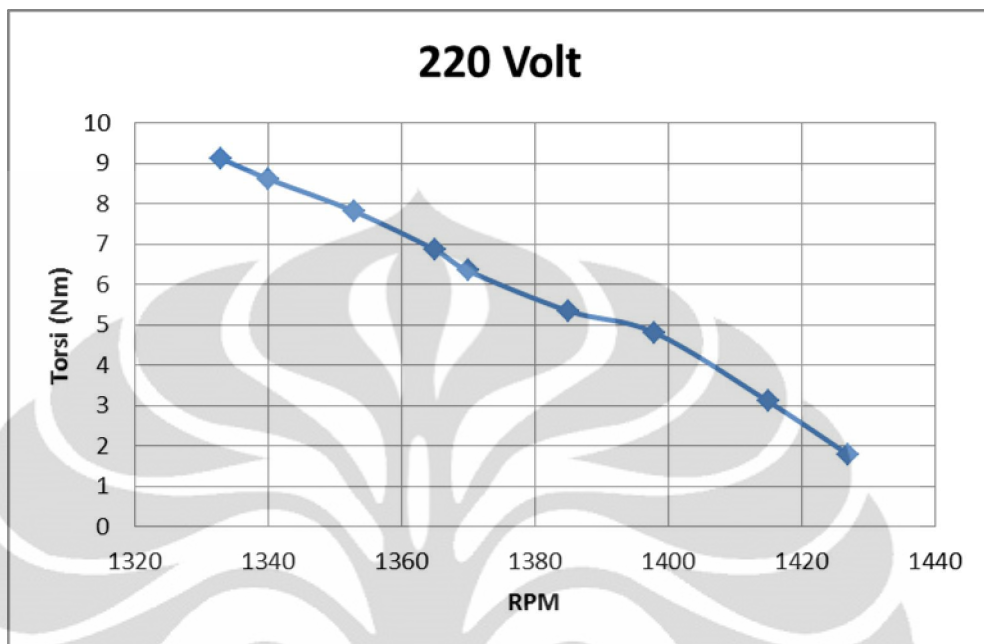
4. Grafik Kecepatan vs Daya Keluaran





5. Grafik Torsi Motor vs Kecepatan





LAMPIRAN E

Bagian-Bagian Motor Induksi

