

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 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.

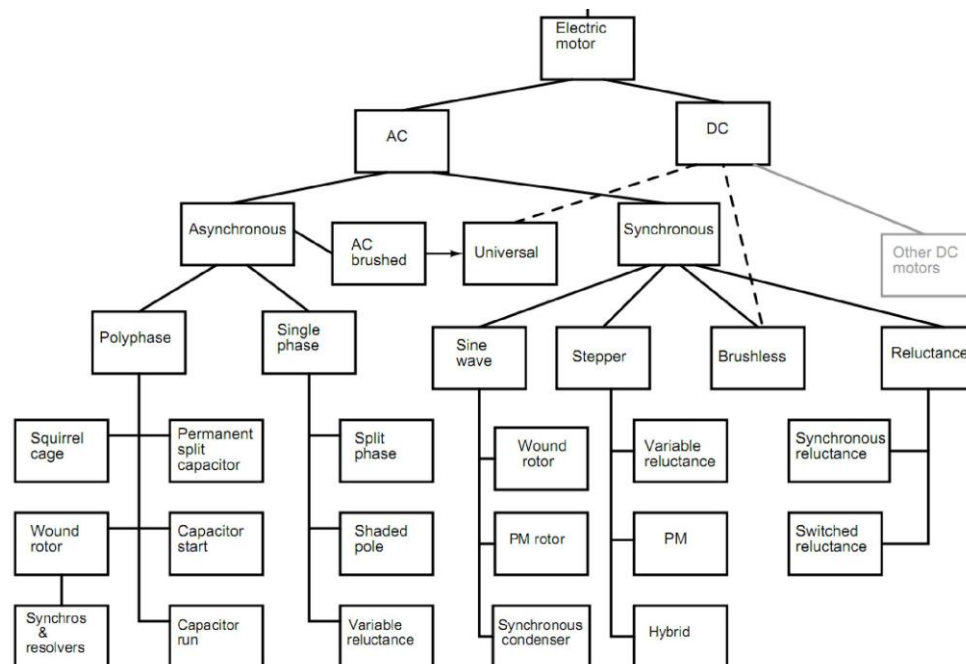
Pada aplikasi industri dan pertambangan, motor induksi 3 fasa adalah penggerak utama bagi sebagian besar mesin. Di negara-negara industri modern, lebih dari setengah total energi listrik yang digunakan diubah ke energi mekanik melalui motor induksi AC 3 fasa. Motor ini diaplikasikan hampir di semua bagian 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 2.1.

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 penyalan 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

(www.ibiblio.org/kuphaldt/electricCircuits/AC/AC_13.html)

2.1.3 Konstruksi Motor Induksi

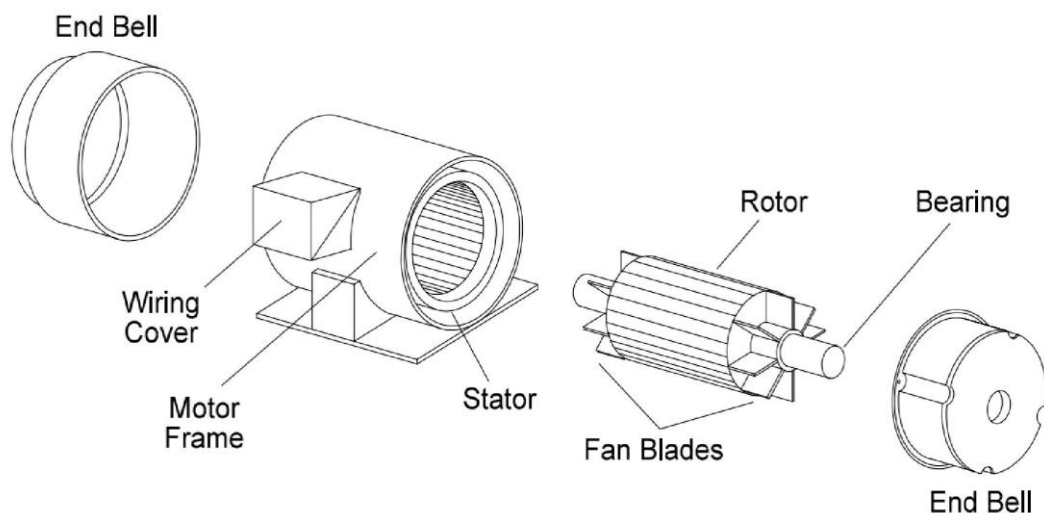
Motor induksi memiliki dua komponen utama yaitu :

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.



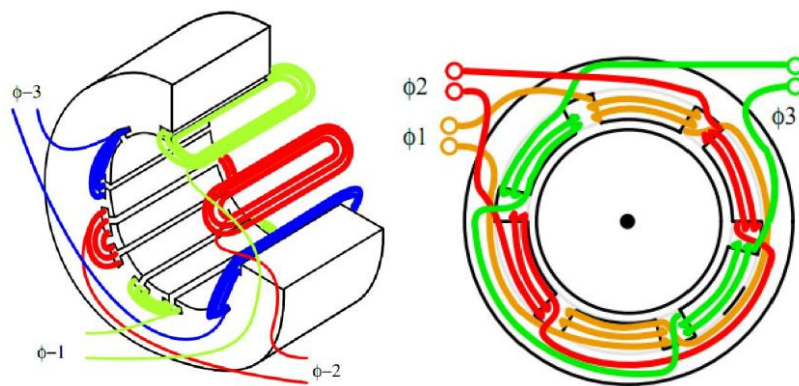
Gambar 2.2 Bagian Motor Induksi

(www.belajarlistrik.com/prinsip-kerja-motor-induksi)

a. Stator

Stator terdiri dari :

1. Silinder terluar motor, yang terbuat baik dari baja, besi atau campuran alumunium 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 terlaminsi. 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.

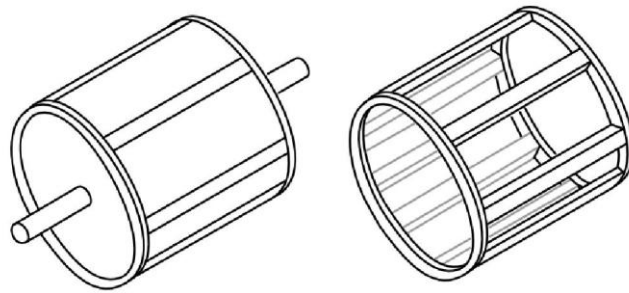


Gambar 2.3 Konstruksi Lilitan 3 Fasa Pada Stator

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 alumunium 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.



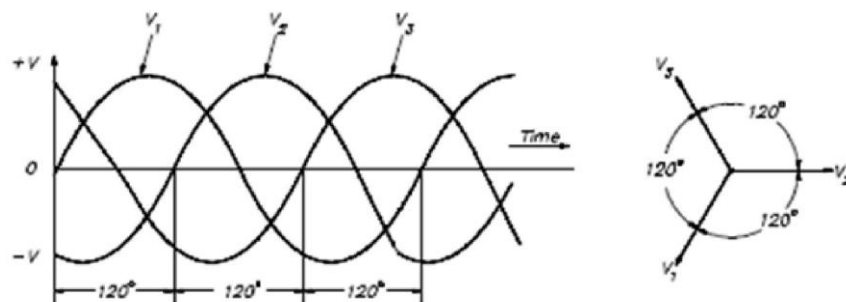
Gambar 2.4 Rotor Sangkar Tupai Motor Induksi

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

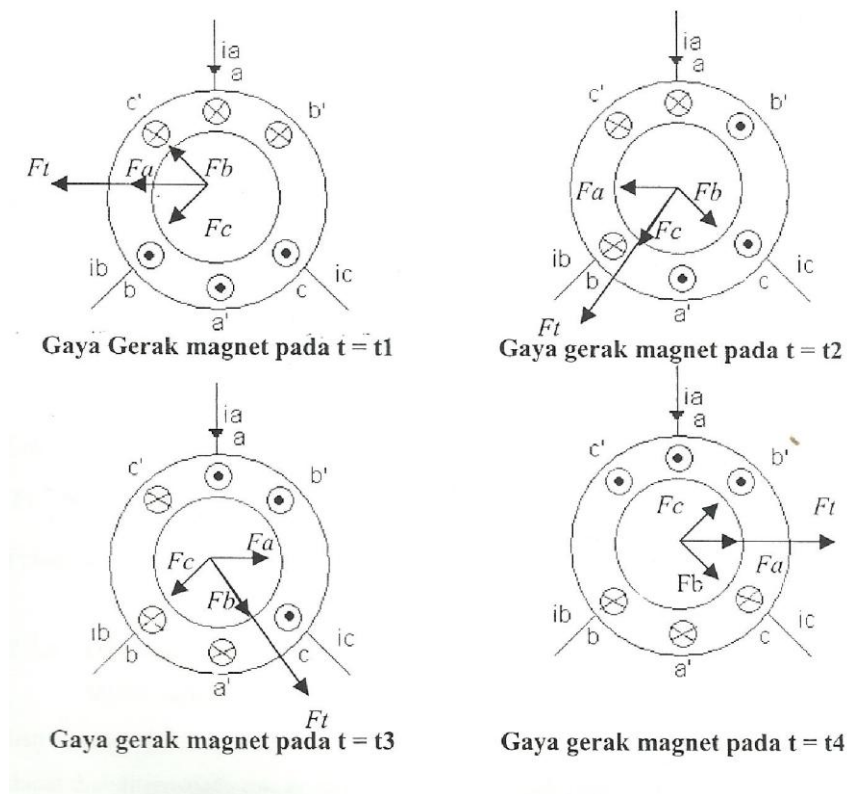
2.2.1 Cara Kerja Motor Induksi

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

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

dimana:

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

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

dimana:

- e_{ind} = tegangan induksi (volt)
- v = kecepatan rotor terhadap kecepatan medan magnet stator (m/s)
- B = kecepatan 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 beraselerasi 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

$$\tau_{sync} = k B_R \times B_S \quad (2.3)$$

dimana:

- τ_{sync} = torsi induk (Nm)
- k = konstan torsi
- B_R = kerapatan fluks magnet rotor (Tesla)
- B_S = kerapatan fluks magnet stator (Tesla)

Torsi induksi inilah yang akan menyebabkan rotor beraselerasi 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 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 relative 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.

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

dimana:

n_{sync} = kecepatan sinkron (rpm)

n_r = kecepatan rotor (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.

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

dimana:

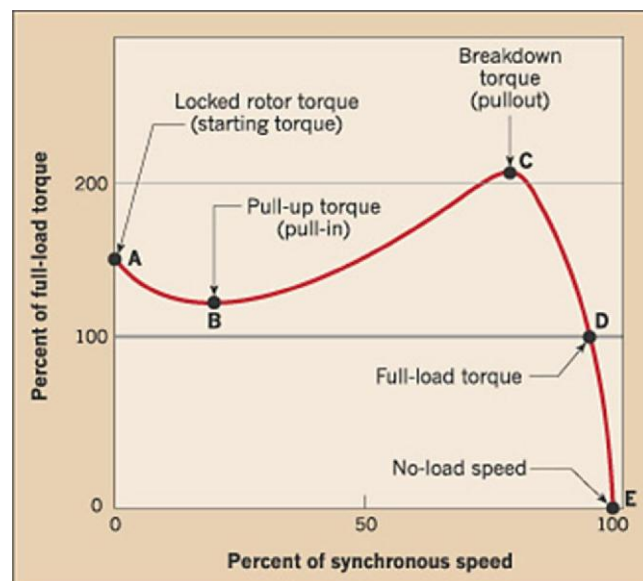
- f_r = frekuensi motor (Hz)
- f_e = frekuensi sistem (Hz)
- s = slip
- n_{sync} = kecepatan sinkron (rpm)
- n_r = kecepatan rotor (rpm)
- p = jumlah kutub mesin

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.

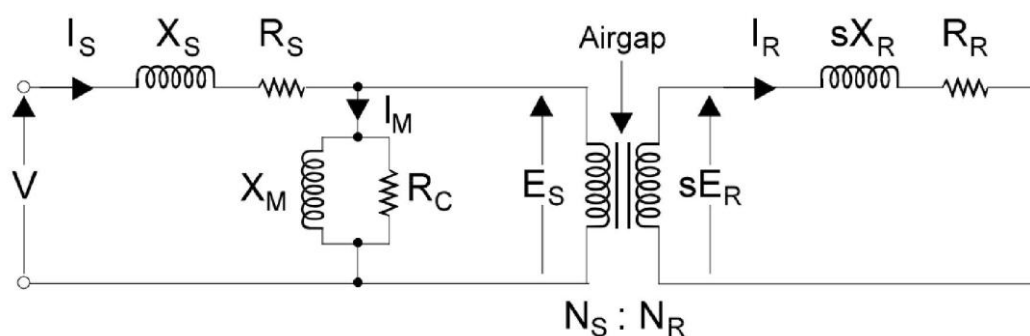
Motor pada mulanya diam dengan kecepatan nol dan mulai menghasilkan torsi locked rotor (titik A) yang biasanya bernilai 175% dari torsi full load. Saat motor mulai beraselerasi, torsi motor akan berkurang sejenak pada titik B yang disebut sebagai torsi pull-up. Ini adalah torsi yang paling kecil saat masa start motor. Dengan bertambahnya kecepatan, maka bertambah pula torsiya, hingga mencapai suatu titik C di mana torsiya 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 Ekvivalen

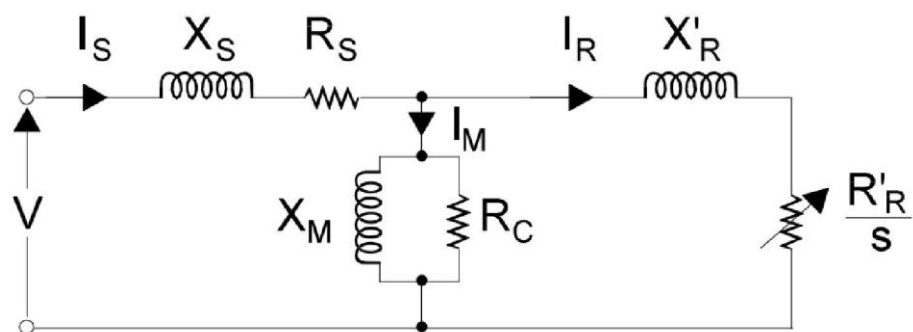


Gambar 2.8 Rangkaian Ekvivalen Motor Induksi

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	= hambatan inti besi
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 ekivalen 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 ekivalen motor induksi pada dasarnya juga sama dengan rangkaian ekivalen 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.

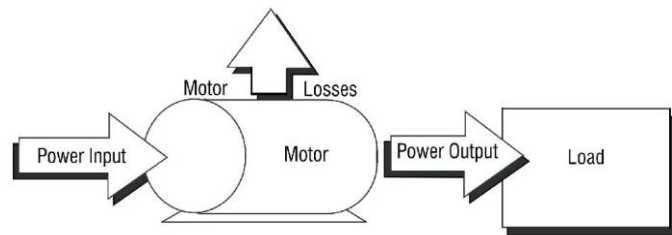


Gambar 2.9 Rangkaian Sederhana Motor Induksi

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 :

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

dimana:

η = efisiensi (%)

P_{out} = daya keluaran (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 dibawah 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 putar motor (rpm)

IEEE juga mempunyai standar metode tersendiri dalam menghitung efisiensi seperti yang terlihat pada tabel 2.1. 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 ekivalen dengan pengukuran langsung pada rugi-rugi stray
7	F1	Rangkaian ekivalen dengan asumsi rugi-rugi stray
8	C/F	Rangkaian ekivalen yang dikalibrasikan per titik beban metode C dengan pengukuran tak langsung rugi-rugi stray
9	E/F	Rangkaian ekivalen yang dikalibrasikan per titik beban Metode E dengan pengukuran langsung rugi-rugi stray
10	E1/F1	Rangkaian ekivalen yang dikalibrasikan per titik beban Metode E dengan asumsi nilai rugi-rugi stray

2.3.2 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

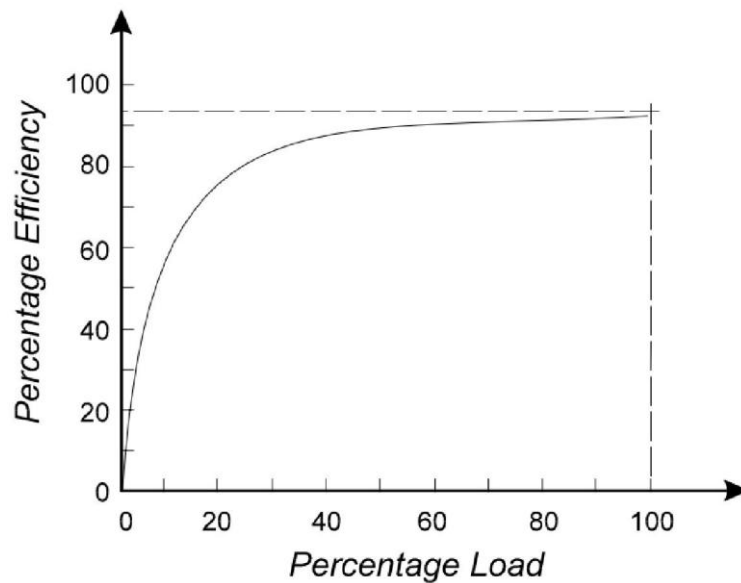
sekundernya dihubungkan pada kedua ujungnya, sehingga daya keluaran listriknya tidak ada, namun daya keluarannya berbentuk energi mekanik. Rugi-rugi yang pertama kali timbul yaitu rugi-rugi pada lilitan stator I^2R_s dan biasa disebut stator copper loss P_{SCL} . Kemudian rugi-rugi yang timbul berikutnya 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 ekivalen 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

a. 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.

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

dimana:

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

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

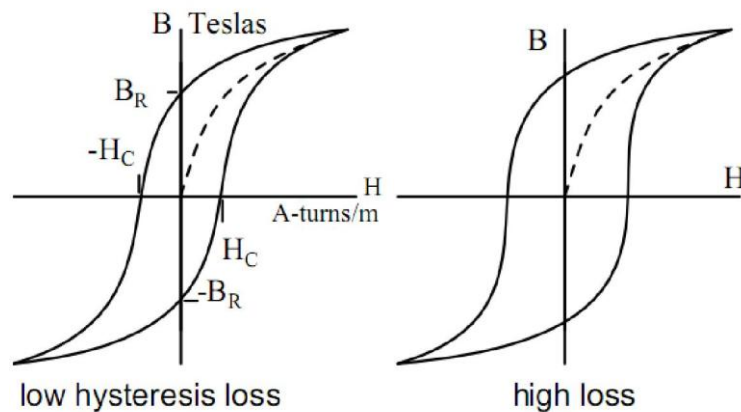
dimana:

- 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.

b. 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.



Gambar 2.12 Kurva Hysteresis

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.

c. 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.

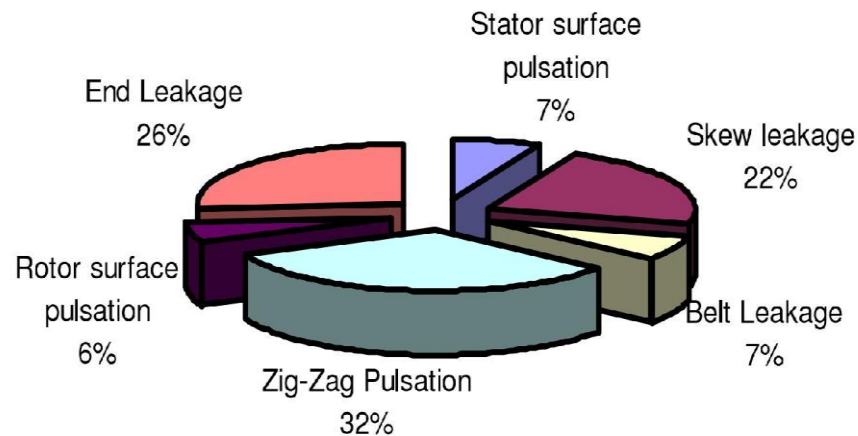
d. Rugi-Rugi Stray

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

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.



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.

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.
--	--	--	--	--	---

Catatan:

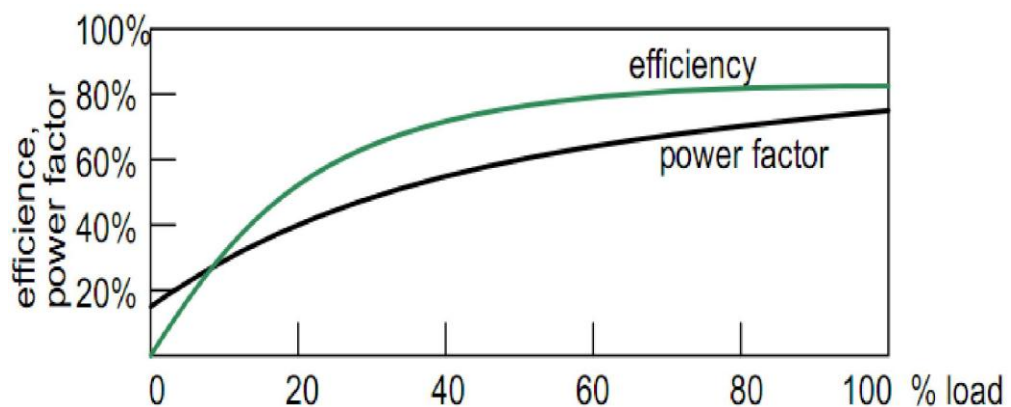
$$RPI = RCL + RPD \quad (2.11)$$

$$RPD = RPI (1-S) \quad (2.12)$$

2.3.4 Faktor daya

Motor induksi menarik arus lagging terhadap tegangan linanya. 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 energy 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. Penggulungan ulang motor dapat mengakibatkan penurunan efisiensi.

2.3.6 Analisa Efisiensi Motor Induksi

a. 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.

$$\text{Penghematan tahunan} = 0,746 \times HP \times L \times C \times U \left(\frac{100}{\eta_B} - \frac{100}{\eta_A} \right) \quad (2.13)$$

dimana:

HP	= daya (Watt)
L	= persentase beban
C	= biaya energy (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.

$$i = \frac{100 + r_1}{100 + r_2} - 1 \quad (2.14)$$

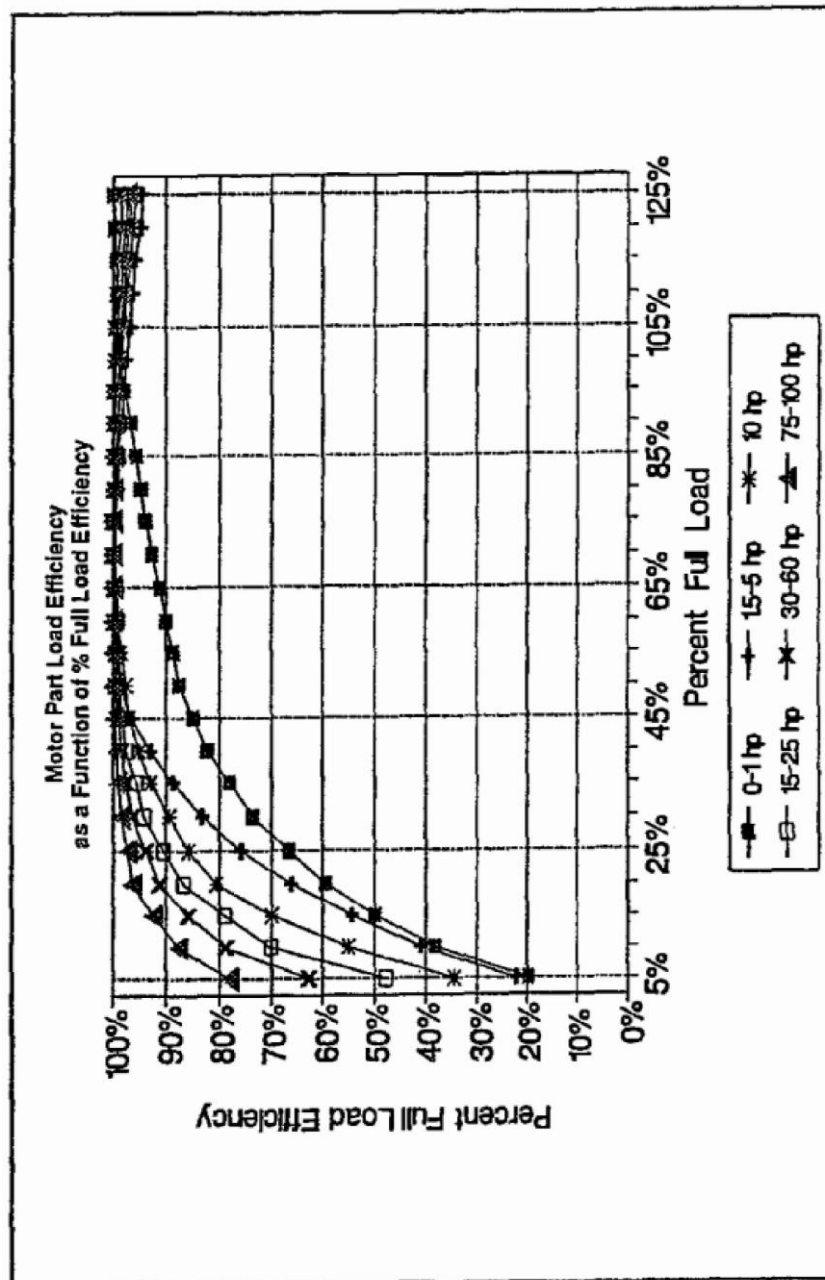
$$\text{Penghematan tahun ke-}n = \text{Penghematan tahunan} \times \frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n} \quad (2.15)$$

dimana:

i	= bunga efektif (%)
r_1	= inflasi biaya energi (%)
r_2	= nilai pengembalian yang diharapkan (%)

b. 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.



Gambar 2.15 Grafik Efisiensi Motor Sebagai Fungsi Beban.

(www.quantum-controls.co.uk/faq/motors/what-design-should-i-consider-when-choosing-a-new-motor)

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%.