



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi 3 Fasa¹

Secara umum motor listrik berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang berupa tenaga putar. Motor listrik terdiri dari dua bagian yang sangat penting yaitu bagian stator atau bagian yang diam dan rotor atau bagian yang berputar. Pada motor AC, kumparan rotor tidak menerima energi listrik secara langsung tetapi secara induksi seperti yang terjadi pada kumparan transformator. Oleh karena itu, motor AC dikenal dengan motor induksi. Dilihat dari konstruksinya yang sederhana, kuat, dan harganya yang relatif murah, maka motor induksi tiga fasa ini sangatlah cocok dan paling banyak digunakan dalam bidang industri.

Motor induksi tiga fasa banyak digunakan dikalangan industri, hal ini berkaitan dengan beberapa keuntungan dan kerugian yang dimiliki oleh motor induksi 3 fasa.

Keuntungan :

- a. Bentuknya sederhana dan konstruksinya yang kuat serta hampir tidak pernah mengalami kerusakan yang berarti.
- b. Harganya relatif lebih murah dan perawatannya mudah.
- c. Tidak memerlukan *starting* tambahan dan tidak harus sinkron.
- d. Menghasilkan putaran yang konstan.

Kekurangan :

- a. Pengaturan kecepatan dari motor induksi sulit diatur.
- b. Kecepatannya akan menurun seiring dengan bertambahnya beban.

¹ Wijaya, Mochtar. 2001. Dasar-dasar Mesin Listrik. Hal : 155



2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi²

Pada dasarnya ada beberapa prinsip penting pada motor induksi yaitu :

1. Apabila sumber tegangan tiga fasa dipasang pada kumparan stator, maka pada kumparan tersebut akan timbul medan magnet putar dengan kecepatan.

$$n_s = \frac{120}{p} f \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

n_s = Kecepatan medan putar stator (rpm)

f = Besarnya frekuensi (Hz)

p = Jumlah kutub

2. Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor.
3. Akibatnya pada kumparan rotor timbul gaya gerak listrik induksi (ggl) sebesar:

$$E_{2s} = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_r \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

E_{2s} = Tegangan induksi pada saat rotor berputar (volt)

f_2 = Frekuensi rotor (Hz)

N_r = Kecepatan putar rotor (rpm)

Φ_m = Fluksi maksimum (Wb)

4. Karena rangkaian kumparan rotor merupakan rangkaian tertutup, maka ggl (E) akan menghasilkan arus rotor (I_r).
5. Adanya arus (I) didalam medan magnet menimbulkan gaya (F) pada rotor.
6. Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
7. Seperti yang telah dijelaskan pada point (3) tegangan induksi rotor timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya agar tegangan terinduksi diperlukan perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator (N_s) dengan kecepatan putar rotor (N_r).
8. Perbedaan kecepatan antara N_s dan N_r disebut *slip* (s).

² Wijaya, Mochtar. 2001. Dasar-dasar Mesin Listrik. Hal : 157



9. Bila $N_r = N_s$, tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada rotor, dengan demikian tidak dihasilkan kopel.
10. Kopel motor akan timbul apabila N_r lebih kecil dari N_s .

2.3 Klasifikasi Motor Induksi³

Motor induksi memiliki berbagai jenis yang dapat diklasifikasikan antara lain berdasarkan prinsip kerja, berdasarkan macam arus, dan berdasarkan kecepatan.

A. Berdasarkan Prinsip Kerja

1. Motor Sinkron.
 - Biasa (tanpa slip ring)
 - Super (dengan slip ring)
2. Motor Asinkron
 - Motor Induksi (Squirrel Cage & Slip Ring)

B. Berdasarkan Macam Arus

Berdasarkan macam arus motor induksi dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok, yaitu :

1. Motor induksi satu fasa. Motor ini hanya memiliki satu gulungan stator, beroperasi dengan pasokan daya satu fasa, memiliki sebuah rotor sangkar tupai, dan memerlukan sebuah alat untuk menghidupkan motornya.
2. Motor induksi tiga fasa. Medan magnet yang berputar dihasilkan oleh pasokan tiga fasa yang seimbang. Motor tersebut memiliki kemampuan daya yang tinggi dan penyalan sendiri.

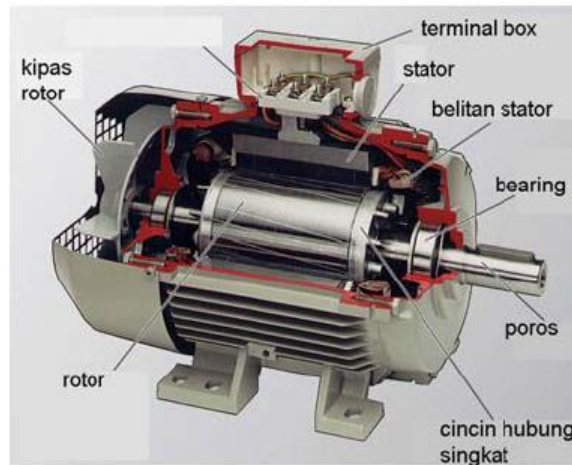
C. Berdasarkan Kecepatan

1. Kecepatan Konstan
2. Kecepatan Berubah
3. Kecepatan Diatur

^[3] Rijono, Yon, Dasar Teknik Tenaga Listrik. (Yogyakarta: Andi Offset, 1997), hal:309



2.4 Konstruksi Motor Induksi 3 Fasa



Gambar 2.1 Konstruksi Motor Induksi 3 fasa⁴

Pada dasarnya motor induksi terdiri dari suatu bagian yang tidak berputar (stator) dan bagian yang bergerak (rotor). Secara ringkas stator terdiri dari blok-blok dinamo yang berisolasi pada satu sisinya dan mempunyai ketebalan 0,35 – 0,5 mm, disusun menjadi sebuah paket blok yang berbentuk gelang. Disisi dalamnya dilengkapi dengan alur - alur.

Bagian motor dengan garis tengah yang besar, inti besi merupakan busur inti segmen yang disambung - sambung menjadi satu lingkaran. Celah udara antara stator dan rotor pada motor yang kecil berkisar 0,25 – 0,75 mm. Pada motor yang besar bisa sampai 10 mm. Celah udara yang besar ini disediakan untuk kemungkinan terjadinya perenggangan pada sumbu atau sambungannya. Tarikan pada pita (*belt*) atau beban yang tergantung tersebut akan mengakibatkan sumbu motor melengkung.

Pada dasarnya inti besi stator dan belitan rotor motor asinkron ini sama dengan stator dan belitan motor asinkron. Kesamaan ini dapat ditunjukkan bahwa pada motor asinkron yang dipasang sesuai dengan stator motor asinkron akan dapat bekerja dengan baik.

⁴ Siswoyo, Teknik Listrik Industri(Jakarta:Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional,2008). Hal. 5-7.



2.4.1 Stator

Pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga fasa yang disebut kumparan stator, yang masing-masing kumparan mendapatkan suplai arus tiga fasa. Stator terdiri dari pelat-pelat besi yang disusun sama besar dengan rotor dan pada bagian dalam mempunyai banyak alur-alur yang diberi kumparan kawat tembaga yang berisolasi. Lalu akan timbul flux medan putar, karena adanya flux medan putar pada kumparan stator, mengakibatkan rotor berputar karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar sinkron dengan kecepatan putar stator. Dari bagian stator dapat dibagi menjadi beberapa bagian antara lain sebagai berikut :

1. Rangka (Frame)

Fungsi utama dari rangka adalah sebagai tempat mengalirnya fluks magnet, karena itu rangka mesin di buat dari bahan ferromagnetik. Selain itu rangka berfungsi untuk meletakkan alat-alat tertentu dan melindungi bagian-bagian mesin lainnya. Mesin – mesin yang kecil di buat dari besi tuang, sedangkan mesin-mesin yang besar rangkanya di buat dari plat campuran baja yang berbentuk silinder.

2. Inti kutub magnet dan lilitan penguat magnet

Fluks magnet yang terdapat pada mesin motor listrik dihasilkan oleh kutub kutub magnet. Kutub magnet diberi lilitan penguat magnet yang berfungsi untuk tempat aliran arus listrik supaya terjadi proses elektromagnetisme. Pada dasarnya kutub magnet terdiri dari magnet dan sepatu kutub magnet. Karena kutub magnet berfungsi menghasilkan fluks magnet, maka kutub magnet di buat dari bahan ferromagnetik, misalnya campuran baja-silikon. Di samping itu kutub magnet di buat dari bahan berlapis-lapis tipis untuk mengurangi panas karena adanya arus pusar yang terbentuk pada kutub magnet tersebut.



3. Sikat komutator

Fungsi dari sikat adalah sebagai penghubung untuk aliran arus dari lilitan jangkar ke terminal luar (generator) ke lilitan jangkar (Motor). Karena itu sikat sikat di buat dari bahan konduktor. Di samping itu sikat juga berfungsi untuk terjadinya komutasi bersama-sama dengan komutator, bahan sikat harus lebih lunak dari komutator. Supaya hubungan/kontak antara sikat sikat yang diam dengan komutator yang berputar dapat sebaik mungkin, maka sikat memerlukan alat pemegang dan penekan berupa per pegas yang dapat diatur.

4. Komutator

Seperti diketahui komutator berfungsi sebagai alat penyearah mekanik, yang bersama-sama dengan sikat membentuk suatu kerjasama yang disebut komutasi. Supaya menghasilkan penyearah yang lebih baik, maka komutator yang digunakan jumlahnya banyak. Karena itu tiap belahan/segmen komutator tidak lagi merupakan bentuk sebagian silinder, tetapi sudah berbentuk lempeng-lempeng. Diantara setiap lempeng/segmen komutator terdapat bahan isolator. Isolator yang digunakan menentukan kelas dari mesin berdasarkan kemampuan suhu yang timbul dalam mesin tersebut.

5. Jangkar

Jangkar yang umum digunakan dalam mesin arus searah adalah yang berbentuk silinder, yang diberi alur pada bagian permukaannya untuk melilitkan kumparan-kumparan tempat terbentuknya Ggl imbas. Jangkar dibuat dari bahan yang kuat yang mempunyai sifat ferromagnetik dengan permeabilitas yang cukup besar, dengan maksud agar kumparan lilitan jangkar terletak dalam daerah yang imbas magnetnya besar sehingga ggl yang terbentuk dapat bertambah besar.



2.4.2 Rotor

Berdasarkan hukum Faraday tentang imbas magnet, maka medan putar yang secara relative merupakan medan magnet yang bergerak terhadap penghantar rotor akan mengimbaskan gaya gerak listrik (ggl). Frekuensi imbas ggl ini sama dengan frekuensi jala-jala (sumber). Besarnya ggl imbas ini berbanding lurus dengan kecepatan relative antara medan putar dan penghantar rotor. Penghantar – penghantar dalam rotor yang membentuk suatu rangkaian tertutup, merupakan rangkaian pelaju arus rotor dan searah dengan hukum yang berlaku yaitu hukum Lenz.

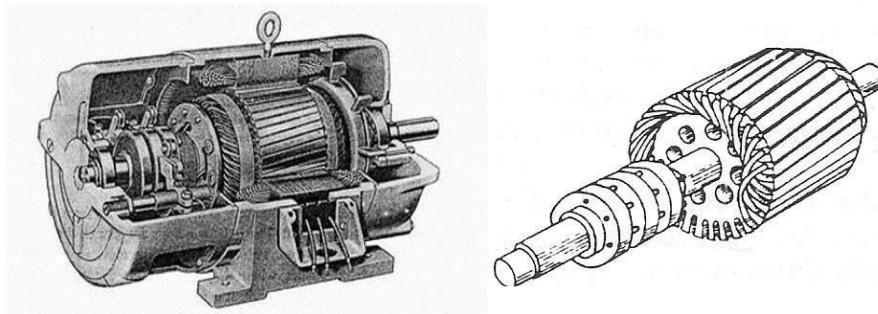
Dalam hal ini arus rotor ditimbulkan karena adanya perbedaan kecepatan yang berada diantara fluksi atau medan putar stator dengan penghantar yang diam. Rotor akan berputar dalam arah yang sama dengan arah medan putar stator.



2.5 Jenis – Jenis Motor Induksi Tiga Fasa Berdasarkan bentuk Rotor-nya

2.5.1 Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Belitan (Wound-Rotor Motor)

Motor rotor belitan (motor cincin slip) berbeda dengan motor sangkar tupai dalam hal konstruksi rotornya. Seperti namanya, rotor dililit dengan lilitan terisolasi serupa dengan lilitan stator. Lilitan fasa rotor dihubungkan secara Y dan masing – masing fasa ujung terbuka yang dikeluarkan ke cincin slip yang terpasang pada poros rotor. Konstruksi motor tiga fasa rotor belitan ditunjukkan pada gambar di bawah ini



Gambar 2.2 Motor Rotor Lilit

2.5.2 Motor Induksi Tiga Fasa Sangkar Tupai (Squirrelcage Motor)

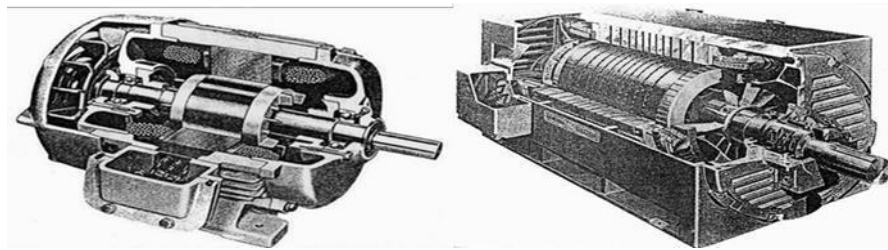
Penampang motor sangkar tupai memiliki konstruksi yang sederhana. Inti stator pada motor sangkar tupai tiga phasa terbuat dari lapisan-lapisan plat baja beralur yang didukung dalam rangka stator yang terbuat dari besi tuang atau plat baja yang dipabrikasi. Lilitan-lilitan kumparan stator diletakkan dalam alur stator yang terpisah 120 derajat listrik. Lilitan fasa ini dapat tersambung dalam hubungan delta (Δ) ataupun bintang (Y). Rotor jenis rotor sangkar ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.3 Rotor Sangkar



Batang rotor dan cincin ujung motor sangkar tupai yang lebih kecil adalah coran tembaga atau aluminium dalam satu lempeng pada inti rotor. Dalam motor yang lebih besar, batang rotor tidak dicor melainkan dibenamkan ke dalam alur rotor dan kemudian dilas dengan kuat ke cincin ujung. Batang rotor motor sangkar tupai tidak selalu ditempatkan paralel terhadap poros motor tetapi kerap kali dimiringkan. Hal ini akan menghasilkan torsi yang lebih seragam dan juga mengurangi derau dengung magnetik sewaktu motor sedang berputar. Pada ujung cincin penutup dilekatkan sirip yang berfungsi sebagai pendingin. Rotor jenis rotor sangkar standar tidak terisolasi, karena batangan membawa arus yang besar pada tegangan rendah. Motor induksi dengan rotor sangkar ditunjukkan pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.4 Konstruksi Motor Induksi Rotor Sangkar



2.6 Rugi-rugi dan Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa

2.6.1 Rugi-rugi

Pada sebuah motor induksi terdapat beberapa rugi-rugi yang ditimbulkan karena komponen-komponen yang menyusun motor itu sendiri, seperti komponen tembaga yang terdapat pada gulungan stator dan rotor. Komponen-komponen tersebut akan menimbulkan rugi-rugi seperti rugi-rugi belitan , rugi-rugi pada inti besi, rugi-rugi mekanik seperti hambatan yang ditimbulkan karena gesekan dan angin.

Keadaan ideal dalam sistem konversi energi, yaitu mempunyai daya output tepat sama dengan daya input yang dapat dikatakan efisiensi 100%. Tetapi pada keadaan yang sebenarnya, tentu ada kerugian energi yang menyebabkan efisiensi dibawah 100%. Dalam sistem konversi energi elektro mekanik yakni dalam operasi motor – motor listrik terutama pada motor induksi, total daya yang diterima sama dengan daya yang diberikan, ditambah dengan kerugian daya yang terjadi, atau :

$$P_{\text{rugi-rugi}} = P_{in} - P_{out} \dots\dots\dots (2.3)^5$$

Dimana:

P_{in} = Total daya yang di terima motor

P_{out} = Daya yang di terima motor untuk beroperasi

$P_{\text{rugi-rugi}}$ = Total kerugian daya yang di hasilkan oleh motor

Tabel 2.1 jenis rugi - rugi motor induksi 3 fasa

Jenis Rugi - rugi	Persentase rugi - rugi total (%)
Rugi - rugi belitan	55
Rugi – rugi inti Besi	25
Rugi - rugi mekanik	15
Rugi - rugi beban menyimpang (<i>stray load</i>)	5

⁵ Siswoyo, Teknik Listrik Industri (Jakarta:Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional,2008). Hal. 5-8.



a. Rugi-rugi Belitan⁶

Pada rugi-rugi belitan, rugi-rugi yang ditimbulkan sebanding dengan nilai $I^2.R$, dimana I merupakan arus yang mengalir pada belitan tembaga dan R merupakan besarnya nilai tahanan tembaga tersebut. Sehingga semakin besar arus maka semakin besar rugi-rugi pada tembaga tersebut. Rugi-rugi belitan biasanya berkisar antara 55-60 % dari total rugi-rugi daya motor pada keadaan beban nominal.

$$P_b = P_{\text{rugi-rugi}} \times 0,55 \dots\dots\dots (2.4)$$

b. Rugi-rugi Inti Besi

Untuk rugi-rugi pada inti besi, rugi-rugi tersebut tidak terkait penuh dengan besar kecilnya beban yang diberikan pada motor tersebut. Faktor yang mempengaruhi besarnya rugi-rugi pada inti besi adalah hysteresis dan *eddy current* (arus eddy). Dan hal ini lebih dipengaruhi pada konstruksi motor itu sendiri. Rugi-rugi mekanik biasanya berkisar antara 20-25 % dari total rugi-rugi daya motor pada keadaan beban nominal.

$$P_{ib} = P_{\text{rugi-rugi}} \times 0,25 \dots\dots\dots (2.5)$$

c. Rugi-rugi Mekanik

Sedangkan untuk rugi-rugi mekanik pada umumnya disebabkan oleh faktor mekanikal seperti hambatan dan gesekan, seperti pada bearing, udara dll. Total rugi-rugi yang dijelaskan diatas akan memperbesar daya listrik yang dibutuhkan untuk menggerakkan beban oleh sebuah motor. Rugi-rugi mekanik biasanya berkisar antara 10-15 % dari total rugi-rugi daya motor pada keadaan beban nominal.

$$P_m = P_{\text{rugi-rugi}} \times 0,15 \dots\dots\dots (2.6)$$

⁶ NAESA, Adna Bagus. *Analisa Efisiensi Motor Induksi 3 Fasa GB 304 45 Kw Pada Blower Cooling Tower Di PT. Pupuk Sriwidjaja*. 2017. PhD Thesis. POLITEKNIK NEGERI SRIWIJAYA.



d. Rugi-rugi *Stray Load*

Kita telah banyak melihat bahwa beberapa macam kerugian selalu dianggap konstan dari keadaan beban nol hingga beban penuh walaupun kita tahu bahwa rugi - rugi tersebut sebenarnya berubah, secara kecil terhadap beban. Sebagai tambahan, kita tidak dapat menghitung berapa besar kerugian ini seperti yang diakibatkan oleh perubahan *fluks* terhadap beban, geometri konduktor sehingga arus terbagi sedikit tidak merata dalam konduktor bertambah, mengakibatkan penambahan tahanan konduktor dan karena itu rugi - rugi konduktor harus bertambah. Dari semua kerugian yang relatif kecil ini, baik dari sumber yang ketahu maupun yang tidak diketahui, disatukan menjadi rugi - rugi *stray load* yang cenderung bertambah besar apabila beban meningkat (berbanding kuadrat dengan arus beban).

Tabel 2.2 Persentase Rugi-rugi *Stray Load*

<i>Machine Rating KW</i>	<i>Stray Load Loss Percent of Rated Load</i>
1 - 90	1.8%
91 - 375	1.5%
376 - 1850	1.2%
1851 and greater	0.9%

Pada umumnya kerugian ini berkisar 1 - 5% dari total kerugian daya motor pada keadaan beban nominal.

$$P_s = P_{\text{rugi-rugi}} \times 0,05 \dots\dots\dots (2.7)$$



2.6.2 Cara – Cara Menentukan Rugi-Rugi Pada Motor

Rugi – rugi motor listrik sebagian dapat ditemukan dengan cara konvensional yaitu dengan percobaan beban nol dan percobaan block rotor (hanya untuk motor arus bolak – balik). Percobaan beban nol dapat menentukan rugi – rugi rotasi motor. Pada keadaan beban nol, seluruh daya listrik input motor digunakan untuk mengatasi rugi – rugi inti dan rugi – rugi mekanik. Rugi – rugi listrik motor dapat ditentukan yaitu pada tahanan DC, tahanan belitan dapat langsung diukur pada terminal belitan jangkar dan belitan penguat secara pengukuran DC, yaitu dengan mengukur tegangan dan arus dengan sumber DC pada belitan tersebut, atau dengan menggunakan ohm meter (jembatan wheatstone).

Pada motor AC, tahanan ekuivalen motor dapat ditentukan dengan percobaan block rotor (hubungan singkat), dimana pada keadaan ini rangkaian ekuivalen motor adalah sama dengan rangkaian ekuivalen hubung singkat dari suatu transformator. Jadi daya pada keadaan ini merupakan rugi – rugi tahanan atau belitan dan pada keadaan ini rugi – rugi inti dapat diabaikan karena tegangan hubung singkat relatif kecil dibandingkan dengan tegangan nominalnya.

Rugi – rugi stray load adalah rugi – rugi yang paling sulit ditukur dan berubah terhadap beban motor. Rugi – rugi ini ditentukan sebagai rugi – rugi sisa (rugi – rugi pengujian dikurangi rugi – rugi konvensional). Rugi – rugi pengujian adalah daya input dikurangi daya output. Rugi – rugi konvensional adalah jumlah dari rugi – rugi inti, rugi – rugi mekanik, rugi – rugi belitan. Rugi – rugi stray load juga dapat ditentukan dengan anggapan kira – kira 1% dari daya output dengan kapasitas daya 150 Kw atau lebih. Dan untuk motor – motor yang lebih kecil dari itu dapat diabaikan.



2.6.3 Efisiensi

Efisiensi dari suatu motor induksi didefinisikan sebagai ukuran keefektifan motor induksi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang dinyatakan sebagai perbandingan/ rasio daya *output* (keluaran) dengan daya *input* (masukan), atau dapat juga dirumuskan dengan :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.8)^7$$

Dimana :

η = Efisiensi (%)

P_{out} = Daya yang diterima motor untuk melakukan kerja (W)

P_{in} = Total daya yang diterima motor (W)

Dari persamaan di atas, perlu dipelajari faktor - faktor yang menyebabkan efisiensi selalu dibawah 100%. Untuk itu perlu diketahui kerugian daya apa saja yang timbul selama motor beroperasi.

1. Belitan dalam motor yang dinamakan rugi-rugi listrik (rugi - rugi belitan).
2. Kerugian daya yang timbul langsung karena putaran motor, yang dinamakan rugi-rugi rotasi, dimana rugi-rugi rotasi dibagi menjadi dua jenis, yaitu:
 - a. Rugi - rugi mekanis akibat putaran.
 - b. Rugi-rugi inti besi akibat kecepatan putaran dan fluks medan.

2.7 Pengertian Daya Listrik Secara Umum

Daya listrik adalah laju perpindahan energi persatuan waktu, yang dilambangkan dengan P. Satuan internasional adalah Watt, yang diambil dari nama *James Watt* (1736 - 1819). Dalam satuan yang umumnya dipakai adalah *Horse Power* (HP), dimana : 1 HP = 746 watt.

Secara teoritis daya terdiri dari tiga yaitu daya aktif, daya reaktif dan daya semu

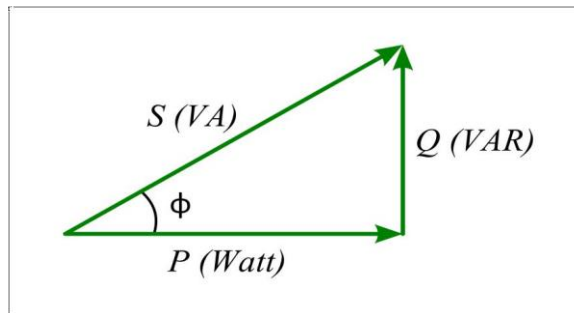
⁷ Siswoyo, Teknik Listrik Industri(Jakarta:Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional,2008). Hal. 5-8.



yang pengertiannya adalah sebagai berikut :

- a. Daya Aktif adalah daya yang dapat diubah menjadi daya thermis mekanis langsung dapat dirasakan oleh konsumen. Satuannya adalah watt (W), kilo watt (KW), dan Mega watt (MW).
- b. Daya reaktif adalah daya yang diperlukan oleh rangkaian magnetisasi peralatan listrik. jadi tidak langsung dipakai, hanya untuk tujuan magnetisasi. Satuannya Volt Ampere Reaktif (VAR), Kilo Volt Ampere Reaktif (KVAR), dan Mega Volt Ampere Reaktif (MVAR).
- c. Daya semu adalah jumlah secara vektoris daya aktif dan daya reaktifnya. Satuannya adalah Volt Ampere (VA), Kilo Volt Ampere (KVA), dan Mega Volt Ampere (MVA).

Jadi hubungan antara daya aktif, daya reaktif dan daya semu dapat digambarkan pada segitiga daya berikut ini :



Gambar 2.5 Segitiga Daya

Dari gambar diatas terdapat tiga jenis persamaan daya untuk tegangan 1 fasa dan 3 fasa yaitu :

Tegangan 1 fasa.

$$P = V \cdot I \cos \varphi \dots\dots\dots(2.9)$$

$$Q = V \cdot I \sin \theta \dots\dots\dots(2.10)$$

$$S = V \cdot I \dots\dots\dots(2.11)$$

Tegangan 3 fasa.

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cos \varphi \dots\dots\dots(2.12)$$



$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \sin \theta \dots\dots\dots(2.13)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

P = Daya Aktif (W)

Q = Daya Reaktif (VAR)

S = Daya Semu (VA)

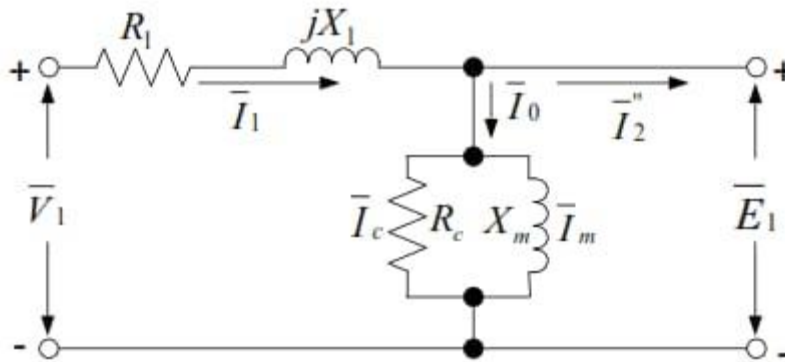
I = Arus (A)

V = Tegangan (V)

Rumus menentukan I_{Steady} menggunakan persamaan berikut

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi} \dots\dots\dots(2.15)$$

2.8 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi



Gambar 2.6 Rangkaian ekuivalen motor induksi

Keterangan:

V1 : Tegangan terminal stator (V)

R1 : Tahanan Efektif Stator (Ohm)

I1 : Arus Stator (A)

X1 : Reaktansi bocor stator (Ohm)

E1 : ggl lawan yang dihasilkan oleh fluks celah udara resultan (V)

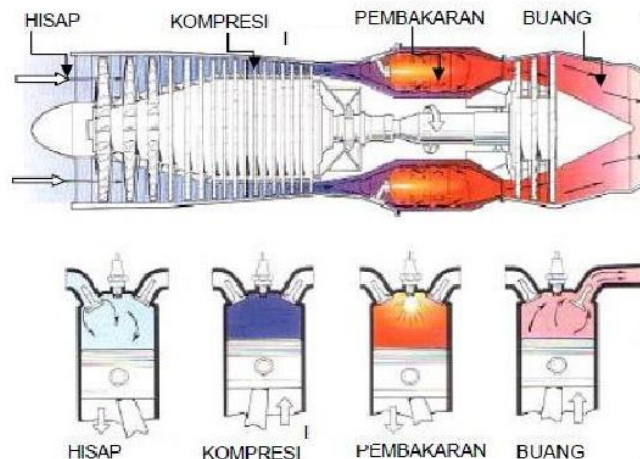


2.9 Pengertian Gas Turbin

Turbin gas merupakan suatu penggerak mula yang memanfaatkan gas sebagai fluida kerja untuk menghasilkan energi gerak. Didalam turbin gas, energi kinetik dikonversikan menjadi energi mekanik berupa putaran yang menggerakkan roda turbin sehingga menghasilkan daya. Bagian turbin yang berputar disebut rotor dan bagian turbin yang diam disebut stator. Rotor sendiri dapat diartikan sebagai roda turbin sedangkan stator dapat diartikan sebagai rumah turbin. Rotor memutar poros daya yang menggerakkan beban seperti generator listrik, pompa dan lain sebagainya.

2.10 Prinsip Kerja Turbin gas

Turbin gas termasuk dalam mesin pembakaran dalam. Yaitu proses pembakarannya yang terdapat didalam mesin itu sendiri.



Gambar 2.7 Mesin Pembakaran Dalam

Udara masuk kedalam kompresor melalui saluran masuk udara (inlet) proses ini disebut dengan proses hisap. Kompresor berfungsi untuk menghisap dan menaikkan tekanan udara tersebut, akibatnya temperatur udara juga meningkat, proses ini dinamakan dengan proses kompresi. Kemudian udara yang telah terkompresi kemudian masuk kedalam ruang bakar. Di dalam ruang bakar terdapat proses penyemprotan udara dengan menggunakan bahan bakar yang berupa gas sehingga terjadinya proses pembakaran. Proses pembakaran tersebut berlangsung dalam keadaan



tekanan konstan sehingga dapat dikatakan ruang bakar hanya untuk menaikkan temperatur. Gas hasil pembakaran tersebut dialirkan ke turbin gas melalui suatu nozel yang berfungsi untuk mengarahkan aliran tersebut ke sudu-sudu turbin. Daya yang dihasilkan oleh turbin gas tersebut digunakan untuk memutar kompresor beban lainnya seperti generator listrik dan lain sebagainya. Setelah melewati turbin gas tersebut akan dibuang keluar melalui saluran buang (*exhaust*).

Karena prinsip dasar kerja turbin gas yang berlangsung kontinyu, maka semua proses yang ada baik itu hisap, kompresi, pembakaraan dan buang semuanya berlangsung secara bersamaan.

2.11 Komponen Turbin Gas⁸

Sesuai siklus Brayton yang sudah dijelaskan diatas komponen utama pada turbin gas yaitu:

- a) Kompresor
 - b) Combustor (ruang bakar)
 - c) Turbin gas
 - d) Kompresor
- a. Kompresor

Kompresor pada turbin gas memiliki fungsi utama yaitu untuk memampatkan udara dan memasok kebutuhan udara pada proses pembakaran di combustor. Kompresor memampatkan udara agar tekanan dan temperatur meningkat agar ketika udara dialirkan menuju ruang bakar tekanan dan temperatur udara tersebut sesuai yang diinginkan.

Ada dua jenis kompresor yang digunakan didalam turbin gas yaitu kompresor dengan aliran tegak lurus sumbu poros, disebut compressor sentrifugal, dan kompresor dengan aliran sejajar sumbu poros, disebut compressor axial. Untuk turbin

⁸ Wijaksana, Luthfi Setia. *Proses Start-Up Turbin Gas Unit 1 Pada PLTGU PT. Indonesia Power UJP Cilegon*. 2019. PhD Thesis. STT PLN JAKARTA.



gas dengan kapasitas kecil digunakan kompresor sentrifugal sedang untuk turbin gas dengan kapasitas besar digunakan kompresor aksial.

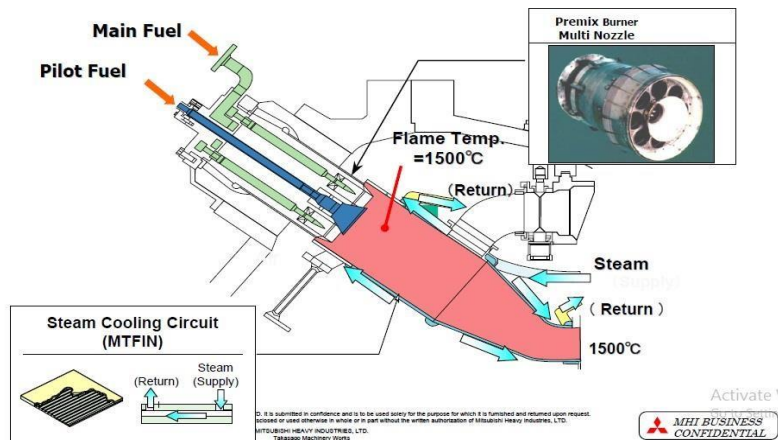
Kompresor sentrifugal, udara masuk pada bagian tengah sejajar poros dan keluar tegak lurus poros. Udara yang masuk kedalam kompresor akan terlempar keluar akibat gaya sentrifugal yang ditimbulkan oleh gerak putar rotor. Kompresor sentrifugal terdiri dari impeler (rotor), difuser (stator), dan sebuah manifold.

Kompresor aksial, udara mengalir sejajar poros. Gerak sudu-sudu rotor akibat berputarnya rotor menyebabkan udara terlempar ke belakang. Kecepatan gerakan sudu menyebabkan kecepatan aliran udara bertambah tinggi atau dengan kata lain mempunyai tekanan dinamis yang lebih tinggi. Tekanan dinamis ini kemudian dirubah menjadi tekanan statis didalam sudu tetap (*stator vane*). Tekanan yang diperoleh didalam kompresor aksial tergantung dari jumlah tingkat dan kecepatan putar rotor. Jumlah udara yang masuk kedalam kompresor diatur dengan menggunakan *Inlet Guide Vane*. Kompresor aksial memiliki dua komponen utama yaitu rotor dan stator.

b. Combustion Chamber (Ruang bakar)

Didalam ruangan bakar adalah tempat proses terjadinya pembakaran antara bahan bakar dan udara. Didalam combustion chamber dipasang komponen-komponen untuk proses pembakaran beserta sarana penunjangnya antara lain fuel nozzle, combustion liner, transition piece, igniter, flame detector.

Turbin gas pembakaran dalam adalah proses kontiniu yang terjadi pada tekanan konstan. Bahan bakar bercampur dan terbakar saat melalui daerah api. Api tidak menyentuh dinding karena dibatasi oleh aliran udara masuk yang juga mendinginkan dinding ruang bakar. Ruang bakar Turbin Gas umumnya berupa tabung silinder terbuat dari material yang tahan dengan panas.



Gambar 2.8 Ruang Bakar

(manual book Mitsubishi Heavy Industries, 2004)

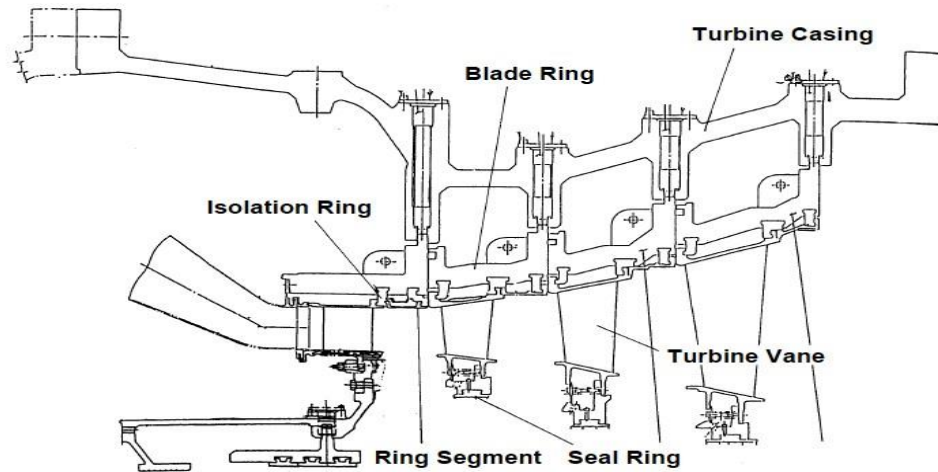
c) Turbin

Turbin merupakan alat untuk menkonversikan energi panas hasil pembakaran di combustion chamber menjadi energi mekanik yang digunakan sebagai penggerak kompresor dan generator serta peralatan lainnya. Perubahan energi terjadi ketika gas panas melewati sudu diam dan sudu gerak. Ketika melewati sudu diam (nozzle) tekanan gas turun tetapi kecepatannya naik. Pada saat mendorong sudu gerak, tekanan dan kecepatan gas turun.

Turbin gas terdiri dari 2 bagian utama, yaitu rotor dan stator:

❖ Stator

Stator terdiri dari casing dan sudu diam serta diaphragma. Casing turbin dapat dibongkar-pasang karena terdiri dari sambungan horisontal dan vertikal. Pada casing terdapat alur-alur melingkar untuk tempat rangkaian sudu diam (fixed blade) dan diaphragma. Sudu diam dipasang pada alur membentuk roda atau tingkat. Jumlah tingkat sudu diam antara 2 sampai 6 tingkat. Sudu diam dialiri gas panas yang suhunya tinggi sehingga perlu pendinginan. Sudu diam merubah tekanan gas panas menjadi kecepatan.

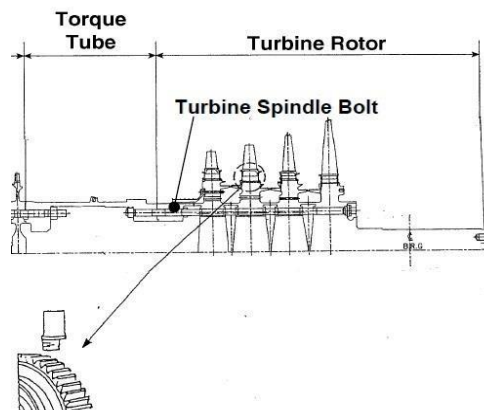


Gambar 2.9 Stator Turbin Gas

(sumber : manual book Mitsubishi Heavy Industries, 2004)^[4]

❖ Rotor

Rotor turbin terdiri dari poros dan sudu gerak. Sudu gerak (moving blade/bucket) dipasang pada poros membentuk lingkaran roda yang biasa disebut tingkat atau disc. Jumlah tingkat sesuai dengan jumlah tingkat pada sudu diam. Pada ujung (tip) tiap sudu gerak tingkat ke 2 dan ke 3 dipasang shroud yang berfungsi untuk mengunci dan meredam getaran yang timbul. Sudu gerak merubah kecepatan gas panas menjadi putaran poros.



Gambar 2.10 Rotor Turbin Gas