



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi Tiga Fasa¹

Motor listrik berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang berupa tenaga putar. Motor listrik terdiri dari dua bagian yang sangat penting yaitu stator atau bagian yang diam dan Rotor atau bagian berputar. Pada motor AC, kumparan rotor tidak menerima energi listrik secara langsung, tetapi secara induksi seperti yang terjadi pada energi kumparan transformator. Oleh karena itu motor AC dikenal dengan motor induksi. Dilihat dari kesederhanaannya, konstruksinya yang kuat dan kokoh serta mempunyai karakteristik kerja yang baik, motor induksi tiga fasa yang cocok dan paling banyak digunakan dalam bidang industri.

Penggunaan motor induksi yang banyak dipakai di kalangan industri mempunyai keuntungan sebagai berikut :

- a. Bentuknya yang sederhana dan memiliki konstruksi yang kuat dan hampir tidak pernah mengalami kerusakan yang berarti.
- b. Harga relatif murah dan dapat diandalkan.
- c. Efisiensi tinggi pada keadaan berputar normal, tidak memerlukan sikat sehingga rugi – rugi daya yang diakibatkannya dari gesekan dapat dikurangi.
- d. Perawatan waktu mulai beroperasi tidak memerlukan starting tambahan khusus dan tidak harus sinkron.

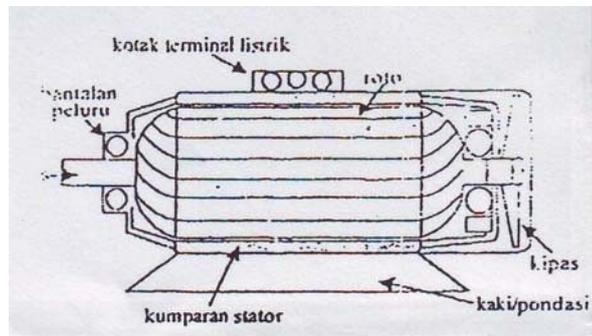
Namun disamping hal tersebut diatas, terdapat pula faktor – faktor kerugian yang tidak menguntungkan dari motor induksi yaitu sebagai berikut :

- a. Pengaturan kecepatan dari motor induksi sangat mempengaruhi efisiensinya.
- b. Kecepatan motor induksi akan menurun seiring dengan bertambahnya beban, tidak seperti motor DC atau motor shunt.

¹ Rijono, Yon, Drs. 1997. Dasar Tehnik Tenaga Listrik. Andi, Yogyakarta. Hal : 306



- c. Kopel awal mutunya rendah dibandingkan dengan motor DC shunt.



Gambar 2.1 Konstruksi Dasar Motor Induksi Tiga Fasa

2.2 Klasifikasi Motor Listrik AC²

Motor listrik AC memiliki beberapa jenis, yang jenis ini membedakan berdasarkan beberapa faktor utama yang antara lain berdasarkan prinsip kerja, berdasarkan macam arus dan berdasarkan kecepatan.

a. Berdasarkan Prinsip Kerja

- Motor Sinkron.
 - Biasa (tanpa slip ring)
 - Super (dengan slip ring)
- Motor Asinkron.
 - Motor Induksi (Squirrel Cage & Slip Ring)
 - Motor Komutator (Seri, Terkompensasi, Shunt, Repulasi)

b. Berdasarkan Macam Arus

- Fasa tunggal
- Tiga fasa

c. Berdasarkan Kecepatan

- Kecepatan konstan
- Kecepatan berubah
- Kecepatan diatur

² Rijono, Yon, Drs. 1997. Dasar Tehnik Tenaga Listrik. Andi, Yogyakarta. Hal : 309



2.3 Konstruksi Motor Induksi³

Pada dasarnya motor induksi arus putar terdiri dari suatu bagian yang tidak berputar (stator) dan bagian yang bergerak memutar (rotor). Secara ringkas stator terdiri dari blek – blek dinamo yang berisolasi pada satu sisinya dan mempunyai ketebalan 0,35 – 0,5 mm, disusun menjadi sebuah paket blek yang berbentuk gelang. Disisi dalamnya dilengkapi dengan alur – alur. Didalam alur ini terdapat perbedaan antara motor asinkron dengan lilitan sarang (rotor sarang atau rotor hubung pendek) dan gelang seret dengan lilitan tiga fasa. Atau dari sisi lainnya bahwa inti besi stator dan rotor terbuat dari lapisan (email) baja silikon tebalnya 0,35 - 0,5 mm, tersusun rapi, masing – masing terisolasi secara elektrik dan diikat pada ujung – ujungnya.

Lamel inti besi stator dan rotor bagian motor dengan garis tengah bagian motor, dengan garis tengah bagian luar dari stator lebih dari 1 m. Bagi motor dengan garis tengah yang lebih besar, lamel inti besi merupakan busur inti segmen yang disambung – sambung menjadi satu lingkaran. Celah udara antara stator dan rotor pada motor yang kecil adalah 0,25 – 0,75 mm, pada motor yang besar sampai 10 mm. Celah udara yang besar ini disediakan bagi kemungkinan terjadinya perenggangan pada sumbu sebagai akibat pembebanan transversal pada sumbu atau sambungannya. Tarikan pada pita (belt) atau beban yang tergantung tersebut akan menyebabkan sumbu motor melengkung.

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

a. Stator (bagian motor yang diam)

Pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga kumparan 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

³ Rijono, Yon, Drs. 1997. Dasar Tehnik Tenaga Listrik. Andi, Yogyakarta. Hal : 311



mempunyai banyak alur – alur yang diberi kumparan kawat tembaga yang berisolasi. Jika kumparan stator mendapatkan suplai arus tiga fasa maka pada kumparan tersebut akan timbul flux magnet putar. Karena adanya flux magnet putar pada kumparan stator, mengakibatkan rotor berputar karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar rotor sinkron dengan kecepatan putar stator.

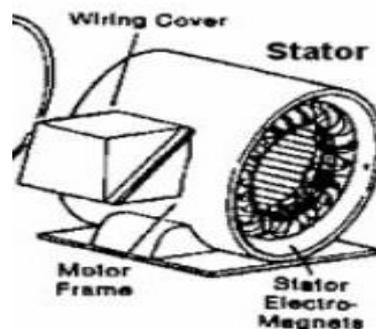
$$n_s = \dots\dots\dots(2.1)^4$$

Dimana :

n_s = Kecepatan sinkron (rpm)

f = Besarnya frekuensi (Hz)

P = Jumlah kutub



Gambar 2.2 Kontruksi Stator Mesin Induksi³

Dari bagian motor yang diam (stator) dapat dibagi – bagi menjadi beberapa bagian antara lain sebagai berikut :

- Bodi Motor (gandar)
- Inti Kutub magnet dan lilitan penguat magnet
- Sikat
- Komutator
- Jangkar
- Lilitan Jangkar

⁴ Zuhail. 1991. Dasar Tenaga Listrik. ITB, Bandung. Hal : 66

Nopisha, Frans. 2008. Menghitung Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sistem Centripugal pada Electrical Submersible Pump (ESP) di PT. Pertamina EP Region Sumatera. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal : 8



- Bodi Motor (gandar) ⁵

Fungsi utama dari bodi atau gandar motor adalah sebagai bagian dari tempat mengalirnya fluks magnet yang dihasilkan kutub – kutub magnet, karena itu beban motor dibuat dari bahan ferromagnetik. Disamping itu badan motor ini berfungsi untuk meletakkan alat – alat tertentu dan melindungi bagian – bagian mesin lainnya. Biasanya pada motor terdapat papan nama atau name plate yang bertuliskan spesifikasi umum dari motor.

- Inti Kutub Magnet Dan Lilitan Penguat Magnet

Sebagaimana diketahui bahwa fluks magnet yang terdapat pada motor arus searah dihasilkan oleh kutub magnet buatan yang dibuat dengan prinsip elektromagnetis. Lilitan penguat magnet berfungsi untuk mengalirkan arus listrik agar terjadi proses elektromagnetis.

- Sikat – Sikat dan Pemegang Sikat

Fungsi dari sikat adalah sebagai jembatan bagi aliran arus dari sumber. Disamping itu sikat memegang peranan penting untuk terjadinya komutasi, agar gesekan antara sikat dan komutator, maka sikat harus lebih lunak dari pada komutator dan biasanya terbuat dari bahan arang.

Dibawah ini menunjukkan kelompok - kelompok tingkatan sikat, antara lain:

- Sikat grafit alam
- Sikat karbon keras
- Sikat elektrografit
- Sikat grafit logam
- Sikat karbon logam.

Sikat – Sikat akan aus selama operasi dan tingginya akan berkurang. Aus yang diizinkan ditentukan oleh konstruksi dari pemegang sikat (gagang-sikat).

⁵ Nopisha, Frans. 2008. Menghitung Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sistem Centripugal pada Electrical Submersible Pump (ESP) di PT. Pertamina EP Region Sumatera. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal : 9



Bagian puncak dari sikat diberi pelat tembaga guna mendapatkan kontak yang baik antara sikat dan dinding pemegang sikat.

Satu atau dua pengantar yang fleksibel dibenamkan ke dalam sikat untuk menghantarkan arus dari sikat ke jepitan dari pemegang sikat bila sikat – sikat terdapat pada kedudukan yang benar, maka baut harus dieratkan sepenuhnya. Ini menetapkan jembatan sikat dalam suatu kedudukan yang tidak dapat bergerak pada pelindung ujung. Gagang sikat (pemegang sikat) berguna untuk menimbulkan tekanan yang diperlukan antara sikat. Ketiadaan bunga api pada komutator banyak tergantung pada mulur dari perakitan dan pemasangan gagang sikat. Tiap – tiap gagang sikat dilengkapi dengan suatu pegas yang menekan pada sikat melalui suatu sistem tertentu sehingga sikat tidak terjepit.

b. Rotor (bagian motor yang bergerak)⁶

Berdasarkan hukum faraday tentang imbas magnet, maka medan putar yang secara relatif merupakan medan magnet yang bergerak terhadap penghantar rotor akan mengibaskan gaya gerak listrik (ggl). Frekuensi ggl imbas ini sama dengan frekuensi jala – jala.

Besar ggl imbas ini berbanding lurus dengan kecepatan relatif antara medan putar dan penghantar rotor. Penghantar – penghantar dalam rotor yang membentuk suatu rangkaian tertutup, merupakan rangkaian melaju bagi arus rotor dan searah dengan hukum yang berlaku yaitu hukum lenz.

Arahnya melawan fluksi yang mengimbas, dalam hal ini arus rotor itu 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, untuk mengurangi beda kecepatan diatas.

.....(2.2)

Dimana :

⁶ Nopisha, Frans. 2008. Menghitung Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sistem Centripugal pada Electrical Submersible Pump (ESP) di PT. Pertamina EP Region Sumatera. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal : 9



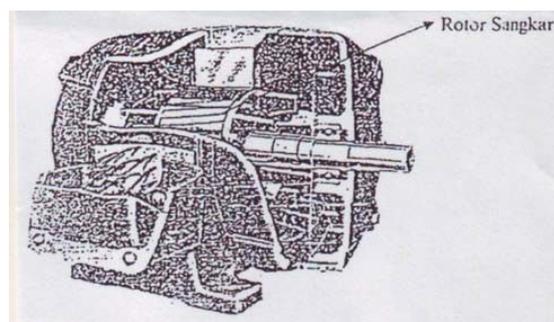
: slip

: kec. rotor (rpm)

: kec. medan putar (rpm)

- Motor rotor sangkar ⁷

Motor rotor sangkar konstruksinya sangat sederhana, yang mana rotor dari motor sangkar adalah konstruksi dari inti berlapis dengan konduktor dipasangkan paralel, atau kira – kira paralel dengan poros yang mengelilingi permukaan inti. Konduktornya tidak terisolasi dari inti, karena arus rotor secara alamiah akan mengalir melalui tahanan yang paling kecil konduktor rotor. Pada setiap ujung rotor, konduktor rotor semuanya dihubung singkatkan dengan cincin ujung. Batang rotor dan cincin ujung sangka yang lebih kecil adalah coran tembaga atau almunium dalam satu lempeng pada inti rotor. Dalam motor yang lebih besar, batang rotor tidak dicor melainkan dibenamkan kedalam alur kemudian dilas ditempatkan paralel terhadap poros motor tetapi kerap kali dimiringkan. Hal ini menghasilkan torsi yang lebih seragam dan juga mengurangi derau dengung magnetik sewaktu motor sedang jalan.



Gambar 2.3 Penampang Potongan Motor Induksi Rotor Sangkar

Motor induksi jenis ini mempunyai rotor dengan kumparan yang terdiri dari beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa sehingga menyerupai sangkar tupai yang terlihat pada gambar dibawah ini, konstruksi

⁷ Zuhail. 1991. Dasar Tenaga Listrik. ITB, Bandung. Hal : 83

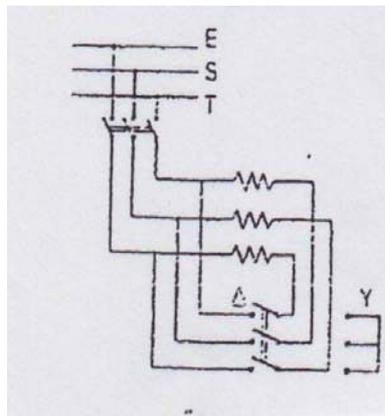
Eugene.C.Lister. 1993. Mesin dan Rangkaian Listrik Edisi Keenam. Erlangga, Jakarta. Hal : 210



rotor seperti ini sangat sederhana bila dibandingkan dengan rotor jenis mesin listrik lainnya.

Dengan demikian harganya pun murah karena konstruksinya yang demikian, padanya tidak mungkin diberikan pengaturan tahanan luar seperti pada motor induksi dengan rotor belitan.

Untuk membatasi arus mula yang besar, tegangan sumber harus dikurangi dan biasanya digunakan oto transformator atau saklar Y – D (seperti pada gambar dibawah ini). Tetapi berkurangnya arus akan berakibat berkurangnya kopel mula, untuk mengatasi hal ini dapat digunakan rotor jenis sangkar ganda.



Gambar 2.4 Rangkaian Rotor Sangkar ⁸

- Motor rotor lilit

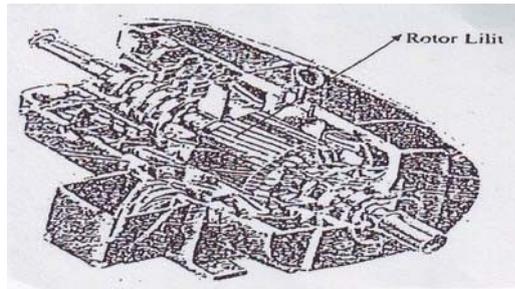
Motor rotor lilit atau motor cincin slip berbeda dengan motor rotor sangkar dalam konstruksi rotornya. Seperti namanya rotor dililit dengan lilitan terisolasi serupa dengan lilitan stator. Lilitan fasa rotor dihubungkan secara Y dengan poros motor. Ketiga cincin slip yang terpasang pada cincin slip dan sikat – sikat dapat dilihat berada disebelah kiri lilitan rotor. Lilitan rotor tidak

⁸ Nopisha, Frans. 2008. Menghitung Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sistem Centripugal pada Electrical Submersible Pump (ESP) di PT. Pertamina EP Region Sumatera. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal : 12

Zuhal. 1991. Dasar Tenaga Listrik. ITB, Bandung. Hal : 83



dihubungkan ke pencatu. Cincin slip dan sikat semata – mata merupakan penghubung tahanan kendali variabel luar ke dalam rangkain motor. Motor rotor lilit kurang banyak diwarnakan dikandingkan dengan motor rotor sangakar karena harganya mahal dan biaya pemeliharaan lebih besar.



Gambar 2.5 Penampang Potongan Motor Induksi Rotor Lilit ⁹

Dari bagian motor yang bergerak rotor ada beberapa hal yang perlu kita ketahui antara lain :

- Komutator

Komutator berfungsi sebagai penyearah mekanik yang bersama – sama dengan sikat membuat suatu kerja sama yang disebut komutasi. Supaya menghasilkan penyearah yang lebih baik, maka komutator yang digunakan hendaknya dalam jumlah yang besar. Setiap belahan (segmen) komutator berbentuk lempengan.

Disamping penyearah mekanik maka komutator berfungsi juga untuk mengumpulkan GGL induksi yang terbentuk pada sisi – sisi kumparan. Oleh karena itu komutator dibuat dari bahan konduktor, dalam hal ini digunakan dari campuran tembaga.

Isolator yang digunakan terletak antara komutator – komutator dan komutator – komutator as (poros) menentukan kelas dari motor berdasarkan kemampuan terhadap suhu yang timbul dari mesin tersebut. Jadi disamping sebagai isolator terhadap listrik pada panas tertentu pada listrik, maka isolator

⁹ Nopisha, Frans. 2008. Menghitung Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sistem Centripugal pada Electrical Submersible Pump (ESP) di PT. Pertamina EP Region Sumatera. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal : 13

Eugene.C.Lister. 1993. Mesin dan Rangkaian Listrik Edisi Keenam. Erlangga, Jakarta. Hal :211



digunakan harus mampu terhadap panas tertentu.

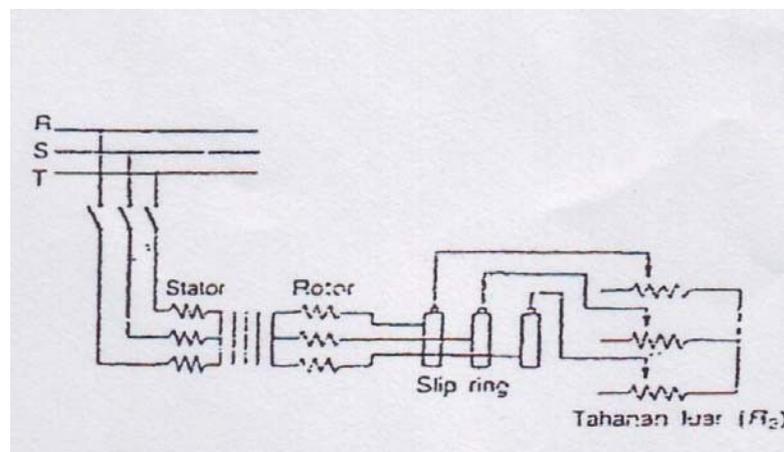
Berdasarkan jenis isolator yang digunakan, dari kemampuan ini dikenal berapa macam kelas – kelas, antar lain :

Kelas A : katun, sutra alam, sutra buatan , dan kertas.

Kelas B : serat asbes, serat gelas.

Seperti yang terlihat pada gambar dibawah ini, penambahan tahanan luar sampai harga tertentu dapat membuat kopel mula mencapai harga maksimum, kopel mula yang besar ini memang diperlukan pada waktu start.

Motor induksi dengan rotor lilit memungkinkan penambahan (Pengaturan Tahanan Luar) tahanan luar yang dapat diatur ini dihubungkan ke rotor melalui cincin, selain untuk menghasilkan kopel mula yang besar tahanan luar tadi diperlukan untuk membatasi arus mula yang besar pada saat start motor. Disamping itu dengan mengubah tahanan luar, kecepatan motor dapat diatur. Dibawah ini terdapat rangkaian induksi dengan belitan memungkinkan penambahan tahanan luar.



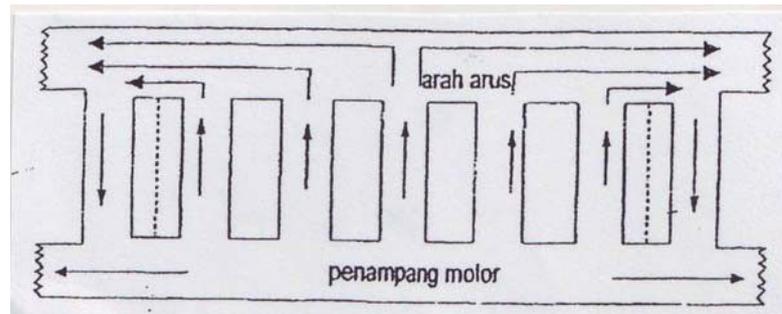
Gambar 2.6 Rangkaian Rotor Lilit ¹⁰

2.4 Beda Motor Induksi Rotor Sangkar Dengan Rotor Lilit

¹⁰ Zuhail. 1991. Dasar Tenaga Listrik. ITB, Bandung. Hal : 82



Rotor Sangkar dapat dianggap sebagai lilitan – lilitan seri dengan langkah penuh (full pitch). Lilitan – lilitan seri tersebut dibentuk oleh pasangan – pasangan batang konduktor yang ujung – ujungnya disatukan oleh cincin hubung singkat, untuk jelasnya dapat dilihat pada gambar 1.7



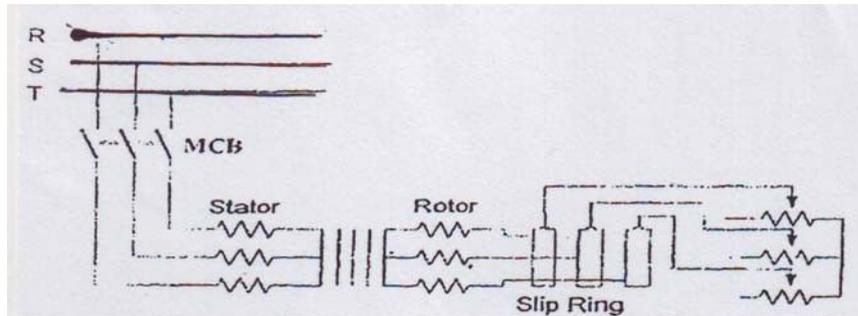
Gambar 2.7 Arus Pada Rotor Sangkar ¹¹

Jika kita bandingkan antara rotor sangkar dan rotor lilit ada perbedaan-perbedaan sebagai berikut :

- Karakteristik motor induksi rotor sangkar sudah fixed, sedang pada motor induksi dengan rotor lilit masih dimungkinkan variasi karakteristiknya dengan cara menambahkan rangkaian luar melalui slipring/sikatnya.
- Jumlah kutub pada rotor sangkar menyesuaikan terhadap jumlah kutub pada lilitan statornya, sedangkan jumlah kutub pada rotor sudah tertentu.

Suatu keuntungan dari motor induksi dengan rotor lilit adalah dapat ditambah tahanan luar. Hal ini sangat menguntungkan untuk starting motor pada beban yang berat dan sekaligus sebagai pengatur putaran motor. Rangkaian motor induksi dengan rotor lilit, dilengkapi dengan tahanan luar. Dalam penggunaannya rotor sangkar lebih banyak dipakai sebab harganya murah. Kelemahan pada starting torque diatasi dengan konstruksi double squirrel cage dan deep bar cage.

¹¹ Sumanto. Drs. 1993. Motor Listrik Arus Bolak – Balik. Andi Offset, Yogyakarta. Hal : 52



Gambar 2.8 Rangkaian Motor Rotor Lilit Dengan Penambahan Tahanan Luar

2.5 Prinsip Kerja Motor Induksi¹²

Pada dasarnya ada beberapa prinsip penting pada motor – motor induksi yaitu :

- a. Apabila sumber tegangan tiga fasa dipasang pada kumparan stator, timbullah medan putar dengan kecepatan.
- b. Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor.
- c. Akibatnya pada kumparan rotor timbul induksi (ggl)
- d. Karena kumparan rotor merupakan rangkaian yang tertutup, ggl (E) akan menghasilkan arus (I).
- e. Adanya arus didalam medan magnet menimbulkan gaya pada motor.
- f. Bila kopel mula dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
- g. Tegangan induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya agar tegangan terinduksi diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator (n_s) dengan kecepatan berputar rotor (n_r).
- h. Perbedaan kecepatan antara n_r dan n_s disebut slip (s) dinyatakan dengan:

¹² Zuhail. 1991. Dasar Tenaga Listrik. ITB, Bandung. Hal : 68



$$S = \frac{n_r}{n_s} \times 100 \% \dots \dots \dots (2.3)$$

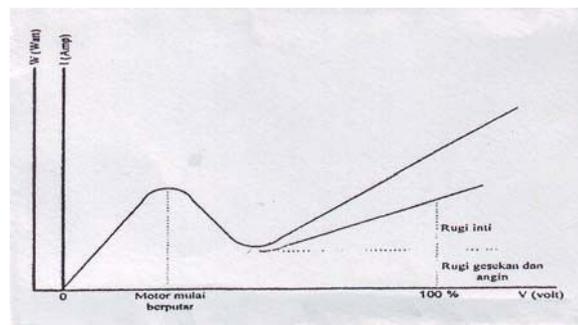
- i. Bila $n_r = n_s$, tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada kumparan jangkar (rotor), dengan demikian tidak dihasilkan kopel. Kopel motor akan ditimbulkan apabila n_r lebih kecil dari n_s .
- j. Dilihat dari cara kerjanya maka motor tak serempak disebut juga motor induksi atau motor asinkron.

2.6 Karakteristik Motor Induksi ¹³

Secara umum motor induksi yang baik mempunyai standar bentuk karakteristik tertentu. Tiap - tiap motor mempunyai karakteristik sendiri - sendiri. Dibawah ini disebutkan beberapa karakteristik yang menggambarkan hubungan antara suatu parameter dan mesin yang lain, yaitu :

a. Karakteristik Beban Nol

Karakteristik beban nol adalah karakteristik yang menggambarkan hubungan antara tegangan ke motor dengan arus daya $\cos \phi$ motor pada keadaan tanpa beban, jadi putaran mendekati sinkron atau sama.

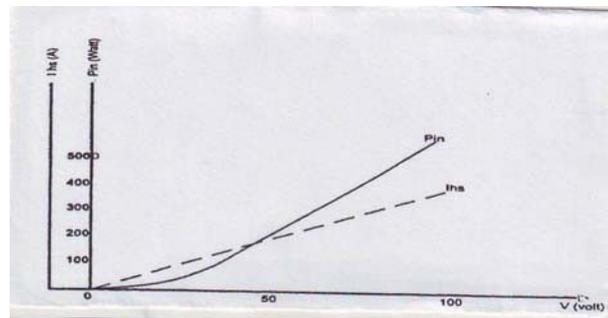


Gambar 2.9 Karakteristik Beban Nol

b. Karakteristik rotor yang diblok

Karakteristik motor yang diblok adalah karakteristik yang menggambarkan hubungan antara tegangan masuk dan arus yang masuk, $\cos \phi$, daya masuk. Seperti yang ditampilkan pada gambar dibawah ini :

¹³ Gunawan. 2008. Efisiensi Motor 3 Fasa Pada Mesin Threshing di PT. Musi Banyuasin Indah. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal : 14

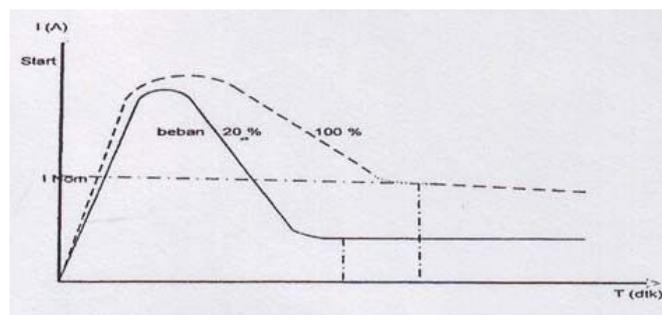


Gambar 2.10 Karakteristik Rotor yang Diblok

c. Karakteristik Start¹⁴

Karakteristik start ini dipakai untuk menggambarkan hubungan antara waktu dan arus. Putaran untuk macam – macam beban pada tegangan masuk konstan. Dari gambar dibawah berikut (Gambar 1.11) dapat dijelaskan bahwa :

- Jika waktu start dari motor induksi makin lama, maka pemanas pada belitan akan lebih besar pula pada elemen pengaman. Hal ini akan berpengaruh terhadap lifetime dari motor.
- Arus akhir ke motor lebih tinggi.
- Putaran akhir motor akan lebih rendah.

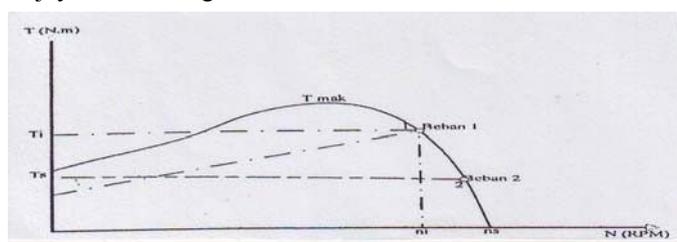


Gambar 2.11 Karakteristik Start

d. Karakteristik Kopel dan Putaran

Daerah kerja motor terletak pada daerah perputaran mendekati n_s . Kopel

¹⁴ Gunawan. 2008. Efisiensi Motor 3 Fasa Pada Mesin Threshing di PT. Musi Banyuasin Indah. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal : 14



lawan beban 1 dan 2 pada waktu start $< T_s$ maka motor dapat distart, masing-masing dengan titik kerja 1 (kopel kerja = T_1 dan putaran kerja n_1) dan titik kerja 2. Bila kopel lawan beban pada saat start $> T_s$ maka motor tidak dapat distart. Selama motor belum berputar, arus motor tinggi. Seperti yang terlihat pada gambar 1.12 berikut ini :

Gambar 2.12 Karakteristik Kopel dan Putaran

2.7 Jenis-jenis motor induksi berdasarkan kelasnya¹⁵

• Kelas A

Motor Induksi 3 fasa kelas A memiliki karakteristik sebagai berikut :

- Torsi awal normal (150 – 170%) dari nilai ratingnya) dan torsi breakdownnya tinggi
- Arus awal relatif tinggi dan Slip rendah ($0.0015 < \text{Slip} < 0.005$)
- Tahanan rotor kecil sehingga efisiensi tinggi
- Baik digunakan untuk torsi beban kecil saat start dan cepat mencapai putaran penuhnya
- contoh : pompa dan fan

• Kelas B

Motor Induksi 3 fasa kelas B memiliki karakteristik sebagai berikut :

- Torsi awal normal hampir sama seperti kelas A
- Arus awal rendah (lebih rendah 75% dari kelas A) dan Slip rendah (slip < 0.005)
- Arus awal dapat diturunkan karena rotor mempunyai reaktansi tinggi
- Rotor terbuat dari plat atau saklar ganda
- Efisiensi dan faktor dayanya pada saat berbeban penuh tinggi
- Contoh : fan, blower, dan motor generator set

• Kelas C

Motor Induksi 3 fasa kelas C memiliki karakteristik sebagai berikut :

- Torsi awal lebih tinggi (200 % dari nilai ratingnya)

¹⁵ Nopisha, Frans. 2008. Menghitung Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sistem Centripugal pada Electrical Submersible Pump (ESP) di PT. Pertamina EP Region Sumatera. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal : 18 dan 22



- Arus awal rendah dan Slip rendah (slip < 0.005)
- Reaktansi rotor lebih tinggi dari kelas B
- Rotor menggunakan sankar rendah
- Saat beban penuh slip cukup tinggi sehingga efisiensinya rendah (lebih rendah dari kelas A dan Kelas B)
- Contoh : Kompresor, Konveyor, Crushers, dan fort

- Kelas D

Motor Induksi 3 fasa kelas D memiliki karakteristik sebagai berikut :

- Torsi awal yang paling tinggi dari kelas lainnya
- Arus awal rendah dan Slip tinggi
- motor ini cocok untuk aplikasi dengan perubahan beban dan perubahan kecepatan secara mendadak pada motor
- Ketika torsi maksimum slip mencapai harga 0.5 atau lebih, sedangkan ketika beban penuh slip antara 8% hingga 15% sehingga efisiensinya rendah
- contoh : elevator, crane, dan ekstraktor.

2.8 Cara-Cara Menentukan Rugi – Rugi Pada Motor Induksi ¹⁶

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).

¹⁶ Nopisha, Frans. 2008. Menghitung Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sistem Centripugal pada Electrical Submersible Pump (ESP) di PT. Pertamina EP Region Sumatera. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal : 21 dan 32



Pada motor AC, tahanan equivalen motor dapat ditentukan dengan percobaan block rotor (hubungan singkat), dimana pada keadaan ini rangkaian equivalen motor adalah sama dengan rangkaian equivalen 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 ditakar 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.

2.9 Rugi – Rugi pada Motor Induksi¹⁷

Seperti kita ketahui bahwa motor – motor listrik adalah suatu alat untuk mengkonversikan energi listrik menjadi energi mekanis. Keadaan ideal dalam system 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 :

$$P_{in} = P_{out} + P_{rugi-rugi} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

P_{in} : Total daya yang diterima motor

P_{out} : Daya yang diterima motor untuk melakukan kerja

¹⁷ Nopisha, Frans. 2008. Menghitung Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sistem Centripugal pada Electrical Submersible Pump (ESP) di PT. Pertamina EP Region Sumatera. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal : 19 dan 20



P_{rugi-rugi} : Total kerugian daya yang dihasilkan oleh motor

Motor listrik tidak pernah mengkonversikan semua daya yang diterima menjadi daya mekanik, tetapi selalu timbul kerugian daya yang semuanya berubah menjadi energi panas yang terbangun.

Efisiensi motor listrik dapat didefinisikan dari bentuk diatas, sebagai perbandingan dimana :

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{Daya Mekanik}}{\text{Daya Listrik}} \quad (2.5)^{18}$$

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{Daya Mekanik}}{\text{Daya Listrik}} \quad (2.6)$$

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

- a. Belitan dalam motor yang dinamakan rugi – rugi listrik (Rugi – rugi belitan).
- b. Kerugian daya yang timbul langsung karena putaran motor, yang dinamakan rugi – rugi rotasi. Rugi – rugi rotasi ini terbagi menjadi dua

jenis yaitu :

- Rugi – rugi mekanis akibat putaran.
- Rugi – rugi inti besi akibat kecepatan putaran dan fluks medan.

Berikut cara menentukan beberapa rugi-rugi, yaitu :

- a. Rugi – Rugi Inti ¹⁹

¹⁸ Nopisha, Frans. 2008. Menghitung Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sistem Centripugal pada Electrical Submersible Pump (ESP) di PT. Pertamina EP Region Sumatera. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal : 18 dan 22

¹⁹ Nopisha, Frans. 2008. Menghitung Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sistem Centripugal pada Electrical Submersible Pump (ESP) di PT. Pertamina EP Region Sumatera. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal : 19 dan 20



Rugi – rugi inti diperoleh pada besi magnetis didalam stator dan rotor akibat timbulnya efek histeris dan arus pusar (eddy current). Timbulnya rugi – rugi inti, ketika besi jangkar atau struktur rotor mengalami perubahan fluks terhadap waktu. Rugi – Rugi ini tidak tergantung pada beban, tetapi merupakan fungsi dari pada fluks dan kecepatan motor. Pada umumnya rugi – rugi inti berkisar antara 20 – 25% dari total kerugian daya motor pada keadaan nominal.

Rugi – rugi arus eddy tergantung pada kuadrat dari kerapatan fluks, frekuensi dan ketebalan dari lapisan. Pada keadaan mesin normal besarnya dapat didekati dengan :

$$P_c = K_c(B_{maks}fT)^2 \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana :

T = Tebal lapisan

B_{maks} = Kerapatan fluks maksimum

f = Frekuensi

K_c = Ketetapan perbandingan

Harga K_c tergantung pada satuan yang digunakan, volume besi dan resistensi vitas besi.

Pada mesin DC, stator tidak mempunyai rugi – rugi inti kecuali pada permukaan kutub akibat adanya perubahan fluks terhadap ruang pada saat rotor berputar karena adanya alur – alur. Pada mesin sinkron, jika belitan medan terletak di rotor Rugi – rugi inti rotor adalah nol kecuali dipermukaan kutub, sedangkan Rugi-rugi inti selalu ada di stator. Pada mesin induksi, Rugi – rugi intinya terdapat di stator dan rotor hampir boleh diabaikan karena frekuensi di rotor relatif kecil.



b. Rugi – rugi mekanik ²⁰

Rugi – rugi gesekan dan angin adalah energi mekanik yang dipakai dalam motor listrik untuk menanggulangi gesekan bantalan poros, gesekan sikat melawan komutator atau slip ring, gesekan dari bagain yang berputar terhadap angin, terutama pada daun kipas pendingin. Kerugian energi ini selalu berubah menjadi panas berubah menjadi panas seperti pada semua rugi – rugi lainnya.

Rugi – rugi mekanik dianggap konstan dari beban nol hingga beban penuh dan ini adalah masuk akal tetapi tidak sepenuhnya tepat seperti halnya pada rugi – rugi inti. Macam –macam ketidak tepatan ini dapat dihitung dalam rugi – rugi stray load. Rugi – rugi mekanik biasanya berkisar antara 5 – 8% dari total rugi – rugi daya motor pada keadaan beban nominal.

c. Rugi – rugi Belitan

Rugi – rugi belitan sering disebut rugi – rugi tembaga tetapi pada saat sekarang sudah tidak begitu. Banyak motor listrik, terutama motor ukuran sangat kecil diatas 750 W, mempunyai belitan stator dari kawat alumunium yang lebih tepat disebut rugi – rugi $I^2 R$ yang menunjukkan besarnya daya yang berubah menjadi panas oleh tahanan dari konduktor tembaga atau aluminium. Total kerugian $I^2 R$ adalah jumlah dari rugi – rugi $I^2 R$ primer (stator) dan rugi – rugi $I^2 R$ sekunder (rotor), termasuk rugi –rugi kontak sikat pada motor AC belitan dan motorDC.

Rugi – rugi $I^2 R$ dalam belitan sebenarnya tidak hanya tergantung pada arus, tetapi juga pada tahanan belitan di bawah kondisi operasi. Sedang tahanan efektif dari belitan selalu berubah dengan perubahan temperatur, skin effect dan sebagainya. Sangat sulit untuk menentukan

²⁰ Nopisha, Frans. 2008. Menghitung Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sistem Centripugal pada Electrical Submersible Pump (ESP) di PT. Pertamina EP Region Sumatera. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal : 19 dan 20



nilai yang sebenarnya dari tahanan belitan dibawah kondisi operasi. Kesalahan pengukuran kerugian belitan dapat dimasukkan ke dalam kerugian stray load. Pada umumnya rugi – rugi belitan ini berkisar antara 55 - 60% dari total kerugian motor pada keadaan beban nominal.

d. Rugi –rugi Stray load ²¹

Kita telah 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, skin effect, geometri konduktor sehingga arus terbagi sedikit tidak merata dalam konduktor bertambah, mengakibatkan pertambahan tahanan konduktor dan karena itu rugi – rugi konduktor harus bertambah. Dari semua kerugian yang relatif kecil ini, baik dari sumber yang di ketahui maupun yang tidak diketahui, disatukan menjadi rugi – rugi stray load yang cenderung bertambah besar apabila beban meningkat (berbanding kuadrat dengan arus beban). Pada mesin DC, rugi – rugi ini masih dapat disebabkan oleh faktor reaksi jangkar, dan arus hubung singkat dalam kumparan pada saat terjadi peristiwa komutasi, kerugian stray load ini sangat sulit ditentukan. Pada umumnya kerugian ini berkisar 11 – 14% dari total kerugian daya motor pada keadaan beban nominal.

2.10 Pengertian Daya ²²

Daya dalam tegangan AC Pada setiap saat sama dengan perkalian dari harga

²¹ Nopisha, Frans. 2008. Menghitung Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sistem Centripugal pada Electrical Submersible Pump (ESP) di PT. Pertamina EP Region Sumatera. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal : 20

²² Nopisha, Frans. 2008. Menghitung Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sistem Centripugal pada Electrical Submersible Pump (ESP) di PT. Pertamina EP Region Sumatera. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal : 21 dan 22

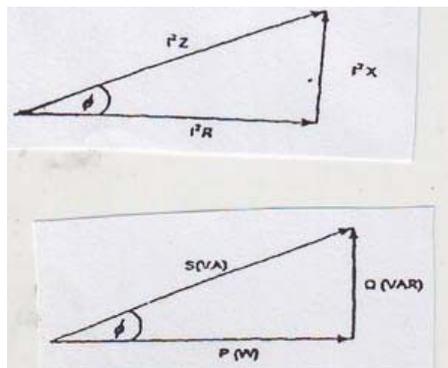


arus dan tegangan pada saat itu. Jika arus dan tegangan bolak – balik satu fasa, maka daya dalam satu periode sama dengan perkalian dari arus dan tegangan efektif. Tetapi jika ada reaktansi dalam rangkaian arus dan tegangan tidak satu fasa sehingga selama siklusnya biasa terjadi arus negatif dan tegangan positif.

Secara teoritis daya terdiri dari tiga yaitu daya efektif, daya reaktif dan daya semu yang pengertiannya adalah sebagai berikut :

- Daya aktif (P) adalah daya yang diubah menjadi energi, persatuan waktu atau dengan kata lain daya aktif adalah daya yang benar – benar terpakai yang dihasilkan oleh komponen resistif, satuannya adalah watt(W).
- Daya reaktif (Q) adalah daya yang ditimbulkan oleh komponen reaktansi, daya reaktif ditentukan dari reaktansi yang menimbulkannya, dapat berupa reaktansi induktif (X_L) atau reaktansi kapasitif (X_C), satuannya adalah volt ampere reaktif (VAR) .
- Daya semu (S) adalah jumlah secara vektoris daya aktif dan daya reaktif yang memiliki satuan volt ampere (VA).

Untuk lebih jelas dapat dilihat pada gambar sistem segi tiga daya berikut ini :



Gambar 2.13 Sistem Segitiga Daya²³

Dimana :

$$P = V.I.\cos \dots\dots\dots (2.8)$$

$$S = V.I \dots\dots\dots (2.9)$$

$$Q = V.I.\sin \dots\dots\dots (2.10)$$

²³ Nopisha, Frans. 2008. Menghitung Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sistem Centripugal pada Electrical Submersible Pump (ESP) di PT. Pertamina EP Region Sumatera. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal : 23



Daya memiliki hubungan dengan usaha yaitu daya merupakan usaha yang dilakukan dalam satuan waktu, atau dengan kata lain daya berbanding terbalik dengan waktu sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P = \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana :

$$P = \text{Daya (W)}$$

$$W = \text{Usaha (Joule)}$$

$$t = \text{Waktu (s)}$$

2.11 Sifat – Sifat Beban Listrik

Dalam sistem arus bolak – balik arus dapat berbeda dengan tegangan yang disebabkan oleh jenis bebannya. Harga arus yang mengalir dalam rangkaian untuk suatu tegangan tertentu yang diberikan seluruhnya ditentukan oleh tahanan rangkaian. Harga arus bolak – balik yang mengalir dalam rangkaian tidak hanya bergantung pada rangkaian tetapi juga tergantung pada induktansi dan kapasitas rangkaian. Tahanan memberikan jenis perlawanan yang sama terhadap aliran arus bolak – balik seperti terhadap arus searah.

Pada motor induksi terjadi perubahan energi listrik menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran rotor. Pada motor industri daya mekanik yang dihasilkan digunakan untuk berbagai keperluan sesuai dengan yang diinginkan seperti digunakan pumping unit sumur minyak seperti yang terjadi objek pengamatan pada laporan akhir ini.

Daya pada motor listrik dapat dihitung menggunakan perhitungan perfasa maupun perhitungan tiga fasa dan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_1 = V_p.I_p.Cos \dots\dots\dots (2.12)$$

Atau

$$P_3 = \sqrt{3}.P_1 \dots\dots\dots (2.13)$$

$$P_3 = \sqrt{3}.V_p.I_p.Cos \dots\dots\dots (2.14)$$



Harga tegangan fasa (V_p) adalah :

$$\dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana :

- P_1 = Daya aktif satu fasa (W)
- P_3 = Daya aktif tiga fasa (W)
- V_L = Tegangan line – line / tegangan line (V)
- V_P = Tegangan perfasa (V)
- I = Arus (A)
- Cos = Faktor daya

2.12 Mesin Pompa Air ²⁴

Pompa adalah mesin yang digunakan untuk memindahkan fluida dari suatu tempat yang rendah ke tempat yang lebih tinggi, atau dari suatu tempat yang bertekanan rendah ke tempat yang bertekanan lebih tinggi dengan melewati fluida tersebut pada sistem perpipaan. Sebenarnya teori dasar untuk pompa adalah sama dengan teori dasar untuk turbin air, yang membedakan adalah bahwa pada turbin air tinggi jatuh diubah menjadi daya poros. Pada pompa, daya pada poros digunakan untuk menaikkan air ke tingkat energi atau tekanan atau tinggi kenaikan yang lebih besar melalui sudu-sudu pada roda jalan.

Didalam roda jalan fluida mendapat percepatan sehingga fluida tersebut mempunyai kecepatan mengalir keluar dari sudu-sudu roda jalan. Kecepatan keluar fluida ini kemudian berkurang dan berubah menjadi tinggi kenaikan H di dalam sudu-sudu pengarah atau di dalam rumah keong. Didalam saluran pipa keluar, ketika fluida mengalir akan bergesekan dengan dinding pipa dan menimbulkan kerugian *head*, sehingga tinggi kenaikan yang diinginkan akan berkurang. Untuk mengatasi hal ini maka kecepatan aliran fluida harus dibatasi, demikian juga dengan kecepatan keliling roda jalan.

Menurut cara memindahkan fluidanya, pompa dapat dibedakan atas :

1. Positive Displacement Pump (Displacement Pump)

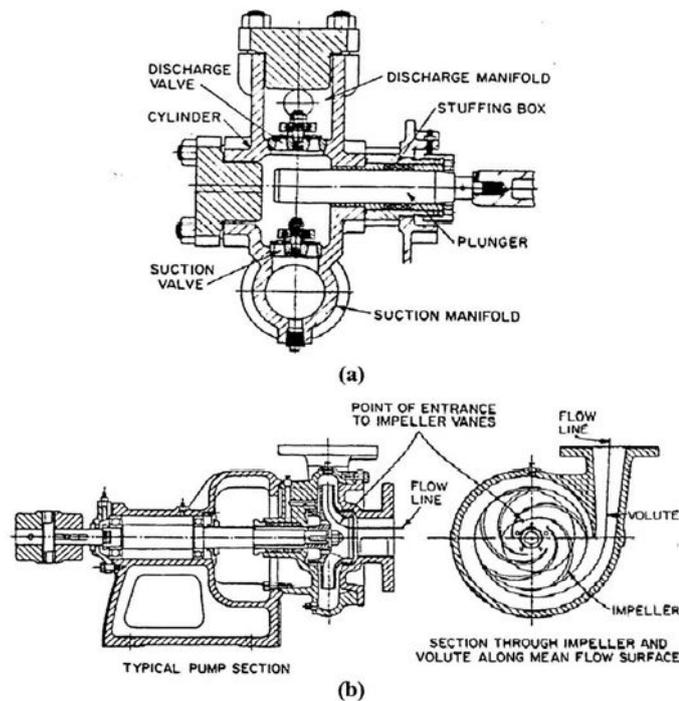
²⁴ M.T, pudjanarsa, Astu. Ir. 2006. Mesin Konversi Energi .Andi Offset, Yogyakarta. Hal :133



Displacement Pump adalah pompa dengan volume ruang yang berubah secara periodik dari besar ke kecil atau sebaliknya. Pada waktu pompa bekerja, energi yang dimasukkan ke fluida adalah energi potensial sehingga fluidanya berpindah dari volume per volume.

2. Non-positive Displacement Pump (Dynamic Pump)

Pada pompa jenis dynamic, volume ruangnya tidak berubah. Waktu pompa bekerja, energi yang dimasukkan ke dalam fluida adalah energi kinetik sehingga perpindahan fluida terjadi akibat adanya perubahan kecepatan.



Gambar 2.14 (a) Positive Displacement Pump, (b) Dynamic Pump

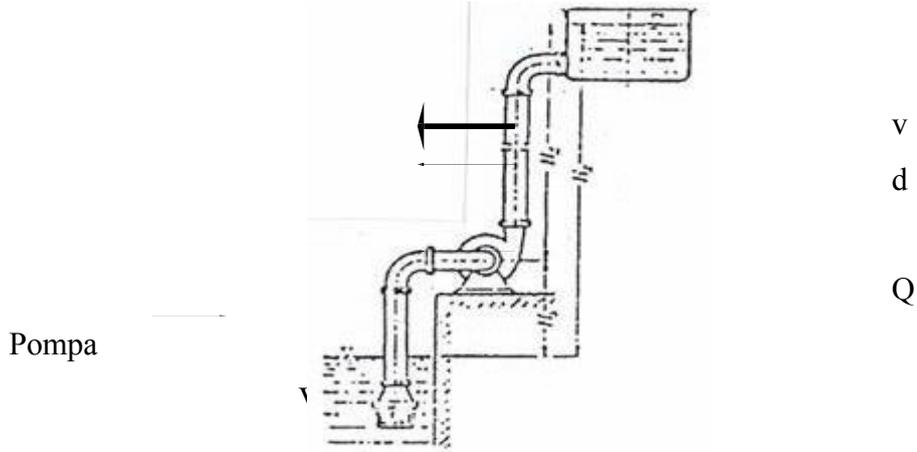
Pada sebuah mesin listrik yang digunakan sebagai motor pompa daya listrik yang dihasilkan ditentukan oleh beberapa faktor antara lain:

- A = Luas penampang pipa (m)
- ρ = Massa jenis cairan 1000 kg/m^3
- Q = Debit aliran (m^3/s)
- v = Kecepatan aliran (m/s)



Sehingga daya mekanik pada pompa dapat ditentukan dengan menggunakan rumus :

$$P \text{ mekanik} = \rho \cdot Q \cdot v^2 \dots\dots\dots (2.16)$$



Gambar 2.15 Proses Pompa Air²⁵

Debit aliran pada pompa air adalah luas penampang pipa yang digunakan dikalai dengan kecepatan aliran cairan yang dipompakan pada pipa tersebut dan secara teoritis dirumuskan dengan :

$$Q = A \cdot v \dots\dots\dots (2.18)$$

$$A = \dots\dots\dots (2.19)$$

Dimana :

- Q = Debit aliran (m³/s)
- A = Luas penampang pipa (m²)
- v = Kecepatan aliran cairan (m/s)
- r = Jari-jari pompa air

²⁵ M.T, pudjanarsa, Astu. Ir. 2006. Mesin Konversi Energi .Andi Offset, Yogyakarta. Hal : 136