



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Alat Tambang Utama ^[1]

Komponen utama dari *Bucket Wheel Excavator* (BWE) System sering disebut dengan Alat Tambang Utama (ATU) yang berada di PT. Bukit Asam Tbk. Secara garis besar ATU pada BWE System meliputi BWE (alat gali muat), *Belt Wagon* (alat transfer), *Belt Conveyor* (alat angkut), *Hopper Car*, sampai dengan TLS. Selain itu, ATU lainnya yang sangat penting yaitu *Train Loading Station* (TLS) yang merupakan alat curah batubara ke gerbong kereta api.

2.1.1 *Bucket Wheel Excavator* (BWE)

Bucket Wheel Excavator (BWE) merupakan alat gali yang menggunakan rangkaian bucket yang berputar pada satu roda putar, dimana bucket pengeruk tersebut berjumlah 14 buah dengan kapasitas masing - masing $0,8 m^3$. BWE berfungsi sebagai alat penggali utama di Tambang Air Laya.



Gambar 2.1 *Bucket Wheel Excavator* 204

BWE juga dilengkapi dua buah lengan mekanis/ban perangkat material dengan lebar ban 1.400 mm dan kecepatannya 4,5 m/detik. BWE digerakkan dengan menggunakan tenaga listrik. Kemampuan gali BWE adalah 1.300 Bcm/jam untuk kapasitas garansi.

[1] Nani, Y., 2011. "BWE Teknologi Penambangan Continuous Mining". Tanjung Enim, Sumatera Selatan.



2.1.2 *Belt Wagon*

Belt wagon (Gambar 2.2) merupakan alat yang berfungsi sebagai alat *transfer* material dari BWE (*Bucket Wheel Excavator*) ke *hopper car*. Perlu diketahui BWE ini merupakan alat gali yang menggunakan rangkaian bucket yang berputar pada satu roda putar, dimana bucket pengeruk tersebut berjumlah 14 buah. Pada *Belt Wagon* (BW) digunakan untuk memperpanjang jangkauan penggalian BWE sejauh 90 meter dari jalur *conveyor* penggalian *Conveyor Excavating* (CE), sehingga mengurangi frekuensi pergeseran (*shifting*) jalur *belt conveyor* di jalur penggalian. Seperti halnya BWE, BW juga memiliki dua lengan mekanis/ban



Gambar 2.2 *Belt Wagon* 301

dengan lebar 1.400 mm dan kecepatan 4,5 m/detik. Kedua ban ini digerakkan dengan tenaga listrik serta bisa diatur arah dan ketinggiannya.

Fungsi ban 1 BW untuk mentransfer material galian dari BWE ke ban 2 BW, sedangkan ban 2 BW mentransfer material galian ke *Hopper Car*. Dalam operasional BWE secara keseluruhan ban 1 BW diberi nama ban 3, sedangkan ban 2 BW diberi nama ban 4. Pergerakan BW disesuaikan dengan pergerakan dari BWE. Sebagaimana BWE, pada *Belt Wagon* juga terdapat tiga bagian *substructure* (bagian bawah), *intermediate structure* (bagian tengah) dan *slewable superstructure* (bagian atas). Data teknis *Belt Wagon* (BW) Type BRS 1400/ (26+21) x 12 sebagai berikut :

- Kapasitas produksi (garansi) : 1300
- Lebar ban 3 dan 4 : 1400 mm
- Panjang ban 3 : 26,4 m



- Panjang ban 4 : 21,4 m
- Kecepatan ban 3 dan 4 : 4,5 m/detik
- Konsumsi listrik : 471 kW
- Berat total : 215 ton
- Tekanan terhadap tanah : 100 kPa
- Palung cekung bagian atas : 35
- Palung cekung bagian bawah : 15

2.1.3 *Hopper Car (HC)*

Hopper Car (gambar 2.3) adalah alat yang berupa corong penerima yang digunakan untuk menyalurkan dari BW ke *Conveyor Excavating* (CE). HC ini seperti gerbong yang berjalan diatas rel yang dipasang pada sisi kiri dan kanan sepanjang jalur CE. HC adalah alat yang digunakan untuk menggerakkan bahan galian yang dijatuhkan dari lengan BW ke *Conveyor Excavating* (CE). HC ini bergerak diatas rel yang terletak diluar sisi tiang penyangga conveyor.



Gambar 2.3 Hopper Car

2.1.4 *Cable Rail Car (CRC)*

Cable Rail Car adalah suatu kendaraan yang mengangkut segulungan kabel listrik bertegangan 20 KV yang memasok daya untuk BWE dan BW. Alat ini juga berfungsi untuk menggerakkan *Hopper Car* menyesuaikan arah pergerakan dari ban 2 BW. CRC bersama dengan HC dapat bergerak maju mundur diatas rel yang dipasang disepanjang jalur CE. Pergerakan CRC akan disesuaikan dengan gerakan BW.



Gambar 2.4 Cable Rail Car

2.1.5 Belt Conveyor

Belt Conveyor merupakan salah satu bagian yang ada di *belt wagon* (Gambar 2.5 *Belt Conveyor* pada *Belt Wagon*). Definisi *Conveyor* menurut KBBI (Kamus Besar Bahasa Indonesia) adalah alat mekanis untuk membawa (mengangkut) barang dari suatu tempat ke tempat lain (dengan ban atau rantai berjalan). Prinsip kerja *belt conveyor* adalah mentransport material yang ada di atas *belt*, dimana umpan setelah di *head* material ditumpahkan akibat *belt* berbalik arah. *Belt* digerakkan oleh *drive/ head pulley* dengan menggunakan motor penggerak. *Head pulley* menarik *belt* dengan prinsip adanya gesekan antara permukaan drum dengan *belt*, sehingga kapasitasnya tergantung gaya gesek tersebut. Motor AC listrik yang digunakan sebagai penggerak *belt conveyor* 1 dan 2 mempunyai daya dan tegangan masing-masing 160 kW/ 500V.



Gambar 2.5 Belt Conveyor



Konveyor memiliki bagian-bagian antara lain :

1. *Pulley*

Pulley berfungsi menyalurkan energi gerak putar pada *belt* sehingga *belt* bergerak.

2. *Tail Pulley* dan *Head Pulley*

Tail Pulley merupakan *pulley* yang pada umumnya berada diujung belakang *Belt* dan berputar karena mengikuti gerakan *Belt*. *Head Pulley* adalah *pulley* yang berada pada ujung depan *Belt* dimana material dicurahkan.

3. *Snub Pulley*

Snub Pulley merupakan *pulley* tambahan yang berfungsi untuk memperbesar sudut lilitan *belt* pada *drive*.

4. *Bend Pulley*

Bend Pulley merupakan *pulley* yang memiliki fungsi melengkungkan atau mengubah arah *belt*.

5. *Take-Up Pulley*

Take-Up Pulley merupakan *pulley* yang dikombinasikan dengan sistem *Take Up*, *Automatic Take Up Pulley* ini dirancang untuk dapat bergerak mengimbangi operasional *Belt Conveyor*.

6. *Idler*

Idler Berfungsi untuk menahan atau menyangga *belt* pada bagian *carrying* dan *return*. Jarak antar *idlers* tergantung dari kegunaan *Take-Up Units*.

Take-Up Units merupakan sistem yang berfungsi untuk mempertahankan ketegangan *belt* dan mengimbangi peregangan *belt* saat operasional pengangkutan sedang dilakukan. [2]

[2] Tri Ulfa, Dhea.2018. “Analisa *Motor Protection* pada *Conveyor Coal 07-TLS102* di Tambang Air Laya PT. Bukit Asam (Persero) Tbk.”. Palembang Politeknik Negeri Sriwijaya. Hal :22-23

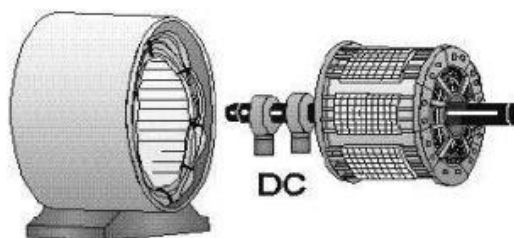


2.2 Motor Listrik ^[3]

Motor arus bolak-balik menggunakan arus listrik yang membalikkan arahnya secara teratur pada rentang waktu tertentu. Motor listrik memiliki dua buah bagian dasar listrik: "stator" dan "rotor" seperti ditunjukkan dalam (Gambar 2.6). Stator merupakan komponen listrik statis. Rotor merupakan komponen listrik berputar untuk memutar as motor. Keuntungan utama motor DC terhadap motor AC adalah bahwa kecepatan motor AC lebih sulit dikendalikan. Untuk mengatasi kerugian ini, motor AC dapat dilengkapi dengan penggerak frekwensi variabel untuk meningkatkan kendali kecepatan sekaligus menurunkan dayanya. Motor induksi merupakan motor yang paling populer di industri karena kehandalannya dan lebih mudah perawatannya. Motor induksi AC cukup murah (harganya setengah atau kurang dari harga sebuah motor DC) dan juga memberikan rasio daya terhadap berat yang cukup tinggi (sekitar dua kali motor DC).

2.2.1 Motor sinkron

Motor sinkron adalah motor AC, bekerja pada kecepatan tetap pada sistim frekwensi tertentu. Motor ini memerlukan arus searah (DC) untuk pembangkitan daya dan memiliki *torque* awal yang rendah, dan oleh karena itu motor sinkron cocok untuk penggunaan awal dengan beban rendah, seperti kompresor udara, perubahan frekwensi dan generator motor. Motor sinkron mampu untuk memperbaiki faktor daya sistim, sehingga sering digunakan pada sistim yang menggunakan banyak listrik.



Gambar 2.6 Motor Sinkron ^[3]

^[3] Diambil dari softfile *Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia* – www.energyefficiencyasia.org
©UNEP:Hal: 6-7.



Komponen utama motor sinkron adalah (Gambar 2.6):

- **Rotor.** Perbedaan utama antara motor sinkron dengan motor induksi adalah bahwa rotor mesin sinkron berjalan pada kecepatan yang sama dengan perputaran medan magnet. Hal ini memungkinkan sebab medan magnet rotor tidak lagi terinduksi. Rotor memiliki magnet permanen atau arus DC-*excited*, yang dipaksa untuk mengunci pada posisi tertentu bila dihadapkan dengan medan magnet lainnya.
- **Stator.** Stator menghasilkan medan magnet berputar yang sebanding dengan frekwensi yang dipasok. Motor ini berputar pada kecepatan sinkron, yang diberikan oleh persamaan berikut (Parekh, 2003):

$$N_s = 120 f / P \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

f = frekwensi dari pasokan frekwensi

P= jumlah kutub

2.2.2 Motor Asinkron (Motor Induksi) ^[4]

Mesin- mesin listrik digunakan untuk mengubah suatu bentuk energi ke energi yang lain, misalnya mesin yang mengubah energi mekanis ke energi listrik disebut generator, dan sebaliknya energi listrik menjadi energi mekanis disebut motor. Masing-masing mesin mempunyai bagian yang diam dan bagian yang bergerak. Bagian yang bergerak dan diam terdiri dari inti besi, dipisahkan oleh celah udara dan membentuk rangkaian magnetik dimana fluksi dihasilkan oleh aliran arus melalui kumparan/belitan yang terletak didalam kedua bagian tersebut.

Pada umumnya mesin-mesin penggerak yang digunakan di Industri mempunyai daya keluaran lebih besar dari 1 HP dan menggunakan motor Induksi Tiga Fasa. Adapun kelebihan dan kekurangan motor induksi bila dibandingkan dengan jenis motor lainnya, adalah:

^[4] Prih Sumardjati, dkk., Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3, (Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), Hal. 408.



1. Kelebihan dari motor induksi yaitu mempunyai konstruksi yang sederhana, relatif lebih murah harganya bila dibandingkan dengan jenis motor yang lainnya, menghasilkan putaran yang konstan, mudah perawatannya, untuk pengasutan tidak memerlukan motor lain sebagai penggerak mula, dan tidak membutuhkan sikat-sikat, sehingga rugi gesekan bisa dikurangi.
2. Kekurangan dari motor induksi yaitu putarannya sulit diatur dan arus asut yang cukup tinggi, berkisar antara 5 - 6 kali arus nominal motor.

2.2.3 Klasifikasi Motor AC ^[5]

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

1. Berdasarkan Prinsip Kerja

- Pada motor sinkron : Biasa (tanpa slip ring) dan Super (dengan slip ring)
- Pada motor asinkron : Motor Induksi (Squirrel Cage & Slip Ring)

2. Berdasarkan Macam Arus

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

a. Satu phasa

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. Motor ini merupakan jenis motor yang paling umum digunakan dalam peralatan rumah tangga, seperti kipas angin dan lain-lain.

b. Tiga phasa

Medan magnet yang berputar dihasilkan oleh pasokan tiga fasa yang seimbang. Motor tersebut memiliki kemampuan daya yang tinggi, dapat memiliki sangkar tupai atau gulungan rotor (walaupun 90% memiliki rotor sangkar tupai) dan penyalan sendiri. Diperkirakan bahwa sekitar 70% motor di industri menggunakan jenis ini, contoh, pompa, *compressor*, *belt conveyor*, jaringan listrik dan *grinder*.

^[5] Rijono, Yon, Dasar Teknik Tenaga Listrik. (Yogyakarta : Andi Offset, 1997), hal : 309.

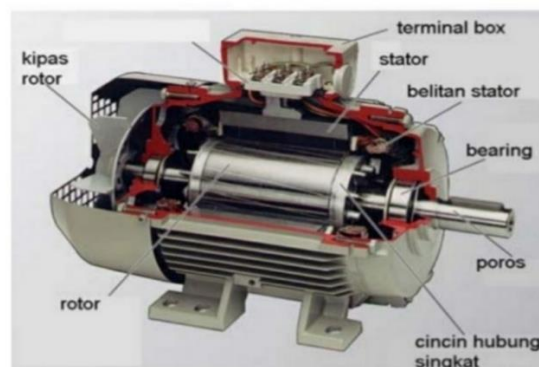


3. Berdasarkan Kecepatan

Adapun berdasarkan kecepatannya yaitu kecepatan konstan, kecepatan berubah, dan kecepatan diatur.

2.2.4 Konstruksi Motor Induksi

Konstruksi motor induksi secara detail terdiri dua bagian, yaitu: bagian stator dan bagian rotor. Dapat di lihat pada Gambar 2.7 dibawah ini.



Gambar 2.7 Fisik Motor Induksi ^[5]

Stator adalah bagian motor yang diam yang terdiri dari badan motor, inti stator, belitan stator, bearing dan terminal box. Sedangkan bagian rotor adalah bagian motor yang berputar, terdiri atas rotor sangkar dan poros rotor. Konstruksi motor induksi tidak ada bagian rotor yang bersentuhan dengan stator, karena dalam motor induksi tidak ada komutator dan sikat arang, selain itu juga konstruksi motor induksi lebih sederhana di bandingkan dengan motor DC, dikarenakan tidak ada komutator dan sikat arang sehingga pemeliharaan motor induksi sangat mudah yaitu di bagian mekanik nya saja, dan konstruksinya juga begitu sederhana serta motor induksi sangat handal dan jarang sekali rusak secara elektrik. Bagian motor induksi yang perlu di pelihara rutin adalah pelumas bearing, dan pemeriksaan kekencangan baut-baut kabel pada terminal box apabila terjadi kondor atau lepas akibat pengaruh getaran secara terus menerus.^[6]

^[6] Siswoyo, Teknik Listrik Industri (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008). Hal. 5-7.



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 :

a. Bodi Motor (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.

b. 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.

c. Sikat komutator

Fungsi dari sikat adalah sebagai 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 bersamaan 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 di atur 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 selinder, tetapi sudah berbentuk lempeng- lempeng.

d. 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. 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). 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. Motor induksi bila ditinjau dari dari rotornya terdiri atas dua tipe yaitu motor rotor sangkar dan motor rotor lilit. ^[7]

^[7] Berliani, Hilda.,2018. “Studi Perhitungan Efisiensi Motor Gbm-602 95,5 Kw Sebagai Penggerak Kipas



a. Motor Rotor Sangkar^[4]

Motor induksi jenis rotor sangkar lebih banyak digunakan dari pada jenis rotor lilit, sebab rotor sangkar mempunyai bentuk yang sederhana. Belitan rotor terdiri atas batang- batang penghantar yang ditempatkan di dalam alur rotor. Batang penghantar ini terbuat dari tembaga, alloy atau alumunium. Ujung- ujung batang penghantar dihubung singkat oleh cincin penghubung singkat, sehingga berbentuk sangkar burung. Motor induksi yang menggunakan rotor ini disebut dengan Motor Induksi Rotor Sangkar. Karena batang penghantar rotor yang telah dihubung singkat, maka tidak dibutuhkan tahanan luar yang dihubungkan seri dengan rangkaian rotor pada saat awal berputar.

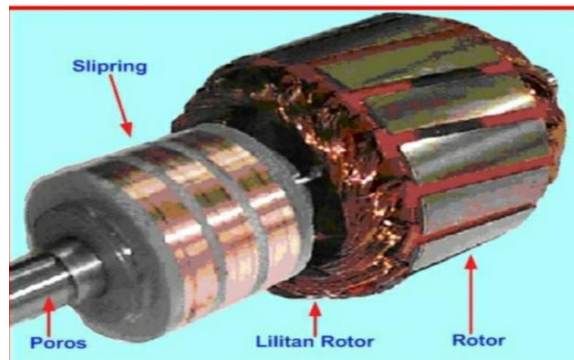


Gambar 2.8 Rotor Sangkar^[4]

b. Motor Rotor Lilit.

Rotor lilit terdiri atas belitan fasa banyak, belitan ini dimasukkan kedalam alur- alur inti rotor. Belitan ini sama dengan belitan stator, tetapi belitan selalu dihubungkan secara bintang. Tiga buah ujung-ujung belitan dihubungkan ke terminal-terminal sikat/cincin seret yang terletak pada poros rotor.

Pada jenis rotor lilit kita dapat mengatur kecepatan motor dengan cara mengatur tahanan belitan rotor tersebut. Pada keadaan kerja normal sikat karbon yang berhubungan dengan cincin seret tadi dihubung singkat. Motor Induksi rotor lilit dikenal dengan sebutan Motor Induksi Slipring atau Motor Induksi Rotor Lilit.



Gambar 2.9 Motor Rotor Lilit ^[4]

2.2.5 Prinsip Kerja Motor Induksi ^[8]

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

1. Apabila sumber tegangan tiga fasa dipasang pada kumparan stator, timbullah medan putar dengan kecepatan.
2. Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor.
3. Akibatnya pada kumparan rotor timbul induksi (ggl) sebesar :

$$E_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \phi_m \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana :

E_2 = Tegangan Induksi

f_2 = frekuensi jala-jala

N_2 = banyaknya lilitan

ϕ_m = fluks magnet

4. Karena kumparan rotor merupakan rangkaian yang tertutup, ggl (E) akan menghasilkan arus (I).
5. Adanya arus (I) didalam medan magnet menimbulkan gaya (F) pada motor.

^[8] Zuhail dan Zhanggishan, Prinsip Dasar Elektroteknik, (Jakarta: Penerbit Gramedia, 2004). Hal. 690



6. Bila torsi mula dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk memikul torsi beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
7. Tegangan magnet 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).
8. Perbedaan kecepatan antara N_r dan N_s disebut slip (s) dinyatakan dengan

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\% \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana : S = Slip motor (%)

N_s = Medan putar stator (Rpm)

N_r = Medan putar rotor (Rpm)

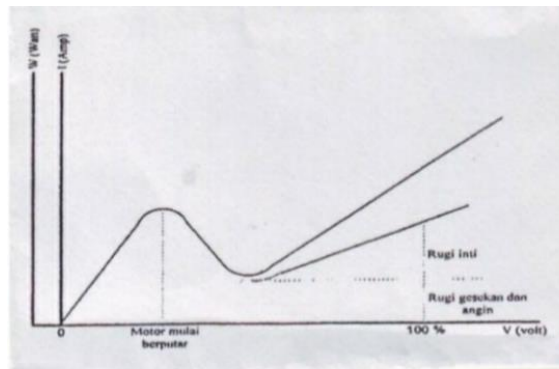
9. Bila $N_r = N_s$, tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada kumparan jangkar (rotor), dengan demikian tidak dihasilkan kopel. Kopel motor akan ditimbulkan apabila N_r lebih kecil dari N_s .
10. Dilihat dari cara kerjanya maka motor tak serempak disebut juga motor induksi atau motor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

2.2.6 Karakteristik Motor Induksi ^[7]

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

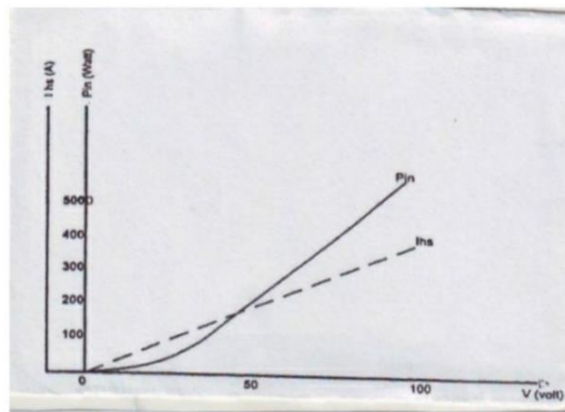
Karakteristik beban nol adalah karakteristik yang menggambarkan hubungan antara tegangan ke motor dengan arus daya $\cos \phi$ motor pada keadaan tanpa beban, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6 jadi putaran mendekati sinkron atau sama.



Gambar 2.10 Karakteristik Beban Nol

b. Karakteristik Rotor yang diblok

Karakteristik motor yang diblok adalah karakteristik yang menggambarkan hubungan antara tegangan masuk dan arus yang masuk, $\cos \phi$, dan daya masuk. Seperti yang ditunjukkan pada (gambar 2.7) Berikut ini:



Gambar 2.11 Karakteristik Rotor yang diblok

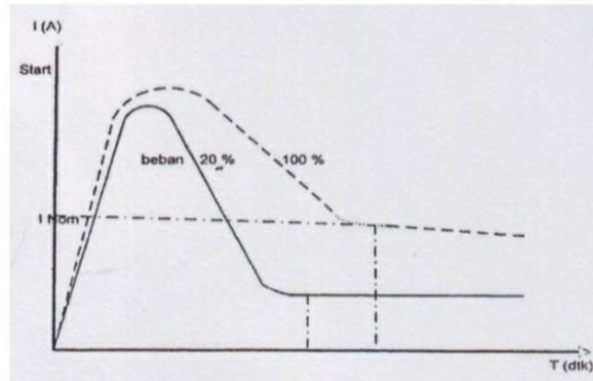
c. Karakteristik Start

Karakteristik start ini dipakai untuk menggambarkan hubungan antara waktu dan arus. Putaran untuk macam-macam beban pada tegangan masuk konstan. Dari (gambar 2.8) dibawah berikut dapat dijelaskan bahwa:

1. 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.
2. Arus akhir ke motor lebih tinggi.



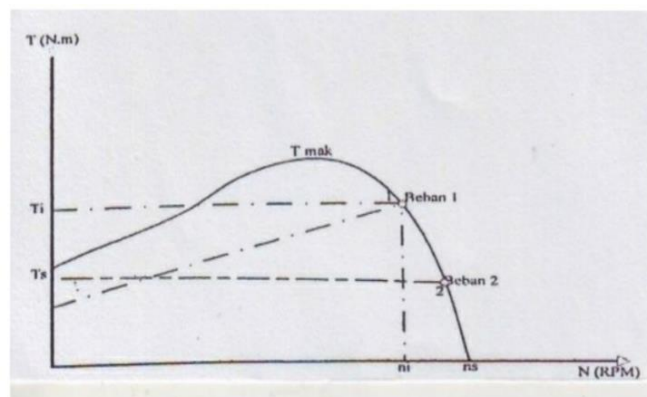
3. Putaran akhir motor akan lebih rendah.



Gambar 2.12 Karakteristik start

d. Karakteristik Kopel dan Putaran

Daerah kerja motor terletak pada daerah perputaran mendekati n_s . Kopel 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 ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.13 Karakteristik kopel dan putaran

2.2.7 Cara – Cara Menentukan Rugi-Rugi Pada Motor ^[7]

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 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 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.

1. Rugi – Rugi Pada Motor Induksi

Motor – motor listrik adalah suatu alat untuk mengkonversikan energi listrik menjadi energi mekanis. 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 :



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

Dimana

P_{in} : Total daya yang diterima motor

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

$P_{rugi-rugi}$: 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 terbuang. Untuk itu perlu diketahui kerugian daya apa saja yang timbul selama motor beroperasi yaitu sebagai berikut :

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

2. Rugi - rugi inti

Rugi - rugi inti rangkaian terbuka terdiri atas rugi-rugi histeris dan arus-edy yang timbul dari perubahan kerapatan fluks pada besi mesin dengan hanya lilitan peneral utama yang diberi tenaga. Pada mesin DC dan mesin serempak, rugi-rugi ini terutama dialami oleh besi armatur, meskipun pembentukan pulsa fluks yang berasal dari mulut celah akan menyebabkan rugi-rugi pada besi medan juga, terutama pada sepatu kutub atau permukaan besi medan. Pada mesin induksi rugi-rugi terdapat terutama pada besi strator. Rugi-rugi inti rangkaian terbuka dapat diperoleh dengan mengukur masukkan pada mesin pada saat bekerja tanpa beban pada kecepatan ukuran atau frekuensi ukuran dan dengan fluks atau tegangan yang semestinya dan kemudian mengurangkan rugi-rugi perlilitan dan gesekan dan jika mesin tersebut bekerja sendiri selama dites, rugi-rugi I^2R armature tanpa beban (rugi-rugi I^2R stator tanpa beban pada motor induksi). 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 daripada *fluks*



dan kecepatan motor. Pada umumnya rugi - rugi inti berkisar antara 20 - 25% dari total kerugian daya motor pada keadaan nominal.

3. Rugi - rugi mekanik

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 bagian yang berputar terhadap angin, terutama pada daun kipas pendingin. Kerugian energi ini selalu 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 ketidaktepatan 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.

4. 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 alumunium. Total kerugian $I^2 R$ adalah jumlah dari rugi - rugi $I^2 R$ primer (stator) dan rugi - rugi $I^2 R$ sekunder (rotor). rugi - rugi $I^2 R$ dalam belitan sebenarnya tidak hanya tergantung pada arus, tetapi juga pada tahanan belitan dibawah kondisi operasi. Sedang tahanan efektif dari belitan selalu berubah dengan perubahan temperatur, *skin effect* dan sebagainya. Sangat sulit untuk menentukan nilai yang sebenarnya dari tahanan belitan dapat dimasukkan kedalam kerugian *stray load*. Pada umumnya rugi - rugi belitan ini berkisar antara 55 - 60% dari total kerugian motor pada keadaan beban nominal.

$$P_{\text{rugi-rugi}} = I^2 \cdot R \dots \dots \dots (2.5)$$



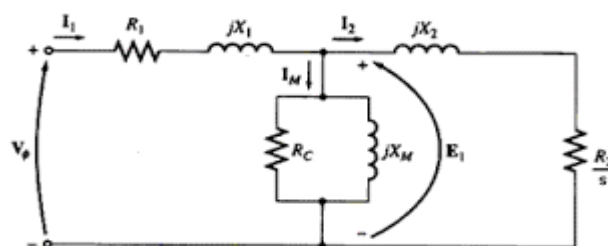
5. Rugi - rugi stray load

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). 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 antara 11-14 % dari total kerugian daya motor pada keadaan beban nol.

2.2.8 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi^[9]

Motor Induksi 3-fasa ini dapat dianalisa berdasarkan rangkaian ekuivalen tanpa harus mengoperasikan motor.

Dari rangkaian ekuivalen (Gambar 2.13) dibawah ini I_1 merupakan arus yang mengalir pada kumparan stator yang terbagi arus I_m dan I_2 , dimana untuk mencari besarnya arus yang mengalir pada saat pembebanan.



Gambar 2.14 Rangkaian Ekuivalen Motor induksi^[11]

^[9] Andyk Probo Prasetya dkk. 2012. "Analisis Perbandingan Sistem Pengasutan Motor Induksi 3 Fasa Sebagai Penggerak Pompa Pada Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Wendit Malang". Malang: Institute Teknologi Malang, hal:225.



V_ϕ = Tegangan sumber perfasa pada kumparan stator

R_1 = Resistansi kumparan stator

jX_1 = Reaktansi Induktif kumparan stator

R_c = Tahanan Inti Besi

R_2 = Resistansi kumparan rotor dilihat dari sisi stator

jX_2 = Reaktansi Induktir rotor dilihat dari sisi stator

jX_m = Reaktansi magnet pada Motor

I_1 = Arus kumparan stator

I_2 = Arus pada kumparan rotor dilihat dari sisi stator saat motor distart

2.3 Pengaman Motor Listrik ^[10]

Energi listrik merupakan salah satu sumber energi utama di industry. Energy tersebut terdiri atas system pembangkitan, saluran distribusi dan peralatan yang menggunakan listrik, dimana peralatan ini harus mempunyai pengaman. Motor listrik biasanya digunakan untuk penggerak alat angkut (konveyor), pengangkat pengaduk, penghisap udara, pompa dan lain-lain. Karena kekuatan motor listrik mempunyai nilai tertentu, maka diperlukan suatu alat pengaman yang bertujuan apabila terjadi beban lebih (*overload*) motor tidak rusak atau terbakar.

Beban lebih dapat terjadi karena adanya beban yang berlebihan maupun dari *plant* yang tidak seharusnya. Sesuatu hal yang bisa digunakan untuk mengetahui suatu motor dalam kondisi beban lebih adalah arus yang mengalir pada motor. Setiap motor tergantung dayanya, mempunyai standar nilai arus tertentu yang diperbolehkan mengalir pada motor tersebut. *Circuit* dalam motor listrik standar minimal terdiri atas *Circuit Breaker* yang berupa : MCCB/NFB (*No Fuse Breaker*), *Magnetic Contactor*, serta OL (*overload relay*) yang berupa TOR (*Thermal Overload Relay*) atau ada yang menyebutnya OCR (*over current*).

Circuit Breaker berfungsi untuk melindungi jaringan, system distribusi dari arus yang tinggi diakibatkan oleh peralatan. *Magnetic Contactor* berfungsi untuk

^[10] Marniati, Yessi. 2011. "Jurnal Dasar-dasar Pengaman Sistem Tenaga Listrik". Palembang : Politeknik Negeri Sriwijaya. Hal : 3.



memutus dan menyambung jaringan listrik dengan motor yang dikendalikan oleh tombol tekan saklar. *Thermal Overload Relay* (TOR) berfungsi untuk melindungi motor listrik dari beban lebih yang ditunjukkan oleh arus yang mengalir pada jaringan listrik. Apabila arus mengalir melebihi nilai TOR, maka timbul panas pada TOR, kemudian TOR membuka dan memerintahkan untuk memutuskan jaringan listrik yang masuk ke motor tersebut. Sehingga motor terhindar dari kerusakan. Pengaman motor listrik pada pengontrolan motor listrik terdiri atas 3 macam, yaitu sebagai berikut.

2.3.1 *Starting Motor Listrik*

Metode yang digunakan untuk *starting* (menjalankan awal) motor listrik cukup banyak. Sistem ini terkait dengan sifat motor listrik yang menyerap arus listrik yang tinggi pada saat start. Setelah beberapa saat arus tersebut akan menurun sesuai dengan arus yang diserap motor. Berdasarkan beban yang digerakkan. Metode yang digunakan antara lain system DOL (*Direct On Line*), *Star Delta*, Auto Transformer, Reostat, *soft starter* dan lain-lain. Dengan memperhatikan sifat dari arus *start* motor listrik, maka dapat ditentukan jenis dan besarnya nilai *thermal overload relay* (TOR).

Arus *start* system DOL sebesar $6 \times I_n$ (Arus nominal motor), sedangkan pada sistem *star-delta* maksimal sebesar $3 \times I_n$. Berdasarkan karakter tersebut, maka apabila menggunakan sistem DOL, nilai TOR = I_n , apabila *star-delta*, nilai TOR = $I_n \sqrt{3} = 0,732 I_n$.

2.3.2 *Karakteristik Thermal Overload Relay (TOR)*

Thermal Overload Relay (TOR) mempunyai karakteristik sesuai dengan standar-standar kelistrikan, diantaranya IEEE, NEMA, IEC dan lain-lain. Penulis akan membahas sesuai standar IEC yang cukup banyak digunakan di Indonesia. Misalnya suatu *Thermal Overload Relay* (TOR) tertulis IEC 947-4-1, *Class 20* bernilai *trip*=10 Ampere. Selang waktu *trip* digunakan agar TOR tidak *trip* bila sedang *start* maupun ketika ada beban kejut. Dengan berpedoman pada karakteristik tersebut, maka bisa didesain nilainya dengan memperhatikan arus *start*



dan selang waktunya sehingga tidak *trip* serta nilai yang tepat untuk *trip* (sesuai dengan kemampuan motor listrik yang dikendalikan) jika terjadi *overload* sehingga jaringan listrik segera terputus dan motor listrik aman dari kerusakan/terbakar. Karakteristik motor harus diketahui karakteristik thermalnya berdasarkan informasi dari motor (*nameplate*) tersebut.

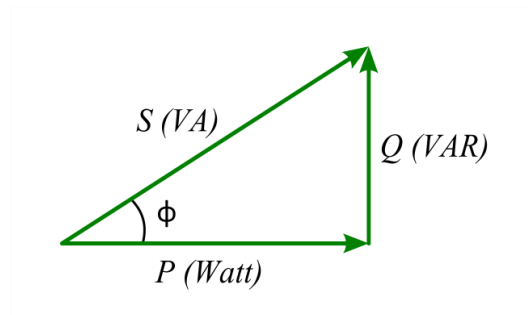
2.4 Faktor Daya ^[7]

Daya dalam tegangan AC pada setiap saat sama dengan perkalian dari harga 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 aktif, daya reaktif, dan daya semu yang pengertiannya adalah sebagai berikut :

- a. Daya aktif (P) adalah daya yang diubah menjadi energi, persatuan waktu atau dengan kata lain adalah daya yang benar-benar terpakai yang dihasilkan oleh komponen resistif, satuannya adalah Watt (W).
- b. Daya reaktif (Q) adalah daya yang ditimbulkan oleh komponen reaktansi. Daya reaktif ditentukan dari reaktansi yang menimbulkannya, dapat berupa reaktansi induktif (X_L) dan reaktansi kapasitif (X_C), satuannya adalah Volt Ampere Reaktif (VAR).
- c. 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 segitiga daya berikut ini :



Gambar 2.15 Segitiga daya

$$P = V.I. \cos\phi \dots\dots\dots(2.6)$$

$$S = V.I. \dots\dots\dots(2.7)$$

$$Q = V. I. \sin\phi \dots\dots\dots(2.8)$$

Untuk daya tiga phasa rumus daya aktif, daya reaktif, dan daya semu adalah seperti dibawah ini.

$$P = \sqrt{3}. V_1. I_1. \cos\phi \dots\dots\dots(2.9)$$

$$S = \sqrt{3}. V_1. I_1. \sin \phi \dots\dots\dots(2.10)$$

$$Q = \sqrt{3}. V_1. I_1 \dots\dots\dots(2.11)$$

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:

$$P = \frac{W}{t} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana, P = Daya mekanik (W)

W= Usaha (joule)

t = Waktu (s)

2.4.1 Sifat – Sifat Beban Listrik ^[11]

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

^[11] Linsley, Trevor.2004. Instalasi Listrik Tingkat Lanjut. Jakarta. Hal: 124 &137.



bergantung pada rangkaian tetapi juga bergantung pada induktansi dan kapasitansi rangkaian. Tahanan memberikan jenis perlawanan yang sama terhadap aliran arus bolak-balik terhadap arus searah.

Pada motor induksi terjadi perubahan energy listrik menjadi energy mekanik dalam bentuk putaran rotor. Pada motor induksi daya mekanik yang dihasilkan digunakan untuk berbagai keperluan sesuai dengan yang diinginkan.

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

$$P_{1\phi} = V_P I_P \cos\phi \dots\dots\dots(2.13)$$

Atau,

$$P_{3\phi} = 3.P_1 \dots\dots\dots(2.14)$$

$$P_{3\phi} = 3.V_P I_P \cos\phi \dots\dots\dots(2.15)$$

Harga tegangan phasa (V_P) adalah:

Dimana;

$$V_P = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dengan mensubstitusi persamaan 2.10 ke persamaan 2.9 maka diperoleh rumus sebagai berikut:

$$P_{3\phi} = \sqrt{3}.V_L I_L \cos\phi \dots\dots\dots(2.17)$$

Keterangan:

$P_{1\phi}$ = daya pada 1 fasa(watt)

$P_{3\phi}$ = daya pada 3 fasa(watt)

V_P = tegangan per fasa(volt)

V_L = tegangan line to line(volt)

I = arus line (ampere)

\cos = faktor daya



2.4.2 Efisiensi

Di dalam setiap mesin daya keluaran yang tersedia adalah lebih rendah dari pada daya masukannya karena terjadinya rugi - rugi didalam mesin bersangkutan. Rugi - rugi ini dapat terjadi karena adanya gesekan pada bantalan, tahanan udara dari bagian - bagian mesinyang bergerak, panas ataupun getaran.

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

Perbandingan dari besarnya daya keluaran terhadap daya yang dikenal sebagai efisiensi mesin yang disimbolkan dengan huruf latin 'eta' atau jadi:

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \dots\dots\dots(2.18)$$

Karena efisiensi biasanya dinyatakan dalam persen, maka rumusan umum yang digunakan ialah:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.19)$$

Dimana :

η = Efisiensi (%)

P_{out} = Daya keluaran (Watt)

P_{in} = Daya masukan (Watt)