

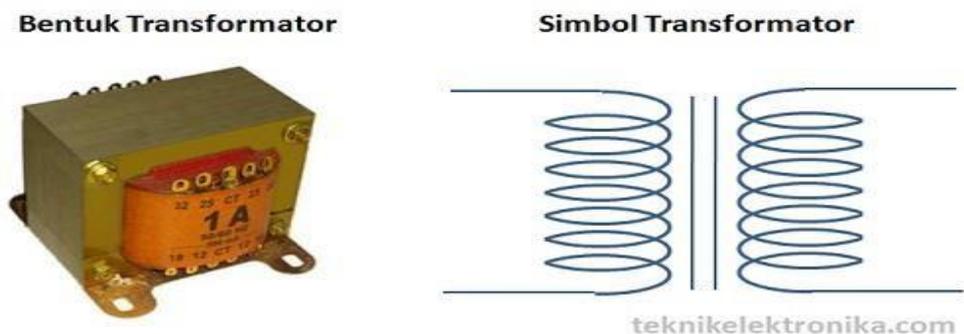
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mesin Mesin Listrik

Mesin-mesin listrik merupakan alat listrik yang berputar dan dapat mengubah energi mekanis menjadi energi listrik (menggunakan Generator AC/DC) dan dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanis (menggunakan Motor AC/DC), serta dapat juga mendistribusikan energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lain (menggunakan Transformator) dengan tegangan yang bisa berubah-ubah dandengan frekuensi yang tetap melalui suatu medium berupa medan magnet atas dasar prinsip Elektro Magnetis. terdiri dari mesin statis (transformator) dan mesin dinamis (motor dan generator).

2.2 Transormator



Gambar 2.1 Bentuk dan Simbol Transformator

Transformator atau sering disingkat dengan istilah Trafo adalah suatu alat listrik yang dapat mengubah taraf suatu tegangan AC ke taraf yang lain. Maksud dari pengubahan taraf tersebut diantaranya seperti menurunkan Tegangan AC dari 220VAC ke 12 VAC ataupun menaikkan Tegangan dari 110VAC ke 220 VAC. Transformator atau Trafo ini bekerja berdasarkan prinsip Induksi Elektromagnet dan hanya dapat bekerja pada tegangan yang berarus bolak balik (AC). Transformator (Trafo) memegang peranan yang sangat penting dalam pendistribusian tenaga listrik. Transformator menaikkan listrik yang berasal dari pembangkit listrik PLN hingga ratusan kilo Volt untuk di distribusikan, dan kemudian Transformator lainnya menurunkan tegangan listrik tersebut ke tegangan yang diperlukan oleh setiap rumah tangga maupun perkantoran yang pada umumnya menggunakan Tegangan AC 220Volt.

2.2.1 Prinsip Kerja Transformator

Sebuah Transformator yang sederhana pada dasarnya terdiri dari 2 lilitan atau kumparan kawat yang terisolasi yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Pada kebanyakan Transformator, kumparan kawat terisolasi ini dililitkan pada sebuah besi yang dinamakan dengan Inti Besi (Core). Ketika kumparan primer dialiri arus AC (bolak-balik) maka akan menimbulkan medan magnet atau fluks magnetik disekitarnya. Kekuatan Medan magnet (densitas Fluks Magnet) tersebut dipengaruhi oleh besarnya arus listrik yang dialirinya. Semakin besar arus listriknya semakin besar pula medan magnetnya. Fluktuasi medan magnet yang terjadi di sekitar kumparan pertama (primer) akan menginduksi GGL (Gaya Gerak Listrik) dalam kumparan kedua (sekunder) dan akan terjadi pelimpahan daya dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Dengan demikian, terjadilah perubahan taraf tegangan listrik baik dari tegangan rendah menjadi tegangan yang lebih tinggi maupun dari tegangan tinggi menjadi tegangan yang rendah.

Sedangkan Inti besi pada Transformator atau Trafo pada umumnya adalah kumpulan lempengan-lempengan besi tipis yang terisolasi dan ditempel berlapis-lapis dengan kegunaannya untuk mempermudah jalannya Fluks Magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik kumparan serta untuk mengurangi suhu panas yang ditimbulkan.

2.3 Generator

Generator adalah sebuah mesin yang mengubah energi mekanis (gerak) menjadi energi listrik (listrik). generator bekerja berdasarkan hukum Faraday yakni apabila suatu penghantar diputar dalam sebuah medan magnet sehingga memotong garis gaya magnet maka pada ujung penghantar tersebut akan timbulkan ggl (gaya gerak listrik) yang mempunyai satuan volt.

2.3.1 Jenis jenis Generator

2.3.1.1 Jenis generator berdasarkan letak kutubnya

1. generator kutub dalam : generator kutub dalam mempunyai medan magnet yang terletak padabagian yang berputar (rotor).
2. generator kutub luar : generator kutub luar mempunyai medan magnet yang terletak padabagian yang diam (stator)

2.3.1.2 Jenis generator berdasarkan putaran Medan

1. Generator sinkron

generator sinkron (sering disebut alternator) adalah mesin sinkron yang digunakan untuk mengubah daya mekanik menjadi daya listrik. Generator sinkron dapat berupa generator sinkron tiga fasa atau generator sinkron AC satu fasa tergantung dari kebutuhan.

Arus DC disuplai ke rangkaian medan rotor dengan dua cara:

1. Menyuplai daya DC ke rangkaian dari sumber DC eksternal dengan sarana *slip ring* dan sikat.
2. Menyuplai daya DC dari sumber DC khusus yang ditempelkan langsung pada batang rotor generator sinkron

2. Generator Asinkron

generator asinkron atau lebih disapa dengan generator induksi adalah salah satu jenis generator AC yang menerapkan prinsip kerja motor induksi dengan menghasilkan daya.

Generator induksi adalah generator yang menggunakan prinsip kerja induksi elektromagnetik dalam pengaplikasiannya, generator ini dapat bekerja pada putaran rendah serta tidak tetap kecepatannya, sehingga generator induksi lebih banyak digunakan dalam pembangkit listrik dengan daya rendah seperti pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro atau tenaga listrik baru.

2.3.1.3 Jenis Generator Berdasarkan Jenis Arus Yang Dibangkitkan

1. *Generator Arus Searah (DC)*

Generator DC merupakan sebuah perangkat Motor listrik yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Generator DC menghasilkan arus DC / arus searah.

Generator DC dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan dari rangkaian belitan magnet atau penguat eksitasinya terhadap jangkar (anker), Konstruksi Generator DC Pada umumnya generator DC dibuat dengan menggunakan magnet permanent dengan 4- kutub rotor, regulator tegangan digital, proteksi terhadap beban lebih, starter eksitasi, penyearah, bearing dan rumah generator atau casing, serta bagian rotor.

2. *Generator Arus Bolak Balik (AC)*

Generator arus bolak-balik berfungsi mengubah tenaga mekanis menjadi tenaga listrik arus bolak-balik. Generator arus bolak-balik berfungsi mengubah tenaga mekanis menjadi tenaga listrik arus bolak-balik. Generator Arus Bolak-balik sering disebut juga sebagai alternator, generator AC (alternating current), atau generator sinkron. Dikatakan generator sinkron karena jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Mesin ini tidak dapat dijalankan sendiri karena kutub-kutub rotor tidak dapat tiba-tiba mengikuti kecepatan medan putar pada waktu sakelar terhubung dengan jala- jala.

¹ Armanda, Andi dahsyat. Tugas makalah mesin-mesin listrik, fakultas Teknik universitas hasanudin makassar.2016/2017. Tidak diterbitkan

2.3.1.4 Jenis generator dilihat dari fasanya

1. Generator satu fasa

Generator yang dimana dalam sistem melilitnya hanya terdiri dari satu kumpulan kumparan yang hanya dilukiskan dengan satu garis dan dalam hal ini tidak diperhatikan banyaknya lilitan. Ujung kumparan atau fasa yang satu dijelaskan dengan huruf besar X dan ujung yang satu lagi dengan huruf U.

2. Generator Tiga Fasa

Generator yang dimana dalam sistem melilitnya terdiri dari tiga kumpulan kumparan yang mana kumparan tersebut masing-masing dinamakan lilitan fasa. Jadi pada statornya ada lilitan fasa yang ke satu ujungnya diberi tanda U – X; lilitan fasa yang ke dua ujungnya diberi tanda dengan huruf V – Y dan akhirnya ujung lilitan fasa yang ke tiga diberi tanda dengan huruf W – Z.

2.3.1.5 Jenis generator berdasarkan bentuk rotornya

1. generator rotor kutub menonjol biasa digunakan pada generator dengan rpm rendah seperti PLTA dan PLTD
2. generator rotor kutub rata (silindris) --> biasa digunakan pada pembangkit listrik / generator dengan putaran rpm tinggi seperti PLTG dan PLTU

2.4 Motor Induksi⁴

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 disebut dengan stator dan bagian yang bergerak disebut dengan rotor. 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 di gunakan di industri mempunyai daya keluaran lebih besar dari 1 HP dan menggunakan motor Induksi tiga phasa. Adapun kelebihan dan kekurangan motor induksi bila dibandingkan dengan jenis motor lainnya, adalah:

2.4.1 Kelebihan motor induksi:

1. Mempunyai konstruksi yang sederhana.
2. Relatif lebih murah harganya bila dibandingkan dengan jenis motor yanglainnya.
3. Menghasilkan putaran yang konstan.
4. Mudah perawatannya.
5. Untuk pengasutan tidak memerlukan motor lain sebagai penggerak mula. Tidak membutuhkan sikat-sikat, sehingga rugi gesekan bisa dikurangi

2.4.2 Kekurangan motor induksi

1. Putarannya sulit diatur.
2. Arus asut yang cukup tinggi, berkisar antara 5 – 6 kali arus nominal motor.

2.5 Klasifikasi Motor Induksi

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

2.5.1 Berdasarkan Prinsip Kerja

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

⁴ Prib Sumardjati, dkk., Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3 Hal. 408

2.5.2 Berdasarkan Macam Arus⁵

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

1. Satu phasa

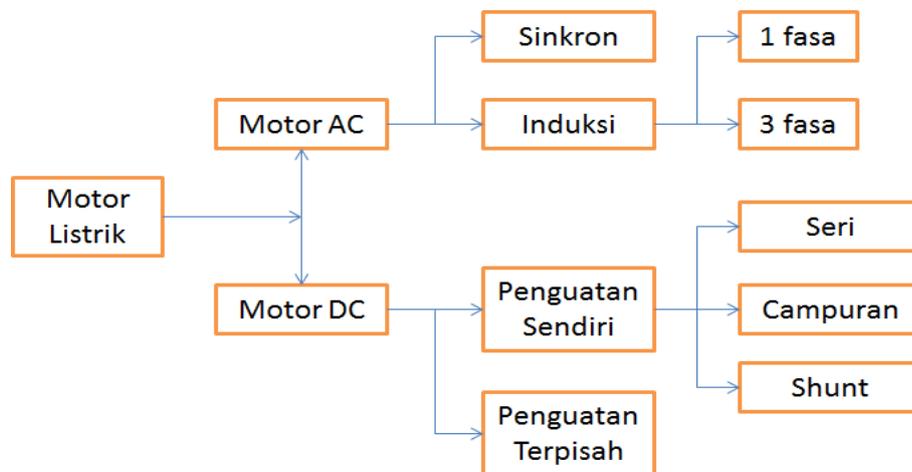
Motor ini hanya memiliki satu gulungan stator, beroperasi dengan pasokan daya satu fasa, memiliki sebuah rotor sangkar tupai, dan memerlukan sebuah alat untuk menghidupkan motornya. Sejauh ini motor ini merupakan jenis motor yang paling umum digunakan dalam peralatan rumah tangga, seperti kipas angin, mesin cuci dan pengering pakaian.

2. 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 penyalaan sendiri. Diperkirakan bahwa sekitar 70% motor di industri menggunakan jenis ini, sebagai contoh, pompa, *compressor*, *belt conveyer*, jaringan listrik dan *grinder*.

2.5.3 Berdasarkan Kecepatan

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

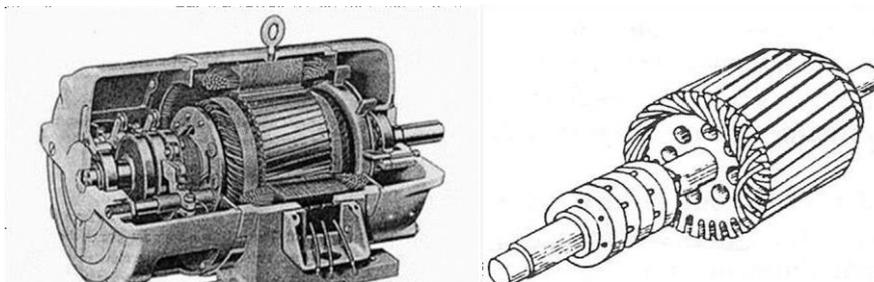


Gambar 2.2 Klasifikasi Motor Listrik

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

2.6.1 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 yangdikeluarkan ke cincin slip yang terpasang pada poros rotor. Konstruksi motor tiga fasa rotor belitan ditunjukkan pada gambar di bawah ini



Gambar 2.3 Rotor Lilit

⁵ Rijono, Yon, Dasar Teknik Tenaga Listrik. (Yogyakarta : Andi Offset, 1997), hal : 30

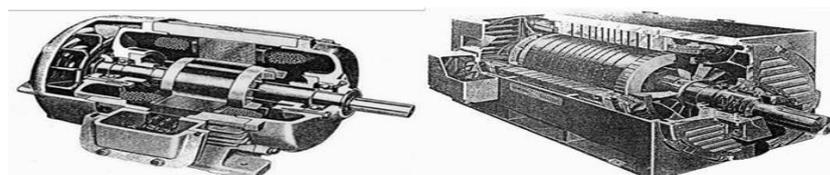
2.6.2 Motor Induksi Tiga Fasa Sangkar Tupai (*Squirrelcage Motor*)

Penampang motor sangkar tupai memiliki konstruksi yang sederhana. Inti stator pada motor sangkar tupai tiga fasa 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 2.4 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 motorsangkar 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 2.5 Konstruksi Motor Induksi Rotor Sangkar

2.7 Konstruksi Motor Induksi 3 fasa⁸

Konstruksi motor induksi secara detail terdiri dua bagian, yaitu: bagian stator dan bagian rotor. Dapat di lihat pada Gambar 2.5 dibawah ini.



Gambar 2.6. Fisik Motor Induksi

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

2.7.1 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 kecepatanputar sinkron dengan kecepatan putar stator.

Dari bagian stator dapat dibagi menjadi beberapa bagian antara lain sebagai berikut :

1. 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 yangkecil 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 dasar nya 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 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 bersamasama 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

Komutator Seperti diketahui komutator berfungsi sebagai alat penyearah mekanik, yang ber-sama-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. Diantara setiap lempeng/ segmen komutator terdapat bahan isolator. Isolator yang digunakan menentukan kelas dari mesin berdasarkan kemampuan suhu yang timbul dalam mesin tersebut.

2.7.2 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.

Motor induksi bila ditinjau dari rotornya terdiri atas dua tipe yaitu motor rotor sangkar dan motor rotor lilit.

1. Motor Rotor Sangkar

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 aluminium. Ujung- ujung batang penghantar dihubungkan 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. Alur-alur rotor biasanya tidak dihubungkan sejajar dengan sumbu (poros) tetapi sedikit miring.

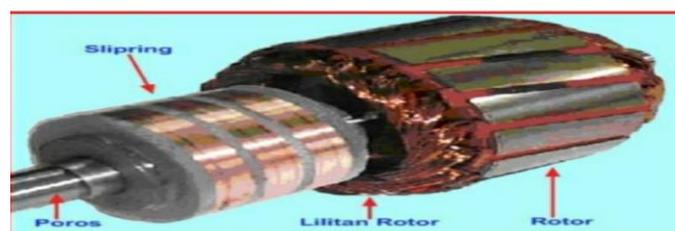


Gambar 2.7. Motor Rotor Sangkar

2. 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 2.8. Motor Rotor Lilit

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

2.8 Prinsip Kerja Motor Induksi¹²

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:

$$E_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \phi_m \dots \dots \dots (2.1)$$

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.
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.

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

100%.....(2.2)

Dimana :

S = Slip motor (%)

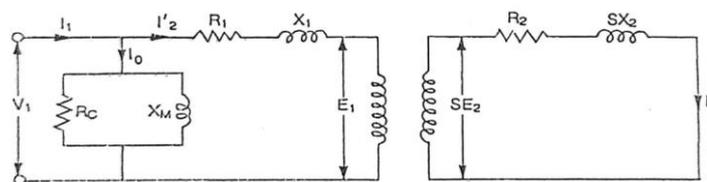
N_s = Medan putar stator (Rpm)

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.

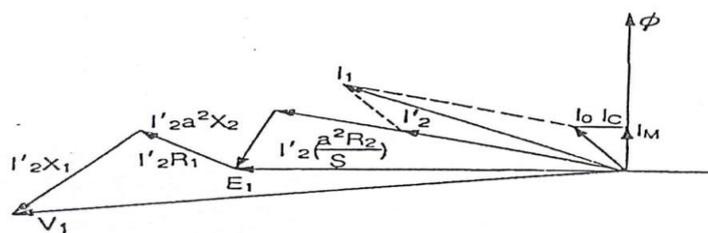
2.9 Rangkaian Ekvivalen Motor Induksi

Kerja motor induksi juga kerja transformator adalah berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Oleh karena itu motor induksi dapat dianggap sebagai transformator dengan rangkaian sekunder yang berputar. Dengan demikian rangkaian motor induksi dapat dilihat seperti gambar di bawah ini.

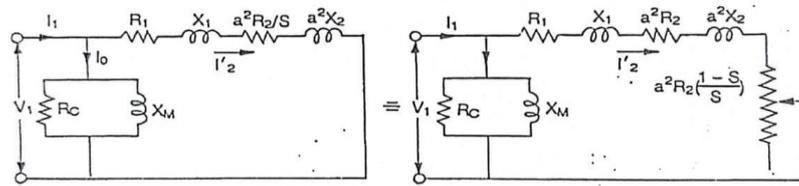


Gambar 2.9 Rangkaian motor induksi

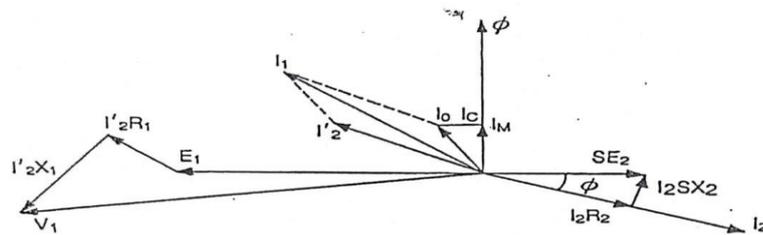
Vektor diagram dapat dilihat pada gambar 2.10, sedangkan rangkaian ekivalen motor induksi dapat dilihat pada gambar 2.11, vektor diagram untuk rangkaian ekivalen motor induksi di atas dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.10. Vektor diagram motor induksi



Gambar 2.11 Rangkaian ekivalen motor induksi



Gambar 2.12. Vektor diagram motor induksi

2.10 Kopel Motor Induksi

Dari rangkaian pada gambar 2.8 arus I_2 adalah:

$$I_2 = \frac{E_1}{\sqrt{(a^2R_2/s)^2 + (a^2X_2)^2}}, \text{ dan } \cos \phi = \frac{\text{tahanan}}{\text{impedansi}} = \frac{a^2R_2/s}{\sqrt{(a^2R_2/s)^2 + (a^2X_2)^2}}$$

$$P = T_w = 3E_1I_2 \cos \phi$$

Dimana :

P =Daya

T =Kopel

w =Kecepatan sudut

Bila $Z_1 = R_1 + jX_1$ dianggap kecil, E_1 hampir sama dengan V_1 .

$$T = \frac{3}{w} V_1^2 \frac{S a^2 R_2}{(a^2 R_2)^2 + S^2 (a^2 X_2)^2} \dots \dots \dots (2.3)$$

Berapa harga S agar T maksimum?

Harga S untuk mendapatkan T maksimum apabila $\frac{dT}{dS} = 0$

Dari diferensiasi $\frac{dT}{dS} = 0$ diperoleh harga T maksimum pada saat

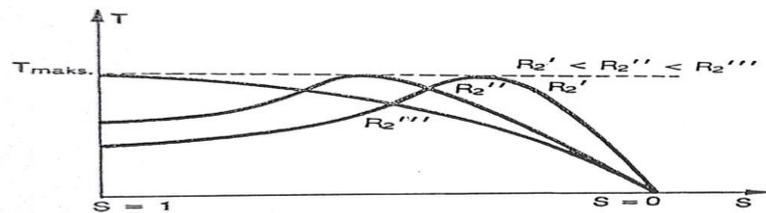
$$S = \pm \frac{R_2}{X_2} \dots\dots\dots(2.4)$$

$$T_{max} = \frac{3V_1^2}{2w a^2 X_2} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dari ketiga persamaan tersebut dapat di tarik beberapa kesimpulan :

1. Dari persamaan (1) diketahui bahwa untuk harga S kecil maka $S^2(a^2 X_2)^2$ dapat diabaikan, maka kopel sebanding dengan S ($T \sim S$).
2. Dari persamaan (2) diketahui bahwa untuk memperoleh kopel maksimum pada saat ($S = 1$) ialah dengan membuat $R_2 = X_2$.
3. Harga kopel maksimum dapat diubah dengan mengatur harga X_2 atau tegangan sumber V_1 lihat persamaan (3).
4. Persamaan (1) dan (2) menunjukan R_2 tidak mengubah harga kopel maksimum, melainkan hanya mengubah harga S pada saat kopel maksimum terjadi.

Perubahan R_2 dalam hubungannya dengan kopel (T) dan slip (S) dapat dilihat dari kurva pada gambar 2.12



Gambar 2.13. Kurva Perubahan R_2 dalam hubungannya dengan kopel (T) dan slip (S)

¹² Zuhail. 1991. Dasar Tenaga Listrik. ITB, Bandung. Hal : 68,71-74

2.11 Pengasutan Motor Induksi

Pengasutan motor induksi adalah cara menjalankan pertama kali motor, tujuannya agar starting kecil dan drop tegangan masih dalam batas toleransi. Dibawah ini beberapa macam pengasutan motor induksi :

1. Pengasutan Hubungan Langsung (DOL)⁷

Jala-jala tegangan rendah 380 V melalui pemutus rangkaian atau kontaktor Q1 langsung terhubung dengan motor induksi. Sekering berfungsi sebagai pengaman hubungsingkat, jika terjadi beban lebih diamankan oleh relay pengaman beban lebih (overload relay). Saat pemutus rangkaian/ kontaktor di ON kan motor induksi akan menarik arus starting antara 5 sampai 6 kali arus nominal. Untuk motor induksi daya kecil 5 KW, hubungan langsung bisa dipakai. Arus starting yang besar akan menyebabkan drop tegangan disisi suply.

2. Pengasutan Segitiga-Bintang²

Metode starting Y – Δ banyak digunakan untuk menjalankan motor induksi rotor sangkar yang mempunyai daya di atas 5 kW (atau sekitar 7 HP). Untuk menjalankan motor dapat dipilih starter yang umum dipakai antara lain : saklar rotari Y – Δ , saklar khusus Y- Δ atau dapat juga menggunakan beberapa kontaktor magnet beserta kelengkapannya yang dirancang khusus untuk rangkaian starter Y – Δ . Arus starting sekitar 1,8 sampai 2,6 kali arus nominal. Dan torsi awal sekitar 0,5 torsi nominal.

3. Tahanan Depan Stator (*Primary Resistor*)

Starting dengan menggunakan tahanan primer adalah suatu cara menurunkan tegangan yang masuk ke motor melalui tahanan yang disebut tahanan primer karena tahanan ini terhubung pada sisi stator. Hal ini menggunakan prinsip tegangan jatuh.

⁷ Siswoyo, Teknik Listrik Industri (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, 2008), jilid 2, hal. 5-11.

² Cahyo. 2015. (online). <http://blog.unnes.ac.id/crowds/pengasutan-motor-listrik/> .(Diakses 2 April 2022 pukul 20.00 WIB).

4. *Autotransformator*

Prinsipnya sama dengan menggunakan tahanan primer namun digantikan dengan trafo otomatis yang akan mengatur tegangan start dari motor. Setelah beberapa saat motor dipercepat, transformator diputuskan dari rangkaian dan motor terhubung langsung pada tegangan penuh.

5. **Tahanan Rotor Lilit**

Metoda lain untuk menurunkan arus starting adalah dengan menggunakan tahanan (R) yang dihubungkan pada rangkaian rotor. Starting ini hanya dapat dipakai untuk motor induksi motor rotor lilit (motor slip ring), sedangkan untuk motor induksi rotor sangkar hal ini tidak bisa dilakukan. Motor induksi rotor lilit juga disebut motor induksi cincin geser (slipring), rotornya mempunyai lilitan yang dihubungkan ke tahanan luar. Pada waktu starting, motor dihubungkan dengan tahanan dengan harga R yang maksimum. Setelah motor running, maka rheostat dihubung singkat.

2.12 **Stacker Reclaimer**¹¹

Prinsip kerja stacker reclaimer ada dua yaitu sebagai stacking dan reclaiming, *Stacking* adalah dengan menggerakkan *conveyor* pada *boom tripper* menuju *boom bucket* dan mencurahkan batu bara ke *stokpile*. Prinsip kerja *reclaiming* adalah menggerakkan *conveyor*, *boom tripper* dan *boom bucket* ke arah *stokpile*, dan juga dengan memutar *bucket wheel* guna mengambil coal dari tumpukan batubara untuk diteruskan dan di angkut melalui *conveyor* sampai masuk kapal.



Gambar 2.14 Stacker Reclaimer

2.13 **Belt Conveyor**³

Belt conveyor merupakan mesin pemindah material sepanjang arah horizontal atau dengan kemiringan tertentu secara kontinu. *Belt conveyor* secara luas

digunakan pada berbagai industri. Sebagai contoh : Penyalur hasil produksi urea curah ke gudang penyimpanan dan sebagainya. Skema konstruksi utama belt conveyor terlihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Skema Kontruksi Utama *BeltConveyor*
(Sumber: Kontruksi Belt Conveyor, 2008)

Berdasarkan standar dari *Conveyor Equipment Manufacturers Association* (CEMA) konstruksi dasar *conveyor* secara umum terdiri dari :

1. *Tail Pulley* (dalam kasus tertentu dapat sebagai drive pulley dengandrive-unit yang dipasangkan padanya).
2. *Snub Pulley* (pada *head-end* dan *tail-end*)
3. *Internal belt cleaner* (*internal belt scraper*)
4. *Impact idlers* (*impact rollers*)
5. *Return idlers* (*return rollers*)
6. *Belt*
7. *Bend pulleys*
8. *Take-up pulley*
9. *Take-up unitt*
10. *Carrying idlers*
11. *Pulley cleaner*
12. *Eksternal belt cleaner* (*eksternal belt scraper*)
13. *Head pulley* (biasanya sebagai *discharge pulley* dan juga *drive pulley*)

¹¹ S Hardianti,B Billi – jurnal teknik patra akademik, 2018 – jurnal.pap.ac.id. hal 10

³ Dwi James.2008.*Kontruksi Belt Conveyor*.Hal:5

Ada beberapa pertimbangan yang mendasari dalam penelitian pesawat pengangkut :

1. Karakteristik pemakaian, hal ini menyangkut jenis dan ukuran material, sifat material, serta kondisi medan atau ruang kerja alat.
2. Proses produksi, mengangkut kapasitas perjam dari unit, kontinuitas pemindahan, metode penumpukan material dan lamanya alat beroperasi.
3. Prinsip-prinsip ekonomi, meliputi ongkos pembuatan, pemeliharaan, pemasangan, biaya operasi dan juga biaya penyusutan dari harga awal alat tersebut.

2.14 Bagian bagian *belt conveyer*

Belt conveyer mempunyai bagian-bagian diantaranya adalah :

1. *Tail Pulley*

Tail pulley merupakan *pulley* terakhir (ujung) *belt conveyer* dan bergerak mengikuti *head pulley* yang berfungsi sebagai tempat berputarnya *belt conveyer* menuju *return roll*. *Tail pulley* (Gambar 2.16) biasanya merupakan titik ujung dari pemindahan material.



Gambar 2.16 *Tail Pulley*

2. *Return roll*

Return roll berfungsi sebagai *roll* penumpu *belt* agar tidak melendut saat berputar kembali tanpa muatan menuju ke *head pulley*. Pada penggunaannya *Return roll* selalu digunakan satu buah pada satu titik tumpuan dengan panjang yang hampir sama dengan lebar *belt*. *Return roll* dapat dilihat pada Gambar 2.17.

Gambar 2.17 *Return roll*

3. *Carrying Roll*

Carrying Roll (Gambar 2.18) merupakan *roll* yang menumpu *belt conveyor* yang berisi material angkut di atasnya. Berbeda dengan *return roll*, *carrying roll* terdiri dari tiga buah *roll* pada satu titik tumpuan, dimana *roll* tengah diposisikan datar dan *roll* sebelah luar diposisikan miring untuk menjaga agar material yang dibawa tidak tumpah. Selain hal tersebut, jarak antara titik tumpu *carrying roll* lebih pendek dari pada *return roll* agar tidak terjadi lendutan belt akibat pengaruh berat material yang diangkut. Foto *carrying roll* yang ada di lapangan adalah sebagai berikut:

Gambar 2.18 *Carrying Roll*

4. *Bend Pulley*

Bend Pulley merupakan *pulley* penghubung atau pembelok *belt* menuju *take up pulley* atau *pulley* pemberat. Dimana *Bend Pulley* bekerja mengatur keseimbangan belt pada pemberat. *Belt conveyor* pada perusahaan ini menggunakan dua buah *bend pulley* untuk membelokkan *belt* menuju *take*

Gambar 2.19 *Bend Pulley*

up pulley (yang berada di posisi lebih rendah). Gambar 2.19 berikut adalah foto salah satu *bend pulley*.

5. *Head Pulley*

Head Pulley merupakan *pulley* yang berhubungan langsung dengan *gearbox* sehingga langsung terhubung dengan penggerak. *Head pulley* berfungsi sebagai penggerak awal dari suatu sistem *belt conveyor*, fotonya bisa dilihat pada Gambar 2.20



Gambar 2.20 *Head Pull*

6. *Take up pulley*

Take up pulley (Gambar 2.21) berfungsi sebagai pengencang *belt*, menjaga agar kekencangan *belt* sama antara sisi yang bermuatan dan sisi yang tidak bermuatan, yang seolah-olah menambah jarak antara *head pulley* dan *tail pulley*.

Take up pulley dibedakan menjadi dua jenis:

1. *Screw Take-up*

Screw take-up merupakan pengencang *belt* dengan memberi gaya tarik pada *belt* dengan menggunakan ulir pada kedudukan *pulley* dan biasanya di gunakan untuk *belt* dengan panjang posisi angkut sekitar 50 – 100 m.

2. *Gravity Take-up*

Gravity Take-up merupakan pengencang *belt horizontal* dan *vertical* yang cara kerjanya adalah dengan memberi gaya tarik pada *belt* menggunakan gaya gravitasi bumi, dan dipakai untuk sistem yang

panjangnya lebih dari 100 m. *Belt conveyor* yang ditinjau menggunakan *take up pulley* jenis ini dan fotonya adalah pada Gambar 2.18 berikut.



Gambar 2.21 *Take Up Pulley*

7. *Take up unit*

Take up unit merupakan unit pemberat yang digunakan sebagai penyeimbang pada kelonggaran *belt* saat beroperasi pada muatan dan tanpa muatan. Agar *belt conveyor* tetap kencang, *take up unit* akan turun kalau tidak ada material yang dibawa dan naik kalau ada material angkut pada *belt conveyor*.

8. *Impact roll*

Impact roll merupakan *roll* dengan karet di bagian luar yang biasanya di pasang di bagian jatuhnya material sehingga ada gaya dorong kembali.

9. *Idler*

Belt disangga oleh *idler*. Jenis *idler* yang digunakan kebanyakan adalah *roller idler*. Berdasarkan lokasi *idler* di *conveyor*, dapat dibedakan menjadi *idler* atas dan *idler* bawah. Gambar susunan *idler* atas dapat dilihat pada Gambar 2.22. Sudut antara *idler* bawah dan *idler* atas dapat divariasikan sesuai keperluan.



Gambar 2.22 *Idler* bagian atas

10. Belt

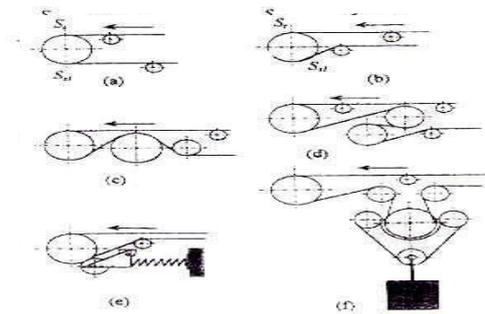
Belt adalah salah satu elemen utama dari *conveyor*. *Belt* terbuat dari bermacam- macam bahan, seperti: *steel*, *nylon*, katun, karet dan lain lain . *Belt* harus memenuhi persyaratan, yaitu kemampuan menyerap air rendah, kekuatan tinggi, ringan, lentur, regangan kecil, ketahanan pemisahan lapisan yang tinggi dan umur pakai panjang. Untuk persyaratan tersebut, *belt* berlapis karet adalah yang terbaik.



Gambar 2.23. *Belt Conveyo*

2.15 Unit penggerak *Belt Conveyor*

Daya penggerak pada *belt conveyor* ditransmisikan kepada *belt* melalui gesekan yang terjadi antar *belt* puli penggerak yang digerakkan dengan motor listrik. Unit penggerak terdiri dari beberapa bagian, yaitu puli, motor serta roda gigi transmisi antara motor dan puli. Tipe-tipe susunan puli penggerak untuk *belt conveyor* dapat dilihat pada Gambar 2.24. Gambar a dan b menunjukkan pulli penggerak tunggal (*single pulley drive*) dengan sudut $\alpha = 180$ dan $\alpha \approx 2100$ s.d 2300. Peningkatan sudut kontak seperti Gambar b dapat diperoleh jika *idler* pembalik diletakkan lebih keatas dan jarak dengan puli penggerak lebih dekat. Gambar c dan d menunjukkan dua puli penggerak dengan sudut kontak 3500 dan 4800. Pada gambar e dan f diperlihatkan puli penggerak khusus, dan digunakan pada *conveyor* yang panjang serta beban yang berat. Susunan puli penggerak pada gambar e menggunakan pegas tekan pada gambar f menggunakan beban *take-up* (Metriadi, 2005). Tetapi dalam aplikasi dilapangan, konstruksi seperti pada Gambar 2.24 (b) lebih banyak digunakan.



Gambar 2.24 Susunan puli penggerak *belt conveyor*

a dan b puli tunggal;

c dan dsistem dua puli;

e dan f menggunakan bagian penekan

2.16 Komponen-Komponen Pendukung Belt Conveyor

Dalam pengoperasian *belt conveyor* dilapangan, ada beberapa komponen pendukung yang ditambahkan pada sistim tersebut seperti :

1. *Hopper*, berfungsi untuk mencurahkan bebas keatas *belt conveyor*. Kapasitas beban dapat diatur dari curahan *hopper* tersebut.
2. Peralatan pembongkar (*discharging device*), berfungsi untuk membongkarmuatan *belt conveyor*
3. Rem penahan otomatis (*automatic hold back brakes*) berfungsi untuk mematikan sistem seketika jika ada gangguan.
4. Pembersih *belt*, yang dipasang pada puli bagian depan. Alat ini dipasang untuk *conveyor* yang membawa material basah dan lengket
5. *Feeder*, sebagai pengumpan dari *hopper* ke *belt*, *feeder* ini memiliki dua bentuk yaitu sudu dan *screw*.

2.17 Sistem Pengaman Pada *Belt Conveyor*¹⁰

Pada sistem *conveyor* memiliki proteksi - proteksi sebagai pengaman yang dapat mengamankan baik untuk peralatan maupun untuk manusia. Semua *belt conveyor* di Tambang Air Laya (TAL) dilengkapi dengan berbagai komponen *safety*. Alat pengaman tersebut dipasang sebagai tindakan pengaman apabila dalam pengoperasian *belt conveyor* mengalami gangguan atau adanya alat yang berfungsi sebagaimana mestinya, maka akat pengaman pada *belt conveyor* yaitu.

1. Ripcord

Berfungsi untuk menghentikan jalannya operasi *belt conveyor* apabila padasaat operasinya terjadi hal – hal yang harus dibenahi disepanjang jalur *belt conveyor*. Dipasang pada samping kiri dan kanan sepanjang jalur *conveyor* dengan jarak yang satu dan lainnya sekitar 120-130 Meter.

2. Belt Deviation Switch

Merupakan suatu alat pengaman *belt conveyor* saat beroperasi. Apabila belt sedang berjalan, kemudian ban keluar atau bergeser dari rol *carying*, maka ban akan menyentuh *handle belt deviation* sehingga *belt conveyor* akan berhenti secara otomatis. Adapun penempatan alat ini pada umumnya diletakkan pada tempat yang diam dan berpasangan dengan alat bergerak (*belt conveyor*) yaitu di bagian *head* dan *tail* untuk dapat menyentuh *handle* atau stang dari *switch* tersebut.

3. Overflow

Overflow merupakan alat untuk menghindari terjadinya penumpukan material dari *chute* atau corong. Penumpukan material atau corong biasanya terjadi saat BWE menggali tanah yang berlumpur pekat sehingga material akan menempel di dinding corong yang makin lama semakin penuh dan mengakibatkan corong tersumbat. Material akan menumpuk sampai ke *discharge pulley*. Material yang pekat atau karena adanya material yang besar sehingga dapat menyumbat corong. Oleh karena itu, pada umumnya *overflow* ditempatkan pada tempat penumpahan material. Fungsi *overflow* untuk memonitor terjadinya penumpukan material atau kelebihan material (*overload*) pada corong atau ujung dari arah jalannya *belt conveyor*. Bila material menyentuh bandul *overflow*, maka *belt conveyor* akan mati secara otomatis

¹⁰ Sobri, Muhammad. Sistem overflow sebagai pengaman pada belt conveyor di cc10 tambang air laya PT.BUKIT ASAM Tbk. Laporan akhir. Tidak Diterbitkan.

4. *Belt Stop*

Belt Stop adalah salah satu pengaman dari *conveyor*. Adapun fungsi dari *beltstop* ini adalah untuk menghentikan keseluruhan motor penggerak *conveyor* secara darurat (Emergency). *Belt Stop* ini terletak ditempat unit area kerja/ditempat operasi mesin – mesin penggerak.

5. *Slip Monitoring*

Slip monitoring ini biasanya difungsikan untuk memonitor apabila terjadi *slip* antara *pulley* penggerak dengan *belt*, dimana yang dimonitor adalah perbedaan putaran antara *pulley* penggerak dengan *return pulley*.

2.18 Perhitungan Daya

Daya dapat dikatakan sebagai energi yang digunakan tiap waktu. 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 :

1. Daya aktif (P) adalah daya yang diubah menjadi energy, persatuan waktu atau dengan kata lain adalah daya yang benar-benar terpakai yang dihasilkan oleh komponen resistif, satuannya adaah Watt (W).
2. Daya reaktif (Q) adalah daya yang ditimbulkan oleh komponen reaktansi. Daya reaktif ditentukan dari reaktansi yang menimbulkannya, dapat berupa reaktansi induktif (X_L) dan reaktasi kapasitif (X_c) , satuannya adalah Volt Ampere Reaktif (VAR).
3. Daya semu (S) adalah jumlah secara vektoris daya aktif dan daya reaktif yang memiliki satuan Volt Ampere (VA).

$$P = V . I . \text{Cos}\phi \dots\dots\dots(2.6)$$

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

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

Untuk daya tiga fasa rumus daya aktif, daya reaktif, dan daya semu adalah seperti dibawah ini :

$$P = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos \phi \dots\dots\dots(2.9)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \dots\dots\dots(2.10)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \sin \phi \dots\dots\dots(2.11)$$

4. Daya *Input*

Daya *Input* adalah daya masukan atau total daya yang diterima. Dibawah ini adalah rumus dari perhitungan P_{input} untuk daya masukan 3 fasa :

$$P_{input} = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos \phi \dots\dots\dots(2.12)$$

V_l = Tegangan Phasa – phasa

I_l = Arus Phasa – phasa

$\cos \phi$ = Faktor daya motor induksi

5. Daya *Output*

Daya *Output* adalah daya keluaran atau daya yang diterima motor untuk melakukan kerja. Dibawah ini adalah rumus dari perhitungan daya keluaran :

$$P_{output} = V_{output} \times I_{output} \dots\dots\dots(2.13)$$

V_{output} = Tegangan yang diukur atau tegangan keluaran

I_{output} = Arus yang diukur atau arus keluaran

$$P_{output} = P_{in} - P_{rugi-rugi} \dots\dots\dots(2.14)$$

P_{in} = Daya masukan atau total daya yang diterima

$P_{rugi-rugi}$ = Rugi – rugi daya

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:

$$P = \frac{W}{t} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana,

P = Daya mekanik (W)

W = Usaha (joule)

t = Waktu (s)

2.19 Rugi – rugi Daya Pada Motor Induksi

Pada setiap motor tentu ada rugi – rugi pada motor hal ini karena motor dapat menkonversikan energi 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

$$P_{\text{rugi rugi}} = \left| \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{in maks}}} \right|^2 \cdot P_{\text{rugi - rugi maks}} \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana

P_{In} : daya input

$P_{\text{In maks}}$: daya input maksimum

$P_{\text{rugi-rugi maks}}$: Total kerugian daya maksimum yang dihasilkan oleh motor

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

2.20 Torsi Motor

Tenaga gerak yang dihasilkan dari sebuah motor listrik di sebut dengan torsi. Dan biasanya menggunakan satuan Nm(Newtonmeter). Adapun cara menghitung torsi adalah sebagai berikut :

$$T = \frac{5252 \times HP}{n} \dots \dots \dots (2.17)$$

Dimana :

T = Torsi (Nm)

P = Daya Motor (HP)

n = Kecepatan Motor (RPM)

2.21 Efisiensi Motor

Efisiensi motor dapat dikatakan sebagai perbandingan keluaran daya motor yang digunakan terhadap keluaran daya totalnya. Pada motor listrik efisiensi motor terdapat hubungan jelas antara motor dan beban. Apabila pada beban 50% - 100% paling efisien pada beban adalah 75%, dan apabila beban turun dibawah 50% efisiensi turun dengan cepat maka akan ada dampak pada faktor dayanya. Untuk mengukur efisiensi motor, maka motor harus dilepaskan sambungannya dari beban dan dibiarkan untuk melalui serangkaian uji. Dibawah ini adalah rumus dari efisiensi :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.18)$$

Dimana :

η = Efisiensi (%)

P_{out} = Daya keluaran (Watt)

P_{in} = Daya masukan (Watt)

⁹ Siswoyo, Teknik Listrik Industri (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, 2008) , jilid 2, hal. 5-8

