

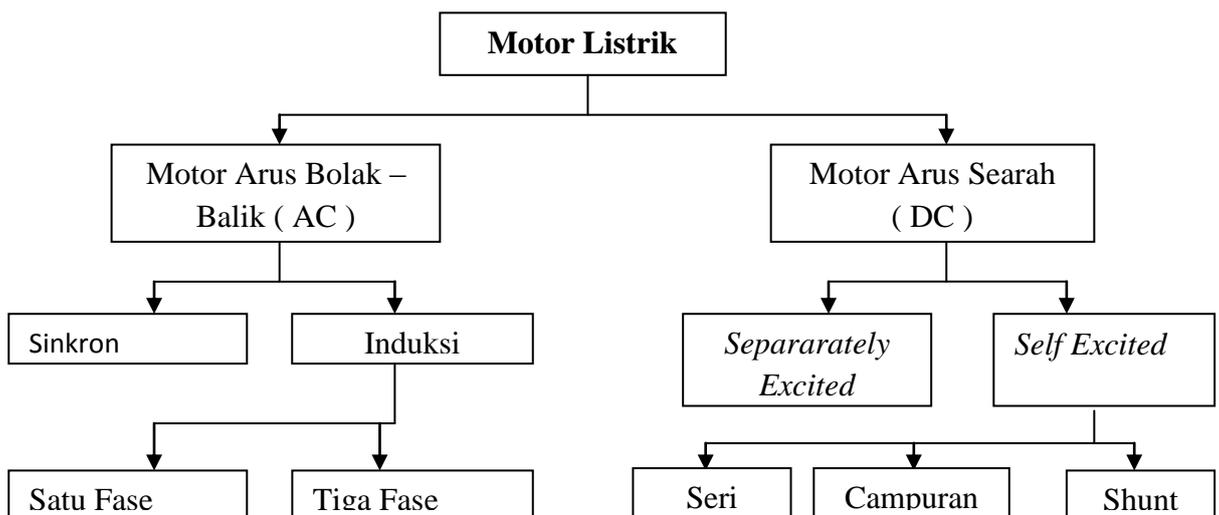
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Motor Induksi

##### 2.1.1 Motor induksi tiga fasa<sup>1</sup>

Motor induksi merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Dari berbagai motor listrik yang ada, motor induksi merupakan jenis motor arus bolak-balik yang paling banyak digunakan. Hal ini disebabkan motor induksi memiliki konstruksi yang kuat dan karakteristik kerja yang baik



Gambar 2.1 Klasifikasi motor listrik

Beberapa kelebihan dari motor induksi adalah :

1. Bentuknya sederhana, dengan konstruksi yang cukup kuat.
2. Biayanya murah dan dapat diandalkan.

<sup>1</sup> Sumardjati, Prih. 2008. Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3. Hal : 408



3. Efisiensinya tinggi dan pada keadaan normal tidak memerlukan sikat, sehingga rugi-rugi gesekan (losis) dapat dikurangi.
4. Perawatan yang minimum.

Namun disamping itu, motor ini tetap memiliki kelemahan, di antaranya adalah :

1. Pengaturan kecepatannya berpengaruh pada efisiensinya.
2. Kecepatan akan berkurang jika bebannya bertambah.
3. Kopel mulanya lebih rendah daripada mesin arus searah paralel.

Disebut motor induksi, karena motor ini bekerja dengan adanya arus yang terinduksi sebagai akibat dari adanya perbedaan relative antara putaran rotor dengan medan magnet berputar yang dihasilkan oleh arus stator. Motor induksi ini terdiri dari dua jenis, yaitu motor induksi dengan rotor belitan dan motor induksi rotor sangkar.

Motor induksi bekerja sebagai berikut : listrik dipasang ke stator yang akan menghasilkan medan magnet. Medan magnet ini bergerak dengan kecepatan sinkron disekitar rotor. Arus rotor menghasilkan medan magnet kedua, yang berusaha untuk melawan medan magnet stator, yang menyebabkan rotor berputar. Walaupun begitu, didalam prakteknya motor tidak pernah bekerja pada kecepatan sinkron namun pada kecepatan dasar yang lebih rendah. Terjadinya perbedaan antara dua kecepatan tersebut disebabkan adanya slip/geseran yang meningkat dengan meningkatnya beban. Slip hanya terjadi pada motor induksi. Untuk menghindari slip dapat dipasang sebuah cincin geser/ slip ring, dan motor tersebut dinamakan motor cincin geser/slip ring motor.

### **2.1.2 Motor cincin seret (*slipring induction motor*)**

Ciri khas motor slipring atau yang sering disebut motor rotor lilit adalah adanya lilitan pada rotornya yang dilengkapi dengan cincin geser (slipring) yang



dihubungkan dengan coal brush ke terminal. Hal lain yang menjadi ciri pada motor ini adalah pada terminal box yang memiliki sembilan terminal. Enam terminal terhubung dengan ujung-ujung lilitan pada statornya (U1-U2, V1-V2 dan W1-W2), sedangkan tiga terminal lainnya (K-L-M) terhubung dengan lilitan pada rotornya melalui slipring. Ada 3 buah cincin (slipring) yang terhubung dengan *coal brush*



Gambar 2.2 *Slipring* pada motor induksi



Gambar 2.3 *Slipring* dan *holder coal brush*

Lilitan rotor yang ujungnya terminal K-L-M dihubungkan dengan resistor luar yang besarnya bisa diatur. Dengan mengatur resistor luar berarti mengatur



besarnya resistor total yang merupakan jumlah resistansi rotor dan resistansi luar ( $R_{\text{rotor}} + R_{\text{lutar}}$ ), sehingga pada arus rotor dapat diatur. Ketika resistor berharga maksimum, arus rotor yang mengalir minimum, sekaligus memperbaiki faktor kerja motor. Kelebihan rotor lilit yaitu diperoleh torsi starting yang tinggi, dengan arus starting yang tetap terkendali. Umumnya motor jenis ini dirancang untuk motor-motor dengan konsumsi daya yang besar.<sup>2</sup>

Berdasarkan prinsip dasar motor slipring terdiri dari 2 bagian, yaitu :

a. Bagian stator

Pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga kumparan tiga fasa yang disebut sebagai kumparan stator dimana masing-masing kumparan mendapatkan supply arus tiga fasa. Jika kumparan stator mendapatkan supply arus tiga fasa, maka kumparan tersebut segera timbul magnet putar, karena adanya fluks magnet putar pada kumparan stator, mengakibatkan rotor berputar karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar rotor sinkron dengan kecepatan putar stator dimana  $f$  adalah frekuensi dan  $p$  adalah jumlah kutub. :  $N_s = \frac{120 f}{p}$ , ..... (2.1)



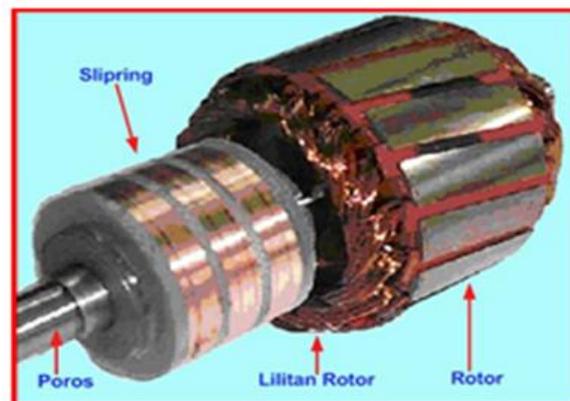
Gambar 2.4 Bagian stator

<sup>2</sup> Bayu prihatmoko diakses dari <http://elektrikbank.blogspot.com/2013/05/motor-induksi-tiga-fasa.html>



#### b. Bagian rotor

Pada bagian rotor yang merupakan tempat kumparan rotor adalah bagian yang bergerak atau berputar. Ada dua jenis kumparan rotor, yaitu *squirrel-cage* rotor dan *phase wound* rotor. Hampir 90% kumparan rotor dari motor slipring menggunakan jenis *squirrel-cage* rotor, hal ini dikarenakan bentuk kumparannya sederhana dan tahan terhadap guncangan. Ciri khusus dari *squirrel-cage* rotor adalah ujung-ujung kumparan rotor terhubung singkat secara permanen.



Gambar 2.5 Bagian rotor belitan

### 2.1.3 Karakteristik motor slipring

Kumparan stator diletakkan pada jaringan tiga fasa sehingga terbangkit medan putar. Medan putar ini memotong kawat stator dan menginduksikan tegangan mula primer. Dari keadaan diam (slip  $s = 100\%$ ) tercapai putaran tinggi dalam keadaan motor berbeban (slip sekitar 3 sampai 6 %). Dengan adanya slip, maka kecepatan potong medan putar akan diperkecil. Dengan demikian, terjadilah suatu pengurangan tegangan rotor, frekuensi rotor dan tahanan induktif rotor. Tegangan rotor dan frekuensi rotor berubah secara linier bersamaan dengan slip (berbanding lurus). Pada saat beroperasi, dikarenakan tahanan induktifnya kecil,



maka tahanan ohm pada jaringan rotor menjadi dominan sehingga tegangan rotor dan arusnya terletak se-fasa.

Dengan naiknya jumlah putaran rotor dari motor slipring, maka frekuensi dan besarnya tegangan rotor yang diinduksikan akan berkurang. Suatu motor induksi slipring dengan kumparan rotor dihubung singkat mempunyai arus penyalaan yang besar, sebab tegangan diam dari rotor mengakibatkan arus rotor besar. Oleh karena itu, tahanan dalam jaringan arus rotor diperbesar melalui *starter*. Setelah itu arus penyalaan akan mengecil dan motor berputar lambat. Dengan pembangkitan jumlah putaran tahanan asut akan diperkecil, dimana hal ini akan memperkecil tegangan induksi. Moment puntir dari suatu motor asinkron tergantung dari fluksi magnet medann puntir stator dan dari medan puntir rotor, hal ini dapat dianggap sebagai dari pengambilan arus rotornya.

Dengan penambahan jumlah putaran di dalam rotor dimana tegangan induksi arus rotornya dan moment puntirnya akan kembali mengecil. Jika pengecilan pergeseran fasa berlebihan, maka moment puntirnya naik. Jika pengecilan tegangan induksinya berlebihan, maka moment puntirnya akan turun (jatuh).

Perbandingan moment puntir berdasarkan VDE 0530 diberi nama :

- a) Momen Mula ( $M_A$ ), diakibatkan momen puntir dalam keadaan diam. Pada motor induksi slipring, momen ini relatif tinggi dan motor akan bekerja dengan baik.
- b) Momen pelana ( $M_A$ ), adalah momen terkecil pada poros satu motor diantara moment mula dan momen tarik dan pada motor induksi slipring moment ini diabaikan.
- c) Momen tarik ( $M_K$ ), adalah momen yang terbesar, dimana motor yang terletak diantara momen pelana dan momen nominal dapat dijalankan. Momen ini besarnya 1,6 kali sampai 2,5 kali lebih besar dari momen nominal.



#### **2.1.4 Alasan penggunaan motor slipring**

Seperti halnya pertambangan pada umumnya, material-material di area pertambangan sangat beranekaragam, mulai dari yang lunak dan cair seperti lumpur sampai tanah bebatuan yang keras seperti batubara dan bebatuan lainnya. Karena hal inilah beban yang diangkat oleh bucket maupun belt conveyor menjadi tidak konstan sehingga motor yang cocok digunakan adalah motor slipring. Karena motor ini kecepatannya dapat di atur step by step, sehingga kecepatan putaran motor dapat di sesuaikan dengan kondisi beban yang diangkat.

#### **2.1.5 Keuntungan dan kerugian motor slipring**

- 1) Keuntungan motor slipring :
  - a. Salah satu keuntungan motor slipring adalah resistan dapat disisipkan dalam rangkaian rotor untuk mendapatkan torsi asut yang tinggi (pada asutan yang rendah) dan kemudian mematikan rangkaian asut (cut-out) untuk memperoleh keadaan putaran yang optimum.
  - b. Bisa digunakan pada beban yang cenderung sangat besar sifat beban berubah-ubah.
  - c. Arus motor slipring bisa ditekan, sedangkan motor induksi lain arus startingnya bisa ditekan.
- 2) Kerugian motor slipring :
  - a. Komponen yang digunakan lebih banyak dari pada motor induksi 3 phasa lainnya
  - b. Memerlukan kontrol external sehingga diperlukan biaya yang lebih besar untuk pengoperasian awalnya.
  - c. Harga jual motor slipring lebih mahal dibanding dengan motor induksi lainnya.
  - d. Komponen internal yang digunakan lebih banyak dari pada motor induksi lainnya.



## 2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi<sup>3</sup>

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

- a. Apabila sumber tegangan tiga fasa di pasang pada kumparan stator timbulah medan putar dengan kecepatan.
- b. Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor
- c. Akibatnya pada kumparan rotor timbul ( ggl ) sebesar :

$$E_2 = 4,44.f_2.N_2.m \dots \dots \dots (2.2)$$

- 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 :

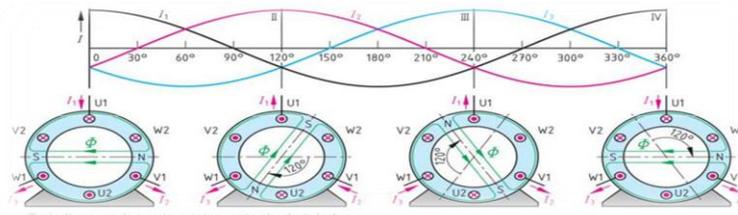
$$S = \frac{n_s - n_r}{N_s} \times 100\% \dots \dots \dots (2.3)$$

<sup>3</sup> Zuhail. 1991. Dasar Tenaga Listrik. ITB, Bandung. Hal : 68



- 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.

Prinsip kerja motor induksi ini juga dapat dijelaskan dengan gelombang sinusoidal seperti pada gambar 2.6, terbentuknya medan putar pada stator motor induksi. Tampak stator dengan dua kutub, dapat diterangkan dengan empat kondisi



Gambar 2.6 Bentuk gelombang dan timbulnya medan putar pada Stator motor induksi<sup>4</sup>

1. Saat sudut  $0^\circ$ . Arus  $I_1$  bernilai positif sedangkan arus  $I_2$  dan arus  $I_3$  bernilai negatif dalam hal ini belitan  $V_2$ ,  $U_1$  dan  $W_2$  bertanda silang (arus meninggalkan pembaca), dan belitan  $V_1$ ,  $U_2$  dan  $W_1$  bertanda titik (arus listrik menuju pembaca). terbentuk fluk magnet pada garis horizontal sudut  $0^\circ$  kutub S (south=selatan) dan kutub N (north=utara).
2. Saat sudut  $120^\circ$ . Arus  $I_2$  bernilai positif sedangkan arus  $I_1$  dan arus  $I_3$  bernilai negatif, dalam hal ini belitan  $W_2$ ,  $V_1$  dan  $U_2$  bertanda silang (arus meninggalkan pembaca), dan kawat  $W_1$ ,  $V_2$  dan  $U_1$  bertanda titik (arus

<sup>4</sup> Siswoyo.2008.Teknik Listrik Industri Jilid 2.Direktorat Jendral Manajemen Pembinaan SMK. Hal:55



menuju pembaca). Garis fluk magnet kutub S dan N bergeser  $120^0$  dari posisi awal.

3. Saat sudut  $240^0$ . Arus  $I_3$  bernilai positif dan  $I_1$  dan  $I_2$  bernilai negatif, belitan  $U_2$ ,  $W_1$ , dan  $V_2$  bertanda silang (arus meninggalkan pembaca), dan kawat  $U_1$ ,  $W_2$  dan  $V_1$  bertanda titik (arus menuju pembaca). Garis fluk magnet kutub S dan N bergeser  $120^0$  dari posisi kedua.
4. Saat sudut  $360^0$ . Posisi ini sama dengan saat sudut  $0^0$ . Dimana kutub S dan N kembali ke posisi awal sekali. Dari keempat kondisi diatas saat sudut  $0^0$ ;  $120^0$ ;  $240^0$ ;  $360^0$ , dapat dijelaskan terbentuknya medan putar pada stator, medan magnet putar stator akan memotong belitan rotor. Kecepatan medan putar stator ini sering disebut kecepatan sinkron, tidak dapat diamati dengan alat ukur tetapi dapat dihitung secara teoritis yaitu dengan menggunakan rumus :

$$n_s = \frac{f \times 120}{P} = RPM \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

$n_s$  = Kecepatan putaran medan stator (Rpm)

$f$  = Frekuensi jala-jala (Hz)

120 = Konstanta

$P$  = Jumlah kutub pada motor (pole)

### 2.3 Slip<sup>5</sup>

Perbedaan kecepatan antara medan putar stator dengan rotor tergantung pada besarnya beban dari motor tersebut. Perbedaan putaran ini disebut dengan slip (S) yang dinyatakan dalam (%). Harga slip selalu berubah-ubah tergantung beban

<sup>5</sup> Sumanto, Drs. 1993. Motor Listrik Arus Bolak-Balik. Yogyakarta. Hal :43



yang di pukul yaitu dari 100% saat start sampai dengan 0% saat diam  
(  $N_s=N_r$  ). Perbedaan putaran antara putaran medan stator dan putaran rotor dapat  
dihitung dengan persamaan berikut

$$\% slip = \frac{n_s - n_r}{n_s} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana :

$n_s$  = Kecepatan Medan Stator (Rpm)

$n$  = Kecepatan Motor Induksi (Rpm)

Dalam hal ini kecepatan relatif rotor terhadap kecepatan meda putar stator  
adalah  $n_{rel}$ , dimana  $n_{rel} = n_s - n_r$ . Frekuensi yang dibangkitkan pada belitan rotor  
adalah  $f_2$ , dimana :

$$f_2 = \left( \frac{n_s - n_r}{120} P \right) \dots\dots\dots (2.6)$$

## 2.4 Torsi

Torsi adalah kekuatan yang menghasilkan rotasi. Hal ini menyebabkan objek  
untuk berputar. Torsi terdiri dari gaya yang bekerja pada jarak. Torsi, seperti  
bekerja, diukur adalah pound-feet (lb-ft). Untuk menghitung torsi, kita dapat  
menerapkan rumus :

$$T = F \times D$$

Dimana :

T = torsi (lb-ft)

F = gaya (lb)

D = jarak (kaki)

Apabila satuan T diubah menjadi satuan lb ft maka :

$$1 \text{ lb} = 4,447 \text{ N} \qquad 1 \text{ lb ft} = 1,356 \text{ Nm}$$

$$1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m} \qquad 1 \text{ Nm} = 0,737 \text{ lb ft}$$



Dan untuk menghitung torsi motor pada saat beban penuh, kita dapat menerapkan rumus:

$$T = \frac{HP \times 5252}{n} \dots\dots\dots (2.7)$$

Atau menggunakan persamaan :

$$T = \frac{P_{out}}{\omega} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$\omega = 2. \pi. n/60 \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana :

T = Torsi

HP = Daya kuda

5252 = Konstan

n = Kecepatan Motor Induksi

Pout = Daya keluaran (output) motor induksi

$\omega$  = Kecepatan sudut putar

## 2.5 Cara – Cara Menentukan Rugi – Rugi Pada Motor

Rugi – rugi motor listrik sebagian dapat ditemukan dengan cara konvensional yaitu dengan percobaan beban nol dan percobaan block rotor ( hanya untuk motor arus bolak – balik ). Percobaan beban nol dapat menentukan rugi – rugi rotasi motor. Pada keadaan beban nol, seluruh daya listrik input motor digunakan untuk mengatasi rugi – rugi inti dan rugi – rugi mekanik.

Rugi – rugi listrik motor dapat ditentukan aitu 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 keadaan ini merupakan rugi – rugi tahanan atau belitan pada keadaan ini rugi – rugi inti dapat di abaikan karena tegangan hubungan singkat relatif kecil di bandingkan dengan nominalnya

Rugi rugi *stray load* adalah rugi – rugi yang paling sulit ditukar 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 di kurangi 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 150 kw atau lebih. Dan untuk motor – motor yang lebih kecil dari itu dapat di abaikan

## 2.6 Rugi – Rugi Pada Motor Induksi

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 :

$$P_{in} = P_{out} + P_{rugi-rugi} \dots\dots\dots (2.10)$$

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



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

$$\begin{aligned} \text{efisiensi} &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \\ &= \frac{P_{in} - P_{rugi}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.11) \end{aligned}$$

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

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

### 2.6.1 Rugi – rugi inti

Rugi – rugi inti di peroleh 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

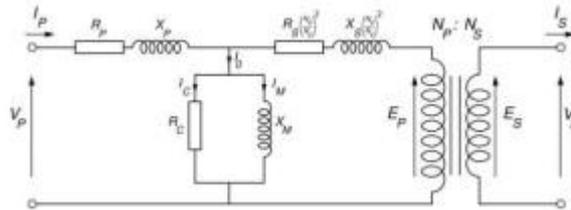
Rugi inti :

$$P_i = 3 \cdot E_1^2 \cdot G_c = \frac{3 \cdot E_1^2}{R_c} \dots\dots\dots (2.12)$$



## 2.7 Menghitung Daya Keluaran Motor

Menghitung daya keluaran motor harus diketahui seluruh rugi daya yang ada daya masuk ke motor bersifat elektris dapat diketahui secara mudah dengan melakukan pengukuran secara langsung namun rugi-rugi daya misalnya rugi daya lilitan baik stator maupun rotor sulit untuk diketahui melalui pengukuran demikian juga dengan rugi daya yang bersifat mekanik seperti rugi gesek dan angin serta daya keluaran yang bersifat mekanik pada poros motor sulit untuk diketahui melalui pengukuran. Untuk itu perlu dicari cara lain untuk menghitung besarnya daya daya tersebut khususnya bila ingin diketahui besarnya daya mekanik keluar dari motor yang terdapat pada poros motor. Salah satu cara yang banyak digunakan adalah dengan menggunakan teori diagram lingkaran motor induksi. Dan teori tersebut dapat diketahui besarnya seluruh daya yang bekerja pada motor induksi, baik secara langsung dengan perhitungan maupun secara tidak langsung dengan menggunakan diagram lingkaran yang telah dibuat. Disamping itu untuk mengetahui rumusan seluruh daya yang bekerja didalam motor induksi juga dapat dilihat dari rangkaian ekivalennya dimana rangkaian ekuivalen dari transformator. Perbedaannya adalah terletak pada sisi sekunder pada trafo dan sisi rotor pada motor. Pada transformator, keluaran berupa besaran listrik dan tidak ada gerakan sehingga rangkaian ekuivalen trafo pada sisi sekundernya terhubung buka. Sedangkan pada motor listrik keluarannya berupa gesekan yang timbul sebagai akibat adanya interaksi antara rapat fluks magnet ( $B$ ) dan arus yang mengalir pada rotor ( $I_r$ ) sehingga rangkaian ini sisi rotornya harus dalam keadaan tertutup. Lihat gambar 2



Gambar 2.7 Rangkaian ekivalen motor listrik saat motor diam tak berputar

#### Keterangan

- $V_1$  : Tegangan sumber ke stator
- $E_1$  : GGL pada stator
- $I_1$  : Arus masuk ke stator
- $I_1'$  : Ekivalen arus rotor pada stator
- $R_1$  : Tahanan stator
- $E_2$  : GGL rotor
- $X_1$  : Reaktansi stator
- $R_2$  : Tahanan lilitan rotor
- $R_2$  : Tahanan Lilitan rotor
- $R_c$  : Tahanan ekivalen inti besi
- $X_2$  : Reaktansi ekivalen inti besi
- $I_2$  : Arus pada lilitan rotor
- $I_o$  : Arus tanpa beban



Terlihat pada gambar 2.6 bahwa bila motor berputar dengan beban sehingga mengakibatkan terjadinya slip sebesar ‘s’, belum dapat diekspresikan pada rangkaian ekivalen tersebut. Untuk menyatakan keadaan tersebut. Untuk menyatakan keadaan tersebut di lakukan perubahan terhadap rangkaian ekivalen rotor seperti yang ditunjukkan pada gambar 3a dan 3b pada saat motor dibebani putarannya akan berubah dan menurut rumus 2 besarnya slip tersebut adalah <sup>6</sup>

$$S = \frac{n_s - n_m}{n_s} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dengan  $n_m$  : kecepatan putar motor (rpm) ;  $n_s = (60 \times f_1)/p$  : kecepatan putar medan sinkron (rpm);  $s$  : slip;  $f_2$  : frekuensi sumber (Hz) dan  $p$  : jumlah pasang kutub dalam keadaan tersebut frekuensi arus rotor  $f_2 = sf_1$  sehingga besar ggl rotor dan reaktansi rotor sebagai fungsi frekuensi masing masing berubah menjadi  $sE_2$  dan  $sX_2$ . Dengan demikian maka rangkaian rotor pada saat motor berputar dan dibebani dengan slip ‘s’ adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 3a, dan untuk mengekspresikan besarnya beban di lakukan penjabaran sebagai berikut <sup>7</sup>

$$\begin{aligned} sE_2 &= I_2 (R_2 + j s X_2) \\ E_2 &= I_2 (R_2 + j s X_2) \\ &= I_2 (R_2 I s - R_2 + R_2 + j X_2) \\ &= I_2 \{ (R_2 I s - R_2) + (R_2 + j X_2) \} \\ &= I_2 [ R_2 = j X_2 + R_2 (1 - s : s) ] \end{aligned}$$

<sup>6</sup> khairin ahmad diakses dari [http://www.academia.edu/15158283/ANALISIS\\_DAYA\\_DAN\\_TORSI\\_PADA\\_MOTOR\\_INDUKSI\\_SU\\_YAMTO\\_Sekolah\\_Tinggi\\_Teknologi\\_Nuklir\\_Badan\\_Tenaga\\_Nuklir\\_Nasional](http://www.academia.edu/15158283/ANALISIS_DAYA_DAN_TORSI_PADA_MOTOR_INDUKSI_SU_YAMTO_Sekolah_Tinggi_Teknologi_Nuklir_Badan_Tenaga_Nuklir_Nasional)  
<sup>7</sup>FITZGERALD.A.E, Mesin –mesin listrik, Erlangga, Edisi ke empat, Jakarta, 1992. Hal 39-40



## 2.8 Efisiensi Motor Induksi 3 Fasa

Perhitungan efisiensi motor induksi melibatkan rugi-rugi yang terjadi pada stator dan rotor. Rugi-rugi stator terdiri atas rugi-rugi hysteresis, rugi-rugi eddy current, rugi-rugi inti dan rugi-rugi tembaga pada kumparan stator.

Efisiensi motor adalah perbandingan antara daya keluaran motor induksi dengan daya masukan motor induksi, yaitu dilihat pada persamaan (2.6) sebagai berikut:

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.14)$$

Dimana :

$P_{out}$  = Daya output motor induksi

$P_{in}$  = Daya input motor induksi

$$P_{in} = P_{out} + P_{rugi-rugi} \dots \dots \dots (2.15)$$

$$P_{rugi-rugi} = P_{in} - P_{out} \dots \dots \dots (2.16)$$

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \dots \dots \dots (2.17)$$

$$P_{out} = \frac{T \cdot n}{9,55} \dots \dots \dots (2.18)$$

Dimana :

V = Tegangan

I = Arus

$\cos \phi$  = Faktor Daya.

$P_{out}$  = Daya keluaran motor induksi

$P_{rugi-rugi}$  = Rugi-rugi daya pada motor induksi

T = Torsi Motor

n = Kecepatan Motor induksi

9,55 = Konstanta



## **2.9 Gangguan-Gangguan Pada Motor Induksi**

Jenis –jenis gangguan yang sering terjadi pada motor induksi yaitu :

### **2.9.1 Gangguan fisik dari lingkungan sekelilingnya**

- a. Pasir
- b. Air
- c. Gas
- d. Debu dll.

### **2.9.2 Gangguan mekanis**

- a. Pelumasan bantal-bantal motor tidak sempurna.
- b. Pemeliharaan motor yang kurang baik.
- c. Pemasangan instalasi yang tidak teliti.
- d. Pemakaian bagian perlengkapan motor yang tidak sesuai.
- e. Pembebanan mekanis yang digerakkan lebih besar dari kemampuan motor.

### **2.9.3 Gangguan beban lebih**

Gangguan ini di sebabkan oleh besarnya beban yang ditanggung motor melebihi kapasitasnya. Akibatnya arus yang lebih besar yang menimbulkan panas sehingga dapat merusak isolasi pada motor.

### **2.9.4 Gangguan tegangan turun**

Turunnya tegangan jala-jala akan mengurangi momen dari motor listrik, sebab momen sebanding dengan kuadrat tegangan. Karena momen beban konstan, maka slip motor bertambah besar, hal ini akan mengakibatkan lebih banyak tenaga reaktif yang diserap motor, sehingga arus yang di perlukan motor juga semakin besar. Untuk itu diperlukan penstabilan tegangan.



### 2.9.5 Gangguan hubung singkat

Biasanya terjadi oleh beberapa sebab yaitu :

- a. Gangguan hubung singkat pada antara fasa, dapat terjadi pada kabel penghubung jala-jala dengan motor, atau pada ujung kabel dan pada kumparan-kumparan motor (Ground).
- b. Gangguan antara masing - masing lilitan pada salah satu kumparan stator, hal ini akan mengganggu keseimbangan motor dan arus yang mengalir pada kumparan yang bersangkutan akan menjadi lebih besar. Dalam suatu sistem kelistrikan mustahil untuk mendapatkan kondisi sistem yang sempurna. Oleh karena itu, diperlukan suatu alat proteksi untuk melindungi sistem atau meminimalkan gangguan tersebut.

### 2.10 Pengaturan Putaran Motor Induksi<sup>8</sup>

Motor induksi pada umumnya berputar dengan kecepatan konstan mendekati kecepatan sinkronnya. Meskipun demikian pada penggunaan tertentu dikehendaki juga adanya pengaturan putaran. Pengaturan putaran motor induksi memerlukan biaya yang tinggi. Biasanya pengaturan ini dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu :

#### 2.10.1 Pengubahan jumlah kutub

Kecepatan putar motor induksi ditentukan oleh frekuensi masukan dan jumlah kutub motor seperti yang dijelaskan dengan rumus :

$$n_s = \frac{120.f}{p} \dots\dots\dots (2.19)$$

<sup>8</sup> Zuhail. 1991. Dasar Tenaga Listrik. ITB, Bandung. Hal : 84



Dimana :

$n_s$  = Kecepatan medan putar motor(rpm)

$f$  = Frekuensi (Hz)

$p$  = Jumlah kutub

Dari rumus diatas dapat disimpulkan bahwa perubahan jumlah kutub dan frekuensi akan mempengaruhi putaran motor. Jumlah kutub dapat diubah dengan merencanakan kumparan stator sedemikian rupa sehingga dapat menerima tegangan masuk pada posisi kumparan yang berbeda-beda. Biasanya diperoleh dua perubahan kecepatan sinkron dengan mengubah jumlah kutub dari 2 menjadi 4, seperti terlihat pada gambar

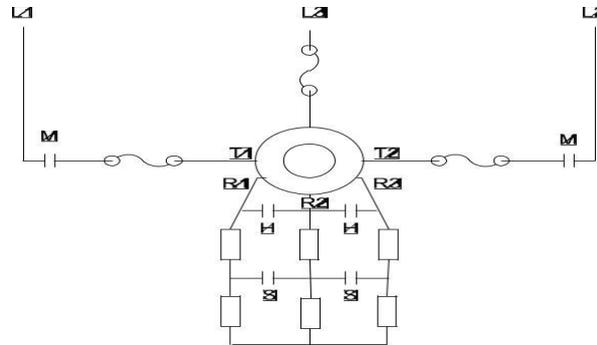
### **2.10.2 Pengubahan tegangan sumber**

Persamaan torsi motor induksi tiga fasa sebanding dengan kuadrat tegangan yang diberikan. Pengubahan tegangan untuk pengendalian kecepatan akan diikuti dengan pengubahan torsi motor. Pengaturan putaran motor induksi tiga fasa dengan cara mengatur tegangan sumber mempunyai daerah kerja yang lebih luas.

### **2.10.3 Pengaturan tahanan luar**

Rotor motor dikonstruksi dengan lilitan yang dibawa keluar dari motor slip ring pada poros motor. Lilitan tersebut dihubungkan pada pengontrol yang menempatkan tahanan variabel seri dengan lilitan. Dengan mengubah jumlah tahanan luar yang dihubungkan pada rangkaian rotor, kecepatan motor lilit yang paling umum dengan rentang 300 hp atau lebih.

Akselerasi sekunder (S dan H), yang mengontrol kecepatan. Ketika bekerja pada kecepatan rendah, kontaktor S dan H keduanya membuka dan tahanan penuh diselipkan pada rangkaian kedua motor.



Gambar 2.8 Pengontrol kecepatan dari motor induksi rotor lilit yang menggunakan tahanan

Keterangan :

R : Hambatan

H : Saklar H

S : Saklar S

M : Pengasut magnetis

L1-L2-L3 : lilitan r, s, t

Apabila kontaktor S menutup, bagian dari tahanan total padarangkaian diparalel, akibatnya kecepatan bertambah. Apabila kontaktor H menutup, maka semua tahanan pada rangkaian sekunder motor di bypass, jadi motor berputar pada kecepatan maksimum. Kelemahan penggunaan tahanan pada kontrol kecepatan pada motor induksi rotor lilit adalah banyak panas yang didisipasi pada tahanan, karena itu efisiensinya rendah. Pengaturan kecepatan juga jelek, karena untuk tahanan tertentu kecepatan berubah sangat menyolok jika beban mekanis berubah.

Kecepatan putar motor induksi tiga fasa dapat dirubah dengan menambahkan tahanan luar. Dengan mengatur tahanan luar akan terjadi



perubahan kecepatan. Pengaturan tahanan luar hanya dapat dilakukan untuk motor induksi jenis rotor lilit.

### 2.11 Stacker/Reclaimer (S/R)

*Stacker/Reclaimer* adalah peralatan yang berfungsi ganda yaitu dapat menimbun batubara di *stockpile* dan mengambil batubara dari *stockpile* menggunakan *Bucket Wheel* yang dikirim TLS melalui belt conveyor.



Gambar 2.9 Stacker reclaimer

Ada beberapa macam mekanisme S/R dalam mengangkat batubara yaitu:

- a) Operasi *stacking*, yaitu batubara diangkut oleh conveyor *coal* (CC) yaitu pada CC10 dan diterima oleh S/R dan selanjutnya ditimbun di stockpile.
- b) Operasi *reclaiming*, yaitu *stacker/reclaimer* akan mengambil kembali batubara yang ditimbun di stockpile dan kemudian disalurkan ke TLS melalui CC11 dan CC12.
- c) Operasi *By-pass*, yaitu batubara dan *coal* conveyor langsung disalurkan ke TLS tanpa singgah distockpile.
- d) Operasi Gabungan, merupakan gabungan operasi *by-pass* dan operasi *reclaiming*.

*Stacker/reclaimer* merupakan sebuah sistem dari beberapa bagian yang kompleks yang bekerja sistematis saat bekerja bagian-bagian tersebut pada



*Stacker/reclaimer* digerakan dengan penggerak berupa motor listrik sesuai dengan fungsi yang digunakan pada bagian tersebut. Berikut adalah motor listrik pada *stacker reclaimer*

### **2.11.1 Motor penggerak *stacker reclaimer***

*Stacker/reclaimer* merupakan sebuah sistem dari beberapa bagian yang kompleks yang bekerja sistematis saat bekerja bagian-bagian tersebut pada *Stacker/Reclaimer* digerakan dengan penggerak berupa motor listrik sesuai dengan fungsi yang digunakan pada bagian tersebut. Berikut adalah motor listrik pada *Stacker reclaimer*:

#### **1) Motor *travel***

Motor *travel* merupakan motor untuk menggerakkan *stacker Reclaimer* maju dan mundur disepanjang rel. Motor ini dilengkapi alat penunjang seperti gear box dan motor break. *Gear box* digunakan mentransmisi putaran dari motor listrik keroda besi dan motor *break* difungsikan sebagai pengeraman dinamis motor. Selain itu untuk mengurangi aus pada *gear box* dilengkapi juga motor *Oil Pump* yang akan memompa minyak sebagai pelumas.

Motor ini terdapat dibagian bawah *Stacker reclaimer* yang dituntut untuk bergerak halus agar mengurangi getaran dibagian atas. Selain itu untuk meringankan beban dipasang total 14 buah motor yang dibagi dalam dua sisi penggerak, sisi penggerak kanan dan kiri dengan dilengkapi *gear box* dan motor *break* pada masing-masing motor.

Pengerakan *stacker reclaimer* maju mundur sebenarnya hanya memanfaatkan motor *travel* untuk berputar kanan atau kiri. Untuk dapat berputar kanan juga kekiri ini diatur dengan menggunakan 2 kontaktor magnet secara bergantian. Pada kontak utama dan kontaktor magnet



tegangan yang masuk pada motor dirubah dengan merubah polaritas motor ini sehingga dapat merubah putaran. Berikut spesifikasi dari motor *travel* :

Tabel 2.1 Spesifikasi Motor *Travel*

Unit	Daya (KW)	Tegangan (VDC)	Putaran (Rpm)	Arus (A)
<i>Travel</i>	8	55-230	100-200	40.5-78

## 2) Motor penggerak *slewing*

Motor *Slewing* merupakan salah satu motor pada *Stacker Reclaimer* yang difungsikan untuk menggerakkan *Bucket Wheel* kekiri dan kekanan. Motor ini terdapat dibagian tengah atau poros gerak *Stecker Reclaimer*. Sama halnya dengan motor *travel* dibagian ini juga di tuntut untuk bergerak halus agar mengurangi gerakan amplitudo dibagian *bucket wheel* dan *belt conveyor 1*, sehingga dipasang motor dipasang motor *slewing* yang termasuk motor DC yang diharapkan mengurangi timbulnya getaran.

Terdapat dua motor penggerak *slewing* yang bekerja saling membantu yaitu pada sisi sebelah kanan dan kiri hal ini dimaksudkan untuk meringankan kerja motor. Selain itu semua motor juga dilengkapi *gear box* dan motor *break*. *Gear box* sebagai transmisi gerak dan motor *break* sebagai pengereman dinamis motor.

Pada bagian ini pengeraman menjadi hal yang penting karena gerakan *slewing Stacker Reclaimer* akan menimbulkan ayunan yang cukup besar. Sehingga mekanisme pengeraman menggunakan motor *break*, yaitu saat motor *slewing* sedang bekerja motor *brake* akan pada posisi terbuka, Namun, pada saat motor *slewing* mulai berhenti motor *brake* akan sedikit terlambat mengerem guna mengimbangi sisa momentum lengan ayun. Berikut spesifikasi dari motor *slewing* :

Tabel 2.2 Spesifikasi Motor *Slewing*

Unit	Daya (KW)	Tegangan (VDC)	Putaran (Rpm)	Arus (A)
<i>Slewing</i>	133	104-406	100-200	32-62

### 3) Motor penggerak hoist

Motor *hoist* merupakan motor yang difungsikan untuk menggerakkan roda singkup serta *conveyor* arah naik dan turun. Arah ini digunakan roda singkup saat proses *stacking* untuk mengambil material batubara dari atas hingga dasar tumpukan mengambil batubara dari atas hingga dasar tumpukan. Sistem pada penggerak naik turun ini menggunakan sistem hidrolis yang dipompa oleh motor listrik arus bolak-balik tiga fasa. Motor ini juga dilengkapi motor *break* yang juga difungsikan sebagai pengeraman dinamis. Berikut *spesifikasi* motor hoist pada alat *Stacker Reclaimer*:

Tabel 2.3 Spesifikasi Motor *Hoist*

Unit	Daya (KW)	Tegangan (VAC)	Putaran (Rpm)	Arus (A)
<i>Hoist</i>	45	500	990	-

### 4) Motor penggerak conveyor 1 dan 2

Conveyor atau roda berjalan merupakan bagian yang digunakan untuk pengangkut material. Pada saat *Stacker Reclaimer conveyor* difungsikan untuk mengangkut material batubara saat proses *stack* maupun *reclaim*. Proses *stacking* yaitu keadaan dimana *stacker* mengambil material batubara menggunakan roda bucket dari *stockpile* menggunakan conveyor menuju langsung *Train Loading Station (TLS)*. Kemudian proses *reclaim*



yaitu keadaan stacker menyalurkan material batubara dari lokasi Tambang Air Laya (TAL) melalui *conveyor* ke *stockpile* (tempat penyimpanan sementara material batubara). Dalam *Stacker Reclaimer* terdapat 2 *conveyor* yang masing-masing digunakan dengan motor listrik :

**a. Motor penggerak conveyor 1**

Conveyor 1 merupakan tahap lanjutan serta penghubung langsung dari Roda *Bucket*. Saat Roda *Bucket* bekerja mengeruk material batubara kemudian material akan diumpun ke *Conveyor* 1 dan berlanjut ketahap berikutnya. Saat sebelum Roda *Bucket* mulai bekerja *Conveyor* 1 terlebih dahulu akan bekerja. Hal ini dikarenakan adanya fungsi *interlock* antar tahapan sehingga tidak akan terjadi penumpukan material batubara.

Motor penggerak pada *Conveyor* ini merupakan motor AC dengan tegangan 500 KV dan termasuk motor induksi *Asynkron*. Motor jenis ini digunakan untuk mendapatkan tenaga maksimal pada proses pengiriman material batubara.

**b. Motor penggerak conveyor 2**

Motor penggerak *conveyor* 2 ini termasuk motor AC dengan daya 500 KV. Berikut ini adalah spesifikasi motor *conveyor* 1 dan 2 pada *Stacker Reclaimer*

Tabel 2.4 Spesifikasi Motor Canveyor 1 dan 2

Unit	Daya (KW)	Tegangan (VAC)	Putaran (Rpm)	Arus (A)
Conveyor	380	500	983	375



### 5) Motor penggerak *bucket wheel*

Motor *Bucket wheel* digunakan untuk meggerakan Roda Singkup pada *Stacker Reclaimer*. Motor ini termasuk motor AC 3 fasa berjenis induksi atau asynkron dengan motor slipring. Dalam pengaturan arus motor ini menggunakan *Variable Resistor*.

Fluktuasi beban pada saat Roda Singkup mengambil material batubara diatasi dengan gigi transmisi dua tingkat. Hal ini dapat membantu meningkatkan torsi bagi Roda Singkup untuk mekerja optimal. Dengan demikian putaran motor akan tetap konstan dengan torsi yang dapat ditingkatkan.

Motor penggerak roda singkup juga dilengkapi dengan motor pengerem ketika motor roda singkup akan dihentikan. Motor tersebut lazim disebut motor *Brake Thrustor* . Motor ini akan mengerem motor pada singkup ketika berhenti beroperasi dan akan membuka rem ketika motor roda singkup akan beroperasi kembali. Secara fisik motor *Brake Thrustor*. Selain dilengkapi dengan motor *Brake Thrustor* sebagai alat pengerem, roda singkup juga dilengkapi dengan motor *oil pump*, yang digunakan untuk memompa minyak pelumas yang akan melumasi gear box (gigi transmisi) agar tidak mudah aus. Berikut adalah spesifikasi *Motor Bucket* pada *Stacker Reclaimer*.

Tabel 2.5 Spesifikasi Motor *Bucket Wheel*

Unit	Daya (KW)	Tegangan (VAC)	Putaran (RPM)	Arus (A)
<i>Bucket Wheel</i>	160	500	990	225



### 6) Motor *cable rell* ( penggulung kabel )

Pada *stacker* motor ini difungsikan untuk mengulang dan mengulur kabel kontrol juga *power* disepanjang *rell*. Proses penggulungan terjadi jika *stacker* bergerak maju dan penguluran terjadi jika *stacker* bergerak mundur.

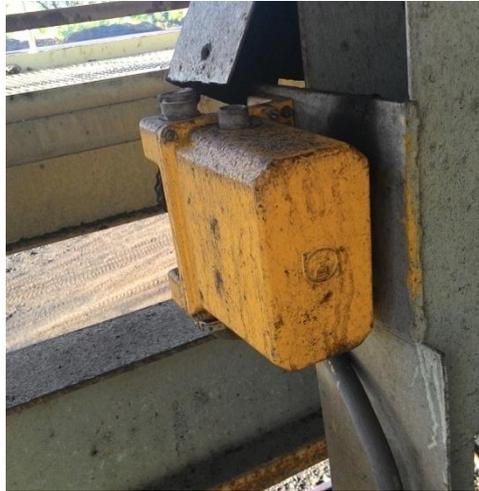
### 7) Motor pengereman *eldro*

Motor *eldro* difungsikan sebagai pengereman dinamis pada motor penggerak pada *Stacker Reclaimer*. Motor ini terpasang di bagian luar pada setiap motor dan dilengkapi bantalan sebagai pengeraman motor. Motor *Eldro* ini merupakan pengabungan motor listrik dengan sistem *hydraulic*. Pada saat motor bekerja maka pompa atau kipas akan mendorong oli akan menggerakkan piston dan membuat bantal rem mengampit as motor sehingga akan menghentikan putaran motor.

Mesin ini merupakan salah satu bagian penting dari motor penggerak. Pada saat motor penggerak *standby* motor *eldro* memompa kedalam menggerakkan piston keluar lalu mengampit bantalan dan saat kembali bekerja motor *eldro* tetap mengompa oli namun kearah keluar piston sehingga bantalan rem akan merenggang dan motor penggerak dapat berkerja

## 2.12 *Camshaft Switch*

Dalam pengendalian kuat dan lemahnya kecepatan motor dalam menggulung kabel digunakan saklar yang bernama *CamShaft Switch*. *Camshaft Switch* juga salah satu jenis pengaman yang terdapat di konstruksi *Cable Reel*. *Camshaft Switch* ini terletak dibagian bawah dari *Cable Reel*. Konstruksi *Camshaft Switch* terdiri dari kontak NO dan NC, dan juga berupa seperti gear yang berfungsi sebagai saklar pemilih yg berguna untuk pengaturan kontaktor tahanan rotor pada saat *Cable Reel* beroperasi.



Gambar 2.10 Camshaft switch

### 2.12.1 Fungsi *camshaft switch* ini ada dua fungsi, yaitu :

#### 1. Sebagai pengaman apabila terjadi slake atau tight

##### a. *Slake* (kabel kendur)

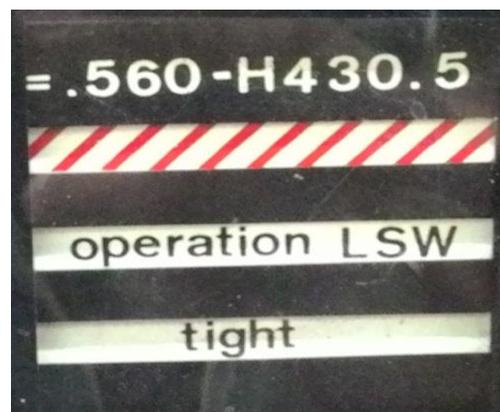
Adalah suatu peristiwa dimana pada saat *Cable Reel* sedang beroperasi, kecepatan motor terlalu lemah sehingga membuat kabel terlalu kendur. Jika hal itu terjadi maka kontak NC pada Camshaft Switch akan secara otomatis berubah menjadi NO, sehingga membuat kontrol sistem pada *Cable Reel* jatuh/mati.

Gambar 2.11 Indikasi gangguan *slake*



b. *Tight* (kabel kencang)

Peristiwa ini berbanding terbalik dengan *Slake*, dimana pada saat *Cable Reel* sedang beroperasi, kecepatan motor untuk menggulung kabel sangat kuat sehingga membuat kabel terlalu kencang. Jika hal itu terjadi maka kontak NC pada *Camshaft Switch* akan secara otomatis berubah menjadi NO, sehingga membuat kontrol sistem pada *Cable Reel* jatuh/mati.



Gambar 2.12 Indikasi gangguan *tight*

- K25 – 7.5 ohm ..... posisi 1
- K24 – 9 ohm ..... posisi 2
- K23 – 12 ohm ..... posisi 3
- K22 – 15 ohm ..... posisi 4
- K21 – 18 ohm ..... posisi 5



Gambar 2.13 Kontaktor rotor k21- k25.

Saklar ini mempunyai 5 posisi yang dipicu dari pergerakan kabel. Posisi 1 akan mengendalikan kontaktor dengan kode K25 yang mempunyai nilai resistansi rendah dimana torsi motor lebih kecil dibandingkan kuat tarik kabel. Sehingga seolah motor membalik putaran dan menggulur kabel. Posisi 2 dan seterusnya akan dikendalikan dengan kontaktor masing-masing dengan nilai resistansi semakin besar dan kecepatan yang menyesuaikan sehingga posisi 5 dengan resistansi paling besar. Saat nilai resistansi paling tinggi motor akan menggulung kabel dengan kecepatan maksimal.

Biasanya hal diatas terjadi dikarenakan pergerakan motor *cable reel* dan motor *travel* tidak sinkron. Pada saat salah satu dari kedua peristiwa tersebut terjadi, peran *Camshaft Switch* sangatlah penting, karena apabila kontrol sistem pada *Cable Reel* tidak jatuh/mati, itu bisa membuat kabel penggulung putus apabila terjadi tight, dan kabel akan jatuh berantakan atau kusut apabila terjadi *slake*, hal itu sangat berbahaya.



2. Sebagai pengatur kontaktor tahanan rotor

Pada motor *slipring cable reel* terdapat 5 buah tahanan yg terhubung seri menuju terminal coal brush pada rotor nya. Ke 5 tahanan tersebut diatur oleh 5 kontaktor