



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi Tiga Fasa

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

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

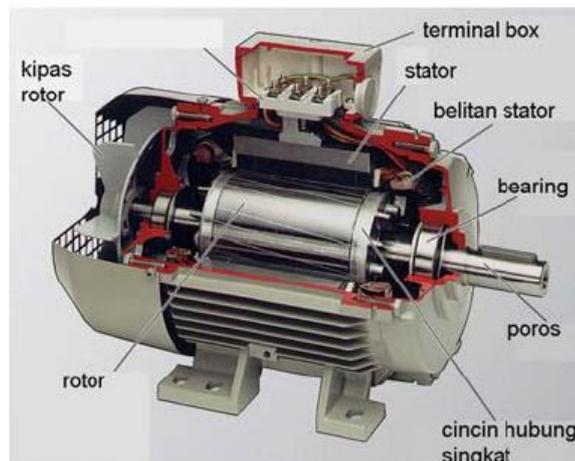
1. Bentuknya yang sederhana dan memiliki konstruksi yang kuat dan hampir tidak pernah mengalami kerusakan yang berarti.
2. Harga relatif murah dan dapat diandalkan.
3. Efisiensi tinggi pada keadaan berputar normal, tidak memerlukan sikat sehingga rugi – rugi daya yang diakibatkannya dari gesekan dapat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

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

1. Pengaturan kecepatan dari motor induksi sangat mempengaruhi efisiensinya.
2. Kecepatan motor induksi akan menurun seiring dengan bertambahnya beban, tidak seperti motor DC atau motor shunt.
3. Kopel awal mutunya rendah dibandingkan dengan motor DC shunt.



Untuk mengenal lebih lanjut tentang motor induksi tiga fasa, dibawah ini adalah salah satu contoh gambar konstruksi dasar motor induksi tiga fasa.



Gambar 2.1 Konstruksi Dasar Motor Induksi Tiga Fasa^[7]

2.1.1 Klasifikasi Motor Listrik AC^[5]

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

A. Berdasarkan Prinsip Kerja

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

B. Berdasarkan Macam Arus

1. Fasa tunggal

^[5] Rijono, Yon, Drs. 1997. Dasar Teknik Tenaga Listrik. Andi, Yogyakarta. Hal:309

^[7] Siswoyo. 2008. Teknik Listrik INDUSTRI. Direktorat Pembinaan Menengah Kejuruan, Jakarta. Hal:5-7



2. Tiga fasa

C. Berdasarkan Kecepatan

1. Kecepatan konstan
2. Kecepatan berubah
3. Kecepatan diatur

2.1.2 Konstruksi Motor Induksi^[5]

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

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

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

^[5] Rijono, Yon, Drs. 1997. Dasar Teknik Tenaga Listrik. Andi, Yogyakarta. Hal:311



stator mesin tak serempak akan dapat bekerja dengan baik.

A. Stator (bagian motor yang diam) ^[4]

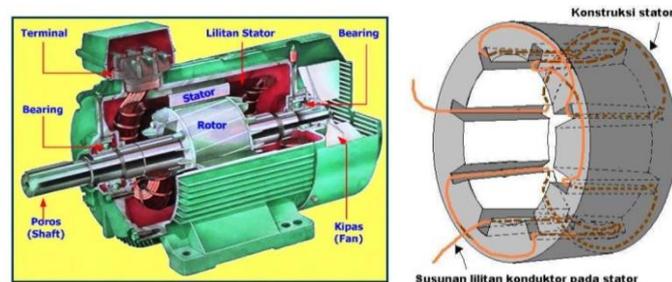
Pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga kumparan tiga fasa yang disebut kumparan stator, yang masing – masing kumparan mendapatkan suplai arus tiga fasa. Stator terdiri dari pelat – pelat besi yang disusun sama besar dengan rotor dan pada bagian dalam mempunyai banyak alur – alur yang diberi kumparan kawat tembaga yang berisolasi. Jika kumparan stator mendapatkan suplai arus tiga fasa maka pada kumparan tersebut akan timbul flux magnet putar. Karena adanya flux magnet putar pada kumparan stator, mengakibatkan rotor berputar karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar rotor sinkron dengan kecepatan putar stator.

$$N_s = \frac{120.f}{P} \dots\dots\dots (2.1)^{[10]}$$

Dimana :

- N_s = Kecepatan sinkron (rpm)
- f = Besarnya frekuensi (Hz)
- P = Jumlah kutub

Untuk mengetahui dan memahami konstruksi stator lebih lanjut dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.2 Kontruksi Stator Mesin Induksi

(sumber : <http://blogs.itb.ac.id/el2244k0112211017ryanadiputra/2013/05/01/>)

^[4] Lesmana, Indra.2009. Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa yang digunakan Sebagai Pompa untuk Sistem Sirkulasi Pendingin Generator Turbin Gas di PT.Pertamina RU III Plaju. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal:8

^[10] Zuhail dan Zhanggishan. 2004. Prinsip Dasar ELEKTROTEKNIK. Gramedia, Jakarta. Hal:687



machines-and-switchgears/)

B. Rotor (bagian motor yang bergerak)^[4]

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

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

Arahnya melawan fluksi yang mengimbas, dalam hal ini arus rotor itu ditimbulkan karena adanya perbedaan kecepatan yang berada diantara fluksi atau medan putar stator dengan penghantar yang diam. Rotor akan berputar dalam arah yang sama dengan arah medan putar stator, untuk mengurangi beda kecepatan diatas.

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \dots\dots\dots (2.2)^{[9]}$$

Dimana :

$$s = \text{slip}$$

$$N_s = \text{Kecepatan sinkron (rpm) medan stator}$$

$$N_r = \text{Kecepatan sinkron (rpm) medan rotor}$$

1. Motor rotor sangkar^[10]

Motor rotor sangkar konstruksinya sangat sederhana, yang mana rotor dari motor sangkar adalah konstruksi dari inti berlapis dengan konduktor dipasangkan paralel, atau kira – kira paralel dengan poros yang mengelilingi permukaan inti. Konduktornya tidak terisolasi dari inti, karena arus rotor secara alamiah akan

^[4] Lesmana, Indra.2009. Effisiensi Motor Induksi Tiga Fasa yang digunakan Sebagai Pompa untuk Sistem Sirkulasi Pendingin Generator Turbin Gas di PT.Pertamina RU III Plaju. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal:11

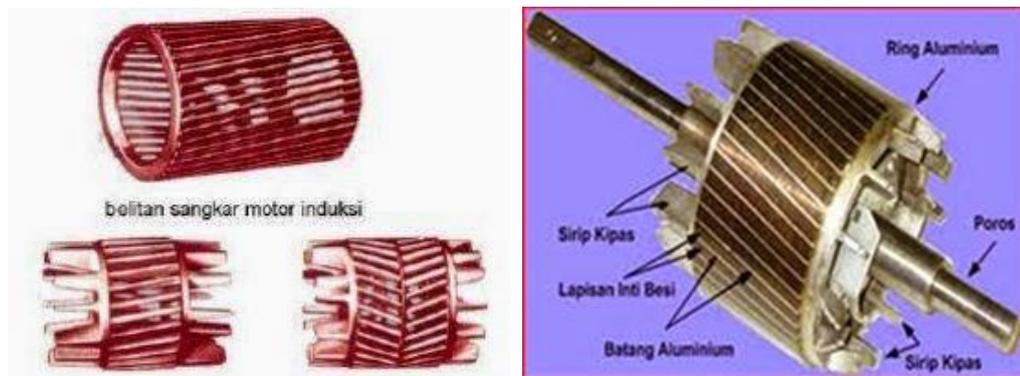
^[9] Sumanto, M.A. Drs.1993.Motor Listrik Arus Bolak-Balik.Andi Offset, Yogyakarta. Hal:43

^[10] Zuhail dan Zhanggischan. 2004. Prinsip Dasar ELEKTROTEKNIK. Gramedia, Jakarta. Hal:701



mengalir melalui tahanan yang paling kecil konduktor rotor. Pada setiap ujung rotor, konduktor rotor semuanya dihubung singkatkan dengan cincin ujung. Batang rotor dan cincin ujung sangka yang lebih kecil adalah coran tembaga atau almunium dalam satu lempeng pada inti rotor. Dalam motor yang lebih besar, batang rotor tidak dicor melainkan dibenamkan kedalam alur kemudian dilas ditempatkan paralel terhadap poros motor tetapi kerap kali dimiringkan. Hal ini menghasilkan torsi yang lebih seragam dan juga mengurangi derau dengung magnetik sewaktu motor sedang jalan.

Berikut ini adalah gambar penampang potongan motor induksi rotor sangkar.



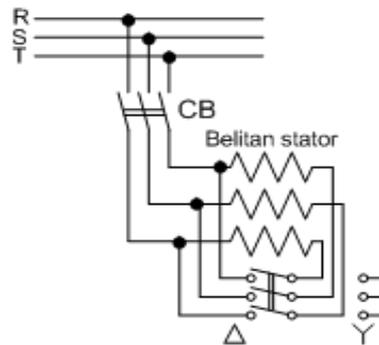
Gambar 2.3 Penampang Potongan Motor Induksi Rotor Sangkar

(Sumber : http://agusbudiana1.blogspot.co.id/2014/05/motor-listrik_4.html)

Motor induksi jenis ini mempunyai rotor dengan kumparan yang terdiri dari beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa sehingga menyerupai sangkar tupai yang terlihat pada gambar dibawah ini, konstruksi rotor seperti ini sangat sederhana bila dibandingkan dengan rotor jenis mesin listrik lainnya.

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

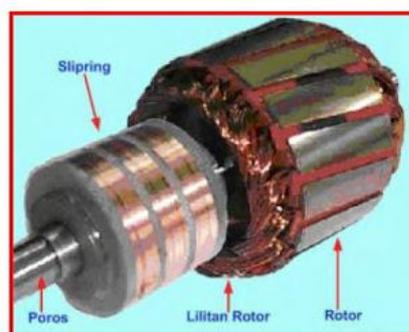
Untuk membatasi arus mula yang besar, tegangan sumber harus dikurangi dan biasanya digunakan oto transformator atau saklar Y – D (seperti pada gambar dibawah ini). Tetapi berkurangnya arus akan berakibat berkurangnya kopel mula, untuk mengatasi hal ini dapat digunakan rotor jenis sangkar ganda.



Gambar 2.4 Rangkaian Rotor Sangkar^[4]

2. Motor rotor Lilit

Motor rotor lilit atau motor cincin slip berbeda dengan motor rotor sangkar dalam konstruksi rotornya. Seperti namanya rotor dililit dengan lilitan terisolasi serupa dengan lilitan stator. Lilitan fasa rotor dihubungkan secara Y dengan poros motor. Ketiga cincin slip yang terpasang pada cincin slip dan sikat – sikat dapat dilihat berada disebelah kiri lilitan rotor. Lilitan rotor tidak dihubungkan ke pencatu. Cincin slip dan sikat semata – mata merupakan penghubung tahanan kendali variabel luar ke dalam rangkain motor. Motor rotor lilit kurang banyak diwarnakan dikandingkan dengan motor rotor sangkar karena harganya mahal dan biaya pemeliharaan lebih besar. Untuk mengetahui bagaimana bentuk rotor lilit dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 2.5 Penampang Potongan Motor Induksi Rotor Lilit

^[4] Lesmana, Indra.2009. Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa yang digunakan Sebagai Pompa untuk Sistem Sirkulasi Pendingin Generator Turbin Gas di PT.Pertamina RU III Plaju. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal:13



(sumber : <http://elektrikbank.blogspot.co.id/2013/05/motor-induksi-tiga-fasa.html>)

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

- Komutator

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

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

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

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

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

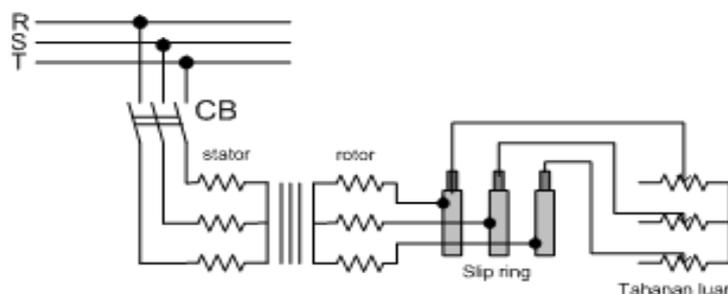
Kelas B : serat asbes, serat gelas.

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

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



penambahan tahanan luar.



Gambar 2.6 Rangkaian Rotor Lilit ^[10]

2.1.3 Beda Motor Induksi Rotor Sangkar Dengan Rotor Lilit

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

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

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

2.1.4 Prinsip Kerja Motor Induksi

^[10]

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

1. Apabila sumber tegangan tiga fasa dipasang pada kumparan stator, timbullah

^[10] Zuhail dan Zhanggishan. 2004. Prinsip Dasar ELEKTROTEKNIK. Gramedia, Jakarta. Hal:690



medan putar dengan kecepatan.

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

$$E_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \Phi \dots\dots\dots (2.3)$$

E_2 = tegangan induksi
 f_2 = frekuensi jala-jala
 N_2 = banyaknya lilitan
 Φ = fluks magnet
4. Karena kumparan rotor merupakan rangkaian yang tertutup, ggl (E) akan menghasilkan arus (I).
5. Adanya arus didalam medan magnet menimbulkan gaya pada motor.
6. Bila kopel mula dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
7. 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).
8. Perbedaan kecepatan antara N_r dan N_s disebut slip (s) dinyatakan dengan :

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.4)$$
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.

2.1.5 Karakteristik Motor Induksi^[3]

Secara umum motor induksi yang baik mempunyai standar bentuk karakteristik tertentu. Tiap - tiap motor mempunyai karakteristik sendiri - sendiri.

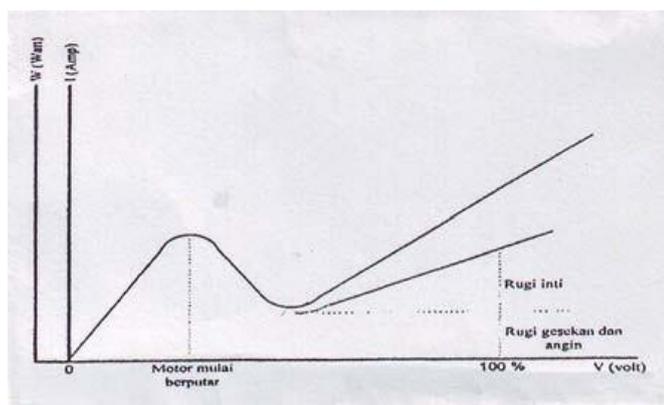
^[3] Gunawan. 2008. Efisiensi Motor 3 Fasa pada Mesin Threshing di PT.Musi Banyuasin Indah. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal:14



Dibawah ini disebutkan beberapa karakteristik yang menggambarkan hubungan antara suatu parameter dan mesin yang lain, yaitu :

A. Karakteristik Beban Nol^[3]

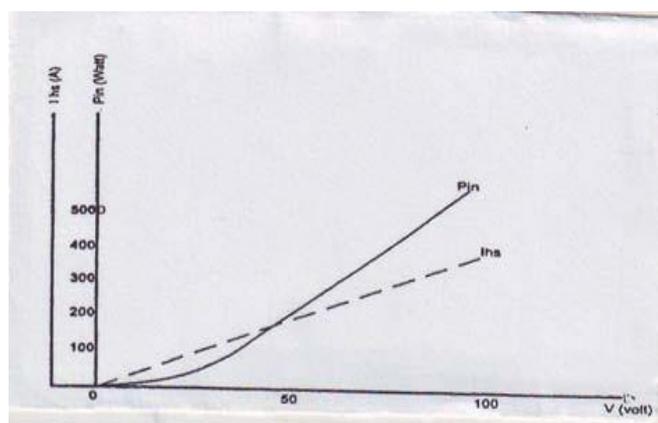
Karakteristik beban nol adalah karakteristik yang menggambarkan hubungan antara tegangan ke motor dengan arus daya $\cos \phi$ motor pada keadaan tanpa beban, jadi putaran mendekati sinkron atau sama.



Gambar 2.7 Karakteristik Beban Nol

B. Karakteristik Rotor yang diblok

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



Gambar 2.8 Karakteristik Rotor yang Diblok

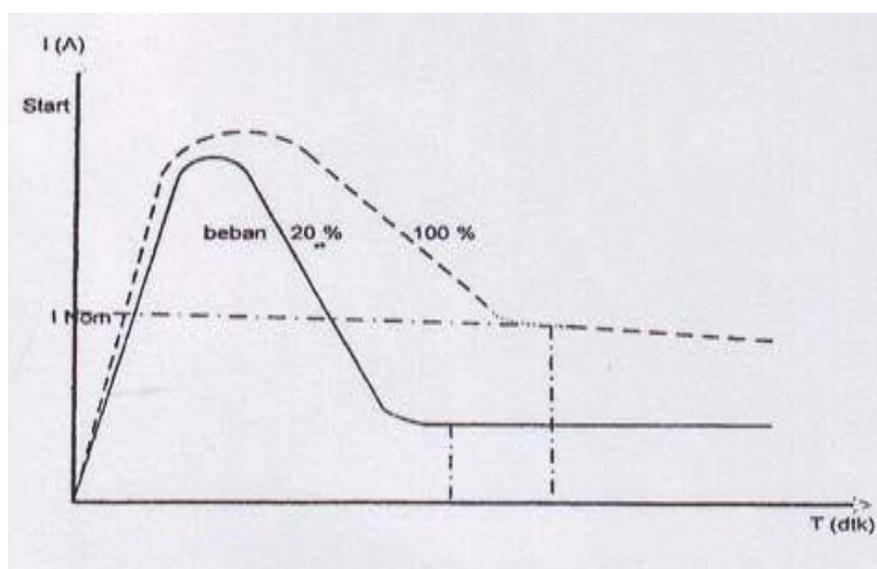
^[3] Gunawan. 2008. Effisiensi Motor 3 Fasa pada Mesin Threshing di PT.Musi Banyuasin Indah. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal:14



C. Karakteristik Start^[3]

Karakteristik start ini dipakai untuk menggambarkan hubungan antara waktu dan arus. Putaran untuk macam – macam beban pada tegangan masuk konstan. Dari gambar dibawah berikut (Gambar 2.11) 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.

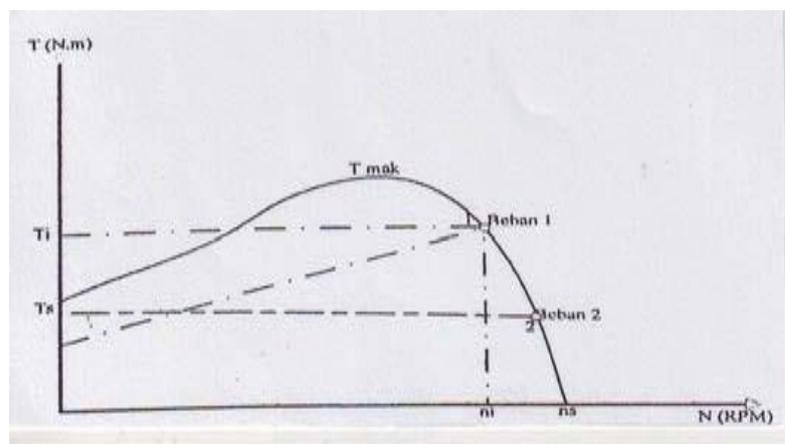


Gambar 2.9 Karakteristik Start

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 terlihat pada gambar 2.12 berikut ini :

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



Gambar 2.10 Karakteristik Kopel dan Putaran ^[3]

2.2 Cara – Cara Menentukan Rugi – Rugi Pada Motor

^[4]

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

^[3] Gunawan. 2008. Effisiensi Motor 3 Fasa pada Mesin Threshing di PT.Musi Banyuasin Indah. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal:14

^[4] Lesmana, Indra.2009. Effisiensi Motor Induksi Tiga Fasa yang digunakan Sebagai Pompa untuk Sistem Sirkulasi Pendingin Generator Turbin Gas di PT.Pertamina RU III Plaju. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal:20



hubung singkat relatif kecil dibandingkan dengan tegangan nominalnya.

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

2.3 Rugi – Rugi pada Motor Induksi

Seperti kita ketahui bahwa 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 :

$$P_{in} = P_{out} + P_{rugi-rugi} \dots\dots\dots (2.5)$$

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 :



$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.6)$$

$$= \frac{P_{\text{in}} - P_{\text{rugi-rugi}}}{P_{\text{in}}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

η : Efisiensi (%)

P_{in} : Total daya yang diterima motor

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

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

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

1. Belitan dalam motor yang dinamakan rugi – rugi listrik (Rugi – rugi belitan).
2. Kerugian daya yang timbul langsung karena putaran motor, yang dinamakan rugi – rugi rotasi.

Rugi – rugi rotasi ini terbagi menjadi dua jenis yaitu :

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

2.3.1. Rugi – Rugi Inti ^[4]

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

^[4] Lesmana, Indra.2009. Effisiensi Motor Induksi Tiga Fasa yang digunakan Sebagai Pompa untuk Sistem Sirkulasi Pendingin Generator Turbin Gas di PT.Pertamina RU III Plaju. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal:22



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

$$P_c = K_c(B_{maks} \cdot f \cdot T)^2 \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana :

T	=	Tebal lapisan
B_{maks}	=	Kerapatan fluks maksimum
f	=	Frekuensi
K_c	=	Ketetapan pembanding

Harga K_c tergantung pada satuan yang digunakan, volume besi dan resistensi vitas besi. Ragam dari rugi – rugi histerisis dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan secara empiris saja.

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

2.3.2. Rugi – rugi Mekanik ^[4]

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

^[4] Lesmana, Indra.2009. Effisiensi Motor Induksi Tiga Fasa yang digunakan Sebagai Pompa untuk Sistem Sirkulasi Pendingin Generator Turbin Gas di PT.Pertamina RU III Plaju. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal:23



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

2.3.3. Rugi – Rugi Belitan^[4]

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^2R yang menunjukkan besarnya daya yang berubah menjadi panas oleh tahanan dari konduktor tembaga atau aluminium. Total kerugian I^2R adalah jumlah dari rugi – rugi I^2R primer (stator) dan rugi – rugi I^2R sekunder (rotor), termasuk rugi –rugi kontak sikat pada motor AC belitan dan motor DC.

Rugi – rugi I^2R dalam belitan sebenarnya tidak hanya tergantung pada arus, tetapi juga pada tahanan belitan di bawah kondisi operasi. Sedang tahanan efektif dari belitan selalu berubah dengan perubahan temperatur, skin effect dan sebagainya. Sangat sulit untuk menentukan nilai yang sebenarnya dari tahanan belitan dibawah kondisi operasi. Kesalahan pengukuran kerugian belitan dapat dimasukkan ke dalam kerugian stray load. Pada umumnya rugi – rugi belitan ini berkisar antara 55 - 60% dari total kerugian motor pada keadaan beban nominal.

2.3.4. Rugi – Rugi Stray Load

Kita telah melihat bahwa beberapa macam kerugian selalu dianggap konstan dari keadaan beban nol hingga beban penuh walaupun kita tahu bahwa rugi – rugi tersebut sebenarnya berubah, secara kecil terhadap beban. Sebagai

^[4] Lesmana, Indra.2009. Effisiensi Motor Induksi Tiga Fasa yang digunakan Sebagai Pompa untuk Sistem Sirkulasi Pendingin Generator Turbin Gas di PT.Pertamina RU III Plaju. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal:23



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

2.4 Pengertian Daya^[2]

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 efektif, daya reaktif dan daya semu yang pengertiannya adalah sebagai berikut :

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

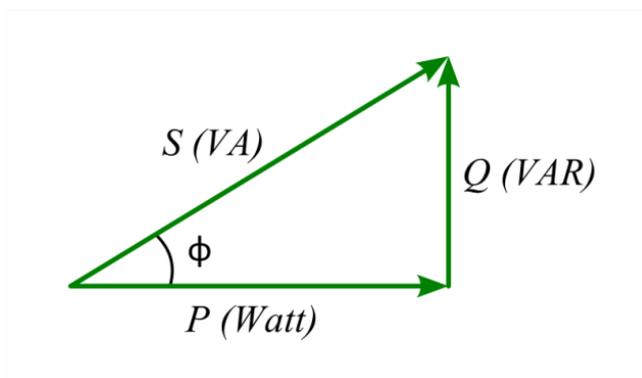
^[2] Cekdin, Cekmas dan Taufik Barlian. 2013. Rangkaian Listrik. Andi Offset, Yogyakarta. Hal:74



memiliki satuan volt ampere (VA).

Perkalian tegangan (V) dengan arus (I^*) dalam kedua besaran ini dalam bentuk bilangan kompleks adalah $V.I^*$ yang dinamakan daya kompleks dengan simbol S, dalam satuan Volt Ampere (VA). Arus (I^*) adalah konjugate dari I.

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



Gambar 2.11 Sistem Segitiga Daya

Dimana

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

$$P = S.\cos \phi = V.I^*.\cos \phi \dots\dots\dots (2.10)$$

$$Q = S.\sin \phi = V.I^*.\sin \phi \dots\dots\dots (2.11)$$

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 :

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

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

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



2.4.1. Sifat – Sifat Beban Listrik^[4]

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

Pada motor induksi terjadi perubahan energi listrik menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran rotor. Pada motor industri daya mekanik yang dihasilkan digunakan untuk berbagai keperluan sesuai dengan yang diinginkan seperti digunakan sebagai penggerak *drive pulley Conveyor Excavating* (CE) 42 di PT. Bukit Asam (Persero), Tbk. Tanjung Enim.

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

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

Atau

$$P_{3\theta} = 3 \cdot P_{1\theta} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$P_{3\theta} = 3 \cdot V_P \cdot I_P \cdot \cos \theta \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana :

$P_{1\theta}$ = Daya aktif satu fasa (W)

$P_{3\theta}$ = Daya aktif tiga fasa (W)

V_P = Tegangan fasa (V)

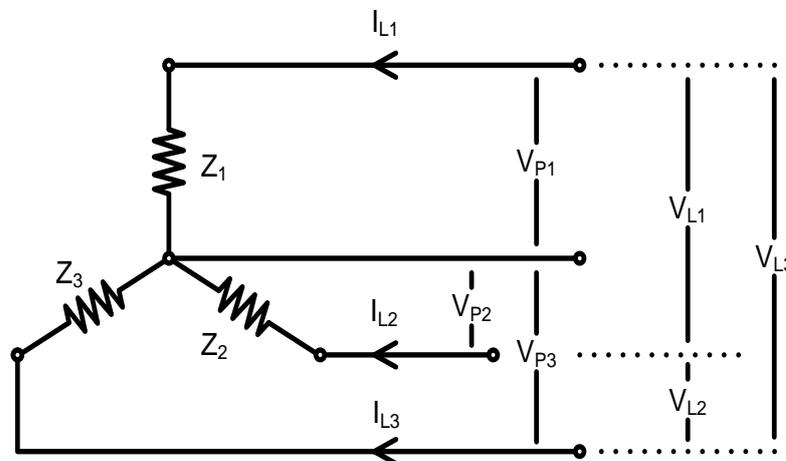
I_P = Arus fasa (V)

$\cos \theta$ = Faktor daya

^[4] Lesmana, Indra.2009. Effisiensi Motor Induksi Tiga Fasa yang digunakan Sebagai Pompa untuk Sistem Sirkulasi Pendingin Generator Turbin Gas di PT.Pertamina RU III Plaju. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang. Hal:26



Rangkaian Hubungan Bintang^[8]



Gambar 2.12 Rangkaian Hubungan Bintang

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

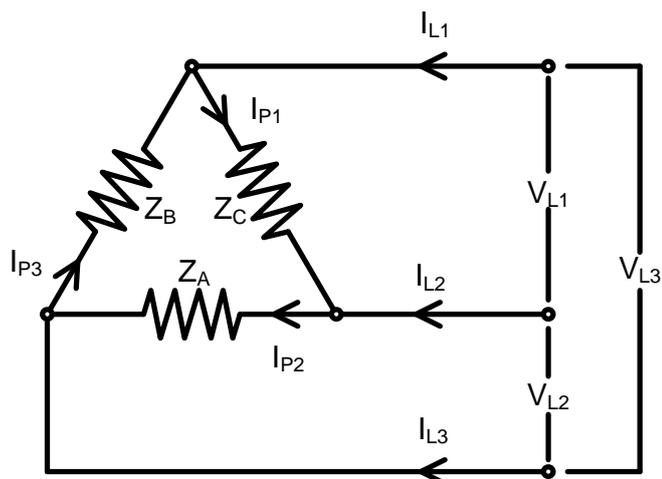
$$I_p = I_L \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana :

V_p = Tegangan fasa (V)

I_p = Arus fasa (V)

Rangkaian Hubungan Segitiga



Gambar 2.13 Rangkaian Hubungan Segitiga

^[8] Sudirham, Sudaryatno. 2012. Analisis Rangkaian Listrik. Jilid-1. Darpublic, Bandung. Hal:124.



$$V_P = V_L \dots\dots\dots (2.18)$$

$$I_P = I_L \cdot \sqrt{3} \dots\dots\dots (2.19)$$

Dimana :

V_P = Tegangan fasa (V)

I_P = Arus fasa (V)

Transformasi Bintang dan Segitiga

Berdasarkan gambar 2.14, rangkaian hubungan segitiga ekuivalen dapat diketahui melalui rangkaian hubungan bintang dan rangkaian hubungan bintang ekuivalen dapat diketahui melalui rangkaian hubungan segitiga melalui persamaan berikut ini :

Ekivalen Segitiga dari Bintang

$$R_A = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}{R_1} \dots\dots\dots (2.20)$$

$$R_B = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}{R_2} \dots\dots\dots (2.21)$$

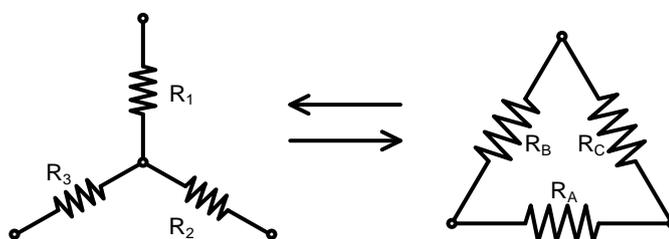
$$R_C = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}{R_3} \dots\dots\dots (2.22)$$

Ekivalen Bintang dari Segitiga

$$R_1 = \frac{R_B R_C}{R_A + R_B + R_C} \dots\dots\dots (2.23)$$

$$R_2 = \frac{R_C R_A}{R_A + R_B + R_C} \dots\dots\dots (2.24)$$

$$R_3 = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B + R_C} \dots\dots\dots (2.25)$$



Gambar 2.14 Rangkaian Transformasi Bintang dan Segitiga^[6]

^[6] Santoso, Djoko dan Rahmadi Heru Setianto. 2009. Teori Dasar Rangkaian Listrik. LaksBang Mediatama, Yogyakarta. Hal:12



2.5 Tahanan Gerak pada *Belt Conveyor* ^[1]

Tahanan gerak didefinisikan sebagai tahanan yang diakibatkan oleh gerakan *belt conveyor* (konveyor sabuk) yang dapat diklasifikasikan dalam 5 kelompok, yaitu :

A. Tahanan utama (F_H)

Tahanan ini adalah tahanan yang disebabkan oleh :

- Gesekan antara bantalan dan penyekat (*seal*) bantalan pada idler *pembawa* (*carry idler*) dan idler balikan (*return idler*).
- Tahanan yang dihasilkan oleh lekukan idler pada sabuk akibat fleksibilitas sabuk dan material.

B. Tahanan kedua (F_N)

Tahanan ini adalah tahanan yang disebabkan oleh :

- Tahanan inersia dan gesekan akibat adanya percepatan material pada titik umpan.
- Tahanan akibat gesekan pada dinding corong pada titik umpan.
- Tahanan pada puli (*pulley*) (kecuali pada puli penggerak)

C. Tahanan khusus utama (F_{S1})

Tahanan ini disebabkan oleh :

- Tahanan akibat permukaan sabuk yang tidak bersentuhan dengan *idler* atau tahanan akibat *idler* gantung.
- Tahanan akibat gesekan pada dinding penahan (*skirt plate*) pada titik umpan, jika dinding penahan hanya mencakup sebagian panjang sabuk.

D. Tahanan khusus kedua (F_{S2})

- Tahanan ini akibat gesekan antara sabuk dan pembersih.
- Tahanan akibat gesekan pada dinding penahan (*skirt plate*) pada titik umpan, jika dinding penahan hanya mencakup sebagian panjang sabuk.
- Tahanan akibat sistem pencurah dengan bajak (*plough*).

^[1] Brodjonegoro, Satriyo Soemantri.2001.*Konveyor Sabuk Dan Peralatan Pendukung Volume 1*. PT. JUNTO Engineering, Bandung. Hal : 7.1



- Tahanan akibat sistem pencurah dengan kereta berjalan (*tripper car*).

E. Tahanan karena kemiringan sabuk (F_{st})

Tahanan yang digunakan untuk menaikkan atau menurunkan material pada *inklinasi belt conveyor* (sabuk konveyor mendaki) dan *deklinasi belt conveyor* (sabuk konveyor menurun).

2.6 Gaya Penggerak dan Daya yang Diperlukan *Belt Conveyor*^[1]

2.6.1 Gaya Keliling yang Diperlukan pada *Drive Pulley*

Gaya Keliling (*peripheral force* (F_U)), yang diperlukan pada *drive pulley* (puli penggerak) perlu dihitung pada kondisi *full load* (beban penuh) dan *empty load* (tanpa beban). Gaya keliling (*peripheral force*(F_U)) pada *drive pulley* (puli penggerak) dari *belt conveyor* (konveyor sabuk) dapat ditentukan dengan menjumlahkan seluruh tahanan yang diuraikan pada 2.6, atau sebagaimana rumus berikut :

$$\begin{aligned} F_U &= F_H + F_N + F_{S1} + F_{S2} + F_{S1} + F_{st} \\ &= C.F_H + F_{S1} + F_{S2} + F_{S1} + F_{st} \dots\dots\dots (2.26) \end{aligned}$$

$$F_H = f \cdot L \cdot g \cdot [q_{RO} + q_{RU} + (2.q_B + q_G) \cos \delta] \dots\dots\dots (2.27)$$

$$F_{st} = q_G \cdot H \cdot g \dots\dots\dots (2.28)$$

$$\begin{aligned} F_U &= C.f.L.g [q_{RO} + q_{RU} + (2.q_B + q_G) \cos \delta] \\ &\quad + q_G \cdot H \cdot g + F_{S2} + F_{S1} \dots\dots\dots (2.29) \end{aligned}$$

$$q_{RO} = \frac{m_{RO}}{s_{RO}} \dots\dots\dots (2.30)$$

$$q_{RU} = \frac{m_{RU}}{s_{RU}} \dots\dots\dots (2.31)$$

$$q_G = \frac{Q_m}{3,6.v} \dots\dots\dots (2.32)$$

^[1] Brodjonegoro Satriyo Soemantri.2001.*Konveyor Sabuk Dan Peralatan Pendukung Volume 1*. PT. JUNTO Engineering, Bandung. Hal : 7.2



Dimana :

- C = koefisien sebagai fungsi dari panjang konveyor sabuk untuk mengakomodasikan tahanan kedua (*diambil dari grafik hubungan C dan L dalam ISO 5048*).
- f = koefisien gesek
- L = jarak horizontal (puli ujung depan ke puli ujung belakang) *belt Conveyor*
- q_{RO} = massa idler pembawa (bagian yang berputar) persatuan panjang (kg/m)
- m_{RO} = massa dari idler pembawa yang berputar (kg)
- s_{RO} = jarak antara idler pembawa (m)
- q_{RU} = massa idler balikan (bagian yang berputar) persatuan panjang (kg/m)
- m_{RU} = massa dari idler balikan yang berputar (kg)
- s_{RU} = jarak antara idler balikan (m)
- q_B = massa sabuk persatuan panjang (kg/m)
- q_G = massa material yang diangkut persatuan panjang (kg/m)
- Q_m = kapasitas angkut (tph)
- v = kecepatan *conveyor* (m/s)
- H = tinggi *head pulley* dari *tail pulley*.
- δ = sudut inklinasi, biasana untuk sudut $<18^\circ$ dianggap = 1

Tabel 2.1 Koefisien sebagai fungsi dari panjang konveyor sabuk

Panjang konveyor (m)	10	20	30	40	50	80	100
Koefisien C	4,4	3,2	2,7	2,4	2,2	1,92	1,78
Panjang konveyor (m)	150	200	300	400	500	600	700
Koefisien C	1,58	1,45	1,31	1,25	1,20	1,17	1,14
Panjang konveyor (m)	800	900	1000	1500	2500	>3000	
Koefisien C	1,12	1,10	1,09	1,06	1,05	1,025	

Sumber : (*diambil dari grafik hubungan C dan L dalam ISO 5048*).



2.6.2 Koefesien Gesek^[1]

Tahanan gesek (f) pada *belt conveyor* (konveyor sabuk) terjadi karena adanya tahanan – tahanan berikut ini terhadap gerakan sabuk :

- Idler yang berputar, akibat adanya gesekan pada sekat-sekat (*seal*) bantalan idler.
- Lendutan sabuk (*belt flexure*)
- Lendutan material (*material flexure*)

Ketiga tahanan diatas terkait langsung dengan massa yang bergerak pada konveyor sabuk, yaitu :

- Massa komponen yang berputar pada idler
- Massa sabuk konveyor
- Massa material yang diangkut

Besarnya tahanan idler yang berputar dipengaruhi oleh ketiga massa yang berputar tersebut diatas. Besarnya tahanan akibat lendutan sabuk dipengaruhi oleh massa konveyor sabuk dan massa material yang diangkut. Sedangkan besarnya tahanan akibat lendutan sabuk dipengaruhi hanya oleh massa material itu sendiri. Akibatnya ada 3 jenis koefesien gesek. Namun untuk menghindari kompleksitas perhitungan diambillah satu angka koefesien gesek.

^[1] Brodjonegoro Satryo Soemantri.2001.*Konveyor Sabuk Dan Peralatan Pendukung Volume 1*. PT. JUNTO Engineering, Bandung.Lampiran F

**Tabel 2.2 Koefesien gesek**

Kondisi operasi	F
Baik, kelurusan sabu baik, <i>idler</i> mudah berputar, kecepatan sabuk rendah	0,017
Normal/standar	0,020
Jelek seperti berdebu, temperatur rendah, kecepatan tinggi (>5,5m/s), overloading, kelurusan sabuk jelek, gesekan internal material tinggi.	0,023-0,030
Temperatur sangat rendah, operasi yang lain normal	s/d 0,035
Konveyor sabuk menurun yang memerlukan pengereman dengan motor	0,012 s/d 0,0

Sumber : DIN 22101

Catatan : ISO 5048 memberikan nilai dasar $f=0,02$ untuk kondisi normal. Nilai $f=0,016$ untuk kondisi kelurusan sabuk yang baik, *idler* yang mudah berputar dan material yang mempunyai sudut gesek internal yang rendah, sedangkan nilai $f=0,03$ untuk kondisi sebaliknya. Untuk konveyor sabuk menurun yang memerlukan pengereman dengan motor nilai f bisa diambil = 0,012

2.6.2 Perhitungan Daya Mekanik ^[1]

Daya mekanik (P_M) diperlukan untuk menggerakkan *belt conveyor* harus dihitung pada kondisi beban penuh (*full load*) dan pada kondisi tanpa beban (*empty load*). Daya motor dipilih adalah pada kondisi yang menghasilkan daya terbesar dan disesuaikan dengan ukuran standar motor yang ada. Daya mekanik (P_M) dapat dihitung dari rumus berikut.

Untuk instalasi *belt conveyor* yang *non-regeneratif*,

$$P_M = \frac{F_U \times v}{\eta_1} \dots\dots\dots (2.33)$$

^[1] Brodjonegoro Satryo Soemantri.2001.*Konveyor Sabuk Dan Peralatan Pendukung Volume 1*. PT. JUNTO Engineering, Bandung. Hal : 7.4



Untuk instalasi *belt conveyor* yang *regeneratif*,

$$P_M = \frac{F_U \times v}{\eta_2} \dots\dots\dots (2.34)$$

Dimana :

η_1 = efisiensi sistem penggerak, biasanya 0,85 dan 0,95

η_2 = efisiensi sistem penggerak, biasanya 1,0 dan 0,95

Instalasi konveyor sabuk dikatakan *non-regeneratif* jika gaya keliling (F_U) yang terjadi adalah positif, biasanya terjadi untuk konveyor sabuk dengan jalur horizontal atau mendaki. Sedangkan instalasi konveyor sabuk dikatakan *regeneratif* jika gaya keliling (F_U) yang terjadi adalah negatif, biasanya terjadi untuk konveyor sabuk menurun.