



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi¹

Motor Induksi berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang berupa tenaga putar. Motor Induksi 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*.

¹ Rijono, Yon. 1997. Dasar Teknik Tenaga Listrik. Yogyakarta : Andi Offset. Hal : 310



2.1.1 Klasifikasi Motor Induksi²

Motor Induksi memiliki berbagai jenis yang dapat diklasifikasikan 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 (*Squirrel Cage & Slip Ring*)

B. Berdasarkan Macam Arus

1. Satu fasa

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 fasa

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 conveyor*, jaringan listrik, dan *grinder*.

C. Berdasarkan Kecepatan

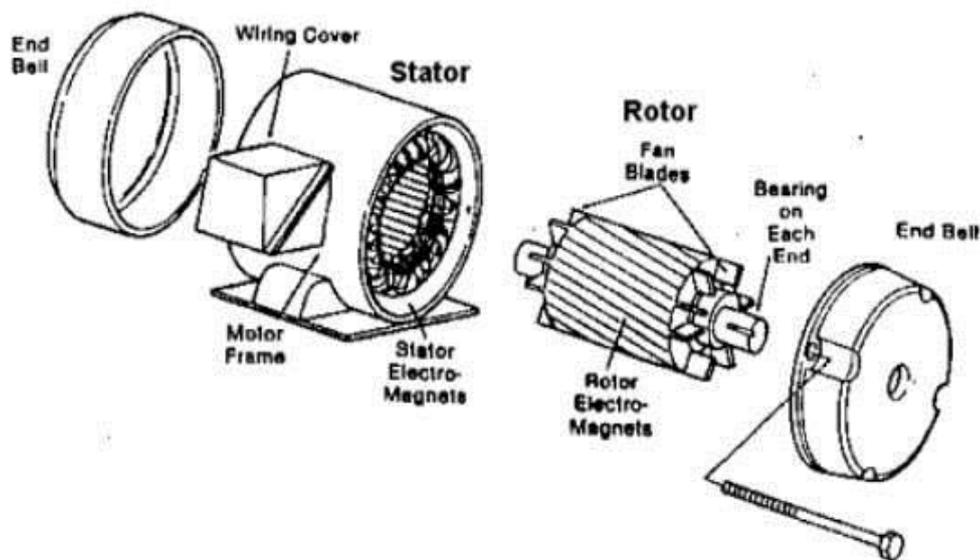
1. Kecepatan konstan
2. Kecepatan berubah
3. Kecepatan diatur

² Rijono, Yon. 1997. Dasar Teknik Tenaga Listrik. Yogyakarta : Andi Offset. Hal : 309



2.1.2 Konstruksi Motor Induksi³

Pada dasarnya motor induksi terdiri dari suatu bagaian yang tidak berputar (stator) dan bagian yang bergerak memutar (rotor) seperti pada gambar 2.1. 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.



Gambar 2.1 Konstruksi Motor Induksi³

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

³ Rijono, Yon. 1997. Dasar Teknik Tenaga Listrik. Yogyakarta : Andi Offset. Hal : 311



terjadinya perenggangan pada sumbu sebagai akibat pembebanan transversal pada sumbu atau sambungannya. Tarikan pada pita (*belt*) atau beban yang tergantung tersebut akan menyebabkan sumbu motor melengkung.

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

A. Stator (bagian motor yang diam)

Pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga kumparan yang masing – masing berbeda fasa dan menerima arus dari tiap fasa tersebut yang disebut kumparan stator. Stator terdiri dari plat – plat besi yang disusun sama besar dengan rotor dan pada bagian dalam mempunyai banyak 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.

$$n_s = \frac{120}{P} f \quad (2.1)^4$$

Dimana :

N_s = Kecepatan Sinkron (rpm)

f = Besarnya Frekuensi (Hz)

P = Jumlah Kutub

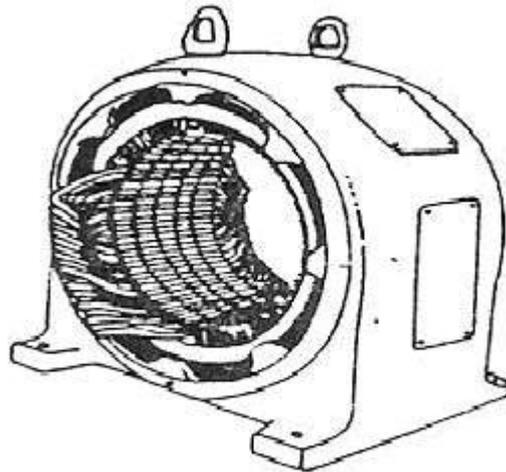
Konstruksi stator motor induksi sendiri terdiri atas beberapa bagian yaitu :

1. Bodi Motor
2. Inti Kutub magnet dan lilitan penguat magnet
3. *Slip ring*

⁴ Zuhail.1991.Dasar Tenaga Listrik. Jakarta, ITB, Bandung. Hal : 84



Bentuk konstruksi stator motor induksi dapat kita lihat pada gambar 2.2



Gambar 2.2 Stator⁵

1. Bodi Motor

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

2. Inti Kutub Magnet dan Lilitan Penguat Magnet

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

3. Sikat-sikat dan Pemegang Sikat

Fungsi dari sikat adalah sebagai jembatan bagi aliran arus dari sumber dan biasanya terbuat dari bahan arang. Dibawah ini menunjukkan kelompok-kelompok tingkatan sikat, antara lain :

- a. Sikat grafit alam
- b. Sikat karbon keras
- c. Sikat elektrografit

⁵ Zuhail.1991.Dasar Tenaga Listrik. Jakarta, ITB, Bandung. Hal : 64



- d. Sikat grafit logam
- e. Sikat karbon logam

Sikat-sikat akan aus selama operasi dan tingginya akan berkurang. Aus yang diizinkan ditentukan oleh konstruksi dari pemegang sikat (gagang – sikat). Bagian puncak dari sikat diberi pelat tembaga guna mendapatkan kontak yang baik antara sikat dan dinding pemegang sikat.

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

B. Rotor (bagian motor yang bergerak)

Berdasarkan hukum Faraday tentang induksi magnet, maka medan putar yang secara relatif merupakan medan magnet yang bergerak terhadap penghantar rotor akan menginduksikan gaya gerak listrik (ggl). Frekuensi ggl induksi ini sama dengan frekuensi jala-jala.

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

Arahnya melawan fluksi yang menginduksi, 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. Jika rotor dibebani, maka putaran rotor akan turun sehingga terjadi perbedaan kecepatan putaran antara rotor dan stator, perbedaan kecepatan putaran ini disebut *slip*.



1. Motor Rotor Sangkar⁶

Motor rotor sangkar konstruksinya sangat sederhana, yang mana rotor dari motor sangkar adalah konstruksi dari inti berlapis dengan konduktor dipasangkan paralel, atau kira – kira paralel dengan poros yang mengelilingi permukaan inti. Konduktornya tidak terisolasi dari inti, karena arus rotor secara alamiah akan mengalir melalui tahanan yang paling kecil konduktor rotor. Pada setiap ujung rotor, konduktor rotor semuanya dihubung singkatkan dengan cincin ujung. Batang rotor dan cincin ujung sangkar yang lebih kecil adalah coran tembaga atau almunium dalam satu lempeng pada inti rotor. Bentuk motor rotor sangkar sendiri dapat dilihat pada gambar 2.3. 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 suara dengung magnetik sewaktu motor sedang jalan.



Gambar 2.3 Motor Induksi Rotor Sangkar⁷

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 2.4a, konstruksi rotor seperti ini sangat sederhana bila dibandingkan dengan rotor jenis mesin listrik lainnya. Dengan

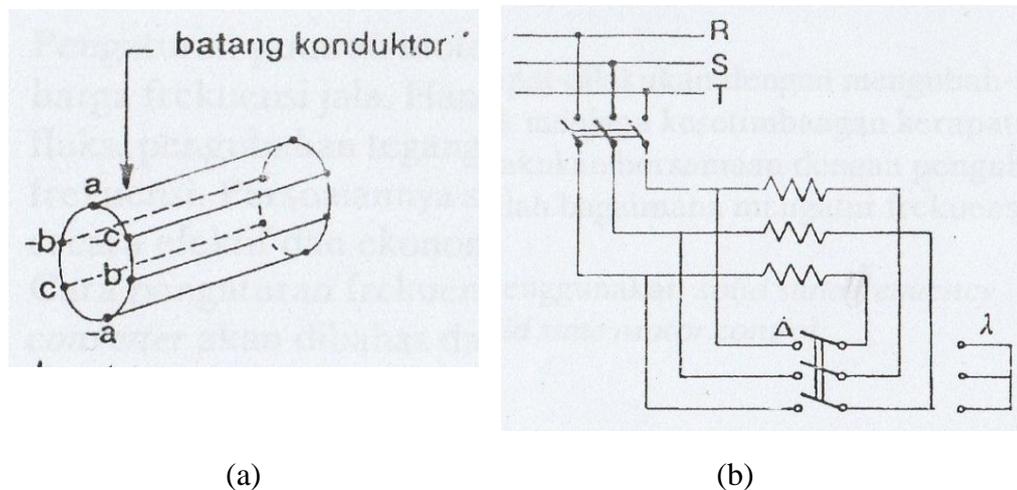
⁶ Zuhail.1991.Dasar Tenaga Listrik. Jakarta, ITB, Bandung. Hal : 83

⁷ <http://blogs.itb.ac.id//motor-ac-prinsip-dasar>, diakses 25 Januari 2016



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 (gambar 2.4b). Tetapi berkurangnya arus akan berakibat berkurangnya kopel mula, untuk mengatasi hal ini dapat digunakan jenis rotor dengan sangkar ganda.



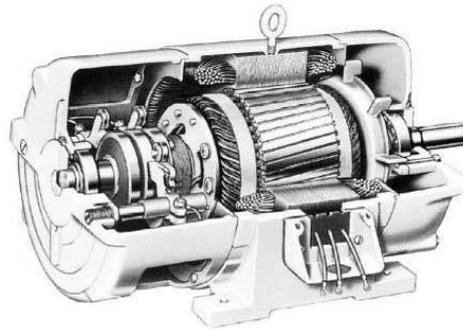
(a) (b)
Gambar 2.4 Batang Konduktor dan Saklar Y – D⁸

2. Motor Rotor Belitan⁹

Motor rotor lilit atau motor cincin *slip* berbeda dengan motor rotor sangkar dalam konstruksi rotornya. Bentuk motor rotor belitan dapat dilihat pada gambar 2.4. 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 rangkaian motor. Motor rotor lilit kurang banyak digunakan dibandingkan dengan motor rotor sangkar karena harganya mahal dan biaya pemeliharaan lebih besar.

⁸ Zuhail.1991.Dasar Tenaga Listrik. Jakarta, ITB, Bandung. Hal : 83

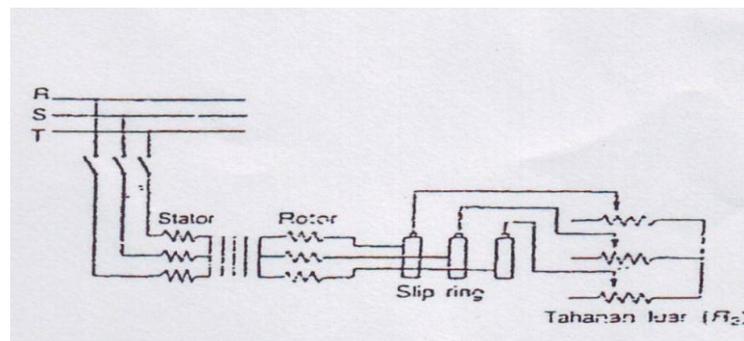
⁹ Zuhail.1991.Dasar Tenaga Listrik. Jakarta, ITB, Bandung. Hal : 82



Gambar 2.5 Motor induksi rotor belitan⁸

Seperti yang terlihat pada gambar 2.5, 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 belitan¹⁰

2.1.3 Beda Motor Induksi Rotor Sangkar Dengan Rotor Lilit¹¹

Rotor sangkar dapat dianggap sebagai lilitan – lilitan seri dengan langkah penuh (*full pitch*). Lilitan – lilitan seri tersebut dibentuk oleh pasangan – pasangan

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

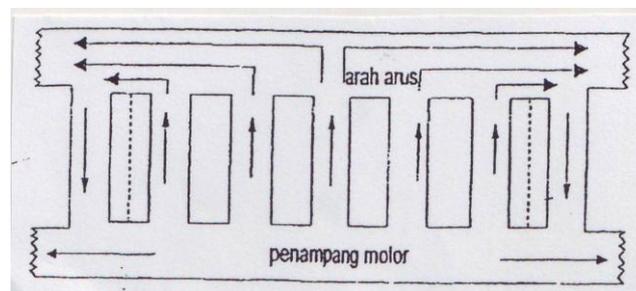
¹¹ Sumanto.1993.Motor Listrik Arus Bolak-Balik. Yogyakarta : Andi Offset. Hal : 53



batang konduktor yang ujung – ujungnya disatukan oleh cincin hubung singkat, untuk jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.7.

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 ring atau sikatnya.
2. Jumlah kutub pada rotor sangkar menyesuaikan terhadap jumlah kutub pada lilitan statornya, sedangkan jumlah kutub pada rotor sudah tertentu.



Gambar 2.7 Arus pada rotor sangkar¹²

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 Induksi¹³

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

1. Apabila sumber tegangan tiga fasa dipasang pada kumparan stator, timbulah medan putar dengan kecepatan

$$n_s = \frac{120}{P} f \quad (2.1)$$

¹² Sumanto.1993.Motor Listrik Arus Bolak-Balik. Yogyakarta : Andi Offset. Hal : 52

¹³ Zuhail.1991.Dasar Tenaga Listrik. Jakarta, ITB, Bandung. Hal : 68



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

$$E_2 = 4,44.f_2.N_2 \quad (2.2)$$
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 :

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \quad (2.3)$$

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 .

2.2 Cara-Cara Menentukan Rugi-Rugi pada Motor¹⁴

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*).

¹⁴ Lister, Eugene.1988.Mesin Dan Rangkaian Listrik. Edisi Keenam, Jakarta : Erlangga. Hal : 227



Pada motor AC, tahanan equivalen motor dapat ditentukan dengan percobaan *block rotor* (hubungan singkat), dimana pada keadaan ini rangkaian *equivalen* motor adalah sama dengan rangkaian *equivalen* hubung singkat dari suatu transformator. Jadi daya pada keadaan ini merupakan rugi – rugi tahanan atau belitan dan pada keadaan ini rugi – rugi inti dapat diabaikan karena tegangan hubung singkat relatif kecil dibandingkan dengan tegangan nominalnya.

Rugi – rugi *stray load* adalah rugi – rugi yang paling sulit diukur 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.

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 diberikan, ditambah dengan kerugian daya yang terjadi, atau :

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

Dimana :

P_{in} : Total daya yang diterima motor

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

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

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

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



$$\text{Efisiensi} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.5)$$

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 :
 - a. Rugi-rugi mekanis akibat putaran.
 - b. Rugi-rugi inti besi akibat kecepatan putaran dan *fluks* medan.

Tabel 2.1 jenis rugi rugi motor induksi 3 phasa (BEE India)

Jenis Rugi-rugi	Persentase rugi-rugi total (%)
Rugi-rugi tetap atau rugi-rugi inti	25
Rugi-rugi variabel: rugi-rugi pada stator	34
Rugi-rugi variabel: rugi-rugi pada rotor	21
Rugi-rugi gesekan	15
Rugi-rugi beban menyimpang (<i>stray load</i>)	5

2.3.1 Rugi-Rugi Inti

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

Rugi inti :

$$P_i = 3.E_1^2 .G_c = \frac{3.E_1^2}{R_c} \quad (2.6)$$

Rugi- rugi arus *eddy* tergantung pada kuadrat dari kerapatan *fluks* dan frekuensi. Pada keadaan mesin normal besarnya dapat didekati dengan :

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



Dimana :

P_c = Rugi –rugi arus *eddy*

B_{maks} = Kerapatan *fluks* maksimum

f = Frekuensi

K_c = Ketetapan pembanding

T = Tebal lapisan

Harga K_c tergantung pada satuan yang digunakan, volume besi dan resistensivitas besi. Ragam dari rugi – rugi histerisis dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan secara empiris saja. Persamaan yang banyak dipergunakan adalah :

$$P_h = K_h f B_{maks} \quad (2.8)$$

Pada mesin induksi, rugi-rugi intinya terdapat di stator dan rotor hampir boleh diabaikan karena frekuensi di rotor relatif kecil. Jadi total rugi rugi inti adalah sebagai berikut :

$$P_i = P_h + P_r \quad (2.9)$$

Atau

$$P_i = P_{rugi-rugi} \times 0,25 \quad (2.10)$$

2.3.2 Rugi- rugi mekanik

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.

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 10 – 15% dari total rugi-rugi daya motor pada keadaan beban nominal.

$$P_m = P_{rugi-rugi} \times 0,15 \quad (2.11)$$



2.3.3 Rugi-rugi belitan

Rugi-rugi belitan sering disebut rugi – rugi tembaga tetapi pada saat sekarang sudah tidak begitu. Banyak motor listrik, terutama motor ukuran sangat kecil diatas 750 W, mempunyai belitan stator dari kawat alumunium yang lebih tepat disebut rugi – rugi $I^2 R$ yang menunjukkan besarnya daya yang berubah menjadi panas oleh tahanan dari konduktor tembaga atau aluminium. Total kerugian $I^2 R$ adalah jumlah dari rugi – rugi $I^2 R$ primer (stator) dan rugi – rugi $I^2 R$ sekunder (rotor). Rugi – rugi $I^2 R$ dalam belitan sebenarnya tidak hanya tergantung pada arus, tetapi juga pada tahanan belitan di bawah kondisi operasi. Sedang tahanan efektif dari belitan selalu berubah dengan perubahan temperatur, *skin effect* dan sebagainya. Sangat sulit untuk menentukan 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.

$$P_b = P_{\text{rugi-rugi}} \times 0,55 \quad (2.12)$$

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 tambahan, kita tidak dapat menghitung berapa besar kerugian ini seperti yang diakibatkan oleh perubahan *fluks* terhadap beban, geometri konduktor sehingga arus terbagi sedikit tidak merata dalam konduktor bertambah, mengakibatkan 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).



Tabel 2.2 persentase rugi – rugi *stray load*¹⁵

<i>Machine Rating KW</i>	<i>Stray Load Loss Percent of Rated Load</i>
1 - 90	1.8%
91 – 375	1.5%
376 – 1850	1.2%
1851 and greater	0.9%

Pada umumnya kerugian ini berkisar 1-5% dari total kerugian daya motor pada keadaan beban nominal.

$$P_s = P_{\text{rugi - rugi}} \times 0,05 \quad (2.13)$$

2.4 Pengertian Daya¹⁶

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 :

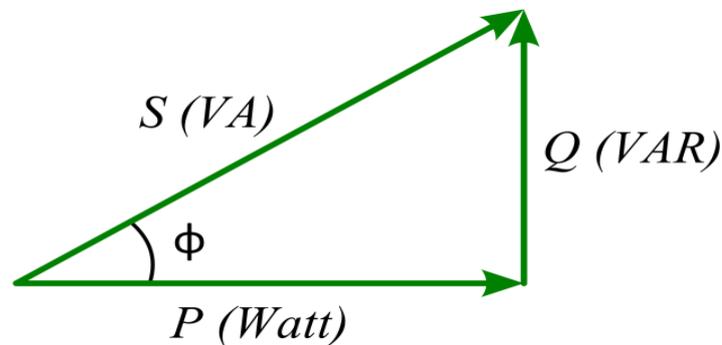
- Daya nyata (P) adalah daya yang diubah menjadi energi, persatuan waktu atau dengan kata lain daya aktif adalah daya yang benar – benar terpakai yang dihasilkan oleh komponen resistif, satuannya adalah watt (W).
- Daya reaktif (Q) adalah daya yang ditimbulkan oleh komponen reaktansi, daya reaktif ditentukan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

¹⁵ IEEE Std 112™ - 2004

¹⁶ Cekdin, Taufik. 2013. Transmisi Daya Listrik. Yogyakarta. Hal: 16



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



Gambar 2.8 Sistem Segitiga Daya

Dimana :

$$P = V.I.\cos \theta \quad (2.14)$$

$$Q = V.I.\sin \theta \quad (2.15)$$

$$S = V.I \quad (2.16)$$

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

$$P = \sqrt{3} .V_L .I_L.\cos \theta \quad (2.17)$$

$$Q = \sqrt{3} .V_L .I_L. \sin \theta \quad (2.18)$$

$$S = \sqrt{3} .V_L .I_L \quad (2.19)$$

2.4.1 Sifat – Sifat Beban Listrik¹⁷

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 kapasitansi 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. Daya mekanik yang dihasilkan digunakan

¹⁷ Linsley,Trevor.2004.Instalasi Listrik Tingkat Lanjut.Jakarta. Hal : 124



untuk berbagai keperluan sesuai dengan kebutuhan seperti digunakan untuk menggerakkan pompa minyak yang menjadi objek pengamatan pada laporan akhir ini.

Daya pada motor listrik dapat dihitung menggunakan perhitungan perphasa maupun perhitungan tiga phasa dan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_3\theta = 3.P_1 \theta \quad (2.20)$$

$$P_3\theta = 3.V_p.I_p.Cos \theta \quad (2.21)$$

Harga tegangan phasa (V_p) adalah :

$$V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (2.22)$$

Dengan mensubstitusi persamaan 2.19 ke persamaan 2.18 maka diperoleh rumus sebagai berikut :

$$P_3\theta = \sqrt{3} . V_L . I_L . Cos \theta \quad (2.23)$$

Dimana :

$P_3\theta$ = Daya aktif tiga phasa (W)

V_L = Tegangan *line-line*/tegangan *line* (V)

V_p = Tegangan perphasa (V)

I = Arus (A)

Cos θ = Faktor daya

2.4.2 Mesin Pompa¹⁸

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

Didalam roda jalan fluida mendapat percepatan sehingga fluida tersebut mempunyai kecepatan mengalir keluar dari sudu-sudu roda jalan. Kecepatan

¹⁸ M.T, Pudjanarsa, Astu.2006.Mesin Konversi Energi. Yogyakarta : Andi Offset. Hal : 170



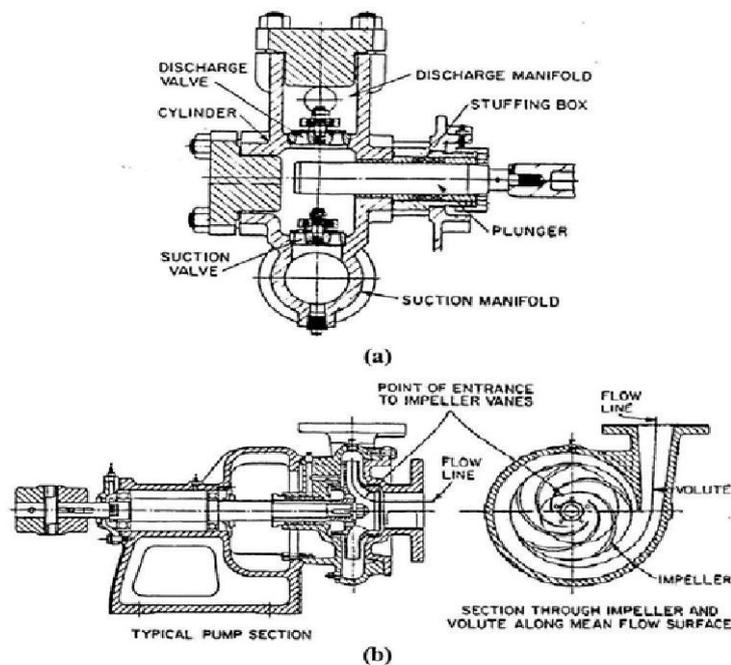
keluar fluida ini kemudian berkurang dan berubah menjadi tinggi kenaikan H di dalam sudu-sudu pengarah atau di dalam rumah keong. Didalam saluran pipa keluar, ketika fluida mengalir akan bergesekan dengan dinding pipa dan menimbulkan kerugian *head*, sehingga tinggi kenaikan yang diinginkan akan berkurang. Untuk mengatasi hal ini maka kecepatan aliran fluida harus dibatasi, demikian juga dengan kecepatan keliling roda jalan. Menurut cara memindahkan fluidanya, pompa dapat dibedakan atas :

1. *Positive Displacement Pump (Displacement Pump)*

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

2. *Non-positive Displacement Pump (Dynamic Pump)*

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



Gambar 2.9 (a) Positive displacement pump, (b) Dynamic pump¹⁹

¹⁹ M.T, Pudjanarsa, Astu.2006.Mesin Konversi Energi. Yogyakarta : Andi Offset. Hal : 171



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

A = Luas penampang pipa (m)

ρ = Massa jenis cairan (kg/m³)

Q = Debit Aliran (m³/s)

V = Kecepatan Aliran (m/s)

Sehingga daya mekanik pada pompa dapat ditentukan dengan menggunakan rumus :

$$P_{\text{mekanik}} = \rho \cdot Q \cdot V^2 \quad (2.24)$$

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

$$Q = A \cdot V \quad (2.25)$$

Dimana :

Q = Debit Aliran (m³/s)

A = Luas Penampang Pipa (m²)

V = Kecepatan Aliran Cairan (m/s)

Nilai luas penampang ini dapat dicari dengan menggunakan rumus seperti berikut ini :

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (2.26)$$

Dimana :

A = Luas Penampang (m²)

π = Konstanta (3,14)

r = Jari-jari lingkaran (m)

2.5 Efisiensi²⁰

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

²⁰ Linsley, Trevor. 2004. Instalasi Listrik Tingkat Lanjut. Jakarta. Hal : 137



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

Perbandingan dari besarnya daya keluaran terhadap daya masukan dikenal sebagai efisiensi mesin yang disimbolkan dengan huruf latin 'eta' atau η . Jadi :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.27)$$

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

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.28)$$

Dimana :

η = Efisiensi (%)

P_{out} = Daya Keluaran (Watt)

P_{in} = Daya Masukan (Watt)