



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi¹

Motor induksi atau motor listrik adalah sebuah perangkat elektromagnetis yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Pada kegiatan industri energi mekanik tersebut digunakan untuk berbagai kegiatan seperti memutar impeller pompa, fan atau blower, menggerakkan kompresor, mengangkat bahan, dan lain sebagainya. Tak hanya di industri Motor listrik juga sering digunakan untuk keperluan rumah tangga (pompa air, bor listrik, kipas angin). Motor listrik dalam dunia industri umumnya memakai jenis motor asinkron yang memegang peranan sangat vital, karena sekitar 70% beban listrik total di industri digunakan untuk motor – motor listrik

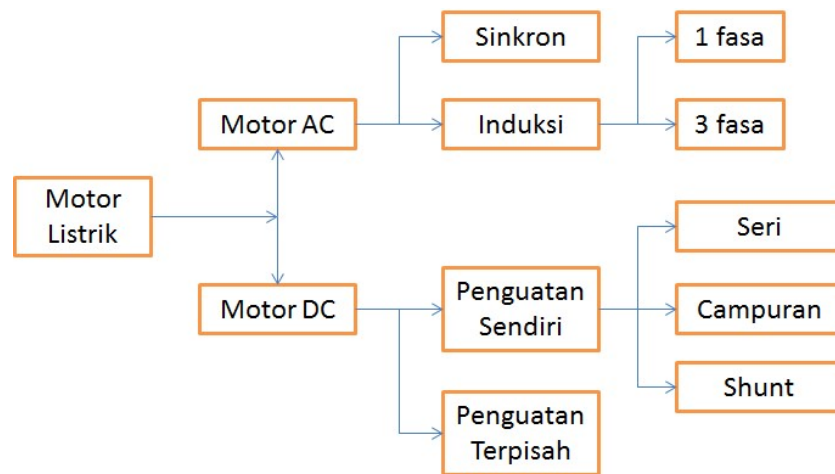
Mesin – mesin listrik digunakan untuk mengubah suatu bentuk energi ke energi yang lain, misalnya mesin yang mengubah energi mekanis ke energi listrik disebut generator, dan sebaliknya energi listrik menjadi energi mekanis disebut motor. Masing – masing mesin mempunyai bagian yang diam dan bagian yang bergerak. Pada umumnya mesin – mesin penggerak yang digunakan di industri mempunyai daya keluaran lebih besar dari 1 HP dan menggunakan motor induksi tiga fasa.

Klasifikasi Motor Listrik Berdasarkan Kecepatan yaitu :²

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

¹ Prih Sumardjati, dkk. 2008, Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3, Hal: 408.

² Rijono, Yon, Dasar Teknik Tenaga Listrik. (Yogyakarta : Andi Offset, 1997), hal : 310

Gambar 2.1 Klasifikasi Motor Listrik³

2.2 Jenis – Jenis Motor Induksi Tiga Fasa Berdasarkan Karakteristik Kelas- nya

2.2.1 Kelas A

Motor Induksi 3 Fasa Kelas A memiliki karakteristik sebagai berikut :

- Torsi awal normal (150 – 170%) dari nilai ratingnya) dan torsi breakdownnya tinggi
- Arus awal relatif tinggi dan Slip rendah ($0.0015 < \text{Slip} < 0.005$)
- Tahanan rotor kecil sehingga efisiensi tinggi
- Baik digunakan untuk torsi beban kecil saat start dan cepat mencapai putaran penuhnya

Contoh : Pompa dan Fan

2.2.2 Kelas B

Motor Induksi 3 Fasa Kelas B memiliki karakteristik sebagai berikut :

- Torsi awal normal hampir sama seperti kelas A

³ Daryanto. 2000. Konsep Dasar Teknik Elektronika Kelistrikan Hal. 174.



-
- b) Arus awal rendah (lebih rendah 75% dari kelas A) dan Slip rendah (slip < 0.005)
 - c) Arus awal dapat diturunkan karena rotor mempunyai reaktansi tinggi
 - d) Rotor terbuat dari plat atau saklar ganda
 - e) Efisiensi dan faktor dayanya pada saat berbeban penuh tinggi
- Contoh : Fan, Blower, dan Motor Generator set

2.2.3 Kelas C

Motor Induksi 3 Fasa Kelas C memiliki karakteristik sebagai berikut :

- a) Torsi awal lebih tinggi (200 % dari nilai ratingnya)
- b) Arus awal rendah dan Slip rendah (slip < 0.005)
- c) Reaktansi rotor lebih tinggi dari kelas B
- d) Rotor menggunakan sankar rendah

Contoh : Kompresor, Konveyor, Crushrs, dan Fort

2.2.4 Kelas D

Motor Induksi 3 Fasa Kelas D memiliki karakteristik sebagai berikut :

- a) Torsi awal yang paling tinggi dari kelas lainnya
- b) Arus awal rendah dan Slip tinggi
- c) motor ini cocok untuk aplikasi dengan perubahan beban dan perubahan kecepatan secara mendadak pada motor
- d) Ketika torsi maksimum slip mencapai harga 0.5 atau lebih, sedangkan ketika beban penuh slip antara 8% hingga 15% sehingga efisiensinya rendah

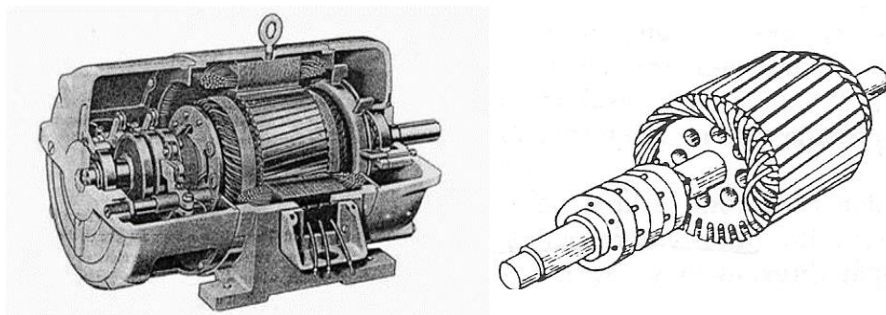
Contoh : Elevator, Crane, dan Ekstraktor.



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

2.3.1 Motor Induksi Rotor Belitan (*Wound- Rotor Motor*)

Motor rotor belitan (motor cincin slip) berbeda dengan motor sangkar tupai dalam hal konstruksi rotornya. Seperti namanya, rotor dililit dengan lilitan terisolasi serupa dengan lilitan stator. Lilitan fasa rotor dihubungkan secara Y dan masing–masing fasa ujung terbuka yang dikeluarkan ke cincin slip yang terpasang pada poros rotor. Konstruksi motor tiga fasa rotor belitan ditunjukkan pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.2 Rotor Lilit

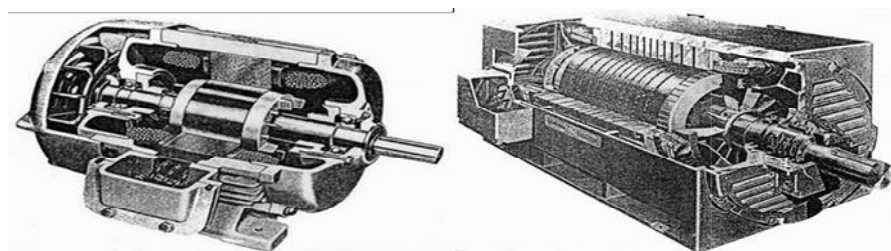
2.3.2 Motor Induksi Sangkar Tupai (*Squirrelcage Motor*)

Penampang motor sangkar tupai memiliki konstruksi yang sederhana. Inti stator pada motor sangkar tupai tiga fasa terbuat dari lapisan-lapisan plat baja beralur yang didukung dalam rangka stator yang terbuat dari besi tuang atau plat baja yang dipabrikasi. Lilitan-lilitan kumparan stator diletakkan dalam alur stator yang terpisah 120 derajat listrik. Lilitan fasa ini dapat tersambung dalam hubungan delta(Δ) ataupun bintang (Y). Rotor jenis rotor sangkar ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.3 Rotor Sangkar

Batang rotor dan cincin ujung motor sangkar tupai yang lebih kecil adalah coran tembaga atau aluminium dalam satu lempeng pada inti rotor. Dalam motor yang lebih besar, batang rotor tidak dicor melainkan dibenamkan ke dalam alur rotor dan kemudian dilas dengan kuat ke cincin ujung. Batang rotor motor sangkar tupai tidak selalu ditempatkan parallel terhadap poros motor tetapi kerap kali dimiringkan. Hal ini akan menghasilkan torsi yang lebih seragam dan juga mengurangi derau dengung magnetic sewaktu motor sedang berputar. Pada ujung cincin penutup dilekatkan sirip yang berfungsi sebagai pendingin. Rotor jenis rotor sangkar standar tidak terisolasi, karena batangan membawa arus yang besar pada tegangan rendah. Motor induksi dengan rotor sangkar ditunjukkan pada gambar dibawah ini:

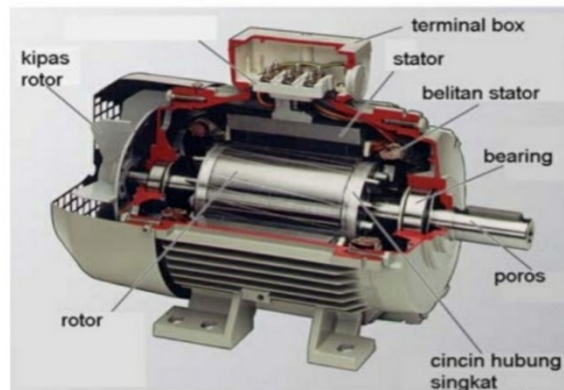


Gambar 2.4 Konstruksi Motor Induksi Rotor Sangkar



2.4 Konstruksi Motor Induksi 3 fasa

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



Gambar 2.5 Bentuk Fisik Motor Induksi

Stator adalah bagian motor yang diam yang terdiri dari badan motor, inti stator, belitan stator, bearing dan terminal box. Sedangkan bagian rotor adalah bagian motor yang berputar, terdiri atas rotor sangkar dan poros rotor. Konstruksi motor induksi tidak ada bagian rotor yang bersentuhan dengan stator, karena dalam motor induksi tidak ada komutator dan sikat arang, selain itu juga konstruksi motor induksi lebih sederhana di bandingkan dengan motor DC, dikarenakan tidak ada komutator dan sikat arang sehingga pemeliharaan motor induksi sangat mudah yaitu di bagian mekanik nya saja, dan konstruksinya juga begitu sederhana serta motor induksi sangat handal dan jarang sekali rusak secara elektrik. Bagian motor induksi yang perlu di pelihara rutin adalah pelumas bearing, dan pemeriksaan kekencangan baut-baut kabel pada terminal box apabila terjadi kondor atau lepas akibat pengaruh getaran secara terus menerus.⁴

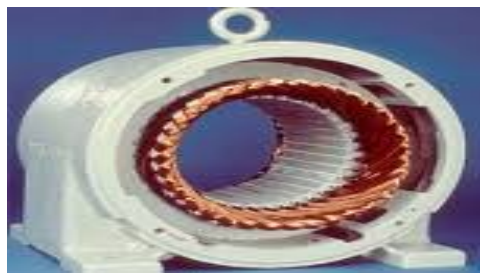
2.4.1 Stator

Pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga fasa yang disebut kumparan stator, yang masing-

⁴ Siswoyo. Teknik Listrik Industri Hal: 5-7



masing kumparan mendapatkan suplai arus tiga fasa. Stator terdiri dari pelat-pelat besiyang disusun sama besar dengan rotor dan pada bagian dalam mempunyai banyak alur-alur yang diberi kumparan kawat tembaga yang berisolasi. Lalu akan timbul flux medan putar , karena adanya flux medan putar pada kumparan stator, mengakibatkan rotor berputar karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar sinkron dengan kecepatan putar stator.



Gambar 2.6 Stator

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

1. Bodi Motor (Frame)

Fungsi utama dari rangka adalah sebagai tempat mengalirnya fluks magnet, karena itu ranka mesin dibuat dari bahan ferro magnetik. Selain itu rangka berfungsi untuk meletakkan alat-alat tertentu dan melindungi bagian-bagian mesin lainnya. Mesin – mesin yang kecil di buat dari besi tuang, sedangkan mesin-mesin yang besar rangkanya dibuat dari plat campuran baja yang berbentuk silinder.

2. Inti kutub magnet dan lilitan penguat magnet

Fluks magnet yang terdapat pada mesin motor listrik dihasilkan oleh kutub kutub magnet. Kutub magnet diberi lilitan penguat magnet yang berfungsi untuk tempat aliran arus listrik supaya terjadi proses elektromagnetisme. Pada dasar nyakutub magnet terdiri dari magnet dan sepatu kutub magnet. Karena kutub magnet berfungsi menghasilkan fluks magnet, maka kutub magnet di buat dari bahan ferromagnetik, misalnya



campuran baja-silikon. Di samping itu kutub magnet di buat dari bahan berlapis-lapis tipis untuk mengurangi panas karena adanya aruspusar yang terbentuk pada kutub magnet tersebut.

3. Sikat komutator

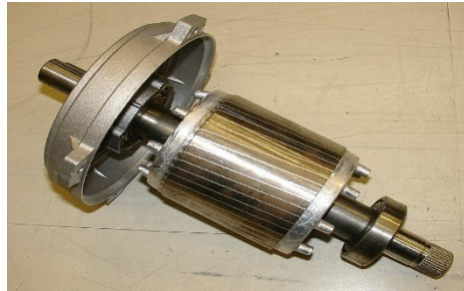
Fungsi dari sikat adalah sebagai sebagai penghubung untuk aliran arus dari lilitan jangkar ke terminal luar (generator) ke lilitan jangkar (Motor). Karena itu sikat sikat di buat dari bahan konduktor. Di samping itu sikat juga berfungsi untuk terjadinya komutasi bersamasama dengan komutator, bahan sikat harus lebih lunak dari komutator. Supaya hubungan/kontak antara sikat sikat yang diam dengan komutator yang berputar dapat sebaik mungkin, maka sikat memerlukan alat pemegang dan penekan berupa per/pegas yang dapat diatur KomutatorSeperti diketahui komutator berfungsi sebagai alat penyearah mekanik, yang ber-sama-sama dengan sikat membentuk suatu kerjasama yang disebut komutasi. Supaya menghasilkan penyearah yang lebih baik, maka komutator yang digunakan jumlahnya banyak. Karena itu tiap belahan/segmen komutator tidak lagi merupakan bentuk sebagian selinder, tetapi sudah berbentuk lempeng- lempeng. Diantara setiap lempeng/ segmen komutator terdapat bahan isolator. Isolator yang digunakan menentukan kelas dari mesin berdasarkan kemampuan suhu yang timbul dalam mesintersebut.

2.4.2 Rotor

Berdasarkan hukum faraday tentang imbas magnet, maka medan putar yang secara relative merupakan medan magnet yang bergerak terhadap penghantar rotor akan mengimbaskan gaya gerak listrik (ggl). Frekuensi imbas ggl ini sama dengan frekuensi jala-jala(sumber). Besarnya ggl imbasini berbanding lurus dengan kecepatan relative antara medan putar dan penghantar rotor. Penghantar –penghantar dalam rotor yang membentuk suatu rangkaian tertutup, merupakan rangkaian pelaju arus rotor dan searah dengan hukum yang berlaku yaitu hukumlenz. Dalam hal ini arus rotor



ditimbulkan karena adanya perbedaan kecepatan yang berada diantara fluksi atau medan putar stator dengan penghantar yang diam. Rotor akan berputar dalam arah yang sama dengan arah medan putar stator.

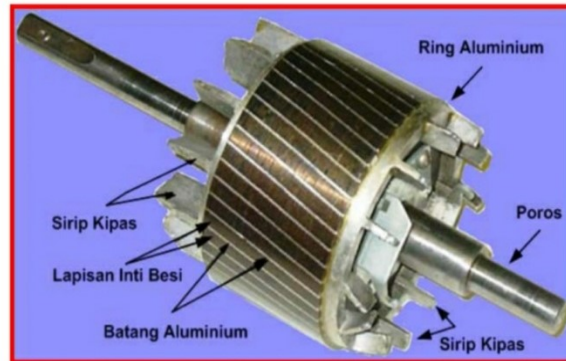


Gambar 2.7 Rotor

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

1. Motor Rotor Sangkar

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

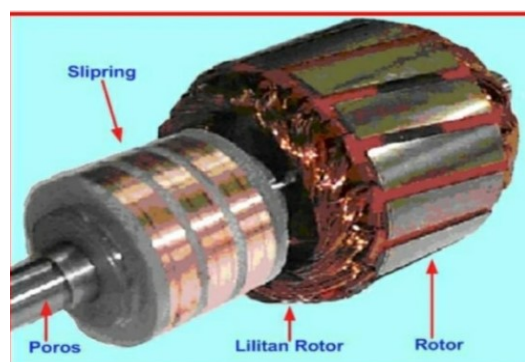


Gambar 2.8 Rotor Sangkar

2. Motor Rotor Lilit.

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

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



Gambar 2.9 Rotor Lilit



2.5 Pengertian *SootBlower*

Sootblower merupakan alat pembersih slag yang menempel pada pipa-pipa boiler yang terbentuk sebagai akibat hasil pembakaran. Hasil pembakaran batu bara selain menghasilkan *Bottom Ash* dan *Fly Ash* juga akan menyebabkan *slagging* dan *fouling* yang akan mengurangi efisiensi boiler. Dengan semakin tebal slag yang akan terbentuk, maka akan mengurangi perpindahan panas pada pipa-pipa boiler.

Sootblower adalah alat yang dirancang untuk menghilangkan slag dan abu dari dinding tungku dan bagian lainnya yang serupa (dinding-dinding boiler/*wall tubes*, *superheater*, *reheater*, *economizer*, dan *air heater*) ketika boiler beroperasi. *Sootblower* beroperasi pada interval tertentu. Tujuannya adalah agar perpindahan panas tetap berlangsung secara baik dan efektif. Sebagai media pembersih digunakan uap. Suplai uap ini diambil dari primary superheater melalui suatu pengaturan tekanan PVC yang diset pada tekanan 40 kg/cm². Setiap *sootblower* dilengkapi dengan *poppet valve* untuk mengatur kebutuhan uap *sootblower*. Katup ini membuka pada saat *sootblower* dioperasikan dan menutup kembali saat *lance tube* dari *sootblower* tersebut mundur menuju *stop*.

Laju (*Rate*) perpindahan panas didalam boiler sangat ditentukan oleh tingkat kebersihan dari Boiler tubes atau *heating surface* dari alat penukar kalor (*Furnace*, *Superheater*, *Reheater*, *Economizer* dan *Air Heater*). Untuk mengendalikan perlu dijaga kesiapan dari *sootblower*. *Monitoring* dari tingkat kebersihan *heating surface* secara operasional dapat dimonitor dari temperature *Flue Gas* Keluar *Air Heater*, idealnya adalah 145 °C. sampai 150 °C.

Dalam pembakaran yang terjadi dalam boiler, maka akan menghasilkan sejumlah gas, Abu, dan *slag*. Beberapa boiler cenderung menghasilkan penumpukan tersebut pada tingkat yang lebih besar, baik karena bahan bakar yang di gunakan, atau karena tidak beroperasi secara efisien. Seiring waktu, slag yang menumpuk dalam boiler akan menimbulkan permasalahan yang serius.



Permasalahan yang pertama adalah slag akan bertindak sebagai isolator panas, dan membatasi pertukran panas. Hal ini membuat kinerja boiler kurang efisien, karena hal itu tergantung pada pertukran panas untuk beroperasi.

Dan demikian, dari waktu ke waktu maka akan menghasilkan sedikit panas, dan harus lebih banyak membutuhkan energi. Yang kedua adalah *slagging* akan menyebabkan kebakaran. Kondisi boiler akan menjadi lebih panas (*overheating*), dan slag dapat terbakar, sehingga dapat merusak boiler dan efeknya dapat meluas ke komponen-komponen pendukung boiler.

Mengingat peranan *sootblower* yang sangat penting dalam mempertahankan efisiensi boiler, maka keandalan dan kesiapan *sootblower* harus tetap dijaga. Kelainan-kelainan yang timbul baik menyangkut pengoperasian dan pemeliharaan perlu segera dikaji dan dilakukan tindakan perbaikannya. Dalam jadwal pengoperasian *sootblower* berbeda-beda, tergantung tipe dan kebutuhannya. Semakin menurun nilai kalor dari batu bara, maka akan semakin banyak kotoran yang timbul, sehingga pengoperasian *sootblower* akan semakin dibutuhkan dari jadwal pengoperasian semula.

2.6 Jenis-Jenis *Sootblower*

Adapun jenis-jenis *sootblower* yang digunakan pada PT.PLN (Persero) Bukit Asam sebagai berikut :

2.6.1 *Sootblower Wall Blower*

Sootblower Wall Blower yaitu *sootblower* dinding nozzle tunggal (*Single Nozzle Wall Blower*) merupakan jenis *blower* yang mana *gun blower* bisa bergerak maju ataupun mundur. *Sootblower* tipe ini cenderung berukuran pendek. Nozzle diarahkan pada susunan pipa dinding boiler (*wall tube*). Sehingga biasanya digunakan pada dinding ruang bakar bagian tengah hingga bagian bawah. Tipe ini menghembuskan uap dengan tekanan 17,6 kg/cm² dengan waktu pengoperasian 180s per *sootblower*.

Gambar 2.10 *Wall Blower SootBlower*

2.6.2 *Sootblower Long retractable sootblower*

Sootblower Long retractable sootblower yaitu *sootblower* lance tube digunakan untuk membersihkan pipa - pipa di dinding ruang bakar bagian atas, superheater dan reheater, serta economizer, dapat maju mundur dengan kecepatan 6-20 feet/menit dan berputar dengan putaran 6-15 rpm.. Gerakan maju-mundur nya merupakan gerakan translasi dan rotasi. Tekanan uap yang dihembuskan tipe ini cukup bervariasi mulai dari 19,5 kg/cm² yang terletak pada zona yang terdekat dengan bola api sampai dengan tekanan 6,3 kg/cm² yang terletak pada Low Temperature Superheater dan Economizer dengan waktu pengoperasian 420s per sootblower

Gambar 2.11 *Long retractable sootblower*



2.6.3 Sootblower Air Heater

Sootblower Air Heater yaitu *sootblower multi jet* merupakan jenis blower yang mempunyai banyak *gun blower* dan dapat diputar namun tidak dapat ditarik keluar. Tipe ini digunakan untuk membersihkan komponen yang suhu kerjanya tidak terlalu tinggi seperti pada *Air Heater* khususnya *Primary Air Heater*. Tipe ini kira-kira menghembuskan uap dengan tekanan $6,5 \text{ kg/cm}^2$ dengan waktu pengoperasian 3600s per *sootblower*.



Gambar 2.12 *Air Heater Sootblower*

2.6.4 Sootblower Half Retractable

Sootblower Half Retractable yaitu *sootblower multi jet* merupakan jenis blower yang menyerupai jenis *Air Heater*. Perbedaan di antara keduanya terletak pada ukuran jenis *Half Retractable* yang cenderung lebih panjang dibandingkan dengan jenis *Air Heater*. Hal ini dikarenakan *Half Retractable* digunakan pada *Secondary Air Heater* yang ukurannya lebih besar dibandingkan *Primary Air Heater*. Sehingga tentu saja membutuhkan *Sootblower* yang lebih panjang pula. Tipe ini menghembuskan uap dengan tekanan yang sedikit lebih tinggi dibandingkan tipe *Air Heater* namun dengan waktu pengoperasian 2700s per *sootblower*.



Gambar 2.13 Half Retractable Sootblower.

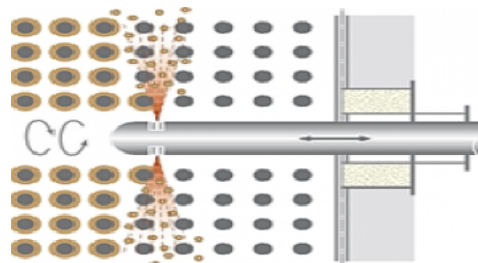
2.7 Prinsip Kerja Sootblower

Sootblower menggunakan steam yang diambil dari *Low Temperature Superheater* ataupun dari *Cold Reheat Steam* untuk melakukan pembersihan. Tekanan *steam* pada masing-masing *blower* diturunkan menggunakan suatu *orifice plate* sehingga sesuai dengan kebutuhan penggunaan. Namun, ketika sistem aliran air untuk *sootblower* terdapat masalah, dapat digunakan udara bertekanan 6 sampai 7 kg/cm² untuk menggantikan peran uap. *Steam* yang diambil dari sumber disalurkan ke pipa *header sootblower*.

Adapun dapat dilihat dari cara kerja/mekanik pada *sootblower* dibagi atas:

2.7.1 Axial Sootblower

- Berbeda dengan *Long Retractable Sootblower*, pada *sootblower* ini poros pipa tidak berputar hanya bergerak bolak-balik.

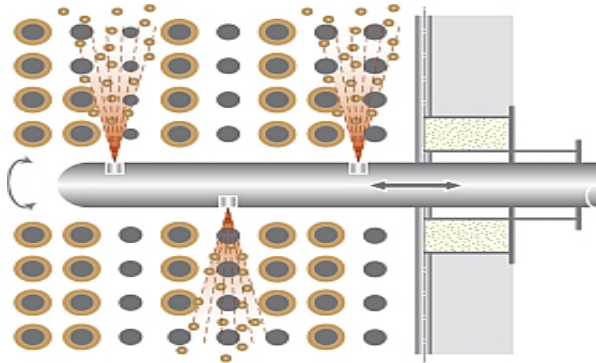


Gambar 2.14 Axial Sootblower.



2.7.2 *Helical Sootblower*

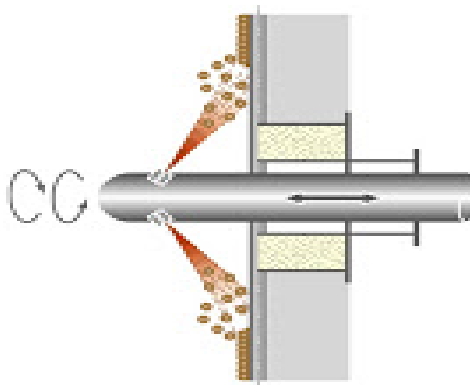
- Sama dengan *Long Retractable Sootblower*, yaitu pipa poros berputar bolak balik.
- Hanya saja *nozzle* dibuat selang-seling.



Gambar 2.15 *Helical Sootblower*.

2.7.3 *Wall Deslagger Sootblower*

- Digunakan untuk membersihkan dinding boiler.
- *Nozzle* ini hanya di arahkan ke dinding boiler.

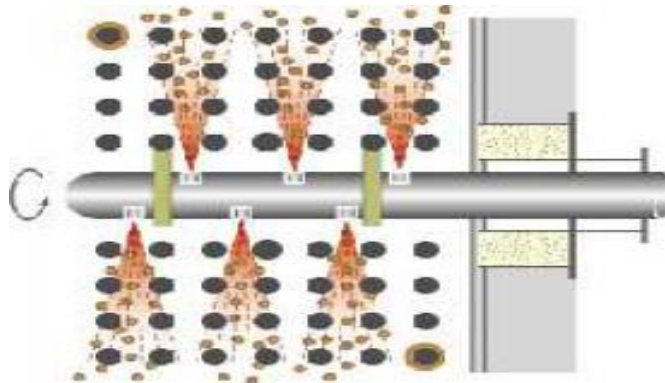


Gambar 2.16 *Wall Deslagger Sootblower*.



2.7.4 Rotating Element Sootblower

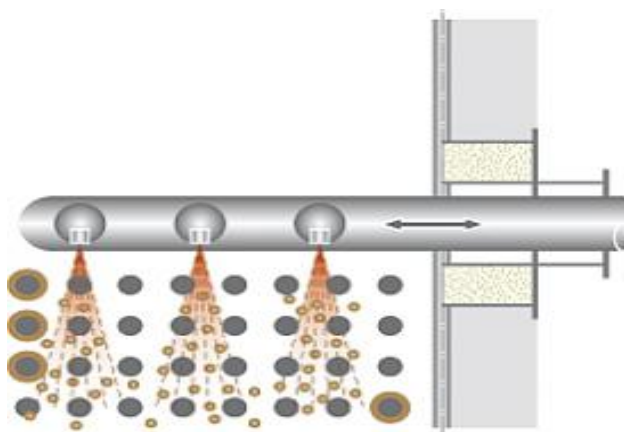
- Hanya ada satu gerakan berputar selama proses hembusan.
- Poros pipa berputar satu arah.



Gambar 2.17 *Rotating Element Sootblower*.

2.7.5 Rake Sootblower

- Tidak ada putaran pada poros pipa
- Tipe sootblower seperti ini digunakan diatas pipa-pipa boiler
- Penyemprotan hanya di lakukan satu arah.

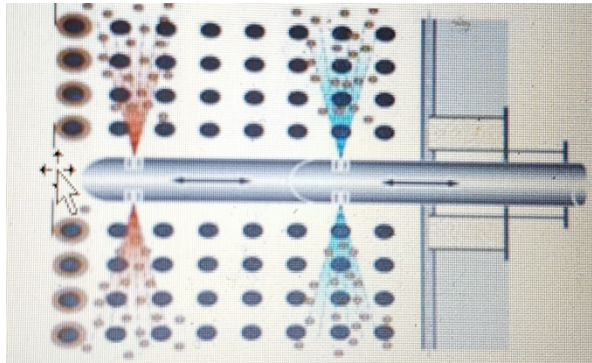


Gambar 2.18 *Rake Sootblower*.



2.7.6 Multi Media Sootblower

- Poros pipa hanya bergerak maju-mundur.
- Media yang di hembuskan adalah udara, uap air dan air.



Gambar 2.19 Multi Media Sootblower.

2.8 Cara Pengoperasian Sootblower

Secara umum ada dua cara pengoperasian *sootblowing* yaitu secara *automatis* dan secara manual.

a. Secara *Automatis*(Auto mode)

Bila operasai yang dipilih adalah secara *automatis*, maka *push button* ditekan dan urutan kerjanya adalah sebagai berikut:

Block valve akan membuka karena digerakkan oleh motor, kemudian *pressure control valve* akan megatur tekanan, bila tekanan air water masih rendah (belum memenuhi syarat kerja) maka akan indikasinya pada ruang kontrol (*control room*).

Jika tekanan air water sudah siap untuk pengoperasian *sootblowing* maka akan ada indikasinya juga. Ketika kondisi tekanan uap sudah terpenuhi, *push button start* ditekan untuk *sootblowing* yang dikehendaki. Pengoperasian ini sudah di program sehingga proses *sootblowing* akan berjalan secara *automatis* dari awal hingga selesai, dan bila selama proses berlangsung terjadi gangguan, maka akan ada indikasi dimana akan ditunjukkan juga lokasi gangguan pada indikator tersebut seperti pada



motor bila terjadi *overload*, *stall* dan sebagainya. Bila proses *sootblowing* secara keseluruhan sudah selesai maka *block valve* akan menutup.

b. Secara Manual

Bila memilih secara manual maka urutan prosesnya adalah sebagai berikut:

Push button manual ditekan, sehingga secara keseluruhan indikator motor *block valve*, *pressure control valve*, dan *warm up interval* akan menyala. Hal ini menandakan seluruh sistem pipa saluran uap *sootblowing* sudah terisi air water . Langkah selanjutnya adalah menekan *push button start* sesuai *sootblowing* yang dikehendaki (prosesnya sama seperti *auto mode*).

Pada cara manual ini, *block valve* tetap terbuka setelah proses *sootblowing* selesai. Letak perbedaan dari kedua cara ini adalah pada *block valve*.

2.9 Prinsip Kerja Motor Induksi⁵

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

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

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

Dimana:

E_2 = Tegangan Induksi

f_2 = frekuensi jala-jala

N_2 = banyaknya lilitan

⁵ Zuhail. 2000. Dasar Tenaga Listrik dan Elektronika Daya



ϕ_m = fluks magnet

4. Karena kumparan rotor merupakan rangkaian yang tertutup, ggl (E) akan menghasilkan arus (I).
5. Adanya arus (I) didalam medan magnet menimbulkan gaya (F) pada motor.
6. Bila torsi mula dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk memikul torsi beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
7. Tegangan magnet induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya agar tegangan terinduksi diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator (N_s) dengan kecepatan berputar rotor (N_r).
8. Perbedaan kecepatan antara N_r dan N_s disebut slip (s) dinyatakan dengan :

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\% \dots \dots \dots (2.2)$$

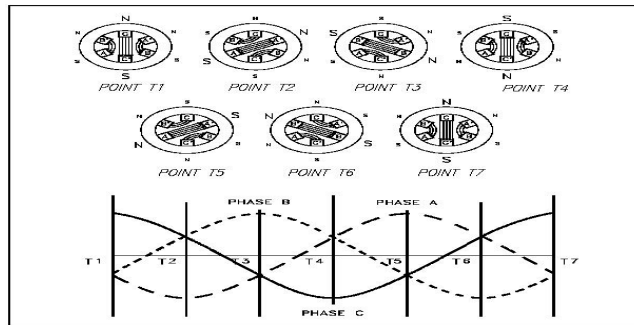
Dimana :

S = Slip motor (%)

N_s = Medan putar stator (Rpm)

N_r = Medan putar rotor (Rpm)

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



Gambar 2.20 Bentuk gelombang dan timbulnya medan putar pada motor induksi 3 fasa.

2.10 Torsi Motor Induksi

Secara umum torsi merupakan gaya yang digunakan untuk menggerakkan sesuatu dengan jarak dan arah tertentu. Dari penjelasan tersebut, maka rumusan torsi adalah sebagai berikut :

$$\tau = \frac{T \times N}{9,55} \dots\dots\dots(2.3)$$

dimana :

τ = Torsi (N.m)

N = Kecepatan putaran rotor (Rpm)

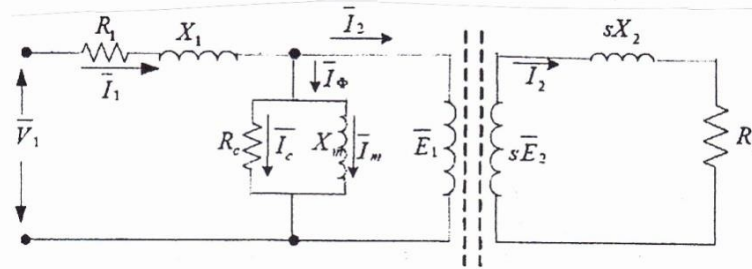
P = Daya (Kw)

975 = Konstantas untuk daya motor (Kw)

2.11 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi⁶

Motor Induksi 3-fasa ini dapat dianalisa berdasarkan rangkaian ekuivalen tanpa harus mengoperasikan motor. Kerja motor induksi seperti juga kerja transformator adalah berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Oleh karena itu, motor induksi dapat dianggap transformator dengan rangkaian sekunder yang berputar. Rangkaian pengganti motor induksi dapat dilihat pada gambar dibawah ini :

⁶ Zuhail, 1991. Dasar Tenaga Listrik Hal : 71



Gambar 2.21 Rangkaian pengganti motor induksi

Untuk menentukan rangkaian ekuivalen dari motor 3 fasa pertama-tama perhatikan keadaan pada stator. Gelombang fluks pada celah udara yang berputar sinkron membangkitkan GGL lawan 3 fasa yang seimbang di dalam fasa-fasa stator. Besarnya tegangan terminal stator berbeda dengan GGL lawan sebesar jatuh tegangan pada Impedansi (Z) bocor stator, sehingga dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$V_1 = E_1 + I_1 (R_1 + jX) \text{ Volt} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

V_1 = Tegangan terminal stator (Volt)

E_1 = Ggl lawan yang dihasilkan oleh fluks celah udara resultan (Volt)

I_1 = Arus stator (Amper)

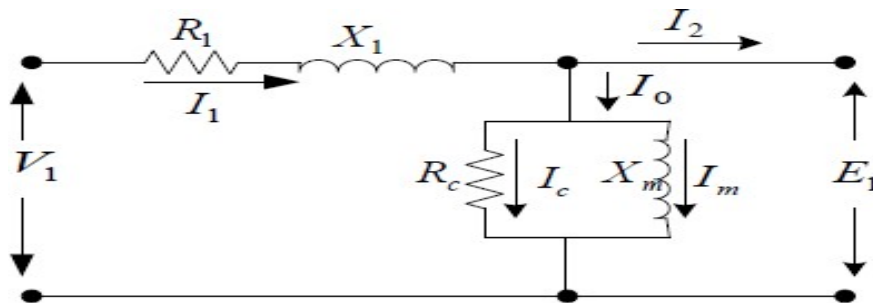
R_1 = Resistansi efektif stator (Ohm) X_1 = Reaktansi bocor stator (Ohm)

Seperti halnya transformator, arus stator dapat dipecah menjadi 2 komponen, yaitu komponen beban dan komponen peneralan. Komponen beban I_2 menghasilkan suatu fluks yang akan melawan fluks yang diakibatkan arus rotor.

Komponen peneralan $I\Phi$ merupakan arus stator tambahan yang diperlukan untuk menghasilkan fluks celah udara resultan. Arus peneralan dapat dipecah menjadi komponen rugi-rugi inti I_c yang se-fasa dengan E_1 dan komponen



magnetisasi I_m yang tertinggal dari E_1 sebesar 90° . Sehingga dapat dibuat rangkaian ekivalen pada stator seperti gambar dibawah ini :



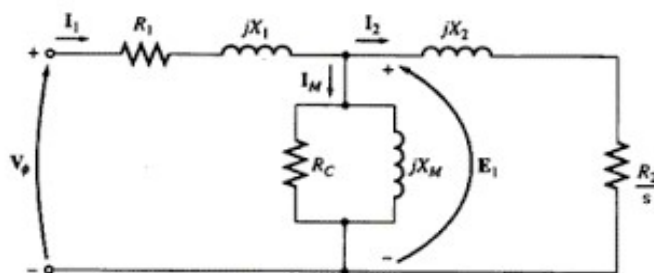
Gambar 2.22 Rangkaian Ekivalen Stator

Pada rotor belitan, belitan yang dililit sama banyaknya dengan jumlah kutub dan phasa stator. Jumlah lilitan efektif tiap phasa pada lilitan stator banyaknya a x jumlah lilitan rotor. Bandingkan efek magnetis rotor ini dengan yang terdapat pada rotor ekivalen magnetic yang mempunyai jumlah lilitan yang sama seperti stator. Untuk kecepatan dan fluks yang sama, hubungan antara tegangan E_{rotor} yang diimbaskan pada rotor yang sebenarnya dan tegangan E_{2s} yang diimbaskan pada rotor ekivalen adalah sebagai berikut:

$$E_{2s} = a E_{rotor} \dots\dots\dots(2.5)$$

Bila rotor-rotor akan diganti secara magnetis, lilitan amper masing-masing harus sama dan hubungan antara arus rotor sebenarnya I_{rotor} dan arus I_{2s} pada rotor ekivalen haruslah :

$$\frac{I_{2s}}{a} = I_{rotor} \dots\dots\dots(2.6)$$



Gambar 2.23 Rangkaian Ekivalen Motor induksi



Dari rangkaian ekuivalen (Gambar B.11) dibawah ini I_1 merupakan arus yang mengalir pada kumparan stator yang terbagi arus I_m dan I_2 , dimana untuk mencari besarnya arus yang mengalir pada saat pembebanan.

V_ϕ = Tegangan sumber perfasa pada kumparan stator

R_1 = Resistansi kumparan stator

jX_1 = Reaktansi Induktif kumparan stator

R_c = Tahanan Inti Besi

R_2 = Resistansi kumparan rotor dilihat dari sisi stator

jX_2 = Reaktansi Induktif rotor dilihat dari sisi stator

jX_m = Reaktansi magnet pada Motor

I_1 = Arus kumparan stator

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

2.12 Pengertian Daya⁸

Daya dalam tegangan AC pada setiap saat sama dengan perkalian dari harga arus dan tegangan pada saat itu. Jika arus dan tegangan bolak-balik satu fasa, maka daya dalam satu periode sama dengan perkalian dari arus dan tegangan efektif. Tetapi jika ada reaktansi dalam rangkaian arus dan tegangan tidak satu fasa sehingga selama siklusnya biasa terjadi arus negatif dan tegangan positif.

Secara teoritis daya terdiri dari tiga yaitu daya aktif, daya reaktif, dan daya semu yang pengertiannya adalah sebagai berikut :

- Daya aktif (P) adalah daya yang diubah menjadi energy, persatuan waktu atau dengan kata lain adalah daya yang benar-benar terpakai yang dihasilkan oleh komponen resistif, satuannya adalah Watt (W).
- Daya reaktif (Q) adalah daya yang ditimbulkan oleh komponen reaktansi. Daya reaktif ditentukan dari reaktansi yang menimbulkannya, dapat

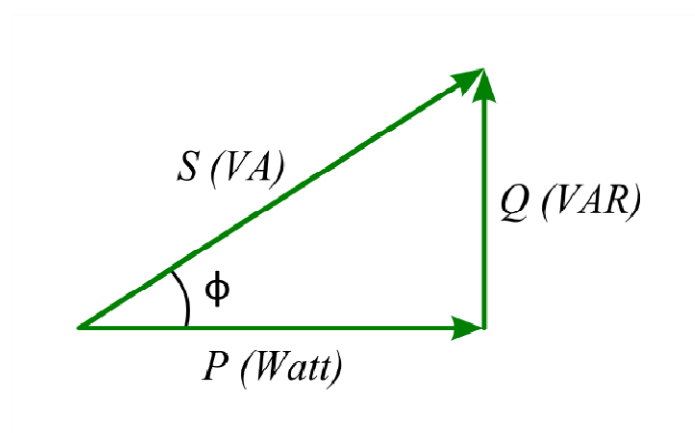
⁸ Cekdin, Taufik. 2013. Transmisi Daya Listrik. Yogyakarta. Hal:16



berupa reaktansi induktif (X_L) dan 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).

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



Gambar 2.24 Segitiga daya

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

$$P = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos\phi \dots\dots\dots(2.7)^9$$

$$S = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \sin\phi \dots\dots\dots(2.8)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana,

P = Daya Aktif (Watt)

S = Daya Semu (VA)

Q = Daya Reaktif (VAR)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

⁹ Zuhail. 1991. Dasar Tenaga Listrik. Hal: 74



2.13 Rugi – Rugi Pada Motor Induksi

Motor – motor listrik adalah suatu alat untuk mengkonversikan energi listrik menjadi energi mekanis. Keadaan ideal dalam sistem konversi energi, yaitu mempunyai daya *output* tepat sama dengan daya input yang dapat dikatakan efisiensi 100%. Tetapi pada keadaan yang sebenarnya, tentu ada kerugian energi yang menyebabkan efisiensi dibawah 100%. Dalam sistem konversi energi elektro mekanik yakni dalam operasi motor – motor listrik terutama pada motor induksi, total daya yang diberikan sama dengan daya yang diterima, dikurang dengan kerugian daya yang terjadi, atau :

$$P_{out} = P_{in} - P_{rugi-rugi} \dots\dots\dots (2.10)^{10}$$

Dimana

- P_{in} : Total daya yang diterima motor
- P_{out} : Daya yang diberikan motor untuk melakukan kerja
- $P_{rugi-rugi}$: Total kerugian daya yang dihasilkan oleh motor

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

Untuk itu perlu diketahui kerugian daya apa saja yang timbul selama motor beroperasi.

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

¹⁰ Nazir, Refdinal. 2017. Teori & Aplikasi Motor Dan generator induksi. Hal: 76


Tabel 2.1 jenis rugi rugi motor induksi 3 phasa (BEE India)¹¹

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

2.13.1 Rugi - rugi inti

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

¹¹Daryanto . 2000. Konsep Dasar Teknik Elektronika Kelistrikan Hal. 184.



berkisar antara 20 - 25% dari total kerugian daya motor pada keadaan nominal.

2.13.2 Rugi - rugi belitan

Rugi - rugi belitan sering disebut rugi - rugi tembaga tetapi pada saat sekarang sudah tidak begitu banyak motor listrik, terutama motor ukuran sangat kecil diatas 750 W, mempunyai belitan stator dari kawat alumunium yang lebih tepat disebut rugi - rugi $I^2 R$ yang menunjukkan besarnya daya yang berubah menjadi panas oleh tahanan dari konduktor tembaga atau alumunium. Total kerugian $I^2 R$ adalah jumlah dari rugi - rugi $I^2 R$ primer (stator) dan rugi - rugi $I^2 R$ sekunder (rotor). rugi - rugi $I^2 R$ dalam belitan sebenarnya tidak hanya tergantung pada arus, tetapi juga pada tahanan belitan dibawah kondisi operasi. Sedang tahanan efektif dari belitan selalu berubah dengan perubahan temperatur, *skin effect* dan sebagainya. Sangat sulit untuk menentukan nilai yang sebenarnya dari tahanan belitan dapat dimasukan kedalam kerugian *stray load*. Pada umumnya rugi - rugi belitan ini berkisar antara 55 - 60% dari total kerugian motor pada keadaan beban nominal.

$$P_{\text{rugi - rugi}} = I^2 \cdot R \dots \dots \dots (2.11)^{12}$$

2.14 Efisiensi

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

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

¹² Zuhail. 2000. Dasar Tenaga Listrik dan Elektronika Daya. Hal: 94



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

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{rugi-rugi}} \dots\dots\dots (2.12)$$

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

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{rugi-rugi}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.13)^{13}$$

Dimana :

η = Efisiensi (%)

P_{out} = Daya keluaran (Watt)

$P_{Rugi-rugi}$ = Daya Rugi-rugi (Watt)

¹³ Nazir, Refdinal. 2017. Teori & Aplikasi Motor Dan Generator Induksi. Hal 76



Politeknik Negeri Sriwijaya
