



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi 3 Phasa^[9]

Secara umum motor, listrik berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang berupa tenaga putar. Di dalam motor DC, energi listrik diambil langsung dari kumparan armatur dengan melalui sikat dan komutator, oleh karena itu motor DC disebut motor konduksi. Lain halnya pada motor AC, Pada motor AC kumparan rotor tidak menerima energi listrik secara langsung, tetapi secara induksi seperti yang terjadi pada kumparan sekunder transformator. Oleh karena itu, motor AC dikenal dengan motor induksi. Sebenarnya motor induksi dapat diidentikksn dengan transformator yang kumparan primer sebagai kumparan stator atau armatur, sedangkan kumparan sekunder sebagai kumparan rotor.

Motor induksi polyphase banyak digunakan dikalangan industri, ini berkaitan dengan beberapa keuntungan dan kerugian.

Keuntungan :

- a. Sangat sederhana dan daya tahan kuat (konstruksi hampir tidak pernah terjadi kerusakan, khususnya tipe squirrel cage).
- b. Harga relatif murah dan perawatan mudah.
- c. Efisiensi tinggi. Pada kondisi berputar normal, tidak dibutuhkan sikat dan karenanya rugi daya yang diakibatkannya dapat dikurangi.
- d. Tidak memerlukan *starting* tambahan dan tidak harus sinkron.

Kekurangan :

- a. Kecepatan tidak dapat berubah tanpa pengorbanan efisiensi.
- b. Tidak seperti motor DC atau motor shunt, kecepatannya menurun seiring dengan tambahan beban.

2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi^[5]

Pada dasarnya ada beberapa prinsip penting pada motor induksi yaitu :



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

$$n_s = \frac{120}{p} f \dots\dots\dots(2.1)$$

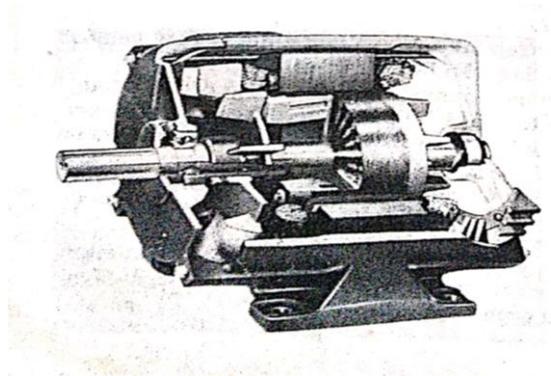
2. Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor.
3. Akibatnya pada batang konduktor dari rotor akan timbul GGL induksi.
4. Karena batang konduktor merupakan rangkaian yang tertutup maka GGL akan menghasilkan arus (I).
5. Adanya arus (I) di dalam medan magnet akan menimbulkan gaya (F) pada rotor.
6. Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
7. Seperti yang telah dijelaskan, G G L induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya agar GGL induksi tersebut timbul, diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator (ns) dengan kecepatan putar rotor (nr).

8. Perbedaan kecepatan antara nr dan ns disebut *slip* (s), dinyatakan dengan :

$$s = \frac{ns - nr}{ns} 100 \% \dots\dots\dots(2.2)$$

9. Bila nr = ns, GGL induksi tidak akan timbul dan arus tidak mengalir pada batang konduktor (rotor), dengan demikian tidak dihasilkan kopel.
10. Dilihat dari cara kerjanya, motor induksi disebut juga sebagai motor tak serempak atau asinkron.

2.3 Konstruksi Motor Induksi 3 Fasa^[3]



Gambar 2.1 Konstruksi Motor Induksi 3 fasa

Inti stator terbuat dari lapis-lapis pelat-baja beralur yang didukung dalam rangka stator yang terbuat dari besi tuang atau pelat-baja yang dipabrikasi. Lilitan-lilitan, sama halnya dengan lilitan stator dari generator sinkron, diletakkan dalam alur stator yang terpisah 120 derajat listrik. Lilitan fase ini bisa tersambung delta ataupun Y.

Rotor dari motor sangkar-tupai adalah konstruksi dari inti berlapis dengan konduktor dipasangkan paralel, atau kira-kira paralel, dengan poros dan mengelilingi permukaan inti. Konduktornya tidak terisolasi dari inti, karena arus rotor secara alamiah akan mengalir melalui tahanan yang paling kecil, yaitu konduktor rotor. Pada setiap ujung rotor, konduktor rotor semuanya dihubungkan dengan cincin-ujung. Konduktor rotor dari cincin-ujung serupa dengan sangkar-tupai yang berputar sehingga dinamakan demikian.

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 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.



Motor rotor-lilitan atau motor cincin-slip berbeda dengan motor sangkar-tupai dalam hal konstruksi rotornya. Seperti namanya, rotor dililit dengan lilitan berisolasi serupa dengan lilitan stator. Lilitan fase rotor dihubungkan secara Y dan masing-masing fase ujung terbuka dikeluarkan ke cincin-slip yang terpasang pada poros rotor. Ketiga cincin-slip dan sikat-sikat dapat dilihat berada sebelah kiri lilitan rotor. Lilitan rotor tidak dihubungkan ke pencatu. Cincin-slip dan sikat-sikat semata-mata merupakan penghubung tahanan kendali-variabel luar ke dalam rangkaian rotor.

Motor rotor-lilitan kurang banyak digunakan dibanding dengan motor sangkar-tupai karena harganya mahal dan biaya pemeliharaannya lebih besar.

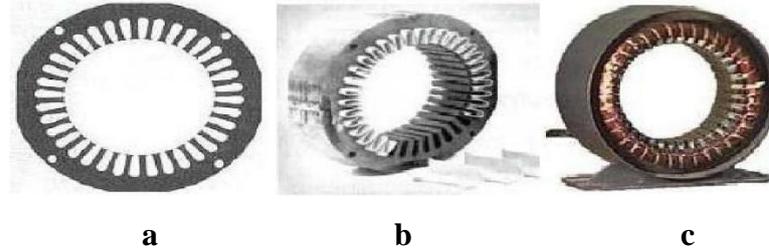
Motor telah dikelompokkan menurut perlindungan terhadap lingkungan dan fasa pendinginan oleh *National Electrical Manufacturers Association (NEMA)*. Ketiga kelas umumnya yaitu motor terbuka, motor terkurung rapat, dan motor dengan lilitan disegel atau dikapsulkan.

Penyelubungan motor terbuka dilakukan untuk beberapa maksud perlindungan. Motor anti tetes terbuka dibuat sedemikian sehingga operasinya tidak terganggu bilaman ada tetesan cairan atau partikel padat menumbuk atau masuk ke selubung dari berbagai sudut antara 1 sampai 15° ke arah bawah dari atas. Motor-motor yang dilindungi mempunyai bukaan yang terlindungi untuk mencegah terjadinya kontak yang taksengaja dengan bagian-bagian yang dialiri listrik atau bagian yang berputar. Motor yang dilindungi terhadap cuaca mempunyai bukaan ventilasi sedemikian sehingga kemungkinan masuknya hujan, salju, atau partikel yang ada di udara adalah kecil sekali.

Motor berselubung rapat diselubungi untuk mencegah pertukaran bebas dari udara antara bagian dalam dan luar pengurung. Mereka dikelompokkan menjadi berselubung rapat tanpa ventilasi, berselubung rapat dengan pendinginan kipas, anti-ledak, anti-air, dan beberapa lagi subkelompok lain yang serupa.

Motor dengan lilitan yang tersegel atau dikapsulkan yang mempunyai lilitan yang dikapsulkan atau disegel dengan isolasi damar atau bahan yang serupa untuk melindungi lilitan tersebut dari berbagai kondisi lingkungan.

Berikut ini contoh lempengan laminasi inti, lempengan inti yang telah disatukan, belitan stator yang telah dilekatkan pada cangkang untuk motor induksi tiga fasa.



- a) Lempengan inti
- b) Tumpukan inti dengan kertas isolasi pada beberapa alurnya
- c) Tumpukan inti dan belitan dalam cangkang stator

Gambar 2.2 Komponen Stator Motor Induksi 3 Fasa

2.3.1 Stator

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

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

- a. Rangka motor (*Frame*)

Fungsi utama dari rangka atau *frame* adalah sebagai tempat mengalirnya fluks magnet yang dihasilkan oleh kutub - kutub magnet, karena itu beban motor dibuat dari bahan feromagnetik. Disamping itu badan motor ini berfungsi untuk meletakkan alat-alat tertentu dan melindungi bagian-bagian



motor lainnya. Biasanya pada motor terdapat *name plate* yang bertuliskan spesifikasi umum dari motor.

b. 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 ini berfungsi untuk mengalirkan arus listrik agar terjadi proses elektromagnetis.

c. Sikat

Fungsi dari sikat adalah sebagai jembatan bagi aliran arus dari sumber. Selain itu sikat berperan penting untuk terjadinya komutasi, agar gesekan antara sikat dan komutator sehingga sikat harus lebih lunak dari komutator. Biasanya sikat terbuat dari bahan arang.

d. Komutator

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

2.3.2 Rotor

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

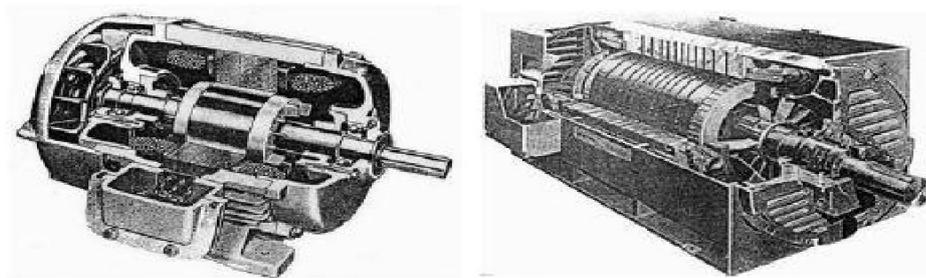
Besarnya ggl imbas ini berbanding lurus dengan kecepatan relatif antara medan putar dan penghantar rotor. Penghantar – penghantar dalam rotor yang membentuk suatu rangkaian tertutup, merupakan rangkaian pelaju arus rotor dan searah dengan hukum yang berlaku yaitu hukum Lenz.

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

Berdasarkan bentuk rotornya, motor induksi terbagi menjadi dua kelompok besar, yaitu :

a. Motor Induksi Rotor Sangkar Tupai (*Squirrel Cage*)

Motor induksi rotor sangkar tupai memiliki konstruksi yang sangat sederhana, dimana rotornya dari inti berlapis dengan konduktor dipasang paralel atau kira-kira paralel dengan poros yang mengelilingi permukaan inti. Konduktornya tidak terisolasi dari inti, karena arus rotor secara ilmiah akan mengalir melalui tahanan yang paling kecil dari konduktor rotor. Batang rotor dan cincin ujung sangkar yang lebih kecil adalah tembaga atau alumunium dalam satu lempeng dengan inti rotor. Dalam motor yang lebih besar, batang rotor tidak dicor melainkan dibenamkan dalam alur kemudian dilas dan ditempatkan paralel terhadap poros motor tetapi kerap kali dimiringkan. Hal ini akan menghasilkan torsi yang lebih seragam dan juga mengurangi dengung sewaktu motor sedang berputar.



Gambar 2.3 Motor Induksi Rotor Sangkar

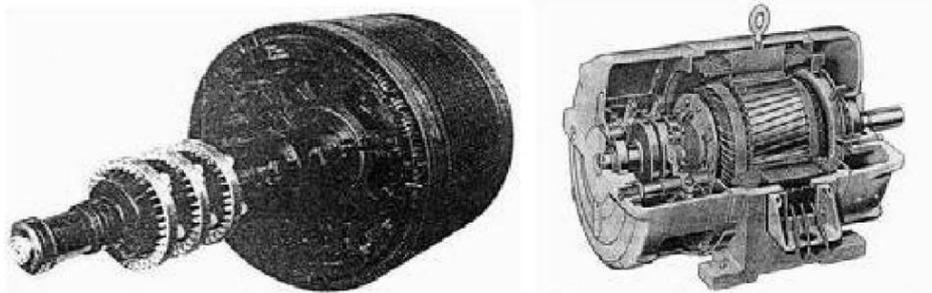
Seperti terlihat pada gambar diatas, motor induksi jenis ini mempunyai rotor dengan kumparan yang terdiri dari beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa sehingga menyerupai sangkar tupai, konstruksi rotor jenis ini sangat sederhana jika dibandingkan dengan rotor pada jenis motor listrik lainnya.

Dengan demikian harganya pun relatif lebih murah dibandingkan dengan harga motor listrik jenis lainnya, namun demikian pada motor ini tidak mungkin diberikan pengaturan tahanan luar seperti pada motor induksi rotor belit.

Untuk membatasi arus *start* yang besar, tegangan sumber harus dikurangi dan biasanya digunakan autotransformator atau saklar Y - D. Tetapi berkurangnya arus *start* akan mengakibatkan berkurangnya kopel mula, untuk mengatasi ini digunakan rotor jenis sangkar ganda.

b. Motor Induksi Rotor Lilit (*Wound Rotor*)

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 variable luar kedalam rangkaian motor. Motor rotor lilit kurang banyak digunakan dibandingkan dengan motor rotor sangkar karena harganya mahal dan biaya pemeliharaan lebih besar.



Gambar 2.4 Motor Induksi Rotor Belitan

Seperti yang terlihat pada gambar diatas, 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 tahanan luar yang dapat diatur ini dihubungkan ke rotor melalui cincin, selain untuk menghasilkan kopel 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.

2.4 Perbedaan Motor Induksi Rotor Sangkar Dengan Rotor Lilit

Beda motor induksi rotor sangkar dengan rotor lilit dari segi karakteristik dan juga jumlah kutubnya. Jika dibandingkan rotor sangkar dan rotor lilit perbedaannya sebagai berikut :

1. Karakteristik motor induksi rotor sangkar tidak melalui *slip ring*, sedang pada motor induksi rotor lilit masih memungkinkan variasi karakteristiknya dengan cara menambahkan rangkaian tahanan luar dengan melalui *slip ring*.
2. Jumlah kutub pada rotor sangkar menyesuaikan pada belitan statornya, sedangkan jumlah kutub pada rotor lilit sudah tertentu.

Keuntungan dari motor induksi dengan rotor lilit adalah bahwa motor jenis ini dapat ditambah dengan tahanan luar. Hal ini sangat menguntungkan untuk *starting* motor karena bisa memperkecil arus *start* motor yang besar dan juga bisa sebagai pengatur kecepatan putaran motor.

2.5 Hubungan Bintang dan Segitiga Motor Fasa Tiga^[1]

Jaringan distribusi tegangan rendah PLN umumnya memiliki tegangan 220/380 V atau 127/220 V. Di kemudian hari untuk distribusi lokal hanya akan digunakan sistem tegangan 220/380 V saja.



Sebuah motor harus digunakan dalam hubungan bintang atau hubungan segitiga, tergantung pada tegangan jaringannya.

Tegangan yang dihubungkan ke motor biasanya dinyatakan pada pelat merknya, misalnya 220/380 V atau 380/660 V.

Tegangan yang lebih rendah ialah tegangan yang harus dihubungkan dengan kumparan - kumparan motor.

Kalau sebuah motor diberi tanda tegangan 380/660 V misalnya, kumparan- kumparannya harus mendapat 380 V. Jadi kalau dihubungkan dengan jaringan 220/380 V, motor ini harus digunakan dalam hubungan segitiga. Kalau digunakan dalam hubungan bintang, kumparan - kumparannya hanya akan mendapat 220 V saja.

Tegangan yang terlalu rendah juga dapat merusak motor. Perbedaan tegangan atau frekuensi yang tidak melebihi + 5% atau - 5% dari nominalnya, biasanya tidak membahayakan motor.

2.6 Pengasutan Dengan Tahanan Mula

Tidak seperti pengasutan pada motor rotor sangkar, pengasutan dengan tahanan mula dilakukan pada motor rotor belitan (*slip ring* / cincin geser). Kumparan rotor motor dihubungkan pada cincin geser dan sikat arang pada tahanan mula.

Pada saat *start* kumparan rotor disambung seri dengan tahanan atur dalam kedudukan penuh / maksimum, hal ini membuat arus rotor berkurang, sehingga arus *start* dari sumber ikut menurun.

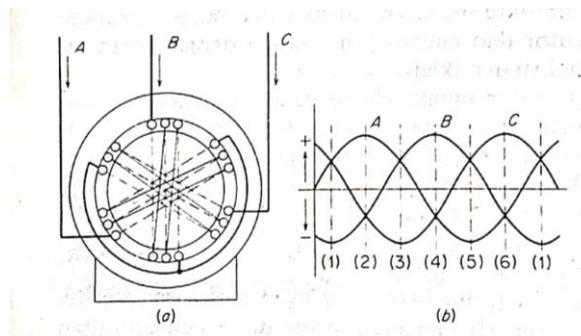
Pada saat berputar penuh tahanan mula jalan terhubung singkat, menyebabkan kumparan jangkar hubung singkat dengan adanya peralatan mekanik kontak khusus yang terdapat pada sumbu. Sehingga motor berputar seperti umumnya type motor induksi, dimana rotor dalam hubung singkat.

Tahanan mula sering dibuat dengan lima tingkat atau lebih dengan harga yang berbeda – beda, dimana jika nilai hambatan/ tahanan mula semakin besar maka arus *start* akan semakin kecil.

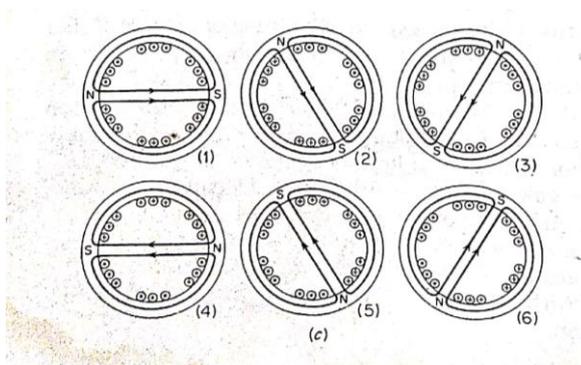
2.7 Medan Magnetik Berputar^[3]

Bekerjanya motor induksi bergantung pada medan magnetik putar yang ditumbulkan dalam celah udara motor oleh arus stator. Lilitan stator tiga fasa dililitkan dengan lilitan fasanya berjarak 120 derajat listrik. Penempatan lilitan stator yang disederhanakan dari motor hubungan Y dua kutub. Jika lilitan diberi energi catu tiga fasa, arus fasa berubah dalam waktu fasanya, dan fluksi yang berdenyut dibangun oleh maing-masing fasanya .

Untuk melihat bagaimana medan putar dihasilkan, maka dapat diambil contoh sebuah motor induksi tiga fasa yang kemudian menghasilkan medan putar, seperti terlihat pada gambar 2.5 dan 2.6



Gambar 2.5 Medan Putar



Gambar 2.6 Hasil distribusi fluksi dalam motor pada saat yang berturtan ditunjukkan oleh angka pada kurva.



2.8 Slip

Kecepatan Putaran rotor motor induksi harus lebih lambat dari kecepatan sinkronnya supaya konduktor pada rotor selalu dipotong oleh medan putar, sehingga pada rotor timbul tegangan induksi yang akan menghasilkan arus induksi pada rotor. Arus induksi ini kemudian berinteraksi dengan fluks yang dihasilkan stator sehingga menghasilkan torsi. Selisih antara kecepatan putaran rotor dengan kecepatan sinkronnya disebut *slip* (s). Pada umumnya *slip* dinyatakan dalam persen dari kecepatan sinkron.

$$Slip (s) = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

Ns = Kecepatan putar medan stator (rpm).

Nr = Kecepatan berputar rotor (rpm).

S = Slip (%)

2.9 Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa

Efisiensi dari suatu motor induksi didefinisikan sebagai ukuran keefektifan motor induksi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang dinyatakan sebagai perbandingan/ rasio daya *output* (keluaran) dengan daya *input* (masukan), atau dapat juga dirumuskan dengan :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

η = Efisiensi (%)

P_{out} = Daya yang diterima motor untuk melakukan kerja (W)

P_{in} = Total daya yang diterima motor (W)

Dari persamaan di atas, perlu dipelajari faktor - faktor yang menyebabkan efisiensi selalu dibawah 100%. Untuk itu perlu diketahui kerugian daya apasaja 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, dimana rugi - rugi rotasi dibagi menjadi dua jenis, yaitu :
 - a. Rugi - rugi mekanis akibat putaran.
 - b. Rugi-rugi inti besi akibat kecepatan putaran dan fluks medan.

2.10 Pemeliharaan Motor Induksi^[8]

Umumnya motor induksi dirancang agar prosedur perawatan diminimalkan, sehingga pengguna motor induksi tersebut tidak banyak menghabiskan waktu dan tenaganya untuk menjaga kondisi motor tersebut agar tetap dapat diandalkan.

Pemeliharaan motor induksi ini meliputi pemeliharaan bagian luar motor, pelumasan dan bagian dalam motor. Untuk bagian luar motor, yang perlu diperhatikan adalah kebersihan rangka motor dan bagian sirip-sirip pendingin motor, serta kelengkapannya, seperti keberadaan kapasitor untuk jenis motor kapasitor. Dengan kebersihan yang terjaga, maka proses pendinginan (cooling) tetap dapat dijaga, sehingga dalam kondisi kerja motor tidak mengalami panas yang berlebih (over-heat), dan ini bisa mempertahankan kondisi kerja motor agar tetap prima untuk jangka waktu yang lama. Selain itu rangka motor yang catnya sudah mengelupas sebaiknya dicat kembali, agar rangka motor tetap awet.

Selain itu perlu diperhatikan pula masalah pelumasan. Umumnya pelumasan ini berkaitan dengan keadaan atau kondisi bantalan (bearing). Kondisi bantalan ini bisa diperiksa dengan mendengarkan bunyi ketika bantalan rotor berputar, bila bunyi yang dihasilkan masih halus (tidak bising), maka kondisi pelumasan bantalan tersebut masih dalam keadaan baik. Kadang-kadang perlu pula dilakukan dengan memutar poros (shaft) rotor, untuk merasakan apakah putaran masih ringan atau sudah macet/seret. Selain dari hal tersebut adalah perlu untuk melaksanakan pembongkaran untuk perbaikan (over-haul) secara periodik sesuai dengan masa pakai bantalan yang dijelaskan oleh pabrik pembuat bantalan.



Sebaiknya penggantian bantalan tersebut disesuaikan dengan petunjuk pabrik pembuat bantalan, begitu pula dengan jenis pelumas yang harus digunakan.

Untuk bantalan yang salah satu sisi yang tertutup, pelumasan tidak perlu dilakukan, setelah masa pakainya habis, bisa langsung diganti dengan yang baru. Untuk bantalan dengan salah satu sisi, atau kedua sisinya terbuka perlu diberikan pelumasan. Untuk bantalan yang salah satu sisinya tertutup, peletakan pada shaft rotornya dilakukan dengan posisi sisi yang tertutup menghadap bagian dalam, sedangkan sisi yang terbuka menghadap ke bagian luar.

Hal penting lainnya yang perlu diperhatikan adalah masalah kebersihan bagian dalam motor, ini dapat dilakukan secara periodik untuk jangka waktu yang cukup lama, karena umumnya rangka motor cukup rapat untuk mencegah debu masuk ke bagian dalam motor. Apabila dilakukan pembongkaran untuk perbaikan, bersihkan bagian dalam motor, kumparan rotor dan stator dengan lap kering dan penyedot debu (*vaccum cleaner*). Lakukan juga pengukuran tahanan isolasi motor tersebut dengan Mega-Ohm-meter (*megger*). Tahanan isolasinya minimal harus sebesar 1000Ω per 1 Volt tegangan yang diaplikasikan. Untuk sumber daya yang tegangannya sebesar $380 \times 1000 \Omega = 380 \text{ k}\Omega$. Apabila hasil pengukuran tahanan isolasinya kurang baik, coba panaskan kumparan motor, kalau perlu kumparannya diberikan cairan laminai ulang (*varnish*).

Untuk menghindari kelembaban pada kumparan motor, kumparan motor tersebut perlu dipanasi. Demikian pula untuk motor-motor yang jarang dipakai kalau bisa dioperasikan secara periodik untuk pemanasan kumparan motornya agar tidak lembab.

2.11 Tahanan isolasi

Tahanan isolasi atau *Insulation Resistance* (IR) merupakan ukuran konduktivitas atau kemampuan isolasi belitan menahan besar arus yang dilewati. Pengujian tahanan isolasi diperlukan untuk mengetahui kondisi isolasi akibat pengaruh kelembaban, kontaminasi, dan cacat (*defect*) yang serius pada isolasi. Pengujian menggunakan metode ini sangat bergantung pada volume dari bahan



isolasi yang akan diujikan. Tahanan isolasi dengan sendiri dapat menunjukkan kelemahan dari bahan isolasi maupun total kekuatan dielektrik suatu bahan isolasi (Gill, 2009). Kualitas tingkat isolasi sangat bergantung beberapa faktor seperti pengaruh temperatur, kelembaban, waktu operasi dan faktor lingkungan. Prosedur pengujian tahanan isolasi yang direkomendasikan untuk mesin elektromekanis telah diatur dalam *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Std 43-2013* (Committee, 2013).

Nilai tahanan isolasi dirumuskan pada persamaan (2.5).

$$IR = \frac{E(t)}{I(t)} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana IR merupakan tahanan isolasi dalam megaohm, $E(t)$ nilai pembacaan tegangan DC dalam volt dan $I(t)$ adalah nilai arus dalam *mikroampere seconds* setelah pemberian tegangan uji. Pengujian tahanan isolasi memiliki tiga jenis tes yang umum dilakukan (Gill, 2009) :

a. *Short-Time Reading*

Bertujuan untuk mengukur tahanan isolasi dalam waktu yang singkat yaitu sekitar 30 sampai 60 detik. Pengecekan secara fisik dilakukan secara sekilas saja untuk memeriksa kondisi fisik isolasi. Setelah itu dilakukan beberapa kali pengambilan data pengujian dalam hitungan detik. Hasil perbandingan hasil pembacaan dengan hasil pembacaan pengujian sebelum sangat penting. Apabila terdapat indikasi hasil pengujian yang terus menurun maka mengindikasikan terjadi kerusakan.

b. *Time-Resistance Reading*

Metode *time-resistance* ini sangat tergantung pada temperatur dan ukuran media isolasi. Rasio dari pembacaan *time-resistance reading* dapat menunjukkan kondisi sistem isolasi. Sistem isolasi yang baik akan menunjukkan kenaikan nilai tahanan isolasi selama periode waktu pengujian *megger* dilakukan. Sedangkan sistem isolasi yang terkontaminasi oleh



kelembaban, kotor, terkelupas akan menunjukkan hasil pengujian yang rendah. Pada sistem isolasi yang baik, efek dari *absorption current* akan mengurangi pengaruh waktu. Sedangkan pada sistem isolasi yang buruk efek *absorption current* akan dipengaruhi oleh *high leakage current*.

c. *PI Test*

pada metode pengujian ini memiliki spesialisasi dari *dielectric absorption test*.

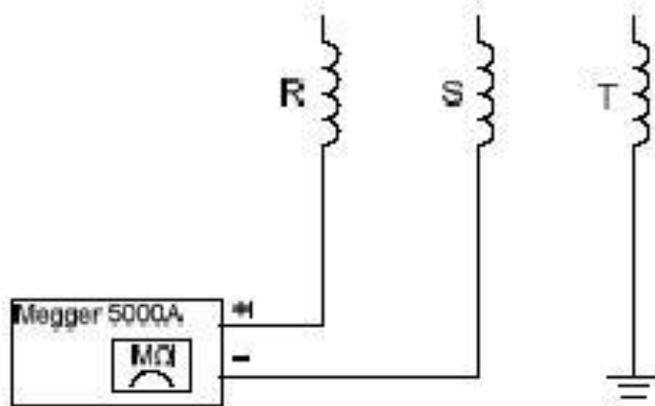
Polarization Index Test

Nilai *Insulation Resistance* (IR) atau tahanan isolasi pada stator diukur pada suhu ruangan 40°C, pengukuran dilakukan dengan cara melepas hubungan way (Y) motor terhadap ground terlebih dahulu. Pengukuran dilakukan pada tiap fasa yaitu fasa R, S, dan T masing-masing di ukur langsung terhadap ground. Sehingga megger yang digunakan yaitu megger fasa terhadap ground.

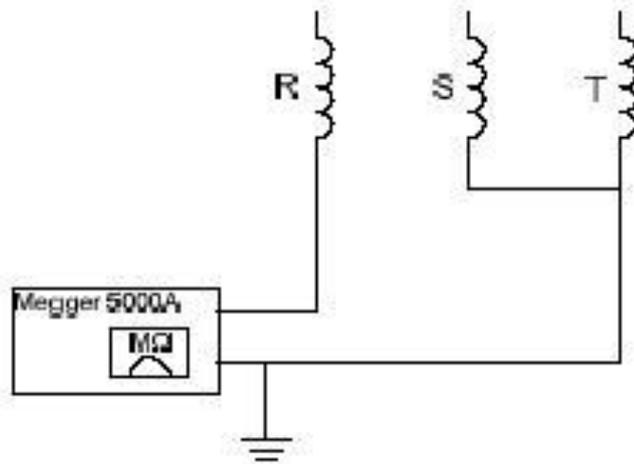
Pengujian ini dilakukan untuk mendeteksi adanya kelemahan isolasi tahanan. Pengujian isolasi secara rutin dapat dilakukan dengan menggunakan Megger yang pembacaannya langsung dalam megghoms. Tahanan isolasi adalah ukuran kebocoran arus yang melalui isolasi. Tahanan berubah-ubah karena pengaruh temperatur dan lamanya tegangan yang diterapkan pada lilitan tersebut, oleh karena itu faktor-faktor tersebut harus dicatat pada waktu pengujian.

Moisture dapat juga terdapat pada permukaan isolasi, atau pada lilitan. Oleh sebab itu, pengujian dengan megger sebelum dan sesudah mesin dibersihkan harus dilakukan. Jika nilai tahanan tetap rendah dan lilitan relatif bersih, ada kemungkinan adanya moisture pada lilitan, dan lilitan harus dikeringkan sekurang-kurangnya sampai diperoleh tahanan minimum yang dianjurkan.

2.12 Rangkaian Pengukuran Tahanan Isolasi



Gambar 2.7 Rangkaian Tahanan Isolasi Antarana Fasa Dan Fasa



Gambar 2.8 Rangkaian Tahanan Isolasi Antara Fasa Dan Ground

2.13 Perhitungan Nilai $IR_{rata-rata}$ Pada Setiap Fasa

Nilai $IR_{rata-rata}$ pada masing-masing fasa dihitung dengan rumus:

$$IR_{rata-rata} = \frac{IR}{n} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana :

$IR_{rata-rata}$ = Nilai rata-rata tahanan isolasi

IR = *Insulation Resistance* hasil pengukuran

n = Banyak jumlah data



Dari hasil perhitungan nilai rata-rata *Insulation Resistance* (IR) masing-masing fasa dapat diketahui bahwa nilai tahanan isolasi lilitan stator pada saat sebelum dilakukan pemeliharaan masih dibawah nilai *Insulation Resistance* (IR) minimum yang distandarkan oleh IEEE no 43.

2.14 Perhitungan Nilai Polarization Index (PI)

Polarization Index (PI) adalah salah satu cara untuk mengetahui quality winding motor akibat pengaruh lingkungan, seperti penyerapan air, pengotoran debu dan lain-lain.

Dari data hasil pengukuran *Insulation Resistance* (IR) lilitan motor di atas dapat dihitung nilai PI-nya yaitu; pengukuran IR 10 menit dibagi dengan nilai IR pengukuran menit pertama, secara matematis dapat digambarkan sebagai berikut :

$$PI = \frac{\text{pengukuran IR 10 menit}}{\text{pengukuran IR 1 menit}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana :

PI : *Polarization Index* (Indeks Polarisasi)

IR 10 Menit : Hasil Pengukuran yang ke 10 menit

IR 1 Menit : Hasil Pengukuran yang ke 1 menit

Tabel 2.1 Nilai Minimum *Polarization Index* (PI)^[2]

Thermal Class Rating	Minimum PI
Class A	1.5
Class B	2.0
Class F	2.0
Class H	2.0

Berikut adalah nilai interpretasi dari nilai *Polarization Index* (PI) sebagai acuan untuk menentukan kualitas dari suatu tahanan isolasi pada mesin-mesin listrik:

Tabel 2.2 Nilai interpretasi dari nilai *polarization index* (PI)

Nilai PI	Keterangan
< 1.0	Bahaya
1 – 1.5	Buruk
1.5 – 2.0	Diragukan
2.0 – 3.0	Cukup
3.0 – 4.0	Bagus
> 4.0	Sangat Bagus

2.15 Pengujian Tahanan Isolasi

Mengetahui besarnya tahanan isolasi dari suatu peralatan listrik merupakan hal yang penting untuk menentukan apakah peralatan tersebut dapat dioperasikan dengan aman. Secara umum jika akan mengoperasikan peralatan tenaga listrik seperti generator, transformator dan motor, sebaiknya terlebih dahulu memeriksa tahanan isolasinya, tidak peduli apakah alat tersebut baru atau lama tidak dipakai. Untuk mengukur tahanan isolasi digunakan Megger (Mega Ohm Meter). Isolasi yg dimaksud adalah isolasi antara bagian yang bertegangan dengan bertegangan maupun dengan bagian yang tidak bertegangan seperti body / ground.

Isolasi mesin yang perlu diuji adalah:

1. Isolasi yang mengisolasi belitan stator dengan badan mesin.
2. Isolasi yang mengisolasi belitan rotor dengan badan mesin.
3. Isolasi yang mengisolasi antar belitan stator.^[5]

Pada dasarnya pengukuran tahanan isolasi belitan stator motor adalah untuk mengetahui besar (nilai) kebocoran arus (*leakage current*) yang terjadi pada isolasi stator motor. Kebocoran arus yang menembus isolasi peralatan listrik memang tidak dapat dihindari. Oleh karena itu, salah satu cara meyakinkan bahwa motor cukup aman untuk dipakai adalah dengan mengukur tahanan isolasinya. Adapun kebocoran arus dapat dihitung dengan rumus:



$$I = \frac{V (LL)}{IR_{average}} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana :

- I = Arus Bocor (mA)
- VL-L = Tegangan Line ke Line (V)
- IR_{rata-rata} = Nilai Rata-rata tahanan isolasi (MΩ)

Kebocoran arus yang memenuhi ketentuan yang ditetapkan akan memberikan jaminan bagi motor itu sendiri sehingga terhindar dari kegagalan isolasi.

Menurut rekomendasi IEEE 43-2000, pada temperature 40°C, resistansi minimum isolasi mesin-mesin listrik yang dibuat sebelum tahun 1970 adalah

$$R_{min} = V + 1 \text{ (megaohm)} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dengan V adalah tegangan nominal fasa ke fasa dalam kilovolt. Sedangkan resistansi minimum isolasi mesin-mesin listrik yang dibuat setelah tahun 1970 adalah

$$R_{min} = V + 100 \text{ (megaohm)} \dots\dots\dots(2.10)$$

Direkomendasikan juga bahwa resistansi minimum mesin-mesin listrik yang bertegangan nominal dibawah 1 kv adalah

$$R_{min} = V + 5 \text{ (megaohm)} \dots\dots\dots(2.11) [5]$$

Pengujian ini dilakukan untuk mendeteksi adanya kelemahan isolasi tahanan. Pengujian isolasi secara rutin dapat dilakukan dengan menggunakan Megohmmeter, atau megger yang pembacaannya langsung dalam megohms. Tahanan isolasi adalah ukuran kebocoran arus yang melalui isolasi. Tahanan berubah-ubah karena pengaruh temperatur dan lamanya tegangan yang diterapkan pada lilitan tersebut, oleh karena itu faktor-faktor tersebut harus dicatat pada



waktu pengujian. Tegangan yang diterapkan kalau bisa hanya pada satu fasa saja. Nilai tegangan minimum pengujian yang banyak digunakan dan diterima dikalangan praktisi adalah satu kilovolt sebanding dengan satu (1) megaohm terhadap peralatan listrik yang banyak digunakan pada industri-industri (untuk lilitan stator), dan satu (1) megaohm untuk lilitan rotor setelah dikenai tegangan 500 volt dc selama satu menit. Motor-motor listrik hampir selalu mempunyai nilai lebih tinggi. Tegangan 500 volt dc untuk pengujian ini harus dilakukan terlebih dahulu sebelum pengujian tegangan yang lebih tinggi dilakukan.

Nilai tahanan diatas merupakan nilai minimum yang menunjukkan bahwa keadaan lilitan masih baik, nilai tahanan yang rendah dapat menunjukkan lilitan dalam keadaan kotor atau basah. Moisture dapat juga terdapat pada permukaan isolasi, atau pada lilitan atau pada keduanya.

Oleh sebab itu, pengujian dengan megger sebelum dan sesudah mesin dibersihkan harus dilakukan. Jika nilai tahanan tetap rendah dan lilitan relatif bersih, ada kemungkinan adanya moisture pada lilitan, dan lilitan harus dikeringkan sekurang-kurangnya sampai diperoleh tahanan minimum yang dianjurkan.

2.15.1 Standar Pengukuran / pengujian Tahanan Isolasi

Sistem resistansi isolasi motor yang efektif memiliki resistansi tinggi, biasanya minimal mempunyai standart beberapa mega ohm ($M\Omega$). Sistem isolasi yang buruk memiliki resistansi isolasi yang lebih rendah. Resistansi isolasi optimal untuk motor listrik sering ditentukan oleh spesifikasi pabrik, kekritisian aplikasi di mana motor digunakan, dan lingkungan di mana ia berada.

Secara praktis tidak mungkin menentukan aturan untuk nilai resistansi isolasi minimum motor listrik karena resistansi bervariasi sesuai dengan metode konstruksi, kondisi bahan insulasi yang digunakan, tegangan pengenal, ukuran dan jenis. Aturan umum resistansi/ tahanan isolasi motor adalah 10 Megohm atau lebih.

Tidak ada aturan untuk menentukan nilai resistansi isolasi minimum untuk motor. Sebagian besar data yang tersedia bersifat empiris. Yang tercantum di bawah ini berasal dari grundfos, produsen motor listrik terkemuka. Sistem isolasi motor listrik dikatakan dalam kondisi baik jika:

Tabel 2.3 Standar Resistansi Isolasi

Standar Resistansi Isolasi	Level Isolasi
2 Megohm or less	Bad
2-5 Megohm	Critical
5-10 Megohm	Abnormal
10-50 Megohm	Good
50-100 Megohm	Very good
100 Megohm or more	Excellent

(sumber : grundfos, produsen motor listrik terkemuka)

2.16 Macam-Macam Alat Ukur Tahanan Isolasi

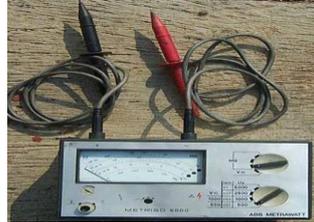


a. METRISO type 5000 A.



b. KYORITSU type

3123



c. METRISO type 5000



d. AEMC type EXTECH (digital).



e. METRISO type 5000 AK (digital).



f. AVO type MJ15



g. HWASHIN type HS-510



h. FLUKE type 1520 (digital).



i. AEMC (analog)

j. AEMC (digital)

Gambar 2.9 Macam-macam Alat Ukur Tahanan Isolasi

2.17 Megger

Megger adalah suatu alat ukur yang paling penting dan sering digunakan untuk mengukur serta menguji besarnya nilai tahanan isolasi dari suatu instalasi listrik atau untuk mengetahui apakah antar kawat pada instalasi itu terdapat hubungan langsung, apakah itu antara kawat fasa dengan fasa ataupun kawat fasa dengan kawat nol (tanah).

Dengan alat ukur ini dapat langsung menunjukkan harga tahanan isolasi yang diharapkan. Prinsip bekerjanya alat ini hampir sama dengan ohm-meter. Perbedaan antara ohm-meter dan mega-ohm meter ini hanya terletak pada besarnya tegangan ukur^[6].



Gambar 2.10 Megger



Keterangan :

1. Saklar pilih (Selector Switch) : tegangan uji megger, uji tegangan batere dan pemutus pasokan.
2. Tombol Range : pilihan jangkau-batas skala pengukuran.
3. Ω LED indicator : LED nyala hijau = pengukuran benar, LED mati = pengukuran salah, batere terlalu lemah.
4. LED nyala : pilihan jangkau-batas skala s.d. T Ω (Tera Ohm) terpilih.
5. LED nyala : pilihan jangkau-batas skala s.d. 100 M Ω terpilih.
6. Skrup koreksi : pengaturan (koreksi) posisi jarum penunjuk pada angka 0.
7. Selector switch (saklar pilih) : pengukuran tegangan atau tahanan isolasi.
8. Analog display : Papan/plat skala penunjukan.
9. Test Prob (-) : Kabel pengukuran kutub (polaritas) negatif.
10. Test Prob (+) : Kabel pengukuran kutub (polaritas) positif.
11. Tempat penyimpanan jack konektor kabel.

Alat penguji tahanan isolasi dipergunakan untuk mengukur tahanan isolasi dari alat-alat listrik maupun instalasi-instalasi. Dengan demikian maka sumber tegangan harus dipilih tidak hanya tergantung dari batas pengukur, akan tetapi juga terhadap tegangan kerja (sistem tegangan) dari peralatan ukur yang sedang diuji isolasinya. Pada umumnya isolasi yang dianggap cukup, untuk tegangan-tegangan rendah, akan tidak dapat bertahan, bila tahanan yang lebih tinggi dipergunakannya. Untuk membangkitkan tegangan yang tetap, maka suatu pengatur kecepatan diperlengkapi di dalam sistem pembangkitannya. Pada umumnya isolasi yang dianggap cukup, untuk tegangan-tegangan rendah, akan tidak dapat bertahan, bila tahanan yang lebih tinggi dipergunakannya. Untuk membangkitkan tegangan yang tetap, maka suatu pengatur kecepatan diperlengkapi didalam sistim pembangkitnya.



Akhir-akhir ini alat pengujian tahanan isolasi yang menggunakan sumber tegangan tinggi, dari tegangan-tegangan tetap sebesar 100 sampai 1000 V, yang didapatkannya dari baterai sebesar 8-12 V, telah dikembangkan. Alat pengujian isolasi ini disebut alat pengujian isolasi dengan baterai ^[4].