

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Motor Induksi

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik (ac) yang paling luas digunakan. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke statornya, dimana arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator.

Motor induksi sangat banyak digunakan di dalam kehidupan sehari-hari baik di industri maupun di rumah tangga. Motor induksi yang umum dipakai adalah motor induksi 3-fase dan motor induksi 1-fase. Motor induksi 3-fase dioperasikan pada sistem tenaga 3-fase dan banyak digunakan di dalam berbagai bidang industri dengan kapasitas yang besar. Motor induksi 1-fase dioperasikan pada sistem tenaga 1-fase dan banyak digunakan terutama untuk peralatan rumah tangga seperti kipas angin, lemari es, pompa air, mesin cuci dan sebagainya karena motor induksi 1-fase mempunyai daya keluaran yang rendah. Bentuk gambaran motor induksi 3-fasa diperlihatkan pada gambar berikut.



Gambar 2.1 Bentuk fisik motor induksi induksi dan struktur motor induksi



Gambar 2.2 Penerapan motor induksi di dunia industri

Data-data motor induksi mengenai daya, tegangan dan data lain yang berhubungan dengan kerja motor induksi dibuatkan pada plat nama (*name plate*) motor induksi. Contoh data yang ditampilkan pada plat nama motor induksi ini diperlihatkan pada gambar 2.3.

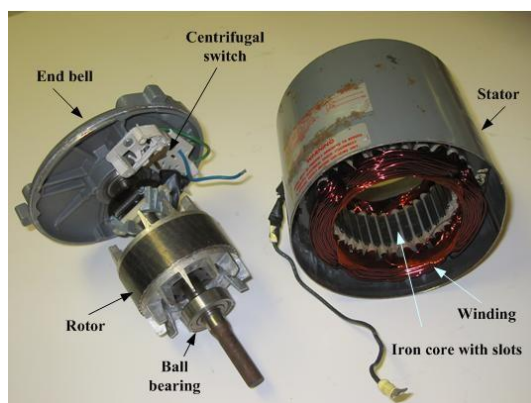
pabrik pembuat	
3~ Motor	Nr.:
Δ 400V	10,7A
5,5kW S1	cos ϕ 0,88
1450 /min	50 Hz
Isol.-KI.F	IP 55
DIN VDE 0530	EN 60034

Gambar 2.3 Contoh data yang ada di plat nama motor induksi

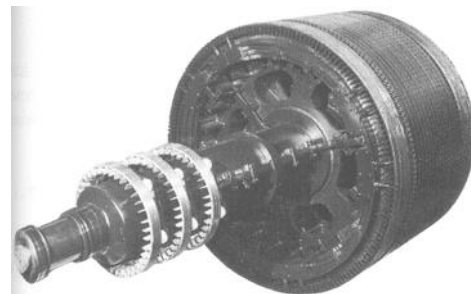
2.2 Konstruksi Motor Induksi

Motor induksi pada dasarnya mempunyai 3 bagian penting seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.4 sebagai berikut:

1. Stator merupakan bagian yang diam dan mempunyai kumparan yang dapat menginduksikan medan elektromagnetik kepada kumparan rotornya.
2. Celah merupakan celah udara: Tempat berpindahnya energi dari stator ke rotor.
3. Rotor merupakan bagian yang bergerak akibat adanya induksi magnet dari kumparan stator yang diinduksikan kepada kumparan rotor.



a) Stator dan rotor sangkar



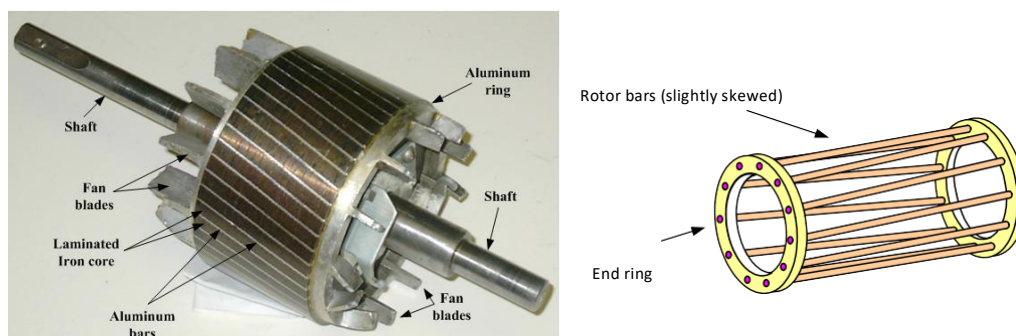
b) Rotor belitan

Gambar 2.4 Bentuk konstruksi dari motor induksi

Konstruksi stator motor induksi pada dasarnya terdiri dari bagian-bagian sebagai berikut:

1. Rumah stator (rangka stator) dari besi tuang.
2. Inti stator dari besi lunak atau baja silikon.
3. Alur, bahannya sama dengan inti, dimana alur ini merupakan tempat meletakkan belitan (kumparan stator).
4. Belitan (kumparan) stator dari tembaga.

Bentuk konstruksi rotor sangkar motor induksi secara lebih rinci diperlihatkan pada gambar 2.5.



a) bentuk rotor sangkar

b) kumparan dikeluarkan dari rotor

Gambar 2.5 Konstruksi rotor sangkar motor induksi

Rangka stator motor induksi ini didisain dengan baik dengan empat tujuan yaitu:

1. Menutupi inti dan kumparannya.
2. Melindungi bagian-bagian mesin yang bergerak dari kontak langsung dengan manusia dan dari goresan yang disebabkan oleh gangguan objek atau gangguan udara terbuka (cuaca luar).
3. Menyalurkan torsi ke bagian peralatan pendukung mesin dan oleh karena itu statordidisain untuk tahan terhadap gaya putar dan guncangan.
4. Berguna sebagai sarana rumah ventilasi udara sehingga pendinginan lebih efektif.

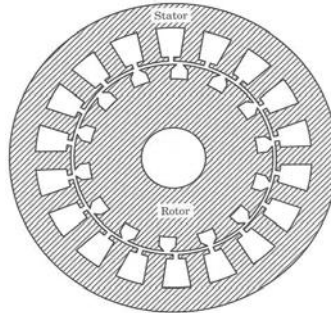
Berdasarkan bentuk konstruksi rotornya, maka motor induksi dapat dibagi menjadi dua jenis seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.4, yaitu:

1. Motor induksi dengan rotor sangkar (*squirrel cage*).
2. Motor induksi dengan rotor belitan (*wound rotor*).

Konstruksi rotor motor induksi terdiri dari bagian-bagian sebagai berikut:

1. Inti rotor, bahannya dari besi lunak atau baja silikon sama dengan inti stator.
2. Alur, bahannya dari besi lunak atau baja silikon sama dengan inti. Alur merupakan tempat meletakkan belitan (kumparan) rotor.

3. Belitan rotor, bahannya dari tembaga.
4. Poros atau as.



Gambar 2.6 Gambaran sederhana bentuk alur / slot pada motor induksi

Diantara stator dan rotor terdapat celah udara yang merupakan ruangan antara stator dan rotor. Pada celah udara ini lewat *fluks* induksi stator yang memotong kumparan rotor sehingga menyebabkan rotor berputar. Celah udara yang terdapat antara stator dan rotor diatur sedemikian rupa sehingga didapatkan hasil kerja motor yang optimum. Bila celah udara antara stator dan rotor terlalu besar akan mengakibatkan efisiensi motor induksi rendah, sebaliknya bila jarak antara celah terlalu kecil/sempit akan menimbulkan kesukaran mekanis pada mesin. Bentuk gambaran sederhana bentuk alur / *slot* pada motor induksi diperlihatkan pada gambar 2.7 .

2.3 Klasifikasi Motor Induksi

Klasifikasi Motor Induksi Motor induksi dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama :

1. Motor induksi satu fase. Motor ini hanya memiliki satu gulungan stator, beroperasi dengan pasokan daya satu fase, memiliki sebuah rotor kandang tupai, dan memerlukan sebuah alat untuk menghidupkan motornya. Sejauh ini motor ini merupakan jenis motor yang paling umum digunakan dalam peralatan rumah tangga, seperti fan angin, mesin cuci dan pengering pakaian, dan untuk penggunaan hingga 3 sampai 4 Hp.
2. Motor induksi tiga fase. Medan magnet yang berputar dihasilkan oleh pasokan



tiga fase yang seimbang. Motor tersebut memiliki kemampuan daya yang tinggi, dapat memiliki kandang tupai atau gulungan rotor (walaupun 90% memiliki rotor kandang tupai); dan penyalaan sendiri. Diperkirakan bahwa sekitar 70% motor di industri menggunakan jenis ini, sebagai contoh, pompa, kompresor, belt conveyor, jaringan listrik, dan *grinder*. Tersedia dalam ukuran 1/3 hingga ratusan Hp.

2.4 Megger

Megger adalah metode pengujian yang menggunakan meteran resistansi pengujian insulasi yang akan membantu memverifikasi kondisi insulasi listrik. Kualitas resistansi isolasi dari sistem kelistrikan menurun seiring waktu, kondisi lingkungan yaitu suhu, kelembaban, kelembaban dan partikel debu. Hal ini juga terkena dampak negatif karena adanya tegangan listrik dan mekanik, sehingga menjadi sangat penting untuk memeriksa IR (Resistansi isolasi) peralatan secara berkala untuk menghindari tindakan fatal atau sengatan listrik.



Gambar 3.3 Alat Ukur Megger Digital

IR memberikan ukuran daya tahan isolator untuk menanggung tegangan layanan tanpa jalur kebocoran arus. Ini memberikan gambaran tentang kondisi isolator. Ini diukur menggunakan instrumen bernama tes Megger yang mampu memberikan



tegangan DC di antara dua probenya, secara otomatis menghitung dan kemudian menampilkan nilai IR. Tes Megger menjadi sangat populer sehingga ” Resistansi Isolasi ” dan ” Tes Megger ” digunakan secara sinonim.

Dalam perangkat listrik, kualitas isolasi merupakan faktor penting. Akan ada perubahan sifat insulasi perangkat listrik sesuai dengan faktor-faktor tertentu seperti kondisi lingkungan, suhu, waktu, dll. Jadi hanya perlu memeriksa kualitas resistansi isolasi secara berkala agar dapat menghindari seseorang dari sengatan listrik. Megger digunakan untuk memeriksa tahanan isolasi peralatan listrik. Jadi dapat menggunakan megger untuk menguji motor, belitan generator, kabel, dll. Megger menguji kawat dengan menerapkan tegangan DC tinggi ke kawat tersebut selama periode waktu tertentu sehingga kualitas insulasi dapat ditentukan. Megger terdiri dari generator DC dan Ohm meter.

2.4.1 Tujuan Pengujian Megger

Kualitas resistansi isolasi dari sistem kelistrikan menurun seiring waktu, kondisi lingkungan yaitu suhu, kelembaban, kelembaban dan partikel debu. Hal ini juga terkena dampak negatif karena adanya tegangan listrik dan mekanik, sehingga menjadi sangat penting untuk memeriksa IR (Resistansi isolasi) peralatan secara berkala untuk menghindari tindakan fatal atau sengatan listrik..

Ketika kebakaran atau peristiwa panas tinggi lainnya (petir, ledakan, dll.) terjadi, kabel dan elemen terkaitnya (isolasi, dll.) terkena panas tingkat tinggi. Semua logam dan senyawa fisik memiliki titik leleh. Dalam beberapa peristiwa kebakaran, titik leleh ini tercapai dan integritas pembawa arus dari kabel terganggu. Insulasi mungkin telah meleleh secara internal atau kabel dan insulasi mungkin telah meleleh. Saat aliran arus meningkat, untuk mencoba melintasi saku, itu menciptakan panas. Panas itu dapat menciptakan suhu yang cukup untuk benar-benar menyebabkan kebakaran lain.

Pengujian Megger tidak menyebabkan kerusakan apa pun, menjadikannya pilihan yang baik ketika seseorang tidak ingin membuat lubang di dinding untuk menguji isolasi listrik untuk masalah atau masalah apa pun. Perangkat pengujian hanya berjalan antara 500 dan 1.000 volt, yang relatif rendah. Karena tegangan



rendah, beberapa tusukan pada isolasi tidak terdeteksi. Ini umumnya memberikan informasi tentang arus bocor dan apakah area insulasi memiliki kotoran atau kelembaban yang berlebihan serta jumlah kelembaban, kerusakan dan kesalahan belitan.

2.4.2 Pengujian Megger

Ini dapat menguji sirkuit untuk koneksi yang ada dan area gangguan leleh yang mungkin terjadi selama peristiwa kebakaran. Hasil ini kemudian dianalisis dan sirkuit tertentu dapat diisolasi dan diganti untuk memastikan bahwa tidak ada masalah lebih lanjut pada sirkuit Anda yang terpengaruh.

Multimeter digunakan sebagai pengujian insulasi dalam beberapa kondisi dan sebagian besar hanya dilakukan uji kontinuitas. Tetapi untuk mendeteksi dan menguji kebocoran arus pada kondisi normal atau kelebihan beban, digunakan alat khusus yang disebut dengan Insulation tester. Ini adalah tes yang sangat populer yang dilakukan sejak lama.

Prosedur uji tahanan isolasi atau uji megger diberikan di bawah ini:

- Pertama kita akan memutuskan semua saluran dan terminal netral transformator.
- Kabel uji Megger dihubungkan ke stud bushing LV dan HV untuk mengukur nilai Insulation Resistance IR di antara belitan LV dan HV.
- Kabel uji Megger dihubungkan ke stud busing HV dan titik pembumian tangki transformator untuk mengukur nilai Resistansi Isolasi IR di antara belitan HV dan pembumian.
- Kabel uji Megger dihubungkan ke stud busing LV dan titik pembumian tangki transformator untuk mengukur nilai Resistansi Isolasi IR di antara belitan LV dan pembumian.
- Hubungan empiris seperti di bawah ini memberikan nilai minimum yang direkomendasikan untuk IR, satuannya adalah mega ohm ($M\Omega$). . Ukuran nilai memberi kita gambaran tentang kekuatan isolasi kabel dan apakah kabel itu rusak atau tidak.



$$IR_{\min} \text{ (dalam } M\Omega) = kV + 1$$

Dimana kV = tegangan layanan pengenalan dalam kV

Ada beberapa contoh ketika IR yang diukur hampir 10 hingga 100 kali lebih banyak daripada IR_{\min} yang ditemukan dari persamaan di atas.

Prosedur pengukuran umum terdiri dari pengukuran IR antara tiga fase dan juga antara fase individu dan bumi. IR juga diukur untuk badan peralatan. Prosedur bervariasi dari peralatan ke peralatan. Ada level tegangan berbeda yang diterapkan pada kabel berdasarkan peringkat dan ukurannya. Untuk melakukan tes Megger dari kabel HT 33kV. Level tegangan yang diterapkan adalah 5000V dan nilai IR dapat berkisar antara 1GigaOhm hingga 200GigaOhm.

2.4.3 Prinsip Kerja Megger

Tegangan untuk pengujian yang dihasilkan oleh tes megger yang dioperasikan dengan tangan dengan memutar engkol dalam kasus tipe yang dioperasikan dengan tangan, baterai digunakan untuk tester elektronik 500 Volt DC cukup untuk melakukan pengujian pada peralatan hingga 440 Volt. 1000 V hingga 5000 V digunakan untuk pengujian sistem kelistrikan tegangan tinggi. Kumputan pembelok atau kumputan arus dihubungkan secara seri dan memungkinkan mengalirnya arus listrik yang diambil oleh rangkaian yang diuji. Kumputan kontrol juga dikenal sebagai kumputan tekanan terhubung di sirkuit. Resistor pembatas arus (CCR dan PCR) dihubungkan secara seri dengan kontrol dan kumputan pembelok untuk melindungi kerusakan jika resistansi sangat rendah di sirkuit eksternal.

Dalam uji megger yang dioperasikan dengan tangan, efek induksi elektromagnetik digunakan untuk menghasilkan tegangan uji yaitu angker diatur untuk bergerak dalam medan magnet permanen atau sebaliknya. Sedangkan pada baterai uji tipe megger elektronik digunakan untuk menghasilkan tegangan pengujian. Ketika tegangan meningkat di sirkuit eksternal, defleksi pointer meningkat dan defleksi pointer berkurang dengan peningkatan arus. Oleh karena itu, torsi yang dihasilkan berbanding lurus dengan tegangan dan berbanding terbalik dengan arus.



Ketika rangkaian listrik yang diuji terbuka, torsi akibat kumparan tegangan akan maksimum dan penunjuk menunjukkan ‘tak terhingga’ berarti tidak ada korslet di seluruh rangkaian dan memiliki resistansi maksimum di dalam rangkaian yang diuji. Jika ada penunjuk hubung singkat menunjukkan ‘nol’, yang berarti ‘TIDAK’ resistansi dalam rangkaian yang diuji.

2.5 Kontruksi dan Isolasi Stator

Konstruksi belitan stator motor dapat dibedakan menjadi dua macam menurut kapasitas daya mesin, yaitu *random-wound stator* untuk mesin berkapasitas di bawah 100 kW dan *form-wound stator* untuk mesin berkapasitas besar antara 50 s.d 100 MVA. *Random-wound stator* biasa digunakan pada motor dengan rating tegangan di bawah 1 kV. Konstruksi belitan jenis ini terdiri dari konduktor tembaga terisolasi (*magnet wire*) yang dibelitkan secara kontinyu melalui slot-slot pada inti stator untuk membentuk sebuah koil (*coil*). Setiap lilitan (*turn*) dapat diletakkan secara acak (*random*) terhadap *turn* lainnya dalam satu koil seperti pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Konstruksi stator jenis *random-wound stator*.

Berbeda dengan *random-wound stator*, *form-wound stator* digunakan pada motor bertegangan di atas 1 kV. Belitan statornya tersusun dari koil-koil terisolasi yang telah dibentuk sebelum dimasukkan pada slot-slot di inti stator. Konduktor tembaga pada *form-wound stator* tersusun dari konduktor-konduktor berukuran kecil (*strand*)



yang terisolasi antara satu dengan lainnya. Selain itu, *form-wound stators* mempunyai dua jenis belitan yaitu belitan dengan banyak gulungan.

Sistem isolasi pada bagian stator pada umumnya terdiri dari *strand insulation*, *turn insulation*, dan *groundwall insulation*. Ketiga komponen ini mempunyai fungsi sebagai pencegah terjadinya *short circuit* pada motor. Untuk motor jenis *random-wound stators*, *strand insulation* berfungsi sebagai *turn insulation*, yaitu berfungsi untuk mencegah *short circuit* antar belitan. Pada motor jenis *form-wound stators*, *turn insulation* mencegah *short circuit* antar belitan sedangkan *strand insulation* berfungsi untuk mencegah *short circuit* antar konduktor. Sementara itu *groundwall insulation* berfungsi untuk memisahkan konduktor tembaga dengan inti stator sehingga *short circuit* antara konduktor dengan *ground* tidak terjadi.

Jika ketebalan isolasi meningkat maka ruang konduktor untuk membawa arus akan berkurang. Sehingga konduksi panas pada konduktor juga terbatas. Adapun kriteria yang harus dimiliki sistem isolasi pada stator mesin listrik, yaitu memiliki konduktivitas termal dan kekuatan dielektrik tinggi serta ketahanan yang tinggi terhadap *partial discharge*, abrasi (goresan), kelembaban dan uap minyak.

2.5.1 Penurunan Kualitas Isolasi

Secara umum, faktor penuaan (*aging factor*) dapat dikelompokkan ke dalam empat macam, yaitu tekanan termal, elektris (*electric*), lingkungan (*ambient*), dan mekanis (*mechanical*) (Stone, et al., 2004). Durasi tekanan (*stress*) pada isolasi dapat tergolong konstan atau hanya beberapa saat (*transient*). Jika kegagalan isolasi disebabkan oleh tekanan yang konstan maka waktu untuk mencapai kegagalan (*time to failure*) sebanding dengan durasi motor beroperasi. Pada tekanan yang transien, seperti ketika *starting* motor, waktu untuk mencapai kegagalan sebanding dengan sejumlah tekanan transien yang selama ini dialami oleh motor. Kerusakan isolasi antar belitan pada stator motor listrik diawali proses degradasi isolasi yang memunculkan *hot spot* antar belitan. Kegagalan ini banyak disebabkan oleh beberapa hal seperti berikut :

- a. Faktor usia yaitu penurunan kualitas isoalasi yang disebabkan karena kerapuhan, penyusutan, dan retakan pada isolasi.



- b. Sebab listrik yaitu adanya efek panas yang ditimbulkan akibat *corona*, *lightning switch surge*, dan *unbalance voltages* serta kegagalan tes.
- c. Sebab mekanik yaitu terjadinya *vibrasi*, *wedges* longgar, akibat pengaruh kipas, korelasi yang longgar, dan benda asing.
- d. Sebab termal yaitu beban lebih, panas berlebih yang muncul karena kegagalan isolasi, dan karena *tape separation*.
- e. Pengaruh lingkungan yaitu masuknya partikel magnetik, partikel debu, kelembaban, dan kontaminan berupa garam dan minyak.

Kenyataan dilapangan, sebagian besar proses kegagalan isolasi terjadi akibat gabungan beberapa faktor diatas, butuh dua atau tiga faktor secara simultan. Semakin banyak tekanan yang terjadi maka besar pula tingkat penurunan kemampuan isolasi. Dampak dari pengaruh kelembaban tinggi pada motor juga bergantung pada temperatur titik embun (*dew point*), yaitu temperatur ketika uap air yang terkandung dalam udara terkondensasi menjadi titik-titik air (*moisture*). Apabila motor beroperasi di atas temperatur *dew point*, tahanan isolasi tidak akan dipengaruhi oleh kelembaban. Sebaliknya, apabila temperatur motor menurun hingga di bawah *dew point*, uap air yang terkondensasi menjadi embun akan menempel pada belitan. Hal ini yang menyebabkan belitan menjadi basah sehingga nilai tahanan isolasi menurun (Stone, et al., 2004).

Sementara itu, kontaminasi terhadap belitan mengakibatkan *electrical tracking* pada isolasi. Kejadian ini memungkinkan arus listrik mengalir pada permukaan isolasi terutama pada bagian *end-winding*. Aliran arus tersebut akan mendegradasi isolasi dan pada akhirnya menyebabkan kerusakan isolasi *groundwall*. Pada kontruksi belitan *form-wound stator*, *electrical tracking* merupakan faktor utama kegagalan isolasi. Sebaliknya kontruksi *random-wound stator* membutuhkan lubang kecil (*pinhole*) atau retakan (*crack*) terlebih dahulu untuk menimbulkan penurunan kemampuan isolasi. Ketika belitan terdapat lubang kecil atau retakan, kontaminan yang bersifat konduktif akan memudahkan arus untuk mengalir antar *turn*. Sehingga tahanan isolasi akan menjadi sangat rendah dan timbul arus sirkulasi yang besar antar *turn* dan *short circuit* antar *turn* yang diikuti dengan *ground fault*.



2.5.2 Kegagalan Isolasi Pada Belitan Stator Motor

Mekanisme kegagalan isolasi belitan stator dapat disebabkan menjadi lima hal. Sebab pertama adalah kerusakan akibat termakan usia. Hal-hal yang dapat terjadi akibat kerusakan akibat usia antara lain keretakan pada isolasi, penyusutan, dan kerapuhan. Sebab kedua yang dapat menyebabkan kegagalan isolasi belitan stator adalah sebab mekanis. Sebab – sebab mekanis antara lain getaran, batang amortissuer yang rusak, koneksi yang longgar, baji dan ikatan-ikatan yang longgar, dan besi yang longgar. Sebab ketiga yang dapat menyebabkan kegagalan isolasi belitan stator adalah sebab suhu/panas. Sebab suhu/panas antara lain kelebihan beban, panas yang berlebih akibat hubung singkat pada laminasi, dan tidak bekerjanya pendingin. Sebab yang keempat adalah sebab lingkungan dan kontaminasi. Sebab lingkungan dan kontaminasi antara lain debu, kelembaban, minyak, dan partikel magnetik. Sebab kelima yang dapat menyebabkan kegagalan isolasi belitan stator adalah sebab elektrik. Sebab sebab elektrik antara lain korona, tegangan tidak seimbang, petir, switching surja, gangguan satu fasa, dan kegagalan tes.

2.6 Isolasi pada Motor Induksi

Isolasi merupakan komponen yang berperan vital terhadap keamanan operasi motor induksi sebagaimana kegagalan isolasi adalah faktor penyebab kerusakan yang tertinggi kedua. Tanpa isolasi, konduktor tembaga akan mengalami kontak dengan konduktor lain atau inti stator. Isolasi juga berfungsi sebagai penghantar panas, sehingga konduktor tembaga tidak mengalami *overheating*.

Prosedur pengujian tahanan isolasi yang direkomendasikan untuk mesin elektromekanis. Pengujian tahanan isolasi memiliki beberapa prosedur dan tahapan yang harus dilakukan yang pertama adalah menyediakan alat ukur Megaohm meter atau Megger untuk pengujian tahanan isolasi dan alat ukur LCR untuk mengukur nilai induktansi, kapasitansi dan resistansi. Alat ukur yang digunakan pada Pengujian ini adalah “Megger MIT 400 *Digital Insulation Tester*” dan Digital LCR Meter. Kemudian yang kedua dari rangkaian pengujian ialah yang kedua menyediakan motor listrik untuk pengujian tahanan isolasi, motor yang digunakan adalah jenis motor induksi dan generator sinkron 3 fasa. Nilai tahanan isolasi dirumuskan pada



Persamaan.

$$IR = E(t) / I(t) \quad (2.1)$$

Ada berbagai metode pengujian yang digunakan untuk menilai kondisi isolasi. Satu pengujian belum dapat mewakili kondisi sebenarnya, namun memerlukan beberapa pengujian lanjutan. Pada penelitian (Muhammed Manif, 2005) dijelaskan beberapa urutan pengujian untuk mendiagnosis kondisi isolasi motor yaitu *continuity test* antar belitan motor, tes tahanan isolasi, PI, dan tes kehilangan inti (*core loss test*).

2.6.1 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). 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*.

Sistem isolasi yang digunakan pada mesin-mesin listrik diklasifikasikan pada kemampuan dasar isolasi tersebut bertahan terhadap jumlah suhu sepanjang mesin listrik tersebut beroperasi tanpa mengalami penurunan nilai isolasi. Ada beberapa persyaratan untuk sistem isolasi pada belitan stator mesin yaitu:

1. Kekuatan dielektrik yang tinggi.
2. Ketahanan yang tinggi terhadap partial discharge.
3. Konduktivitas termal yang tinggi.
4. Ketahanan yang baik terhadap abrasi.
5. Ketahanan yang baik terhadap pemisahan pita akibat pemanasan suhu.
6. Ketahanan yang baik terhadap kelembaban dan uap minyak.

Sistem isolasi pada mesin listrik terbagi menjadi 5 bagian besar. Pertama adalah sistem isolasi antar lilitan berlokasi diantara setiap lilitan yang terpisah pada belitan yang sama. Kedua adalah sistem isolasi antar fasa berlokasi diantara belitan yang berdekatan pada fasa yang berbeda. Ketiga adalah sistem isolasi fasa ke ground berlokasi diantara belitan dengan ground atau bagian struktur dari motor. Keempat adalah sistem isolasi slot baji yang berguna untuk menahan konduktor pada slotnya dengan kokoh. Kelima adalah sistem isolasi impregnasi yang berguna untuk mengikat semua komponen dan mengisi rongga udara. Sistem isolasi berdasarkan NEMA (National Electrical Manufacturers Association) untuk belitan mesin terbagi



beberapa kelas.

- Kelas O : Isolasi kelas ini memiliki jumlah suhu rating 100°C terbuat dari kombinasi katun, sutra, dan kertas tanpa impregnasi
- Kelas A : Isolasi kelas ini memiliki jumlah suhu rating 105°C terbuat dari kombinasi katun, sutra, dan kertas dengan impregnasi dan dilaminasi oleh minyak.
- Kelas B : Isolasi kelas ini memiliki jumlah suhu rating 130°C terbuat dari kombinasi mika, serat optik, asbestos, dan lainnya
- Kelas F : Isolasi kelas ini memiliki jumlah suhu rating 155°C terbuat dari kombinasi mika, serat optik, asbestos, dan lainnya.
- Kelas H : Isolasi kelas ini memiliki jumlah suhu rating 180°C terbuat dari kombinasi elastomer silicon, mika, serat optik, asbestos, dan lainnya
- Kelas C : Isolasi kelas ini memiliki jumlah suhu rating 220°C terbuat dari kombinasi teflon dan bahan sintetik alami lainnya.

Pada dasarnya, kemampuan isolasi akan mengalami penurunan secara perlahan-lahan akibat penuaan. Namun, degradasi isolasi akan menjadi lebih cepat akibat tekanan (*stress*), seperti termal, elektrik, mekanis, dan lingkungan. Keempat jenis tekanan tersebut memberikan dampak yang berbeda-beda terhadap isolasi. Temperatur tinggi akan menimbulkan reaksi oksidasi yang berujung pada isolasi yang mudah rapuh (*brittle*), retak (*crack*), dan terkelupas (*peeled off*). Lembab atau minyak yang dikombinasikan dengan debu atau kotoran dapat membentuk sekumpulan partikel konduktif pada permukaan isolasi. Belitan yang terkontaminasi juga memicu reaksi kimia dan *electrical tracking* pada isolasi. *Electrical tracking* memungkinkan arus listrik untuk mengalir di sepanjang permukaan isolasi, terutama pada bagian *end-winding* (belitan di luar *slot*). Pada akhirnya, arus tersebut menyebabkan kegagalan isolasi *groundwall*. Selama beberapa dekade terakhir, metode pengukuran tahanan isolasi (*insulation resistance*, IR) digunakan untuk mengetahui kondisi isolasi motor induksi. Pengukuran IR dipilih karena merupakan metode yang aman, mudah, dan sederhana.



2.6.2 Polarization indeks

Indek polarisasi atau *Polarization indeks* (PI) adalah petunjuk kekeringan dan kebersihan dari lilitan stator motor. Petunjuk ini berupa rasio nilai tahanan isolasi pada waktu satu menit pertama terhadap nilai tahanan isolasi pada waktu sepuluh menit. Nilai PI dirumuskan pada persamaan dibawah ini.

$$PI = \frac{IR(10)}{IR(1)} \quad (2.2)$$

Nilai PI merupakan *polarization indeks* atau indeks polarisasi, IR_1 merupakan nilai tahanan isolasi pada waktu satu menit dan IR_{10} merupakan nilai tahanan isolasi pada waktu sepuluh menit. Selain sebagai petunjuk kekeringan dan kebersihan dari lilitan stator motor. PI juga dapat digunakan untuk menentukan lilitan stator motor dalam peralatan aman untuk digunakan dan dioperasikan atau layak dilakukan untuk pengujian tegangan lebih.

Tabel 2. 1 Definisi nilai PI yang terukur.

Nilai Indeks Polarisasi (PI)	Kondisi Isolasi
< 1	Sangat Buruk (Berbahaya)
1 – 2	Buruk
2 – 4	Baik
> 4	Sangat Baik

Sumber: IEEE Std 43-2013

Jika pengujian berkelanjutan untuk periode selama 10 menit dilakukan, megaohm meter akan mempunyai kemampuan untuk mempolarisasikan atau mengisi kapasitansi tinggi ke isolasi stator motor, dan pembacaan resistansi akan meningkat jika isolasi stator bersih dan kering. PI memiliki nilai minimum yang direkomendasikan menurut IEEE Std 43-2013 (ditunjukkan oleh Tabel 2.1). Apabila hasil pengukuran menunjukkan nilai yang kurang dari nilai minimum, pengoperasian mesin atau pengujian tegangan lebih pada belitan tidak direkomendasikan (Committee, 2013).



2.6.3 Continuity test

Pengukuran kontinuitas adalah pengukuran tahanan setiap belitan motor menggunakan multimeter lalu menghubungkannya ke masing-masing terminal belitan. Untuk pengukuran tahanan setiap belitan ini perlu ketelitian karena memiliki nilai yang begitu kecil (miliOhm). Apabila belitan motor saat diukur nilai tahanannya adalah nol (0) atau sangat mendekati angka nol maka belitan motor rusak atau bocor.

2.6.4 Core loss test

Core loss test atau pengujian kehilangan inti telah menjadi salah satu pengujian terpenting untuk jaminan kualitas di industri motor. Fungsi dari uji kehilangan inti adalah untuk menentukan apakah motor mengalami kerusakan pada besi inti. Kerusakan dapat mencakup hubungan pendek antara laminasi dan lengkungan listrik. Tanpa pengujian kehilangan inti, peralatan apalagi untuk motor, mungkin kehilangan energi dalam jumlah besar dan perlahan-lahan merusak integritas motor. Penguji rugi inti adalah *instrument* portabel & sangat mudah dioperasikan.