



TESIS - TE142599

**ANALISIS PERCEPATAN PENUAAN ISOLASI
AKIBAT PENGARUH KELEMBABAN DAN
KONTAMINAN PADA MOTOR INDUKSI
BERBEBAN**

**DAPIS
2213201202**

**DOSEN PEMBIMBING
Dr. Dimas Anton Asfani, ST, MT.
Dr. Eng. I Made Yulistia N., ST, M.Sc**

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016**



TESIS - TE142599

**ANALYSIS DETERIORATION OF INSULATION
DUE TO THE EFFECT OF MOISTURE AND
CONTAMINATION IN LOADED
INDUCTION MOTOR**

**DAPIS
2213201202**

ADVISOR
Dr. Dimas Anton Asfani, ST, MT.
Dr. Eng. I Made Yulistia N., ST, M.Sc

**MAGISTER PROGRAM
POWER SYSTEM ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2016**

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Oleh :
Dapis
NRP. 2213201202

Tanggal Ujian : 13 Januari 2016
Periode Wisuda : Maret 2016


Disetujui oleh:


1. Dr. Dimas Anton Asafani, ST., MT.
NIP. 198109052005011002


(Pembimbing I)


2. Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
NIP. 197007121998021001

(Pembimbing II)


3. Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
NIP. 196308171990031001

(Penguji)


4. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.
NIP. 195512071980031004

(Penguji)


5. Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
NIP. 198006032006041003

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana


Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D.
NIP. 196012021987011001

ANALISIS PERCEPATAN PENUAAN ISOLASI AKIBAT PENGARUH KELEMBABAN DAN KONTAMINAN PADA MOTOR INDUKSI BERBEBAN

Nama Mahasiswa : Dapis
NRP : 2213201202
Pembimbing : Dr. Dimas Anton Asfani, ST, MT.
: Dr. Eng. I Made Yulistia N., ST, M.Sc

ABSTRAK

Kerusakan motor induksi merupakan masalah yang serius dalam dunia industri. Salah satu penyebab kerusakan tersebut ialah penurunan kualitas isolasi. Pembebanan terus-menerus dan faktor lingkungan seperti pengaruh kelembaban dan kontaminan dapat mempengaruhi penurunan kualitas isolasi (*deterioration*). Meskipun isolasi dirancang mampu bertahan dari tekanan (*stressed*), namun tekanan berlebihan akan mempercepat penuaan isolasi. Hal ini menyebabkan kinerja motor menurun sehingga mengganggu proses produksi dan menambah biaya *maintanace*. Oleh karena itu, percepatan penuaan isolasi motor harus diantisipasi sedini mungkin. Pada penelitian ini, eksperimen percepatan penuaan isolasi motor induksi dilakukan dalam keadaan berbeban dengan pengaruh kelembaban tinggi dan efek kontaminan. Metode yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi motor adalah *polarization index* (PI), tes respon osilasi (*surge test*) dan pengukuran *LCR meters*. PI digunakan untuk mengetahui nilai indek polarisasi dan tahanan belitan isolasi melalui empat arus searah yang terukur saat pengujian. Tes respon osilasi digunakan untuk mengetahui perbedaan kualitas isolasi berdasarkan respon belitan terhadap gelombang osilasi dengan metode *Error Area Ratio* (EAR). Sedangkan pengukuran *LCR meters* digunakan untuk mendeteksi nilai induktansi, kapasitansi dan resistansi yang timbul akibat pengaruh kelembaban dan kontaminan didalam belitan stator. Selanjutnya nilai PI, respon osilasi dan pengukuran *LCR meters* dibandingkan, sehingga didapat grafik kecenderungan kerusakan. Berdasarkan hasil pengujian, metode EAR lebih cepat mendeteksi penurunan belitan isolasi sebesar 30,5% pada pengujian ke 2. Sementara itu nilai PI mampu mendeteksi pada pengujian ke 4. Sedangkan *LCR meters* tidak mendeteksi nilai induktansi, kapasitansi dan resistansi secara signifikan.

Kata Kunci : Percepatan Penuaan, Tahanan Isolasi, Kelembaban Tinggi, Efek Kontaminan, *Polarization Indeks* (PI) , Tes Respon Osilasi, Pengukuran *LCR meters*.

ANALYSIS OF INSULATION DETERIORATION DUE TO THE EFFECT OF HUMIDITY AND CONTAMINANTS IN LOADED INDUCTION MOTOR

Name : Dapis
NRP : 221320202
Advisor : Dr. Dimas Anton Asfani, ST, MT.
: Dr. Eng. I Made Yulistia N., ST, M.Sc

ABSTRACT

Induction motor damage is a serious problem in the industrialized world. One cause of the malfunction is a decrease in the quality of the insulation. Imposition constantly and environmental factors such as the influence of moisture and contaminants can affect a decrease in the quality of the insulation (deterioration). Although the insulation is designed able to withstand the pressure (stressed), but excessive pressure will accelerate the aging of insulation. This leads to decreased motor performance so that disrupt the production process and increase the maintainace cost. Therefore, the accelerated aging of the motor insulation should anticipated quickly and precisely. In this research, insulation deterioration is investigated in the loaded induction motor with high humidity and contaminants effect. The method used to evaluate the condition of the motor is the polarization index (PI), the test response oscillations (surge test) and LCR meters measurements. PI is used to determine the index values of polarization and isolation of prisoners winding through four direct current that is measured during testing. Oscillation response test used to determine differences in the quality of the winding insulation based on the response to the wave oscillation method error area ratio (EAR). While the measurement LCR meters are used to detect the value of inductance, capacitance and resistance arising from the influence of moisture and contaminants in the stator winding. Furthermore the value of PI, the response oscillation and measurement LCR meters are compared, in order to get the graph tendency damage. Based on test results, EAR faster method to detect a decrease of 30.5% winding insulation on testing to 2. Meanwhile, the value of PI is able to detect the test to 4. While the LCR meters did not detect the value of inductance, capacitance and resistance significantly.

Keywords : Acceleration Aging, Insulation Resistance, High Humidity, Effect Contaminants, Polarization Index (PI) and Test Response Oscillation.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, sesungguhnya segala puji hanya bagi Allah atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul :

“Analisis Percepatan Penuaan Isolasi Akibat Pengaruh Kelembaban Dan Kontaminan Pada Motor Induksi Berbeban”

Tesis ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada bidang keahlian Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Akhir kata pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Almarhum kedua orang tua penulis, Ayahanda H. Muhammad Nur dan Ibunda Hatijah yang telah melahirkan dan membesarkan dengan semangat agar anak-anaknya memiliki sekolah yang tinggi.
2. Istri tercinta Fitriyani Yakub bersama anakku tersayang Abu Raihan Dapis, serta kakak tercinta ayuk Senang, kak Mahmud, ayuk Sundusia dan Siti Zubaidah (Mundu), serta semua keluarga besar yang selalu memberikan doa dan motivasi selama mengikuti proses perkuliahan di Surabaya hingga mengerjakan tesis.
3. Bapak Dr. Dimas Anton Asfani, ST, MT, dan Dr. Eng. I Made Yulistia N., ST, M.Sc, selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan arahan dan bimbingan selama proses pembuatan tesis dan selama perkuliahan di bidang Teknik Sistem Tenaga.
4. Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng., selaku dosen wali dan seluruh dosen pengajar Magister Teknik Elektro Bidang Keahlian Teknik Sistem Tenaga yang telah memberikan ilmu dan pengalamannya di bidang kelistrikan.

5. Universitas Ichsan Gorontalo yang telah memberikan Bantuan Studi di awal semester dan Gaji sebagai tenaga pendidik yang sangat membantu kelangsungan perkuliahan.

6. Teman-teman seperjuangan S2 angkatan tahun 2013, 2014 dan 2015 yang tidak dapat disebutkan, yang telah memberikan kenangan dan pelajaran berharga saat kuliah di Teknik Elektro Bidang Keahlian Teknik Sistem Tenaga ITS.

7. Seluruh member Lab. Tegangan Tinggi baik mahasiswa S3, S2 dan S1 yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu dalam menyelesaikan tesis ini.

Semoga tesis ini dapat bermanfaat dan Semoga Allah SWT, membalas semua kebaikan kepada semua pihak yang membantu terselesainya tesis ini.

Surabaya, Januari 2016

Dapis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
SIMBOL DAN SINGKATAN	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Kontruksi dan Isolasi Stator	4
2.2 Penurunan Kualitas Isolasi	5
2.3 Diagnosis Kondisi Isolasi	6
2.3.1 Pengujian tahanan isolasi	6
2.3.2 Tes respon osilasi	9
2.4 Standar Pengujian Alat	13
BAB 3 METODE PENELITIAN	17
3.1 Desain Pengujian	17
3.1.1 Alat percepatan isolasi	18
3.1.2 Pengujian tegangan surja	18
3.2 Kontruksi Pengujian	19
3.2.1 Pengujian dengan kelembaban	21
3.2.1 Pengujian dengan kelembaban dan kontaminan	25
3.3 Pengukura Kualitas Isolasi	26
3.3.1 Pengukuran nilai PI	26
3.3.2 Pengukuran nilai EAR	27
3.3.3 Pengukuran nilai LCR	28

BAB 4 HASIL PERCOBAAN DAN ANALISIS	29
4.1 Skema Percobaan.....	29
4.1.1 Percobaan kelembaban tinggi	29
4.1.2 Percobaan kelembaban dengan kontaminasi garam	30
4.2 Hasil Pengukuran.....	30
4.2.1 Pengukuran nilai PI	30
4.2.2 Pengukuran nilai EAR.....	33
4.2.3 Pengukuran nilai LCR	36
4.3 Analisis	39
BAB 5 KESIMPULAN	43
5.1 Kesimpulan	43
5.2 Kelanjutan penelitian.....	43
DAFTAR PUSTAKA.....	45
BIOGRAFI PENULIS	47
ADDENDUM.....	49
INDEKS	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konstruksi stator jenis <i>random-wound stator</i>	3
Gambar 2.2	Konstruksi stator <i>form-wound stator</i> : (a) menggunakan <i>multi turn coils</i> (b) menggunakan <i>roebel baers</i>	5
Gambar 2.3	Tegangan impuls surja	5
Gambar 2.4	A. Kontruksi pengujian tes surja dan b. Rangkaian ekivalen dari tes respon osilasi.....	5
Gambar 2.5	Rangkaian <i>Cockcroft-Walton Multiplier</i>	6
Gambar 2.6	Alat percepatan penuaan isolasi.....	7
Gambar 2.7	Pengujian pembangkit tegangan surja.....	7
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	14
Gambar 3.2	Desain alat uji percepatan penuan isolasi.....	15
Gambar 3.3	Diagram alur alat pengujian	17
Gambar 3.4	Perangkat pembangkit tegangan surja	17
Gambar 3.5	Diagram alur pengujian surja	18
Gambar 3.6	A. Megger”Digital Insulation Tester” MIT 400 dan b. Sanwa “Digital LCR 700”.....	18
Gambar 3.7	Motor induksi dan generator tiga fasa	18
Gambar 3.8	Set Lampu.....	19
Gambar 3.9	Sensor temperature LM35	20
Gambar 3.10	Modifikasi <i>Chasing</i>	20
Gambar 3.11	Pengukuran nilai PI tahanan isolasi motor menggunakan Megger MIT 400.	21
Gambar 3.12	Pengujian surja dengan mengukur nilai EAR terhadap belitan	22
Gambar 3.13	Pengukuran nilai RLC pada (a). Belitan per fasa (b). antar fasa ..	22
Gambar 4.1	Tranding penurunan nilai tahanan isolasi pada pengujian kondisi kelembaban tinggi	35
Gambar 4.2	Tranding penurunan nilai tahanan isolasi pada pengujian kondisi kontaminan garam.....	36
Gambar 4.3	Gelombang LL EAR pada pengujian kontaminan hari ke dua	41
Gambar 4.4	Gelombang LL EAR pada pengujian kontaminan hari ke lima.....	41

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Definisi nilai PI yang terukur (Fluke Corperation, 2007).....	8
Tabel 2.2 Hasil pengujian pada alat percepatan penuaan isolasirdhika, 2015).....	14
Tabel 2.3 Hasil analisis EAR dengan variasi kapasitansi (Nugroho, 2015).	15
Tabel 3.1 Spesifikasi motor induksi.....	22
Tabel 3.2 Skema percobaan pengaruh kelembaban tinggi.....	24
Tabel 3.3 Skema percobaan pengaruh kelembaban dan kontaminan.	25
Tabel 3.4 Skema percobaan pengaruh kelembaban dan kontaminan. (Lanjutan)..	26
Tabel 4.1 Hasil percobaan pertama untuk motor dengan pengaruh kelembaban tinggi.	29
Tabel 4.2 Hasil percobaan kedua untuk motor dengan pengaruh kelembaban dengan kontaminasi garam.	30
Tabel 4.3 Hasil pengukuran tahanan isolasi pada skema percobaan untuk motor dengan pengaruh kelembaban tinggi.....	31
Tabel 4.4 Hasil pengukuran tahanan isolasi pada skema percobaan untuk motor dengan pengaruh kelembaban dan kontaminasi.....	31
Tabel 4.4 Hasil pengukuran tahanan isolasi pada skema percobaan untuk motor dengan pengaruh kelembaban dan kontaminasi. (Lanjutan).....	31
Tabel 4.5 Hasil pengukuran PI pada motor dengan pengaruh kelembaban tinggi dan kontaminan garam menggunakan megger.....	32
Tabel 4.6 Hasil pengukuran nilai luasan pada motor dengan pengaruh kelembaban menggunakan pengujian surja.....	33
Tabel 4.7 Hasil pengukuran nilai <i>Test-Ref</i> EAR dengan pengaruh kelembaban menggunakan pengujian surja.....	34
Tabel 4.8 Hasil pengukuran nilai <i>Line to Line</i> EAR dengan pengaruh kelembaban menggunakan pengujian surja.....	34

Tabel 4. 9 Hasil pengukuran nilai luasan pada motor dengan pengaruh kontaminan menggunakan pengujian surja.....	35
Tabel 4.10 Hasil pengukuran nilai <i>Test-Ref</i> EAR dengan pengaruh kontaminan menggunakan pengujian surja.....	35
Tabel 4.11 Hasil pengukuran nilai <i>Line to Line</i> EAR dengan pengaruh kontaminan menggunakan pengujian surja.....	36
Tabel 4.12 Hasil pengukuran induktansi pada motor dengan pengaruh kelembaban tinggi menggunakan sanwa LCR 700.	37
Tabel 4.13 Hasil pengukuran kapasitansi pada motor dengan pengaruh kelembaban tinggi menggunakan sanwa LCR 700.....	37
Tabel 4.14 Hasil pengukuran resistansi pada motor dengan pengaruh kelembaban tinggi menggunakan sanwa LCR 700.	37
Tabel 4.15 Hasil pengukuran induktansi pada motor dengan pengaruh kelembaban disertai kontaminan garam menggunakan sanwa LCR 700.....	38
Tabel 4.16 Hasil pengukuran kapasitansi pada motor dengan pengaruh kelembaban disertai kontaminan garam menggunakan sanwa LCR 700.	38
Tabel 4.17 Hasil pengukuran resistansi pada motor dengan pengaruh kelembaban disertai kontaminan garam menggunakan sanwa LCR 700.....	38

SIMBOL DAN SINGKATAN

C

Kapasitansi

CWM

Cockcroft-Walton Multiplier

EAR

Error Area Ratio

$E_{(t)}$

Nilai pembacaan tegangan DC (volt)

f

Frekuensi (Hz)

$F_i^{(1)}$

Nilai poin ke-i pada gelombang referensi

$F_i^{(2)}$

Nilai poin ke-i pada gelombang pengujian

IEC

International Electrotechnical Commission

IEEE

Institute of Electrical and Electronics Engineers

IR

Insulation Resistance ($M\Omega$)

IR_1

Nilai tahanan isolasi pada waktu satu menit ($M\Omega$)

IR_{10}

Nilai tahanan isolasi pada waktu sepuluh menit ($M\Omega$)

$I_{(t)}$

Nilai arus (*Amper microseconds*)

kV

Kilo Volt

kW

Kilo Watt

L

Induktansi

L-L EAR

Line to Line Error Area Ratio

MVA

Mega Volt Amper

BAB 1

PENDAHULUAN

Pada bab ini, akan dibahas latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian dan kontribusi penelitian.

1.1. Latar Belakang

Pemeliharaan motor induksi secara rutin bertujuan untuk mempertahankan kondisi peralatan sehingga dapat dioperasikan dengan baik. Seiring dengan bertambahnya usia pemakaian motor, secara perlahan-lahan isolasi mengalami penurunan kualitas isolasi (*deterioration*) (Muhammed Manif, 2005). Pengujian dan pemeliharaan isolasi secara rutin mampu menurunkan frekuensi kerusakan dan menekan biaya perbaikan akibat *downtime* yang tidak terduga. Temperatur dan pembebanan terus-menerus juga dapat mempengaruhi kualitas isolasi. Pengaruh ini dapat dideteksi dari nilai *polarization indeks* (PI) melalui rangkaian ekuivalen tahanan isolasi (McKinnon, 2012). Motor induksi yang mengalami *turn fault* dengan nilai kecil atau kurang dari 5 belitan, mempunyai nilai arus yang sama seperti keadaan normal. Sehingga sulit untuk mengetahui motor tersebut mengalami penurunan kualitas isolasi. Dengan menggunakan tes surja atau tes respon osilasi melalui metode *error area ratio* (EAR) hal ini dapat diketahui (Wiedenbrug, et al., June 2003) (Wilson, June 2003).

Publikasi mengenai penelitian percepatan penuaan isolasi terhadap waktu masih sedikit ditemui. Penelitian yang telah dilakukan hanya menunjukkan simulasi penurunan kualitas isolasi belitan motor terhadap pengaruh kelembaban. Penelitian tersebut tidak membahas pengaruh kelembaban tinggi disertai keadaan kontaminan dengan efek pembebanan motor sebelum pengujian (Wiedenbrug, et al., June 2003) (McKinnon, June 2010). Beberapa eksperimen laboratorium telah dilakukan untuk mensimulasikan penurunan kualitas isolasi menggunakan PI dan tes respon osilasi. Hasil dari eksperimen tersebut menunjukkan bahwa kedua metode ini efektif dan dapat digunakan untuk mengetahui percepatan penuaan isolasi (McKinnon, 2012) (Wiedenbrug, et al., June 2003). Sementara itu,

pengukuran *LCR meters* digunakan untuk mendeteksi nilai induktansi, kapasitansi dan resistansi yang timbul akibat pengaruh kelembaban dan kontaminasi didalam belitan stator.

Pada penelitian ini, eksperimen percepatan penuaan isolasi pada motor induksi dilakukan dengan cara memberi beban terus-menerus lebih dari 24 jam pada kondisi kelembaban tinggi dan kelembaban mengandung kontaminasi hingga mengalami gejala kerusakan. Selanjutnya, gejala kerusakan dievaluasi secara menyeluruh menggunakan metode PI, tes respon osilasi dan pengukuran *LCR meters*.

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan–permasalahan yang dibahas pada penelitian ini adalah :

1. Kombinasi metode PI, tes respon osilasi dan pengukuran *LCR meters* dalam mendiagnosa percepatan penuaan isolasi.
2. Pola atau tren penurunan tahanan isolasi akibat kelembaban tinggi dan efek kontaminasi garam pada motor berbeban.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah mengidentifikasi dampak signifikan percepatan penuaan isolasi motor berbeban terhadap pengaruh kelembaban dan efek kontaminasi menggunakan kombinasi metode PI, tes respon osilasi dan pengukuran *LCR meters*. Diharapkan dengan kombinasi metode tersebut perbandingan grafik penurunan tahanan isolasi diketahui, sehingga percepatan penuaan isolasi dapat diantisipasi.

1.4. Kontribusi Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi sebagai berikut :

1. Menjadi referensi baru untuk menganalisa percepatan penuaan isolasi motor berbeban menggunakan kombinasi metode PI, tes respon osilasi dan pengukuran *LCR meters*.
2. Membantu operator industri untuk mengantisipasi pengaruh kontaminasi terhadap percepatan penuaan isolasi motor.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab dua ini, akan dibahas mengenai konstruksi dan isolasi stator, pengujian kondisi isolasi, penurunan kualitas isolasi, diagnosis kondisi isolasi dan standar pengujian alat.

2.1 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*) (Stone, et al., 2004). Setiap lilitan (*turn*) dapat diletakkan secara acak (*random*) terhadap *turn* lainnya dalam satu koil seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 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

(*multiturn coils*) dan belitan batang (*roebel bars*) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



(a) (b)
Gambar 2. 2 Kontruksi *stator form-wound stator* : (a) menggunakan *multiturn coils* (b) menggunakan *roebel bars*.

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 (Stone, et al., 2004).

Isolasi sering sekali menjadi salah satu faktor pembatas dalam mendesain mesin listrik. Jika ketebalan isolasi meningkat maka ruang konduktor untuk membawa arus akan berkurang. Sehingga konduksi panas pada konduktor juga terbatas. Adapun kreteria 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 (Gill, 2009). Berdasarkan klasifikasi *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) dan *International Electrotechnical Commission* (IEC) 60085 sistem isolasi listrik dibagi menjadi beberapa kelas

seperti kelas O, A, B, F, H dan C. Setiap kelas tersebut memiliki ketahanan yang berbeda-beda terhadap temperatur tertentu (Deshpande, 2010).

2.2 Penurunan Kualitas Isolasi

Secara umum, faktor penuaan (*aging factor*) dapat dikelompokkan ke dalam empat macam, yaitu tekanan termal, listrik (*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 (Gill, 2009) :

- 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 kincir kipas, korelasi yang longgar, dan benda asing.
- d. Sebab termal yaitu beban lebih, panas berlebih yang muncul karena kegagalan isolasi, dan karena *tape speration*.
- 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. (Stone, et al., 2004). 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) (Jones, et al., 2002).

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 konstruksi belitan *form-wound stator*, *electrical tracking* merupakan faktor utama kegagalan isolasi. Sebaliknya konstruksi *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* (Stone, et al., 2004).

2.3 Diagnosis Kondisi Isolasi

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 tahanan belitan, tahanan isolasi, PI, *step voltage* dan tes gelombang osilasi (surja).

2.3.1 Pengujian tahanan isolasi

Pengujian isolasi secara rutin mampu menurunkan frekuensi kerusakan dan mampu menekan biaya pemeliharaan. Berikut metode yang sering digunakan dalam mendeteksi kerusakan belitan stator yaitu pengujian tahanan isolasi (*megger test*) (Gill, 2009).

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). 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 (1).

$$IR = \frac{E(t)}{I(t)} \quad (1)$$

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*.

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 (2) dibawah ini.

$$PI = \frac{IR_{10}}{IR_1} \quad (2)$$

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 (Fluke Corporation, 2007).

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

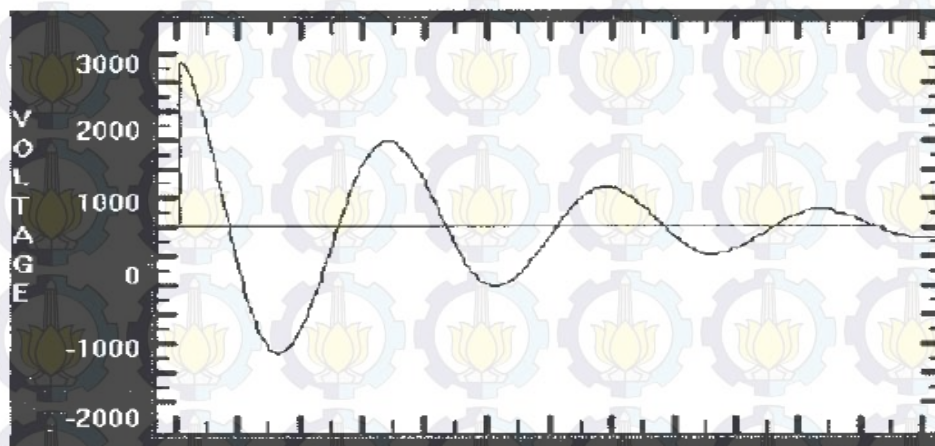
Jika pengujian berkelanjutan untuk periode selama 10 menit dilakukan, megaohm meter akan mempunyai kemampuan untuk mempolarisasikan atau mengisi kapasitansi tinggi ke isolasi stator motor, dan pembacaan resistansi akan meningkat jika isolasi stator bersih dan kering. PI memiliki nilai minimum yang direkomendasikan 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).

2.3.2 Tes respon osilasi

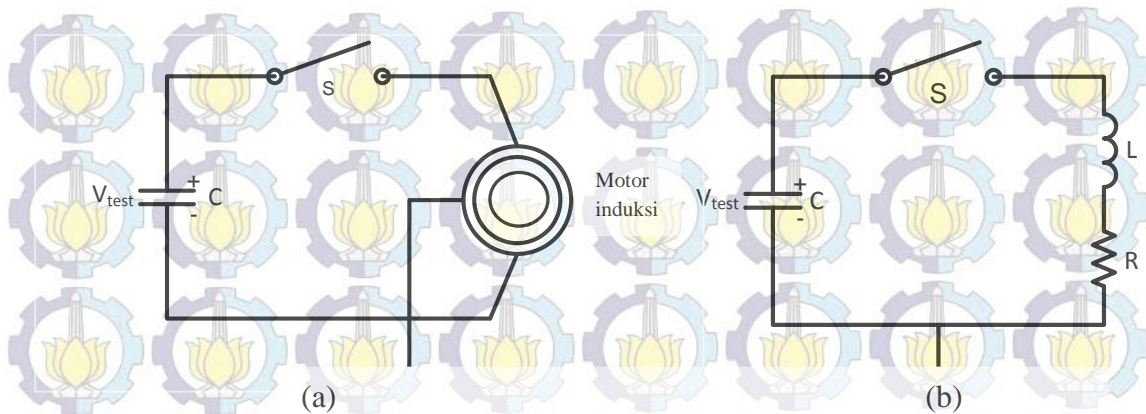
Tes gelombang osilasi merupakan rangkaian pembangkit gelombang impuls dengan menggunakan rangkaian seri ekivalen resistansi, induktansi dan kapasitansi. Tes gelombang isolasi juga sering disebut pengujian surja dengan pembangkitan tegangan tinggi DC. Untuk menganalisis gelombang tersebut digunakan metode *error area ratio* (EAR) seperti berikut :

1. Surge test

Pengujian surja atau *surge test* adalah pengujian dengan memberikan pulsa *short current* dengan *rise time* tertentu pada belitan stator mesin listrik sehingga timbul tegangan induksi antar belitan (Grubic, et al., Dec. 2008). Jika tegangan yang diberikan melebihi batasan tegangan maksimum dari isolasi, maka akan muncul busur api dan menyebabkan perubahan nilai induktansi. Pada proses ini dapat diamati perbedaan respon respon osilasi (impuls) atau gelombang *impulse* (*surge*) seperti pada Gambar 2.3 (Wiedenbrug, et al., June 2003).



Gambar 2.3 Tegangan impuls surja [3].



Gambar 2. 4 a. Kontruksi pengujian tes surja dan b. Rangkaian ekivalen dari tes respon osilasi (Grubic, et al., 2011).

Setiap pulsa respon motor akan menghasilkan respon tegangan impuls, dan frekuensi resonansi (Gill, 2009). Jika dilihat kontruksi pengujian ini membentuk rangkaian ekivalen RLC yang terhubung seri seperti ditunjukkan pada gambar 2.4a dan 2.4b. Sehingga apabila motor mengalami kerusakan isolasi otomatis nilai induktansi (L) akan berkurang dan berakibat perubahan nilai frekuensi tegangan impuls dan pergeseran bentuk gelombang setelah diamati. Persamaan nilai frekuensi ini di oleh persamaan tunjukkan persamaan (3) dan (4) (Institute, 1992)

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (3)$$

Nilai f menunjukkan nilai frekuensi osilasi yang terjadi, L induktansi belitan motor, dan C kapasitansi dari kapasitor surja yang digunakan serta R merupakan resistansi total rangkaian. Dikarenakan nilai $\frac{R^2}{4L^2}$ jauh lebih kecil dari $\frac{1}{LC}$ maka persamaan dapat direduksi menjadi [14] :

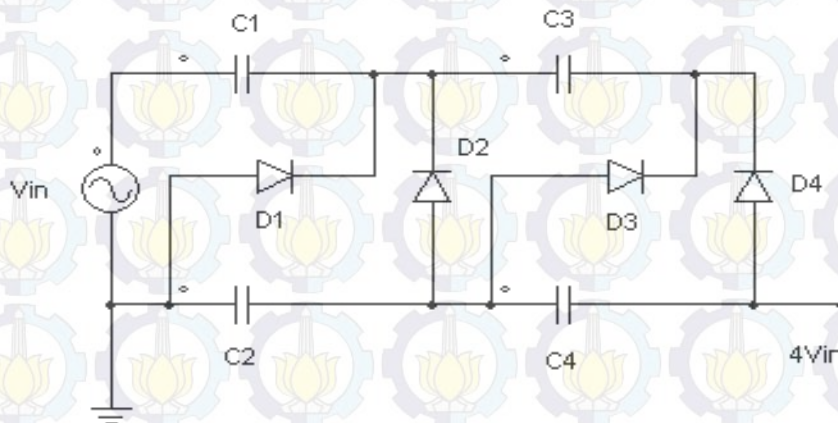
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (4)$$

Dari persamaan (4) dilihat bahwa nilai induktansi berbanding terbalik dengan nilai frekuensi respon tegangan impuls. Ketika isolasi antar belitan mengalami kerusakan akan terjadi *short* antar belitan sehingga nilai induktansi akan

berkurang. Pegurangan nilai yang signifikan akan merubah gelombang respon dari motor normal.

2. Pembangkit tegangan tinggi searah

Secara umum pembangkitan tegangan tinggi searah dilakukan dengan penyearahan tegangan tinggi bolak balik melalui diode, kemudian dapat dilipat gandakan. Seperti pada rangkaian *cockcroft-walton multiplier* (CWM). Rangkaian seperti ini tersusun dari rangkaian pengali tegangan yang terdiri kapasitor dan dioda. Rangkaian tersebut mengkonversi tegangan rendah AC atau tegangan DC berpulsa menjadi tegangan DC yang lebih tinggi dengan nilai arus yang rendah (K. & Daigavane M. B. , July 2011). Skema rangkaian *cockcroft-walton* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Rangkaian *Cockcroft-Walton Multiplier* (K. & Daigavane M. B. , July 2011)

Rangkaian *cockcroft-walton* memiliki keunggulan berupa tegangan setiap tahap *cascade* mempunyai nilai yang sama dengan dua kali tegangan input puncak penyearah setengah gelombang penuh. Dalam penyearah gelombang penuh itu adalah tiga kali tegangan input. Ini memiliki keuntungan dari memerlukan komponen biaya yang relatif rendah dan menjadi mudah untuk mengisolasi. Satu juga dapat menekan output dari setiap tahap, seperti *transformator multitapped*. Operasi rangkaian *Cockcroft-Walton Multiplier* atau pengali tegangan, cukup sederhana. Tegangan output, dengan asumsi setiap komponen bekerja dengan kondisi yang ideal, adalah dua kali tegangan input puncak dikalikan dengan jumlah *stage* dalam *multiplier* (K. & Daigavane M. B. , July 2011).

3. Error area ratio

Metode *error area ratio* (EAR) merupakan salah satu metode paling efektif yang digunakan untuk menganalisis gelombang osilasi. Hal ini dikarenakan sensitifitas yang sangat tinggi terhadap perubahan gelombang osilasi (Grubic, et al., 2011).

Rumus *modified* EAR adalah sebagai berikut :

$$EAR = \frac{|\sum_{i=1}^N |F_i^{(1)}| - \sum_{i=1}^N |F_i^{(2)}|}{\sum_{j=1}^N |F_j^{(1)}|} \times 100 \quad (5)$$

Nilai $F_i^{(1)}$ merupakan poin ke-i pada gelombang referensi dan $F_i^{(2)}$ adalah poin ke-i pada gelombang pengujian. Perbandingan perubahan gelombang tersebut maka akan didapatkan nilai EAR. Metode EAR sendiri dibagi menjadi tiga yaitu *Pulse to Pulse* EAR (P-P EAR), *Line to Line* EAR (L-L EAR) dan *Test-Ref* EAR (Baker, n.d.).

a. *Test-Ref* EAR% : Pengujian ini digunakan ketika motor dalam jumlah banyak dengan desain konstruksi yang sama akan diuji. Metode ini digunakan untuk proses manufaktur motor dan selama *rewinding* motor. Metode ini sangat sensitif terhadap belitan dan kondisi motor. Pengujian ini hampir mirip dengan pengujian menggunakan metode L-L EAR. Perbedaan *Test-Ref* EAR% terhadap L-L EAR menggunakan fasa satu dengan lain untuk melakukan perbandingan referensi EAR. Sedangkan *Test-Ref* EAR menggunakan kondisi awal belitan sebagai perbandingan referensi EAR. Sehingga bentuk gelombang referensi harus disimpan untuk perbandingan selanjutnya.

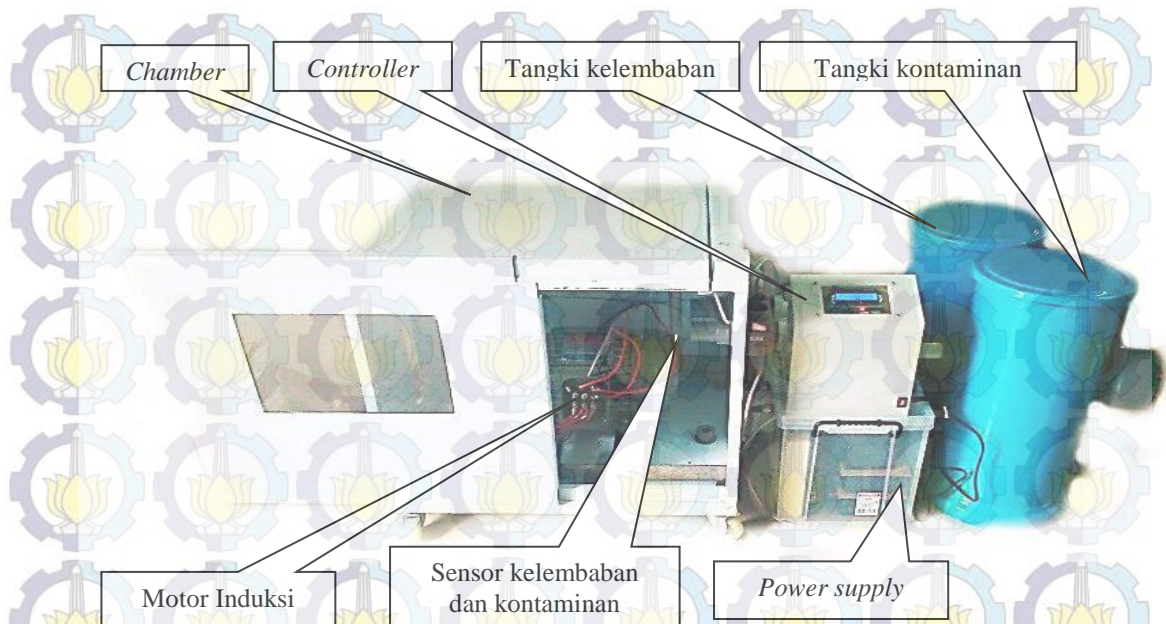
b. L-L EAR% : Metode ini secara matematis membandingkan gelombang surja hasil pengujian antarfasa terhadap antarfasa lain. Cara kerja dari metode ini yaitu bentuk gelombang dari ketiga fasa motor harus identik atau sama. Jika ada bentuk gelombang yang tidak sama, maka akan dianalisis seberapa jauh perbedaan yang terjadi. Dan apa bila telah melebihi batas standar L-L EAR maka dapat disimpulkan terdapat hubungan singkat antar belitan atau antar fasa. Metode L-L EAR bekerja dengan baik

saat rotor tidak dipasang pada motor karena setiap koil akan identik. Selain itu pengujian dengan rotor juga tidak disarankan untuk metode ini. Metode ini cocok untuk pengujian dengan tegangan uji 500 s.d 30.000 V. Terdapat beberapa kondisi yang mempengaruhi nilai dari hasil tes dengan metode ini yaitu: (1) posisi rotor, (2) konfigurasi belitan, (3) kondisi rotor, (4) koneksi motor, (5) kondisi laminasi besi (*iron condition*) dan (6) *iron saturation*.

- c. P-P EAR% merupakan metode *real-time* untuk menganalisis gelombang surja. Metode ini dioperasikan ketika tes gelombang osislsi dijalankan. Sebagai contoh untuk mencapai tegangan tes 2500 V dengan *step voltage* 50 V maka akan didapat 50 *step* (tahap) dari 0 s.d 2500 V. Yaitu 0 V, 50 V, 100 V, 150 V, s.d 2500 V. Lalu perbedaan antar gelombang yang berhasil, seperti contoh 1400 V dan 1450 V maka itulah P-P EAR. Metode ini tidak memiliki keterbatasan seperti metode L-L EAR yaitu tidak dipengaruhi oleh efek posisi rotor, kondisi rotor, konfigurasi belitan, koneksi motor, kondisi logam (*iron*), dan saturasi. Metode ini merupakan metode paling modern untuk menguji integritas isolasi antar belitan dengan menggunakan tes surja. Metode ini bisa digunakan untuk pengujian dengan tegangan 1 kV s.d 30 kV.

2.4 Standar Pengujian Alat

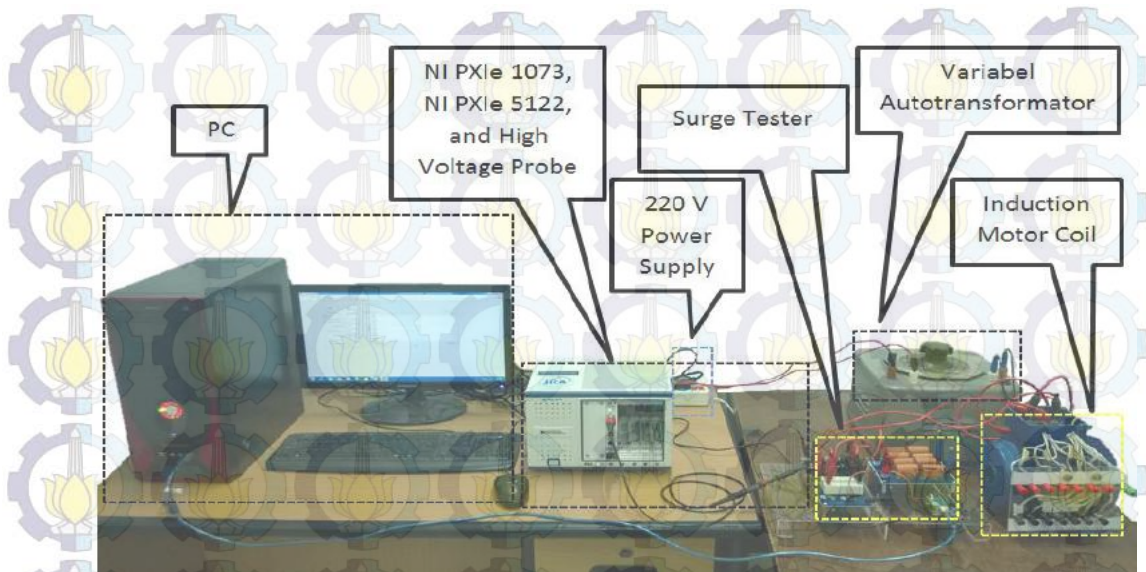
Pengujian alat percepatan penuaan isolasi telah dilakukan di laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Gambar 2.6 menunjukkan alat percepatan penuaan isolasi tersebut. Berdasarkan hasil pengujian, alat ini mampu memberikan efek kelembaban tinggi dan kontaminan garam secara terkontrol. Pada Tabel 2.2 terlihat bahwa belitan stator mengalami penurunan nilai yang sangat signifikan. Untuk PI pada belitan V terjadi penurunan signifikan mulai dari nilai 4 ke 5,33 pada pengujian pertama hingga mencapai nilai yang sangat rendah 0,64 pada pengujian ke tiga. Hal ini juga terjadi pada belitan yang lain (Mahardhika, 2015).



Gambar 2. 6 Alat percepatan penuaan isolasi (Mahardhika, 2015).

Tabel 2. 2 Hasil pengujian pada alat percepatan penuaan isolasi (Mahardhika, 2015)

Visual	Kondisi Awal			Kondisi Percobaan 1		
	Hasil Pengukuran					
	V	U	W	V	U	W
Tahanan isolasi menit 1 (M Ω)	2.140	2.640	2.730	446	350	690
IR menit 10(M Ω)	9.500	>10.000	>10.000	611	470	860
PI	4	3,8	3,7	1,4	1,3	1,3
Visual	Kondisi Percobaan 3			Kondisi Percobaan 3		
	Hasil Pengukuran					
	V	U	W	V	U	W
IR menit 1 (M Ω)	242	47,9	212	170	42.5	197
IR menit 10(M Ω)	222	47,9	187	109	35,4	129
PI	0,9	1	0,9	0,6	0,8	0,7



Gambar 2. 7 Pengujian pembangkit tegangan surja (Nugroho, 2015)

Berdasarkan hasil pengujian, alat ini mampu mendeteksi kerusakan belitan hingga kerusakan yang sangat kecil sekalipun. Kenaikan nilai EAR pada setiap penambahan *turn fault* semakin besar. Hal ini mengindikasikan peralatan surja yang digunakan memiliki tingkat akurasi yang baik dalam mendeteksi pelemahan atau kerusakan isolasi. Berikut hasil yang telah dicapai terlihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Hasil analisis EAR dengan variasi kapasitansi (Nugroho, 2015).

Coil	Belitan ke	(Rangkaian pertama, 10nf) EAR %	(Rangkaian kedua, 1 nf) EAR %
Keadaan normal dan short tanpa rumah stator	2-3	20,4 %	46,3 %
	2-15	81,0 %	84,3 %
	2-24	88,4 %	88,3 %
Keadaan normal dan short dengan rumah stator	1-2	7,7 %	5 %
	1-3	24,8 %	9,2 %
	1-15	53,6 %	4,6 %
	1-24	38,6 %	2,7 %
Isolasi normal dan isolasi rusak tanpa rumah stator	1-24 (tes pertama)	43,9 %	22,2 %
	1-24 (tes kedua)	44,2 %	12,1 %

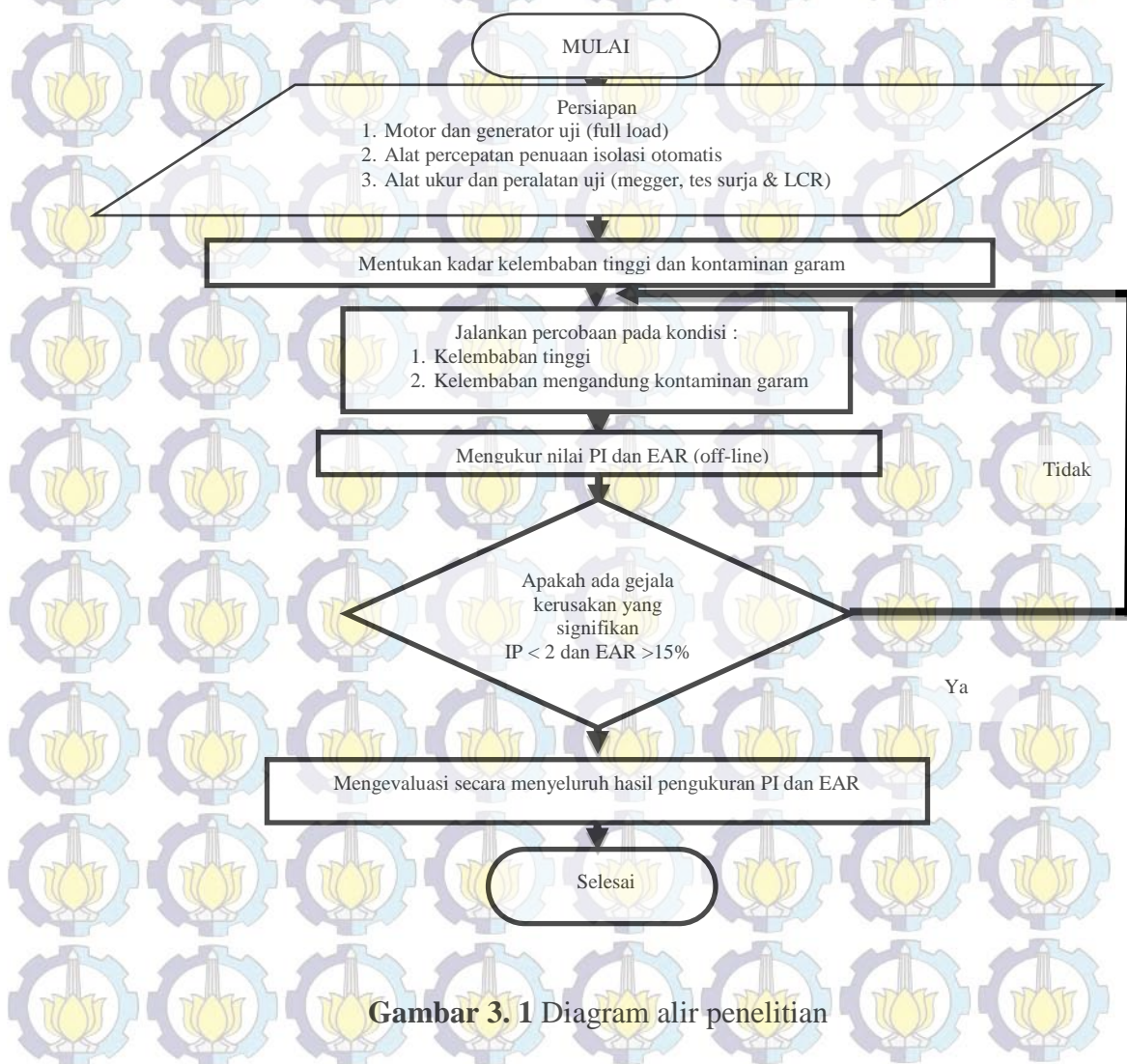
BAB 3

METODE PENELITIAN

Pada BAB ini akan dibahas mengenai proses-proses penelitian mulai dari desain pengujian, konstruksi pengujian, dan pengukuran kualitas isolasi.

3.1 Desain Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kondisi isolasi pada motor induksi berbeban yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan (*ambient stress*). Langkah awal adalah mendesain ruangan untuk motor dalam kondisi pengaruh kelembaban dan kontaminan berupa alat percepatan penuaan isolasi secara otomatis.

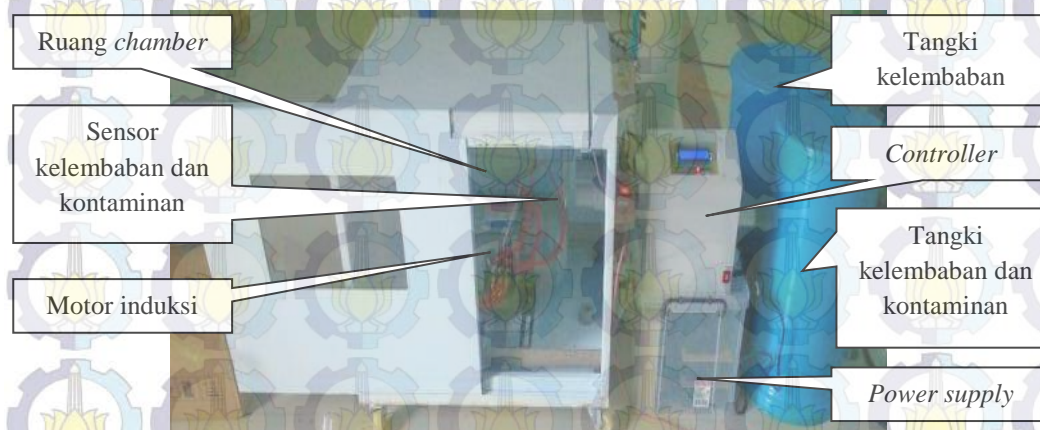


Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Terdapat dua motor yang diuji berdasarkan kondisi tertentu yaitu kelembaban tinggi serta gabungan antara kelembaban dan kontaminan. Kemudian motor dijalankan dengan beban penuh. Setelah mencapai waktu yang diinginkan, lilitan stator diukur nilai PI menggunakan megger, EAR melalui tes respon osilasi serta pengukuran induktansi, kapasitansi dan resistansi menggunakan *LCR meters*. Semua pengukuran nilai tersebut dilakukan pada saat motor *off-line*. Tahap terakhir berupa diagnosa hasil pengukuran yang diharapkan menuju tren penurunan setiap tahapan uji. Agar proses tersebut lebih jelas, dapat dilihat dalam *flowchart* di Gambar 3.1. Desain pengujian pada penelitian ini mencakup desain alat percepatan penuaan isolasi dan pembangkitan tegangan surja.

3.1.1 Alat percepatan penuaan isolasi

Alat pengujian untuk mempercepat penuaan isolasi pada penelitian ini merupakan alat yang didesain sedemikian rupa hingga efek yang diberikan dalam pengujian menyerupai keadaan di Industri. Gambar 3.2 menunjukkan alat uji yang digunakan.

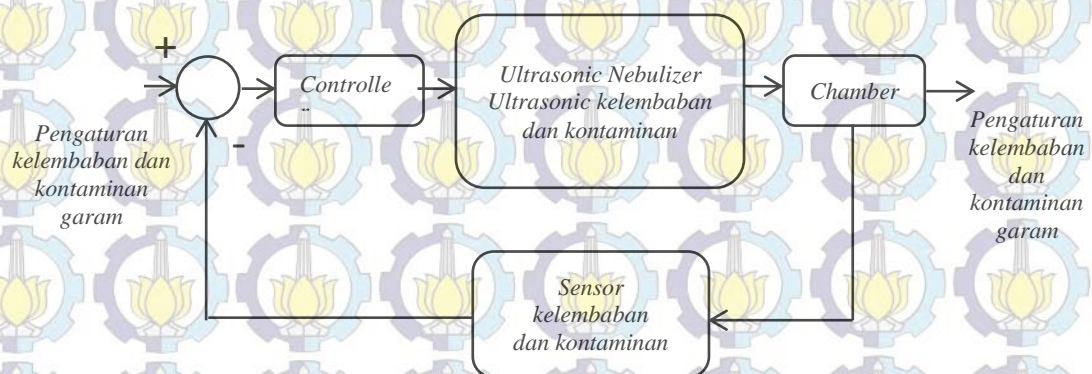


Gambar 3. 2 Desain alat uji percepatan penuaan isolasi

Pada alat ini terdapat 2 tangki yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan air. Tangki pertama untuk menyimpan air yang digunakan sebagai sumber kelembaban dan tangki kedua untuk menyimpan larutan garam yang digunakan sebagai sumber kontaminasi. Masing-masing tangki mampu menampung 10 liter air dengan dilengkapi *blower* untuk memindahkan kelembaban dan atau kontaminasi dari tangki ke dalam *chamber*. *Chamber* ini terbuat dari plat besi berbentuk persegi dengan jendela transparan untuk melihat keadaan motor saat

beroperasi. Pengaturan nilai kelembaban dan kontaminan menggunakan dua sensor. Sensor DHT11 untuk mengukur nilai kelembaban dan sensor *salinity* (kontaminasi) berupa dua buah elektroda lithium yang bekerja berdasarkan prinsip konduktivitas.

Kelembaban dan kontaminasi di dalam *chamber* dibangkitkan oleh *ultrasonic nebulizer* dan diatur sesuai setting yang diinginkan. Pada tangki pertama jika kelembaban di dalam *chamber* di bawah *setting*, maka *ultrasonic nebulizer* untuk kelembaban bekerja. Ketika kelembaban di dalam *chamber* di atas *setting*, maka *ultrasonic nebulizer* untuk kelembaban tidak bekerja. Hal ini juga berlaku pada tangki kedua, ketika kontaminasi di dalam *chamber* di bawah *setting*, maka *ultrasonic nebulizer* untuk kontaminasi bekerja. Ketika kontaminasi di dalam *chamber* di atas *setting*, maka *ultrasonic nebulizer* untuk kontaminasi tidak bekerja. Untuk kordinasi kerja dari setiap komponen digunakan mikrokontroler Arduino Mega. Gambar 3.3 menunjukkan diagram alur pengujian percepatan penuaan isolasi yang digunakan dalam penelitian ini .

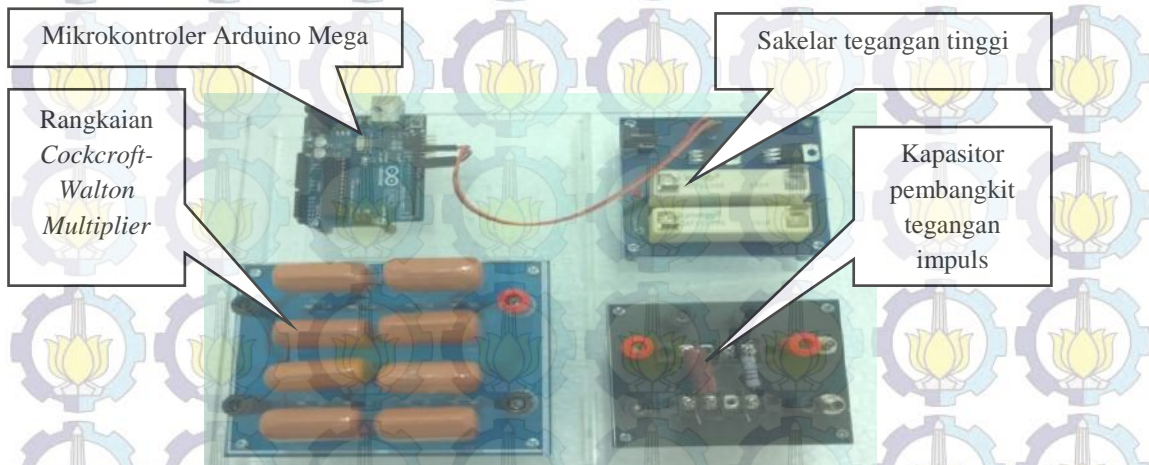


Gambar 3. 3 Diagram alur alat pengujian

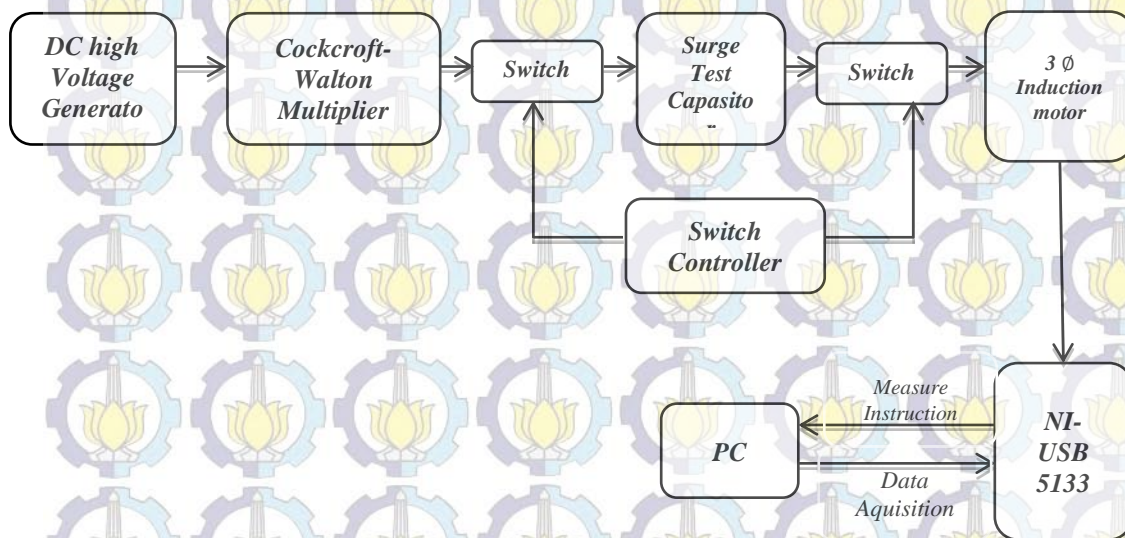
3.1.2 Pengujian tegangan surja

Pengujian tegangan surja atau tes gelombang osilasi yang digunakan pada penelitian ini berupa pembangkitan tegangan tinggi berfrekuensi osilasi terhadap belitan stator motor. Adapun peralatan uji didesain sedemikian rupa dengan standar industri yang telah ditentukan. Gambar 3.4 menunjukkan perangkat pembangkit tegangan surja. Proses kerja dari *switch* yaitu pertama *switch* 1 menutup dan *switch* 2 terbuka sehingga *DC high voltage generator*

akan mengisi tegangan ke *surge test capacitor*. Kedua *switch* 1 terbuka dan *switch* 2 tetap terbuka.



Gambar 3. 4 Perangkat pembangkit tegangan surja

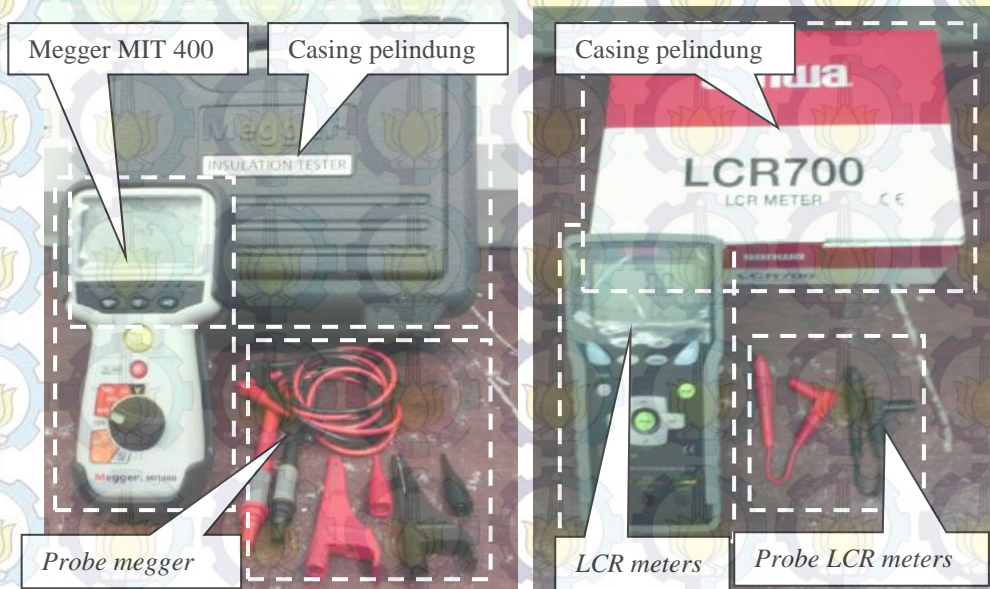


Gambar 3. 5 Diagram alur pengujian surja

Keempat *switch* 1 tetap terbuka dan *switch* 2 terbuka. Disaat gelombang surja terbentuk, data gelombang surja tersebut diambil oleh Digitizer NI USB 5133. Lalu data tersebut akan dilanjutkan dan disimpan oleh PC. Setelah semua data tersimpan dalam program PC, lalu proses pengukuran dan akusisi dihentikan dengan menekan tombol *restart* pada *switch controller*. Gambar 3.5 menunjukkan diagram alur pengujian surja yang digunakan dalam penelitian ini.

3.2 Kontruksi Pengujian

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*” yang mempunyai tegangan uji 250 Volt, 500 Volt, hingga 1000 Volt DC, serta mempunyai *range* tahanan isolasi sampai 20.000 M Ω atau 20 G Ω . Sedangkan Digital LCR Meter mempunyai *range* pengukuran : Induktansi 20.000 μ H ~ 2000 H, Capacitor 200 pF ~ 20 mF serta Resistansi 20.000 Ω ~ 200 M Ω . Gambar 3.6 dibawah ini merupakan peralatan ukur yang digunakan.

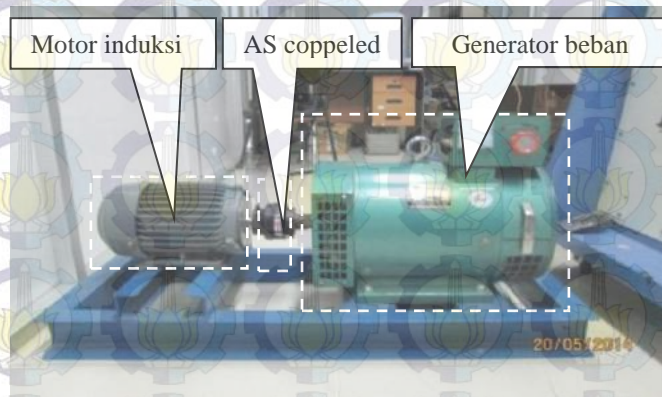


(a)

(b)

Gambar 3. 6 a. Megger “Digital Insulation Tester” MIT 4000 dan b. Sanwa “Digital LCR Meter” LCR 700.

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 seperti dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Motor Induksi dan Generator Sinkron tiga fasa

Adapun spesifikasi motor induksi yang digunakan dalam penelitian ini terlampir pada Tabel 3.1 berikut :

Tabel 3. 1 Spesifikasi motor induksi.

Parameter	Nilai
Daya keluaran nominal	1,5 kW
Jumlah kutub	4 pole
Kecepatan nominal	1380 rpm
Indeks proteksi (IP)	55
Tegangan operasi	220 / 380 V
Arus nominal	5,94 / 3,44 A
Efisiensi (<i>Full load</i>)	78,6 %
Daya input (<i>Full load</i>)	1,91 kW

Sedangkan generator sinkron yang digunakan memiliki kapasitas daya mencapai 3 kW. Generator tersebut dihubungkan dengan set lampu berdaya total sebesar 2100 kW seperti pada Gambar 3.8.



Gambar 3. 8 Set Set lampu.

Generator dan set lampu ini digunakan sebagai beban motor yang bertujuan untuk meningkatkan temperatur belitan. Untuk mengetahui besar temperatur belitan tersebut secara *realtime* maka sensor temperatur LM35 dilekatkan pada bagian *end-winding* belitan stator motor seperti pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Sensor temperature LM35

3.2.1 Pengujian dengan kelembaban tinggi

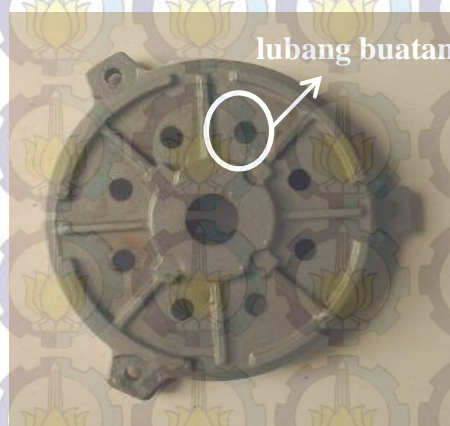
Motor yang telah dibebani dioperasikan dengan pengaruh kelembaban. Dalam hal ini, tingkat kelembaban diatur tinggi dan tidak melebihi titik embun (*dew point*) dari bahan isolasi motor untuk mempercepat proses penuaan. Motor akan dioperasikan secara terus-menerus sampai tidak dapat dioperasikan kembali (rusak). Pengujian ini dilakukan dalam ruangan (*chamber*) untuk memudahkan dalam menjaga tingkat kelembaban yang diinginkan. Pada Tabel 3.2 ditunjukkan skema pengujian pada percobaan terhadap pengaruh kelembaban tinggi. Pada skema percobaan ini, motor dikopel dengan generator sinkron yang terhubung dengan set lampu berdaya total sebesar 900 W. Prosedur percobaan dimulai dengan mengaktifkan *controller* yang mengirim sinyal untuk menyalakan *ultrasonic nebulizer* sehingga membentuk lingkungan dengan kelembaban tinggi di dalam *chamber*. Seiring dengan penyalaan *ultrasonic nebulizer* tersebut, prosentase kelembaban yang terukur akan mengalami peningkatan hingga mencapai nilai maksimum. Selain itu, *chasing* motor dimodifikasi untuk memudahkan udara lembab masuk ke dalam ruang stator seperti pada Gambar

3.10

Tabel 3. 2 Skema percobaan pengaruh kelembaban tinggi.

Durasi pengujian (Jam)	Kelembaban (%)	Beban (Watt)	Keterangan (Nilai PI, EAR & LCR)
0-2 (Hari pertama)			Pengujian pada kondisi normal
0-6	60	1500	Pembebanan selama 4 jam
6-16	60-80	1500	Pembebanan selama 6 jam*
16-26	60-80	900	Pembebanan selama 6 jam*
26-36 (Hari kedua)	60-80	900	Pembebanan selama 6 jam*
36-46	60-80	900	Pembebanan selama 6 jam*
46-56	60-80	900	Pembebanan selama 6 jam*
56-66 (Hari ketiga)	60-80	900	Pembebanan selama 6 jam*
66-70	60-80	900	Pembebanan selama 6 jam*
70-76	60-80	900	Pembebanan selama 6 jam*
dts	**		
* Proses pendinginan, pengukuran dan persiapan pengujian kembali selama 4 jam			
**Pengujian ini terus dilakukan hingga belitan isolasi menunjukkan tren penurunan			

Selain itu, *chasing* motor dimodifikasi untuk memudahkan udara lembab masuk ke dalam ruang stator seperti pada Gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Modifikasi *Chasing*

Setelah kondisi ini tercapai, barulah pengoperasian motor dilakukan. Pembebanan dan tingkat kelembaban diatur berdasarkan skema pada Tabel 3.2 diatas. Kemudian, motor dioperasikan secara kontinyu hingga pengukuran tahanan isolasi dilakukan. Pencatatan terhadap temperatur belitan dan kondisi

lingkungan di dalam *chamber* dilakukan secara berkala selama percobaan berlangsung.

3.2.2 Pengujian dengan kelembaban dan kontaminan

Pada pengujian kedua ini, metode yang digunakan untuk menimbulkan kelembaban dan kontaminasi yang sama dengan percobaan pertama. Namun tingkat kelembaban ditambahkan kontaminasi berupa larutan garam (*atmospheric salt*). Jenis kontaminasi garam ini termasuk kontaminasi berat (*very heavy pollution*) yaitu dengan konsentrasi 56 kg/m^3 (Yamamoto & Ohashi, 1961). Motor akan dioperasikan secara terus-menerus sampai tidak dapat dioperasikan, yang bertujuan untuk melihat pengaruh kelembaban dan kontaminasi tersebut pada nilai tahanan isolasi motor.

Penambahan beban motor secara bertahap dimaksudkan untuk meningkatkan temperatur belitan. Dengan temperatur belitan yang tinggi, isolasi dapat mengalami tekanan *thermal*. Pengurangan tekanan *thermal* tersebut diharapkan dapat memudahkan udara lembab untuk mempengaruhi isolasi belitan (Stone, et al., 2004). Dalam hal ini dilakukan dengan cara mengurangi jumlah lampu pada generator hingga menjadi 900 W. Pada Tabel 3.3 ditunjukkan skema pengujian pada percobaan terhadap pengaruh kelembaban dan kontaminan.

Tabel 3. 3 Skema percobaan pengaruh kelembaban dan kontaminan.

Durasi pengujian (Jam)	Kelembaban (%)	Kontaminan (%)	Beban (Watt)	Keterangan (Nilai PI, EAR & LCR)
0-2 (Hari I)				Pengujian pada kondisi normal
2-6	60	1-2	1500	Pembebanan selama 4 jam
6-16	60-80	1-2	1500	Pembebanan selama 6 jam*
16-26	60-80	1-3	900	Pembebanan selama 6 jam*
26-36 (Hari II)	60-80	1-3	900	Pembebanan selama 6 jam*
36-46	60-80	1-3	900	Pembebanan selama 6 jam*
46-56	60-80	1-3	900	Pembebanan selama 6 jam*
56-66 (Hari III)	60-80	1-3	900	Pembebanan selama 6 jam*
66-70	60-80	1-3	900	Pembebanan selama 6 jam*
70-76	60-80	1-3	900	Pembebanan selama 6 jam*

Tabel 3. 4 Skema percobaan pengaruh kelembaban dan kontaminan. (Lanjutan)

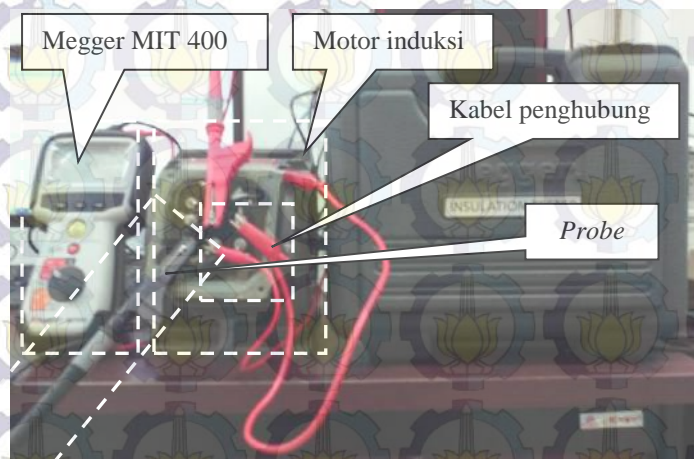
Durasi pengujian (Jam)	Kelembaban (%)	Kontaminan (%)	Beban (Watt)	Keterangan (Nilai PI, EAR & LCR)
70-76 dts	60-80 **	1-3	900	Pembebanan selama 6 jam*
* Proses pendinginan, pengukuran dan persiapan pengujian kembali selama 4 jam				
**Pengujian ini terus dilakukan hingga belitan isolasi menunjukkan tren penurunan				

3.3 Pengukuran Kualitas Isolasi

Pada tahapan ini diagnosa penurunan kualitas isolasi digunakan tiga teknik pengukuran yaitu pengukuran nilai PI menggunakan megger MIT 400, pengukuran nilai RLC menggunakan sanwa LCR 700 dan pengukuran surja EAR menggunakan tes respon osilasi.

3.3.1 Pengukuran nilai PI

Pengukuran nilai PI dari isolasi stator dilakukan pada suhu ruangan atau suhu ambient. Pengukuran dilakukan pada tiap fasa yaitu fasa U, V, dan W masing-masing di ukur langsung terhadap *ground*. *Grond* pada pengujian ini dapat di hubungkan ke bodi atau *cassing* motor yang berhubungan langsung dengan slot stator. Saat pengujian, motor harus dalam keadaan tidak dioperasikan.

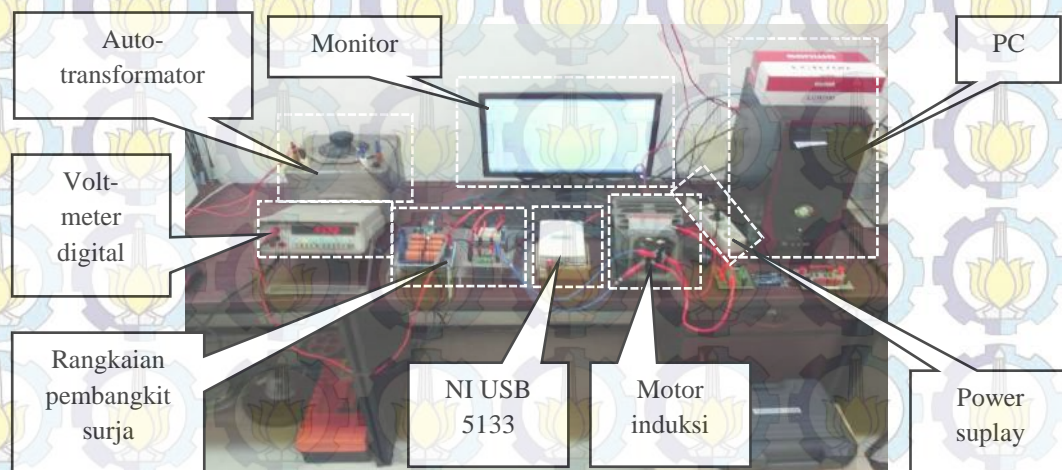


Gambar 3. 11 Pengukuran nilai PI tahanan isolasi motor menggunakan Megger MIT 400.

Gambar 3.11 memperlihatkan cara pengukuran nilai PI tahanan isolasi motor dengan menggunakan megaohm meter fasa terhadap *ground*. Setiap pengujian harus diawali terlebih dahulu mengosongkan muatan belitan dengan cara menghubungkan-singkatkan titik pengukuran belitan dengan *ground*. Perlu diperhatikan setiap tahapan pengujian harus dipersiapkan catatan atau rekaman untuk mericod data hasil pengukuran.

3.3.2 Pengukuran nilai EAR

Pada pengujian tes respon gelombang osilasi atau tes surja pada motor induksi tiga fasa, dilakukan perbandingan hasil gelombang osilasi dengan variasi kegagalan belitan stator. Gelombang yang dihasilkan pada kondisi belitan normal inilah yang dijadikan sebagai gelombang referensi. Adapun pengujian ini dilakukan seperti pada Gambar 3.12.



Gambar 3. 12 Pengujian surja dengan mengukur nilai EAR terhadap belitan.

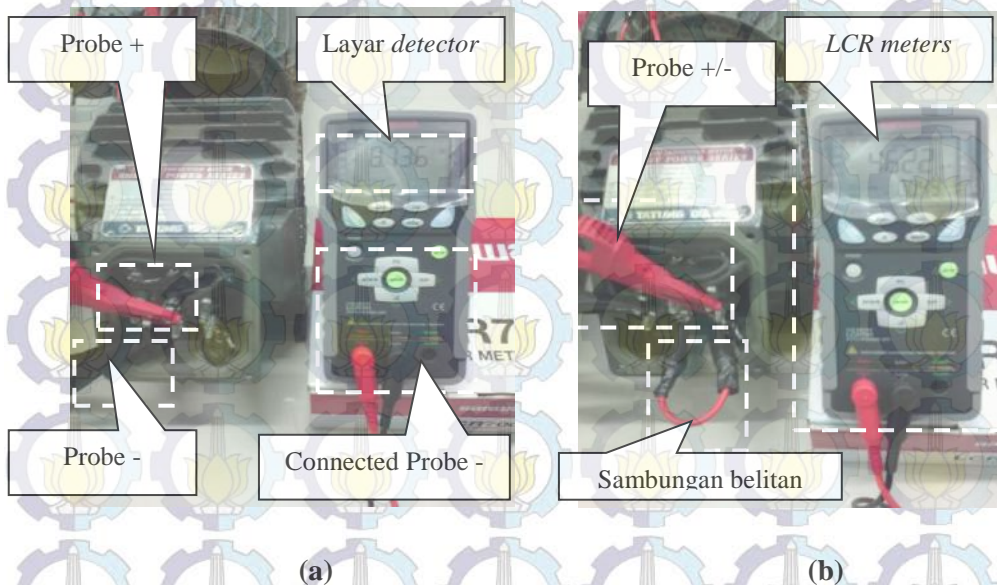
Respon gelombang osilasi dari belitan yang diuji dibandingkan dengan gelombang osilasi referensi untuk mengetahui perbedaan. Dari hasil analisa respon gelombang osilasi dengan menggunakan metode EAR dapat diketahui kondisi kelayakan belitan motor induksi tersebut. Berdasarkan *Baker Instrument Company AWA Surge Test pass/fail criteria*, hasil tes respon gelombang osilasi pada belitan motor induksi tiga fasa yang didapatkan ditentukan kondisi kelayakan atau penurunan kualitas isolasi. Belitan motor induksi dinyatakan

layak, jika hasil gelombang surja belitan mempunyai nilai EAR 15% dari respon gelombang referensi (Baker, n.d.).

Pada pengujian ini menggunakan sebuah motor induksi tiga fasa yang telah rusak beberapa isolasi belitan akibat pembebanan pada kondisi kelembaban tinggi dan efek kontaminan. Tes respon gelombang isolasi pada motor induksi dilakukan dengan mengalirkan tegangan impuls pada belitan motor tersebut, pengetesan dilakukan ketika motor dalam keadaan *offline* atau tidak beroperasi. Dari hasil pengujian tersebut, gelombang osilasi pada motor induksi dengan kondisi belitan normal dijadikan sebagai gelombang osilasi referensi.

3.3.2 Pengukuran nilai LCR

Pengukuran nilai LCR dilakukan sama seperti pada pengukuran PI Saat pengujian, motor harus dalam keadaan tidak dioperasikan. Gambar 3.13 menunjukkan pengukuran dengan belitan per fasa dan belitan antar fasa. Pengukuran dilakukan pada fasa U1-U2, V1-V2, W1-W2, U1-V1, U1-W1 dan V1-W1. Perlu diperhatikan pada saat mengukur terhadap belitan antar fasa kita perlu menghubungkan belitan antar fasa agar pengukuran dapat terbaca.



Gambar 3. 13 Pengukuran nilai RLC pada (a). Belitan per fasa (b). antar fasa.

BAB 4 HASIL PERCOBAAN DAN ANALISIS

Pada BAB ini akan dibahas mengenai hasil dari penelitian yang dilakukan. Hasil penelitian meliputi skema percobaan, hasil pengukuran dan analisa pengukuran.

4.1 Skema Percobaan

Pada skema ini akan dibahas hasil pengujian kelembaban tinggi dan percobaan kelembaban dengan kontaminan garam.

4.1.1 Percobaan kelembaban tinggi

Pada skema percobaan pertama, motor yang dipengaruhi oleh kelembaban tinggi dioperasikan selama 6 jam tiap percobaan. Setelah pengoperasian motor dihentikan sementara untuk dilakukan pengukuran tahanan isolasi. Sebelum dilakukan pengukuran terlebih dahulu stator motor didinginkan. Hal ini dimaksudkan agar pengaruh temperature tinggi pada belitan stator tidak mempengaruhi akurasi pengukuran. Hasil pengukuran terhadap temperatur belitan maksimum, temperature udara, kelembaban di dalam *chamber* dapat pada Tabel 4.1. Data-data tersebut berguna dalam menilai tingkat faktor tekanan (*stress factor*) yang diberikan pada isolasi motor.

Tabel 4. 1 Hasil percobaan pertama untuk motor dengan pengaruh kelembaban tinggi.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	Temperatur Belitan Stator (°C)	Temperatur Udara <i>Chamber</i> (°C)	Kelembaban (%)
1	40,3	29	60
2	42,0	34	62
3	39	28	70
4	30,2	27	70
5	35,0	29,4	72

4.1.2 Percobaan kelembaban dengan kontaminan garam

Pada skema percobaan pertama, motor yang dipengaruhi oleh kelembaban dengan kontaminan dioperasikan 6 jam tiap percobaan. Pada setiap 6 jam pengoperasian motor dihentikan sementara untuk dilakukan pengukuran tahanan isolasi. Sebelum dilakukan pengukuran terlebih dahulu stator motor didinginkan. Hasil pengukuran terhadap temperatur belitan maksimum, temperature udara, kelembaban serta kontaminan di dalam *chamber* dapat pada Tabel 4.2. Hal ini dimaksudkan agar pengaruh temperature tinggi pada belitan stator tidak mempengaruhi akurasi pengukuran.

Tabel 4. 2 Hasil percobaan kedua untuk motor dengan pengaruh kelembaban dengan kontaminasi garam.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	Temperatur Belitan Stator (°C)	Temperatur Udara <i>Chamber</i> (°C)	Kelembaban Tinggi (%)	Kelembaban dan kontaminan (%)
1	29,2	29	61	2
2	30,3	29	70	2
3	35,4	28	70	3
4	30,2	30	75	3
5	31,0	29,4	72	3

Pada Tabel 4.2 terlihat bahwa kelembaban yang terjadi dalam *chamber* berkisar 70% dengan kontaminasi garam sebesar 1% s.d 3%. Hal ini dimaksudkan agar belitan mengalami tekanan sehingga kondisi isolasi mengalami penurunan. Tampak juga suhu chamber berkisar 29° C.

4.2 Hasil Pengukuran

4.2.1 Pengukuran nilai PI

Berdasarkan hasil pengukuran tahanan isolasi menggunakan megger dengan rating tahanan terukur 10.000 M Ω , nilai tahanan pada setiap fasa melebihi 10.000 M Ω sebelum durasi pemberian tegangan DC mencapai 1 menit, sehingga nilai PI tidak terukur. Secara praktis, isolasi belitan dalam kondisi baik karena

tahanan isolasi pada saat 1 menit melebihi nilai minimum yang direkomendasikan oleh IEEE Std 43-2013, yaitu sebesar 5 M Ω . Pada Tabel 4.3 dijelaskan mengenai hasil pengukuran tahanan isolasi pada setiap fasa dari setiap percobaan yang dilakukan.

Tabel 4. 3 Hasil pengukuran tahanan isolasi pada skema percobaan untuk motor dengan pengaruh kelembaban tinggi.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	Tahanan Isolasi			Tahanan Isolasi		
	Saat 1 Menit			Saat 10 Menit		
	Fasa U (M Ω)	Fasa V (M Ω)	Fasa W (M Ω)	Fasa U (M Ω)	Fasa V (M Ω)	Fasa W (M Ω)
Normal	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000
1	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000
2	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000
3	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000
4	> 10.000	463	2.390	> 10.000	2.753	6.740
5	320	79,4	3.150	2.080	425	3.540

Pada pengujian terhadap pengaruh kontaminan perubahan nilai PI terlihat di pengujian ke 3 pada fasa U. Nilai tahanan isolasi pada menit pertama 602 M Ω dan tahanan isolasi menit ke sepuluh 610 M Ω . Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh kontaminan telah terjadi. Demikian pula keadaan ini terjadi pada kondisi untuk motor dengan pengaruh kelembaban dan kontaminasi seperti terlihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil pengukuran tahanan isolasi pada skema percobaan untuk motor dengan pengaruh kelembaban dan kontaminasi.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	Tahanan Isolasi			Tahanan Isolasi		
	Saat 1 Menit			Saat 10 Menit		
	Fasa U (M Ω)	Fasa V (M Ω)	Fasa W (M Ω)	Fasa U (M Ω)	Fasa V (M Ω)	Fasa W (M Ω)
Normal	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000

Tabel 4. 5 Hasil pengukuran tahanan isolasi pada skema percobaan untuk motor dengan pengaruh kelembaban dan kontaminasi. (Lanjutan)

Percobaan 1 x 6 jam ke-	Tahanan Isolasi			Tahanan Isolasi		
	Saat 1 Menit			Saat 10 Menit		
	Fasa U (MΩ)	Fasa V (MΩ)	Fasa W (MΩ)	Fasa U (MΩ)	Fasa V (MΩ)	Fasa W (MΩ)
1	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000
2	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000	> 10.000
3	602	> 10.000	> 10.000	610	> 10.000	> 10.000
4	259	291	230	262	1.100	1.280
5	7.550	423	3.440	652	980	7.600

Pada pengujian 6 jam ke 3 indikasi penurunan sudah mulai terlihat dengan nilai IR menit pertama sebesar 602 MΩ dan 610 MΩ pada menit ke sepuluh untuk belitan fasa U. Seiring lama pengujian nilai tahanan isolasi mulai terdeteksi hingga seluruh fasa. Berdasarkan hasil pengukuran pada Table 4.4 dan Tabel 4.3 dilihat nilai PI dari ke dua kondisi yang tersaji pada Tabel 4.5

Tabel 4. 6 Hasil pengukuran PI pada motor dengan pengaruh kelembaban tinggi dan kontaminan garam menggunakan megger.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	PI					
	Kondisi kelembaban			Kondisi kontaminan		
	Fasa U	Fasa V	Fasa W	Fasa U	Fasa V	Fasa W
Normal	OL	OL	OL	OL	OL	OL
1	OL	OL	OL	OL	OL	OL
2	OL	OL	OL	OL	OL	OL
3	OL	OL	OL	1.013	OL	OL
4	OL	5,9	2,8	1	3,8	5,6
5	6,5	5,4	1,1	0,1	2,3	2,2

Keterangan :

OL = tahanan isolasi yang terukur pada saat 1 s.d 10 menit melebihi *range* dari alat ukur megger.

Nilai PI pada kondisi kelembaban tinggi mulai terlihat pada pengujian 6 jam ke 4 ditunjukkan pada phasa V dan W sebesar 5,9 dan 2,8. Hal ini juga terjadi pada kondisi kontaminan garam. Nilai PI terendah terlihat pada belitan fasa U pada percobaan kontaminan sebesar 0,1, kemudian disusul belitan fasa W pada percobaan kelembaban dengan nilai 1,1.

4.2.1 Pengukuran nilai EAR

Berdasarkan hasil pengujian surja nilai EAR didapatkan luasan area perfasa dan antar fasa. Untuk melihat perbedaan luasan, pada penelitian ini digunakan dua analisis yaitu *test ref* EAR dan *Line-line* EAR. Hasil pengukuran luasan gelomabang yang terbentuk di tiap skema percobaan dapat dilihat pada Tabel 4.6 untuk kondisi kelembaban.

Tabel 4. 7 Hasil pengukuran nilai luasan pada motor dengan pengaruh kelembaban menggunakan pengujian surja.

Percobaan	Luasan area motor kondisi kelembaban					
	U1-U2	V1-V2	W1-W2	U1-V1	U1-W1	V1-W1
1 x 6 jam ke-						
Refrensi	67.387,5	64.010,3	79.955,9	127.819,2	122.098,9	115.571,6
1	68.430,6	65.619,4	78.705,9	98.368,2	101.660,6	104.334,9
2	54.465,2	44.479,9	58.877,9	77.194,9	79.761,9	85.429,3
3	18.751,7	28.978,2	32.196,1	51.917,9	55.779,8	53.845,0
4	48.812	44.691,2	83.522,6	87.664,6	82.025,8	85.372,4
5	44.685,5	44.639,2	75.682,7	83.105,0	82.444,0	86.220,4

Dari tabel diatas terlihat luasan area yang terbesar terdapat pada belitan pada kondisi normal dengan nilai 83.522,6 untuk belitan W1 terhadap belitan W2 per fasa. Kemudian untuk antar belitan terdapat pada belitan U1 terhadap V1 yaitu sebesar 127.819,2. Dengan menggunakan rumusan (5) didapat nilai EAR seperti ditunjukkan pada Tabel 4.7 berikut ini.

Tabel 4. 8 Hasil pengukuran nilai *Test-Ref* EAR dengan pengaruh kelembaban menggunakan pengujian surja.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	<i>Test-Ref</i> EAR Kondisi kelembaban tinggi (%)		
	U1-U2	V1-V2	W1-W2
1	1,5	2,5	1,6
2	19,2	30,5	26,4
3	72,2	54,7	59,7
4	27,64	30,2	4,5
5	33,7	30,3	5,3

Tabel 4.7 diatas menunjukkan nilai *test ref* EAR perbelitan dimana nilai tertinggi pada belitan fasa U1-U2 pada pengujian ke 3 hingga ke 5 mengalami *error* yang tinggi diatas standar 15%. Hal ini juga terjadi pada belitan pada fasa V1-V2 pada pengujian ke 2 serta pada fasa W1-W2. Nilai pada fasa W1-W2 menunjukkan tren yang berbeda dimana pada pengujian pertama nilai EAR masih cukup baik. Namun pada pengujian ke 2 dan 3 nilai berubah dan kembali baik. Hal ini disebabkan oleh faktor komponen *switching* pembangkit surja yang mengalami pelemahan. Untuk hasil pengujian pada *Line to Line* EAR (L-L EAR) kondisi kelembaban tinggi terlihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 9 Hasil pengukuran nilai *Line to Line* EAR dengan pengaruh kelembaban menggunakan pengujian surja.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	<i>Line to Line</i> EAR (L-L EAR) Kondisi kelembaban tinggi (%)					
	U1V1- U1W1	U1V1- V1W1	U1W1- U1V1	U1W1- V1W1	V1W1- U1V1	V1W1- U1W1
Normal	4,7	10,6	4,5	5,6	9,6	5,3
1	3,2	5,7	3,3	2,6	6,1	2,6
2	3,2	9,6	3,3	6,6	10,7	7,1
3	6,9	3,6	7,4	3,6	3,7	3,5
4	6,9	2,7	6,4	3,9	2,6	4,1
5	0,8	3,6	0,8	4,4	3,7	4,6

Dari hasil perhitungan L-L EAR terlihat bahwa selisih luasan masih dikategorikan baik. Hal ini terlihat dari besaran nilai tidak melebihi nilai maksimum yaitu 20%.

Hasil pengukuran luasan gelombang yang terbentuk di tiap skema percobaan dapat dilihat pada Tabel 4.9 untuk kondisi kontaminan.

Tabel 4. 10 Hasil pengukuran nilai luasan pada motor dengan pengaruh kontaminan menggunakan pengujian surja.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	Luasan area motor kondisi kontaminan					
	U1-U2	V1-V2	W1-W2	U1-V1	U1-W1	V1-W1
Refrensi	67.387,5	64.010,3	79.955,8	123.084	121.608	126.213
1	57.780,2	60.602,0	68.322,0	81.012,6	83.572,5	87.099,3
2	45.839,6	51.616,5	48.283,6	86.191,8	83.989,3	66.390,7
3	44.046,9	48.605,6	45.332,0	86.340,2	82.294,2	91.265,6
4	39.545,5	33.172,7	37.855,9	76.544,7	69.453,3	76570,1
5	45.788,8	45.716,4	46.477,8	71.606,4	94.341,2	87.156,2

Dari tabel diatas terlihat luasan area yang terbesar terdapat pada belitan pada kondisi normal tertinggi dengan nilai 79.955,8 untuk belitan W1 terhadap belitan W2 per fasa. Kemudian untuk antar belitan terdapat pada belitan U1 terhadap V1 yaitu sebesar 123.084. Dengan menggunakan rumusan (5) didapat nilai *Test-Ref* EAR seperti ditunjukkan pada Tabel 4.10 berikut ini.

Tabel 4. 11 Hasil pengukuran nilai *Test-Ref* EAR dengan pengaruh kontaminan menggunakan pengujian surja.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	<i>Test-Ref</i> EAR Kondisi kontaminan (%)		
	U1-U2	V1-V2	W1-W2
1	15,0	9,4	10,2
2	32,6	22,8	36,5
3	35,2	27,3	40,4
4	41,8	50,4	50,2
5	32,6	31,6	38,9

Tabel 4.10 diatas menunjukkan nilai *test ref* EAR perbelitan dimana nilai pada belitan fasa U1-U2 pada pengujian ke 2 hingga ke 5 mengalami *error* yang tinggi diatas standar. Dari nilai ini dapat disimpulkan bahwa belitan mengalami short per fasa. Untuk hasil pengujian pada *Line to Line* EAR (L-L EAR) kondisi kelembaban dengan kontaminan terlihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 12 Hasil pengukuran nilai *Line to Line* EAR dengan pengaruh kontaminan menggunakan pengujian surja.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	<i>Line to Line</i> EAR (L-L EAR) Kondisi kelembaban dengan kontaminan (%)					
	U1V1- U1W1	U1V1- V1W1	U1W1- U1V1	U1W1- V1W1	V1W1- U1V1	V1W1- U1W1
Normal	1,2	2,5	1,2	3,6	2,5	3,8
1	3,1	6,9	3,6	4,0	7,5	4,2
2	2,6	29,8	2,6	26,5	22,9	20,9
3	4,9	5,4	4,7	9,8	5,7	10,9
4	10,2	0,1	9,3	9,3	0,1	10,2
5	24,1	17,8	31,7	8,2	21,7	7,6

Pada kondisi kelembaban dan kontaminan untuk percobaan ke dua nilai L-L EAR sudah mengalami indikasi kerusakan dengan nilai belitan U1V2 terhadap V1W1 29,8 %, U1W1 terhadap V1W1 26,5%, V1W1 terhadap 22,9%, dan belitan V1W1 terhadap U1W1 20,9%. Setelah pengujian ke 5 belitan U1V1-U1W1, U1V1-V1W1, U1W1-U1V1 dan V1W1-U1V1 mengalami kenaikan dengan nilai berturut-turut sebesar 24,1%, 17,8%, 31,7% dan 21,7%.

4.2.2 Pengukuran nilai LCR

Pada kondisi kelembaban tinggi perubahan nilai LCR mulai dari keadaan normal hingga stator mengalami penurunan isoslasi tidak terjadi penurunan signifikan. Nilai LCR tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.12 s.d Tabel 4.17.

Tabel 4. 13 Hasil pengukuran induktansi pada motor dengan pengaruh kelembaban tinggi menggunakan sanwa LCR 700.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	Induktansi (mH)					
	U1-U2	V1-V2	W1-W2	U1-V1	U1-W1	V1-W1
Normal	24,3	23,5	23,2	56,5	55,4	54,9
1	24,2	23,6	23,2	53,1	56,4	54,9
2	24,2	23,6	23,2	56,4	55,4	54,8
3	24,2	23,1	23,5	56,4	55,3	54,8
4	24,2	23,2	23,3	56,4	55,3	54,8
5	24,3	23,3	23,2	65,4	55,3	54,8

Tabel 4. 14 Hasil pengukuran kapasitansi pada motor dengan pengaruh kelembaban tinggi menggunakan sanwa LCR 700.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	Kapasitansi (nF)					
	U1-U2	V1-V2	W1-W2	U1-V1	U1-W1	V1-W1
Normal	1.044,5	1.075,5	1.092,2	448,5	457,4	461,4
1	1.044,4	1.074,9	1.091,9	448,6	457,4	461,4
2	1.044,4	1.091,9	1.091,5	448,6	457,5	461,8
3	1.044,8	1.094,4	1.077,7	449,1	458	462,2
4	1.044,8	1.094,4	1.077,3	448,7	458	462,2
5	1.044,8	1.094,4	1.067,9	448,9	458	462,3

Tabel 4. 154 Hasil pengukuran resistansi pada motor dengan pengaruh kelembaban tinggi menggunakan sanwa LCR 700.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	Resistansi (Ω)					
	U1-U2	V1-V2	W1-W2	U1-V1	U1-W1	V1-W1
Normal	7,1	6,7	6,5	13,9	13,6	13,3
1	7,1	6,8	7,3	14,1	14,0	13,7
2	7,1	6,7	7,1	14,1	14,0	15,9
3	8,7	8,6	7,9	15,9	26,4	17,1
4	8,7	8,4	7,9	14,2	26,2	17,2
5	8,6	8,5	8,1	14,2	26,2	17,2

Tabel 4. 16 Hasil pengukuran induktansi pada motor dengan pengaruh kelembaban disertai kontaminan garam menggunakan sanwa LCR 700.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	Induktansi (mH)					
	U1-U2	V1-V2	W1-W2	U1-V1	U1-W1	V1-W1
Normal	24,4	23,2	23,2	56,7	55,5	55,1
1	24,3	23,7	23,3	56,8	55,6	55,2
2	24,2	23,6	23,2	56,9	55,6	55,3
3	24,3	23,7	23,2	56,7	55,4	55,1
4	24,3	23,7	23,2	56,7	55,5	55,1
5	24,3	23,7	23,2	56,4	55,5	55,2

Tabel 4. 176 Hasil pengukuran kapasitansi pada motor dengan pengaruh kelembaban disertai kontaminan garam menggunakan sanwa LCR 700.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	Kapasitansi (nF)					
	U1-U2	V1-V2	W1-W2	U1-V1	U1-W1	V1-W1
Normal	1.043,8	1.069,3	1.091,3	447,6	456,9	499,9
1	1.042	1.067	1.088,4	446	455,9	450,9
2	1.040	1.067,4	1.089	446,2	455,3	454,9
3	1.043,4	1.069,5	1.091,9	446,8	456,8	460
4	1.043,3	1.069,5	1.090	446,7	456,5	459,6
5	1.043,2	1.069	1.090	446,4	456,1	458,2

Tabel 4. 17 Hasil pengukuran resistansi pada motor dengan pengaruh kelembaban disertai kontaminan garam menggunakan sanwa LCR 700.

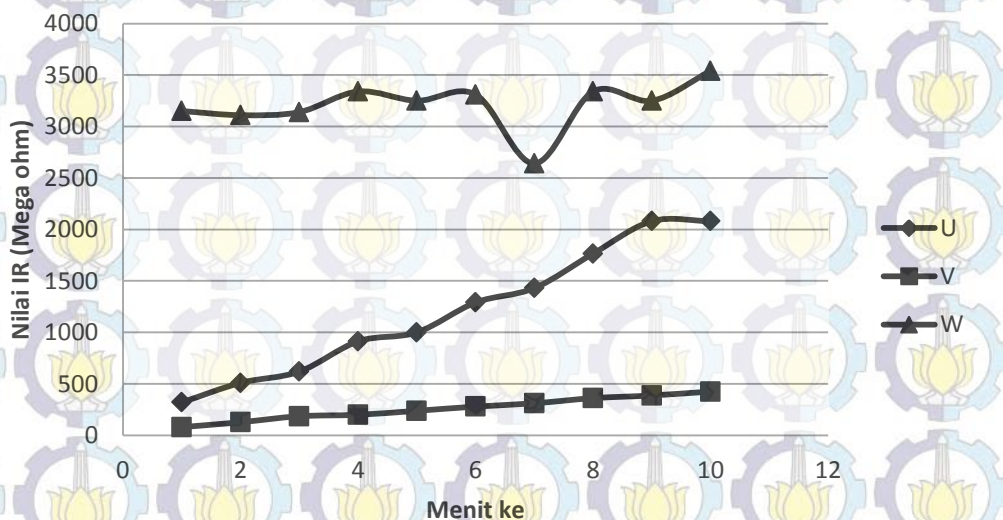
Percobaan 1 x 6 jam ke-	Resistansi (Ω)					
	U1-U2	V1-V2	W1-W2	U1-V1	U1-W1	V1-W1
Normal	7,2	6,7	6,5	13,9	13,7	13,4
1	7,1	7,9	6,8	14,5	13,6	13,7
2	8,9	7,8	13,2	15,3	20,9	15,9
3	9,4	7,7	15,4	19,5	28,9	29,4
4	7,1	6,9	6,6	15	13,8	15,1
5	7,1	6,9	7,9	15,3	23,5	20,9

4.3 Analisis

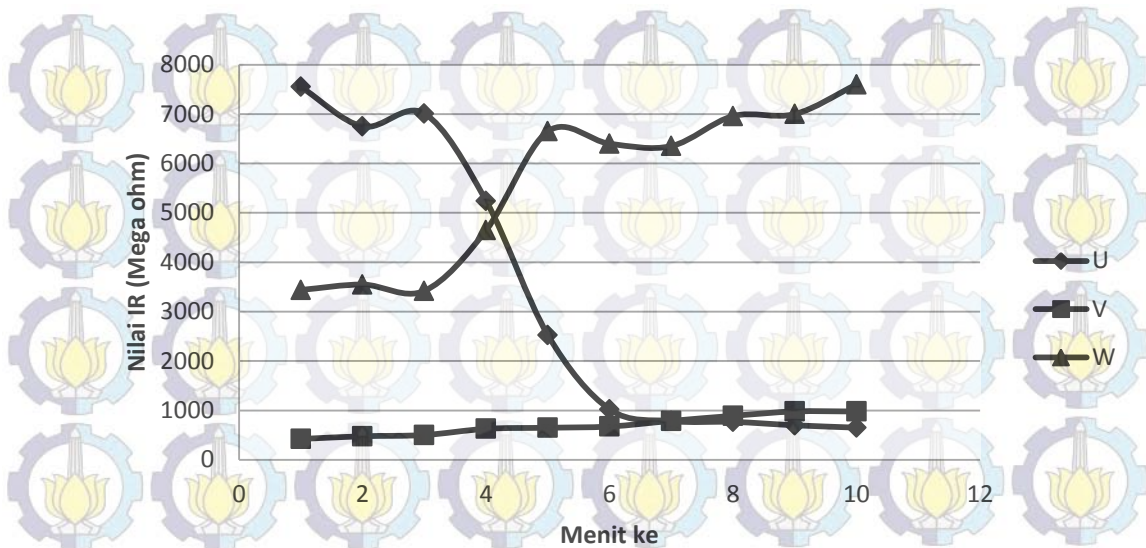
Berdasarkan hasil pengujian nilai PI pada Tabel 4.5 terdeteksi nilai yang sangat rendah pada kondisi kelembaban tinggi mulai terlihat pada pengujian ke 4 ditunjukkan pada fasa V dan W sebesar 5,9% dan 2,8%. Berbeda dengan kondisi kontaminan garam nilai PI mulai terlihat cepat yaitu pada pengujian ke 3 pada belitan fasa U kontaminan sebesar 1%. Pada pengujian terakhir nilai PI terendah yang dicapai sebesar 1,1% pada kondisi kontaminan kelembaban dan 0,1% pada kondisi kontaminan garam. *Trending* penurunan nilai tahanan isolasi pada pengujian terakhir kondisi kelembaban tinggi dapat dilihat pada Gambar 4.1

Dari grafik diatas nilai tahanan isolasi pada fasa V tidak mengalami kenaikan yang signifikan mulai menit pertama hingga menit kesepuluh. Kondisi tersebut juga terlihat pada fasa W, namun menunjukkan nilai yang konstan. Hal yang sangat berbeda terlihat pada fasa U, nilai tahanan isolasi menunjukkan kenaikan yang baik. Hal ini menandakan kondisi belitan pada fasa U sangat baik.

Berdasarkan grafik diatas dapat disimpulkan secara umum bahwa kondisi isolasi mengalami penurunan. Sehingga perlu dilakukan tindakan berupa pembersihan atau pengeringan kembali. Hal ini dimaksudkan agar belitan menjadi baik dan motor layak di operasikan kembali.



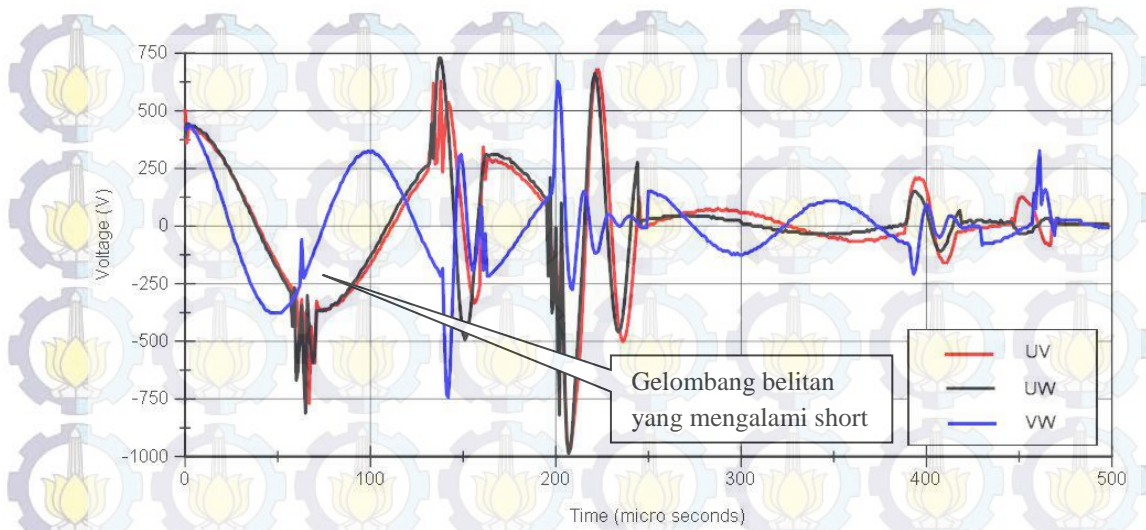
Gambar 4. 1 Trending penurunan nilai tahanan isolasi pada pengujian kondisi kelembaban tinggi



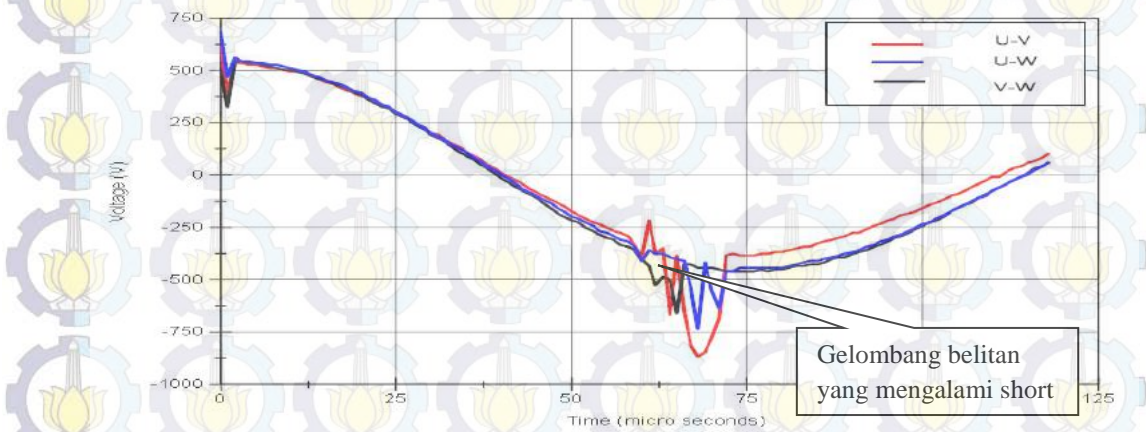
Gambar 4. 2 Trending penurunan nilai tahanan isolasi pada pengujian kondisi kontaminan garam.

Berdasarkan Gambar 4.2 diatas nilai tahanan isolasi pada fasa W tidak mengalami kenaikan yang signifikan mulai menit pertama hingga menit kesepuluh. Kondisi berbeda dialami oleh fasa U, nilai tahanan isolasi turun drastis pada menit ke 3 hingga mencapai nilai yang paling dasar dibawah 1 giga ohm. Untuk fasa W menunjukkan tren kenaikan yang baik hingga mencapai nilai tahanan isolasi maksimum. Secara umum kondisi seperti ini sangat direkomendasikan untuk melakukan pembersihan keseluruhan belitan isolasi. Hal ini dimaksudkan agar belitan menjadi baik dan motor layak dioperasikan kembali.

Berbeda dengan pengukuran PI, pengukuran EAR melalui pengujian surja nilai penurunan isolasi telah dideteksi lebih awal pada percobaan ke 2 pada Tabel 4.2. Indikasi ini terlihat jelas pada pengukuran *Test-Ref* EAR kondisi kelembaban tinggi sebesar 30,5% untuk belitan V1-V2. Untuk kondisi kontaminan garam 32,6% pada belitan U1-U2, 22,8% fasa dan 36,5% pada belitan W1-W2 terlihat pada Tabel 4.10. Pada pengujian ke 2 kondisi kontaminan terjadi perbedaan luasan area yang sanga signifikan untuk pengujian antar fasa L-L EAR yaitu pada fasa U1W1-V1W1 sebesar 26,5%, fasa V1W1-U1V1 sebesar 22,9% dan fasa V1W1-U1W1 sebesar 20,9%. Berikut ini Gambar 4.3 menunjukkan belitan memiliki frekuensi yang lebih tinggi dari belitan yang lain. Hal ini mengindikasikan mengalami hubung singkat antar belitan.



Gambar 4. 3 Gelombang LL EAR pada pengujian kontaminan hari ke dua.



Gambar 4. 4 Gelombang LL EAR pada pengujian kontaminan hari ke lima

Pengujian pada hari kelima setelah motor pada kondisi kontaminan mengalami *breakdown* dilakukan pengujian surja L-L EAR dan didapatkan hasil bahwa belitan fasa U1V1 mengalami hubung singkat antar belitan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Selain itu pengukuran pada pengukuran nilai LCR pada kedua kondisi kelembaban dan kontaminan belum memperlihatkan perubahan signifikan.

BAB 5 KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

1. Kombinasi metode PI dan tes respon osilasi dalam mendiagnosa percepatan penuaan isolasi sangat baik digunakan hal ini terbukti dapat mendeteksi penurunan isolasi sebelum terjadi short.
2. Pengujian surja melalui metode L-L EAR memiliki sensitifitas yang akurat untuk mendeteksi perubahan perilaku belitan isolasi yang mengalami penurunan kualitas.
3. Metode pengukuran *LCR meters* tidak dapat dijadikan acuan untuk melihat pola atau tren penurunan tahanan isolasi akibat kelembaban tinggi dan efek kontaminasi pada motor berbeban.

5.2 Kelanjutan penelitian

Untuk kelanjutan penelitian dapat menambah faktor lingkungan yang lain seperti kontaminasi oli dan gas. Agar agar diagnosa penurunan kualitas isolasi lebih mendekati permasalahan ril dilapangan. Selain itu pengukuran surja diharapkan mempunyai pengukuran menggunakan alat lain. Hal ini bertujuan agar desain alat yang sudah ada memiliki presisi yang tepat dalam mendiagnosa setiap sespon gelombang yg terbentuk.

DAFTAR PUSTAKA

Committee, E. M., 2013. *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*, New York, USA: IEEE Press.

Company, B., n.d. *Baker Instrument Company AWA Surge Test pass/fail criteria*, s.l.: Baker Company.

Deshpande, M., 2010. *Electric Motor : Application & Control*. New Delhi: PHI Learning Private Limited.

Fluke Corporation, 2007. *Insulation Resistance Testing*, Everett, WA USA: Fluke Corporation, .

Gill, P., 2009. *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing 2nd Edition*. New York: CRC Press Taylor & Francis Group.

Grubic, S., Jose M. Aller, Bin Lu & Thomas G. Habetler, Dec. 2008. A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 55(12), pp. 4127 - 4136.

Grubic, S. et al., 2011. A New Concept for Online Surge Testing for the Detection of Winding Insulation Deterioration in Low-Voltage Induction Machines. *Ieee Transactions On Industry Applications*, 47(5), pp. 2051 - 2058.

Grubic, S., Ronald G, H., Thomas G, H. & Jose, R., 2011. *Sensitivity Analysis of the Surge Test Applied to AC Machines*. s.l., s.n.

Institute, A. N. S., 1992. *Guide for Testing Turn-to-Turn Insulation on Form Wound Stator Coils for Alternating Current Rotating Electrical Machines*, New York: IEEE Standards Board.

Jones, D. O., Jeffrey R, J., S. Graeme, T. & David S, D., 2002. *A Guide to Diagnostics Insulation Testing Above 1kV*. s.l.:Megger Cooperation.

K., D. C. & Daigavane M. B. , July 2011. Multi-purpose low cost DC high voltage generator (60kv output), using cockroft-walton voltaage multiplier circuit. *International Journal of Science and Technology Education Research*, 2(7), pp. 109 - 119.

Mahardhika, D., 2015. *Desain Perangkat Percobaan Akselerasi Umur dengan Kelembaban dan Kontaminasi Terkontrol untuk Motor Induksi*, Surabaya: s.n.

McKinnon, D. L., 2012. Simulating Insulation Systems Under Various. *IEEE*.

McKinnon, D. L., June 2010 . *Insulation Resistance Profile (Irp) And Its Use For Assessing Insulation Systems*. San Diego, CA, s.n.

Muhammed Manif, 2005. Principle & Aplication of Insulation Testing with DC. *IEP-SAC Journal*, pp. 336-340.

Nugroho, W. J., 2015. [19] *Desain Peralatan Penguji Isolasi Belitan Motor Induksi Menggunakan Gelombang Surja Dan Metode Error Area Ratio*, Surabaya: s.n.

Stone, G. C., Edward, A. B., Ian, C. & Hussein, D., 2004. *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair*. United States of America.: IEEE Press Series on Power Engineering.

Wiedenbrug, E., G. Frey & J. Wilson, June 2003. Impulse Testing And Turn Insulation Deterioration In Electric Motors. *IEEE Pulp Paper*, pp. 50-55.

Wilson, J., June 203. *Current State Of Surge Testing Induction Machines*. Santa Monica, CA, s.n.

Yamamoto, M. & Ohashi, K., 1961. Salt Contamination of External of High Voltage Apparatus and its Countermeasurs. *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 80(3), pp. 380 - 387.



ADDENDUM

Saat menjalani perkuliahan, penulis aktif pada kegiatan seminar internasional dan nasional, di antaranya :

1. Dapis, Wahyudi. M, Asfani. D. A, Fahmi. D, Negara I. M. Y. “*Accelerated ageing experiment for induction motor insulation due to humidity effect*”, *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 20-21 May 2015, ITS Surabaya.
2. Dapis. “Desain frekuensi kontrol pada hibrid wind-diesel dengan PID – diferensial evolusi”. Seminar nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi (RETII) 2015 Yogyakarta. 19 Desember 2015, STTNas Yogyakarta.

INDEKS

E

EAR, iii, iv, viii, ix, xi, 1, 9, 12, 13, 15,
17, 23, 25, 26, 27, 33, 34, 35, 36,
37, 41, 42

G

Gelombang osilasi, iii, 6, 9, 12, 19, 26,
27

K

Kelembaban, iii, vii, viii, ix, xi, xii, 1,
2, 4, 5, 7, 8, 13, 16, 17, 18, 23, 24,
25, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35,
36, 37, 38, 39, 40, 41, 42

Kontaminan, iii, vii, viii, ix, xi, xii, 1,
2, 5, 6, 13, 16, 17, 18, 24, 25, 27,
29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38,
39, 40, 41, 42

Kualitas isolasi, iii, 1, 3, 16, 26, 27, 43

L

LCR meters, iii, iv, viii, ix, xii, 1, 2, 17,
20, 21, 23, 25, 26, 28, 37, 38, 39, 42

M

Motor induksi, iii, xi, 1, 2, 16, 21, 22,
26, 27

P

PI, iii, iv, viii, ix, xi, 1, 2, 6, 8, 9, 13,
14, 15, 17, 23, 25, 26, 28, 30, 31,
32, 33, 39, 41, 42

R

Respon osilasi, iii, vii, ix, 1, 2, 9, 10,
26, 42

T

Tahanan isolasi, iii
Temperatur, 1, 29, 30

BIOGRAFI PENULIS



Dapis, dilahirkan di Jambi, 10 April 1984. Anak kelima dari lima bersaudara pasangan H. Muhammad Nur dan Hatijah. Istri Fitriyani Yakub dan anak pertama Abu Raihan Dapis. Pendidikan dasar di mulai pada tahun 1993 di SD Negeri 132 Kasang Puduk Batang Hari Jambi. Kemudian melanjutkan ke MTS Negeri Talang Bakung Jambi Selatan hingga tahun 2000. Pada tahun 2003 lulus SMK Negeri 3

Kota Jambi. Kemudian penulis memperoleh gelar sarjana di Teknik Elektro Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta pada tahun 2009. Pengalaman kerja penulis dimulai dari :

1. *Maintenance electrical* Hoter Matahari 2 Jambi.
2. *Marketing Relationship Executive* (MRE) PT. BFI. Tbk.
3. *Mechanical and electrical engineering* PT. Harim Korean Company.
4. Staf pengajar Fakultas Teknik Universitas Ichsan Gorontalo.

Saat ini sedang menyelesaikan pendidikan pada program magister di jurusan Teknik Elektro ITS bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis dapat di hubungi melalui email dapis.caniago@yahoo.co.id.