

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

Dapis

Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

Email dapis.caniago@yahoo.co.id

Dimas Anton Asfani

Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

Email : anton@ee.its.ac.id

I Made Yulistya Negara

Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

Email : yulistya@ee.its.ac.id

Abstrak—Pada penelitian ini, eksperimen percepatan penuaan isolasi motor induksi dilakukan dalam keadaan berbeban dengan pengaruh kelembaban tinggi dan efek kontaminasi. Metode yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi motor adalah *polarization index* (PI), tes respon osilasi (*surge test*) dan pengukuran LCR. PI digunakan untuk mengetahui nilai indeks 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 digunakan untuk mendeteksi nilai induktansi, kapasitansi dan resistansi yang timbul akibat pengaruh kelembaban dan kontaminasi didalam belitan stator. Selanjutnya variabel output keluaran PI dan tes respon osilasi serta pengukuran LCR dibandingkan untuk mendapatkan grafik kecenderungan kerusakan. Berdasarkan hasil pengujian, metode EAR lebih cepat mendeteksi penurunan belitan isolasi pada pengujian ke 2 sebesar 30,5%. Sementara itu nilai PI baru terlihat perubahan nilainya pada pengujian ke 4. Sedangkan pertambahan nilai LCR tidak signifikan.

Kata Kunci : Tahanan Isolasi, Kelembaban Tinggi, Efek Kontaminasi, *Polarization Indeks* (PI), Tes Respon Osilasi, Pengukuran LCR

I. PENDAHULUAN

Seiring dengan bertambahnya usia pemakaian motor, secara perlahan-lahan isolasi mengalami penurunan kualitas isolasi (*deterioration*) [1]. 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 PI melalui rangkaian ekuivalen tahanan isolasi [2]. 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 EAR hal ini dapat diketahui [3] [4].

Publikasi mengenai penelitian percepatan penuaan isolasi terhadap waktu masih sedikit ditemui [5]. Penelitian yang telah dilakukan hanya menunjukkan simulasi penurunan kualitas isolasi belitan motor terhadap pengaruh kelembaban [3] [5]. Namun tidak membahas pengaruh kelembaban tinggi disertai keadaan kontaminasi dengan efek pembebanan motor sebelum pengujian. 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 [2] [3]. Sementara itu, pengukuran LCR 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 kedua metode diatas.

II. PENGUJIAN TAHANAN ISOLASI

A. Tahanan Isolasi dan Indeks Polarisasi

Tahanan isolasi atau *Insulation Resistance* (IR) merupakan ukuran konduktivitas atau kemampuan isolasi belitan menahan besarnya 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 sendirinya dapat menunjukkan kelemahan dari bahan isolasi maupun total kekuatan dielektrik suatu bahan isolasi [6]. 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 IEEE Std 43-2013 [7]. 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 sekon setelah pemberian tegangan uji. Pengujian resistansi isolasi memiliki tiga jenis tes yang umum dilakukan, seperti *short-time reading test*, *time-resistance reading test* dan *dielectric absorption test* [6]. Sementara itu, nilai PI merupakan 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.

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

Dimana, IR_1 nilai tahanan isolasi pada waktu satu menit dan IR_{10} 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. 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.

Tabel 2.1 Definisi nilai PI yang terukur [8].

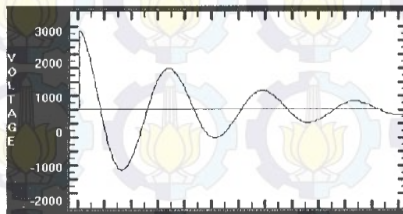
Nilai PI	Kondisi Isolasi
< 1	Sangat Buruk (Berbahaya)
1 - 2	Buruk
2 - 4	Baik
> 4	Sangat Baik

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 [7].

B. Tes Respon Isolasi

Tes respon osilasi merupakan rangkaian pembangkit gelombang impuls dengan menggunakan rangkaian seri ekuivalen RLC. Tes gelombang isolasi juga sering disebut pengujian surja dengan pembangkitan tegangan tinggi DC. Pengujian ini adalah pengujian dengan memberikan pulsa *short current* dengan *rise time* tertentu pada belitan stator mesin listrik sehingga timbul tegangan induksi antar belitan [9]. 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 gelombang osilasi (impuls) seperti pada Gambar 2.3 [3].



Gambar 2.1 Tegangan impuls surja [3]

Pada umumnya pembangkitan tegangan tinggi searah dilakukan dengan penyearahan tegangan tinggi bolak balik melalui diode, kemudian dapat dilipat gandakan tingginya seperti pada rangkaian *cockcroft-walton multiplier* (CWM). 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* [11]. Setiap pulsa respon motor akan menghasilkan respon tegangan impuls, dan frekuensi resonansi [6]. 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) [10] :

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Dari persamaan (3) 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. adalah satu metode paling efektif yang digunakan untuk menganalisis gelombang osilasi adalah metode *error area ratio* (EAR). Hal ini dikarenakan sensitifitasnya yang sangat tinggi terhadap perubahan gelombang osilasi dirumuskan pada persamaan (4) [12].

$$EAR = \frac{\left| \sum_{i=1}^N |F_i^{(1)}| - \sum_{i=1}^N |F_i^{(2)}| \right|}{\sum_{j=1}^N |F_j^{(1)}|} \times 100 \quad (4)$$

Dimana $F_i^{(1)}$ merupakan poin ke-i pada gelombang referensi dan $F_i^{(2)}$ adalah poin ke-i pada gelombang pengujian. Dari 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* [12].

C. Pengukuran nilai LCR

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

III. KONTRUKSI PENGUJIAN

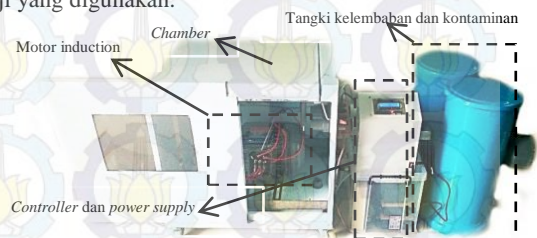
Pengujian tahanan isolasi memiliki beberapa prosedur dan tahapan yang harus dilakukan yang pertama adalah menyediakan alat ukur Megaohm meter atau Megger untuk pengujian tahanan isolasi dan alat ukur LCR untuk mengukur nilai induktansi, kapasitansi dan resistansi. Alat ukur yang digunakan pada Pengujian 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 MΩ atau 20 GΩ. Sedangkan Digital LCR Meter mempunyai *range* pengukuran : Induktansi 20.000 μH ~ 2000 H, Capacitor 200 pF ~ 20 mF serta Resistansi 20.000 Ω ~ 200 M Ω. 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. 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

A. Pengujian dengan kelembaban tinggi

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



Gambar 3.1 Alat 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 kontaminasi 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. Sebaliknya 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. Sebaliknya ketika kontaminasi di dalam *chamber* di atas *setting*, maka *ultrasonic nebulizer* untuk kontaminasi tidak bekerja. Untuk koordinasi kerja dari setiap komponen digunakan mikrokontroler Arduino Mega.

B. 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 [13]. 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 [14]. 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. 2 Skema percobaan pengaruh kelembaban dan kontaminan.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	Kelembaban (%)	Kontaminan (%)	Beban (Watt)
1	60	1-2	1500
2	60-80	1-2	1500
3	60-80	1-3	900
4	60-80	1-3	900
5	60-80	1-3	900

* Proses pendinginan, pengukuran dan persiapan pengujian kembali selama 4 jam.
** Pengujian ini terus dilakukan hingga belitan isolasi menunjukkan tren penurunan.

IV. HASIL PENGUJIAN DAN PENGUKURAN

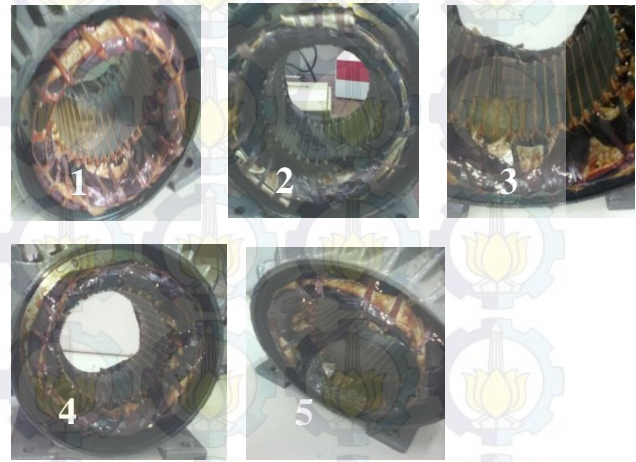
A. Percobaan kelembaban tinggi

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.

Durasi pengujian (6 Jam)	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

Pada gambar 4.1 berikut merupakan visualisasi hasil pengujian selama enam jam pertama hingga enam jam ke lima. Terlihat bahwa belitan isolasi mengalami perubahan warna dan terdapat bercak berupa debu dan kotoran. Hal ini membuktikan bahwa pemberian efek kelembaban sangat berpengaruh terhadap kondisi belitan.



Gambar 4.1 Visualisasi belitan isolasi setelah pengujian terhadap pengaruh kelembaban tinggi.

B. 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. Pada gambar 4.2 berikut merupakan visualisasi hasil pengujian selama enam jam pertama hingga enam jam ke lima. Terlihat bahwa belitan isolasi mengalami perubahan warna dan terdapat bercak berupa debu dan kotoran berupa endapan garam. Hal ini membuktikan bahwa pemberian efek kelembaban dan kontaminasi garam sangat berpengaruh terhadap kondisi belitan.



Gambar 4. 2 Visualisasi belitan isolasi setelah pengujian terhadap pengaruh kelembaban disertai kontaminasi garam.

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.

Durasi pengujian (6 Jam)	Temperatur Belitan Stator (°C)	Temperatur Udara Chamber (°C)	Ke-Lembaban (%)	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. Pengukuran nilai PI

Pada pengujian terhadap pengaruh kontaminan perubahan nilai PI terlihat di pengujian ke 3 pada fasa U. Nilai tahanan isolasi pada menit pertama 602 MΩ dan tahanan isolasi menit ke sepuluh 610 MΩ. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh kontaminan telah terjadi. 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.

Tabel 4. 3 Hasil pengukuran PI pada motor dengan pengaruh kelembaban tinggi dan kontaminan garam menggunakan megger.

Durasi pengujian (6 Jam)	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.

C. 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. Dengan menggunakan rumusan (5) didapat nilai EAR seperti ditunjukkan pada Tabel 4.7 berikut ini.

Tabel 4. 4 Hasil pengukuran nilai 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 4.4 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. 5 Hasil pengukuran nilai luasan pada motor 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
Normal	4,7	10,6	4,5
1	3,2	5,7	3,3
2	3,2	9,6	3,3
3	6,9	3,6	7,4
4	6,9	2,7	6,4
5	0,8	3,6	0,8
	U1W1-V1W1	V1W1-U1V1	V1W1-U1W1
Normal	5,6	9,6	5,3
1	2,6	6,1	2,6
2	6,6	10,7	7,1
3	3,6	3,7	3,5
4	3,9	2,6	4,1
5	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%. Dengan menggunakan rumusan (5) didapat nilai EAR pada pengaruh kontaminan garam seperti ditunjukkan pada Tabel 4.10 berikut ini.

Tabel 4. 6 Hasil pengukuran nilai EAR dengan pengaruh kontaminan garam menggunakan pengujian surja.

Percobaan 1 x 6 jam ke-	<i>Test-Ref</i> EAR Kondisi kontaminan (%)		
	U1-U2	U1-U2	U1-U2
1	15,0	15,0	15,0
2	32,6	32,6	32,6
3	35,2	35,2	35,2
4	41,8	41,8	41,8
5	32,6	32,6	32,6

Tabel 4.6 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 4.7.

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

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

Percobaan 1 x 6 jam ke-	U1W1-V1W1	V1W1-U1V1	V1W1-U1W1
Normal	3,6	2,5	3,8
1	4,0	7,5	4,2
2	26,5	22,9	20,9
3	9,8	5,7	10,9
4	9,3	0,1	10,2
5	8,2	21,7	7,6

Pada kondisi kelembaban dan kontaminasi 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%.

D. Pengukuran nilai LCR

Pada kondisi kelembaban tinggi perubahan nilai LCR mulai dari keadaan normal hingga stator megalami penurunan isolasi tidak terjadi penurunan signifikan. Nilai LCR tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.8 s.d Tabel 4.13.

Tabel 4. 8 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. 9 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	1.075	1.092	448	457,4	461,4
1	1.044	1.074	1.091	448	457,4	461,4
2	1.044	1.091	1.091	448	457,5	461,8
3	1.044	1.094	1.077	449	458	462,2
4	1.044	1.094	1.077	448	458	462,2
5	1.044	1.094	1.067	448,	458	462,3

Tabel 4. 30 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. 4 Hasil pengukuran Induktansi pada motor dengan pengaruh kelembaban disertai kontaminasi 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. 52 Hasil pengukuran Kapasitansi pada motor dengan pengaruh kelembaban disertai kontaminasi garam menggunakan sanwa LCR 700.

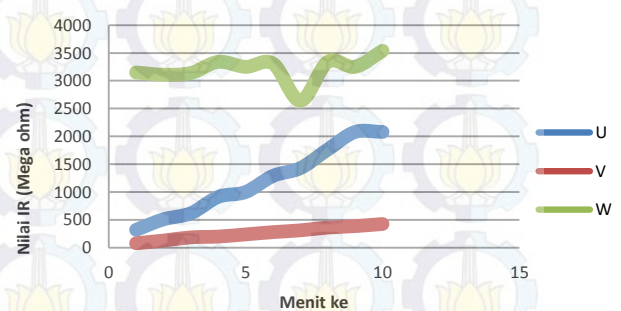
Percobaan 1 x 6 jam ke-	Kapasitansi (nF)					
	U1-U2	V1-V2	W1-W2	U1-V1	U1-W1	V1-W1
Normal	1.043	1.069	1.091	447	456,9	499,9
1	1.042	1.067	1.088	446	455,9	450,9
2	1.040	1.067	1.089	446	455,3	454,9
3	1.043	1.069	1.091	446	456,8	460
4	1.043	1.069	1.090	446	456,5	459,6
5	1.043	1.069	1.090	446	456,1	458,2

Tabel 4. 13 Hasil pengukuran Resistansi pada motor dengan pengaruh kelembaban disertai kontaminasi 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	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	7,7	15,4	19,5	28,9	29,4	9,4
4	6,9	6,6	15	13,8	15,1	7,1
5	6,9	7,9	15,3	23,5	20,9	7,1

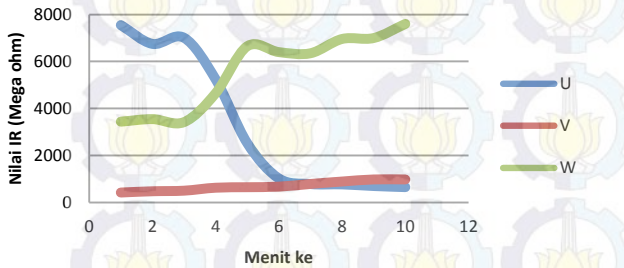
IV. ANALISIS

Berdasarkan hasil pengujian nilai PI pada Tabel 4.3 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 kontaminasi garam nilai PI mulai terlihat cepat yaitu pada pengujian ke 3 pada belitan fasa U kontaminasi sebesar 1%. Pada pengujian terakhir nilai PI terendah yang dicapai sebesar 1,1% pada kondisi kontaminasi kelembaban dan 0,1% pada kondisi kontaminasi garam. *Trending* penurunan nilai tahanan isolasi pada pengujian terakhir kondisi kelembaban tinggi dapat dilihat pada Gambar 4.1.



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

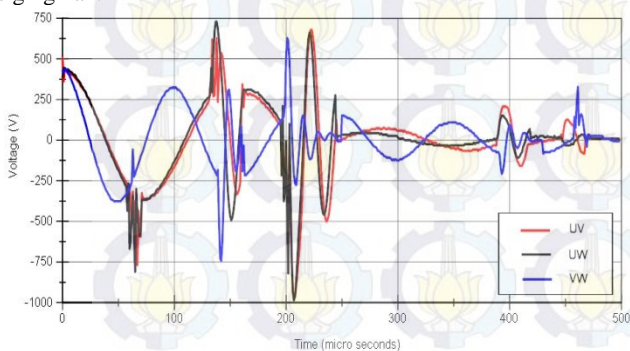
Pada Gambar 4.1 bahwa nilai tahanan isolasi pada fasa V tidak mengalami kenaikan yang signifikan mulai menit pertama hingga menit kesepuluh. Kondisi tersebut juga terlihat pada fasa W, namun menunjukkan nilai yang konstan. Hal yang sangat berbeda terlihat pada fasa U, nilai tahanan isolasi menunjukkan 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 dioperasikan kembali.



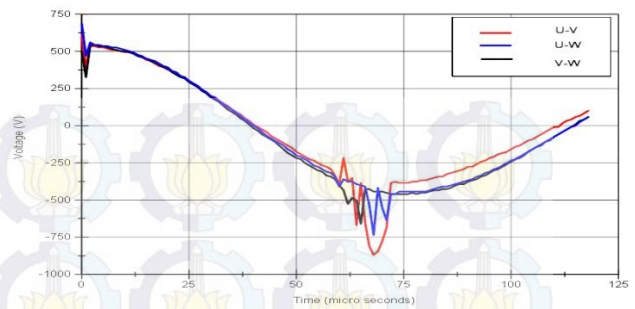
Gambar 4. 2 Trending penurunan nilai tahanan isolasi pada pengujian kondisi kontaminan garam.

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. 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 sangat 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%. Pada Gambar 4.3 menunjukkan belitan memiliki frekuensi yang lebih tinggi dari belitan yang lain. Hal ini mengindikasikan mengalami hubung singkat antar belitan. 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.



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



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

V. KESIMPULAN

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. Tes respon osilasi (surja) melalui metode L-L EAR memiliki sensitifitas yang akurat untuk mendeteksi perubahan perilaku belitan isolasi yang mengalami penurunan kualitas. Sementara itu, metode pengukuran *LCR meters* tidak dapat dijadikan acuan untuk melihat pola atau tren penurunan tahanan isolasi akibat kelembaban tinggi dan efek kontaminasi pada motor terbebani. 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

- [1] Manif, Muhammed. "Principle & Application of Insulation Testing with DC", IEP-SAC Journal, 2005.
- [2] McKinnon, David L. "Simulating Insulation System Under Various Environmental Conditions in Laboratory", IEEE, 2012.
- [3] E. Wiedenbrug, G. Frey, and J. Wilson, "Impulse testing and turn insulation deterioration in electric motors," in Conf. Rec. Annu. IEEE Pulp Paper Ind. Tech. Conf., Jun. 2003, pp. 50-55.
- [4] J. Wilson, "Current State of Surge Testing Induction Machines", Baker Instrum.Co., Jun. 2003.
- [5] McKinnon, David L. Insulation Resistance Profile (IRP) And Its Use For Assessing Insulation Systems, IEEE, 2010.
- [6] P. Gill, "Electrical Power Equipment Maintenance and Testing 2nd Edition", CRC Press Taylor & Francis Group, 2009.
- [7] Electric Machinery Committee, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery", IEEE Press, 2013.
- [8] Fluke Corporation, "Insulation Resistance Testing", 2007.
- [9] S. Grubic, J. M. Aller, and T. G. Habetler, "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, Vol. 55, No. 12, Dec. 2008.
- [10] S. Grubic, J. Restrepo, J. M. Aller, B. Lu, and T. G. Habetler, "A New Concept for Online Surge Testing for the Detection of Winding Insulation Deterioration in Low-Voltage Induction Machines", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.47, No. 5, Sept./Oct. 2011.
- [11] "Guide for Testing Turn-to-Turn Insulation on Form Wound Stator Coils for Alternating Current Rotating Electrical Machines", IEEE 522-1992, 1992
- [12] "Baker Instrument Company AWA Surge Test pass/fail criteria", Baker Instrum. Co.

- [13] Yamamoto, M. dan Ohashi, K., "Salt Contamination of External of High Voltage Apparatus and its Countermeasures", IEEE Transaction, 1961.
- [14] Stone, Greg C., Edward A. Boulter, Ian Culbert and H. Dhirani, "Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair", IEEE Press Series on Power Engineering, 2004.

BIOGRAFI



Dapis, dilahirkan di Jambi, 10 April 1984. Pendidikan dasar di mulai pada tahun 1993 di SD Negeri 132 Kasang Pudak 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. 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.