

Evaluasi Degradasi Isolasi Motor akibat *Multi-factor Aging* berdasarkan Indeks Polarisasi dan SEM-EDX

Mochammad Wahyudi^{1,2}, Dimas Anton Asfani^{2,3,4}, I Made Yulistya Negara^{2,4}, Daniar Fahmi^{2,4},
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda^{2,4}

Abstract—The operation of induction motor affected by stress factor causes insulation degradation. This degradation can be observed from changes in insulation characteristics, including electrical, physical, and chemical. This study aimed to evaluate the insulation resistance (IR) and polarization index (PI) since the induction motor condition was good until burned out. Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDX) testing was also carried out to analyze changes in microstructure, morphological characteristics, and chemical composition in stator windings. In addition, X-ray powder diffraction (XRD) testing was presented to validate that the damaged insulation was caused by the given stress. To accelerate degradation of insulation, induction motor in service condition was subjected by a lot of pressure simultaneously, including thermal, moisture, and salt contamination. The accelerated aging testing was gradually conducted according to three schemes with different pressure levels. The results showed that the applied stresses could accelerate the insulation aging. A significant decrease of IR and PI values was found in the third scheme, as the IR value was less than 5 M Ω and the PI value was 0.6 (danger category). The insulation failure was achieved at a total duration of testing for 222 hours. The results of SEM-EDX and XRD testing showed the presence of mineral deposits from water vapor, salt contaminants, cracks, and fracture on the insulation surface.

Intisari—Pengoperasian motor induksi yang dipengaruhi oleh faktor tekanan dapat menyebabkan degradasi isolasi. Degradasi tersebut dapat diamati dari perubahan karakteristik isolasi, meliputi listrik, fisik, dan kimiawi. Makalah ini bertujuan untuk mengevaluasi nilai tahanan isolasi dan indeks polarisasi sejak kondisi motor induksi baik hingga rusak. Pengujian SEM-EDX juga dilakukan untuk menganalisis perubahan mikrostruktur, karakteristik morfologi, dan komposisi kimia pada isolasi belitan motor. Di samping itu, pengujian XRD dilakukan untuk memvalidasi bahwa kerusakan isolasi disebabkan oleh tekanan yang diberikan. Untuk mempercepat degradasi isolasi, motor induksi dalam kondisi beroperasi diberikan banyak tekanan secara simultan, meliputi termal (karena beban lebih), kelembapan, dan kontaminasi garam (sebagai partikel konduktif). Pengujian dilakukan secara

bertahap menurut tiga skema dengan tingkat tekanan yang berbeda-beda. Hasil menunjukkan bahwa pemberian tekanan secara simultan mampu mempercepat umur isolasi. Penurunan nilai IR dan PI yang signifikan ditemui pada pengujian skema 3, sebagaimana nilai IR kurang dari 5 M Ω dan nilai PI sebesar 0,6 (kategori berbahaya). Kegagalan isolasi tercapai pada total durasi pengujian selama 222 jam. Hasil pengujian SEM-EDX dan XRD menunjukkan adanya endapan mineral dari uap air, kontaminan garam, retakan, dan patahan pada permukaan isolasi.

Kata Kunci—Indeks polarisasi (PI), degradasi isolasi motor, SEM-EDX, tahanan isolasi (IR), XRD.

I. PENDAHULUAN

Isolasi merupakan komponen yang berperan vital terhadap keamanan operasi motor induksi sebagaimana kegagalan isolasi adalah faktor penyebab kerusakan yang tertinggi kedua [1]. Tanpa isolasi, konduktor tembaga akan mengalami kontak dengan konduktor lain atau inti stator. Isolasi juga berfungsi sebagai penghantar panas, sehingga konduktor tembaga tidak mengalami *overheating*. Selain itu, isolasi harus mampu mempertahankan kedudukan konduktor dari pergerakan yang tidak diinginkan akibat gaya magnetik yang timbul ketika motor dalam kondisi *starting* atau operasi normal.

Pada dasarnya, kemampuan isolasi akan mengalami penurunan secara perlahan-lahan akibat penuaan. Namun, degradasi isolasi akan menjadi lebih cepat akibat tekanan (*stress*), seperti termal, listrik, mekanis, dan lingkungan [2]. Keempat jenis tekanan tersebut memberikan dampak yang berbeda-beda terhadap isolasi [3], [4]. Temperatur tinggi akan menimbulkan reaksi oksidasi yang berujung pada isolasi yang mudah rapuh (*brittle*), retak (*crack*), dan terkelupas (*peeled off*). Lembap atau minyak yang dikombinasikan dengan debu atau kotoran dapat membentuk sekumpulan partikel konduktif pada permukaan isolasi. Belitan yang terkontaminasi juga memicu reaksi kimia dan *electrical tracking* pada isolasi. *Electrical tracking* memungkinkan arus listrik untuk mengalir di sepanjang permukaan isolasi, terutama pada bagian *end-winding* (belitan di luar *slot*). Pada akhirnya, arus tersebut menyebabkan kegagalan isolasi *groundwall*.

Selama beberapa dekade terakhir, metode pengukuran tahanan isolasi (*insulation resistance*, IR) digunakan untuk mengetahui kondisi isolasi motor induksi [3]-[14]. Pengukuran IR dipilih karena merupakan metode yang aman, mudah, dan sederhana. Dari hasil pengukuran tersebut, nilai indeks polarisasi (*polarization index*, PI) dapat diperoleh, yaitu rasio tahanan isolasi saat 10 menit dan 1 menit. Selanjutnya, nilai PI digunakan sebagai acuan dalam menilai tingkat kelayakan isolasi.

¹Dosen, Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 55281 (telp: 0274-6492599; e-mail: mohammadwahyudi@ugm.ac.id)

²Peneliti, Laboratorium Tegangan Tinggi, Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 60111

³Peneliti, Pusat Unggulan Iptek Perguruan Tinggi – Sistem Kontrol Otomotif (PUI SKO), Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 60111 (e-mail: anton@ee.its.ac.id)

⁴Dosen, Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 60111 (telp: 031-5994251-54; e-mail: yulistya@ee.its.ac.id)

Karakteristik nilai IR dan PI pada isolasi yang dipengaruhi oleh tekanan telah diteliti [4], [10]-[11]. Secara umum, karakteristik kedua nilai tersebut akan bergantung pada jenis tekanan dan tingkat degradasi isolasi. Akan tetapi, karakteristik nilai IR dan PI pada isolasi motor induksi sejak kondisi baik hingga rusak (terjadi hubung singkat) belum diselidiki. Dengan mengetahui karakteristik tersebut, efek tekanan terhadap laju degradasi isolasi dan mekanisme kegagalan isolasi dapat dipahami secara lebih detail. Selanjutnya, pemahaman ini akan menunjang tindakan pemeliharaan isolasi, tidak hanya secara preventif, tetapi juga secara prediktif.

Pada makalah ini, pengujian akselerasi umur isolasi karena termal, kelembapan, dan kontaminasi dilakukan pada motor induksi. Analisis degradasi isolasi dilakukan berdasarkan nilai tahanan (IR dan PI), kondisi fisik (*Scanning Electron Microscope*, SEM), dan komposisi kimia (*Energy Dispersive X-ray*, SEM-EDX dan *X-Ray Diffraction*, XRD). Melalui pengujian SEM-EDX dan XRD, fenomena fisik dan kimiawi yang terjadi ketika isolasi bernilai IR dan PI tertentu juga dapat diketahui.

Berbeda dengan [4], [9]-[11], [15], pemberian banyak tekanan pada makalah ini dilakukan secara simultan dan motor induksi dalam kondisi beroperasi dan berbeban. Skema pengujian tersebut akan lebih menyerupai kondisi riil di lapangan. Dalam hal ini, tekanan termal akibat beban lebih atau sistem pendingin (sirkulasi udara) yang gagal dan tekanan lingkungan akibat kelembapan dan kontaminan di lokasi pengoperasian motor dapat terjadi dalam waktu yang bersamaan. Di samping itu, makalah ini bertujuan untuk menjelaskan metode pengukuran IR dan PI berdasarkan IEEE Std. 43-2013 karena penelitian-penelitian sebelumnya masih mengacu pada standar versi lama [3]-[10], [12].

II. METODE TAHANAN ISOLASI DAN INDEKS POLARISASI BERDASARKAN IEEE STD. 43-2013

A. Tahanan Isolasi (IR)

IR merupakan ukuran konduktivitas suatu isolasi. Besar IR dirumuskan sebagai hasil bagi antara tegangan DC yang diberikan dengan arus yang melewati isolasi dan diambil pada waktu tertentu sejak tegangan DC tersebut diberikan. Pemberian tegangan uji biasanya 1 menit (IR_1) atau 10 menit (IR_{10}). Besar tegangan uji yang direkomendasikan oleh IEEE Std. 43-2013 ditunjukkan pada Tabel I, sedangkan besar tahanan minimum untuk 1 menit pengukuran ditunjukkan pada Tabel II. Rekomendasi tersebut berlaku untuk belitan medan dan jangkar dari mesin elektromekanis dengan *rating* 750 watt (1 hp) atau lebih. Besar tegangan (kV) pada Tabel II merupakan tegangan antar fase (*line to line*) dari *rating* belitan motor.

Tahanan isolasi yang terukur biasanya meningkat pesat ketika tegangan DC pertama kali diberikan. Selanjutnya, besar tahanan akan mendekati nilai yang relatif stabil seiring waktu pengujian. Akan tetapi, pembacaan tahanan isolasi dari belitan yang kering dan kondisi baik dapat memiliki nilai yang terus meningkat selama berjam-jam seiring dengan pemberian tegangan DC.

TABEL I
BESAR TEGANGAN UJI YANG DIREKOMENDASIKAN [4]

Rating Tegangan Belitan (V)	Tegangan Uji DC (V)
< 1.000	500
1.000-2.500	500-1.000
2.501-5.000	1.000-2.500
5.001-12.000	2.500-5.000
>12.000	5.000-10.000

TABEL II
BESAR TEGANGAN UJI YANG DIREKOMENDASIKAN [4]

Nilai IR Minimum (M Ω)	Isolasi Belitan yang Diuji
$IR_{1min} = kV + 1$	Untuk sebagian besar jenis belitan yang dibuat sebelum tahun 1970 dan semua jenis belitan medan.
$IR_{1min} = 100$	Untuk sebagian besar belitan jangkar mesin DC dan belitan mesin AC yang dibuat setelah tahun 1970 (jenis stator <i>form-wound coils</i>)
$IR_{1min} = 5$	Untuk sebagian besar mesin dengan jenis stator <i>random-wound</i> dan <i>form-wound</i> kurang dari 1 kV

Untuk jenis belitan tua, nilai tahanan isolasi yang cukup stabil dicapai dalam waktu 10 hingga 15 menit. Untuk jenis belitan modern, seperti *epoxy-mica* dan *polyester-mica*, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai yang cukup stabil adalah 4 menit atau kurang. Untuk belitan yang basah atau kotor, nilai stabil yang rendah dapat dicapai dalam waktu 1 hingga 2 menit setelah tegangan DC diberikan.

Dalam kasus lainnya, nilai tahanan isolasi dapat sedikit menurun seiring pemberian tegangan DC. Penurunan nilai tahanan secara signifikan seiring dengan pemberian tegangan uji mengindikasikan adanya masalah pada isolasi. Permasalahan tersebut dapat disebabkan oleh ketidaksempurnaan (*imperfection*) atau keretakan (*fracture*) pada isolasi yang diperburuk oleh kelembapan atau kontaminasi.

B. Indeks Polarisasi (PI)

Pada umumnya, PI diperoleh dengan membandingkan IR pada waktu 10 menit (IR_{10}) dengan 1 menit (IR_1), seperti dalam (1). Dalam hal ini, PI mengindikasikan kemiringan dari kurva IR terhadap durasi penerapan tegangan DC. Untuk mendapatkan nilai akurasi PI yang lebih baik, pengukuran dapat dilakukan dengan pembacaan menurut interval-interval tertentu, seperti 15 detik, 30 detik, 45 detik, 1 menit, 2 menit, 3 menit, 4 menit, hingga 10 menit.

Sama halnya dengan IR, PI memiliki nilai minimum yang direkomendasikan menurut IEEE Std. 43-2013, seperti ditunjukkan pada Tabel III dan Tabel IV. Untuk mesin elektromekanis dengan *rating* 10.000 kVA atau kurang, pengoperasian atau pengujian tegangan lebih dapat diperbolehkan hanya jika salah satu hasil pengukuran IR_1 atau PI berada di atas nilai minimum, sedangkan untuk mesin dengan *rating* di atas 10.000 kVA, nilai keduanya harus berada di atas nilai minimum yang direkomendasikan.

Dengan hasil pembacaan IR atau PI yang rendah, maka penyelidikan secara fisik terhadap kondisi isolasi perlu dilakukan. Penurunan yang signifikan pada pengukuran IR

dan PI dibandingkan dengan pembacaan sebelumnya mengindikasikan bahwa permukaan isolasi belitan terkena kontaminasi, lembap, atau beberapa kerusakan isolasi, seperti retakan. Apabila hasil pengukuran bernilai rendah karena kotoran atau lembap yang berlebihan, upaya pembersihan dan pengeringan dapat dilakukan untuk mengembalikan nilai yang dapat diterima.

TABEL III
DEFINISI NILAI PI YANG TERUKUR [8]

Nilai PI	Kondisi Isolasi
< 1,0	Sangat Buruk (Berbahaya)
1,0 - 2,0	Buruk
2,0 - 4,0	Baik
> 4,0	Sangat Baik

TABEL IV
NILAI PI MINIMUM MENURUT KELAS TERMAL ISOLASI [4]

Rating Kelas Termal Isolasi	Nilai Minimum PI
Kelas A	1,5
Kelas B	2,0
Kelas F	2,0
Kelas H	2,0

Pada pengukuran tahanan isolasi (IR_I yang telah dikoreksi terhadap temperatur 40°C) dapat ditemui hasil yang lebih besar dari $5.000\text{ M}\Omega$. Apabila kondisi tersebut terjadi, maka nilai PI yang diperoleh tidak dapat digunakan sebagai acuan dalam penilaian kelayakan isolasi. Hal ini disebabkan oleh arus resultan yang terukur berada dalam kisaran *submicroampere*. Pada tingkatan ini, sensitivitas instrumen pengukuran, sedikit perubahan pada sumber tegangan uji, pengaruh kelembapan lingkungan, sambungan-sambungan dalam pengukuran, dan komponen-komponen lain yang tak berhubungan dapat memberikan pengaruh yang besar terhadap arus resultan yang terukur.

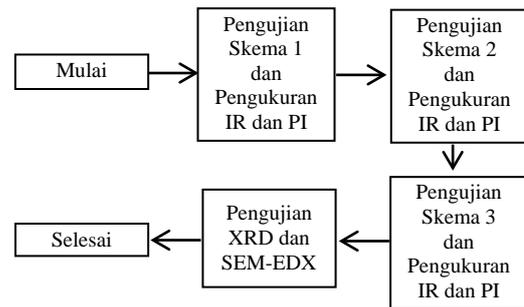
C. Prosedur Pengukuran

Pengukuran IR dan PI mengacu pada IEEE Std. 43-2013. Hubungan *wye* (Y) pada terminal stator motor dilepaskan. Pengukuran IR yang dilakukan adalah fase terhadap *ground*. *Lead* fase (berwarna merah) dari megger dihubungkan ke salah satu fase belitan stator, sedangkan *lead ground* (berwarna hitam) dihubungkan ke bodi motor yang telah diketanahkan (*grounding*). Megger diatur pada tegangan uji 500 V yang telah disesuaikan dengan *rating* tegangan belitan motor. Penerapan tegangan DC pada belitan dilakukan selama 10 menit untuk mendapatkan nilai PI. Dalam pengujian ini, megger yang digunakan memiliki *rating* tahanan isolasi $4\text{ G}\Omega$.

Pada saat pengukuran, pencatatan terhadap temperatur belitan perlu dilakukan. Selain itu, pencatatan tahanan isolasi pada interval waktu tertentu hingga durasi pemberian tegangan uji mencapai 10 menit perlu dilakukan untuk mendapatkan hasil pengukuran dengan tingkat akurasi yang lebih baik.

Setelah durasi pemberian tegangan DC mencapai 10 menit, megger dimatikan dan kedua *lead* dilepaskan dari motor. Pengosongan muatan pada fase belitan yang diuji perlu dilakukan dengan cara menghubungkan titik

pengukuran belitan dengan *ground*. Pengukuran tahanan isolasi dilanjutkan terhadap fase lainnya dengan prosedur yang sama. Hal ini berguna dalam mengetahui kondisi isolasi dari masing-masing fase.



Gbr. 1 Alur penelitian secara umum.

Untuk membandingkan hasil dari banyak pengukuran, maka besar IR dari setiap pengukuran perlu diberikan koreksi terhadap temperatur dasar 40°C , seperti dalam (1). Hal ini disebabkan oleh temperatur belitan yang dapat berbeda-beda dalam setiap pengukuran dan tidak memungkinkan untuk dikontrol.

$$R_C = K_T \cdot R_T \quad (1)$$

dengan R_C = tahanan isolasi ($\text{M}\Omega$) yang dikoreksi pada 40°C , K_T = koefisien tahanan isolasi pada $T^\circ\text{C}$, dan R_T = tahanan isolasi yang terukur ($\text{M}\Omega$) pada $T^\circ\text{C}$.

Pada (1) perlu didefinisikan nilai K_T untuk mendapatkan tahanan isolasi yang dikoreksi terhadap temperatur dasar 40°C . Rumus penghitungan faktor koreksi K_T ditentukan berdasarkan material isolasi yang digunakan. Berdasarkan rekomendasi IEEE Std. 43-2013, secara umum material isolasi dapat dikelompokkan menjadi dua macam, yaitu *thermoplastic* dan *thermosetting*. Material isolasi jenis *thermoplastic* mencakup isolasi yang terbuat sebelum tahun 1960, seperti *asphaltic*, sedangkan *thermosetting* mencakup isolasi yang terbuat setelah tahun 1960, seperti *epoxy* dan *polyester*. Faktor K_T untuk material isolasi jenis *thermosetting* dirumuskan sebagai berikut [4].

$$K_T = \exp \left[-4.320 \left(\frac{1}{(T+273)} - \frac{1}{313} \right) \right] \quad (2)$$

dengan T = temperatur belitan saat pengukuran tahanan isolasi ($^\circ\text{C}$).

III. SKEMA PENGUJIAN AKSELERASI ISOLASI MOTOR INDUKSI KARENA TERMAL, KELEMBAPAN, DAN KONTAMINASI SECARA SIMULTAN

Alur penelitian secara umum ditunjukkan pada Gbr. 1. Prinsip dasar pengujian akselerasi penuaan isolasi adalah tekanan diberikan dalam tingkat yang lebih tinggi daripada kondisi idealnya [2]. Semakin tinggi tekanan, semakin cepat penuaan isolasi. Untuk mencapai kriteria tersebut, pengujian isolasi dilakukan menurut skema pada Tabel V. Konstruksi pengujian pada masing-masing skema disajikan pada Gbr. 2 sampai Gbr. 4. Motor dikopel dengan generator sinkron 5 kW yang terhubung dengan set lampu. Tingkat pembebanan motor

diatur melalui penambahan jumlah lampu, sedangkan tingkat kelembapan dan kontaminasi diatur melalui *humidifier*. Motor dimasukkan ke dalam ruangan terisolasi (*chamber*) yang terbuat dari material akrilik dengan ukuran 50 x 80 x 75 cm³, sehingga lingkungan di dalam *chamber* tidak dipengaruhi oleh lingkungan eksternal.

TABEL V

SKEMA PENGUJIAN AKSELERASI PENUAAN ISOLASI MOTOR INDUKSI

Parameter	Skema 1	Skema 2	Skema 3
Beban motor	Generator yang terhubung dengan set lampu 1.800 W	Generator yang terhubung dengan set lampu 1.800 W	Generator yang terhubung dengan set lampu 2.100 W
Alat pemberi kelembapan dan kontaminasi	<i>Evaporative humidifier</i> berisi air garam	a. <i>Evaporative humidifier</i> dan <i>steam humidifier</i> berisi air garam b. <i>Evaporative humidifier</i> berisi air	a. <i>Evaporative humidifier</i> dan <i>steam humidifier</i> berisi air garam b. <i>Ultrasonic humidifier</i> berisi air
Modifikasi <i>chasing</i> motor	Tidak	Tidak	Ya

TABEL VI

SPESIFIKASI MOTOR INDUKSI YANG DIUJI

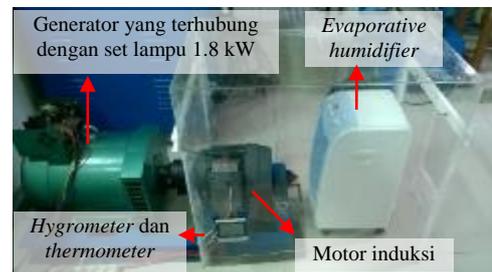
Parameter	Nilai
Daya keluaran nominal	1,5 kW
Jumlah kutub	4 <i>pole</i>
Kecepatan nominal	1.380 rpm
Indeks proteksi (IP)	55
Tegangan operasi	220 / 380 V
Arus nominal	5,94 / 3,44 A
Efisiensi (<i>Full load</i>)	78,6 %
Daya input (<i>Full load</i>)	1,91 kW

Pada skema 1 dan 2, tingkat pembebanan motor adalah sama, tetapi tingkat kelembapan dan kontaminasi garam pada skema 2 lebih tinggi. Skema 3 merupakan pengujian dengan tingkat tekanan paling tinggi. Dalam hal ini, beban motor dinaikkan untuk mendapatkan kenaikan temperatur belitan yang lebih signifikan dan tingkat kelembapan ditambah. Di samping itu, lubang diberikan pada *chasing* motor dan kotak terminal dilepaskan dari bodi motor, seperti ditunjukkan pada Gbr. 5, agar udara lembap dan kontaminan dapat masuk ke dalam ruang stator secara lebih mudah.

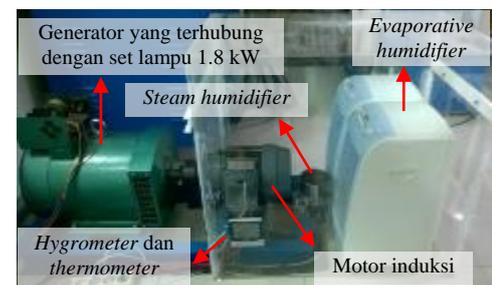
Motor induksi yang digunakan memiliki konstruksi belitan *random-wound stator* dengan rotor jenis sangkar tupai (*squirrel cage*). Kelas termal isolasi dari belitan stator motor tersebut tergolong kelas F (155° C). Adapun spesifikasi lebih lengkap dari motor induksi yang digunakan disajikan pada Tabel VI.

Pemberian kontaminasi garam pada isolasi motor dilakukan dalam bentuk udara yang mengandung garam [10]. Larutan tersebut memiliki kelarutan 56 kg/m³ (0,954 M) yang

tergolong kontaminasi berat [12], [16]. Untuk mengevaluasi tingkat tekanan yang diberikan, pengukuran terhadap temperatur maksimum belitan stator dan kondisi lingkungan di dalam *chamber*, seperti temperatur udara maksimum dan titik embun ketika persentase kelembapan nisbi yang terukur menunjukkan nilai yang konstan, dilakukan.



Gbr. 2 Konstruksi pengujian skema 1.



Gbr. 3 Konstruksi pengujian skema 2.



Gbr. 4 Konstruksi pengujian skema 3.



Gbr. 5 Modifikasi *chasing* motor.

IV. HASIL DAN ANALISIS

A. Pengujian Skema 1

Motor dioperasikan selama 3 x 24 jam. Akan tetapi, pengoperasian motor dihentikan sementara setiap 1 x 24 jam untuk pengukuran IR dan PI. Hasil pengukuran temperatur belitan stator dan kondisi lingkungan di dalam *chamber* tercantum pada Tabel VII.

TABEL VII
HASIL PENGUKURAN TEMPERATUR DAN KELEMBAPAN PADA PENGUJIAN SKEMA 1

Pengujian 1 x 24 Jam ke-	Temperatur Belitan (°C)	Kondisi Ruangan Chamber		
		Temperatur Udara (°C)	Dew Point (°C)	Kelembapan Relatif (%)
1	155,61	64,3	48,4	47
2	154,36	75,4	43,8	23
3	159,24	77,3	30	13

TABEL VIII
HASIL PENGUKURAN IR PADA PENGUJIAN SKEMA 1

Pengujian 1 x 24 Jam ke-	Nilai IR saat 1 Menit		
	Fase 1	Fase 2	Fase 3
1	> 4 GΩ	> 4 GΩ	> 4 GΩ
2	> 4 GΩ	> 4 GΩ	> 4 GΩ
3	> 4 GΩ	> 4 GΩ	> 4 GΩ

TABEL IX
HASIL PENGUKURAN TEMPERATUR DAN KELEMBAPAN PADA PENGUJIAN SKEMA 2

Durasi Pengujian (Jam)	Temperatur Belitan (°C)	Kondisi Ruangan Chamber		
		Temperatur Udara (°C)	Dew Point (°C)	Kelembapan Relatif (%)
1 x 24	151,43	71,7	58,3	56
4 x 24	156,51	72,7	58,4	53

Beban motor yang berupa generator sinkron berkapasitas 5 kW yang terhubung dengan satu set lampu berdaya total 1.800 watt mampu meningkatkan temperatur belitan stator hingga melebihi temperatur *rating* isolasi pada pengujian 1 x 24 jam pertama dan ketiga. Temperatur belitan pada pengujian 1 x 24 jam kedua sedikit di bawah temperatur *rating* isolasi motor. Peningkatan temperatur cenderung menyebabkan penurunan tingkat kelembapan. Di samping itu, dengan temperatur belitan yang lebih besar daripada temperatur udara dan titik embun di dalam *chamber*, pengembunan tidak terjadi pada isolasi motor.

Berdasarkan hasil pengukuran IR menggunakan megger dengan *rating* tahanan terukur 4 GΩ, seperti tercantum pada Tabel VIII, nilai IR pada setiap fase melebihi 4 GΩ sebelum durasi pemberian tegangan DC mencapai 1 menit, sehingga nilai PI tidak terukur. Secara praktis, isolasi dikatakan dalam kondisi baik karena nilai IR pada saat 1 menit melebihi nilai minimum yang direkomendasikan oleh IEEE Std. 43-2013, yaitu sebesar 5 MΩ.

B. Pengujian Skema 2

Adanya penambahan *steam humidifier* dan *evaporative humidifier* meningkatkan persentase kelembapan hingga mencapai 56%, seperti ditunjukkan pada Tabel IX. Tingkat kontaminasi yang diberikan juga turut meningkat seiring dengan penggunaan *steam humidifier* yang berisi larutan air garam. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat tekanan lingkungan yang diberikan pada pengujian ini lebih ekstrem daripada pengujian sebelumnya.

TABEL X
HASIL PENGUKURAN IR PADA PENGUJIAN SKEMA 2

Durasi Pengujian (Jam)	Nilai IR saat 1 Menit		
	Fase 1	Fase 2	Fase 3
1 x 24	> 4 GΩ	> 4 GΩ	> 4 GΩ
4 x 24	> 4 GΩ	> 4 GΩ	> 4 GΩ

TABEL XI
HASIL PENGUKURAN TEMPERATUR DAN KELEMBAPAN PADA PENGUJIAN SKEMA 3

Durasi Pengujian (Jam)	Kondisi Ruangan Chamber		
	Temperatur Udara (°C)	Dew Point (°C)	Kelembapan Relatif (%)
1 x 24	71	62,5	69
1 x 6	71	61	63

TABEL XII
HASIL PENGUKURAN PI PADA PENGUJIAN SKEMA 3

Durasi Pengujian (Jam)	Nilai PI		
	Fase 1	Fase 2	Fase 3
1 x 24	Tidak terukur	1,044	Tidak terukur
1 x 6	Tidak terukur	0,6	Tidak terukur

Pengaruh temperatur terhadap kelembapan di dalam *chamber* juga terlihat pada pengujian ini. Tingkat kelembapan saat motor dioperasikan seharusnya bernilai lebih tinggi dari 56% sebagaimana tingkat kelembapan mendekati 100% sebelum motor dioperasikan.

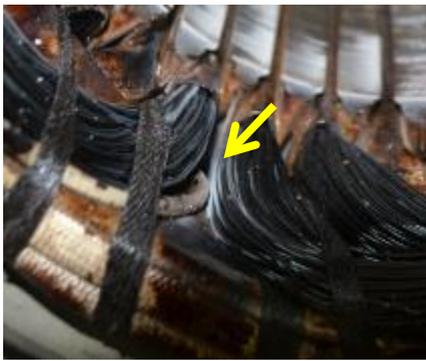
Berdasarkan hasil pengukuran IR pada pengujian berdurasi 1 x 24 jam, seperti ditunjukkan pada Tabel X, nilai IR yang terukur pada setiap fase melebihi 4 GΩ sebelum durasi pemberian tegangan DC mencapai 1 menit, sehingga nilai PI tidak diperoleh. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan tingkat kelembapan dan kontaminasi garam yang diberikan belum memberikan penurunan kemampuan isolasi motor secara signifikan.

Pengujian dilanjutkan dalam durasi yang lebih lama, yaitu 4 x 24 jam, untuk memberikan tingkat tekanan yang lebih tinggi. Akan tetapi, berdasarkan hasil pengukuran IR, seperti tertera pada Tabel X, nilai IR masih berada di atas nilai minimum yang direkomendasikan.

C. Pengujian Skema 3

Penambahan beban motor mampu meningkatkan temperatur belitan stator hingga mencapai 190° C. Besar temperatur tersebut telah jauh melebihi temperatur *rating* isolasi motor (155° C). Di samping itu, penggunaan *ultrasonic humidifier* sebagai pengganti *steam humidifier* lebih efektif dalam memberikan efek kelembapan sebagaimana persentase kelembapan yang terukur mendekati 70%, seperti ditunjukkan pada Tabel XI.

Pada Tabel XII, nilai IR yang terukur pada fase 1 dan 3 melebihi 4 GΩ sebelum durasi pemberian tegangan DC mencapai 1 menit, sehingga nilai PI tidak terukur. Dengan mengacu pada nilai IR yang diperoleh, secara praktis, kondisi isolasi pada kedua fase tersebut dapat dikatakan tergolong baik.

Gbr. 6 Lapisan putih pada permukaan *turn insulation*.Gbr. 7 Lapisan putih pada permukaan *groundwall insulation*.

Hasil berbeda ditunjukkan pada fase 2 yang memiliki nilai PI kurang dari 2,0. Dengan nilai PI yang berada di bawah nilai minimum yang direkomendasikan oleh IEEE Std. 43-2013, kondisi isolasi terindikasi rusak. Selanjutnya, jika nilai PI tersebut dibandingkan dengan Tabel III, nilai PI pada fase 2 berada dalam rentang 1,0-2,0. Artinya, kondisi isolasi pada fase 2 tergolong buruk.

Pengoperasian motor dilanjutkan kembali setelah pengukuran IR dilakukan. Akan tetapi, ketika durasi pengujian mencapai 1 x 6 jam, motor berbunyi keras dan mengeluarkan asap hitam yang memenuhi ruangan *chamber*. Lalu, pengoperasian motor dihentikan untuk pengukuran IR.

Nilai tahanan pada fase 1 dan 3 tidak menunjukkan perubahan secara signifikan jika dibandingkan dengan pengujian 1 x 24 jam sebelumnya. Hal ini berbeda dengan hasil pengukuran pada fase 2 yang menunjukkan nilai PI kurang dari 1,0. Nilai PI yang diperoleh tersebut berada di bawah nilai minimum yang direkomendasikan oleh IEEE Std. 43-2013 dan berada dalam rentang kurang dari 1,0 berdasarkan Tabel III. Artinya, kondisi isolasi tergolong sangat buruk (berbahaya). Hal ini juga didukung oleh nilai IR saat 1 menit, yaitu sebesar 0,052 M Ω (telah dikoreksi terhadap temperatur dasar 40° C), yang kurang dari nilai minimum yang direkomendasikan oleh IEEE Std. 43-2013.

D. Pengamatan Kondisi Fisik Isolasi Motor

Pasca pengujian skema 3 berdurasi 1 x 6 jam, motor dibongkar untuk memastikan bahwa isolasi telah mengalami kegagalan. Hasil penyelidikan secara fisik menunjukkan bahwa ruang stator tidak ditemui titik-titik air. Akan tetapi, pada bagian *end-winding* terdapat lapisan berwarna putih yang



Gbr. 8 Bercak putih yang mengendap dan tersebar pada permukaan isolasi motor.



Gbr. 9 Patahan pada belitan stator.

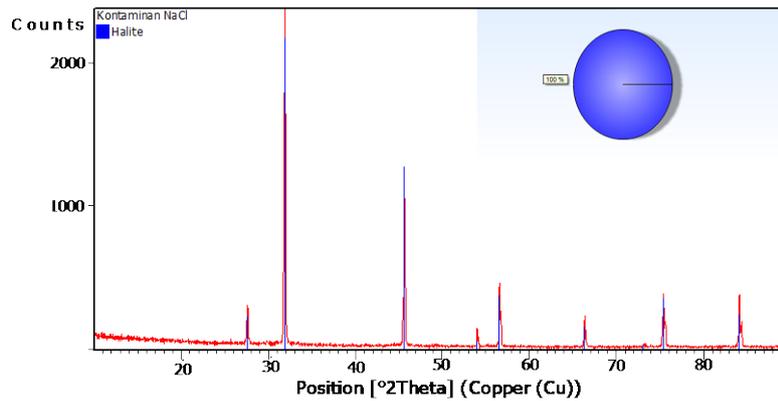
menutupi permukaan *turn insulation* dan *groundwall insulation*, seperti ditunjukkan pada Gbr. 6 dan Gbr. 7. Pada Gbr. 8 terlihat bahwa pada permukaan *turn insulation* dan *groundwall insulation* juga terdapat bercak-bercak berwarna putih yang mengendap. Di samping itu, warna belitan stator yang semula kuning kecoklatan (sebelum motor dikenai tekanan) berubah menjadi hitam pekat akibat tekanan termal yang diberikan.

Hasil penyelidikan juga menunjukkan ada patahan pada salah satu lilitan stator, seperti ditunjukkan pada Gbr. 9. Dengan mengacu pada nilai PI fase 2 yang turun signifikan dibandingkan fase lainnya, patahan tersebut terindikasi terjadi pada belitan fase 2.

E. Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Bercak putih yang mengendap pada *turn insulation* dan *groundwall insulation* perlu diverifikasi, endapan tersebut adalah kontaminan garam (NaCl) yang diberikan selama pengujian atau kontaminan lainnya. Dalam hal ini, endapan tersebut diambil sebagai sampel pengujian XRD di Laboratorium Karakterisasi, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS.

Hasil pengujian XRD menunjukkan bahwa bercak putih yang mengendap dan tersebar pada permukaan *turn insulation* dan *groundwall insulation* merupakan kontaminan garam yang diberikan. Hal ini dibuktikan melalui spektrum gelombang hasil pengujian XRD, seperti ditunjukkan pada Gbr. 10. Puncak-puncak gelombang yang terbentuk (ditandai



Gbr. 10 Spektrum gelombang hasil pengujian XRD.

oleh warna biru teridentifikasi sebagai senyawa NaCl (garam) berdasarkan perangkat lunak PDF Card. Nilai-nilai parameter puncak gelombang yang terdeteksi tersebut ditunjukkan secara lebih detail pada Tabel XIII.

TABEL XIII
NILAI PARAMETER PUNCAK GELOMBANG HASIL PENGUJIAN XRD

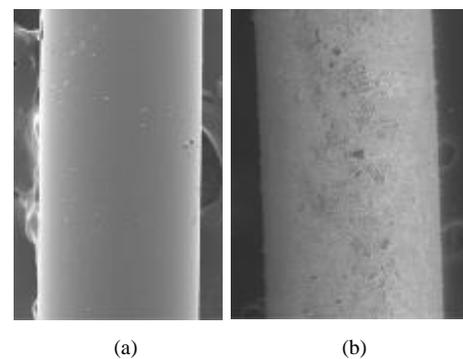
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
27,6242	261,19	0,0836	3,22921	12,19
31,8474	2142,97	0,0816	2,80765	100,00
31,9505	1906,40	0,0408	2,80578	88,96
45,5884	1030,52	0,0816	1,98827	48,09
45,7025	859,11	0,0612	1,98850	40,09
45,8171	284,12	0,0408	1,97887	13,26
54,0052	127,86	0,0816	1,69658	5,97
54,1611	65,34	0,0612	1,69627	3,05
56,5793	418,76	0,0816	1,62535	19,54
56,7392	251,06	0,0612	1,62517	11,72
66,3300	185,22	0,1020	1,40809	8,64
66,5127	109,00	0,0816	1,40816	5,09
73,2165	24,04	0,1224	1,29171	1,12
75,4092	367,62	0,1224	1,25950	17,15
75,6595	147,44	0,1632	1,25908	6,88
84,1020	355,25	0,1428	1,15006	16,58
84,3321	166,88	0,1632	1,15036	7,79

F. Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) - Energy Dispersive X-ray (EDX)

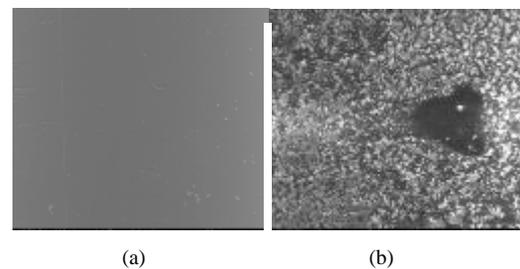
Pengujian SEM bertujuan untuk mengetahui kondisi fisik permukaan isolasi dengan perbesaran tertentu. Sampel yang digunakan adalah filamen belitan stator yang normal (tidak dipengaruhi oleh tekanan apapun) dan filamen belitan stator yang telah dipengaruhi oleh tekanan atau terdegradasi (pasca pengujian skema 3 berdurasi 1 x 6 jam). Sampel isolasi terdegradasi yang dipilih adalah filamen yang diselimuti oleh lapisan putih pada permukaannya.

Perbedaan hasil uji SEM pada perbesaran 200 kali antara isolasi yang normal dan isolasi yang dipengaruhi oleh tekanan termal, kelembapan, dan kontaminasi garam tidak terlalu signifikan, seperti ditunjukkan pada Gbr. 11. Akan tetapi, dengan perbesaran yang lebih tinggi, yaitu 2.000 kali, perbedaan fisik terlihat lebih jelas, seperti ditunjukkan pada

Gbr. 12. Permukaan isolasi yang normal terlihat rata, halus, dan bersih, sedangkan permukaan isolasi yang dipengaruhi tekanan terlihat tidak rata, kasar, dan kotor.

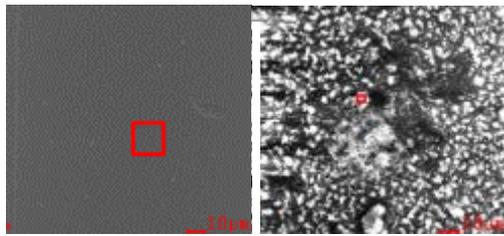


Gbr. 11 Permukaan isolasi belitan stator dengan perbesaran 200 kali; (a) kondisi normal; (b) dipengaruhi tekanan termal, kelembapan, dan kontaminasi garam.

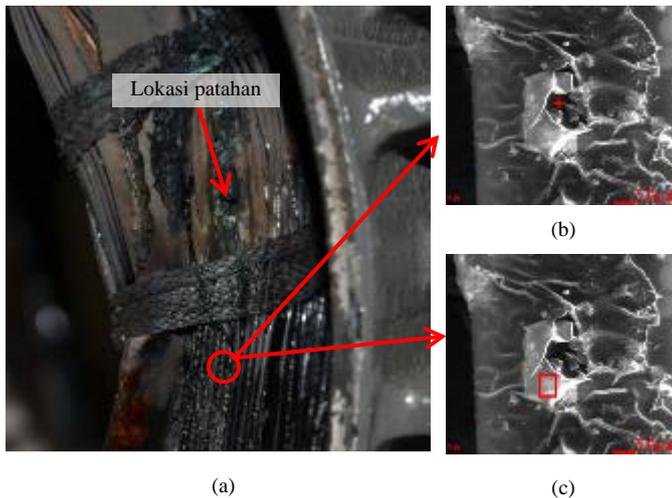


Gbr. 12 Permukaan isolasi belitan stator dengan perbesaran 2.000 kali; (a) kondisi normal; (b) dipengaruhi tekanan termal, kelembapan, dan kontaminasi garam.

Melalui pengujian EDX, komposisi kimia suatu material dari sampel citra SEM dapat diketahui. Gbr. 13 menunjukkan hasil pengujian SEM dengan perbesaran 1.000 kali, sedangkan hasil pengujian EDX-nya ditunjukkan pada Tabel XIV dan Tabel XV. Pada kedua tabel tersebut, perbedaan komposisi kimia antara isolasi yang normal dan isolasi yang dipengaruhi oleh tekanan dapat diamati secara jelas. Komposisi kimia isolasi normal hanya terdiri atas O, Si (material isolasi), dan Cu (material konduktor penghantar), sedangkan pada isolasi yang dipengaruhi oleh tekanan terdapat banyak unsur lain yang merupakan mineral yang terbawa oleh uap air, sebagaimana air yang digunakan pada *humidifier* bukan air murni H₂O.



Gbr. 13 Permukaan isolasi belitan stator dengan perbesaran 1.000 kali; (a) kondisi normal; (b) dipengaruhi tekanan termal, kelembapan, dan kontaminasi garam. Kotak merah menunjukkan area yang digunakan sebagai sampel pengujian EDX.



Gbr. 14 Pengujian SEM pada filamen yang mengalami retak; (a) lokasi retakan (ditandai lingkaran merah); (b) perbesaran 1.000 kali dengan titik merah sebagai sampel pengujian EDAX; (c) perbesaran 1.000 kali dengan area kotak merah sebagai sampel pengujian EDX.

TABEL XIV
KOMPOSISI KIMIA ISOLASI NORMAL BERDASARKAN SAMPEL CITRA SEM PADA GBR. 12(A)

Elemen	Wt%	At%
OK	53,10	80,83
SiK	2,47	2,14
CuK	44,43	17,03

TABEL XV
KOMPOSISI KIMIA ISOLASI YANG DIPENGARUHI TERMAL, KELEMBAPAN, DAN KONTAMINASI GARAM BERDASARKAN SAMPEL CITRA SEM PADA GBR. 12(B)

Elemen	Wt%	At%
OK	55,50	74,81
NaK	2,48	2,33
MgK	1,26	1,11
SiK	0,43	0,33
SK	0,47	0,32
ClK	0,88	0,53
CaK	36,92	19,87
CuK	2,06	0,70

Pengujian SEM-EDX juga dilakukan pada permukaan filamen yang mengalami retak (*crack*), seperti ditandai oleh kotak merah pada Gbr. 14(a). Filamen tersebut berada dalam satu koil dengan lokasi patahan. Hasil pengujian EDX pada sampel bertanda merah (Gbr. 14(b)) menunjukkan bahwa titik merah tersebut terindikasi sebagai konduktor. Hal ini

disebabkan oleh persentase Cu yang paling dominan dibandingkan komposisi kimia lainnya, seperti terlihat pada Tabel XVI. Di sisi lain, area kotak merah pada Gbr. 14(c) merupakan kontaminan yang menutupi konduktor penghantar. Hal ini disebabkan oleh adanya unsur Na dan Cl yang merupakan komposisi kimia penyusun garam serta Cu yang merupakan material penyusun konduktor, seperti ditunjukkan pada Tabel XVII.

TABEL XVI
HASIL PENGUJIAN EDX PADA TITIK MERAH GBR. 14(B)

Elemen	Wt%	At%
OK	1,72	6,43
ClK	1,40	2,36
TiK	0,71	0,89
CuK	96,16	90,32

TABEL XVII
HASIL PENGUJIAN EDX PADA AREA KOTAK MERAH GBR. 14(C)

Elemen	Wt%	At%
OK	39,05	63,75
NaK	5,66	6,42
AlK	1,68	1,62
ClK	15,33	11,29
TiK	8,73	4,76
CuK	29,57	12,15

V. KESIMPULAN

Pemberian tekanan termal akibat beban lebih dan tekanan lingkungan akibat kelembapan dan kontaminasi garam (partikel konduktif) selama 222 jam mampu mendegradasi isolasi motor induksi hingga rusak, sehingga belitan stator motor mengalami hubung singkat dan terbakar. Pada pengujian skema 1 dan 2, kondisi isolasi pada semua fase masih tergolong baik berdasarkan nilai IR yang lebih dari nilai minimumnya (5 MΩ), sedangkan nilai PI tidak terukur karena nilai IR saat 1 menit pengukuran melebihi 4 GΩ. Pada pengujian skema 3, kondisi isolasi pada fase 1 dan 3 masih tergolong baik, sedangkan kondisi isolasi yang buruk ditemui pada fase 2. Hal ini dibuktikan oleh nilai IR yang kurang dari nilai minimumnya dan nilai PI yang berada dalam kategori <1 (buruk atau berbahaya). Selain itu, hasil pengujian SEM-EDX dan XRD menunjukkan bahwa pada permukaan isolasi motor ditemukan mineral-mineral yang berasal dari uap air, kontaminan garam, retakan, bahkan patahan. Berdasarkan hasil pengamatan fisik, mineral tersebut terlihat sebagai lapisan putih pada permukaan *turn insulation* dan *groundwall insulation*. Warna belitan menjadi hitam (teroksidasi), tetapi titik-titik air tidak ditemui pada isolasi. Di samping itu, bagian *end-winding* adalah bagian yang paling mudah dipengaruhi oleh kelembapan dan kontaminasi. Dengan demikian, berdasarkan seluruh hasil yang diperoleh, nilai IR saat 1 menit yang kurang dari 5 MΩ dan nilai PI kurang dari 2,0 mengindikasikan isolasi telah dipengaruhi kelembapan dan kontaminasi yang disertai kerusakan serius pada isolasi.

REFERENSI

[1] Motor Reliability Working Group. "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, part I," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. IA-21, No. 4, hal. 853-864, Juli/Agt. 1985.

- [2] G.C. Stone, E.A. Boulter, I. Culbert, dan H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair*, New York, USA: Wiley- IEEE Press, 2004.
- [3] J.H. Dymond, N. Stranges, K. Younsi, dan J.E. Hayward, "Stator Winding Failures: Contamination, Surface Discharge, Tracking," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 38, No. 2, Mar./Apr. 2002.
- [4] *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*, IEEE Std. 43-2013, 2013.
- [5] R.M. Tallam, S.-B. Lee, G. Stone, G.B. Kliman, J. Yoo, T.G. Habetler, dan R.G. Harley, "A Survey of Methods for Detection of Stator Related Faults in Induction Machines," *4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, (SDEMPED 2003)*, 2003, hal. 35-46.
- [6] S.B. Lee, J. Yang, K. Younsi, dan R.M. Bharadwaj, "An Online Groundwall and Phase-to-Phase Insulation Quality Assessment Technique for Ac-Machine Stator Windings," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 42, No. 4, Jul./Agt. 2006.
- [7] *Insulation Resistance Testing*, Fluke Corporation, 2007.
- [8] M. Farahani, E. Gockenbach, H. Borsi, dan M. Kaufhold, "Behaviour of a Machine Insulation System During Accelerated Aging Tests," *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2008, hal. 404-407.
- [9] D.L. McKinnon, "Insulation Resistance Profile (IRP) and Its Use for Assessing Insulation Systems," *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2010, hal. 1-4.
- [10] A. Brown, M. Essalihi, dan E. David, "Insulation Resistance Measurements for Machine Insulation," *Electrical Insulation Conference*, 2011, hal. 261-264.
- [11] H. Torkaman dan F. Karimi, "Measurement Variations of Insulation Resistance/Polarization Index During Utilizing Time in HV Electrical Machines – A Survey" *Measurement*, Vol. 59, hal. 21–29, 2015.
- [12] I.M.Y. Negara, D.A. Asfani, D. Fahmi, S.S. Aisyah N., "Testing and Simulation of Motor Insulation System Under Some Artificial Environmental Conditions," *Proc. of Int. Conf. on Electrical Engineering, Computer Science, and Informatics (EECSI)*, 2014, hal. 286-289.
- [13] A.S. Guedesa, S.M. Silvaa, B.d.J.C. Filhoa, dan C.A. Conceic, "Evaluation of Electrical Insulation in Three-Phase Induction Motors and Classification of Failures Using Neural Networks," *Electric Power Systems Research*, Vol. 140, hal. 263–273, 2016.
- [14] N. Phloymuk dan N. Tanthanuch, "Improvement of Insulation for Rotating Machine by Dry Ice Method," *International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 2016, hal. 345-348.
- [15] N. Lahoud, J. Faucher, D. Malec, dan P. Maussion, "Electrical Aging of the Insulation of Low-Voltage Machines: Model Definition and Test with the Design of Experiments," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 9, hal. 4147-4155, 2013.
- [16] M. Yamamoto dan K. Ohashi, "Salt Contamination of External of High Voltage Apparatus and Its Countermeasures", *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, Vol. 80, No. 3, hal. 380-387, 1961.