

Evaluasi Keandalan *Permanent magnet synchronous generator* pada Turbin Angin Berdasarkan *Insulation Resistance* terhadap Kondisi Kelembapan Relatif Tinggi

Reliability Evaluation of a Permanent magnet synchronous generator for Wind Turbines Based on Insulation Resistance under High Relative Humidity

¹Armando Akbar Prakoso, ²Belly Yan Dewantara, dan ³Suryadhi

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan, Universitas Hang Tuah Surabaya, Jalan Arief Rahman Hakim No. 150, Surabaya, Jawa Timur 60111

¹armandoakbr09@gmail.com, ²bellyyandewantara@hangtuah.ac.id, ³suryadhi@hangtuah.ac.id

Abstract Insulation systems of wind turbine generators operating in tropical coastal regions are exposed to a sustained risk of degradation caused by prolonged high humidity. This study measured the decline of *Insulation Resistance* (IR) in the stator winding of a 400 W *permanent magnet synchronous generator* (PMSG) during *accelerated aging*, classified the insulation condition at each time point using IEEE Std 43-2013, and examined the accompanying trend in generator electrical output. A single-factor laboratory experiment was conducted in which a *housing-free* stator winding specimen was exposed to $93\% \pm 3\%$ RH at $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ for 144 hours, following the *damp heat steady state* protocol of IEC 60068 – 2 – 78, with *chamber* homogeneity and stability validated with reference to IEC 60068 – 3 – 6. IR was measured every 24 hours across phase to ground terminal combinations using a 500 V DC megger, and all readings were corrected to a 40°C reference temperature. At the initial condition, all replicate readings exceeded the instrument measuring range (*over load*, $> 4000 \text{ M}\Omega$ at a specimen temperature of 32°C). After 144 hours of exposure, the corrected IR fell to $40.4 - 42.0 \text{ M}\Omega$, corresponding to a reduction of at least 98.2%, through three phases: initial protection (0 – 48 h), infiltration and rapid degradation (72 – 120 h), and a critical phase (120 – 144 h). Output voltage, current, and power at 600, 900, and 1200 rpm declined in parallel with the IR trend, while time domain statistical analysis of the voltage waveform at 600 rpm showed a consistently low standard deviation throughout, indicating that the generator retained stable short term signal quality even as its *mean* output fell. Comparison of leakage current magnitude with the observed power loss indicated that the two trends are better explained as co – occurring effects of the same environmental exposure rather than a direct cause and effect relationship. These findings provide a quantitative basis for setting condition-monitoring intervals and planning predictive maintenance for wind turbine generators operating in tropical coastal environments.

Keywords: *insulation resistance; relative humidity; accelerated aging; permanent magnet generator; time-domain signal analysis*

Abstrak Sistem isolasi generator turbin angin di wilayah pesisir tropis menghadapi risiko degradasi akibat paparan kelembapan yang tinggi dan berlangsung terus – menerus. Penelitian ini mengukur penurunan *Insulation Resistance* (IR) pada belitan stator sebuah *permanent magnet synchronous generator* (PMSG) 400 W selama pengujian *accelerated aging*, mengelompokkan kondisi isolasi pada setiap titik waktu berdasarkan acuan IEEE Std 43 – 2013, serta mengamati tren keluaran elektrik generator yang menyertainya. Pengujian dilaksanakan dengan pendekatan eksperimen laboratorium faktor tunggal: spesimen belitan stator tanpa *housing* generator dipapar pada $93\% \pm 3\%$ RH dan suhu $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ selama 144 jam, mengacu pada protokol *damp heat steady state* IEC 60068 – 2 – 78, dengan homogenitas dan kestabilan *chamber* divalidasi mengacu pada IEC 60068 – 3 – 6. Pengukuran IR dilakukan setiap 24 jam pada kombinasi terminal fasa ke tanah menggunakan megger arus searah 500 V, dan seluruh nilai dikoreksi ke suhu acuan 40°C . Pada kondisi awal, ketiga ulangan pengukuran pada ketiga fasa terbaca melampaui batas ukur instrumen (*over load*, $> 4000 \text{ M}\Omega$ pada suhu spesimen 32°C). Setelah 144 jam paparan, nilai IR terkoreksi turun menjadi $40,4 - 42,0 \text{ M}\Omega$, setara penurunan sekurang-kurangnya 98,2% terhadap batas bawah nilai awal, melalui tiga fase: proteksi awal (0 – 48 jam), infiltrasi dan degradasi cepat (72 – 120 jam), dan fase kritis (120 – 144 jam). Tegangan, arus, dan daya keluaran pada kecepatan 600, 900, dan 1200 rpm menurun sejalan dengan tren IR, sementara analisis statistik domain waktu terhadap gelombang tegangan pada 600 rpm menunjukkan standar deviasi yang tetap rendah sepanjang pengujian, mengindikasikan generator tetap mempertahankan kestabilan sinyal jangka pendek meskipun nilai rata – ratanya menurun. Perbandingan besaran arus bocor isolasi dengan penurunan daya yang teramati menunjukkan bahwa kedua tren tersebut lebih tepat ditafsirkan sebagai kejadian yang berlangsung bersamaan akibat paparan lingkungan yang sama, bukan hubungan sebab – akibat langsung. Temuan ini memberikan acuan kuantitatif untuk menetapkan interval pemantauan kondisi dan perencanaan pemeliharaan prediktif generator turbin angin yang beroperasi di lingkungan pesisir tropis.

Kata Kunci: *resistansi isolasi; kelembapan relatif; accelerated aging; generator magnet permanen; analisis sinyal domain waktu*

I. PENDAHULUAN

Energi angin menempati posisi penting dalam transisi menuju sistem pembangkitan rendah karbon, dengan potensi di Indonesia yang masih belum sepenuhnya dimanfaatkan, terutama di pesisir selatan Jawa, Nusa Tenggara, Sulawesi Selatan, dan Maluku. Pemanfaatannya menuntut perhatian pada keandalan komponen pembangkit, khususnya

generator, yang oleh Carroll, McDonald dan McMillan dilaporkan sebagai komponen dengan waktu henti rata – rata tertinggi per kejadian kegagalan pada turbin angin lepas pantai di Eropa [1], sejalan dengan temuan Tavner, Xiang dan Spinato bahwa laju kegagalan sistem elektrik generator konsisten menempati posisi teratas dibandingkan subsistem lain [2]. Pada generator bertipe *permanent magnet synchronous generator* (PMSG), keandalan tersebut sangat bergantung pada keutuhan sistem isolasi dielektrik belitan stator.

Kelembapan relatif merupakan faktor lingkungan dominan yang mendegradasi sistem isolasi di wilayah pesisir tropis, yang umumnya berada pada rentang kelembapan relatif tahunan 80 – 95%. Ma dkk. menunjukkan bahwa mekanisme utama penuaan higrotermal pada isolasi komposit epoksi adalah hidrolisis ikatan ester resin menjadi asam organik dan alkohol, yang merusak jaringan resin sekaligus menurunkan kekuatan mekanisnya [3]. Pengaruh kelembapan terhadap perilaku dielektrik belitan mesin listrik telah dikaji secara eksperimental oleh Ji dkk. melalui pengukuran faktor disipasi dan kapasitansi isolasi, yang menemukan bahwa peran kelembapan pada mekanisme inisiasi peluahan sebagian bersifat kompleks dan saling terkait dengan suhu lingkungan [4], [5]. Tinjauan menyeluruh yang disusun Ji, Giangrande dan Zhao menegaskan bahwa suhu, tekanan, dan kelembapan merupakan tiga faktor lingkungan yang paling menentukan aktivitas peluahan sebagian pada isolasi mesin listrik [6].

Insulation Resistance (IR) merupakan parameter diagnostik yang paling umum digunakan untuk menilai kesehatan isolasi mesin berputar, dengan prosedur pengukuran, koreksi suhu, dan penafsiran nilainya diatur dalam IEEE Std 43 – 2013 [7]. Untuk memperoleh gambaran degradasi jangka panjang tanpa menunggu masa operasi bertahun – tahun, pengujian *accelerated aging* berbasis IEC 60068 – 2 – 78 pada 93% RH dan 40°C digunakan untuk merepresentasikan kondisi ekstrem iklim pesisir tropis [8]. Selain resistansi isolasi, karakteristik keluaran elektrik generator berupa tegangan, arus, dan daya turut menjadi indikator praktis yang dapat diamati langsung di lapangan, namun keterkaitan keduanya belum banyak dibahas secara kuantitatif. Data degradasi IR yang spesifik untuk belitan stator PMSG pada kondisi kelembapan dominan 93% RH juga masih terbatas, sehingga penelitian ini bertujuan mengukur dan mendokumentasikan tren penurunan IR pada belitan stator PMSG tanpa *housing* generator selama 144 jam pengujian *accelerated aging*, mengelompokkan kondisi isolasi berdasarkan IEEE Std 43 – 2013 [7], serta mengamati keterkaitannya dengan karakteristik keluaran elektrik generator termasuk analisis statistik domain waktu pada sinyal tegangan. Kajian dibatasi pada IR sebagai variabel utama dengan faktor tekan tunggal berupa kelembapan relatif..

II. METODE PENELITIAN

A. Pendekatan dan Spesimen Uji

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan jenis eksperimen laboratorium faktor tunggal. Kelembapan relatif ditetapkan sebagai satu – satunya variabel tekan yang divariasikan, sementara suhu dijaga konstan pada kondisi tunak, sehingga perubahan yang teramati dapat ditafsirkan secara spesifik sebagai sensitivitas isolasi terhadap kelembapan.

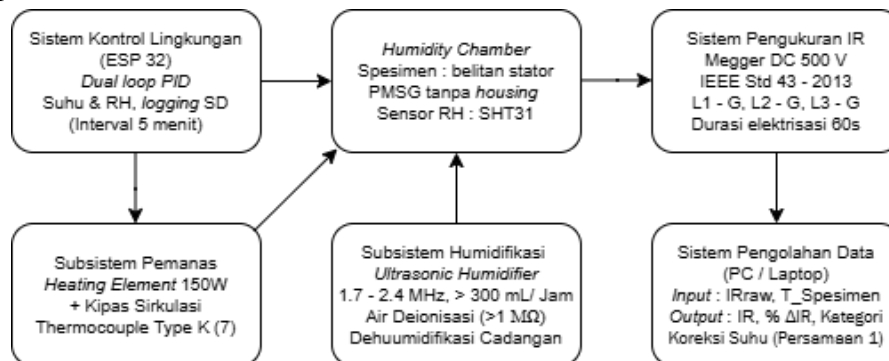
Spesimen uji berupa belitan stator PMSG tiga fasa dengan isolasi berbahan mika epoksi dan tegangan nominal 0,4 – 1 kV. Spesimen diuji tanpa *housing* generator, sesuai ketentuan IEC 60068 – 2 – 78 yang mengizinkan pengujian pada tingkat komponen untuk mempelajari mekanisme dasar degradasi [8]. Generator yang digunakan memiliki daya nominal 400 W, tegangan nominal 12 V, tiga sudu, diameter rotor 1,1 m, kecepatan angin awal 2 m/s, dan kecepatan angin nominal 12 m/s. Dokumentasi spesimen beserta penempatan titik ukur suhu dan perangkat pendukung di dalam ruang uji ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Dokumentasi Spesimen Belitan Stator dan Ruang Uji Kelembapan

B. Rancangan dan Diagram Sistem Pengujian

Sistem pengujian dirancang agar sistem kontrol lingkungan (suhu dan kelembapan *chamber*), sistem pengukuran *Insulation Resistance*, dan sistem pengolahan data berjalan secara independen satu sama lain, sehingga pengukuran IR tidak dipengaruhi oleh proses akuisisi data lingkungan. Kendali suhu dan kelembapan *chamber* menggunakan skema dual loop PID pada mikrokontroler, dengan pencatatan data ke kartu SD pada interval lima menit. Rancangan keseluruhan subsistem tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Blok Sistem Pengujian

C. Prosedur Prakondisi

Sebelum pengujian dimulai, seluruh spesimen menjalani tahap prakondisi. Nilai *Insulation Resistance* awal diukur sebanyak tiga kali pengulangan menggunakan megger arus searah 500 V. Spesimen juga diperiksa secara visual untuk memastikan tidak terdapat retak, delaminasi, kontaminasi, maupun kerusakan mekanis, dan karakteristik sinyal keluaran generator direkam pada kondisi kering untuk tiga variasi kecepatan putar, yaitu 600, 900, dan 1200 rpm, sebagai *baseline* pembanding bagi data yang diambil sepanjang masa pengujian.

D. Kondisi Pengujian dan Pengukuran

Kondisi *accelerated aging* mengacu pada protokol *damp heat steady state* IEC 60068 – 2 – 78 pada $93\% \pm 3\%$ RH dan suhu $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ selama maksimal 144 jam [8], dengan homogenitas dan kestabilan *chamber* divalidasi mengacu pada IEC 60068 – 3 – 6 [9]. Suhu ruang uji distabilkan terlebih dahulu dalam keadaan udara kering selama sekurang – kurangnya 30 menit sebelum pelembap diaktifkan, kemudian kelembapan dinaikkan bertahap hingga mencapai kondisi target dalam waktu tidak lebih dari dua jam untuk mencegah kondensasi mendadak pada permukaan spesimen. Ringkasan parameter pengujian disajikan pada Tabel 1.

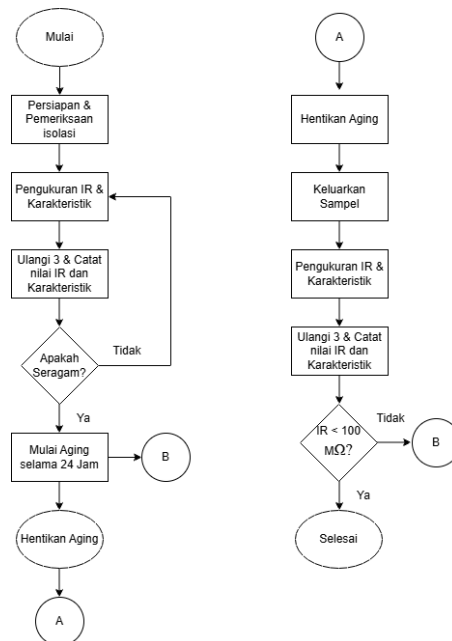
Tabel 1. Parameter dan Kondisi Pengujian *Accelerated aging*

Parameter	Nilai/Kondisi	Toleransi	Acuan
Kelembapan relatif	93% RH	$\pm 3\%$ RH	IEC 60068-2-78
Suhu tunak	40°C	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	IEC 60068-2-78
Durasi pengujian	maks. 144 jam	–	IEC 60068-2-78
Tegangan uji fasa-tanah	500 V DC	$\pm 1\%$	IEEE Std 43-2013
Durasi elektrisasi	60 detik	± 1 detik	IEEE Std 43-2013
Frekuensi pengukuran	tiap 24 jam	–	IEC 60068-2-78
Jumlah ulangan awal	3 kali	–	ISO/IEC GUM
Suhu acuan koreksi	40°C	–	IEEE Std 43-2013

Pengukuran berkala dilaksanakan setiap 24 jam dengan mengeluarkan spesimen dari ruang uji selama tidak lebih dari lima menit. Nilai *Insulation Resistance* diukur pada seluruh kombinasi terminal fasa ke tanah, yaitu L1 – G, L2 – G, dan L3 – G, menggunakan megger arus searah 500 V dengan durasi elektrisasi 60 detik. Bersamaan dengan itu, sinyal tegangan, arus, dan daya keluaran generator direkam pada tiga variasi kecepatan putar untuk memantau keterkaitannya dengan tren degradasi isolasi.

E. Alur Penelitian

Keseluruhan tahapan penelitian, mulai dari prakondisi, pengujian *accelerated aging*, pengukuran berkala, hingga analisis data, disusun dalam diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

F. Koreksi Suhu dan Kriteria Evaluasi

Nilai *Insulation Resistance* sangat bergantung pada suhu bahan, sehingga seluruh pembacaan dikoreksi ke suhu acuan 40°C mengikuti IEEE Std 43 – 2013 [7]:

$$RI_{40} = RI^T \times 2^{((T-40)/10)} \quad (1)$$

dengan RI_{40} adalah nilai terkoreksi pada suhu acuan 40°C, RI^T adalah nilai hasil pengukuran pada suhu T , dan T adalah suhu spesimen saat pengukuran dalam derajat Celsius.

Evaluasi keandalan dilakukan dengan membandingkan nilai terkoreksi terhadap dua acuan, yaitu nilai minimum berbasis tegangan nominal yang dirumuskan IEEE Std 43 – 2013 sebagai $RI_{min} = (kV_{nominal} + 1) M\Omega$ [7], dan nilai 100 $M\Omega$ pada 40°C yang secara luas digunakan sebagai kriteria penerimaan operasional dalam pengujian lapangan. Pengujian dapat dihentikan sebelum durasi maksimal tercapai apabila *Insulation Resistance* mencapai 100 $M\Omega$ atau lebih rendah, atau apabila ditemukan kegagalan visual berupa *tracking*, karbonisasi, *flashover*, maupun delaminasi signifikan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kondisi Awal dan Keterulangan Pengukuran

Hasil pengukuran prakondisi disajikan pada Tabel 2. Pada ketiga kombinasi terminal, seluruh ulangan menunjukkan pembacaan yang melampaui batas ukur atas instrumen sehingga tercatat sebagai *over load*, yaitu lebih dari 4000 $M\Omega$ pada suhu spesimen 32°C. Dengan faktor koreksi 0,574 untuk suhu tersebut, batas bawah nilai terkoreksi pada suhu acuan 40°C adalah lebih dari 2296 $M\Omega$.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Awal dan Keterulangan

Terminal	Ulangan 1	Ulangan 2	Ulangan 3	Suhu Spesimen	RI_{40}
L1–G	>4000 $M\Omega$	>4000 $M\Omega$	>4000 $M\Omega$	32°C	>2296 $M\Omega$
L2–G	>4000 $M\Omega$	>4000 $M\Omega$	>4000 $M\Omega$	32°C	>2296 $M\Omega$
L3–G	>4000 $M\Omega$	>4000 $M\Omega$	>4000 $M\Omega$	32°C	>2296 $M\Omega$

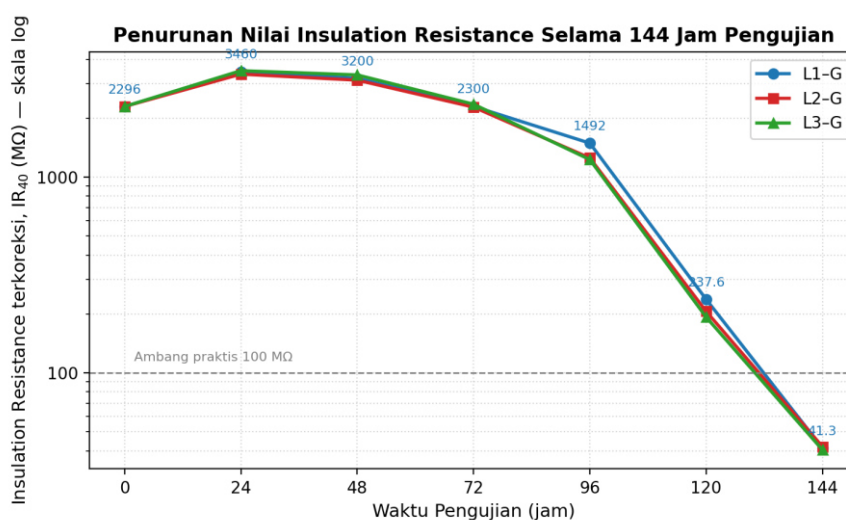
Simpangan baku dan koefisien variasi tidak dapat dihitung secara representatif pada tahap ini, bukan karena ketidakstabilan pengukuran, melainkan karena seluruh pembacaan berada pada batas ukur instrumen sehingga tidak memiliki variasi numerik yang dapat dianalisis. Ketiga ulangan pada setiap terminal secara konsisten menunjukkan hasil yang sama, sehingga spesimen dinyatakan memenuhi syarat untuk dilanjutkan ke tahap *accelerated aging*. Konsekuensinya, nilai awal hanya dapat diperlakukan sebagai batas bawah, sehingga seluruh persentase penurunan yang dilaporkan berikutnya merupakan nilai minimum, bukan nilai pasti.

B. Tren Penurunan Resistansi Isolasi

Rekapitulasi hasil pengukuran selama 144 jam beserta pengelompokan kondisi isolasi disajikan pada Tabel 3, dan tren penurunannya ditampilkan secara grafis pada Gambar 4.

Tabel 3. Rekapitulasi Pengukuran IR dan Kategori Kondisi Isolasi

Hari	Jam	L1-G (MΩ)	L2-G (MΩ)	L3-G (MΩ)	Kategori
0	0	>2296	>2296	>2296	kondisi awal
1	24	3460	3360	3500	sangat baik
2	48	3200	3130	3330	sangat baik
3	72	2300	2280	2360	sangat baik
4	96	1492	1254	1229	sangat baik
5	120	237,6	206,3	192,7	baik
6	144	41,3	42,0	40,4	perlu investigasi



Gambar 4. Grafik Penurunan Nilai *Insulation Resistance* Selama 144 Jam pada Setiap Fasa

Selama 48 jam pertama nilai *Insulation Resistance* bertahan di atas 3000 MΩ, menunjukkan lapisan mika dan resin penutup masih efektif menahan difusi uap air. Memasuki jam ke – 72 mulai terjadi permeasi uap yang menembus pori – pori mikroskopis bahan isolasi, ditandai turunnya nilai ke kisaran 2280 – 2360 MΩ. Penurunan berlanjut secara tajam pada jam ke – 96 hingga ke – 120, dan pada jam ke – 144 nilai ketiga fasa berada pada kisaran 40,4 – 42,0 MΩ, telah menembus ambang praktis 100 MΩ sehingga kriteria penghentian dini terpenuhi.

Terhadap batas bawah nilai awal sebesar 2296 MΩ, penurunan pada akhir pengujian mencapai sekurang – kurangnya 98,2% pada ketiga fasa. Perbandingan antarfasa menunjukkan perilaku yang seragam, dengan selisih akhir antarfasa kurang dari 2 MΩ, memperkuat dugaan bahwa mekanisme degradasi bersifat menyeluruh pada seluruh volume isolasi, bukan terlokalisasi pada satu titik lemah. Pola penurunan dapat dibagi menjadi tiga fase: fase proteksi awal (0 – 48 jam), fase infiltrasi dan degradasi cepat (72 – 120 jam), dan fase kritis (120 – 144 jam) ketika nilai *Insulation Resistance* jatuh di bawah ambang praktis operasional.

Pola bertahap tersebut sejalan dengan mekanisme penuaan higrotermal yang dilaporkan Ma dkk. [3], yaitu penyerapan uap air yang diikuti hidrolisis ikatan ester resin epoksi, pemutusan rantai molekul, dan berkurangnya daya lekat antara resin dan bahan pengisi anorganik. Temuan Ji dkk. mengenai keterkaitan kelembapan dan suhu turut mendukung penafsiran ini [5], karena pengujian dilaksanakan pada suhu tunak yang cukup tinggi sehingga mempercepat mobilitas molekul air di dalam struktur isolasi.

C. Klasifikasi Kondisi Isolasi

Untuk memudahkan interpretasi praktis, Tabel 4 merangkum acuan klasifikasi kondisi isolasi yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan nilai *Insulation Resistance* terkoreksi pada 40°C, sebagai panduan lapangan yang melengkapi nilai minimum formal IEEE Std 43 – 2013 [7].

Tabel 4. Acuan Klasifikasi Kondisi Isolasi Berdasarkan Nilai IR Terkoreksi (40°C)

Rentang IR ₄₀	Kategori	Rekomendasi Tindak Lanjut
> 1000 MΩ	sangat baik	operasi normal, pemantauan rutin
100–1000 MΩ	baik	pemantauan diperketat
1–100 MΩ	perlu investigasi	penjadwalan inspeksi/pemeliharaan
< 1 MΩ	buruk / berisiko gagal	penghentian operasi, perbaikan segera

Mengacu pada Tabel 4, kondisi isolasi spesimen bergeser dari kategori sangat baik pada 0 – 96 jam, menjadi baik pada jam ke – 120, dan menjadi perlu investigasi pada jam ke – 144. Pergeseran kategori dalam rentang waktu yang relatif singkat, yaitu kurang dari tiga hari dari kategori sangat baik ke perlu investigasi, menegaskan bahwa paparan kelembapan tinggi yang berkelanjutan dapat mempercepat degradasi isolasi jauh lebih cepat dibandingkan penuaan pada kondisi operasi normal.

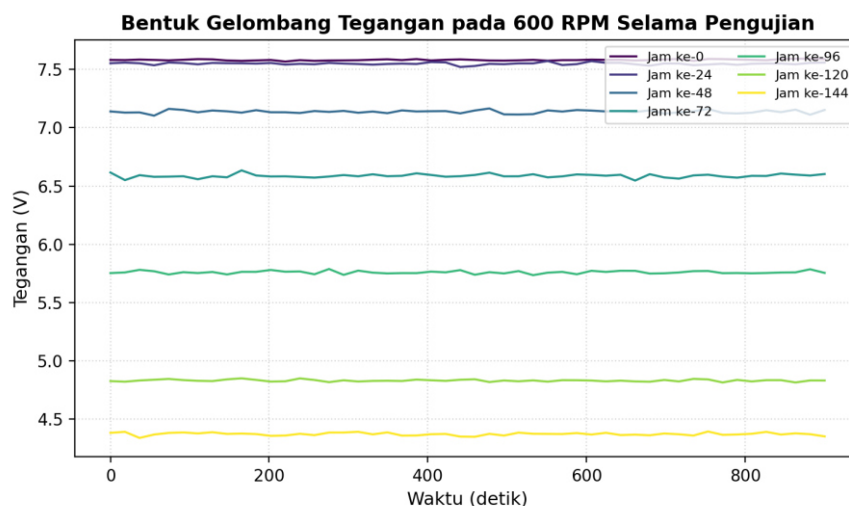
D. Karakteristik Keluaran Generator

Sebagai data pendukung, karakteristik tegangan, arus, dan daya keluaran generator direkam pada tiga variasi kecepatan putar di setiap titik waktu pengukuran. Ringkasannya disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Karakteristik Keluaran Generator pada Tiga Variasi Kecepatan Putar

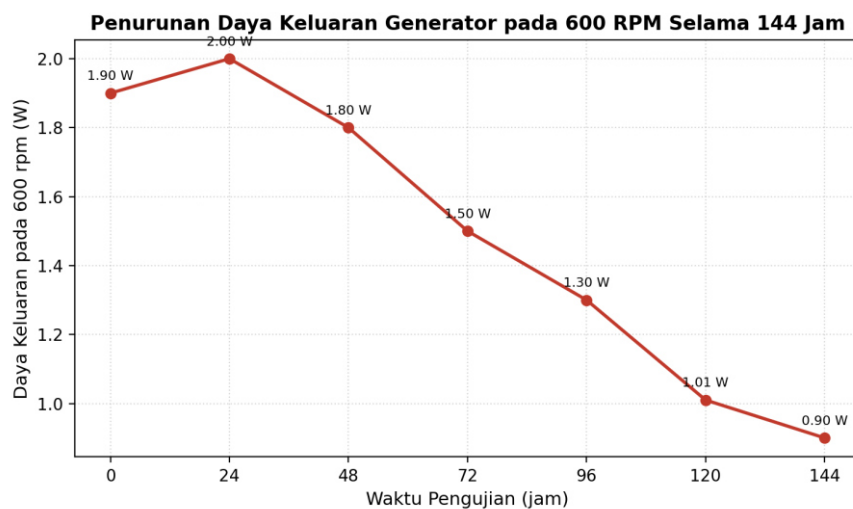
Kondisi	RI L1–G (MΩ)	600 rpm: V (V)	600 rpm: P (W)	900 rpm: V (V)	900 rpm: P (W)	1200 rpm: V (V)	1200 rpm: P (W)
Awal	>2296	7,41	1,90	12,60	4,40	17,48	6,80
24 jam	3460	7,54	2,00	11,92	4,00	17,39	6,70
48 jam	3200	7,13	1,80	11,63	3,87	16,65	6,40
72 jam	2300	6,50	1,50	10,64	3,30	15,68	5,87
96 jam	1492	5,76	1,30	9,80	3,00	14,70	5,28
120 jam	237,6	4,83	1,01	8,61	2,43	13,53	4,74
144 jam	41,3	4,37	0,90	8,53	2,30	13,10	4,50

Data pada Tabel 5 memperlihatkan bahwa tegangan dan daya keluaran menurun seiring bertambahnya durasi paparan, sejalan dengan menurunnya resistansi isolasi. Bentuk gelombang tegangan pada kecepatan 600 rpm untuk setiap hari pengujian ditunjukkan pada Gambar 5, sedangkan bentuk gelombang dayanya ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 5. Bentuk Gelombang Tegangan pada 600 RPM Selama Tujuh Hari Pengujian

Gambar 5 memperlihatkan bahwa pada kecepatan 600 rpm, kurva tegangan hari ke-0 berada paling atas dan secara bertahap turun mendekati kurva hari – hari berikutnya, dengan setiap kurva harian tetap tampil sebagai garis horizontal yang datar sepanjang durasi perekaman. Karakteristik ini menunjukkan bahwa meskipun nilai rata – rata tegangan menurun akibat degradasi isolasi, generator tetap mempertahankan kestabilan keluaran pada setiap kondisi pengukuran, tanpa fluktuasi acak yang berarti dalam skala waktu singkat.



Gambar 6. Bentuk Gelombang Daya pada 600 RPM Selama Tujuh Hari Pengujian

Pola serupa terlihat pada Gambar 6, dengan daya keluaran pada kecepatan 600 rpm menurun dari sekitar 2,1 W pada hari ke – 0 menjadi di bawah 1,0 W pada hari ke – 6, mengikuti tren penurunan tegangan dan arus secara proporsional. Karena daya merupakan hasil kali langsung dari tegangan dan arus, pola penurunannya konsisten dengan penurunan kedua besaran penyusunnya, dan tidak menunjukkan indikasi gangguan mendadak atau ketidakstabilan yang tiba – tiba.

E. Karakteristik Statistik Sinyal Domain Waktu

Untuk memperjelas kestabilan sinyal, data gelombang tegangan pada 600 rpm diekstraksi menjadi parameter RMS, mean, peak, peak to peak, dan standar deviasi (Tabel 6); kecepatan ini dipilih karena pola penurunan pada ketiga variasi kecepatan bersifat homogen dan hanya berbeda pada magnitudo akibat perbedaan GGL induksi. Nilai RMS dan mean menurun konsisten dari 7,5802 V pada hari ke-0 menjadi 4,3705 V pada hari ke – 6, sejalan dengan tren penurunan IR, sementara standar deviasi tetap pada rentang sangat kecil (0,0058 – 0,0142 V) sepanjang pengujian tanpa tren peningkatan fluktuasi berarti. Temuan ini mengindikasikan bahwa degradasi isolasi akibat kelembapan pada penelitian ini terutama menurunkan magnitudo keluaran generator, bukan menimbulkan ketidakstabilan atau derau pada sinyal, konsisten dengan karakteristik *damp heat steady state* pada IEC 60068 – 2 – 78 yang mensimulasikan paparan lingkungan stabil dan berkelanjutan [8].

Tabel 6. Parameter Statistik Domain Waktu Sinyal Tegangan pada 600 RPM

Hari	RMS (V)	Mean (V)	Peak (V)	Peak to peak (V)	Std Dev (V)
0	7,5802	7,5802	7,59	0,02	0,0058
1	7,5489	7,5489	7,57	0,04	0,0106
2	7,1365	7,1365	7,16	0,05	0,0137
3	6,5866	6,5866	6,61	0,05	0,0142
4	5,7609	5,7609	5,78	0,04	0,0121
5	4,8347	4,8347	4,86	0,04	0,0097
6	4,3705	4,3705	4,39	0,04	0,0121

F. Evaluasi Keandalan Isolasi

Hasil evaluasi keandalan pada akhir pengujian dirangkum pada Tabel 7.

Tabel 7. Evaluasi Keandalan Isolasi pada Akhir Pengujian

Fasa	RI ₄₀ Akhir (MΩ)	Penurunan thd Batas Bawah Awal	Kategori	Status Operasional
L1-G	41,3	≥ 98,2%	perlu investigasi	tidak memenuhi kriteria penerimaan lapangan
L2-G	42,0	≥ 98,2%	perlu investigasi	tidak memenuhi kriteria penerimaan lapangan
L3-G	40,4	≥ 98,2%	perlu investigasi	tidak memenuhi kriteria penerimaan lapangan

Terhadap acuan berbasis tegangan nominal IEEE Std 43-2013, nilai akhir 40,4 – 42,0 MΩ masih berada di atas nilai minimum untuk mesin bertegangan nominal di bawah 1 kV [7], namun terhadap kriteria penerimaan operasional

lapangan sebesar 100 MΩ pada 40°C, ketiga fasa telah berada di bawah ambang tersebut perbedaan kedua acuan ini penting dinyatakan eksplisit agar penafsiran tidak melampaui apa yang ditetapkan standar. Sebagai perbandingan besaran, arus bocor pada isolasi 41,3 MΩ dengan tegangan kerja 13,10 V hanya berorde sepersejuta ampere, sehingga daya yang hilang melalui jalur kebocoran berorde mikrowatt jauh dari penurunan daya keluaran yang teramati pada Tabel 5 ($\approx 2,3$ W pada 1200 rpm). Dengan demikian, penurunan IR tidak dapat menjelaskan penurunan daya keluaran melalui mekanisme kebocoran arus semata; kedua gejala lebih tepat ditafsirkan sebagai kejadian yang berlangsung bersamaan akibat paparan lingkungan yang sama, mengingat kelembapan tinggi pada suhu 40°C selama enam hari juga berpotensi menimbulkan korosi pada komponen logam termasuk magnet permanen neodymium besi boron pada rotor serta perubahan pada sambungan terminal dan resistansi belitan.

G. Keterbatasan Penelitian

Beberapa keterbatasan perlu dinyatakan agar hasil ditafsirkan secara proporsional. Pertama, nilai awal *Insulation Resistance* berada di atas batas ukur instrumen sehingga hanya dapat diperlakukan sebagai batas bawah. Kedua, pengujian dilaksanakan pada satu spesimen dengan faktor tekan tunggal, sehingga hasilnya belum merepresentasikan kondisi operasional nyata yang melibatkan siklus suhu dinamis, tegangan kerja, dan getaran mekanis secara bersamaan. Ketiga, keterkaitan antara *Insulation Resistance* dan karakteristik keluaran generator belum diuji melalui analisis korelasi maupun regresi formal. Keempat, mekanisme degradasi disimpulkan berdasarkan pola data dan rujukan pustaka, tanpa disertai pengujian material seperti mikroskopi permukaan atau spektroskopi inframerah pada komponen rotor dan magnet permanen.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini mengukur dan mendokumentasikan tren penurunan *Insulation Resistance* pada belitan stator *permanent magnet synchronous generator* tanpa *housing* generator selama 144 jam pengujian *accelerated aging* pada $93\% \pm 3\%$ RH dan suhu $40^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. Nilai *Insulation Resistance* ketiga fasa menurun secara progresif dari kondisi awal yang melampaui batas ukur instrumen menjadi 40,4 – 42,0 MΩ pada jam ke – 144, setara penurunan sekurang – kurangnya 98,2% terhadap batas bawah nilai awal, melalui tiga fase: proteksi awal (0 – 48 jam), infiltrasi dan degradasi cepat (72 – 120 jam), serta fase kritis (120 – 144 jam). Berdasarkan kriteria penerimaan operasional yang lazim digunakan di lapangan, kondisi isolasi pada akhir pengujian dikategorikan perlu investigasi.

Karakteristik keluaran generator turut menurun selama periode yang sama, dengan analisis statistik domain waktu menunjukkan bahwa penurunan tersebut terutama berupa pelemahan magnitudo sinyal, bukan peningkatan fluktuasi atau derau. Perbandingan besaran juga menunjukkan bahwa penurunan daya keluaran tidak dapat dijelaskan oleh kebocoran arus melalui isolasi, sehingga kedua gejala diperlakukan sebagai kejadian yang berlangsung bersamaan akibat paparan lingkungan yang sama. Bagi penerapan di lapangan, hasil ini mendukung penggunaan pemanas antikondensasi pada generator yang beroperasi di lingkungan pesisir tropis serta pemantauan *Insulation Resistance* secara berkala. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan instrumen dengan rentang ukur lebih tinggi, menggabungkan tekanan kelembapan dengan siklus suhu dinamis dan getaran mekanis, melengkapi pengukuran dengan metode diagnostik lain seperti peluahan sebagian dan faktor disipasi, serta melakukan pengujian material dan analisis korelasi formal untuk membuktikan mekanisme degradasi yang diduga.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan, Universitas Hang Tuah Surabaya, atas dukungan fasilitas laboratorium selama penelitian berlangsung, serta kepada seluruh pihak yang telah memberikan arahan dan masukan selama proses penelitian dan penyusunan naskah.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Q. Liu, Y. Qin, and D. Xu, "Wind turbine generator failure analysis and fault diagnosis: A review," *IET Renewable Power Generation*, vol. 18, no. 15, pp. 3163–3183, 2024.
- [2] F. Anderson, A. McDonald, and D. McMillan, "On the sensitivity of wind turbine failure rate estimates to failure definitions," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2626, art. 012025, 2023.
- [3] J. Ma, Y. Yang, Q. Wang, Y. Deng, M. Yap, W. K. Chern, J. T. Oh, and Z. Chen, "Degradation and lifetime prediction of epoxy composite insulation materials under high relative humidity," *Polymers*, vol. 15, no. 12, art. 2666, 2023.
- [4] Y. Ji, P. Giangrande, W. Zhao, V. Madonna, X. Zhang, H. Zhang, and M. Galea, "Partial discharge investigation under humidity conditions via dissipation factor and insulation capacitance tip-up test," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 29, no. 4, pp. 1483–1490, 2022.
- [5] Y. Ji, P. Giangrande, W. Zhao, V. Madonna, H. Zhang, J. Li, and M. Galea, "Investigation on combined effect of

humidity–temperature on partial discharge through dielectric performance evaluation,” *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 17, no. 1, pp. 37–46, 2023.

- [6] Y. Ji, P. Giangrande, and W. Zhao, “Effect of environmental and operating conditions on partial discharge activity in electrical machine insulation: a comprehensive review,” *Energies*, vol. 17, no. 16, art. 3980, 2024.
- [7] IEEE Std 43-2013, *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*. New York: IEEE, 2013.
- [8] IEC 60068-2-78:2012, *Environmental Testing – Part 2-78: Tests – Test Cab: Damp Heat, Steady State*. Geneva: IEC, 2012.
- [9] IEC 60068-3-6:2018, *Environmental Testing – Part 3-6: Supporting Documentation and Guidance – Confirmation of the Performance of Temperature/Humidity Chambers*. Geneva: IEC, 2018.