

PENILAIAN ISOLASI WIND TURBINE GENERATOR DARI EFEK ACCELERATED AGING HUMIDITY BERDASARKAN POLARIZATION INDEX

Moch Aditya¹, Istiyo Winarno², Belly Yan Dewantara³

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan, Universitas Hang Tuah, Surabaya

Email: adityatya802@gmail.com

Abstract — The operational reliability of wind turbine generators relies heavily on the dielectric condition of their stator winding insulation, especially under high humidity and variable load environments. This study aims to evaluate the insulation degradation of Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) stator windings in wind turbines exposed to high humidity (accelerated humidity aging). The experiment was conducted in a controlled humidity chamber at 93% RH and 40°C for 144 hours, with measurement intervals every 24 hours. Dielectric condition assessment followed IEEE Std 43-2013 using Insulation Resistance (IR) and Polarization Index (PI) parameters, correlated with generator electrical output performance across speeds of 600, 900, and 1200 RPM. Results showed a drastic decrease in insulation resistance (IR_{10}) from an initial $>4000\text{ M}\Omega$ to $42.53\text{ M}\Omega$ at hour 144, representing a 98.94% degradation. The PI values ranging between 1.00 and 1.25 confirmed that the insulation experienced massive moisture saturation and polymer chain degradation, posing a very high risk of dielectric breakdown. This loss of dielectric integrity directly reduced generator power output by up to 33.8% at 1200 RPM. The combination of IR and PI parameters effectively enables early detection of insulation damage to support predictive maintenance strategies for wind turbines.

Keywords — Accelerated humidity aging; Insulation Resistance; IEEE Std 43-2013; Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG); Polarization Index; Wind turbine generator.

Abstrak — Keandalan operasional generator turbin angin sangat bergantung pada kondisi dielektrik isolasi belitan stator, khususnya pada lingkungan berkelembapan tinggi dan berbeban dinamis. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi degradasi sistem isolasi belitan stator *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) pada *wind turbine* generator akibat paparan kelembapan tinggi (*accelerated humidity aging*). Pengujian dilakukan di dalam humidity chamber terkondisi 93% RH dan suhu 40°C selama 144 jam dengan interval pengukuran setiap 24 jam. Evaluasi kondisi kelayakan dielektrik mengacu pada standar IEEE Std 43-2013 berbasis parameter *Insulation Resistance* (IR) dan *Polarization Index* (PI), serta dikorelasikan dengan kinerja keluaran listrik generator pada variasi kecepatan 600, 900, dan 1200 RPM. Hasil penelitian menunjukkan penurunan drastis nilai tahanan isolasi (IR_{10}) dari kondisi awal $>4000\text{ M}\Omega$ menjadi $42,53\text{ M}\Omega$ pada jam ke-144, yang merepresentasikan degradasi sebesar 98,94%. Pergerakan nilai PI yang berada pada kisaran 1,00 hingga 1,25 mengonfirmasi bahwa isolasi telah mengalami saturasi uap air masif dan degradasi rantai polimer, yang berisiko tinggi menyebabkan kegagalan tembus listrik. Penurunan integritas dielektrik ini berdampak langsung pada penurunan daya keluaran generator hingga 33,8% pada kecepatan 1200 RPM. Kombinasi parameter IR dan PI terbukti efektif mendeteksi dini kerusakan isolasi guna mendukung strategi pemeliharaan prediktif turbin angin.

Kata Kunci— Accelerated humidity aging; Insulation Resistance; IEEE Std 43-2013; Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG); Polarization Index; Wind turbine generator.

I PENDAHULUAN

Transformasi sistem energi global menuju sumber energi rendah emisi karbon mendorong peningkatan pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA Angin) sebagai salah satu pilar utama energi terbarukan. Hingga tahun 2025, kapasitas terpasang turbin angin secara global diproyeksikan melampaui 1.200 GW sebagaimana dilaporkan oleh *Global Wind Energy Council* (GWEC) [1]. Pertumbuhan pesat ini menuntut tingkat keandalan sistem yang sangat tinggi, khususnya pada komponen vital seperti generator listrik. Kegagalan pada sistem isolasi generator dapat menyebabkan penghentian operasi tak terencana (*unplanned outage*) serta peningkatan biaya perawatan dan perbaikan secara signifikan. Sistem isolasi belitan stator pada generator turbin angin, khususnya yang berbasis resin epoksi dan mika (*epoxy-mica insulation*), secara bertahap mengalami degradasi mutu akibat paparan stres operasional terintegrasi. Lingkungan tropis, pesisir, dan lepas pantai (*offshore*) menghadirkan tantangan ekstrem berupa

kelembapan relatif tinggi (>80%), fluktuasi temperatur, serta kontaminasi uap garam. Kelembapan berperan langsung sebagai katalis percepatan penuaan dielektrik melalui fenomena penyerapan uap air, hidrolisis rantai polimer, dan terbentuknya jembatan konduktif pada permukaan isolasi [2]. Proses degradasi mikrostruktural ini sering kali tidak terdeteksi secara visual, namun tercermin langsung melalui penurunan resistivitas bahan dan peningkatan arus bocor (*leakage current*). Menurut penelitian Ji *et al.* [2], kombinasi temperatur dan kelembapan tinggi memicu pembentukan lapisan film air (*water film*) pada antarmuka isolasi yang meningkatkan konduktivitas listrik permukaan serta memicu polarisasi antarmuka (*interfacial polarization*). Efek ini berlanjut pada penurunan *Partial Discharge Inception Voltage* (PDIV) dan mempercepat terjadinya tembus dielektrik. Untuk memantau dan mengidentifikasi tingkat kesehatan isolasi mesin listrik berputar, standar IEEE Std 43-2013 merekomendasikan pengujian *Insulation Resistance* (IR) dan kalkulasi *Polarization Index* (PI) [4]. Nilai PI didefinisikan sebagai rasio tahanan isolasi menit ke-10 (IR₁₀) terhadap menit ke-1 (IR₁) selama pemberian tegangan uji DC konstan. Nilai PI mencerminkan dinamika arus absorpsi dielektrik dan pergerakan muatan terpolarisasi dalam bahan isolasi. Pada kondisi isolasi kering dan sehat, nilai PI berada pada level tinggi (>2,0) karena arus absorpsi meluruh secara perlahan sehingga nilai IR₁₀ jauh lebih besar dibanding IR₁. Sebaliknya, pada isolasi yang terkontaminasi uap air atau mengalami degradasi fisik, arus konduksi dominan sejak awal pengujian sehingga nilai IR₁₀ mendekati IR₁, menghasilkan nilai PI mendekati 1,0 [5]. Meskipun dampak kelembapan terhadap nilai IR telah banyak diteliti pada komponen statis seperti transformator dan *bushing* [6], studi eksperimental terkontrol yang mengevaluasi degradasi kuantitatif nilai PI dan dampaknya terhadap performa keluaran elektrik pada generator turbin angin tipe *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif pengaruh penuaan dipercepat berbasis kelembapan (*accelerated humidity aging*) pada kelembapan 93% RH dan suhu 40°C terhadap nilai PI belitan stator PMSG, serta menghubungkannya dengan penurunan daya keluaran generator pada berbagai variasi kecepatan putar (600, 900, dan 1200 RPM).

II METODE PENELITIAN

A. Pendekatan dan Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium terkontrol untuk menganalisis efek paparan kelembapan relatif tinggi (*humidity accelerated aging*) terhadap degradasi sistem isolasi belitan stator *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG). Proses pengondisian lingkungan dilakukan di dalam *humidity chamber* pada temperatur konstan 40 °C ± 2 °C dan kelembapan relatif 93% ± 2% RH mengacu pada standar IEC 60068-2-78. Pengujian dilakukan selama 144 jam (6 hari) dengan interval pengukuran resistansi isolasi setiap 24 jam. Parameter utama yang dianalisis adalah nilai *Polarization Index* (PI) dan *Insulation Resistance* (IR) berdasarkan kriteria IEEE Std 43-2013

B. Objek dan Spesifikasi Peralatan Penelitian

Dari Objek penelitian yang digunakan adalah belitan stator generator PMSG 3-fasa dengan spesifikasi daya nominal 400 W dan tegangan nominal 12 V DC. Pengukuran resistansi isolasi difokuskan pada tiga terminal fasa terhadap rangka/bodi generator (*ground*), yaitu jalur U-G (1-G), V-G (2-G), dan W-G (3-G)

Rangkaian instrumen eksperimen terdiri dari beberapa komponen utama :

- *Humidity Chamber*: Ruang uji berisolasi termal yang dikontrol secara terotomatisasi menggunakan mikrokontroler ESP32-S3 dengan algoritma kontrol PID ganda.
- Sistem Pemanas dan Humidifier: Menggunakan dua unit pemanas keramik (*heating element*) dan dua unit *ultrasonic humidifier* untuk mempertahankan kondisi kelembapan dan suhu konstan tanpa membentuk kondensasi langsung pada spesimen.
- Sensor Lingkungan: Sensor SHT31 digunakan untuk memantau RH dan temperatur udara, serta termokopel Tipe K yang terintegrasi dengan modul MAX6675 pada beberapa titik ruang pengujian.
- *Insulation Tester / Megger*: Alat uji resistansi isolasi dengan injeksi tegangan uji sebesar 500 V DC.

C. Prosedur Penelitian

- *Preconditioning*: Stator generator dikondisikan pada lingkungan kering dengan kelembapan relatif RH < 30% selama 24 jam untuk menghilangkan pengaruh kelembapan sisa

- Pengukuran *Baseline*: Sebelum dimasukkan ke dalam *chamber*, dilakukan pengukuran resistansi isolasi awal (IR_1 dan IR_{10}) menggunakan tegangan uji 500 V DC pada ketiga fasa untuk menghitung nilai PI_0 .
- Prosedur *Humidity Accelerated Aging*: Generator dimasukkan ke dalam *humidity chamber* yang telah distabilkan pada kondisi 93% RH dan 40 °C. Pengondisian ini dipertahankan secara terus-menerus hingga 144 jam
- Pengukuran Berkala dan *Discharging*: Setiap interval 24 jam, proses pengondisian dihentikan sementara untuk dilakukan pengukuran IR_1 dan IR_{10} . Setelah setiap kali pengujian megger berdurasi 10 menit selesai, dilakukan pelepasan muatan residual (*discharging*) minimal selama 40 menit demi alasan keselamatan dan akurasi pengukuran berikutnya
- Pengujian Karakteristik Output Generator: Setelah pengukuran isolasi dilakukan, generator diputar menggunakan prime mover pada tiga variasi kecepatan (600 RPM, 900 RPM, dan 1200 RPM). Parameter sinyal keluaran berupa tegangan (V), arus (I), dan daya (P) direkam secara real-time menggunakan sensor PZEM-017

D. Perhitungan Analisa PI

Nilai Indeks Polarisasi pada interval waktu t dihitung menggunakan persamaan rasio nilai resistansi isolasi menit ke-10 (IR_{10}) terhadap menit ke-1 (IR_1):

$$PI(t) = IR_{10}(t) / IR_1(t) \quad (1)$$

Untuk mengevaluasi tingkat keterulangan (*repeatability*) dan konsistensi data pengukuran berulang pada setiap fasa, digunakan parameter statistik rata-rata ($\bar{X}$), deviasi standar (s), dan koefisien variasi (CV)

$$\bar{PI} = (\sum PI_i) / n \quad (2)$$

$$s = \sqrt{[\sum (PI_i - \bar{PI})^2 / (n - 1)]} \quad (3)$$

$$CV = (s / \bar{PI}) \times 100\% \quad (4)$$

Untuk melihat Bentuk gelombang sinyal listrik (V, I, P) diekstraksi ke dalam domain waktu menggunakan parameter statistik meliputi *Root Mean Square* (RMS), Mean, Peak, Peak-to-Peak, dan Standard Deviation. Perhitungan RMS dilakukan untuk memperoleh nilai efektif sinyal keluaran

$$XRMS = \sqrt{(1 / N) \times \sum (X_k^2)} \quad (5)$$

E. Tabel Matrik Evaluasi Keandalan

Penilaian tingkat keandalan dan kategori kelayakan isolasi diklasifikasikan berdasarkan standar IEEE Std 43-2013 yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1
Matrik

Nilai PI	Kondisi Isolasi
> 4.0	Sangat Baik
2.0 - 4.0	Baik
1.0 - 2.0	Perlu Investigasi
< 1.0	Buruk
≈ 1.0 atau menurun cepat	Kritis

Tabel
Evaluasi

Keandalan

III HASIL DAN PEMBAHASAN

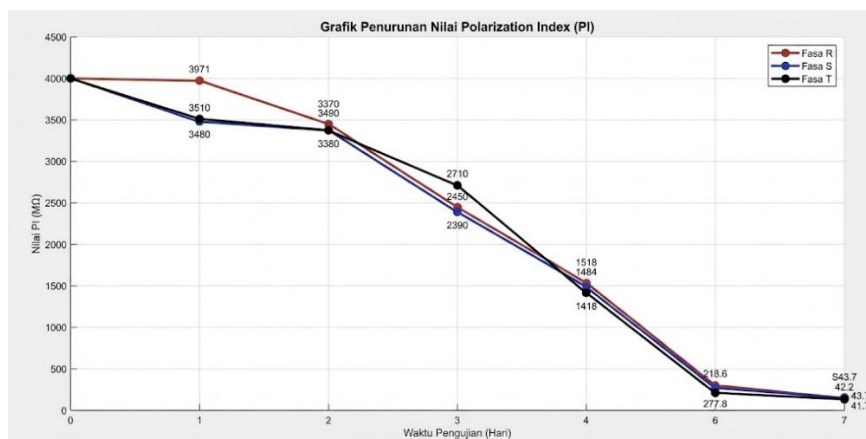
Pada bagian bab ini menyajikan analisis dampak penuaan kelembapan dipercepat (*accelerated humidity aging*) pada 93% RH dan 40 °C (durasi 0–6 hari) terhadap karakteristik isolasi belitan stator PMSG prototipe turbin angin. Pada setiap *checkpoint*, dilakukan pengukuran Indeks Polarisasi (PI) dari resistansi isolasi serta uji kinerja generator pada kecepatan 600, 900, dan 1200 RPM. Korelasi antara degradasi PI dan parameter keluaran generator (tegangan, arus, dan daya) dianalisis untuk mengevaluasi keandalan operasional sistem.

A. Hasil Pengukuran Tahanan Isolasi dan Polarization Index

Pengukuran tahanan isolasi menit ke-1 (IR_1) dan menit ke-10 (IR_{10}) serta nilai kalkulasi PI pada 3 titik belitan fasa (1-G, 2-G, 3-G) selama 144 jam pengusangan dipercepat (93% RH, 40°C) ditabulasi secara lengkap pada Tabel 2:

Hari	Aging (Jam)	Fasa 1-G (U-G)			Fasa 2-G (V-G)			Fasa 3-G (W-G)			RH (%)	Suhu (°C)
		IR_1 (M Ω)	IR_{10} (M Ω)	PI 1-G	IR_1 (M Ω)	IR_{10} (M Ω)	PI 2-G	IR_1 (M Ω)	IR_{10} (M Ω)	PI 3-G		
1	0	> 4000	> 4000	1,00	> 4000	> 4000	1,00	> 4000	> 4000	1,00	93%	40
2	24	3460,0	3970,0	1,15	3360,0	3480,0	1,04	3500,0	3510,0	1,00	93%	40
3	48	3200,0	3450,0	1,08	3130,0	3380,0	1,08	3330,0	3370,0	1,01	93%	40
4	72	2300,0	2450,0	1,07	2280,0	2490,0	1,09	2360,0	2710,0	1,15	93%	40
5	96	1472,0	1536,0	1,04	1254,0	1494,0	1,19	1229,0	1419,0	1,15	93%	40
6	120	237,6	305,7	1,29	206,3	277,8	1,35	192,7	216,6	1,12	93%	40
7	144	41,3	42,2	1,02	42,0	43,7	1,04	40,4	41,7	1,03	93%	40

Tabel 2 Rekapitulasi Data IR 1 menit IR 10 menit



Gambar 1 Grafik Tren Penurunan Tahanan Isolasi (IR_{10}) vs Waktu Aging pada Fasa 1-G, 2-G, 3-G

Berdasarkan Tabel II dan Gambar 1, isolasi belitan stator pada kondisi awal (0 jam) berada dalam keadaan sangat baik dengan nilai tahanan isolasi melampaui batas ukur instrumen megger (>4000 M Ω). Penuaan kelembapan selama

24 hingga 96 jam menyebabkan difusi molekul air ke dalam pori-pori pernis mika-epoksi, sehingga nilai IR₁₀ fasa 1-G menurun secara bertahap dari 3970 MΩ menjadi 1536 MΩ. Degradasi signifikan terjadi pada jam ke-120 hingga ke-144, di mana nilai rata-rata IR₁₀ anjlok hingga 42,53 MΩ (fasa 1-G: 42,2 MΩ; 2-G: 43,7 MΩ; dan 3-G: 41,7 MΩ). Penurunan ini mencerminkan degradasi tahanan isolasi sebesar 98,94% dibandingkan dengan kondisi baseline.

Berdasarkan data kuantitatif pada Tabel II serta tren visualisasi yang disajikan dalam Gambar 1, kondisi awal isolasi belitan stator (0 jam) menunjukkan tingkat kelayakan dielektrik yang sangat optimal, di mana nilai tahanan isolasi awal melampaui batas ukur maksimum instrumen megger (>4000 MΩ). Namun, seiring diterapkannya pengkondisian lingkungan dengan kelembapan tinggi secara terus-menerus, terjadi fenomena penuaan dipercepat (*accelerated aging*). Pada interval pemaparan 24 hingga 96 jam, molekul air mulai mengalami difusi parsial dan menembus pori-pori mikroskopis pada lapisan pernis mika-epoksi. Penetrasi kelembapan ini memicu penurunan nilai tahanan isolasi sepuluh detik pertama (IR₁₀) secara bertahap pada fasa 1-G, yaitu dari 3970 MΩ pada jam ke-24 menjadi 1536 MΩ pada jam ke-96.

Degradasi karakteristik dielektrik mengalami akselerasi yang jauh lebih drastis pada rentang waktu pengujian jam ke-120 hingga jam ke-144 (hari ke-7). Pada titik waktu jam ke-144, nilai tahanan isolasi IR₁₀ mengalami penurunan yang sangat ekstrem hingga mencapai nilai rata-rata sebesar 42,53 MΩ, dengan rincian pengukuran individual pada tiap fasa sebesar 42,2 MΩ pada fasa 1-G, 43,7 MΩ pada fasa 2-G, dan 41,7 MΩ pada fasa 3-G. Secara keseluruhan, akumulasi penurunan nilai tahanan isolasi ini mencerminkan tingkat degradasi performa dielektrik belitan stator yang sangat signifikan, yakni mencapai 98,94% apabila dibandingkan dengan nilai kondisi dasar (baseline) pada keadaan awal.

B. Anlisa Statistik *Polarization Index*

Hasil perhitungan statistik deskriptif pengulangan pengukuran PI serta evaluasi keandalan isolasi mengacu pada standar IEEE Std 43-2013 dirangkum pada Tabel III dan Tabel IV.

Tabel 3 Analisis Statistik Deskriptif Nilai *Polarization Index* (PI)

Hari	Aging (Jam)	Rata-rata PI	Deviasi Standar (s)	Koefisien Variasi (CV)
1	0	1,00	0,000	0,00%
2	24	1,06	0,078	7,30%
3	48	1,06	0,040	3,82%
4	72	1,10	0,042	3,77%
5	96	1,13	0,078	6,89%
6	120	1,25	0,019	9,52%
7	144	1,03	0,010	0,95%

Berdasarkan Tabel III, nilai Koefisien Variasi (CV) dari hasil pengukuran berulang secara konsisten berada di bawah 10% dengan rentang antara 0,00% hingga 9,52%. Hal ini mengonfirmasi bahwa metode eksperimen yang diterapkan memiliki tingkat presisi dan keterulangan (*repeatability*) yang sangat tinggi. Pada jam ke-144, nilai CV mencapai tingkat terendah yaitu sebesar 0,95% dengan standar deviasi 0,010. Secara fisis, kondisi ini mengindikasikan bahwa seluruh bagian belitan stator telah mengalami degradasi global secara homogen dan mencapai titik kejenuhan penuaan yang seragam.

Tabel 4 Evaluasi Keandalan Isolasi Berdasarkan Ieee Std 43-2013

Hari	Jam	Nilai PI	Status Keandalan & Keterangan Fisik
1	0	1,00	Sangat Baik (Over limit IR >4000 Mfi, isolasi baru)

2	24	1,06	Sangat Baik (PI rendah diabaikan karena IR >3000 Mfi)
3	48	1,06	Sangat Baik (PI rendah diabaikan karena IR >3000 Mfi)
4	72	1,10	Buruk (Mulai terjadi degradasi penetrasi uap air)
5	96	1,13	Buruk / Membahayakan (Degradasi polimer signifikan)
6	120	1,25	Buruk / Membahayakan (Keretakan mikro polimer)
7	144	1,03	Kritis / Gagal Isolasi (IR anjlok di bawah standar)

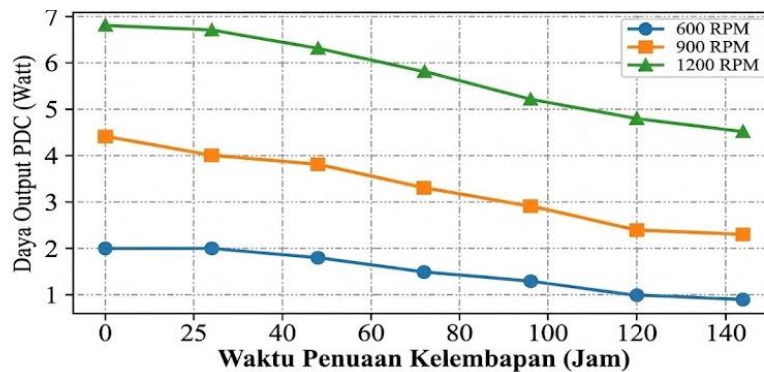
Berdasarkan evaluasi keandalan pada Tabel IV, status isolasi pada jam ke-24 dan ke-48 tetap dikategorikan "Sangat Baik" berdasarkan klausul pengecualian IEEE Std 43-2013 karena nilai mutlak IR masih sangat tinggi (>3000 MΩ), meskipun nilai PI bernilai 1,06. Sebaliknya, penurunan bersamaan pada nilai IR dan bertahannya nilai PI di bawah 1,15 dari jam ke-72 hingga ke-144 mengindikasikan bahwa isolasi telah memasuki fase "Buruk/Kritis" hingga mengalami kegagalan dielektrik permanen pada hari ke-7.

C. Evaluasi Performa Eletrikal *Wind Turbine*

Guna menguji dampak kerusakan isolasi belitan stator terhadap performa fungsional generator, dilakukan pengujian keluaran daya PMSG pada variasi kecepatan putar 600 RPM, 900 RPM, dan 1200 RPM selama 7 titik pengamatan (*checkpoints*) harian. Data hasil pengujian tersebut ditabulasi pada Tabel V.

No	Kecepatan (RPM)	Kondisi Aging	Rata-rata PI	Parameter Output Kelistrikan		
				Tegangan V_{DC} (V)	Arus I_{DC} (A)	Daya P_{DC} (W)
1	600	Baseline (0 Jam)	> 1,00	7,59	0,27	2,00
2	900	Baseline (0 Jam)	> 1,00	12,60	0,35	4,40
3	1200	Baseline (0 Jam)	> 1,00	17,40	0,39	6,80
4	600	1 Hari (24 Jam)	1,06	7,54	0,27	2,00
5	900	1 Hari (24 Jam)	1,06	11,90	0,34	4,00
6	1200	1 Hari (24 Jam)	1,06	17,30	0,39	6,70
7	600	2 Hari (48 Jam)	1,06	7,13	0,26	1,80
8	900	2 Hari (48 Jam)	1,06	11,60	0,33	3,80
9	1200	2 Hari (48 Jam)	1,06	16,60	0,38	6,30
10	600	3 Hari (72 Jam)	1,10	6,58	0,24	1,50
11	900	3 Hari (72 Jam)	1,10	10,60	0,31	3,30
12	1200	3 Hari (72 Jam)	1,10	15,60	0,37	5,80
13	600	4 Hari (96 Jam)	1,13	5,70	0,23	1,30
14	900	4 Hari (96 Jam)	1,13	9,80	0,30	2,90
15	1200	4 Hari (96 Jam)	1,13	14,60	0,36	5,20
16	600	5 Hari (120 Jam)	1,25	4,80	0,21	1,00
17	900	5 Hari (120 Jam)	1,25	8,60	0,28	2,40
18	1200	5 Hari (120 Jam)	1,25	13,50	0,35	4,78
19	600	6 Hari (144 Jam)	1,03	4,37	0,21	0,90
20	900	6 Hari (144 Jam)	1,03	8,53	0,28	2,30
21	1200	6 Hari (144 Jam)	1,03	13,10	0,35	4,50

Tabel 5 Evaluasi Performa Kelistrikan PMSG Pada Variasi Kecepatan dan penuaan



Gambar 2 Grafik Penurunan Daya Vs Waktu Aging Dan Kecepatan

Berdasarkan Tabel 5 dan Gambar 3, peningkatan kecepatan rotor (600–1200 RPM) meningkatkan GGL induksi secara linear. Meskipun daya *baseline* mencapai 2,0 W (600 RPM), 4,4 W (900 RPM), dan 6,8 W (1200 RPM), paparan kelembapan selama 144 jam secara konsisten mendegradasi daya keluaran generator pada seluruh tingkat kecepatan. Akumulasi penurunan daya terbesar terjadi pada kecepatan terendah, yaitu sebesar 55,0% pada 600 RPM (2,00 W ke 0,90 W), diikuti 47,7% pada 900 RPM (4,40 W ke 2,30 W), dan 33,8% pada 1200 RPM (6,80 W ke 4,50 W).

D. Analisa Parameter Domain Waktu Sinyal Listrik

Hasil ekstraksi parameter statistik domain waktu (RMS, *mean*, *peak*, *peak-to-peak*, dan deviasi standar) untuk sinyal tegangan, arus, serta daya pada kecepatan 600 RPM disajikan pada Tabel VI, VII, dan VIII.

Tabel 6 Extraksi Parameter Domain Waktu Sinyal Tegangan (600 Rpm)

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

Data statistik domain waktu pada Tabel VI menunjukkan bahwa nilai efektif tegangan V_{RMS} menyusut dari 7,5802 V menjadi 4,3705 V, dan Nilai deviasi standar yang sangat kecil (Std Dev < 0,05) membuktikan bahwa pelemahan sinyal keluaran bersifat stabil dan sistematis sepanjang running test 1000 detik.

E. Keandalan dan Evaluasi Akhir Kegagalan Isolasi

Sebagai Pembahasan Terakhir, Evaluasi Presentase Penurunan tahanan Isolasi Menit ke IR_{10} terhadap tingkat keandalan isolasi

Tabel 7 Evaluasi Keandalan Operasional Isolasi (Ieee Std 43-2013)

Hari	Jam	Rata-rata IR_{10} (MΩ)	Penurunan IR_{10} (%)	Rata-rata PI	Status Degradasi
1	0	4000,00	0,00%	1,00	Baseline Normal (Kondisi Baru)

2	24	3653,33	8,67%	1,06	Penurunan Ringan (Layak Operasi)
3	48	3400,00	15,00%	1,06	Penurunan Ringan (Waspada)
4	72	2550,00	36,25%	1,10	Penurunan Menengah (Buruk)
5	96	1483,00	62,93%	1,13	Degradasi Signifikan (Membahayakan)
6	120	266,70	93,33%	1,25	Sangat Buruk (Keretakan Mikro)
7	144	42,53	98,94%	1,03	Gagal Isolasi (Operasi Harus Dihentikan)

Tabel VII mengonfirmasi bahwa penuaan kelembapan dipercepat selama 144 jam menyebabkan penurunan nilai tahanan isolasi IR10 secara eksponensial hingga hanya tersisa 1,06% dari nilai awal (degradasi 98,94%). Kombinasi nilai IR10 < 50 MΩ dan rasio PI ≈ 1,03 mengindikasikan bahwa isolasi belitan stator PMSG telah mengalami pembentukan jalur konduksi air kontinu (*continuous water path*). Untuk penelitian selanjutnya, penambahan variabel siklus termal dan getaran mekanis diperlukan agar dapat merepresentasikan kondisi operasional nyata pada *offshore wind turbine*.

IV KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental dan analisis komprehensif, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Paparan kelembapan tinggi dipercepat (93% RH, 40 °C) selama 144 jam memicu difusi molekul air ke dalam rongga mikro isolasi belitan stator PMSG. Hal ini ditunjukkan oleh penurunan drastis tahanan isolasi IR₁₀ sebesar 98,94%, dari nilai awal >4000 MΩ menjadi 42,53 MΩ pada jam ke-144.
2. Metode *Polarization Index* (PI) terbukti efektif sebagai indikator diagnostik keandalan isolasi, namun penggunaannya wajib dikombinasikan dengan nilai mutlak *Insulation Resistance* (IR). Nilai PI yang menyusut ke angka 1,03 pada jam ke-144 mengonfirmasi kondisi jenuh air dan hilangnya arus absorpsi dielektrik.
3. Degradasi mutu isolasi berdampak langsung pada penurunan daya keluaran PMSG pada seluruh variasi kecepatan putar, yaitu sebesar 55,0% pada 600 RPM (2,0 W ke 0,9 W), 47,7% pada 900 RPM (4,4 W ke 2,3 W), dan 33,8% pada 1200 RPM (6,8 W ke 4,5 W).
4. Nilai Koefisien Variasi (CV) pengukuran berulang yang berada di bawah 10% (0,00%–9,52%) membuktikan bahwa metodologi uji penuaan dipercepat ini memiliki presisi dan keandalan eksperimen yang tinggi.

B. Saran

Untuk pengembangan riset selanjutnya, disarankan:

1. Mengembangkan pengujian penuaan multi-faktor terintegrasi (*multi-factor aging*) yang menggabungkan kelembapan tinggi, stres pembebanan elektrik kontinu, siklus termal, dan getaran mekanis guna memodelkan kondisi operasional nyata pada *offshore wind turbine*.
2. Menerapkan teknik diagnostik tingkat lanjut seperti *Frequency Domain Spectroscopy* (FDS) dan pengukuran *Partial Discharge* (PD) untuk mendeteksi pembentukan jalur konduksi kelembapan secara lebih awal.

V DAFTAR PUSTAKA

- [1] Global Wind Energy Council (GWEC), "Global Wind Report 2025: Scaling Up for Net Zero," Brussels: GWEC Publications, 2025.
- [2] 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. 1325–1334, 2022.
- [3] A. R. Mor, G. E. van Veldhuizen, C. Mier, and A. Lathouwers, "The Effect of Humidity on the AC Breakdown Strength of C4-FN/CO₂ and Corona Behavior," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 57, no. 8, p. 085201, 2024.

- [4] IEEE, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery," *IEEE Std 43-2013 (Revision of IEEE Std 43-2000)*, New York: IEEE, 2013.
- [5] A. Verginadis et al., "Insulation Condition Assessment of Synchronous Generators Operating under Adverse Environmental Conditions," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 45120–45132, 2022.
- [6] Y. Zhang, J. Liu, Z. Wang, Q. Li, and W. Chen, "Study on Lifespan Prediction of Oil-Paper Bushing Considering Moisture Accelerated Aging," in *Proc. IEEE ICDL*, 2023, pp. 1–4.
- [7] H. Aghizade Ansari and A. Vahedi, "Insulation Condition Prediction of Oil-Impregnated Paper (OIP) Bushings Using a Novel Hybrid Geometric Approach," in *Proc. IEEE ICHVE*, 2023, pp. 1–6.
- [8] IEC, "Environmental testing - Part 2-78: Tests - Test Cab: Damp heat, steady state," *IEC 60068-2-78:2025*, Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025.
- [9] IEC, "Environmental testing - Part 3-6: Supporting documentation and guidance - Confirmation of the performance of temperature/humidity chambers," *IEC 60068-3-6:2018*, Geneva: IEC, 2018.
- [10] ISO/IEC, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)," *ISO/IEC Guide 98-3:2008*, Geneva: ISO, 2008.
- [11] Rao et al., "Degradation Mechanisms of Epoxy-Mica Insulation in High Voltage Rotating Machines," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 1, pp. 112–120, 2010.
- [12] Sudirman et al., "Quantitative Condition Assessment of Generator Stator Insulation Using Polarization Index and Insulation Resistance under High Humidity," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 19, no. 2, pp. 845–854, 2024.