

EVALUASI PERFORMA PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR TURBIN ANGIN BERDASARKAN PARAMETER RESISTANSI ISOLASI PENGARUH *STRESS THERMAL*

Moch Radhi Syaputra¹, Belly Yan Dewantara², Istiyo Winarno³

^{1,2,3} Teknik Elektro, Universitas Hang Tuah, Surabaya

¹radhisyaputra23@gmail.com, ²bellyyandewantara@hangtuah.ac.id, ³istiyo.winarno@hangtuah.ac.id

This study evaluates the degradation of the insulation system in a Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) for wind turbines due to exposure to extreme heat. The primary focus of the study is to analyze the effect of thermal stress on the decline in insulation resistance (IR) as a key parameter for generator reliability. The method used is a laboratory experimental approach involving the application of constant thermal stress at a temperature of 160°C until the IR value drops below 100 MΩ for thermal class F, in accordance with the IEC 60085 and IEEE 43-2000 standards. The research subject consists of PMSG stator windings tested in a thermal chamber until the insulation fails. IR measurements were taken every hour using a Megger Insulation Tester. Data analysis was performed by rotating the wind turbine at a predetermined RPM to generate characteristic power output values. A drop in the IR value below 1 MΩ or degradation of more than 60% within less than 24 hours was identified as the critical point of insulation failure. The research results provide a scientific contribution to understanding the mechanism of heat-induced aging of insulation materials, while also serving as the basis for the development of inspection standards and preventive maintenance strategies to improve the operational reliability of wind turbines and reduce the risk of downtime.

Key words: PMSG, wind turbine, insulation resistance, thermal stress, degradation

Penelitian ini mengevaluasi degradasi sistem isolasi pada *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) turbin angin akibat paparan panas ekstrem. Fokus utama penelitian adalah menganalisis pengaruh *stress thermal* terhadap penurunan kualitas *insulation resistance* (IR) sebagai parameter kunci keandalan generator. Metode yang digunakan adalah pendekatan eksperimental laboratorium dengan memberikan *stress thermal* konstan pada suhu 160°C hingga nilai IR < 100 MΩ pada *thermal class F* sesuai standar IEC 60085 dan IEEE 43-2000. Objek penelitian berupa lilitan stator PMSG yang diuji di dalam thermal chamber hingga isolasi rusak. Pengukuran IR dilakukan setiap 1 jam menggunakan *Megger Insulation Tester*. Analisis data dilakukan dengan memutar turbin angin dengan RPM yang sudah ditentukan untuk menghasilkan nilai karakteristik output daya. Penurunan nilai IR di bawah 1 MΩ atau degradasi lebih dari 60% dalam waktu kurang dari 24 jam diidentifikasi sebagai titik kritis kegagalan isolasi. Hasil penelitian memberikan kontribusi ilmiah dalam memahami mekanisme penuaan material isolasi akibat panas, sekaligus menjadi dasar penyusunan standar inspeksi dan strategi pemeliharaan preventif guna meningkatkan keandalan operasional turbin angin serta mengurangi risiko *downtime*.

Kata kunci: PMSG, turbin angin, insulation resistance, stress thermal, degradasi

I. PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga angin (turbin angin) merupakan salah satu teknologi energi terbarukan yang terus berkembang karena kemampuannya menyediakan listrik secara bersih dan berkelanjutan [1]. Pada sistem turbin angin, generator berperan sebagai komponen utama yang mengubah energi mekanik putaran turbin menjadi energi listrik. Keandalan dan performa generator sangat bergantung pada kondisi isolasi dan resistansi internalnya, karena kedua parameter tersebut menentukan kemampuan generator dalam menahan tegangan kerja, panas, serta pengaruh lingkungan [2]. Dalam pengoperasian jangka panjang, generator turbin angin mengalami berbagai kondisi ekstrem seperti fluktuasi suhu, kelembapan tinggi, getaran mekanis, beban berlebih, serta kontaminasi partikel. Kondisi-kondisi tersebut mempercepat proses degradasi pada material isolasi dan komponen internal, sehingga menurunkan resistansi isolasi dan resistansi belitan [3]. Degradasi ini menyebabkan penurunan performa generator, peningkatan rugi-rugi daya, bahkan potensi kegagalan sistem secara menyeluruh [4]. Salah satu pendekatan yang umum digunakan

untuk mempelajari degradasi komponen listrik adalah *accelerated aging*, yaitu metode percepatan penuaan dengan memberikan kondisi termal, mekanis, atau lingkungan yang lebih ekstrem dari operasi normal. Melalui *accelerated aging*, perubahan parameter kelistrikan seperti isolasi, resistansi, temperatur, serta sifat dielektrik dapat dievaluasi dalam waktu yang lebih singkat [5]. Evaluasi performa generator pada kondisi sebelum dan sesudah aging sangat penting untuk memahami pola kerusakan, memprediksi umur pakai, serta menentukan strategi pemeliharaan yang lebih terukur [6]. Sebagian besar literatur yang tersedia masih bersifat terpisah, berfokus pada komponen yang tidak bergerak seperti bushing atau transformator, menggunakan satu metode diagnostik saja, dan belum menggabungkan aspek material, lingkungan, serta protokol standar dalam satu kerangka evaluasi yang menyeluruh untuk turbin angin [7]. Unsur kebaruan pada penelitian ini adalah penggunaan sampel PMSG turbin angin yang nyata untuk proses degradasi, dengan variabel suhu thermal tunggal (tanpa variabel lingkungan lain) guna mengetahui laju degradasi akibat *stress thermal* secara spesifik pada isolasi generator turbin angin. Isolasi pada lilitan generator terdiri dari material polimer atau resin yang berfungsi menahan tegangan listrik, melindungi konduktor terhadap panas, menghindari kontaminasi partikel, serta mengurangi risiko sengatan listrik ke tubuh. Kinerja sistem isolasi dapat diamati melalui beberapa parameter, yaitu resistansi isolasi (IR) yang menggambarkan kemampuan isolasi menahan aliran arus bocor, indeks polarisasi (PI) yang merupakan rasio IR menit ke-10 terhadap menit ke-1 [8], serta partial discharge (PD) sebagai indikasi kegagalan mikro pada material isolasi. Degradasi thermal merupakan fenomena penurunan sifat isolasi akibat paparan panas berlebih dalam jangka panjang, yang menyebabkan perubahan kimia struktur resin, retakan mikro pada lapisan isolasi, penurunan ketahanan dielektrik, dan penurunan resistansi isolasi. Semakin tinggi suhu paparan, semakin cepat laju degradasi berlangsung, mengikuti hukum Arrhenius [7]. Bahan isolasi umumnya memiliki batas suhu operasi sesuai kelas termal, misalnya kelas F = 155°C, sehingga paparan yang melewati batas tersebut akan mempercepat proses kerusakan. Masalah penelitian ini adalah bagaimana pengaruh *stress thermal* terhadap penurunan kualitas *insulation resistance* pada *Permanent Magnet Synchronous Generator* turbin angin, dan bagaimana hubungan penurunan tersebut dengan karakteristik performa elektrik (tegangan, arus, dan daya) yang dihasilkan generator pada berbagai kecepatan putar. Penelitian ini memiliki beberapa batasan, yaitu: (1) metode *accelerated aging* mengacu pada standar internasional IEEE 1776-2018, IEC 60085 (2010), dan NEMA MW 1000 sebagai penentu kelas isolasi tanpa pembahasan mendalam mengenai reaksi kimia material; (2) efek *stress thermal* terhadap isolasi hanya difokuskan pada pengukuran batas aman resistansi isolasi menggunakan Megger tester sesuai standar IEEE 43-2000; (3) sampel yang digunakan adalah PMSG turbin angin dengan satu variabel suhu (160°C) tanpa variabel lingkungan lain seperti kelembapan; dan (4) penelitian berfokus pada proses penuaan, pengukuran, serta analisis penurunan karakteristik output generator, tanpa membahas rekayasa ulang desain isolasi. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh thermal *accelerated aging* pada isolasi belitan PMSG dengan menggunakan metode *insulation resistance* (IR) sebagai parameter utama [2], [8]. Tujuan utama penelitian adalah mengamati pola penurunan IR pada berbagai durasi paparan stress thermal, mengidentifikasi tingkat sensitivitas IR sebagai indikator dini kerusakan isolasi, serta memahami mekanisme degradasi akibat panas pada material isolasi selama proses penuaan, sehingga dapat digunakan sebagai dasar penyusunan standar inspeksi dan strategi pemeliharaan preventif pada turbin angin yang beroperasi di wilayah pesisir [6], [8].

II. METODE PENELITIAN

A. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium untuk mengevaluasi degradasi isolasi pada *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) melalui pengujian penuaan dipercepat (*thermal accelerated aging*) [6]. Objek penelitian adalah lilitan stator PMSG dengan isolasi *thermal class F*, yang dipaparkan pada media pemanas berupa oven/thermal chamber terkontrol pada suhu konstan 160°C mengacu pada standar IEC 60085 [9] dan IEEE Std 1776-2018 [10]. Pengukuran *insulation resistance* (IR) dilakukan menggunakan Megger *Insulation Tester* Sanwa tipe MG1000 dengan tegangan uji 500 VDC selama 60 detik (spot reading test), mengacu pada standar IEEE 43-2000 [8].



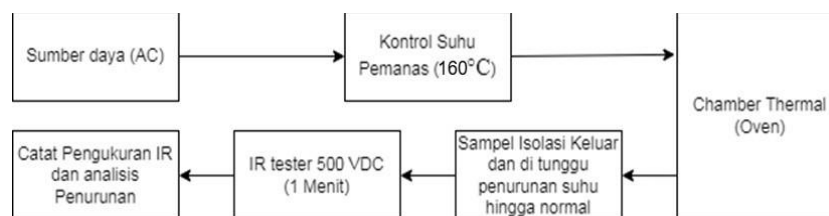
Gambar 1. Thermal chamber dan sampel belitan PMSG

Turbin angin yang digunakan sebagai sumber putaran serta thermal chamber yang digunakan untuk memberikan *stress thermal* memiliki spesifikasi seperti pada Tabel 1. Pengujian karakteristik output daya PMSG memanfaatkan motor AC 1 phase sebagai pemutar rotor, motor DC 24V sebagai beban, tachometer sebagai pengukur RPM, rectifier 3 fasa, sensor PZEM AC, modul RS-485 to USB, serta perangkat lunak Modbus Poll dan Python untuk akuisisi data.

Tabel 1. Spesifikasi turbin angin dan thermal chamber

Parameter	Nilai
Model turbin	FT-400S5
Jumlah blade	3
Start wind speed	2 m/s
Diameter roda	1,1 m
Rated power	400 W
Rated voltage	24 V
Rated wind speed	12 m/s
Protection grade	IP54
Chamber thermal	Oven 900 watt
Suhu pemanas maksimal	250°C

Sistem eksperimen dirancang untuk mensimulasikan kondisi panas ekstrem yang dialami generator turbin angin di lapangan. Diagram blok pada Gambar 2 menjelaskan alur input berupa *stress thermal* yang melampaui suhu operasi normal (mengikuti hukum Arrhenius), proses degradasi berupa perubahan struktur kimia polimer dan micro-cracks, hingga output berupa penurunan nilai IR, penurunan PDIV, dan peningkatan arus bocor.



Gambar 2. Diagram blok sistem pengujian

Prosedur pengumpulan data mengikuti alur: (1) pengukuran baseline pada kondisi sehat; (2) siklus aging di dalam thermal chamber dengan interval pengukuran IR setiap 1 jam; (3) pengukuran pasca-aging, dengan nilai IR di bawah 1 MΩ dianggap sebagai titik kritis kegagalan; serta (4) evaluasi akhir berupa perhitungan persentase penurunan ($\Delta IR\%$). Isolasi dinyatakan tidak andal apabila penurunan melebihi 60% dalam waktu kurang dari 168 jam. Persentase penurunan dihitung menggunakan persamaan berikut:

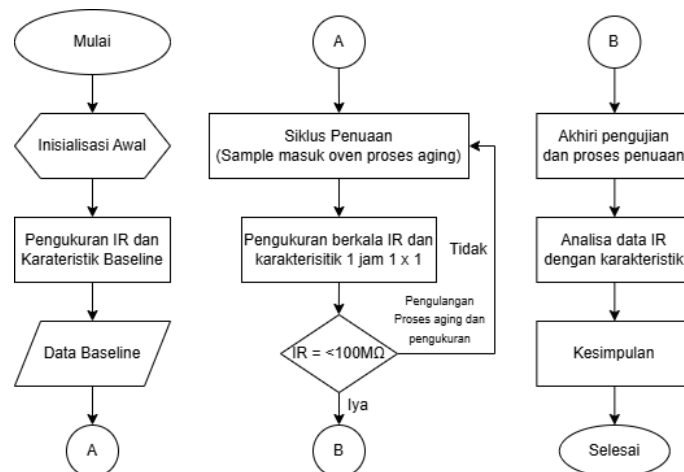
$$\Delta IR\% = ((IR_0 - IR_t) / IR_0) \times 100\%(1)$$

Sebagai acuan interpretasi hasil pengukuran, standar IEEE 43-2013 menetapkan batas nilai IR minimum sesuai jenis dan tahun pembuatan belitan, seperti dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Batas nilai IR minimum menurut standar IEEE 43-2013

IR minimum (M Ω)	Kondisi isolasi
IR1min = kV + 1	Belitan sebelum 1970 dan seluruh belitan medan
IR1min = 100	Belitan form-wound coils setelah 1970
IR1min = 5	Belitan random-wound dan form-wound < 1 kV

Setiap satu jam penurunan nilai IR, dilakukan pula pengambilan data karakteristik output daya generator PMSG pada variasi kecepatan putar 600, 800, 1000, dan 1200 RPM selama 10 detik dengan frekuensi sampling 100 Hz, untuk mengetahui hubungan antara degradasi isolasi dengan performa elektrik generator. Alur kerja penelitian secara keseluruhan, mulai dari pengukuran baseline, siklus aging, pengukuran pasca-aging, hingga evaluasi akhir, disusun berdasarkan standar internasional IEEE 43-2000 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Flowchart penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum sampel PMSG dimasukkan ke dalam thermal chamber untuk proses *accelerated aging*, dilakukan pengukuran baseline pada kondisi sehat. Kondisi pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kondisi pengujian

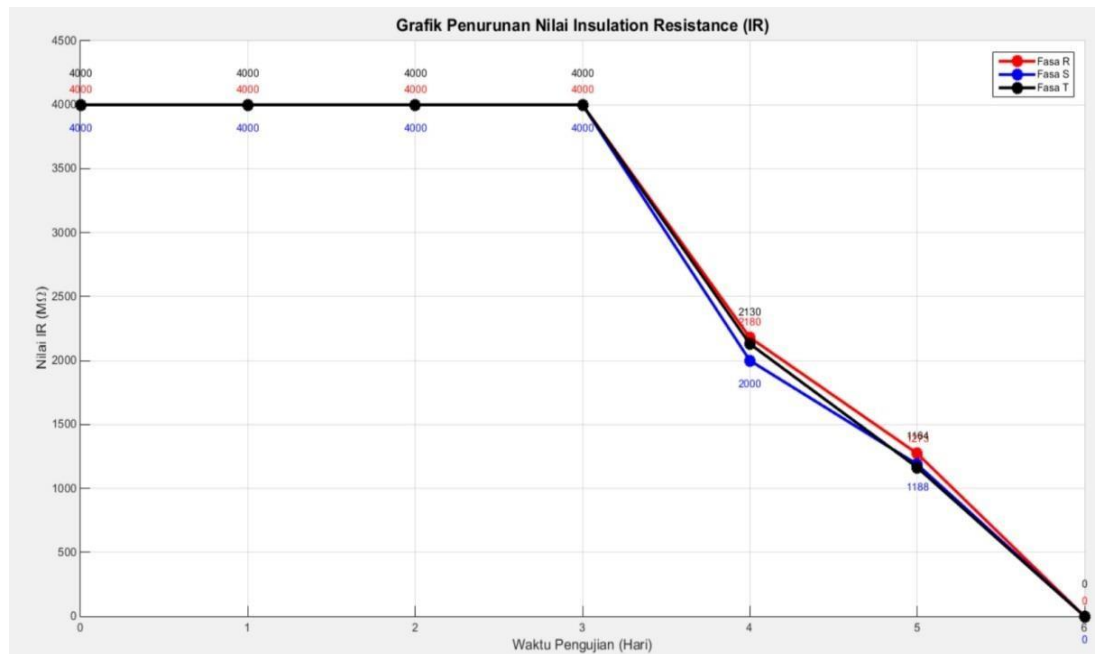
Parameter	Nilai
Temperature chamber	160°C
Lama pemanasan	0 – 6 jam
Interval pengukuran	1 jam
Standar IR	IEEE 43
Alat ukur	Megger tester 1 kV

Hasil pengukuran baseline menunjukkan nilai IR fasa-ke-tanah (phase to ground) pada seluruh terminal (L1-G, L2-G, L3-G) berada di atas 4000 M Ω , sehingga menurut standar IEEE 43-2013 kondisi isolasi belitan stator generator berada dalam status sangat baik (layak) [8]. Nilai ini digunakan sebagai nilai batas awal (IR₀) untuk menghitung laju kerusakan pada tahapan pengujian selanjutnya.

Tabel 4. Nilai *insulation resistance* (IR) dan persentase penurunan tiap belitan akibat *stress thermal* 160°C

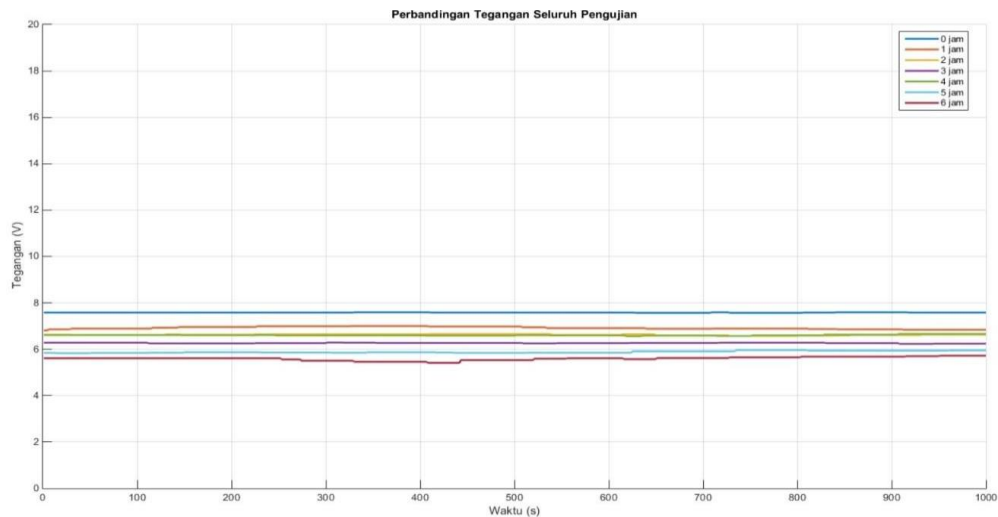
Durasi aging (jam)	Belitan 1		Belitan 2		Belitan 3	
	IR (MΩ)	Turun (%)	IR (MΩ)	Turun (%)	IR (MΩ)	Turun (%)
0	4000	0	4000	0	4000	0
1	4000	0	4000	0	4000	0
2	4000	0	4000	0	4000	0
3	4000	0	4000	0	4000	0
4	2180	45,5	2000	50	2130	46,75
5	1273	68,17	1188	70,3	1164	70,9
6	0	100	0	100	0	100

Sampel lilitan stator PMSG dipaparkan pada suhu konstan 160°C di dalam thermal chamber hingga nilai IR < 100 MΩ. Suhu ini dipilih karena berada jauh di atas batas kelas termal material isolasi (kelas F = 155°C) guna mempercepat proses penuaan. Pengukuran dilakukan berkala setiap 1 jam sekali, seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Berdasarkan Tabel 4, pada durasi aging 0–3 jam belum terjadi penurunan nilai IR pada ketiga belitan (masih terbaca > 4000 MΩ). Pada durasi aging 4 jam mulai terjadi penurunan menjadi 2180 MΩ (belitan 1), 2000 MΩ (belitan 2), dan 2130 MΩ (belitan 3), atau setara penurunan 45,5%–50%. Pada aging 5 jam nilai IR turun lebih lanjut ke kisaran 1164–1273 MΩ (penurunan 68,17%–70,9%), dan pada aging 6 jam nilai IR pada seluruh belitan turun menjadi 0 MΩ (penurunan 100%), yang menandakan titik kritis kegagalan isolasi telah tercapai.



Gambar 4. Grafik penurunan nilai *insulation resistance* (IR) pada line 1, line 2, dan line 3 selama pengujian stress thermal

Grafik pada Gambar 4 menunjukkan pola penurunan resistansi isolasi pada ketiga belitan relatif konsisten: nilai IR stabil pada rentang baseline hingga jam ke-3, kemudian menurun tajam pada jam ke-4 hingga ke-6 sampai mencapai titik kritis kegagalan. Metode pengujian Megger dengan injeksi tegangan 500 VDC terbukti efektif dan sensitif dalam mendeteksi gejala awal kerusakan isolasi sebelum terjadi kegagalan fatal. Setiap jam pengujian aging juga diikuti pengambilan data karakteristik sinyal tegangan, arus, dan daya keluaran generator pada variasi 600, 800, 1000, dan 1200 RPM selama 10 detik dengan frekuensi sampling 100 Hz. Sinyal tegangan pada kondisi baseline dan kondisi setelah aging (contoh pada RPM 600) ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Sinyal tegangan keluaran generator pada 600 RPM

Tabel 5. Tegangan, arus, dan daya keluaran generator PMSG pada berbagai RPM dan durasi stress thermal

No.	RPM	Kondisi	IR fasa R (M Ω)	Tegangan (VDC)	Arus (A)	Daya (W)
1	600	Baseline	>4000	7,41	0,26	1,9
2	800	Baseline	>4000	9,88	0,31	3,03
3	1000	Baseline	>4000	13,93	0,36	5
4	1200	Baseline	>4000	17,48	0,39	6,8
5	600	1 jam	>4000	6,9	0,25	1,7
6	800	1 jam	>4000	9,23	0,29	2,7
7	1000	1 jam	>4000	12,23	0,34	4,1
8	1200	1 jam	>4000	14,36	0,36	5,2
9	600	2 jam	>4000	6,64	0,25	1,6
10	800	2 jam	>4000	9,20	0,3	2,7
11	1000	2 jam	>4000	12,46	0,34	4,2
12	1200	2 jam	>4000	16	0,37	6
13	600	3 jam	>4000	6,21	0,24	1,43
14	800	3 jam	>4000	8,93	0,28	2,5
15	1000	3 jam	>4000	11,53	0,33	3,8
16	1200	3 jam	>4000	14,36	0,36	5,1
17	600	4 jam	2180	6,6	0,25	1,6

No.	RPM	Kondisi	IR fasa R (MΩ)	Tegangan (VDC)	Arus (A)	Daya (W)
18	800	4 jam	2180	9,26	0,3	2,7
19	1000	4 jam	2180	12,69	0,35	4,4
20	1200	4 jam	2180	18,25	0,39	7,24
21	600	5 jam	1273	5,88	0,23	1,3
22	800	5 jam	1273	9,13	0,28	2,58
23	1000	5 jam	1273	12,82	0,34	4,4
24	1200	5 jam	1273	16,12	0,37	5,96
25	600	6 jam	0	5,59	0,23	1,23
26	800	6 jam	0	8,5	0,28	2,34
27	1000	6 jam	0	11,83	0,33	3,92
28	1200	6 jam	0	11,17	0,32	3,57

Untuk memperkuat analisis, dilakukan pula ekstraksi parameter domain waktu dari sinyal tegangan pada kondisi baseline, 3 jam, dan 6 jam aging, meliputi mean, RMS, peak, dan peak-peak, seperti ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Ringkasan parameter domain waktu (mean, RMS, peak, dan peak-peak) sinyal tegangan pada kondisi baseline, 3 jam, dan 6 jam aging

No.	RPM	Kondisi	Mean (V)	RMS (V)	Peak (V)	Peak-peak (V)
1	600	Baseline	6,45	7,58	7,59	0,02
2	1200	Baseline	15,80	17,55	17,60	0,05
3	600	3 jam	5,40	6,25	6,28	0,03
4	1200	3 jam	12,90	14,42	14,48	0,06
5	600	6 jam	4,85	5,61	5,66	0,05
6	1200	6 jam	9,95	11,20	11,30	0,10

Tabel 6 memperlihatkan bahwa nilai RMS dan peak sinyal tegangan pada kedua RPM (600 dan 1200) mengalami penurunan konsisten seiring bertambahnya durasi aging, sedangkan nilai peak-peak relatif meningkat pada durasi 6 jam yang mengindikasikan meningkatnya fluktuasi/riak sinyal akibat menurunnya kualitas isolasi belitan. Data pada Tabel 5 menunjukkan hubungan antara penurunan nilai IR, dengan penurunan performa elektrik generator PMSG. Pada kondisi baseline, daya keluaran pada 1200 RPM mencapai 6,8 W, kemudian secara umum menurun seiring bertambahnya durasi aging hingga mencapai 3,57 W pada jam ke-6 di RPM 1200. Pola serupa terjadi pada RPM 600, 800, dan 1000, meskipun terdapat fluktuasi kecil pada beberapa titik akibat variasi pengukuran di lapangan. Arus bocor yang timbul akibat rusaknya isolasi menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya dan panas pada belitan. Analisis sinyal domain waktu (mean, RMS, minimum, peak, peak-to-peak, dan standar deviasi) membuktikan bahwa setiap jam penurunan nilai IR secara konsisten berhubungan dengan penurunan parameter tegangan, arus, dan daya generator PMSG pada seluruh variasi RPM yang diuji. Kegagalan isolasi ini menurunkan efisiensi turbin angin secara keseluruhan dan menjadi penyebab terjadinya *downtime* operasional [4], [11]. Secara umum, hasil penelitian ini menegaskan bahwa *insulation resistance* (IR) merupakan indikator dini yang efektif untuk mendeteksi degradasi isolasi akibat stress thermal, sekaligus berkorelasi kuat dengan penurunan performa elektrik generator PMSG [12].

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data dan pengujian laboratorium mengenai evaluasi performa PMSG turbin angin akibat pengaruh stress thermal, dapat disimpulkan beberapa hal berikut. Pertama, paparan panas ekstrem 160°C mampu merusak lapisan isolasi pada belitan dan menurunkan kualitas isolasi polimer; paparan yang melebihi batas *thermal class* F (155°C) memicu pemutusan rantai polimer dan oksidasi material resin, sehingga menghilangkan sifat dielektrik dan meningkatkan arus bocor. Kedua, metode pengujian Megger dengan injeksi tegangan 500 VDC terbukti efektif dan sensitif dalam mendeteksi gejala awal kerusakan isolasi sebelum terjadi kegagalan fatal. Nilai IR > 4000 MΩ diinterpretasikan sangat baik (layak) dan bertahan hingga jam ke-3, penurunan mulai terjadi pada jam ke-4 (2000–2180 MΩ atau 45,5%–50%), dan titik rusak (0 MΩ) tercapai pada jam ke-6. Ketiga, penurunan nilai IR berbanding lurus dengan penurunan performa elektrik generator PMSG. Arus bocor akibat rusaknya isolasi meningkatkan rugi-rugi daya dan panas pada belitan, yang secara konsisten berhubungan dengan penurunan tegangan, arus, dan daya pada variasi RPM 600, 800, 1000, dan 1200. Kegagalan isolasi ini menurunkan efisiensi turbin angin secara keseluruhan dan menjadi penyebab *downtime* operasional. Untuk penelitian selanjutnya disarankan penjadwalan preventive maintenance menggunakan pengujian IR berkala, optimalisasi desain proteksi termal generator (misalnya penambahan cooling system atau sensor thermocouple terintegrasi), serta pengembangan variasi dan kombinasi parameter uji dengan menggabungkan *accelerated aging* thermal bersama variabel lingkungan lain seperti kelembapan tinggi dan kontaminasi garam, untuk mensimulasikan kondisi riil *turbin angin* di wilayah pesisir Indonesia secara lebih akurat.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Bošnjakovi, “*Turbin angin* Technology Trends,” Early Writings on India, pp. 124–134, 2022.
- [2] D. P. Wawoh, G. M. C. Mangindaan, and L. S. Patras, “Analysis Lifetime of Generator Based On It's,” vol. 13, no. 1, pp. 19–26, 2024.
- [3] M. S. Mathew, S. T. Kandukuri, and C. W. Omlin, “Estimation of *Turbin angin* Performance Degradation with Deep Neural Networks,” PHM Society European Conference, vol. 7, no. 1, pp. 351–359, 2022.
- [4] D. Astolfi and R. Pandit, “*Turbin angin* Performance Decline with Age,” *Energies*, vol. 15, no. 14, pp. 2–5, 2022.
- [5] J. Zhang et al., “A Review of Reliability Assessment and Lifetime Prediction Methods for Electrical Machine Insulation Under Thermal Aging,” *Energies*, vol. 18, no. 3, pp. 1–38, 2025.
- [6] H. Abdillah et al., “Analisis Pengukuran Tahanan Isolasi dan Indeks Polaritas pada Motor 3 Fasa,” *INTRO: Journal Informatika dan Teknik Elektro*, vol. 2, no. 1, pp. 37–42, 2023.
- [7] X. Zhou, P. Giangrande, Y. Ji, W. Zhao, S. Ijaz, and M. Galea, “Insulation for Rotating Low-Voltage Electrical Machines,” 2024.
- [8] H. W. Penrose, “A Review of Polarization Index, IEEE Std. 43-2000,” *EC and M: Electrical Construction and Maintenance*, vol. 103, no. 9, pp. 24–27, 2000.
- [9] International Electrotechnical Commission, IEC 60085:2010, *Electrical Insulation – Thermal Evaluation and Designation*. Geneva: IEC, 2010.
- [10] IEEE, IEEE Std 1776-2018, *IEEE Recommended Practice for Thermal Evaluation of Insulation Systems for AC Electric Machinery Employing Form-Wound Pre-Insulated Stator Coils*. New York: IEEE, 2018.
- [11] H. C. Kim and J. S. Kim, “Development and Validation of Reliability Testing Methods for Insulation Systems in High-Voltage Rotating Electrical Machinery on Ships,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 1–18, 2025.
- [12] L. Szamel and J. Oloo, “Monitoring of Stator Winding Insulation Degradation through Estimation of Stator Winding Temperature and Leakage Current,” *Machines*, vol. 12, no. 4, 2024.