

Diagnosa Pengaruh *Thermal Stress* di *Permanent Magnet Synchronous Generator* Pada Sistem Turbin Angin Melalui *Polarization Index (PI)*

¹Muhammad Choirul Umam _1, ²Belly Yan Dewantara _2, Iradiratu Diah Prahmana _3

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan, Universitas Hang Tuah Surabaya

¹ choirulchoirul021@gmail.com _1

Abstract - Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG) are widely used in wind turbine systems because they have high efficiency and good reliability. However, in long-term use, PMSG's are prone to a decline in the quality of the stator winding insulation due to thermal stress, which is can reduce performance and trigger generator malfunctions. If this happens continuously, it can accelerate the degradation of the insulation, so a method is needed that can detect insulation deterioration early. This research focuses on evaluating the impact of accelerated aging on the insulation quality of PMSG's stator windings. The research uses Insulation Resistance (IR) and Polarization Index (PI) testing methods with a measuring device that called a Megger Test. The approach was applied on a small scale, with accelerated thermal stress treatment at a constant temperature of 160°C for 6 hours in accordance with the IEC 60085 standard for insulation class of F. In each heating a cycle, IR and PI tests were conducted referring to IEEE Std 43 to evaluate changes in insulation characteristics. The test results showed that the IR values for all phases were in the Over Limit condition (>4000 MΩ) from the baseline up to the 3rd hour of aging, then decreased to 2000–2180 MΩ (PI 1.03–1.08) at the 4th hour, and 1164–1273 MΩ (PI 1.09–1.20) at the 5th hour, finally reaching 0 MΩ at the 6th hour, indicating total insulation failure. This decrease in IR and PI shows insulation material degradation due to repeated heating, one sign being the reduced dielectric polarization capability. Consequently, IR and PI tests using the Megger Test have proven effective as a method to detect early PMSG insulation degradation caused by thermal stress.

Keywords — *Permanent Magnet Synchronous Generator, Accelerated Thermal Aging, Thermal Stress, Insulation Resistance, Polarization Index*

Abstrak— *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) banyak diaplikasikan pada sistem turbin angin karena memiliki karakteristik efisiensi tinggi dan keandalan yang baik, Namun, dalam penggunaan jangka panjang, PMSG rentan mengalami penurunan kualitas pada sistem isolasi belitan stator yang diakibatkan oleh stres termal dan dapat menurunkan kinerja serta memicu terjadinya kegagalan fungsi generator, jika terjadi secara berkelanjutan dapat mempercepat proses penurunan isolasi, sehingga diperlukan metode evaluasi yang mampu mendeteksi degradasi isolasi secara dini. Penelitian ini berfokus pada evaluasi dampak dari penuaan yang dipercepat terhadap kualitas isolasi belitan stator PMSG. Penelitian ini menggunakan metode pengujian *Insulation Resistance* (IR) dan *Polarization Index* (PI) dengan menggunakan alat ukur yakni *Megger Test*. Pendekatan diterapkan dengan skala kecil, perlakuan stres termal dipercepat pada temperatur konstan 160°C selama 6 jam sesuai standar IEC 60085 untuk kelas isolasi F. Setiap siklus pemanasan, dilakukan pengujian IR dan PI mengacu pada IEEE Std 43 untuk mengevaluasi perubahan karakteristik isolasi. Hasil pengujian menunjukkan nilai IR pada seluruh fasa berada pada kondisi *Over Limit* (>4000 MΩ) sejak *baseline* hingga *aging* jam ke-3, kemudian menurun menjadi 2000–2180 MΩ (PI 1,03–1,08) pada jam ke-4, dan 1164–1273 MΩ (PI 1,09–1,20) pada jam ke-5, hingga akhirnya mencapai 0 MΩ pada jam ke-6 yang menandakan kegagalan isolasi total. Penurunan IR dan PI ini menunjukkan degradasi material isolasi akibat pemanasan berulang, salah satu tanda yaitu berkurangnya kemampuan polarisasi dielektrik. Oleh karena itu, pengujian IR dan PI dengan *Megger Test* terbukti efektif sebagai metode untuk mendeteksi degradasi isolasi PMSG akibat stres termal secara dini.

Kata Kunci — *Permanent Magnet Synchronous Generator, Accelerated Thermal Aging, Thermal Stress, Insulation Resistance, Polarization Index*

I. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi global yang disertai isu perubahan iklim dan ketergantungan pada bahan bakar fosil telah mendorong percepatan pengembangan energi terbarukan, salah satunya energi angin yang berkembang pesat karena ketersediaannya melimpah dan teknologinya relatif matang [1]. Keandalan turbin angin kecepatan variabel dapat ditingkatkan secara signifikan menggunakan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), yang memanfaatkan magnet permanen

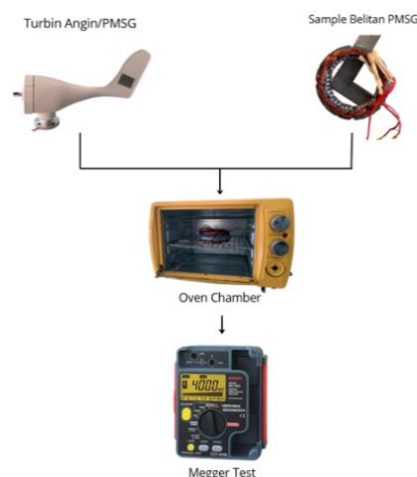
untuk menghasilkan medan celah udara serta menawarkan efisiensi operasi dan faktor daya yang tinggi [2]. Namun, meningkatnya penggunaan PMSG pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin turut memunculkan risiko gangguan, terutama kerusakan isolasi belitan stator akibat *thermal stress* selama proses konversi energi. Suhu tinggi menyebabkan degradasi kimia, munculnya *micro-crack*, penurunan resistivitas, serta hilangnya sifat mekanik dan dielektrik material isolasi (mika, *epoxy resin*, *composite insulation*), yang jika berlanjut dapat berkembang menjadi *Interturn Short Circuit* (ITSC) salah satu kegagalan elektrik paling berbahaya pada PMSG. Penggunaan *Megger* sangat dibutuhkan mengingat dalam kondisi operasi lapangan, generator sering kali mengalami gangguan yang disebut sebagai *operating with illness*, di mana generator tetap beroperasi meski memiliki cacat kecil yang belum terdeteksi, sehingga *thermal stress* memperparah ketidaksempurnaan eksisting seperti *eccentricity* dan pendinginan yang tidak optimal [3].

Standar IEC 60085 mengklasifikasikan isolasi listrik berdasarkan kelas termal dan kemampuan menahan suhu kerja maksimum tanpa degradasi, dengan batas kemampuan belitan sebesar 155°C sebagai acuan dasar desain dan evaluasi isolasi mesin listrik [4]. Untuk menilai kondisi isolasi secara kuantitatif, metode pengujian *Megger* melalui parameter *Insulation Resistance* (IR) dan *Polarization Index* (PI) menjadi pendekatan yang umum digunakan karena peka terhadap perubahan akibat *thermal aging*. Nilai IR menurun seiring naiknya temperatur operasi, sementara PI yang dihitung dari rasio IR menit ke-10 terhadap menit ke-1 dengan nilai di bawah 2 mengindikasikan isolasi mengalami penuaan, absorpsi kelembaban, atau kontaminasi internal [5]. Mengingat metode deteksi pasca-kerusakan seringkali terlambat karena hanya sensitif pada tahap akhir degradasi, serta meningkatnya penggunaan turbin angin skala kecil hingga menengah di Indonesia dengan kondisi lingkungan tropis (suhu tinggi, kelembapan >80%, kontaminasi garam) yang memperburuk stres termal diperlukan pengujian *accelerated thermal aging* untuk mendeteksi degradasi isolasi PMSG secara dini. Berbeda dengan penelitian Zhang et al. [2] yang berfokus pada tinjauan metode *reliability assessment* dan prediksi umur isolasi mesin listrik secara umum tanpa disertai data eksperimental langsung, serta penelitian Dai et al. [3] yang mengkaji kerusakan mekanis dan isolasi pada ujung belitan stator PMSG akibat *eccentricity* tanpa melibatkan pengujian *thermal aging* bertahap, penelitian ini menghadirkan kebaruan berupa pengujian *accelerated thermal aging* pada suhu konstan 160°C selama 6 jam yang dilakukan secara bertahap tiap 1 jam. Pemilihan suhu 160°C mengacu pada ambang atas kelas isolasi F menurut IEC 60085 [4], sedangkan durasi 6 jam dipilih untuk mengamati proses degradasi secara bertahap hingga tercapainya kegagalan isolasi total, sehingga pola penurunan IR dan PI dapat dikorelasikan langsung dengan perubahan performa elektrik generator dalam satu kerangka pengujian yang sama. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan memadukan acuan standar IEC 60085 dengan metode pengujian IR dan PI berdasarkan IEEE 43 untuk mendiagnosis efek penuaan termal terhadap isolasi belitan stator PMSG pada sistem turbin angin, sehingga degradasi dapat terdeteksi lebih awal, potensi kegagalan dapat dicegah, dan umur operasi mesin dapat diperpanjang.

II. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium untuk mengevaluasi degradasi isolasi pada *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) melalui pengujian *Accelerated Thermal Aging*, serta mengamati perubahan IR dan PI secara berkala menggunakan *oven chamber*. Metode ini mengacu dalam standar IEC 60034, IEEE std 43-2013.

Sistem eksperimen dirancang untuk mensimulasikan kondisi panas ekstrim yang dialami generator turbin angin di lapangan. Komponen utama dalam desain sistem penelitian ini sebagai berikut:



Gambar 1. Desain Sistem *Thermal Aging*

1. Objek Penelitian: Lilitan stator PMSG dengan isolasi kelas termal
2. Media Pemanas: Oven atau pemanas terkontrol untuk memberikan *thermal stress* konstan dengan suhu 160°C
3. Alat ukur yang digunakan: *Megger Insulation Tester* untuk mengukur *Insulation Resistance* (IR) dan *Polarization Index* (PI) serta arus bocor

Menurut IEEE Std 43 [6], nilai minimum IR yang dapat diterima adalah 1 MΩ per kV tegangan nominal ditambah 1 MΩ.

Tabel 1. Nilai Standar IR

Nilai Resistansi (MΩ)	Kondisi Isolasi
> 1000 MΩ	Sangat Baik
100 – 1000 MΩ	Baik
1 – 100 MΩ	Perlu perhatian khusus
< 1 MΩ	Buruk, perlu perbaikan

Polarization Index (PI) merupakan parameter diagnostik insulasi yang didefinisikan sebagai rasio nilai IR pada menit ke-10 (R10) terhadap nilai IR pada menit ke-1 (R1) dari pengukuran *Megger*.

$$PI = \frac{R10}{R1}$$

Keterangan :

PI = *Polarization Index* (1)

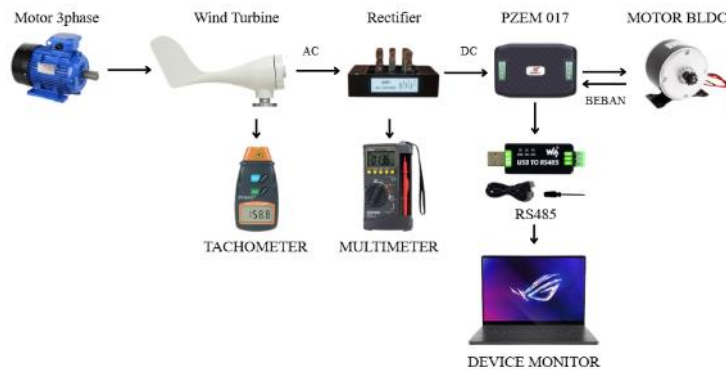
R1 = IR yang diukur pada menit ke-1 pengujian (MΩ) (2)

R10 = IR yang diukur pada menit ke-10 pengujian (MΩ) (3)

Tabel 2. Nilai Standar PI

Nilai PI	Interpretasi
< 2,0	Isolasi sangat baik (kering dan bersih)
1,5 – 2,0	Isolasi cukup, tetapi perlu pemantauan
1,0 – 1,5	Isolasi lembab/terkontraminasi, butuh tindakan
< 1,0	Isolasi buruk (arus konduktif tinggi)

Pada penelitian ini tidak hanya berfokus pada nilai isolasi saja, tetapi juga pengaruh *output* karakteristik elektrikal yang disebabkan oleh penurunan nilai isolasi yang disebabkan terkena paparan *thermal aging*. Berikut skema desain sistem pengambilan data.

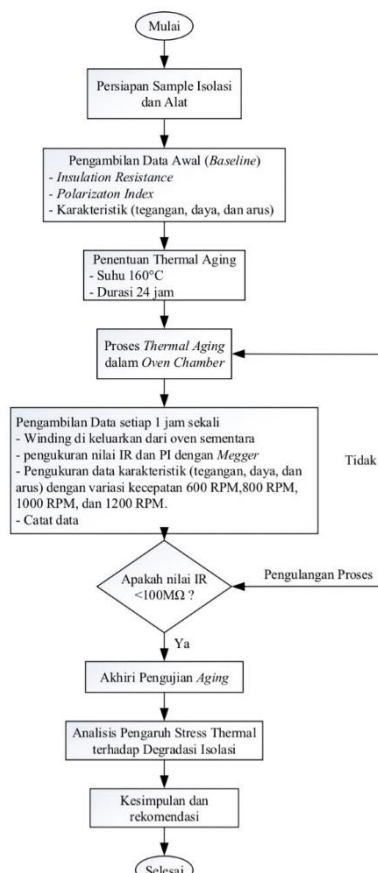


Gambar 2. Desain Sistem Pengambilan Data Karakteristik

Alur kerja pengambilan data karakteristik dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Motor 3 *phase* diatur putarannya untuk menggerakkan *wind turbine* sesuai kecepatan target pengujian (600, 800, 1000, dan 1200 RPM).
2. Kecepatan putar rotor diverifikasi menggunakan *tachometer*, sedangkan kondisi tegangan keluaran awal dapat diverifikasi menggunakan multimeter.
3. Setelah kecepatan putar dipastikan stabil sesuai target, generator PMSG pada *wind turbine* menghasilkan tegangan AC tiga fasa yang kemudian disearahkan oleh *rectifier* menjadi tegangan DC.
4. Tegangan DC hasil penyearahan dialirkan menuju modul PZEM 017, yang secara otomatis mengukur nilai tegangan DC, arus DC, dan daya DC.
5. Data hasil pengukuran PZEM 017 dikirim melalui modul RS485 (konversi sinyal serial RS485 ke USB) menuju *device monitor*, kemudian ditampilkan secara *real-time* dan dicatat sebagai data karakteristik pada kondisi kecepatan putar tersebut.
6. Prosedur pada poin 1-5 diulang untuk setiap variasi kecepatan putar (600, 800, 1000, dan 1200 RPM), sehingga diperoleh rangkaian data karakteristik tegangan, arus, dan daya DC pada seluruh kondisi pengujian yang telah ditentukan.

Alur kerja secara keseluruhan mulai dari persiapan sampel hingga selesai dapat digambarkan pada *flowchart* berikut:



Gambar 3. *Flowchart* Pengambilan Data *Accelerated Thermal Aging*

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum memasuki tahap pengujian *thermal aging*, dilakukan terlebih dahulu pengamatan pada kondisi *baseline*. Tujuan dari pengujian *baseline* ini adalah untuk mengetahui kondisi awal isolasi belitan serta karakteristik elektrik generator dalam keadaan normal, data yang diperoleh sebagai acuan pembandingan terhadap seluruh data hasil pengujian setelah terkena perlakuan *thermal aging*. Setiap tahap pengujian mencakup pengukuran nilai *Insulation Resistance* (IR), *Polarization Index* (PI), dan karakteristik elektrik yang meliputi (tegangan, arus, dan daya) *output* di PMSG dengan variasi kecepatan 600 RPM, 800 RPM, 1000 RPM, dan 1200 RPM. Nilai pada IR digunakan sebagai perhitungan PI, nilai pengukuran PI digunakan sebagai parameter utama untuk mengevaluasi kualitas isolasi selama proses *thermal aging*. Oleh karena itu hasil pengukuran pada kondisi *baseline* menjadi acuan dalam membandingkan perubahan kondisi isolasi pada setiap interval pengujian. Hasil dari pengukuran menunjukkan bahwa seluruh pengujian menghasilkan nilai OL (*Over Limit*) pada menit ke-1 maupun menit ke-10.

Nilai OL pada resistansi isolasi yaitu menandakan melebihi batas ukur maksimum alat yang digunakan yaitu lebih dari 4000 M Ω .

Tabel 3. Data IR dan PI *Baseline*

Fasa Pengujian	Tegangan Uji (V)	IR - 1 Menit (M Ω)	IR-10 Menit (M Ω)	PI = R10/R1	Keterangan Kondisi Isolasi
R-G	500V	OL (>4000)	OL (>4000)	OL	Sangat Baik
S-G		OL (>4000)	OL (>4000)	OL	Sangat Baik
T-G		OL (>4000)	OL (>4000)	OL	Sangat Baik

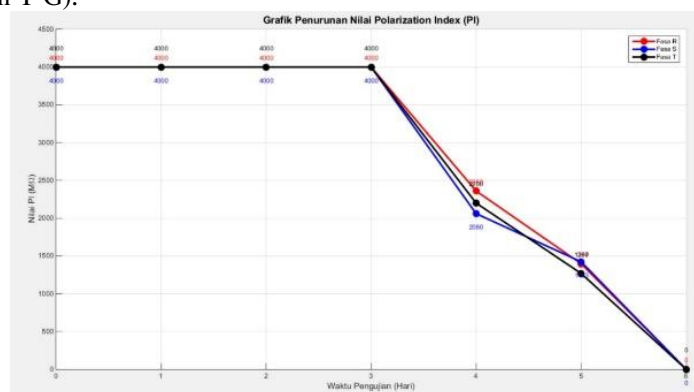
Selanjutnya akan menjabarkan hasil pengukuran PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) yang diperoleh dari *baseline* hingga kondisi akhir proses *thermal aging* selama 6 jam. Kondisi *baseline* digunakan sebagai acuan pembandingan setelah diberikan perlakuan.

Tabel 4. Data IR dan PI *Baseline*

Waktu Pengujian	Fasa Pengujian	Tegangan Uji	IR-1 Menit M Ω	IR-10 Menit M Ω	PI = R10/R1	Keterangan
<i>Baseline</i> (0 Jam)	R-G	500 VDC	>4000 M Ω	>4000 M Ω	-	Sangat Baik
	S-G		>4000 M Ω	>4000 M Ω	-	
	T-G		>4000 M Ω	>4000 M Ω	-	
1 Jam	R-G	500 VDC	>4000 M Ω	>4000 M Ω	-	Sangat Baik
	S-G		>4000 M Ω	>4000 M Ω	-	
	T-G		>4000 M Ω	>4000 M Ω	-	
2 Jam	R-G	500 VDC	>4000 M Ω	>4000 M Ω	-	Sangat Baik
	S-G		>4000 M Ω	>4000 M Ω	-	
	T-G		>4000 M Ω	>4000 M Ω	-	
3 Jam	R-G	500 VDC	>4000 M Ω	>4000 M Ω	-	Sangat Baik
	S-G		>4000 M Ω	>4000 M Ω	-	
	T-G		>4000 M Ω	>4000 M Ω	-	
4 Jam	R-G	500 VDC	2180 M Ω	2360 M Ω	1,80	Perlu Investigasi
	S-G		2000 M Ω	2060 M Ω	1,03	
	T-G		2130 M Ω	2200 M Ω	1,03	
5 Jam	R-G	500 VDC	1273 M Ω	1397 M Ω	1,10	Perlu Investigasi
	S-G		1188 M Ω	1423 M Ω	1,20	
	T-G		1164 M Ω	1269 M Ω	1,09	
6 Jam	R-G	500 VDC	0 M Ω	0 M Ω	-	Isolasi Gagal
	S-G		0 M Ω	0 M Ω	-	

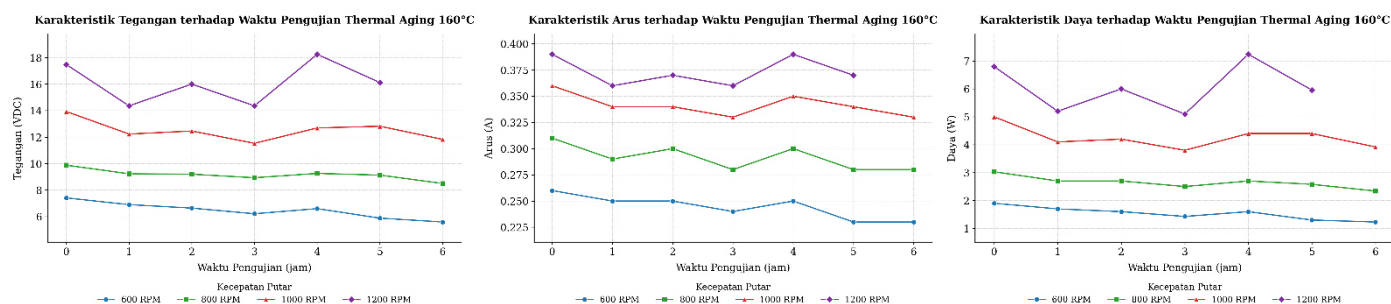
Waktu Pengujian	Fasa Pengujian	Tegangan Uji	IR-1 Menit $M\Omega$	IR-10 Menit $M\Omega$	PI = R_{10}/R_1	Keterangan
	T-G		0 $M\Omega$	0 $M\Omega$	-	

Berdasarkan tabel 4 tersebut bisa dilihat pada nilai *Polarization baseline* hingga *aging* ke-3 jam, nilai PI tidak dapat dihitung dikarenakan pembagian antara IR menit ke-10 terhadap IR menit ke-1 tidak dapat dihitung. Tetapi pada *aging* ke-4 jam hingga ke-5 jam nilai pada IR menit ke-10 dan IR menit ke-1 memberikan nilai, sehingga pada *aging* ke-4 jam hingga ke-5 jam dapat memunculkan nilai. Pada tabel tersebut dapat dilihat dari *baseline* hingga *aging* ke-3 jam untuk keterangan kondisi isolasinya masih dalam kondisi yang sangat baik, akan tetapi pada *aging* ke-4 jam hingga ke-5 jam untuk kondisi isolasi perlu investigasi atau pengawasan dikarenakan terdapat penurunan yang sangat signifikan. Pada *aging* ke-6 jam kondisi nilai IR dan PI menunjukkan angka 0 bahwa kondisi isolasi sudah mengalami kegagalan isolasi. Untuk mempermudah analisis penurunan nilai IR dan PI terhadap durasi *thermal aging* terhadap perlakuan *thermal stress* data pada tabel 4 dapat diplot kedalam bentuk grafik untuk setiap fasa (R-G, S-G, dan T-G).



Gambar 4. Grafik Penurunan *Polarization Index* (PI)

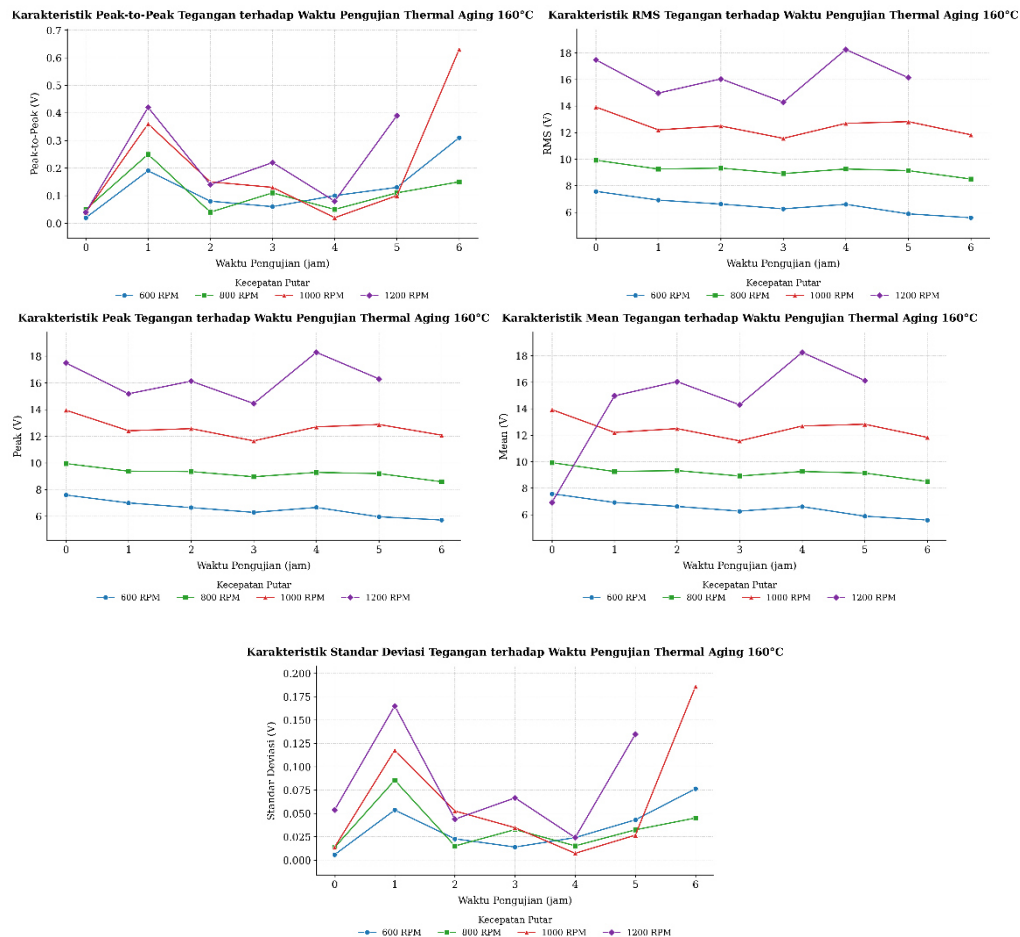
Berdasarkan Gambar 4, nilai *Polarization Index* (PI) menunjukkan penurunan signifikan dari *baseline* hingga *aging* ke-6 jam. Pada fase *baseline* hingga jam ke-3, garis grafik tampak datar pada nilai $<4000 M\Omega$ untuk seluruh fasa karena resistansi isolasi masih berada di atas batas maksimum pengukuran alat *megger*. Penurunan tajam mulai terlihat sejak jam ke-3, dari 4000 $M\Omega$ menjadi 2180–2360 $M\Omega$ pada jam ke-4, turun lagi menjadi 1164–1423 $M\Omega$ pada jam ke-5, dan akhirnya mencapai 0 $M\Omega$ pada jam ke-6 untuk seluruh fasa. Pola ini menunjukkan bahwa degradasi isolasi berlangsung secara progresif setelah jam ke-3 pada suhu *thermal aging* 160°C. Setelah pengujian IR dan PI, tahap berikutnya adalah mengevaluasi karakteristik elektrik PMSG untuk mengetahui pengaruh penurunan kualitas isolasi terhadap tegangan keluaran, yang diukur pada setiap kondisi pengujian (*baseline* hingga akhir *thermal aging*) dengan variasi kecepatan 600, 800, 1000, dan 1200 RPM.



Gambar 5. Grafik Karakteristik Elektrikal Keluaran (Tegangan, Arus, dan Daya) PMSG selama *Thermal Aging* 160°C

Berdasarkan Gambar 5 terlihat jelas bahwa dalam setiap intervalnya mengalami penurunan seiring juga dengan bertambahnya kecepatan putar pada seluruh kondisi pengujian. Selain parameter tegangan, arus, dan daya keluaran, penelitian ini juga menganalisis karakteristik sinyal tegangan generator menggunakan parameter *Root Mean Square* (RMS), *Peak*, *Peak-to-Peak*,

Mean, Standard Deviation (STD Dev). Analisis dilakukan pada setiap kondisi pengujian, mulai dari *baseline* hingga *thermal aging* selama 6 jam pada temperatur 160°C, dengan variasi kecepatan putar 600 RPM, 800 RPM, 1000 RPM, dan 1200 RPM. Parameter-parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi perubahan kualitas sinyal keluaran generator sebagai dampak dari degradasi isolasi belitan stator akibat *thermal aging*.



Gambar 6. Grafik Hasil Analisis Karakteristik Sinyal Tegangan Generator

Berdasarkan Gambar 6, kecepatan putar generator tetap menjadi faktor utama yang memengaruhi besarnya tegangan keluaran, ditunjukkan oleh peningkatan nilai RMS, *Peak*, *Mean*, seiring bertambahnya kecepatan dari 600 hingga 1200 RPM pada kondisi baseline. Namun, setelah *thermal aging* 6 jam, nilai RMS pada 600 RPM menurun dari 7,58 V menjadi 5,60 V, sementara nilai *peak to peak* dan *standar deviasi* justru cenderung meningkat pada beberapa variasi kecepatan putar. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa *thermal aging* pada temperatur 160°C memberikan pengaruh nyata terhadap kualitas sinyal tegangan keluaran generator, yang sejalan dengan penurunan nilai IR dan PI akibat meningkatnya rugi-rugi listrik pada belitan stator, sehingga kemampuan generator dalam menghasilkan tegangan yang stabil dan efektif semakin menurun.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian pada PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) di sistem turbin angin melalui parameter *Insulation Resistance* (IR), *Polarization Index* (PI), dan parameter keluaran generator, maka dapat disimpulkan bahwa *thermal aging* pada temperatur 160°C menyebabkan penurunan kualitas isolasi belitan stator PMSG. Hal ini ditunjukkan oleh penurunan nilai *Insulation Resistance* (IR) yang semula berada pada kondisi lebih dari 4000 MΩ pada tahap *baseline* hingga 3 jam *thermal aging* dan mencapai kondisi kegagalan isolasi pada pengujian 6 jam, lalu nilai *Polarization Index* (PI) menunjukkan penurunan seiring bertambahnya durasi *thermal aging*, sehingga dapat digunakan sebagai indikator untuk

mengevaluasi tingkat degradasi isolasi. *Thermal aging* juga memberikan pengaruh terhadap karakteristik elektrik generator, di mana pada seluruh variasi kecepatan putar (600, 800, 1000, dan 1200 RPM), tegangan, arus, dan daya keluaran menunjukkan penurunan yang signifikan dibandingkan kondisi *baseline*, meskipun sempat terjadi kenaikan tidak konsisten pada jam ke-4 dan ke-5 yang diduga akibat gangguan pengambilan data, sebelum kembali menurun tajam pada jam ke-6. Hubungan antara hasil pengujian IR, PI, dan karakteristik elektrik menunjukkan bahwa *thermal aging* menyebabkan penurunan performa generator secara menyeluruh, di mana semakin lama durasi pemanasan diberikan, semakin besar tingkat degradasi isolasi dan penurunan performa elektrik yang terjadi pada PMSG.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. A. Prambudi, "BUKU AJAR ENERGI BARU DAN TERBAHARUKAN (EBT)," 2022.
- [2] J. Zhang *et al.*, "A Review of Reliability Assessment and Lifetime Prediction Methods for Electrical Machine Insulation Under Thermal Aging," pp. 1–38, 2025.
- [3] D. Dai, Y. He, M. Xu, W. Zhang, Z. Fu, and D. Gerada, "Mechanical properties and insulation damage of PMSG stator end windings with eccentricity considerations," *Alexandria Eng. J.*, vol. 105, no. March, pp. 156–169, 2024, doi: 10.1016/j.aej.2024.06.090.
- [4] IEC 60085, "Electrical Insulation – Thermal Evaluation and Designation," *Int. Electrotech. Comm. Geneva*.
- [5] A. Hidayat and M. A. Kartawidjaja, "Evaluasi Indeks Polaritas (PI) sebagai Indikator Keandalan Isolasi Kabel pada Sistem Pressurized Fan di Gedung Bertingkat PT XYZ," vol. 2, no. 3, 2025.
- [6] I. S. 43TM-2013, E. Machinery, and E. Society, *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery IEEE Power and Energy Society*, vol. 2013. 2013.
- [7] 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, p. 220, 2024, doi: 10.3390/machines12040220.
- [8] A. Fazylova, Y. Napadailo, G. V. Rybina, B. Tultayev, T. Iliev, and I. Stoyanov, "Modeling the Thermal State of a Wind Turbine Generator Considering External Factors," *Eng. Proc.*, vol. 104, no. 1, p. 88, 2025, doi: 10.3390/engproc2025104088.
- [9] K. E. Okedu, "Investigating Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine Performance During Low Voltage Using Series and Bridge Type Fault Current Limiters," *Electrica*, vol. 23, no. 2, pp. 212–221, 2023, doi: 10.5152/electrica.2022.22066.
- [10] B. Majout *et al.*, "Improvement of PMSG-Based Wind Energy Conversion System Using Developed Sliding Mode Control," *Energies*, vol. 15, no. 5, p. 1625, 2022, doi: 10.3390/en15051625.