Evaluasi Efektivitas Pemeliharaan Prediktif Berbasis Pengujian Isolasi pada Generator PLTD Sukaharja

Andi Putra Akbar, Nurmayanti Zain, Lompo Ramos Emakarim, Farhan Rezki Arifin, Ummu Khalsum, Muh. Irham M, dan Abdul Hakim Udin*

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Cokroaminoto Makassar

**Correspondent Author: nurmayanti.zain@ucm-si.ac.id*

Abstract **This study evaluates the effectiveness of predictive maintenance based on insulation testing on the generator at PLTD Sukaharja. Predictive maintenance is a condition-based strategy that utilizes periodic monitoring to detect early degradation of generator insulation. Research methods include Insulation Resistance (IR), Polarization Index (PI), Surge Comparison, Tan Delta, and Hi-Pot tests. The results show PI values of 2.22, 2.37, and 2.99 for phases R, S, and T. All of these values exceed the minimum standard of 2.0. Tan Delta values range from 2.14% to 2.66%, which is below the 4% maximum limit, and all Hi-Pot tests are passed. The Surge Comparison test shows no indication of turn-to-turn faults. Economic estimation reveals that predictive maintenance can potentially save up to Rp5.56 billion compared to potential losses of Rp5.85 billion if generator breakdown occurs. This study concludes that predictive maintenance based on insulation testing is effective in detecting early degradation of generator insulation, ensuring operational readiness, and providing significant economic benefits through planned maintenance.**

Keyword **— Condition based maintenance, diesel power plant, generator, generator insulation testing, predictive maintenance.**

Abstrak — Penelitian ini mengevaluasi efektivitas pemeliharaan prediktif berbasis pengujian isolasi pada generator di PLTD Sukaharja. Pemeliharaan prediktif merupakan strategi berbasis kondisi yang memanfaatkan pemantauan periodik untuk mendeteksi degradasi dini isolasi generator. Metode penelitian meliputi uji Tahanan Isolasi (IR), Indeks Polarisasi (PI), Uji Banding Surja, Tan Delta, dan Hi-Pot. Hasil penelitian menunjukkan nilai PI fasa R sebesar 2,22, fasa S sebesar 2,37, dan fasa T sebesar 2,99. Seluruh nilai tersebut melampaui standar minimum 2,0. Nilai Tan Delta berada pada kisaran 2,14% hingga 2,66% di bawah batas maksimum 4%, dan seluruh uji Hi-Pot dinyatakan lulus. Uji Banding Surja tidak menunjukkan indikasi gangguan antar lilitan. Estimasi ekonomi menunjukkan pemeliharaan prediktif berpotensi menghemat hingga Rp5,56 miliar dibandingkan potensi kerugian Rp5,85 miliar apabila terjadi kegagalan generator. Penelitian menyimpulkan bahwa pemeliharaan prediktif berbasis pengujian isolasi efektif mendeteksi degradasi awal isolasi generator, menjamin kesiapan operasi, serta memberikan manfaat ekonomi signifikan melalui pemeliharaan terencana.

Kata kunci — Generator, pemeliharaan berbasis kondisi, pemeliharaan prediktif, pembangkit listrik diesel, pengujian isolasi generator.

I. PENDAHULUAN

PT PLN (Persero) sebagai badan usaha milik negara yang mengelola kelistrikan di Indonesia memiliki kewajiban untuk memberikan pelayanan terbaik kepada masyarakat. Tantangan utama yang dihadapi dari sisi pembangkitan adalah menjaga keandalan mesin pembangkit agar dapat beroperasi secara optimal, andal, dan efisien. Keandalan suatu sistem didefinisikan sebagai probabilitas bahwa komponen atau sistem akan menjalankan fungsi yang dibutuhkan dalam periode waktu tertentu ketika digunakan dalam kondisi operasi yang ditentukan [1].

Generator merupakan komponen paling vital dalam sistem pembangkitan listrik. Peralatan ini berfungsi mengubah energi mekanik dari penggerak mula menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Kegagalan pada generator dapat menyebabkan unit pembangkit berhenti beroperasi, yang pada gilirannya dapat mengakibatkan pemadaman bergilir di masyarakat, terutama pada sistem isolated seperti Ketapang. Berdasarkan data industri, kegagalan isolasi belitan stator menyumbang sekitar 56% dari total kegagalan generator, sehingga menjadikan pengujian isolasi sebagai komponen kritis dalam pemeliharaan [2].

PLTD Sukaharja merupakan salah satu unit pembangkit listrik tenaga diesel yang terletak di Kabupaten Ketapang, Kalimantan Barat, dan beroperasi pada sistem isolated Ketapang. Generator yang terpasang memiliki usia operasi yang cukup tua, dengan beberapa unit telah beroperasi sejak tahun 1987 (Deutz), 1990 (Wartsila), dan 1991 (Ruston). Dengan usia operasi yang panjang, risiko degradasi isolasi generator menjadi semakin tinggi. Degradasi ini dapat disebabkan oleh tekanan termal (overheating), tekanan mekanis (vibrasi), kontaminasi lingkungan (kelembapan, debu, minyak), serta penuaan material isolasi secara alami [3].

Berbeda dengan PLTD di ibu kota provinsi, PLTD Sukaharja yang terletak jauh dari pusat memiliki keterbatasan sumber daya manusia dan peralatan uji. Pemeliharaan selama ini lebih banyak dilakukan secara rutin dan periodik tanpa evaluasi mendalam berbasis kondisi aktual. Pemeliharaan prediktif *(predictive maintenance)* hadir sebagai solusi dengan melakukan pemantauan parameter kondisi peralatan secara berkala, kemudian membandingkannya dengan standar untuk menentukan tindakan perbaikan sebelum terjadi kegagalan fatal.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas penerapan pemeliharaan prediktif berbasis pengujian isolasi pada generator PLTD Sukaharja melalui serangkaian

pengujian diagnostik (IR, PI, Surge Comparison, Tan Delta, dan Hi-Pot), serta menghitung manfaat ekonomi yang diperoleh dari deteksi dini kerusakan isolasi generator.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Konsep Pemeliharaan Prediktif

Strategi pemeliharaan secara umum dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama, yaitu pemeliharaan reaktif *(reactive maintenance)*, pemeliharaan preventif *(preventive maintenance)*, dan pemeliharaan prediktif *(predictive maintenance)*. Pemeliharaan prediktif merupakan strategi berbasis data yang memprediksi kegagalan dan mengoptimalkan rencana pemeliharaan aset untuk menghindari kegagalan mendadak. Strategi ini menawarkan keunggulan berupa peningkatan waktu operasi aset hingga 47%, pengurangan biaya hingga 17%, serta penurunan risiko keselamatan, kesehatan, lingkungan, dan kualitas sebesar 11% [4]. Selain itu, pemeliharaan prediktif terbukti mampu mengurangi biaya pemeliharaan darurat dan memperpanjang usia peralatan karena tindakan pemeliharaan dilakukan berdasarkan kondisi aktual, bukan semata-mata berdasarkan jadwal waktu.

Dalam penerapannya, peralatan kritis yang memiliki dampak besar terhadap kelangsungan produksi sebaiknya diprioritaskan untuk mendapatkan pemeliharaan prediktif. Penelitian yang dilakukan pada generator turbin gas di lingkungan industri minyak dan gas membuktikan bahwa penerapan pemeliharaan berbasis kondisi *(condition-based maintenance)* pada komponen dengan prioritas risiko tertinggi memberikan dampak signifikan terhadap pencegahan kegagalan dan penghindaran kerugian produksi [5].

B. Kegagalan Isolasi Generator

Kerusakan pada mesin listrik berputar sebagian besar disebabkan oleh kerusakan pada sistem isolasi *winding* stator. Kegagalan isolasi belitan generator menyumbang sekitar 56% dari seluruh kegagalan generator [2]. Degradasi sistem isolasi generator dapat disebabkan oleh berbagai faktor, di antaranya tekanan termal, tekanan mekanis, dan tekanan lingkungan.

Tekanan termal *(thermal stresses)* terjadi ketika *overheating* pada *winding* berlangsung dalam waktu yang lama sehingga menimbulkan tekanan termal pada sistem isolasi dan menyebabkan isolasi kawat menjadi rapuh. Kondisi tersebut dapat semakin mempercepat proses penuaan isolasi apabila disertai dengan timbulnya *Partial Discharge (PD)*, karena aktivitas PD dapat menyebabkan kerusakan lokal pada material isolasi [3].

Selain tekanan termal, tekanan mekanis *(mechanical stresses)* juga dapat memengaruhi keandalan sistem isolasi generator. *Winding* yang tidak divarnish dengan baik, *connection point*, dan *blocking coil* merupakan bagian yang relatif rentan terhadap pengaruh eksternal, seperti *mechanical vibration* dan *magnetic vibration*, yang dapat menyebabkan pergeseran, abrasi, atau kerusakan mekanis pada sistem isolasi. Faktor lainnya adalah tekanan lingkungan *(environmental stresses)*, yang dapat berupa udara lembap, debu, karbon, minyak, maupun bahan kimia yang terakumulasi pada permukaan isolasi. Kontaminan tersebut dapat bersifat konduktif dan, akibat adanya beda potensial antara *winding* dan *ground*, memungkinkan terbentuknya jalur arus listrik dari *winding* menuju *ground*. Akumulasi kontaminan pada permukaan isolasi selanjutnya dapat memicu terbentuknya jalur hantaran listrik *(electrical tracking)* yang mempercepat degradasi dan meningkatkan risiko kegagalan isolasi.

B. Pengujian Isolasi Generator

Kegagalan isolasi belitan stator menyumbang sekitar 56% dari total kegagalan generator [6]. Beberapa pengujian diagnostik yang umum dilakukan untuk mengevaluasi kondisi isolasi belitan stator meliputi uji tahanan isolasi *(Insulation Resistance/IR)* dan indeks polarisasi *(Polarization Index/PI)*, yang dilakukan dengan memberikan tegangan DC untuk mengukur kualitas isolasi. Nilai PI > 2,0 menunjukkan bahwa isolasi berada dalam kondisi baik dan kering.

Selain itu, uji Tan Delta *(Dissipation Factor)* digunakan untuk mengukur rugi-rugi dielektrik pada sistem isolasi. Berdasarkan IEEE Std 286-2000, nilai faktor disipasi maksimum yang diperbolehkan adalah 4% [7].

Uji banding surja *(Surge Comparison Test)* juga digunakan untuk mendeteksi gangguan antar-lilitan *(turn-to-turn short circuit)* dengan membandingkan karakteristik atau impedansi belitan [8].

Sementara itu, uji Hi-Pot dilakukan untuk menguji kemampuan isolasi dalam menahan tegangan tinggi dan memastikan tidak terjadi tembus isolasi *(dielectric breakdown)* [9].

III. METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Unit Pelaksana Pengendalian Pembangkitan (UP) Kapuas, PLTD Sukaharja, yang terletak di Kecamatan Delta Pawan, Kabupaten Ketapang, Kalimantan Barat. Pengambilan data dilakukan pada periode pemeliharaan prediktif tahun 2025.

B. Objek Penelitian

Objek penelitian adalah generator sinkron 3 fasa yang terpasang di PLTD Sukaharja. Spesifikasi generator yang diuji meliputi tegangan nominal 6,3 kV, frekuensi 50 Hz, dengan sistem eksitasi brushless. Gambar 1 dan Tabel 1

memperlihatkan area cakupan dan daya suplai PLTD Sukaharja.



Gambar 1. Area Cakupan Suplai PLTD Sukaharja

Tabel 1. Daya Suplai PLTD Sukaharja

NO	PUSAT LISTRIK PEMBANGKIT		JENIS TENAGA A.D.U.G.BM	DAYA (MW) DAYA TERPASANG	DAYA MAMPU	BEBAN PUNCAK DI SISTEM
1	2		3	4		
I	PLTD SUKAHARJA			20.674	15.100	15.100
47	PLTD SUKAHARJA #01 (DEUTZ)	BV 628M	D	1.237	900	900
48	PLTD SUKAHARJA #02 (DEUTZ)	BV 628M	D	1.237	900	900
49	PLTD SUKAHARJA #03 (WARTSILA)	8R32D	D	2.800	2.300	2.300
50	PLTD SUKAHARJA #04 (WARTSILA)	8R32D	D	2.800	2.300	2.300
51	PLTD SUKAHARJA #05 (RUSTON)	16 RKC	D	3.140	2.200	2.200
52	PLTD SUKAHARJA #06 (RUSTON)	16 RKC	D	3.140	2.000	2.000
53	PLTD SUKAHARJA #07 (DEUTZ AG) EX PLTD PURUK CAHU #04	TBD 620 V 12	D	1.000	500	500
54	PLTD SUKAHARJA #08 (MITSUBISHI) EX PLTD SUKAMARA #10	S16R-PTA-(S)	D	1.330	1.000	1.000
55	PLTD SUKAHARJA #09 (MITSUBISHI) EX PLTD SENTAWAR #26	S16R-PTA	D	1.330	1.000	1.000
56	PLTD SUKAHARJA #10 (MITSUBISHI) EX PLTD SEKADAU #05	S16R-PTA-S	D	1.330	1.000	1.000
57	PLTD SUKAHARJA #11 (MITSUBISHI) EX PLTD SEKADAU #08	S16R-PTA-S	D	1.330	1.000	1.000

C. Metode Pengumpulan Data

Metode penelitian menggunakan pendekatan deskriptif analitik melalui pengambilan data langsung, wawancara dengan supervisor, dan studi literatur.

Langkah-langkah penelitian meliputi: (1) pengumpulan data spesifikasi dan histori peralatan, (2) pelaksanaan pengujian sesuai standar operasional prosedur, (3) pencatatan hasil pengukuran, (4) perbandingan hasil dengan standar acuan (IEEE, IEC, dan standar internal PLN), serta (5) analisis Root Cause Failure Analysis (RCFA) apabila ditemukan hasil yang tidak memenuhi standar.

Pelaksanaan pemeliharaan prediktif pada PLTD Sukaharja dilakukan dengan melakukan pengukuran dan pemantauan terhadap kondisi peralatan pembangkit secara terencana. Salah satu bentuk pelaksanaannya adalah penyusunan Formulir Rencana dan Realisasi Pemeliharaan Prediktif (PDM) yang digunakan sebagai acuan dalam menentukan pekerjaan pengukuran, waktu pelaksanaan, serta realisasi kegiatan pada setiap unit pembangkit.

IV. Hasil dan Pembahasan

A. Evaluasi Pemeliharaan Prediktif pada Generator

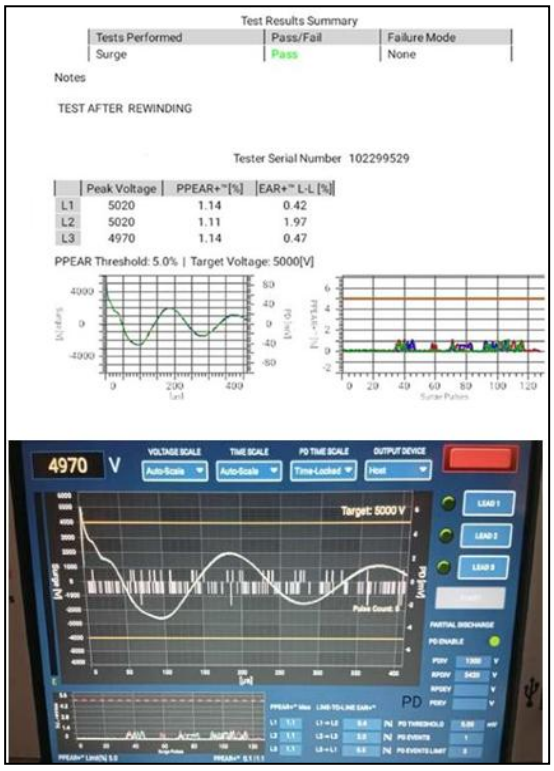
Pengujian tahanan isolasi dan indeks polarisasi pada Tabel 2, menunjukkan peningkatan nilai tahanan dari 540–550 MΩ pada menit pertama menjadi 1,22–1,31 GΩ pada menit ke-10. Pola kenaikan yang stabil ini mengindikasikan isolasi belitan dalam kondisi kering dan bebas kontaminasi. Nilai PI yang tercatat (fasa R=2,22; fasa S=2,37; fasa T=2,99) seluruhnya berada di atas ambang batas 2,0, yang menandakan tidak adanya degradasi signifikan pada material isolasi. Dokumentasi pengujian diperlihatkan pada Gambar 49.

Tabel 2. Hasil Pengujian *Insulation Resistance Test* dan PI

Insulation Resistance of Stator [Polarization Index] PI				
Cable Core	Minutes	PHASA R	PHASA S (MΩ)	PHASA T (M)
PHASE TO GROUND	1	541 MΩ	540 MΩ	548 MΩ
	2	718 MΩ	723 MΩ	821 MΩ
	3	833 MΩ	851 MΩ	918 MΩ
	4	920 MΩ	946 MΩ	957 MΩ
	5	987 MΩ	1.03 GΩ	1.04 GΩ
	6	1.05 GΩ	1.09 GΩ	1.11 GΩ
	7	1.10 GΩ	1.13 GΩ	1.17 GΩ
	8	1.15 GΩ	1.19 GΩ	1.22 GΩ
	9	1.18 GΩ	1.24 GΩ	1.27 GΩ
	10	1.22 GΩ	1.28 GΩ	1.31 GΩ
PI		2.22	2.37	2.99



Gambar 2. Pengujian *Insulation Resistance Test* dan PI



Gambar 3. Hasil Pengujian *Surge Comparison*

Hasil uji Banding Surja pada Gambar 3 memperlihatkan dua gelombang yang berimpit sempurna tanpa perbedaan fase, amplitudo, maupun distorsi. Kondisi ini membuktikan tidak adanya gangguan antar lilitan *(turn-to-turn short)* pada kumparan stator. Nilai *Partial Discharge* yang sangat rendah turut menguatkan bahwa isolasi lilitan masih dalam kondisi prima. Dokumentasi pelaksanaan uji ini ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengujian *Surge Comparison*

Pengujian Tan Delta pada Tabel 3 menghasilkan faktor disipasi antara 2,14% hingga 2,66%, jauh di bawah batas maksimum 4% sesuai standar VDE 0530 / IEC 60034-27. Perubahan delta PF yang sangat kecil (< ±0,5%) dan kapasitansi yang relatif konstan di setiap level tegangan menunjukkan bahwa sistem isolasi stator masih homogen dan tidak mengalami penuaan termal maupun kelembapan berlebih. Seluruh fasa dinyatakan dalam status *"Good"*. Dokumentasi pengujian ditampilkan pada Gambar 5.

Tabel 3. Hasil Pengujian Tan Delta

Tan delta of Stator									
Phase	Mode	V test	Freq	V out	I tot	Watt losses	DF meas	Delta PF	Cap Meas
R	GST-A+B	0,73 kV	50,00 Hz	0,73 kV	35,96 mA	600,28 mW	2,30%	%	157370,9 pF
		1,45 kV	50,00 Hz	1,46 kV	72,07 mA	2435,71 mW	2,32%	0,03%	157500,5 pF
		2,18 kV	50,00 Hz	2,18 kV	107,95 mA	5595,49 mW	2,38%	0,06%	157652,9 pF
		2,91 kV	50,00 Hz	2,91 kV	144,74 mA	11211,96 mW	2,66%	0,28%	158190,1 pF
		3,64 kV	**50,00 Hz**	**3,63 kV**	**181,66 mA**	**20644,44 mW**	**3,13%**	**0,47%**	**159209,8 pF**
		2,91 kV	50,00 Hz	2,91 kV	144,70 mA	11345,10 mW	2,70%	-0,44%	158225,6 pF
		2,18 kV	50,00 Hz	2,19 kV	108,30 mA	5703,83 mW	2,41%	-0,29%	157683,3 pF
		1,45 kV	50,00 Hz	1,46 kV	72,03 mA	2461,79 mW	2,35%	-0,06%	157520,5 pF
		0,73 kV	50,00 Hz	0,73 kV	36,11 mA	611,60 mW	2,32%	-0,03%	157401,2 pF
Phase	Mode	V test	Freq	V out	I tot	Watt losses	DF meas	Delta PF	Cap Meas
S	GST-A+B	0,73 kV	50,00 Hz	0,73 kV	36,19 mA	614,21 mW	2,34%	%	158821,9 pF
		1,45 kV	50,00 Hz	1,45 kV	72,54 mA	2464,67 mW	2,34%	0,00%	158965,0 pF
		2,18 kV	50,00 Hz	2,18 kV	108,79 mA	5648,28 mW	2,39%	0,05%	159104,0 pF
		2,91 kV	50,00 Hz	2,92 kV	146,70 mA	11383,82 mW	2,65%	0,27%	159631,6 pF
		3,64 kV	**50,00 Hz**	**3,66 kV**	**184,50 mA**	**20835,56 mW**	**3,09%**	**0,44%**	**160602,3 pF**
		2,91 kV	50,00 Hz	2,91 kV	145,81 mA	11331,66 mW	2,68%	-0,42%	159649,4 pF
		2,18 kV	50,00 Hz	2,18 kV	109,23 mA	5735,26 mW	2,40%	-0,27%	159132,4 pF
		1,45 kV	50,00 Hz	1,46 kV	72,68 mA	2486,30 mW	2,35%	-0,05%	158978,8 pF
		0,73 kV	50,00 Hz	0,73 kV	36,59 mA	624,64 mW	2,33%	-0,02%	158875,5 pF
Phase	Mode	V test	Freq	V out	I tot	Watt losses	DF meas	Delta PF	Cap Meas
		0,73 kV	50,00 Hz	0,73 kV	35,72 mA	554,12 mW	2,14%	%	156769,3 pF
T	GST-A+B	1,45 kV	50,00 Hz	1,45 kV	71,48 mA	2233,79 mW	2,16%	0,02%	156835,6 pF
		2,18 kV	50,00 Hz	2,18 kV	107,68 mA	5168,57 mW	2,20%	0,04%	156940,9 pF
		2,91 kV	50,00 Hz	2,91 kV	144,08 mA	10223,76 mW	2,44%	0,24%	157371,2 pF
		3,64 kV	50,00 Hz	3,64 kV	180,80 mA	18911,81 mW	2,88%	0,44%	158274,7 pF
		2,91 kV	50,00 Hz	2,89 kV	143,06 mA	10146,53 mW	2,45%	-0,43%	157364,5 pF
		2,18 kV	50,00 Hz	2,18 kV	107,61 mA	5180,39 mW	2,21%	-0,25%	156921,3 pF
		1,45 kV	50,00 Hz	1,46 kV	71,69 mA	2251,78 mW	2,16%	-0,05%	156796,1 pF
		0,73 kV	50,00 Hz	0,73 kV	36,01 mA	562,93 mW	2,14%	-0,02%	156719,2 pF



Gambar 5. Pengujian Tan Delta

Pengujian Hi-Pot pada Tabel 4 mengonfirmasi ketahanan isolasi terhadap tegangan tinggi, dengan seluruh fasa berstatus *"Passed"* pada setiap tahapan tegangan uji. Nilai faktor disipasi pada uji ini berkisar 2,1%–3,0% dan tidak terdeteksi lonjakan arus bocor atau percikan api. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kondisi isolasi generator masih sangat baik dan layak dioperasikan tanpa risiko tembus tegangan. Dokumentasi pengujian ditampilkan pada Gambar 6.

Tabel 4. Hasil Pengujian Hi-Pot

Measurement: U-VWGnd

No.	1	Test mode	GSTg-A+B

Freq.	V test	V out	I tot	Watt losses	DF meas	Delta PF	Cap. meas	Assessment
50,00 Hz	0,73 kV	0,73 kV	35,96 mA	600,28 mW	2,2969 %	%	157370,9 pF	Paased
50,00 Hz	1,45 kV	1,46 kV	72,07 mA	2435,71 mW	2,3219 %	0,0250 %	157500,5 pF	Passed
50,00 Hz	2,18 kV	2,18 kV	107,95 mA	5595,49 mW	2,3794 %	0,0575 %	157652,9 pF	Passed
50,00 Hz	2,91 kV	2,91 kV	144,74 mA	11211,96 mW	2,6619 %	0,2825 %	158190,1 pF	Passed
50,00 Hz	3,64 kV	3,63 kV	181,66 mA	20644,44 mW	3,1322 %	0,4702 %	159209,8 pF	Paased
50,00 Hz	2,91 kV	2,91 kV	144,70 mA	11345,10 mW	2,6952 %	-0,4370 %	158225,6 pF	Passed
50,00 Hz	2,18 kV	2,19 kV	108,30 mA	5703,83 mW	2,4099 %	-0,2853 %	157683,3 pF	Paased
50,00 Hz	1,45 kV	1,46 kV	72,03 mA	2461,79 mW	2,3496 %	-0,0604 %	157520,5 pF	Passed
50,00 Hz	0,73 kV	0,73 kV	36,11 mA	611,60 mW	2,3208 %	-0,0288 %	157401,2 pF	Paased

Measurement: V-UWGnd

No.	2	Test mode	GSTg-A+B

Freq.	V test	V out	I tot	Watt losses	DF meas	Delta PF	Cap. meas	Assessment
50,00 Hz	0,73 kV	0,73 kV	36,19 mA	614,21 mW	2,3414 %	%	156821,9 pF	Paased
50,00 Hz	1,45 kV	1,45 kV	72,54 mA	2464,67 mW	2,3407 %	-0,0007 %	158965,0 pF	Passed
50,00 Hz	2,18 kV	2,18 kV	108,79 mA	5648,28 mW	2,3868 %	0,0460 %	159104,0 pF	Paased
50,00 Hz	2,91 kV	2,92 kV	146,70 mA	11383,82 mW	2,6549 %	0,2681 %	159631,6 pF	Passed
50,00 Hz	3,64 kV	3,66 kV	184,50 mA	20835,56 mW	3,0912 %	0,4363 %	160602,3 pF	Paased
50,00 Hz	2,91 kV	2,91 kV	145,81 mA	11331,66 mW	2,6753 %	-0,4159 %	159649,4 pF	Passed
50,00 Hz	2,18 kV	2,18 kV	109,23 mA	5735,26 mW	2,4049 %	-0,2704 %	159132,4 pF	Paased
50,00 Hz	1,45 kV	1,46 kV	72,68 mA	2486,30 mW	2,3518 %	-0,0531 %	158978,8 pF	Passed
50,00 Hz	0,73 kV	0,73 kV	36,59 mA	624,64 mW	2,3299 %	-0,0219 %	158875,5 pF	Paased

Measurement: W-UVGnd

No.	3	Test mode	GSTg-A+B

Freq.	V test	V out	I tot	Watt losses	DF meas	Delta PF	Cap. meas	Assessment
50,00 Hz	0,73 kV	0,73 kV	35,72 mA	554,12 mW	2,1404 %	%	156769,3 pF	Paased
50,00 Hz	1,45 kV	1,45 kV	71,48 mA	2233,79 mW	2,1557 %	0,0154 %	156835,6 pF	Passed
50,00 Hz	2,18 kV	2,18 kV	107,68 mA	5168,57 mW	2,1993 %	0,0436 %	156940,9 pF	Paased
50,00 Hz	2,91 kV	2,91 kV	144,08 mA	10223,76 mW	2,4366 %	0,2373 %	157371,2 pF	Passed
50,00 Hz	3,64 kV	3,64 kV	180,80 mA	18911,81 mW	2,8787 %	0,4421 %	158274,7 pF	Paased
50,00 Hz	2,91 kV	2,89 kV	143,06 mA	10146,53 mW	2,4523 %	-0,4264 %	157364,5 pF	Passed
50,00 Hz	2,18 kV	2,18 kV	107,61 mA	5180,39 mW	2,2068 %	-0,2456 %	156921,3 pF	Paased
50,00 Hz	1,45 kV	1,46 kV	71,69 mA	2251,78 mW	2,1592 %	-0,0476 %	156796,1 pF	Passed
50,00 Hz	0,73 kV	0,73 kV	36,01 mA	562,93 mW	2,1393 %	-0,0199 %	156719,2 pF	Paased



Gambar 6. Pengujian Hi-Pot

B. Pembahasan dan Manfaat Ekonomi

Berdasarkan hasil pengujian pada generator, pemeliharaan prediktif berbasis pengujian isolasi menunjukkan efektivitas yang tinggi dalam mengetahui kondisi aktual isolasi dan mendeteksi potensi gangguan sejak dini. Seluruh pengujian utama (IR, PI, Surge Comparison, Tan Delta, dan Hi-Pot) memberikan hasil yang memenuhi kriteria standar, yang berarti kondisi isolasi generator masih sangat baik dan layak beroperasi.

Jika dibandingkan dengan pemeliharaan reaktif yang hanya menunggu sampai terjadi kerusakan, pemeliharaan prediktif memberikan keunggulan berupa deteksi dini dan kesempatan untuk melakukan tindakan pemeliharaan terencana. Deteksi dini ini sangat penting karena kegagalan isolasi generator biasanya terjadi secara bertahap, dimulai dari penurunan tahanan isolasi, peningkatan rugi-rugi dielektrik, hingga akhirnya terjadi tembus isolasi yang menyebabkan unit padam mendadak [10][11].

Penerapan pemeliharaan prediktif memberikan manfaat ekonomi melalui deteksi dini indikasi kerusakan sebelum terjadi breakdown. Apabila terjadi kegagalan isolasi generator yang menyebabkan unit tidak dapat beroperasi selama 31 hari, potensi kehilangan pendapatan diperkirakan sebesar Rp5.851.877.080. Perhitungan ini menggunakan parameter daya mampu netto 26.000 kWh, EAF Declare 92,64%, serta harga komponen energi Rp862.837/kWh dan Rp1.997.746/kWh pada Tabel 5.

Tabel 5. Potensi Kehilangan Pendapatan Akibat Gangguan Generator

Uraian	Komponen A	Komponen B
Daya mampu netto	26.000 kWh	26.000 kWh
EAF Declare	92,64%	92,64%
Harga komponen	Rp862.837/kWh	Rp1.997.746/kWh
Waktu perbaikan	31 hari	31 hari
Estimasi kehilangan pendapatan	Rp1.765.100.584	Rp4.086.776.496
Total Potensi Kerugian		**Rp5.851.877.080**

Sebagai perbandingan, biaya yang diperlukan untuk melakukan tindakan perbaikan atau pemeliharaan preventif pada generator berdasarkan hasil deteksi dini (misalnya pencucian, pengeringan, atau perbaikan minor isolasi) diperkirakan sebesar Rp288.045.000. Dengan demikian, potensi penghematan yang dapat diperoleh melalui pemeliharaan prediktif adalah Rp5.563.832.080.

Efisiensi ekonomi yang dihasilkan dihitung dengan rumus:

Efisiensi (%) = [(Potensi Kerugian – Biaya Perbaikan) / Potensi Kerugian] × 100%

Efisiensi (%) = [(Rp5.851.877.080 – Rp288.045.000) / Rp5.851.877.080] × 100% = 95,08%

Hasil ini menunjukkan bahwa biaya yang dikeluarkan untuk melakukan tindakan pemeliharaan sebelum terjadi kegagalan isolasi jauh lebih kecil dibandingkan dengan potensi kehilangan pendapatan apabila kerusakan menyebabkan unit pembangkit berhenti beroperasi. Dengan demikian, pemeliharaan prediktif berbasis pengujian isolasi terbukti memberikan manfaat ekonomi yang sangat signifikan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis pada generator PLTD Sukaharja, dapat disimpulkan bahwa pemeliharaan prediktif berbasis pengujian isolasi efektif dalam mengevaluasi kondisi dan mendeteksi degradasi awal isolasi stator sebelum berkembang menjadi kegagalan fatal. Hasil pengujian menunjukkan nilai PI sebesar 2,22 pada fasa R, 2,37 pada fasa S, dan 2,99 pada fasa T, yang seluruhnya melampaui standar minimum 2,0, sedangkan nilai Tan Delta berada pada kisaran 2,14%–2,66%, masih di bawah batas maksimum 4%. Seluruh pengujian Hi-Pot juga dinyatakan lulus dan Uji Banding Surja tidak menunjukkan indikasi gangguan antar-lilitan, sehingga kondisi isolasi generator dinyatakan sangat baik dan layak beroperasi. Pengujian periodik seperti IR, PI, Tan Delta, Hi-Pot, dan Uji Banding Surja memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi isolasi sehingga tindakan pemeliharaan dapat direncanakan secara tepat waktu tanpa harus menunggu terjadinya breakdown. Dari aspek ekonomi, penerapan pemeliharaan prediktif memberikan efisiensi hingga 95,08% dengan potensi penghematan sebesar Rp5,56 miliar dibandingkan potensi kerugian sebesar Rp5,85 miliar apabila terjadi kegagalan operasi, sehingga biaya pemeliharaan prediktif dan perbaikan terencana jauh lebih kecil dibandingkan risiko kerugian akibat kegagalan generator yang tidak terdeteksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT PLN (Persero) UP Kapuas atas izin dan dukungan data selama pelaksanaan penelitian.

DAFTAR ACUAN

[1] F. R. Putra, I. G. N. S. Hernanda, and D. Fahmi, "The Utilization of Multi-Layer Perceptron (MLP) as a Diagnostic Tool for Dielectric Testing on Stator Winding Insulation to Improve the Generator's Reliability," *2025 Int. Semin. Intell. Technol. Its Appl. (ISITIA)*, pp. 307–312, 2025.

[2] D. Verginadis, A. Karlis, M. G. Danikas, and J.-A. Antonino-Daviu, "Qualitive Predictive Model of the Insulation Condition of HV Electrical Machines through a Combination of Diagnostic Techniques and NNs," *2024 Int. Conf. Electr. Mach. (ICEM)*, Torino, Italy, pp. 1–8, 2024.

[3] R. Madarasz, "3-Level Strategy of Insulation Status Monitoring for Critical HV Motors and Generators," *14th Mediterranean Conf. Power Gener. Transm. Distrib. Energy Convers. (MEDPOWER 2024)*, Athens, Greece, pp. 727–731, 2024.

[4] M. Khan, A. Ahmad, F. Sobieczky, M. Pichler, B. A. Moser, and I. Bukovský, "A Systematic Mapping Study of Predictive Maintenance in SMEs," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 88738–88749, 2022.

[5] M. Alrifaey, T. Sai Hong, A. As'arry, E. Elianddy Supeni, and C. K. Ang, "Optimization and Selection of Maintenance Policies in an Electrical Gas Turbine Generator Based on the Hybrid Reliability-Centered Maintenance (RCM) Model," *Processes*, vol. 8, no. 6, p. 670, 2020.

[6] S. Kulkarni, B. Doiphode, and Y. Kulkarni, "An Overview of Dynamic Contact Resistance Measurement of HV Circuit Breakers," *2018 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. (T&D)*, pp. 1–9, 2018.

[7] A. Anton, M. Andruşcă, M. Adam, M.-B. Micu, A. Dragomir, and S. M. Antohi, "About Contact Resistance Monitoring and Vibration Analysis of a Power Circuit Breaker," *2024 IEEE Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng. (EPEi)*, Iasi, Romania, pp. 430–434, 2024.

[8] M. Badawi *et al*., "Reliable Estimation for Health Index of Transformer Oil Based on Novel Combined Predictive Maintenance Techniques," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 25954–25972, 2022.

[9] P. M. Darade and S. Diwan, "Hi-Pot Test Failure of Transformer Winding, Impact and Corrective Actions," *2020 2nd Int. Conf. Innovative Mechanisms Ind. Appl. (ICIMIA)*, pp. 422–428, 2020.

[10] Smeets, R.R., Hooijmans, J., & Schoonenberg, G.G. (2007). Test experiences with new Medium-Voltage TRV requirements in IEC 62271-100.

[11] D. Febrina, "Feasibility Test of Transformer Insulating Oil Lifetime Based on Breakdown Voltage (BDV) and Furan Analysis," *JEECS (J. Electr. Eng. Comput. Sci.)*, 2023.