

Evaluasi Tahanan Isolasi dan Indeks Polarisasi pada Generator Set Diesel 350 kVA

Sunu Arsy Pratomo¹, Lilik Budiyo²

Universitas Maritim AMNI Semarang, Indonesia

*Penulis korespondensi: shoeyzero@gmail.com

Abstract. The reliability of a Generator Set (Genset) as a backup power supply heavily depends on the integrity of its dielectric insulation system, especially when operating in a tropical coastal environment prone to thermal stress and high humidity. This study aims to evaluate the Insulation Resistance (IR) and Polarization Index (PI) of a 350 kVA generator based on the IEEE 43-2024 standard, and to analyze the conductor resistance balance referring to ANSI/EASA AR100-2025. The research method includes verifying the cooling circulation space, conducting a 1,000 V DC voltage injection test for 10 minutes, and measuring the low-order direct current resistance on the stator windings. Evaluation results show that the insulation resistance values on the stator, power cables, and circuit breaker exceed the instrument's limit ($>1,000 \text{ M}\Omega$), indicating minimal leakage current and excellent insulation condition. The Polarization Index (PI) value was recorded at a ratio of 2.0 (categorized as Good). A maximum resistance asymmetry deviation of 4.35% was found in the T-R phase, which still meets the operational tolerance limit. It is concluded that the generator unit is in a highly feasible operating condition. As a preventive measure in coastal areas, operating the internal space heater while the unit is on standby is recommended to prevent the accumulation of microscopic condensation.

Keywords: Insulation Resistance, Polarization Index, Diesel Generator, IEEE 43-2024, Preventive Maintenance.

Abstrak. Keandalan Generator Set (Genset) sebagai cadangan daya sangat bergantung pada integritas sistem isolasi dielektriknya, terutama saat beroperasi di lingkungan pesisir tropis yang rentan terhadap stres termal dan tingginya kelembapan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi Tahanan Isolasi (Insulation Resistance/IR) dan Indeks Polarisasi (Polarization Index/PI) generator 350 kVA berdasarkan standar IEEE 43-2024, serta menganalisis keseimbangan resistansi konduktor mengacu pada ANSI/EASA AR100-2025. Metode penelitian meliputi verifikasi ruang sirkulasi pendingin, pengujian injeksi tegangan 1.000 V DC selama 10 menit, dan pengukuran tahanan arus searah orde rendah pada belitan stator. Hasil evaluasi menunjukkan nilai tahanan isolasi pada stator, kabel tenaga, dan pemutus tenaga (Circuit Breaker) melampaui batas instrumen ($>1.000 \text{ M}\Omega$), mengindikasikan arus bocor minimal dan kondisi insulasi yang sangat baik. Nilai Indeks Polarisasi (PI) tercatat pada rasio 2,0 (kategori Good). Deviasi asimetri hambatan maksimum ditemukan sebesar 4,35% pada fasa T-R, yang masih memenuhi batas toleransi operasional. Disimpulkan bahwa unit generator berada dalam kondisi sangat layak operasi. Sebagai langkah preventif di area pesisir, direkomendasikan pengoperasian space heater internal saat unit siaga guna mencegah akumulasi kondensasi mikroskopis.

Kata Kunci: Tahanan Isolasi, Indeks Polarisasi, Generator Diesel, IEEE 43-2024, Pemeliharaan Preventif.

1. LATAR BELAKANG

Dalam ekosistem infrastruktur modern, keandalan dan kontinuitas pasokan daya listrik merupakan prasyarat mutlak. Oleh karena itu, ketersediaan sistem pembangkit

cadangan (*standby power generation system*) yang selalu siap beroperasi saat terjadi gangguan pada jaringan utama sangatlah krusial. Generator set (*genset*) tidak lagi dipandang sekadar sebagai fasilitas pelengkap sekunder, melainkan bertindak sebagai tulang punggung operasional yang menjamin keberlangsungan berbagai sistem kritis. Sistem ini mencakup pusat data (*data center*), infrastruktur telekomunikasi, fasilitas pendidikan dan laboratorium, hingga sistem keselamatan gedung ketika pasokan daya dari jaringan utilitas negara terputus. Secara teknis, kegagalan sistem isolasi pada belitan stator telah diidentifikasi sebagai salah satu penyumbang utama kerusakan fatal pada mesin elektrik putar (*rotating machines*). Mengingat 30% hingga 40% dari total gangguan operasional bersumber dari degradasi isolasi stator, pemantauan kondisi dielektrik secara berkala menjadi suatu keharusan dalam manajemen pemeliharaan fasilitas (Zou et al., 2024).

Dalam sistem ketenagalistrikan, *generator set* (*genset*) memiliki peranan sentral sebagai perangkat elektromekanikal utama yang bertugas mengonversi energi mekanik kinetik dari putaran poros penggerak (*prime mover* berupa mesin diesel) menjadi energi listrik bolak-balik (*Alternating Current/AC*). Stabilitas fungsi konversi energi ini sangat vital untuk menjamin keberlanjutan pasokan daya pada berbagai infrastruktur kritis, termasuk dalam menunjang operasional fasilitas pendidikan. Terjadinya anomali atau kegagalan fungsional pada komponen kelistrikan *genset*, meskipun dalam skala minor, dapat memicu hilangnya pasokan daya secara mendadak (*power outage*). Kondisi ini berisiko melumpuhkan seluruh aktivitas operasional secara total, yang pada akhirnya menimbulkan dampak kerugian signifikan, baik secara materiil akibat kerusakan perangkat elektronika lanjutan, maupun non-materiil akibat terhentinya pelayanan esensial (Schweiger & Macdonald, 2025).

Salah satu faktor paling krusial dalam menentukan tingkat keandalan (*reliability*), umur pakai operasional maksimum (*maximum lifetime*), dan profil keselamatan dari sebuah *genset* adalah integritas sistem isolasi dielektrik yang melindungi belitan stator maupun rotor. Berbeda dengan komponen mekanikal yang tingkat keausannya dapat dipantau secara visual atau melalui indikator getaran, material polimer pada sistem isolasi elektrik mengalami proses penuaan termal (*thermal aging*) dan degradasi kimiawi yang beroperasi secara mikroskopis di bawah permukaan. Proses penuaan tak kasat mata ini secara bertahap merusak ikatan molekul dielektrik, sehingga evaluasi

kuantitatif secara berkala mutlak diperlukan untuk memprediksi sisa umur pakai isolasi sebelum material tersebut kehilangan daya tahannya secara permanen (Zhang et al., 2025).

Kerusakan laten pada sistem isolasi dielektrik dapat memicu rentetan gangguan destruktif, yang umumnya diawali oleh kegagalan insulasi mikro dan berujung pada hubung singkat antar-belitan (*turn-to-turn short circuit*). Jika tidak terdeteksi sejak dini, anomali arus skala kecil pada area yang terdegradasi ini akan terus tereskalasi menjadi hubung singkat antar-fasa (*phase-to-phase fault*), hingga berujung pada hubung singkat ke tanah (*ground fault*). Eskalasi kegagalan ini secara langsung berisiko memicu kerusakan termal berskala masif, pelelehan inti magnetik (*core iron melting*), kemunculan busur listrik, dan berakibat pada kerusakan total unit pembangkit (Zhu et al., 2024). Mengingat fatalitas dari risiko tersebut dan urgensi menjaga kontinuitas pasokan daya pada fasilitas pendidikan, penelitian ini secara spesifik dilaksanakan untuk mengevaluasi parameter Tahanan Isolasi (*Insulation Resistance*) dan Indeks Polarisasi (*Polarization Index*) pada unit *Generator Set Diesel* 350 kVA menggunakan pedoman mutakhir standar IEEE 43-2024. Sebagai tahapan diagnostik pelengkap untuk mengonfirmasi kelayakan operasional genset secara komprehensif, penelitian ini juga menganalisis tingkat keseimbangan resistansi konduktor arus searah dengan mengacu pada standar ANSI/EASA AR100-2025.

1.1. Tantangan Iklim Pesisir dan Daerah Tropis

Aspek penting yang mendasari analisa dalam penelitian ini adalah karakteristik lingkungan di mana genset beroperasi. Terletak di daerah pesisir dengan iklim tropis ekuatorial, instalasi kelistrikan menghadapi tantangan lingkungan yang sangat berat. Umumnya, wilayah pesisir tropis memiliki tingkat kelembapan relatif (*Relative Humidity/RH*) atmosfer dengan rata-rata yang cukup tinggi, berkisar antara 60% hingga mencapai 95% dalam kondisi cuaca tertentu, hal tersebut diperparah dengan suhu harian yang bisa melebihi 32°C (BMKG, 2023). Paparan kelembapan relatif (RH) yang tinggi serta partikel garam di udara (*salt spray*) pada daerah pesisir secara signifikan mempercepat penyerapan uap air ke dalam pori-pori pernis isolasi, yang memicu penurunan drastis pada nilai tahanan isolasi dan mempercepat penuaan dielektrik.

Kondisi geoklimatologis tersebut memberikan paparan stres termal, higroskopis, dan korosif yang signifikan pada material polimer isolasi generator. Atmosfer yang jenuh dengan kelembapan, dikombinasikan dengan partikel garam di udara (*salt spray*), secara drastis mempercepat penyerapan uap air ke dalam rongga mikropori material isolasi dan lapisan *varnish* pelindung. Penetrasi molekul air (H_2O)—yang secara inheren memiliki sifat polarisasi tinggi ke dalam komponen dielektrik akan menurunkan nilai resistivitas material secara ekstrem. Kondisi ini berpotensi besar menciptakan jalur arus bocor (*leakage current path*) yang mendestruksi integritas belitan stator (Szamel & Oloo, 2024). Terakumulasinya kontaminan korosif seperti partikulat garam pesisir, debu, dan uap air pada permukaan insulasi menuntut adanya pendekatan evaluasi pemeliharaan dielektrik yang komprehensif, karena prosedur inspeksi visual konvensional tidak lagi memadai untuk menjamin keandalan sistem.

1.2. Ruang Lingkup dan Metodologi Penelitian

Penelitian ini dirancang untuk menganalisis, menilai, dan merekonstruksi secara mendalam kondisi aktual tahanan isolasi (*Insulation Resistance/IR*), nilai indeks polarisasi (*Polarization Index/PI*), serta keseimbangan tahanan belitan (*Winding Resistance*) pada sebuah unit generator set berkapasitas 350 kVA/280 kW. Penelitian ini mengambil sampel dari mesin diesel perkins 2206C-E13TAG2 sebagai sumber tenaga dan dipadukan dengan generator sinkron tipe HCI444E1.1 yang diproduksi oleh STAMFORD.

Evaluasi diagnostik ini mengikuti dengan ketat kerangka kerja analitis dan metodologi pengujian kelistrikan yang ditetapkan oleh lembaga standar internasional, merujuk pada dokumen standar IEEE 43-2024 (*IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*) (SCHLEICH, 2024). Selain itu, evaluasi ini diperluas dengan melakukan perbandingan menggunakan matriks keseimbangan yang ditetapkan dalam ANSI/EASA Standard AR100-2025 (*Recommended Practice for the Repair of Rotating Electrical Apparatus*) (*EASA_AR100-2025_v1225-01*, n.d.). Hasil analisis ini bertujuan untuk menetapkan dasar bagi *standar operational prosedur* (SOP) pemeliharaan preventif dan prediktif yang didasarkan pada data dari lapangan.

1.3. Tujuan Penelitian

1. Mengevaluasi kondisi dielektrik dari generator (Tahanan Isolasi dan Indeks Polarisasi) dengan mengikuti standar IEEE 43-2024.
2. Menganalisis keseimbangan resistansi konduktor (*Winding Resistance*) dengan mengacu pada parameter toleransi yang ditetapkan dalam ANSI/EASA AR100-2025.
3. Merumuskan langkah-langkah mitigasi untuk pemeliharaan prediktif guna mencegah terjadinya kegagalan hubung singkat pada generator yang beroperasi di lingkungan pesisir tropis.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1. Degradasi Isolasi dan Standar IEEE 43-2024

Sistem isolasi polimer pada mesin elektrik berputar modern dirancang untuk menahan empat tekanan operasional utama yang secara komprehensif dikenal dengan akronim TEAM: *Thermal, Electrical, Ambient, dan Mechanical*. Dari keempat faktor tersebut, penuaan termal (*thermal aging*) bertindak sebagai penyumbang degradasi paling dominan. Mengacu pada prinsip kinetika kimia Hukum Arrhenius, masa pakai (*lifetime*) dielektrik material isolasi akan menyusut hingga 50% untuk setiap lonjakan suhu operasional sebesar 10 °C yang melampaui batas desain termalnya. Sebagai representasi, sistem isolasi Kelas H yang diimplementasikan pada mayoritas generator *heavy-duty* dirancang memiliki ketahanan titik panas maksimum (*hot-spot*) hingga 180 °C (Wawoh Devi P. et al., 2023). Lebih lanjut, paparan stres lingkungan (*ambient stress*), seperti tingginya tingkat kelembapan di kawasan pesisir, akan secara masif mempercepat terjadinya retak rambut pada matriks epoksi. Kerusakan struktural ini terjadi ketika uap air polar berpenetrasi ke dalam celah mikroskopis insulasi yang sebelumnya telah terbuka akibat stres mekanis (*mechanical stress*) berupa getaran operasional rotor pada frekuensi 50 Hz.

The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) secara berkala memperbarui standar pengujian insulasi untuk mengimbangi kemajuan teknologi material. Pembaruan terbaru, IEEE 43-2024 (*Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*), menghadirkan perubahan mendasar yang

signifikan dibandingkan versi sebelumnya tahun 2013 dan 2000. Beberapa poin penting dalam pembaruan ini meliputi (*IEEE SA - P43*, n.d.):

1. Gugurnya Peraturan (kV + 1): Ketentuan lama yang mengizinkan resistansi minimum sebesar 1.4 MΩ untuk mesin 400 Volt telah dicabut untuk mesin modern. Mesin yang diproduksi setelah tahun 1970 dengan lilitan kaku (*form-wound*) diwajibkan memiliki Tahanan Isolasi Minimum 1 Menit (IR_{1min}) sebesar 100 MΩ.
2. Klasifikasi Suhu: IEEE 43-2024 memisahkan formula koreksi suhu (*Temperature Correction Facto/ K_t*) menjadi dua kategori, yaitu untuk material *Thermoplastic* (mesin lama) dan *Thermosetting* (resin epoksi modern). Pemisahan ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi dalam proses normalisasi dan ekstrapolasi nilai tahanan isolasi pada suhu referensi standar 40 °C.
3. Indeks Polarisasi (PI) dapat dihitung dengan rumus:

$$PI = \frac{IR_{10min}}{IR_{1min}} \quad (1)$$

Standar 2024 dengan jelas menetapkan bahwa untuk material insulasi Kelas B, F, dan H, nilai minimum kelulusan PI haruslah 2.0. IEEE juga mengeluarkan peringatan (Klausul pengecualian) yang menyatakan bahwa jika resistansi arus pada menit pertama telah mencapai lebih dari 5.000 Mega-Ohm, maka nilai PI dapat diabaikan, karena resistansinya telah terbukti tidak mengalami kebocoran arus.

2.2. Standar ANSI/EASA AR100-2025 untuk Hambatan Belitan

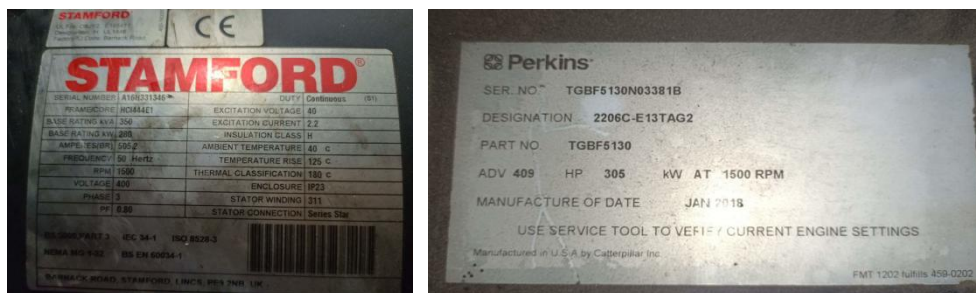
Jika standar IEEE fokus pada penilaian integritas dielektrik sistem isolasi, penilaian kondisi konduktor tembaga pada belitan stator merujuk pada peraturan yang ditetapkan oleh *Electrical Apparatus Service Association* (EASA). Mengacu pada dokumen ANSI/EASA AR100-2025 (*Recommended Practice for the Repair of Rotating Electrical Apparatus*), parameter keseimbangan tahanan belitan (*winding resistance balance*) diatur dengan ketat untuk menjaga simetri fluks magnetik dan menghindari terjadinya pemanasan local (*localized heating*). Standar ini menetapkan bahwa deviasi maksimum nilai tahanan arus searah (*DC resistance*) antar-fasa tidak boleh melebihi

batas toleransi 2% untuk belitan acak (*random-wound coils*) dan 1% untuk belitan cetak (*form-wound coils*), yang dihitung berdasarkan nilai rata-rata tahanan keseluruhan fasa (*EASA_AR100-2025_v1225-01*, n.d.).

3. METODE PENELITIAN

3.1. Profil Peralatan Objek Evaluasi

Peralatan yang dievaluasi merupakan unit Pembangkit Listrik Tenaga Diesel yang baru dikomisioning untuk instalasi luar ruangan (*Genset Silent Canopy*) di lingkungan beriklim tropis basah. Berdasarkan plat pabrikan (Nameplate), data spesifikasi mekanikal dan kelistrikan diuraikan pada gambar 1. dan tabel 1.



Gambar 1. Spesifikasi Genset STAMFORT HCI444E1/UK/2018

Tabel 1. Spesifikasi Teknik Genset STAMFORT HCI444E1/UK/2018

Komponen Mesin	Deskripsi Spesifikasi Parameter
Alternator / Generator	STAMFORD (UK / 2018)
Model Tipe	HCI444E1
Daya Nominal	350 kVA / 280 kW
Tegangan & Frekuensi	400 Volt L-L / 50 Hz / 3 Fasa
Arus Nominal / Cos Phi	505.2 Ampere / 0.8 Lagging
Tingkat Proteksi & Isolasi	IP23 / Thermal Class H (180 Derajat Celcius)
Konstruksi Stator	Winding ST1 / Connection Series Star
Mesin Prime-Mover	PERKINS (USA / 2018)
Model Mesin	2206C-E13TAG2
Daya Output & Putaran	305 kW / 1500 RPM

3.2. Teknik Pengukuran dan Alat Uji

1. Langkah awal pengujian mencakup pengukuran dan verifikasi jarak bebas (*clearance area*) di sekeliling instalasi unit pembangkit. Proses verifikasi tata letak spasial ini esensial untuk menjamin kecukupan sirkulasi udara pendingin di seluruh perimeter unit. Pemenuhan dimensi jarak bebas yang sesuai dengan standar toleransi pabrikan mutlak diperlukan untuk mengoptimalkan kinerja sistem ventilasi pendingin mekanis. Hal ini bertujuan agar suplai udara segar (*intake*) maupun ekstraksi panas dari ruang operasional dapat memenuhi spesifikasi rasio laju aliran udara (*Cubic Feet per Minute/CFM*) yang dipersyaratkan. Ketidakpatuhan terhadap standar konfigurasi tata letak ini berisiko tinggi memicu fenomena sirkulasi balik gas buang (*exhaust recirculation*). Anomali sirkulasi tersebut akan mendongkrak suhu ambien ruangan secara drastis, yang pada gilirannya memberikan paparan stres termal berlebih, memicu *overheating*, dan mempercepat degradasi sistem isolasi pada belitan stator (Nishanth et al., 2021).



Gambar 2. Pengukuran Jarak Bebas

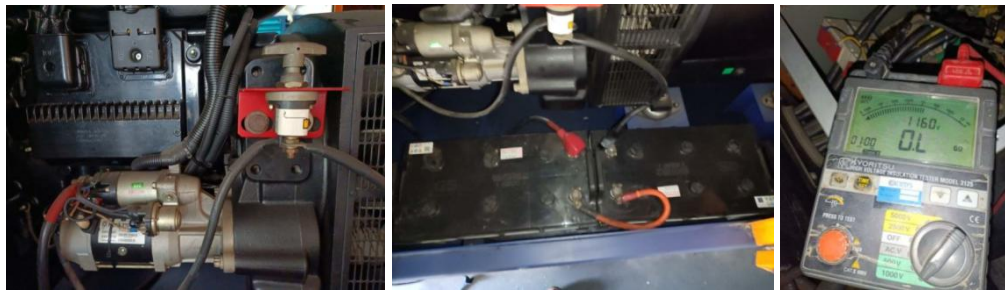
2. Evaluasi integritas dielektrik pada sistem isolasi belitan dilakukan melalui pengujian tahanan isolasi menggunakan instrumen *High-Voltage Insulation Tester* digital. Prosedur diagnostik ini secara ketat mengacu pada pedoman standar IEEE 43-2024. Pengujian dieksekusi dengan menginjeksikan tegangan uji arus searah (*Direct Current/DC*) konstan sebesar 1.000 V ke terminal belitan stator selama periode kontinu 10 menit. Evaluasi non-destruktif berbasis tegangan DC ini terbukti sebagai metode yang paling andal dan ekonomis untuk memisahkan arus bocor konduktif (*leakage current*) dari arus serapan polarisasi

(*absorption current*). Parameter dan kriteria kelulusan dielektrik untuk metode ini telah diperketat dalam pembaruan pedoman IEEE 43-2024 (IEEE Power and Energy Society, 2024). Selama proses injeksi berlangsung, pembacaan nilai resistansi isolasi ekuivalen (dalam satuan Mega-Ohm) direkam secara presisi pada menit pertama sebagai representasi nilai Tahanan Isolasi (IR) dasar, dan terus dilanjutkan hingga menit kesepuluh. Rasio perbandingan antara nilai resistansi pada menit kesepuluh terhadap menit pertama kemudian dihitung untuk menghasilkan Indeks Polarisasi (PI). Kalkulasi PI ini berfungsi sebagai indikator krusial dalam mendeteksi akumulasi kontaminan, penetrasi uap air, serta mengevaluasi tingkat degradasi polimer isolasi. Keunggulan utama dari parameter PI ini adalah akurasinya yang konsisten dan tidak terpengaruh oleh fluktuasi suhu ruang selama masa pengujian (Mahendra et al., 2023).



Gambar 3. Pengukuran Tahanan Isolasi

3. Evaluasi konduktor tembaga stator dilakukan melalui uji tahanan arus searah orde rendah (*low-resistance DC measurement*) secara menyilang antar-terminal fasa (R-S, S-T, T-R). Matriks data tersebut kemudian dikomparasikan untuk menghitung persentase deviasi ketidakseimbangan tahanan sesuai dengan batas toleransi ANSI/EASA AR100-2025



Gambar 4. Pengukuran Sistem Peralatan Utama (Stator) dan Alat Bantu

Pemenuhan standar keseimbangan ini sangat krusial; simpangan resistansi yang dibiarkan melampaui batas akan mendistorsi distribusi sirkulasi arus dan memicu asimetri fluks magnetik. Kondisi ini berisiko menciptakan anomali pemanasan lokal (*hot-spots*) yang dapat mempercepat kerusakan dielektrik isolasi saat unit beroperasi pada kapasitas penuh (Rafli Ariwan et al., 2023).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Validasi Aliran Udara Pendingin dan Ruang Kosong

Proses verifikasi dimensi dan ruang kosong (*Clearance Distance*) dilakukan dengan menggunakan alat pengukur pita metrik. Tujuan dari pengukuran ini adalah untuk memastikan bahwa ruang sirkulasi di sekeliling unit sudah memadai, sehingga dinamika laju aliran udara pendingin (*cooling ventilation flow*) dapat memenuhi spesifikasi standar *Cubic Feet per Minute* (CFM) yang disarankan oleh produsen.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Jarak Bebas

Parameter Dimensi	Jarak Terukur	Persyaratan Kelayakan	Keterangan
Area Samping Kanan	150 cm	> 100 cm	Lulus Uji Standar
Area Samping Kiri	168 cm	> 100 cm	Lulus Uji Standar
Area Akses Depan	160 cm	> 100 cm	Lulus Uji Standar
Area Akses Belakang	172 cm	> 100 cm	Lulus Uji Standar

Berdasarkan data geometris pada Tabel 2, dapat dikonfirmasi bahwa unit genset terinstal pada area dengan dimensi ruang bebas (*clearance*) yang memadai. Kondisi tata letak ini secara efektif mencegah terjadinya sirkulasi balik gas buang (*exhaust*

recirculation) pada saluran masuk udara ambien (*air intake*), sehingga sistem isolasi termal stator terhindar dari paparan radiasi panas eksternal tambahan.

4.2. Analisis Tahanan Isolasi (IR) dan Indeks Polarisasi (PI)

Evaluasi kelayakan sistem isolasi stator pada genset tidak hanya mengandalkan nilai Tunggal dari hasil pembacaan instrument alat ukur. Mengacu pada kerangka standar IEEE 43-2024, analisis yang menyeluruh memerlukan pemahaman yang mendalam mengenai nilai Tahanan Isolasi (IR) dan perhitungan rasio Indeks Polarisasi (PI). Hasil pengujian diagnostik untuk ketiga fase stator terhadap terminal pembumian (*ground*) diukur terhadap bagian kabel tenaga antar generator, *circuit breaker* (PMT) dan Sistem Peralatan Utama (Stator) dan Alat Bantu.

4.2.1. Analisis Tahanan Isolasi pada Kabel Tenaga Antar Generator

Kabel daya (*power cables*) dan rel daya (*busbar*) yang menghubungkan terminal generator menuju Panel Kontrol Generator (PKG) merupakan komponen fundamental dalam sistem transmisi dan distribusi kelistrikan. Penurunan kualitas atau kegagalan isolasi pada segmen konduktor ini sangat rentan memicu gangguan hubung singkat satu fasa-ke-tanah (*phase-to-ground fault*) sesaat sebelum daya listrik mencapai sistem proteksi utama. Kegagalan fungsi insulasi pada penghantar penghubung ini dapat mengakibatkan lonjakan arus gangguan eksternal yang masif. Jika tidak diantisipasi, arus tersebut berisiko menimbulkan busur api listrik (*electrical arcing*) dan merusak komponen di dalam panel secara permanen (Muliadi et al., 2023). Oleh karena itu, pengujian integritas dielektrik secara berkala pada jalur kabel daya ini mutlak diperlukan guna menjamin keandalan sistem. Adapun rekapitulasi hasil pengujian dielektrik pada instalasi kabel tenaga disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Tahanan Isolasi pada Kabel Tenaga/*Busbar*

Titik Pengukuran	Tegangan Uji	Hasil Ukur (IR)	Ambang Batas	Status Evaluasi
Fasa R - Ground	1000 V DC	> 1.000 M Ω (Over Limit)	$\geq 1,0$ M Ω	Sangat Baik
Fasa S - Ground	1000 V DC	> 1.000 M Ω (Over Limit)	$\geq 1,0$ M Ω	Sangat Baik
Fasa T - Ground	1000 V DC	> 1.000 M Ω (Over Limit)	$\geq 1,0$ M Ω	Sangat Baik

Berdasarkan Tabel 3, nilai tahanan isolasi pada ketiga fase kabel tenaga menunjukkan angka yang sama, yaitu melebihi 1.000 M Ω (melebihi batas yang ditentukan oleh instrumen alat ukur. Nilai ini jauh di atas standar kelayakan minimum yang ditetapkan dalam Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUILL 2011) , yang menetapkan ambang batas minimal sebesar $\geq 1,0$ M Ω . Hal ini menunjukkan bahwa selubung polimer pelindung kabel tidak mengalami degradasi akibat panas, keretakan fisik, atau penurunan kualitas akibat kelembapan dari lingkungan pesisir, sehingga kabel tersebut sangat aman untuk digunakan dalam menyalurkan arus nominal tanpa risiko kebocoran daya.

4.2.2. Analisis Tahanan Isolasi pada *Circuit Breaker* (PMT)

Circuit Breaker atau Pemutus Tenaga (PMT) bertindak sebagai pelindung utama dalam interkoneksi. Pada unit ini, PMT yang dievaluasi adalah tipe *Molded Case Circuit Breaker* (MCCB) dengan kapasitas 630 Ampere. Pengujian tahanan isolasi dilaksanakan untuk memastikan bahwa bahan isolator pada kutub-kutub pemutus tidak mengalami proses karbonisasi akibat efek busur api (*arcing*) dari operasi sebelumnya. Hasil pengujian tahanan isolasi pada *circuit breaker* (PMT) dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Data Pengukuran Tahanan Isolasi pada *Circuit Breaker* (PMT)

Kutub Pengukuran	Tegangan Uji	Hasil Ukur (IR)	Keterangan	Status Evaluasi
Fasa R - Ground	1000 V DC	> 1.000 M Ω (Over Limit)	Kondisi Close	Sangat Baik
Fasa S - Ground	1000 V DC	> 1.000 M Ω (Over Limit)	Kondisi Close	Sangat Baik
Fasa T - Ground	1000 V DC	> 1.000 M Ω (Over Limit)	Kondisi Close	Sangat Baik

Pengujian dilakukan pada posisi PMT tertutup (*Close*), yang bertujuan untuk mengukur tahanan isolasi keseluruhan struktur MCCB terhadap body dari genset yang terhubung dengan ground. Hasil pengukuran (> 1.000 M Ω) membuktikan bahwa ruang pemadam busur api (*arc chute*) dan sekat antar-fasa pada MCCB bebas dari penumpukan residu karbon yang bersifat konduktif. Komponen PMT dinyatakan 100%

layak operasi dan siap menahan tegangan kerja minimum 220/440 Volt tanpa potensi terjadi *flashover*.

4.2.3. Analisis pada Sistem Peralatan Utama (Stator) dan Alat Bantu

Evaluasi kinerja dielektrik dan mekanis tidak hanya ditujukan pada sistem transmisi daya, tetapi juga mencakup elemen inti yang menghasilkan fluks elektromagnetik, yaitu unit Stator genset serta sistem eksitasinya. Data Pengukuran Tahanan Isolasi (IR) dan Polarisasi (PI) dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Data Pengukuran Tahanan Isolasi (IR) dan Polarisasi (PI)

Sumbu Pengujian	Hasil Ukur IR_{1min}	Hasil Ukur IR_{10min}	Nilai PI (R_{10}/R_1)	Keterangan
Fasa R - Ground	> 1000 Mega-Ohm	> 2000 Mega-Ohm	2.0	Good
Fasa S - Ground	> 1000 Mega-Ohm	> 2000 Mega-Ohm	2.0	Good
Fasa T - Ground	> 1000 Mega-Ohm	> 2000 Mega-Ohm	2.0	Good

Pengujian tahanan isolasi pada ketiga fase menghasilkan nilai resistansi yang sangat tinggi, bahkan mencapai batas maksimum dari instrumen pengujian (Over Limit > 1000 Mega-Ohm). Sesuai dengan standar terbaru IEEE 43-2024, batas minimum ketahanan absolut yang diperlukan untuk genset 400 Volt generasi terbaru hanya sebesar 100 M Ω . Hasil pengukuran tersebut juga menunjukkan bahwa sistem isolasi genset kelas H pada unit ini masih dalam kondisi yang sangat baik. Dari hasil pengukuran dapat diketahui bahwa lapisan pernis epoksi dan mika yang melapisi alur inti stator berada dalam keadaan yang optimal, tidak terdeteksi adanya masuknya partikel garam laut, molekul air, maupun tanda-tanda retak mekanis pada komponen grounding (*groundwall insulation*). Nilai arus bocor ekuatorial (*surface leakage*) hampir mendekati nol.

Nilai Indeks Polarisasi (PI) sebesar 2,0 mengonfirmasi status kelayakan operasional pada kategori Good. Namun, terdapat catatan teknis penting sesuai klausul IEEE 43-2024: apabila nilai IR_{1min} sudah sangat tinggi (>1.000 M Ω), maka arus bocor konduktif hampir mendekati nol, sehingga rasio PI 2,0 cenderung merepresentasikan kejenuhan

arus polarisasi daripada indikasi kontaminasi. Dengan demikian, sistem isolasi stator dinyatakan sangat aman.

4.2.4. Analisis Keseimbangan Tahanan Belitan (ANSI/EASA AR100-2025)

Penilaian terhadap kondisi konduktor tembaga stator dilakukan untuk mendeteksi adanya ketidakseimbangan hambatan yang dapat memicu asimetri fluks. Setelah dilakukan pengukuran kondisi konduktor tembaga stator diperoleh nilai resistansi sebagaimana disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Pemeriksaan Ketidakseimbangan Hambatan Tembaga Fasa

Titik Pengukuran Terminal	Nilai Ukur (Ω)	ANSI/EASA AR100-2025
Resistansi Fasa R - S	1.5 Ω	Deviasi Simpangan Maksimal < 2%
Resistansi Fasa S - T	1.5 Ω	Deviasi Simpangan Maksimal < 2%
Resistansi Fasa T - R	1.6 Ω	Deviasi Simpangan Maksimal < 2%

a. Kalkulasi Asimetri Deviasi Fasa

Ketidakseimbangan atau asimetri tahanan belitan dihitung dengan mencari persentase deviasi maksimum dari nilai rata-rata ketiga fasa pengujian.

Nilai Rata-rata (R_{avg}):

$$R_{avg} = \frac{1,5 + 1,5 + 1,6}{3} = 1,5333 \Omega$$

b. Deviasi Masing-masing Fasa

$$\text{Deviasi R-S} = 1,5 - 1,5333 = 0,0333 \Omega$$

$$\text{Deviasi S-T} = 1,5 - 1,5333 = 0,0333 \Omega$$

$$\text{Deviasi T-R} = 1,6 - 1,5333 = 0,0667 \Omega \text{ (Deviasi maksimum}/\Delta R_{max})$$

c. Persentase Deviasi Maksimum

$$\% \text{ Deviasi} = \left(\frac{0,0667}{1,5333} \right) \times 100\% = 4,35\%$$

Berdasarkan data pada Tabel 6, perhitungan nilai rata-rata tahanan belitan dari ketiga fasa adalah $1,5333 \Omega$. Deviasi maksimum ditemukan pada pengukuran fasa T-R dengan selisih sebesar $0,0667 \Omega$ dari nilai rata-rata, atau setara dengan 4,35%.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

1. Pengukuran tahanan isolasi (IR) pada ketiga fasa stator menunjukkan hasil yang melebihi batas maksimum instrumen ($> 1.000 \text{ M}\Omega/\text{Over Limit}$). Meskipun nilai Indeks Polarisasi (PI) tercatat pada angka 2,0 (kategori Good), sesuai dengan ketentuan standar IEEE 43-2024, tingginya nilai resistansi dasar tersebut membuktikan bahwa arus bocor (*leakage current*) yang terjadi sangat rendah. Hal ini menunjukkan bahwa selubung polimer resin epoksi Kelas H pada unit genset masih dalam kondisi sangat baik dan tidak mengalami kerusakan, meskipun beroperasi di lingkungan pesisir dengan tingkat kelembapan yang tinggi.
2. Pengukuran tahanan arus searah pada belitan stator tembaga murni menunjukkan adanya deviasi asimetri maksimum sebesar 4,35% (berada pada fasa T-R). Mengacu pada standar ANSI/EASA AR100-2025, angka tersebut masih memenuhi batas toleransi operasional yang diizinkan (maksimal 5% untuk belitan acak). Hal ini mengonfirmasi tidak adanya hubung singkat antar-belitan (*turn-to-turn short*), meskipun terdapat potensi resistansi transisi pada titik koneksi.
3. Komponen transmisi daya pendukung, seperti kabel tenaga (busbar) dan Pemutus Tenaga (MCCB), menunjukkan kondisi isolasi yang sempurna. Secara keseluruhan, unit generator STAMFORD HCI444E1 berkapasitas 350 kVA dapat diklasifikasikan dalam kondisi Layak Operasi untuk menjalankan fungsinya sebagai sistem cadangan kritis (*standby power system*).

5.2. Saran

1. Meskipun asimetri belitan sebesar 4,35% masih memenuhi standar kelulusan EASA AR100, angka ini melebihi batas ideal yang ditetapkan ($< 2\%$). Disarankan untuk melakukan pembersihan oksidasi dan pengencangan ulang

- baut (*retightening/retorquing*) secara presisi pada blok terminal, khususnya pada fasa T-R, guna mereduksi resistansi kontak dan mencegah konsentrasi panas lokal (*hot-spots*) saat beban puncak.
2. Mengingat tingginya tingkat kelembapan relatif (RH) di lingkungan operasional pesisir, pengoperasian pemanas ruang (*space heater*) internal pada generator saat unit berada dalam kondisi siaga (*standby*) mutlak harus dipertahankan. Langkah preventif ini sangat krusial untuk memastikan suhu internal di sekitar belitan stator tidak mengalami penurunan drastis hingga menyentuh batas titik embun (*dew point*). Pengaktifan *space heater* secara konsisten terbukti efektif dalam mencegah terperangkapnya uap air dan menghindari akumulasi kondensasi mikroskopis di dalam ruang mesin. Tercegahnya embun basah pada permukaan insulasi ini akan melindungi material polimer dari degradasi kualitas dielektrik dan menghambat terbentuknya jalur konduktif (*conductive path*). Apabila kondensasi ini tidak dicegah, masuknya air ke dalam pori-pori isolator berpotensi besar menurunkan nilai tahanan isolasi secara drastis, memicu arus bocor, hingga berujung pada kegagalan hubung singkat (Aditya Pasaribu Ivan et al., 2025).
 3. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengintegrasikan pengujian pelepasan muatan listrik (*Partial Discharge/PD*) dan analisis termografi inframerah (*Infrared Thermography*) saat unit beroperasi (uji dinamis). Kombinasi metode tersebut akan memberikan pemetaan makroskopis terkait sebaran stres termal yang tidak dapat dideteksi hanya dengan pengujian statis arus searah.

DAFTAR REFERENSI

- Wawoh Devi P., M. C. Glanny, Mangindaan, & Patras Lily S. (2023). Analysis Lifetime of Generator Based On It's Calculate Insulation. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer*, 13, 19–26. <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/elekdankom>
- Aditya Pasaribu Ivan, Nur Pertiwi Masitoh, Ibnu Habib Faiz, & Jonto Sinaga Desman. (2025). *ANALISIS HASIL PENGUJIAN TAHANAN ISOLASI (IR) DAN POLARIZATION INDEX (PI) PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASA 6 KV SISTEM CIRCULATING WATER PUMP (CWP) DI PLTGU PT PLN NUSANTARA POWER UNIT PEMBANGKITAN*. 6.

- BMKG. (2023). *Anomali Suhu Udara Rata-Rata Tahun 2023 - Anomali Suhu Udara - BMKG*. <https://www.bmkg.go.id/iklim/anomali-suhu-udara/anomali-suhu-udara-rata-rata-tahun-2023>
- EASA_AR100-2025_v1225-01*. (n.d.).
- IEEE SA - P43*. (n.d.). Retrieved May 11, 2026, from <https://standards.ieee.org/ieee/43/11466/>
- Mahendra, L. S., Zulkifli, Z., Herwono, B., Anggraini, Y., Sholikha, E. N., & Nisa, K. (2023). Analisis Kondisi Belitan Stator Generator Melalui Pengujian Indeks Polarisasi dan Tan Delta (Dissipation Factor). *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputasi (ELKOM)*, 5(2), 244–251. <https://doi.org/10.32528/elkom.v5i2.12716>
- Muliadi, M., Mado, I., Budiman, A., Subrianto, S., & Rantepadang, A. (2023). Dampak Keandalan Generator Set 3 Fase terhadap Kontinuitas Suplai Listrik saat Terjadi Pemadaman. *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, 22(2), 144–151. <https://doi.org/10.23917/emitor.v22i2.22728>
- Nishanth, F., Johnson, M., & Severson, E. L. (2021). A Review of Thermal Analysis and Management of Power Dense Electric Machines. *2021 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2021*. <https://doi.org/10.1109/IEMDC47953.2021.9449520>
- Rafli Ariwan, M., Pengaruh Perubahan Beban, A., Rafli Ariwan, M., Syahputra, R., Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi Jurusan Teknik Elektro, P., & Negeri Lhokseumawe, P. (2023). ANALISIS PERUBAHAN BEBAN TERHDAP KINERJA GENERATOR DI PT. PJB UBJOM PLTMG ARUN. *JURNAL TEKTR0*, 7(2).
- SCHLEICH. (2024). *IEEE 43-2024 | Standard for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*. <https://www.schleich.com/en/test-standard/ieee-43-2024/>
- Schweiger, J., & Macdonald, R. (2025). Techno-Economic Analysis of Decarbonized Backup Power Systems Using Scenario-Based Stochastic Optimization. *Energies*, 18(16). <https://doi.org/10.3390/en18164388>
- SNI 0225:2011/AMD 5:2016 Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2011 (PUILL 2011) - Amandemen 5 (2011).
- Szamel, L., & Oloo, J. (2024). Monitoring of Stator Winding Insulation Degradation through Estimation of Stator Winding Temperature and Leakage Current. *Machines*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/machines12040220>
- Zhang, J., Wang, J., Li, H., Zhang, Q., He, X., Meng, C., Huang, X., Fang, Y., & Wu, J. (2025). A Review of Reliability Assessment and Lifetime Prediction Methods for Electrical Machine Insulation Under Thermal Aging. In *Energies* (Vol. 18, Number 3). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/en18030576>
- Zhu, Z., Bosi, G., Raffo, A., Crupi, G., & Cai, J. (2024). Accurate Modeling of GaN HEMTs Oriented to Analysis of Kink Effects in S22 and h21: An Effective Machine Learning Approach. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 12, 201–210. <https://doi.org/10.1109/JEDS.2024.3364809>

Zou, Z., Liu, S., & Kang, J. (2024). Degradation Mechanism and Online Electrical Monitoring Techniques of Stator Winding Insulation in Inverter-Fed Machines: A Review. In *World Electric Vehicle Journal* (Vol. 15, Number 10). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/wevj15100444>