

Analysis Lifetime of Generator Based On It's Calculate Insulation

Analisa Umur Kerja Generator

Devi P. Wawoh, Glanny M. C. Mangindaan, Lily S. Patras

Dept. of Electrical Engineering, Sam Ratulangi University Manado, Kampus Bahu St., 95115, Indonesia

e-mails : devipwawoh@gmail.com, glanny_m@unsrat.ac.id, patraslilys48@gmail.com

Received: 12 September 2023; revised: 09 February 2024 ; accepted: 05 March 2024

Abstract — Synchronous generators are one of the components that play an important role in power generation. If there is a failure in the generator, the operation stops and will result in the cessation of business and considerable losses. The main cause of failure in generators lies in the stator winding, especially in its insulation condition. Based on the factors that cause the quality of generator insulation to decrease, it will automatically affect the workability or life of the generator. The purpose of this study is to evaluate the performance of the generator during its working life and to analyze the condition of the generator based on insulation resistance testing and delta tangent testing. From the tests that have been carried out, the results of the insulation resistance test are obtained with a resistance value of more than 1 M Ω . So it can be stated that the insulation condition is still good because it has a resistance value of more than 1 M Ω . As for the tan delta test carried out on each phase (U,V,W) from the tests results it can be concluded that the condition is in good condition because the smaller the tangent delta value, the better the generator insulation condition.

Keywords — Delta Tangent; Generator; ; Insulation Resistance; Lifetime

Abstrak — Generator sinkron merupakan salah satu komponen yang berperan penting dalam pembangkitan tenaga listrik. Jika terjadi kegagalan pada generator, operasi terhenti dan akan mengakibatkan terhentinya bisnis dan kerugian yang cukup besar. Penyebab utama kegagalan pada generator terletak pada belitan stator, terutama pada kondisi isolasinya. Berdasarkan faktor yang menyebabkan kualitas isolasi generator menurun, maka secara otomatis akan mempengaruhi kemampuan kerja atau umur pada generator. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengevaluasi kinerja generator selama umur kerjanya serta untuk menganalisa kondisi generator berdasarkan pengujian tahanan isolasi dan pengujian tangen delta. Dari pengujian yang telah dilakukan di PLTP Lahendong, didapatkan hasil pengujian tahanan isolasi dengan nilai tahanan lebih dari 1 M Ω . Sehingga dapat dinyatakan kondisi isolasinya masih baik karena memiliki nilai tahanan lebih dari 1 M Ω . Adapun pengujian tan delta yang dilakukan pada masing-masing phase (U, V, W) dari hasil pengujian bisa disimpulkan keadaannya dalam kondisi baik karena semakin kecil nilai tangen delta maka semakin baik kondisi isolasi generatornya,

Kata kunci — Generator; Umur Kerja; Tahanan Isolasi; Tangen Delta

I. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) adalah jenis pembangkit listrik yang memanfaatkan energi panas bumi sebagai sumber energi[1]. Cara yang digunakan adalah

membuat sumur dengan kedalaman yang mencapai titik panas bumi, kemudian energi panas bumi dialirkan melalui pipa untuk memutar turbin. PLTP biasanya menggunakan uap dari reservoir panas bumi untuk memutar turbin untuk menggerakkan generator dan menghasilkan listrik. Jumlah uap yang dibutuhkan harus cukup untuk menjalankan turbin dan tekanan serta suhu harus berada pada kondisi yang tepat agar uap dapat dihasilkan untuk menjalankan turbin.[2]

Pada PLTP, generator sinkron merupakan salah satu komponen yang berperan penting dalam pembangkitan tenaga listrik. Generator sinkron mengubah energi kinetik menjadi energi listrik dan menjadi pembangkit utama PLTP. Generator sebagai sumber pembangkit tenaga listrik merupakan bagian penting dari sistem pembangkit tenaga listrik. Jika generator gagal, operasi terhenti dan menyebabkan kerugian yang cukup besar. Faktor utama penyebab kegagalan generator terletak pada belitan stator. Belitan atau belitan stator harus menjadi perhatian yang sangat penting, terutama kondisi isolasinya. Jika kualitas isolasi generator menurun, secara otomatis akan berpengaruh terhadap kemampuan kerja atau umur pada generator.

A. Penelitian Terkait

Menurut Arrdy Kusumma Wijaya dkk (2022), Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) adalah jenis pembangkit listrik yang menggunakan panas bumi sebagai sumber energi. Cara pemanfaatannya adalah dengan membuat sumur dengan kedalaman mencapai titik panas bumi, kemudian panas bumi tersebut dialirkan melalui pipa-pipa untuk memutar turbin.[3]

Menurut Gilbert Hutaaruk (2010), terdapat 3 jenis teknologi pembangkit panas bumi – dikenal sebagai *geothermal power plants* – yang mengubah panas bumi menjadi listrik, yaitu *dry steam* (uap basah), *flash steam* (uap flash) dan *binary cycle* (uap biner).[4], [5]

Menurut Anhar Fauzi Muhammad dkk (2021), generator adalah salah satu peralatan utama yang bertegangan tinggi dalam sistem pembangkit tenaga listrik; sistem isolasi peralatan ini sangat penting untuk operasi normal suatu generator.[6]

Menurut Heri Priagusno dkk (2020), sangat penting bagi kehandalan pasokan listrik di seluruh negara, terutama di Indonesia untuk menghindari kekurangan pasokan yang menyebabkan sistem pemadaman. Dengan demikian, kehandalan sebuah sistem pembangkit listrik sangat diharapkan. Generator adalah salah satu peralatan yang paling penting dalam pembangkit listrik. Sebelum generator

beroperasi, nilai resistansi isolasi harus diperiksa untuk mendapatkan nilai minimum yang sesuai dengan standar.[7]

Menurut Mohammad Amir dan I Wayan Angga Juliawan (2018), banyak faktor yang menyebabkan kegagalan atau kerusakan generator terjadi pada belitan stator. Faktor tekanan listrik, panas, dan mekanis adalah salah satu dari banyak faktor yang menyebabkan kualitas isolasi generator menurun.[8]

B. Generator

Generator adalah mesin listrik yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik[9] yang memanfaatkan putaran turbin untuk membangkitkan listrik. Generator didesain untuk menghasilkan tenaga yang dapat diandalkan dan efisien berdasarkan kondisi yang diminta oleh PLN yaitu tegangan, daya dan frekuensi.

Generator dapat beroperasi dengan baik secara paralel dengan unit lain yang sejenis, baik dengan beban yang sama maupun berbeda serta dengan *power factor* yang sama maupun berbeda, baik pada posisi *lagging* maupun *leading*[10].

Kurva kapabilitas generator merepresentasikan batasan operasi generator pada kondisi amannya sehingga diperlukan batasan-batasan yang perlu diatur. Generator haruslah beroperasi pada batasan-batasan yang telah ditentukan baik tegangan, frekuensi maupun air pendinginnya[10]. Operasi generator di luar kurva dapat mempengaruhi usia generator.

Generator terdiri dari beberapa jenis yaitu generator sinkron, generator induksi, generator kompak, generator magnet permanen, generator diesel, generator gas, generator mikrohidro, generator tenaga surya, generator magnetik terangsang.

Generator sinkron (sering disebut alternator) adalah mesin listrik arus bolak-balik (AC) yang mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik dengan adanya induksi medan magnet[11], [12].

C. Komponen Generator

Di dalam generator terdapat beberapa komponen, di antaranya adalah sebagai berikut.

1) Generator Stator

Stator pada generator sinkron adalah gulungan kawat penghantar yang ditempatkan pada alur-alur inti besi. Di sanalah terbentuk GGL induksi karena medan magnet rotor memotong kumparan stator.

2) Generator Rotor

Gulungan rotor dicocokkan ke dalam ruangan-ruangan (*slot*) yang terdapat pada *shaft* rotor. Insulator *slot* dimasukkan ke dalam *slot* untuk menginsulasinya dan konduktor ke dalam *slot* sesuai urutannya.

3) Brushless Exciter

Brushless exciter dieksitasi oleh *Permanent Magnet Generator* (PMG). Arus AC generator membangkitkan daya AC dan menyuplai ke *rotating rectifier*. Kemudian *rotating rectifier* menyuplai arus DC yang disearahkan untuk sinkronisasi generator sebagai arus eksitasinya. Daya generator diatur dengan menyesuaikan arus eksitasi menggunakan *Automatic Voltage Regulator* (AVR).

4) Sistem Pendingin Generator

Sistem udara pendingin generator yang digunakan ialah aliran tunggal. Udara pendingin disirkulasikan di dalam generator dengan kipas aliran axial yang berada pada kedua sisi *shaft* rotor dan didinginkan kembali di dalam pendingin udara yang tersusun pada bagian stator *frame*.

5) Rotor *Earthing Detector*

Earthing detector digunakan untuk memeriksa pentanahan rotor dari generator utama dan sistem eksitasi.

6) Alat Pendingin Udara (*Air Cooler*)

Pendingin udara merupakan pipa dengan sirip-sirip, dengan pipa menopang pipa pendingin dengan sirip-sirip sedangkan rangkanya menopang seluruh pipa dan ruang air untuk menampung air pendingin yang merupakan komponen utama dalam alat ini.

7) *Space Heater*

Pada saat generator berhenti beroperasi, temperatur di bagian dalamnya menurun. Jika temperatur pada bagian dalam turun lebih rendah dibandingkan titik embun, udara basah yang terkandung pada mesin akan menjadi embun yang akan menempel pada permukaan mesin dan berbahaya bagi peralatan listrik. Hal ini tidak hanya membawa keburukan tetapi juga dapat menyebabkan karat pada alat. Oleh karena itu perlu adanya alat ini untuk menjaga temperatur tidak turun di bawah titik embun.

8) *Bearing*

Bearing menggunakan sistem pelumasan umpan oil paksa untuk pelumasan *bearing* dan pendingin. Pada permukaan dalam *bearing* terdapat saluran yang bertujuan untuk saluran minyak pelumas *bearing*.

D. Faktor yang Mempengaruhi Umur Generator

Umur generator dapat dipengaruhi oleh banyak faktor. Berikut beberapa faktor yang dapat mempengaruhi umur kerja generator.

1) *Suhu Operasional*

Suhu pengoperasian generator merupakan faktor penting yang dapat mempengaruhi masa pakai generator. Generator yang terlalu panas atau terlalu dingin dapat menyebabkan perubahan pada bagian-bagian tertentu seperti isolasi kabel dan komponen lainnya. Kondisi suhu yang ekstrim juga dapat mempercepat keausan dan dapat mengurangi umur pakai generator.

2) *Beban Kerja*

Beban kerja atau kapasitas generator adalah faktor yang berpengaruh terhadap umur kerja generator. Jika generator terus-menerus bekerja pada beban yang tinggi dan melebihi batas kapasitasnya, hal tersebut dapat menyebabkan stres mekanis dan termal berlebihan yang dapat mempercepat keausan dan penurunan umur kerja generator.

3) *Kebutuhan Perawatan dan Pemeliharaan*

Perawatan dan pemeliharaan yang tepat adalah faktor penting untuk menjaga umur generator. Ketidaktepatan terhadap jadwal pemeliharaan rutin, kurangnya perawatan preventif, atau ketidakteraturan dalam memeriksa dan membersihkan generator dapat menyebabkan kegagalan komponen yang dapat memperpendek umur kerja generator.

TABEL I
KELAS ISOLASI

Kelas	Suhu Kerja Maksimum (°C)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	>180

E. Isolasi

Agar peralatan listrik bertegangan tinggi dapat beroperasi dengan baik dalam sistem ketenagalistrikan, seperti generator, trafo, isolator, kabel, dan lainnya, peralatan-peralatan tersebut memiliki sistem tahanan yang dikenal sebagai isolasi untuk memisahkan bagian bertegangan dari bagian bertegangan lainnya atau bagian netral[6].

Untuk memperbaiki suatu peralatan, kualitas isolasi dari peralatan tertentu harus diperhatikan. Salah satu cara untuk mengetahui adanya arus bocor pada isolasi belitan adalah dengan memberikan tegangan tinggi pada isolasi belitan. Pengujian tersebut menunjukkan kualitas isolasi terhadap tegangan kerja yang diterima[6].

Nilai arus bocor yang didapatkan selama pengujian digunakan sebagai indikator ketahanan kualitas isolasi terhadap tegangan kerja yang diterima. Faktor disipasi, juga dikenal sebagai Tan Delta, adalah sebuah parameter yang menunjukkan seberapa efisien isolasi yang digunakan. Kontaminasi isolasi dapat dideteksi dengan sangat baik dengan pengujian Tan Delta[13]. Penurunan kualitas isolasi akan menyebabkan nilai tan delta semakin tinggi[14].

Untuk mendapatkan nilai tan delta digunakan persamaan (1) sebagai berikut[8].

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega \cdot C_p \cdot R_p} \tag{1}$$

Dimana:

Tan δ = faktor disipasi

ω = 2πf

C_p = kapasitansi (F)

R_p = tahanan (Ω)

Persamaan (2) berikut dapat digunakan untuk menghitung standar minimal hasil pengukuran tahanan isolasi suatu peralatan.

$$R = \frac{(1000 \cdot U)}{Q} \cdot U \cdot 2.5 \tag{2}$$

Dimana:

R = tahanan isolasi minimal (Ω)

U = tegangan kerja (V)

Q = tegangan megger (V)

1000 = bilangan tetap

2.5 = faktor keamanan

Banyak hal yang dapat menentukan apakah suatu isolasi masih layak atau tidak. Daya hambat, kekakuan listrik, histeris dielektrik, dan keuletan merupakan persyaratan bahan isolasi. Bahan isolasi untuk mesin listrik ditinjau dari kestabilan termalnya dibagi menjadi beberapa kelas. Klasifikasi isolasi menurut IEC ditunjukkan pada tabel I[15].

Kelas Y, suhu kerjanya sampai dengan maksimum 90 °C. Bahan yang termasuk dalam kelas Y yaitu bahan berserat

TABEL II
PENGUJIAN TAHANAN ISOLASI

	Tahanan Isolasi	Tegangan Megger	Toleransi
Belitan stator generator	22.3 GΩ	1000 V	>12 MΩ
Belitan rotor generator	39.4 GΩ	500 V	>12 MΩ
Belitan stator eksiter	32.4 GΩ	500 V	>1 MΩ
Belitan stator PMG	86.9 GΩ	500 V	>1 MΩ
Exciter side bearing stand	41.7 GΩ	500 V	>1 MΩ
Generator space heater	9.38 GΩ	500 V	>1 MΩ
Exciter space heater	296 GΩ	500 V	>1 MΩ

(Sumber : PT. Pertamina Geothermal Energy Lahendong)

organis, yang tidak dicelup dalam bahan pernis atau bahan pencelup lainnya[16].

Kelas A, suhu kerjanya sampai dengan maksimum 150 °C. Bahan berserat kelas Y yang terndam dalam cairan dielektrikum, pernis aspal, minyak trafo, email yang dicampur dengan vernis, atau poliamil termasuk dalam kelas A[16].

Kelas E, suhu kerjanya sampai dengan maksimum 120 °C. Bahan kelas E termasuk bahan penyekat kawat enamel yang menggunakan bahan pengikat polyvinilformal, polyurethane, damar-epoxy, perinaks, tekstolit, film triacetate, dan serat polietilen terphthalate[16].

Kelas B, suhu kerjanya sampai dengan maksimum 130 °C. Bahan non-organik yang biasanya tahan panas dan dicelup atau direkat dengan pernis atau kompon termasuk dalam kelas B[16].

Kelas F, suhu kerjanya sampai dengan maksimum 155 °C. Bahan bukan organik yang dicelup atau direkat dengan epoksi, poliurethan, atau vernis yang tahan panas tinggi termasuk dalam kelas F[16].

Kelas H, suhu kerjanya sampai dengan maksimum 180 °C. Bahan Kelas H adalah bahan yang terbuat dari mika, asbes, atau gelas fiber yang dicelupkan dalam silikon tanpa campuran bahan berserat[16].

Kelas C, suhu kerjanya di atas 180 °C. Bahan anorgnaik yang tidak dicelup dan tidak terikat dengan bahan organik termasuk dalam kelas C[16].

II. BAHAN DAN METODE

A. Spesifikasi Generator

Generator dibuat, disuplai dan dipasang oleh Fuji Electric Company. Adapun kapasitas produksi generator output yaitu 25.3 MVA (sesuai dengan batasan nameplate yang digaransikan), frekuensi 50 Hz, tiga fasa, tegangan armature 11 kV dengan suhu udara pendingin 40 °C. Generator dapat menghasilkan daya aktif sebesar 20 MW dengan kecepatan 3000 rpm dan lagging 0.85.

B. Tahanan Isolasi

Data tahanan isolasi generator dapat bervariasi tergantung pada ukuran, jenis, dan kondisi generator tertentu. Tahanan isolasi generator mengukur kemampuan isolasi listrik dari lilitan stator dan rotor generator terhadap tanah atau antara fase-fase. Nilai tahanan isolasi yang tinggi menunjukkan isolasi yang baik dan kurangnya kebocoran arus listrik.

Kita dapat menghitung nilai tahanan isolasi dengan menggunakan persamaan (2).

1) Perhitungan nilai tahanan isolasi pada belitan stator generator :

$$R = \frac{(1000-11000)}{1000} \cdot 11000 \cdot 2.5$$

$$= 11000 \cdot 11000 \cdot 2.5$$

$$= 3025 \times 10^5 \Omega$$

2) Perhitungan nilai tahanan isolasi pada belitan stator eksiter

$$R = \frac{(1000-11000)}{500} \cdot 11000 \cdot 2.5$$

$$= 22000 \cdot 11000 \cdot 2.5$$

$$= 605 \times 10^6 \Omega$$

C. Tan Delta

Tidak ada standar internasional untuk pengujian belitan penuh. Standar internasional untuk kumparan atau batang belitan menggunakan standar EN 50209 sebagai panduan. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi keadaan isolasi dinding utama belitan stator.

Menurut IEEE.62.2 halaman 28; sebagai panduan umum, tip-up pada belitan mika epoksi (atau poli ester) mungkin sekitar 1% tergantung pada efek lapisan pengontrol tegangan dan untuk tip-up tidak boleh lebih 0.5%. Untuk mendapatkan nilai tan delta, dapat digunakan persamaan (1). Sedangkan untuk menentukan nilai R_p pada persamaan (1), dapat digunakan rumus (3) sebagai berikut.

$$R_p = \frac{V}{I} \tag{3}$$

Dimana :

V = tegangan (V)

I = arus (A)

Berdasarkan tabel III, dengan menggunakan persamaan (3) dan persamaan (1), kita dapat menghitung dan mengetahui nilai tan delta phase U.

$$1) R = \frac{1199.77V}{0.0379651A}$$

$$= 31601.91 \Omega$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{1}{314 \cdot 1.00719 \times 10^{-7} \cdot 31601.91}$$

$$= \frac{1}{0.99943461}$$

$$= 1.00057$$

TABEL III
DATA TAN DELTA PHASE U

No.	Tegangan Uji (V)	Arus (A)	Kapasitansi (F)
1	1199.7	0.0379651	1.00719×10^{-7}
2	2489.05	0.0788554	1.00838×10^{-7}
3	3790.33	0.120246	1.00992×10^{-7}
4	4977.54	0.158135	1.01131×10^{-7}
5	6259.37	0.199435	1.01433×10^{-7}

(Sumber : PT. Pertamina Geothermal Energy Lahendong)

$$2) R = \frac{2489.05V}{0.0788554A}$$

$$= 31564.73 \Omega$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{1}{314 \cdot 1.00838 \times 10^{-7} \cdot 31564.73}$$

$$= \frac{1}{0.99943821}$$

$$= 1.00056$$

$$3) R = \frac{3790.33V}{0.120246A}$$

$$= 31521.46 \Omega$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{1}{314 \cdot 1.00992 \times 10^{-7} \cdot 31521.46}$$

$$= \frac{1}{0.9995924}$$

$$= 1.00041$$

$$4) R = \frac{4977.54V}{0.158135A}$$

$$= 31476.52 \Omega$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{1}{314 \cdot 1.01131 \times 10^{-7} \cdot 31476.52}$$

$$= \frac{1}{0.99954111}$$

$$= 1.00046$$

$$5) R = \frac{6259.37V}{0.199435A}$$

$$= 31385.51 \Omega$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{1}{314 \cdot 1.01433 \times 10^{-7} \cdot 31385.51}$$

$$= \frac{1}{0.9996273}$$

$$= 1.00037$$

Berdasarkan tabel IV, dengan menggunakan persamaan (3) dan persamaan (1), kita dapat menghitung dan mengetahui nilai tan delta phase V.

$$1) R = \frac{1196.87V}{0.037837A}$$

$$= 31632.18 \Omega$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{1}{314 \cdot 1.00630 \times 10^{-7} \cdot 31632.18}$$

$$= \frac{1}{0.99950792}$$

$$= 1.00049$$

TABEL IV
DATA TAN DELTA PHASE V

No.	Tegangan Uji (V)	Arus (A)	Kapasitansi (F)
1	1196.87	0.0378371	1.00630×10^{-7}
2	2502.64	0.0792138	1.00753×10^{-7}
3	3793.78	0.120259	1.00898×10^{-7}
4	4990.67	0.158473	1.01071×10^{-7}
5	6283.09	0.200147	1.01360×10^{-7}

(Sumber : PT. Pertamina Geothermal Energy Lahendong)

$$\begin{aligned}
 2) \quad R &= \frac{2502.64V}{0.0792138A} \\
 &= 31593.48 \Omega \\
 \tan \delta &= \frac{1}{\frac{314 \cdot 1.00753 \times 10^{-7} \cdot 31593.48}{1}} \\
 &= \frac{1}{0.99950529} \\
 &= 1.00049
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2) \quad R &= \frac{2498.23V}{0.0790519A} \\
 &= 31602.52 \Omega \\
 \tan \delta &= \frac{1}{\frac{314 \cdot 1.00719 \times 10^{-7} \cdot 31602.52}{1}} \\
 &= \frac{1}{0.994539} \\
 &= 1.00055
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3) \quad R &= \frac{3793.78V}{0.120259A} \\
 &= 31546.74 \Omega \\
 \tan \delta &= \frac{1}{\frac{314 \cdot 1.00898 \times 10^{-7} \cdot 31546.74}{1}} \\
 &= \frac{1}{0.99946293} \\
 &= 1.00054
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3) \quad R &= \frac{3800.05V}{0.120437A} \\
 &= 31552.18 \Omega \\
 \tan \delta &= \frac{1}{\frac{314 \cdot 1.00876 \times 10^{-7} \cdot 31552.18}{1}} \\
 &= \frac{1}{0.99941732} \\
 &= 1.00058
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 4) \quad R &= \frac{4990.67V}{0.158473A} \\
 &= 31492.24 \Omega \\
 \tan \delta &= \frac{1}{\frac{314 \cdot 1.01071 \times 10^{-7} \cdot 31492.24}{1}} \\
 &= \frac{1}{0.99944698} \\
 &= 1.00055
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 4) \quad R &= \frac{4985.06V}{0.158219A} \\
 &= 31507.34 \Omega \\
 \tan \delta &= \frac{1}{\frac{314 \cdot 1.01031 \times 10^{-7} \cdot 31507.34}{1}} \\
 &= \frac{1}{0.99953047} \\
 &= 1.00047
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 5) \quad R &= \frac{6283.09V}{0.200147A} \\
 &= 31392.37 \Omega \\
 \tan \delta &= \frac{1}{\frac{314 \cdot 1.01360 \times 10^{-7} \cdot 31392.37}{1}} \\
 &= \frac{1}{0.99912621} \\
 &= 1.00087
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 5) \quad R &= \frac{6333.18V}{0.201612A} \\
 &= 31412.71 \Omega \\
 \tan \delta &= \frac{1}{\frac{314 \cdot 1.01330 \times 10^{-7} \cdot 31412.71}{1}} \\
 &= \frac{1}{0.99947766} \\
 &= 1.00052
 \end{aligned}$$

Berdasarkan tabel V, dengan menggunakan persamaan (3) dan (1), kita dapat menghitung nilai tan delta phase W.

$$\begin{aligned}
 1) \quad R &= \frac{1201.96V}{0.0379874A} \\
 &= 31641.01 \Omega \\
 \tan \delta &= \frac{1}{\frac{314 \cdot 1.00599 \times 10^{-7} \cdot 31641.01}{1}} \\
 &= \frac{1}{0.99947894} \\
 &= 1.00052
 \end{aligned}$$

TABEL V
DATA TAN DELTA PHASE W

No.	Tegangan Uji (V)	Arus (A)	Kapasitansi (F)
1	1201.96	0.0379874	1.00599×10^{-7}
2	2498.24	0.0790519	1.00719×10^{-7}
3	3800.05	0.120437	1.00876×10^{-7}
4	4985.06	0.158219	1.01031×10^{-7}
5	6333.18	0.201612	1.01330×10^{-7}

(Sumber : PT. Pertamina Geothermal Energy Lahendong)

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Data Tahanan Isolasi Generator

Dari data hasil pengujian tahanan isolasi akan dilakukan evaluasi apakah nilai tahanan isolasi generator masih sesuai dengan standar. Tabel VI menunjukkan data hasil pengujian tahanan isolasi.

Berdasarkan hasil pengujian tahanan isolasi, dapat dinyatakan bahwa generator dalam kondisi baik jika memiliki nilai tahanan lebih dari 1 MΩ.

TABEL VI
DATA TAHANAN ISOLASI GENERATOR

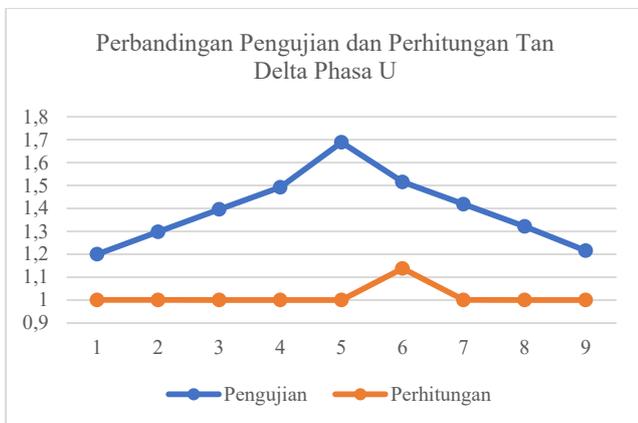
Komponen	Tahanan Isolasi
Generator stator winding	22.3 GΩ
Generator and exciter rotor winding	39.4 GΩ
Exciter stator winding	32.4 GΩ
PMG stator winding	86.9 GΩ
Exciter side bearing stand	41.7 GΩ
Generator space heater	9.38 GΩ
Exciter space heater	296 GΩ

TABEL VII
DATA TAN DELTA PHASE U

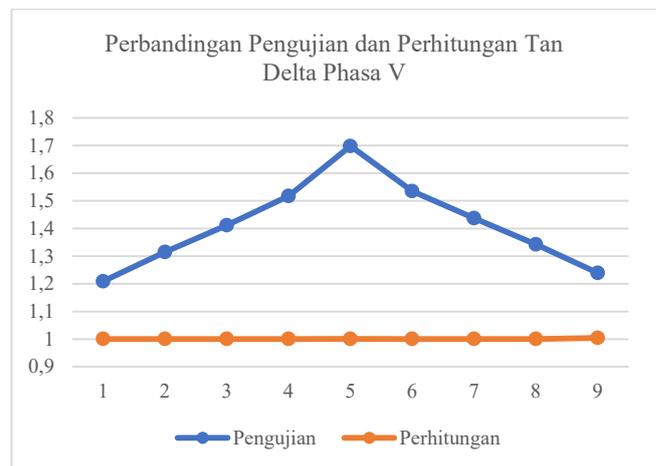
No.	Tan δ	
	Pengujian	Perhitungan
1	1.20034	1.00057
2	1.29818	1.00056
3	1.39606	1.00041
4	1.49274	1.00046
5	1.68889	1.00037
6	1.51565	1.13822
7	1.41896	1.00062
8	1.32163	1.00042
9	1.21599	1.00038

TABEL VIII
DATA TAN DELTA PHASE V

No.	Tan δ	
	Pengujian	Perhitungan
1	1.209	1.00049
2	1.31509	1.00049
3	1.41184	1.00054
4	1.51788	1.00055
5	1.69827	1.00087
6	1.53535	1.00054
7	1.43746	1.00042
8	1.3427	1.00046
9	1.23932	1.0044



Gambar 1. Grafik Data Nilai Pengujian Dan Perhitungan Tan Delta Phase U



Gambar 2
Grafik Data Nilai Pengujian dan Perhitungan Tan Delta Phase V

B. Tan Delta

Tan delta merupakan nilai yang menjelaskan ketidakidealan dari kapasitansi isolasi generator. Pengujian tan delta adalah pengukuran kerugian dielektrik yang menentukan kualitas isolasi generator. Dari data hasil pengujian dan pengukuran tan delta, akan dievaluasi apakah nilai tan delta sesuai standard yang ada. Berdasarkan hasil pengujian dan pengukuran tan delta, kualitas isolasi suatu generator dapat dinyatakan dalam kondisi yang baik jika hasil pengukurannya $\leq 1\%$. Data hasil pengujian dan perhitungan tan delta dapat dilihat pada tabel VII.

Berdasarkan data pengujian dan perhitungan tan delta phase U, dapat dilihat dengan grafik seperti pada gambar 1. Dimana nilai puncak ada pada pengujian kelima dan perhitungan keenam.

Pada tabel VII Data Tan Delta Phase U menunjukkan data nilai tan delta phase U yang digunakan pada gambar 1. Dapat dilihat pada grafik nilai tan delta mengalami kenaikan dan penurunan. Dari hasil pengujian dan hasil perhitungan bisa disimpulkan isolasi generator masih dalam keadaan yang baik. Karena semakin kecil nilai tangen deltanya maka semakin baik kondisi isolasi generator tersebut.

Berdasarkan data pengujian dan perhitungan tan delta phase V, dapat dilihat dengan grafik pada gambar 2, dimana pada

pengujian kelima merupakan nilai tertinggi yang selanjutnya kembali menurun, sedangkan untuk data perhitungannya cenderung sama.

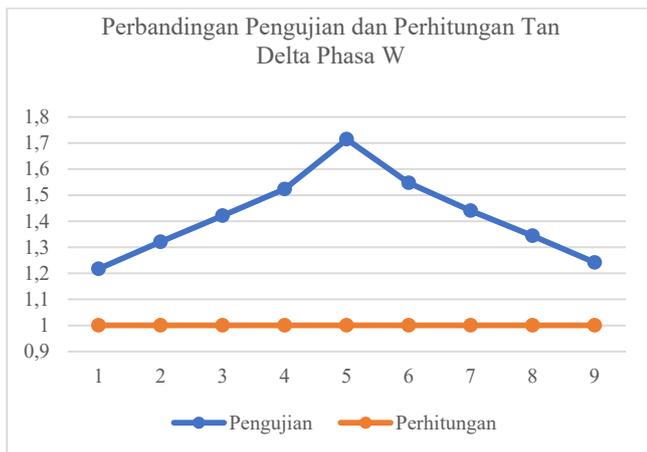
Pada tabel VIII Data Tan Delta Phase V menunjukkan data nilai tan delta phase V yang digunakan pada gambar 2. Dapat dilihat pada grafik nilai tan delta mengalami kenaikan dan penurunan. Dari hasil pengujian dan hasil perhitungan bisa disimpulkan isolasi generator masih dalam keadaan yang baik. Karena semakin kecil nilai tangen deltanya maka semakin baik kondisi isolasi generator tersebut.

Berdasarkan data pengujian dan perhitungan tan delta phase W, dapat dilihat dengan grafik pada gambar 3. Dimana nilai puncak atau tertinggi terdapat pada pengujian kelima. Sedangkan nilai perhitungan yang diperoleh dari sembilan data cenderung sama.

Pada tabel IX Data Tan Delta Phase W menunjukkan data nilai tan delta phase W yang digunakan pada gambar 3. Dapat dilihat pada grafik nilai tan delta mengalami kenaikan dan penurunan. Dari hasil pengujian dan hasil perhitungan bisa disimpulkan isolasi generator masih dalam keadaan yang baik.

TABEL IX
DATA TAN DELTA PHASE W

No.	Tan δ	
	Pengujian	Perhitungan
1	1.209	1.00049
2	1.31509	1.00049
3	1.41184	1.00054
4	1.51788	1.00055
5	1.69827	1.00087
6	1.53535	1.00054
7	1.43746	1.00042
8	1.3427	1.00046
9	1.23932	1.0044



Gambar 3. Grafik Data Nilai Pengujian dan Perhitungan Tan Delta Phase W

Karena semakin kecil nilai tangen deltanya maka semakin baik kondisi isolasi generator tersebut.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa dan pembahasan dapat diperoleh kesimpulan bahwa generator di PLTP Lahendong Unit 5 dioperasikan sejak tahun 2016 sampai saat ini (tahun 2023) dan masih bekerja dengan baik dengan *maintenance* yang dilakukan setiap sebulan sekali. Adapun pengujian tahanan isolasi generator yang dilakukan yaitu untuk mengetahui adanya penurunan tahanan isolasi dan untuk mendeteksi adanya kelemahan pada generator. Berdasarkan pengujian tahanan isolasi dan pengujian tan delta, kondisi isolasi generator di PLTP Lahendong Unit 5 masih dalam kondisi yang baik karena masih sesuai dengan nilai standar.

B. Saran

Untuk mengetahui kondisi isolasi suatu mesin listrik, sebaiknya dilakukan juga pengujian indeks polarisasi agar dapat mengetahui dengan jelas mengenai kualitas isolasi mesin listrik khususnya isolasi pada generator. Sebagai saran juga untuk perusahaan, dalam suatu pembangkit listrik bisa dikatakan tidak mungkin apabila tidak pernah mengalami gangguan dari awal beroperasinya suatu pembangkit. Oleh karena itu, kiranya pihak perusahaan bisa lebih terbuka lagi mengenai data-data yang dibutuhkan khususnya data gangguan dan *maintenance* untuk mempermudah peneliti dalam mengumpulkan dan mengolah data karena melalui penelitian ini juga kiranya dapat dijadikan bahan evaluasi perusahaan agar dapat meningkatkan pemeliharaan generator untuk meminimalisir gangguan-gangguan yang mungkin terjadi pada generator di masa yang akan datang.

V. KUTIPAN

- [1] N. S. Khadijah, "ANALISIS PEMBANGUNAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI (PLTP) MELALUI INSENTIF FISKAL DALAM Mendukung KETAHANAN ENERGI INDONESIA," *Ketahanan Energi*, vol. 3, no. 2, Art. no. 2, Dec. 2018, Accessed: Jul. 22, 2023. [Online]. Available: <https://jurnalprodi.idu.ac.id/index.php/KE/article/view/272>
- [2] R. Mahmudah and D. Ichsani, "Re-Design dan Modifikasi Generator Cooler Heat Exchanger Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) untuk Meningkatkan Performasi," *J. Tek. ITS SINTA 4 11815*, vol. 2, no. 3, pp. B409–B413, Dec. 2013, doi: 10.12962/j23373539.v2i3.5118.
- [3] A. K. Wijaya, D. Nugroho, and A. A. Nugroho, "Analisa Efisiensi Kinerja Generator G-101 Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi," *TRANSISTOR Elektro Dan Inform.*, vol. 4, no. 1, Art. no. 1, Apr. 2022, doi: 10.30659/ei.4.1.43-48.
- [4] Gilbert Hutaaruk, "PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI," *Bupatitaput*. Jun. 05, 2010. Accessed: Aug. 05, 2023. [Online]. Available: <https://bupatitaput.wordpress.com/2010/06/05/pembangkit-listrik-tenaga-panas-bumi/>
- [5] L. J. D. Atmanto, "PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI (PLTP) DAN KENDALA PEMBANGUNANNYA," *Orbith Maj. Ilm. Pengemb. Rekayasa Dan Sos.*, vol. 11, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2015, doi: 10.32497/orbith.v11i1.373.
- [6] A. F. Muhammad, U. Latifa, and I. A. Bangsa, "ANALISIS ISOLASI PADA GENERATOR PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR SAGULING," *Power Elektron. J. Orang Elektro*, vol. 10, no. 2, Art. no. 2, Jul. 2021, doi: 10.30591/polektr.v10i2.2584.
- [7] H. Priagusno, M. Zr, S. I. Rezkiika, and S. Novaliamda, "Analisa Nilai Resistansi Isolasi Generator 200 MW Dengan Media Pendingin Hydrogen Dan Air Demin," *RELE Rekayasa Elektr. Dan Energi J. Tek. Elektro*, vol. 3, no. 1, Art. no. 1, Jul. 2020, doi: 10.30596/rele.v3i1.5231.
- [8] M. Amir and I. W. A. Juliawan, "ANALISA PENGARUH PARTIAL DISCHARGE DAN TAN δ TERHADAP UMUR ISOLASI BELITAN STATOR AKIBAT IKATAN KUMPARAN GENERATOR LONGGAR," *SINUSOIDA*, vol. 20, no. 4, pp. 1–11, Oct. 2018, doi: 10.37277/s.v20i4.814.
- [9] 14524044 Anisa Rani Utomo, "STUDI ANALISIS TAHANAN ISOLASI 90 MW SYNCHRONOUS GENERATOR DENGAN MENGGUNAKAN METODE REGRESI LINIER (KASUS : PT.PLN (PERSERO) PEMBANGKIT SUMATERA BAGIAN SELATAN UBP BANDAR LAMPUNG)," Aug. 2018, Accessed: Jul. 22, 2023. [Online]. Available: <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/10197>
- [10] A Sutrisno, M Mukhlis, dkk, *Buku Pintar Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Lahendong Unit 5 & 6 (2 x20 MW)*, 1st ed.
- [11] Z. Anthony, *Mesin Listrik Dasar*. ITP Press.
- [12] R. Septiyan, M. W. K, and B. Sugeng, "Analisa Hilang Daya Pada Generator Sinkron 3 Fasa (6,6 KV) 11 MVA TYPE 1DT4038-3EE02-Z," *J. Tek. Elektro Uniba JTE UNIBA*, vol. 4, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2019, doi: 10.36277/jteuniba.v4i1.45.

- [13] A. Multi and S. P. Handojo, "ANALISIS PENGUKURAN TANGEN DELTA PADA BAHAN ISOLASI GENERATOR," *SAINSTECH J. Penelit. DAN Pengkaj. SAINS DAN Teknol.*, vol. 32, no. 1, pp. 9–23, Mar. 2022, doi: 10.37277/stch.v32i1.1216.
- [14] A. Fernandes and S. Samsurizal, "Prediksi Sisa Umur Generator Dengan Metode Pengujian Dielektrik Pada Stator Generator Unit 2 PLTU Ombilin," *KILAT*, vol. 12, no. 1, Art. no. 1, May 2023.
- [15] "Kelas Isolasi | PDF," *Scribd*. <https://id.scribd.com/doc/315861753/kelas-isolasi> (accessed Sep. 06, 2023).
- [16] "Pembagian Kelas Bahan Penyekat - TN Elektro." <https://www.tneutron.net/elektro/pembagian-kelas-bahan-penyekat/> (accessed Jul. 24, 2023).



Devi Patrisia Wawoh, penulis adalah anak kedua dari dua bersaudara, lahir di Tomohon, Sulawesi Utara pada tanggal 31 Desember 2000. Penulis menempuh pendidikan pertama di sekolah Taman Kanak-Kanak Kartika Wirabuana VI pada tahun 2006 sampai 2007, kemudian melanjutkan pendidikan di Sekolah Dasar Katolik 13 St. Yosep Manado pada tahun 2007 sampai 2013, setelah itu masuk

ke Sekolah Menengah Pertama Katolik St. Theresia pada tahun 2013 sampai 2016, kemudian melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Atas Negeri 9 Binsus Manado pada tahun 2016 hingga lulus di tahun 2019. Pada tahun 2019 penulis memulai pendidikan di Universitas Sam Ratulangi, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Elektro dengan mengambil konsentrasi minat Teknik Tenaga Listrik pada tahun 2021. Dalam menempuh pendidikan, penulis telah melaksanakan Kerja Prakterk di PT. Jago Elfah Anugerah pada bulan Juni-Agustus tahun 2022, dan mengikuti Kuliah Kerja Terpadu (KKT) pada bulan Agustus-September 2022 pada KKT 132 Posko Kema II, Kecamatan Kema, Kabupaten Minahasa Utara. Kemudian pada bulan Juni-Juli tahun 20223 melakukan penelitian dan pengambilan data di PT. Pertamina Geothermal Energy Lahendong. Penulis juga merupakan anggota bidang dalam kepengurusan organisasi Himpunan Mahasiswa Elektro Universitas Sam Ratulangi.