

TUGAS AKHIR

PENGARUH KELEMBABAN UDARA TERHADAP KELAYAKAN TAHANAN ISOLASI STATOR PADA GENERATOR 60 MW PLTA PANGLIMA BESAR SOEDIRMAN MRICA DENGAN MENGGUNAKAN UJI *POLARIZATION INDEX*

*Diusulkan untuk melengkapi persyaratan memperoleh gelar sarjana (S1) di
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan
Agung*



DISUSUN OLEH

ADELIA JANIS PARAHITA

NIM 30602000077

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2023

FINAL PROJECT

**THE EFFECT OF AIR HUMIDITY ON THE FEASIBILITY OF INSULATION
RESISTANCE OF STATOR GENERATOR 60 MW AT PANGLIMA BESAR
SOEDIRMAN MRICA HYDROPOWER PLANT USING *POLARIZATION
INDEX TEST***

*Proposed to complete the requirement to obtain a bachelor's degree (S1) at a
Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Universitas Islam Sultan Agung*



**ARRANGED BY :
ADELIA JANIS PARAHITA**

NIM 30602000077

**MAJORING OF ELECTRICAL ENGINEERING
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2023

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**PENGARUH KELEMBABAN UDARA TERHADAP KELAYAKAN TAHANAN ISOLASI STATOR PADA GENERATOR 60 MW PLTA PANGLIMA BESAR SOEDIRMAN MRICA MENGGUNAKAN UJI *POLARIZATION INDEX***” ini disusun oleh :

Nama : Adelia Janis Parahita

NIM 30602000077

Program Studi : Teknik Elektro

Telah disetujui untuk siding/ujia oleh dosen pembimbing pada :

Hari : Jumat

Tanggal : 18 Agustus 2023

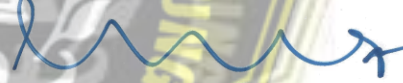
Pembimbing I

Pembimbing II



GUNAWAN S.T., M.T.

NIDN. 0607117101



PROF. DR. IR. H. MUHAMAD HADDIN, M.T.

NIDN. 0618066301

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Elektro



JENNY PUTRI HAPSARI, S.T., MT.

10/09/23

NIP. 0607018501.

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**PENGARUH KELEMBABAN UDARA TERHADAP KELAYAKAN TAHANAN ISOLASI STATOR PADA GENERATOR 60 MW PLTA PANGLIMA BESAR SOEDIRMAN MRICA**

MENGGUNAKAN UJI *POLARIZATION INDEX*” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Jumat

Tanggal : 18 Agustus 2023

Tim Penguji

Tanda Tangan

Dr. Bustanul Arifin, S.T., M.T.

NIDN : 0614117701

Ketua

..... 07 Sept 2023.....

Ir. Ida Widiastuti, M.T.

NIDN : 0005036501

Penguji I

Munaf Ismail, S.T., M.T.

NIDN : 0613127302

Penguji II

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Adelia Janis Parahita

NIM 30602000077

Fakultas : Teknologi Industri

Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) **Teknik Elektro di Fakultas Teknologi Industri UNISSULA Semarang** dengan judul “Pengaruh Kelembaban Udara Terhadap Kelayakan Tahanan Isolasi Stator Pada Generator 60 MW PLTA Panglima Besar Soedirman Mrica Menggunakan Uji *Polarization Index*”, adalah asli (orisinal) dan bukan menjiplak (plagiat) dan belum pernah diterbitkan/dipublikasikan dimanapun dalam bentuk apapun baik sebagian atau keseluruhan, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab. Apabila di kemudian hari ternyata terbukti bahwa Tugas Akhir tersebut adalah hasil karya orang lain atau pihak lain, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademik.

Semarang, Agustus 2023

Yang Menyatakan,



Adelia Janis Parahita

NIM. 3060200007

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iv
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
KATA PENGANTAR.....	x
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1. 1 Latar Belakang	1
1. 2 Rumusan Masalah.....	2
1. 3 Batasan Masalah.....	3
1. 4 Tujuan Penelitian	3
1. 5 Manfaat	3
1. 6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Landasan Teori.....	7
2.2.2. Stator	9
2.2.3. Kelembaban.....	10
2.2.4. Tahanan Isolasi.....	11
2.2.5. Pengendalian Generator	12
2.2.6. Pemeliharaan Generator	13
2.2.7. Pengujian Tahanan Isolasi [14].....	15
2.2.8. Polarization Index (PI)	16
BAB III METODE PENELITIAN	17
3. 1 Model Penelitian	17
3. 2 Sumber Data	18
3. 3 Alat dan Bahan	19
3.3.1 Alat Ukur Mega Ohm Meter	19
3.3.2 Termometer Suhu Ruang.....	20
3.3.3 RTD.....	21
3.3.4 Laptop.....	22

3. 4 Data Penelitian.....	22
3. 5 Diagram Alir Penelitian	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1 Hasil Penelitian	27
4. 2 Hasil Perhitungan Metode <i>Polarization Index</i>	28
4.2.1 Perhitungan Tahanan Isolasi dengan Metode Uji <i>Polarization Index</i>	29
4.2.2 Melakukan Pengukuran Temperatur	31
4. 3 Hasil Analisa	32
BAB V PENUTUP.....	36
5. 1 Kesimpulan	36
5. 2 Saran.....	36
DAFTAR PUSTAKA	38
LAMPIRAN.....	40



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai Polarization Index	17
Tabel 3.1 Temperatur Stator.	23
Tabel 3.2 Temperatur Pendingin.....	23
Tabel 3.3 Spesifikasi Generator	23
Tabel 3.4 Hasil pengukuran R,S,T Tahanan Isolasi sebelum AI	24
Tabel 3.5 Hasil pengukuran R,S,T Tahanan Isolasi setelah AI.....	24
Tabel 4. 1 Pengukuran Tahanan Isolasi Sebelum AI	27
Tabel 4. 2 Pengukuran Tahanan Isolasi Setelah AI	28
Tabel 4. 3 Perhitungan PI Sebelum dan Sesudah AI	30
Tabel 4. 4 Temperatur Tertinggi R,S,T dan Cooling Water	31



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Gaya Gerak Listrik.....	8
Gambar 2.2 Stator Tampak Atas.....	9
Gambar 2. 3 Komponen Stator Generator.....	10
Gambar 3. 1 Gambar Model.....	17
Gambar 3.2 Lokasi PLTA PBS.....	19
Gambar 3. 3 Alat Ukur Mega Ohm.....	20
Gambar 3. 4 Alat Ukur Termometer Suhu Ruang.....	21
Gambar 3.5 Alat Ukur RTD.....	21
Gambar 3.6 Diagram Flowchart.....	25
Gambar 4. 1 Grafik Nilai PI.....	30
Gambar 4. 2 Grafik Temperatur Tertinggi R,S,T & Cooling Water.....	32
Gambar 4. 3 Pengaruh Temperatur Terhadap Nilai PI.....	33



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Temperatur Stator	40
Lampiran 2 Temperatur Pendingin	47
Lampiran 3 Tahanan Isolasi	54
Lampiran 4 Surat Izin Penelitian	55
Lampiran 5 Spesifikasi Generator Unit 2	56



KATA PENGANTAR

Puji Syukur kepada Allah SWT atas anugerah Nya sehingga saya dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul “Pengaruh Kelembaban Udara Terhadap Kelayakan Tahanan Isolasi Stator pada Generator 60 MW PLTA Panglima Besar Soedirman Mrica Menggunakan Uji *Polarization Index* ”.

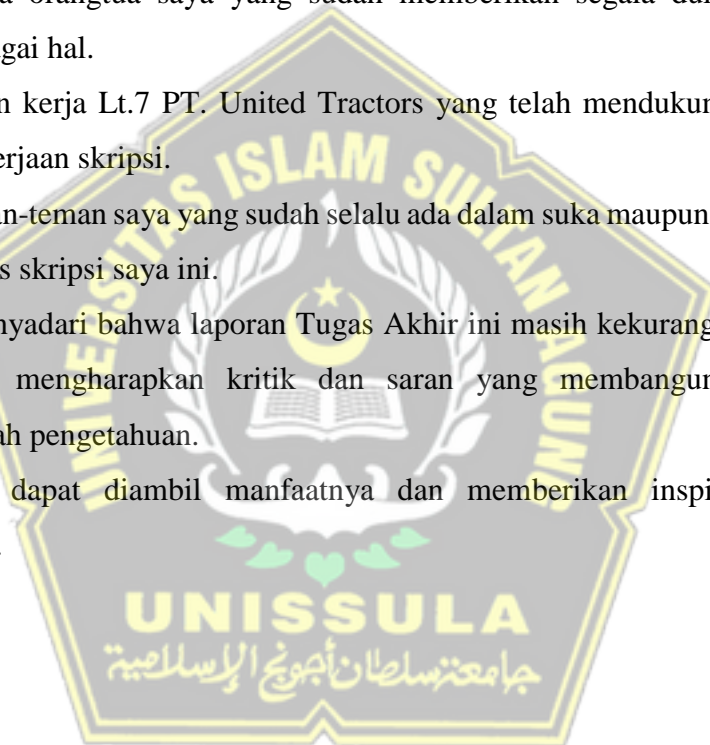
Adapun Tugas Akhir merupakan salah satu syarat yang ditempuh mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang, untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.). Laporan ini telah saya usahakan semaksimal mungkin dan tentunya dengan bantuan berbagai pihak serta sumber, sehingga dapat memperlancar pembuatan Laporan Tugas Akhir ini. Untuk itu saya tidak lupa menyampaikan banyak terimakasih kepada:

1. Dr. Ir. Novi Marlyana, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Terimakasih atas motivasi yang telah diberikan kepada Penulis.
2. Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Terima kasih telah segala arahan, saran dan bimbingannya, bahkan ketika Penulis mendapat masalah dalam pengerjaan tugas akhir yang tidak dalam bimbingannya.
3. Gunawan, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing I yang dalam kesibukannya dapat meluangkan waktunya untuk membimbing Penulis dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
4. Prof. Dr, Ir. H. Muhamad Haddin, M.T. selaku dosen pembimbing II yang dalam kesibukannya dapat meluangkan waktunya untuk membimbing Penulis dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
5. Bapak dan Ibu dosen Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang selaku tenaga pengajar yang telah menyempatkan waktu untuk berbagi ilmu sehingga penulis memperoleh ilmu pengetahuan yang bermanfaat selama menempuh studi.

6. Bapak Bayu Pribadi dan Dody Jayakusumah selaku Teknisi Listrik dan Bapak Kornelius Sidabutar selaku operator di PLTA Panglima Besar Soedirman yang telah membimbing dan memberikan ilmu lapangan maupun tertulis kepada penulis saat melaksanakan pengambilan data. Terimakasih atas segala saran yang telah diberikan kepada penulis.
7. Rekan-rekan Program Studi S1 Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang selalu ada pada setiap suka maupun duka baik saat jam akademik maupun non akademik.
8. Kedua orangtua saya yang sudah memberikan segala dukungan dalam berbagai hal.
9. Rekan kerja Lt.7 PT. United Tractors yang telah mendukung saya dalam pengerjaan skripsi.
10. Teman-teman saya yang sudah selalu ada dalam suka maupun duka di dalam proses skripsi saya ini.

Saya menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih kekurangan, maka dari itu saya mengharapkan kritik dan saran yang membangun serta dapat menambah pengetahuan.

Laporan dapat diambil manfaatnya dan memberikan inspirasi terhadap pembaca.



MOTTO

"Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya."

- Al Baqarah 286

"Barang siapa keluar untuk mencari sebuah ilmu, maka ia akan berada di jalan Allah hingga ia kembali."

- HR Tirmidzi



ABSTRAK

Permasalahan nilai tahanan isolasi yang berubah setiap bulannya. Dampaknya adalah penurunan nilai tahanan isolasi yang meningkatkan risiko kebocoran arus pada permukaan isolasi generator, berpotensi mempengaruhi kinerja dan umur pakai generator. Sebagai langkah preventif dengan melakukan monitoring dan pemeliharaan rutin. Pengendalian kelembaban adalah cara efektif dalam mencegah kerusakan pada generator dan menjaga kinerja sistem kelistrikan. Penelitian ini membahas tentang uji kelayakan generator 60 MW pada PLTA Panglima Besar Soedirman Mrica. Pengujian meliputi kelayakan generator dengan uji tahanan isolasi pada stator generator 18 kV dengan metode indeks. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi nilai PI sebelum pemeliharaan untuk stator generator unit 2 R, S, dan T adalah 3.71 M Ω , 4.04 M Ω , dan 3.94 M Ω , sedangkan setelah pemeliharaan adalah 5.32 M Ω , 5.62 M Ω , dan 5.58 M Ω . Pengukuran temperatur sebelumnya adalah 63°C, dan setelah pemeliharaan adalah 33°C. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan maka generator 60 MW di PLTA Panglima Besar Soedirman untuk generator unit 2 masih dalam keadaan baik dan masih layak akan tetapi nilai PI tidak stabil.

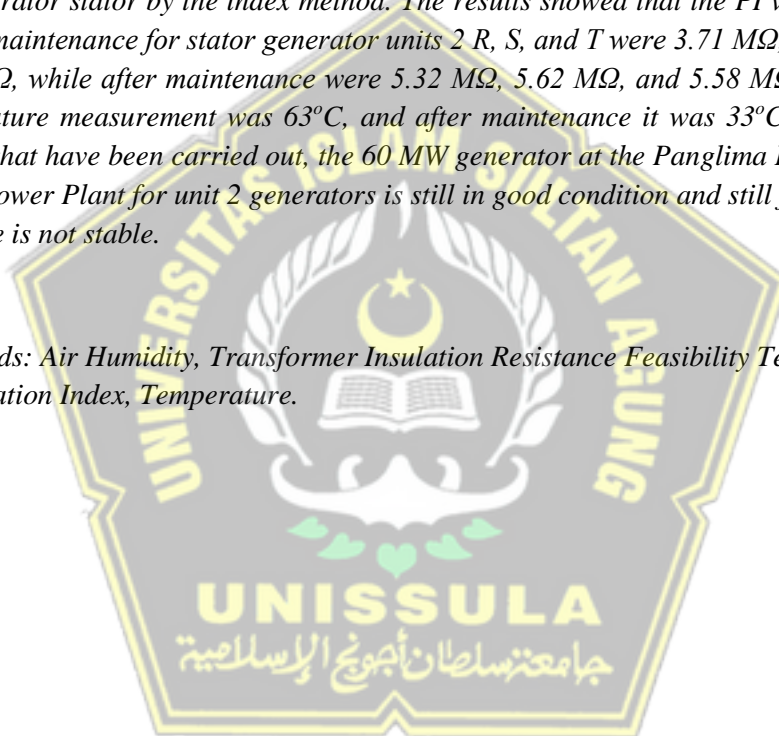
Kata kunci: Kelembaban Udara, Uji Kelayakan Tahanan Isolasi Generator, Indeks Polarisasi, Temperatur.



ABSTRACT

The problem of the value of solitary confinement that changes every month. The impact is a decrease in the insulation resistance value which increases the risk of leakage current on the insulation surface of the generator, potentially affecting the performance and service life of the generator. As a preventive measure by conducting routine monitoring and maintenance. Humidity control is an effective way in preventing damage to the generator and maintaining the performance of the electrical system. This study discusses the feasibility test of a 60 MW generator at the Panglima Besar Sudirman Mrica hydropower plant. Tests include the feasibility of the generator with insulation resistance tests on an 18 kV generator stator by the index method. The results showed that the PI value conditions before maintenance for stator generator units 2 R, S, and T were 3.71 MΩ, 4.04 MΩ, and 3.94 MΩ, while after maintenance were 5.32 MΩ, 5.62 MΩ, and 5.58 MΩ. The previous temperature measurement was 63°C, and after maintenance it was 33°C. From the test results that have been carried out, the 60 MW generator at the Panglima Besar Sudirman Hydropower Plant for unit 2 generators is still in good condition and still feasible, but the PI value is not stable.

Keywords: Air Humidity, Transformer Insulation Resistance Feasibility Test, Polarization Index, Temperature.



BAB I

PENDAHULUAN

1. 1 Latar Belakang

PLTA Panglima Besar Soedirman merupakan salah satu pembangkit terbarukan yang dikelola oleh PT. PLN Indonesia Power Mrica PGU berlokasi di Kabupaten Banjarnegara Provinsi Jawa Tengah yang memanfaatkan energi potensial dan kinetik air sebagai sumber energi utamanya. PLTA tersebut memiliki 3 unit dengan kapasitas daya terpasang generator masing-masing 60,3 MW. PLTA Panglima Besar Soedirman berkontribusi dalam penyediaan energi listrik pada Sistem 150 kV Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta. Dilansir pada *portal mimbar.co.id* bahwa PLTA Panglima Besar Soedirman juga berfungsi sebagai pembangkit *blackstart*, yaitu pembangkit yang berfungsi sebagai penyedia tegangan awal dalam kondisi *blackout* (padam pada sistem secara total) sehingga keandalan peralatan menjadi tuntutan mutlak dalam mendukung sistem 150 kV Jateng DIY. PLTA Panglima Besar Soedirman memanfaatkan aliran air Waduk Mrica untuk menggerakkan turbin jenis *Francis Vertical* yang beroperasi dalam kisaran head ± 94 m, kemudian putaran turbin digunakan menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. Generator merupakan bagian utama pada pembangkit listrik. Pada prinsip kerjanya, energi mekanik menggerakkan rotor yang sudah diberikan tegangan DC sehingga timbul energi elektromagnetik pada rotor. Oleh karena perputaran rotor yang memiliki energi elektromagnetik, sehingga muncul gaya gerak listrik pada stator yang kemudian diteruskan ke transformator.

Penelitian tahanan isolasi sebelumnya yang dilakukan oleh Yoga Bimantara di PLTA Panglima Besar Soedirman dipaparkan bahwa, dari hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan pada sisi stator memiliki tahanan isolasi 5,47 G Ω pada bulan Januari, 5,07 G Ω pada bulan Februari, 6,27 G Ω

pada bulan maret dan dari nilai standar tahanan isolasi stator, yaitu $12 \text{ M}\Omega$ [1].

Permasalahan nilai tahanan isolasi yang berubah setiap bulannya. Secara environment PLTA Panglima Besar Soedirman berada pada daerah dataran tinggi yang memiliki potensi kelembaban yang cukup tinggi. Kelembaban yang tinggi akan menurunkan nilai Tahanan Isolasi maka kemungkinan adanya kebocoran arus pada permukaan isolasi. Kebocoran arus pada permukaan isolasi generator dapat mempengaruhi kinerja dan umur pakai generator. Hal tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu faktor *thermal*, *mechanical* dan *environment*. Dampaknya adalah jika nilai tahanan isolasi dibawah standar yang berlaku maka dapat menyebabkan kerusakan pada generator tersebut. Solusi terhadap permasalahan tersebut dilakukan monitoring dan pemeliharaan rutin, serta dilakukan pengendalian kelembaban. Tindakan ini akan membantu mencegah kerusakan pada generator dan menjaga kinerja sistem kelistrikan yang terkait.

Penelitian ini memfokuskan permasalahan kelembaban. Metode uji yang akan digunakan yaitu metode uji *Polarization Index* . Kondisi kelembaban yang tinggi pada lokasi pembangkit listrik di dataran tinggi dapat mempengaruhi kondisi isolasi generator, sehingga dapat mempengaruhi nilai PI. Oleh karena itu, pengujian PI dapat digunakan untuk mengidentifikasi adanya perubahan pada kondisi isolasi generator yang disebabkan oleh kondisi kelembaban di lokasi pembangkit.

1. 2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diketahui terdapat potensi penurunan nilai tahanan isolasi disebabkan kelembaban yang cukup tinggi. maka rumusan dari masalah penelitian sebagai berikut :

- a. Bagaimana menentukan kelayakan tahanan isolasi stator Generator 60 MW terhadap pengaruh kelembaban dengan uji *Polarization Index*?
- b. Bagaimana mengidentifikasi pengaruh kelembaban pada stator generator menggunakan uji *Polarization Index*.

1. 3 Batasan Masalah

Penelitian ini, pembahasan hanya dibatasi pada analisa kelembaban sebagai berikut:

- a. Pengukuran dan perhitungan pada stator generator di unit 2.
- b. Pengukuran tahanan isolasi stator generator dilakukan selama sebelum dan sesudah pemeliharaan dalam keadaan beroperasi.
- c. Data uji parameter adalah data primer yaitu data tahanan isolasi fasa R,S dan T menggunakan *megger* yang dilakukan pengukuran di PLTA Panglima Besar Soedirman.
- d. Pengukuran tahanan isolasi dilakukan 1 menit pertama sampai dengan 10 menit.
- e. Data uji yang diambil pada *Annual Inspection* yang terhitung dari bulan 17-21 Oktober 2022.

1. 4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut :

- a. Mengidentifikasi sumber dan besar nilai kelembaban pada stator generator di PLTA Panglima Besar Soedirman.
- b. Mengetahui pengaruh kelembaban terhadap tahanan isolasi pada stator generator di PLTA Panglima Besar Soedirman menggunakan metode uji *Polarization Index*.

1. 5 Manfaat

Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian ini yaitu :

- a. Hasil pengukuran dapat digunakan untuk menyatakan kelayakan tahanan isolasi yang ada di PLTA Panglima Besar Soedirman.
- b. Menambah referensi terkait penanganan tahanan isolasi untuk pembangkit lain.
- c. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi dunia pendidikan khususnya bidang elektro dan juga bisa menjadi referensi

bagi peneliti lain yang akan membahas tema yang sama dengan sudut pandang yang berbeda.

1. 6 Sistematika Penulisan

Diperlukan adanya sistematika penulisan yang terstruktur dengan baik. Menjelaskan kerangka dan pedoman penulisan skripsi yang digunakan. Adapun sistematika penulisan skripsi ini terdiri dari beberapa bab, yaitu sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Membahas mengenai latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, metode penelitian, dan sistematika penulisan yang digunakan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berfokus pada tinjauan pustaka dan landasan teori yang berkaitan dengan tahanan isolasi generator, metode *Polarization Index* serta dasar teori yang menjadi dasar pembuatan Tugas Akhir ini.

BAB III METODE PENELITIAN

Menjelaskan mengenai metode penelitian yang digunakan, yaitu proses pengambilan data, penentuan sampel data, perhitungan tahanan isolasi dengan *Polarization Index*, dan data-data pendukung lainnya.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Membahas hasil dan analisis perhitungan nilai Tahanan Isolasi pada generator hasil sebelum dan sesudah pemeliharaan. Selain itu, bab ini juga mencakup menssimulasikan dengan menggunakan grafik melalui Microsoft Excel.

BAB IV PENUTUP

Bab ini akan disajikan kesimpulan dari hasil penelitian Tugas Akhir, serta saran-saran untuk penelitian Tugas Akhir yang akan datang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Beberapa studi terkait tahanan isolasi menggunakan metode *Polarization Index* meliputi:

- a. Pengaruh Kelembaban terhadap Kelayakan Tahanan Isolasi Stator Generator 60 Mw/13.8 kV pada PLTA Panglima Besar Soedirman Mrica Menggunakan Uji *Polarization Index* [1]. Hasil menunjukkan bahwa pada sisi stator memiliki tahanan isolasi 5,47 G Ω pada bulan januari, 5,07 G Ω pada bulan Februari, 6,27 G Ω pada bulan maret dan pengukuran tersebut di atas dari nilai standar tahanan isolasi stator, yaitu 12 M Ω , menunjukkan bahwa nilai tahanan isolasi pada stator dan rotor berubah-ubah setiap bulannya.
- b. Analisa Pengaruh *Partial Discharge* dan Tan Δ Terhadap Umur Isolasi Belitan Stator Akibat Ikatan Kumparan Generator Longgar [2]. Hasil menunjukkan bahwa hal yang dominan menjadi faktor penyebab dari kegagalan atau breakdown pada generator terjadi pada belitan Stator. Belitan atau *winding* stator harus menjadi perhatian penting khususnya pada kondisi isolasinya. Banyak faktor yang menjadi penyebab kualitas isolasi generator menurun, seperti faktor tekanan yang bersifat electric, thermal, dan mekanis.
- c. *Simulating insulation systems under various environmental conditions in the laboratory* [3]. Temperatur dan pembebanan terus-menerus juga dapat mempengaruhi kualitas isolasi. Pengaruh ini dapat dideteksi dari nilai *polarization indeks* (PI) melalui rangkaian ekuivalen tahanan isolasi.
- d. Analisis Percepatan Penuaan Isolasi Akibat Pengaruh Kelembaban Dan Kontaminasi Pada Motor Induksi Berbeban [4]. Selain sebagai petunjuk kekeringan dan kebersihan dari lilitan stator motor. PI juga dapat digunakan untuk menentukan lilitan stator motor dalam peralatan aman

untuk digunakan dan dioperasikan atau layak dilakukan untuk pengujian tegangan lebih.

- e. Penentuan Kelayakan Tahanan Isolasi Pada Transformator 60 MVA Di Gardu Induk 150 kV Tegal Dengan Menggunakan *Polarization Index* , *Tangen Delta*, *Dan Breakdown Voltage*, Universitas Islam Sultan Agung [5]. Dijelaskan bahwa tahanan isolasi yang diukur merupakan fungsi dari arus bocor yang melalui isolasi atau arus yang melewati jalur kebocoran pada permukaan luar. Oleh karena itu, hal tersebut dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti suhu, kelembaban dan jalur kebocoran ke permukaan yang dipengaruhi oleh adanya kotoran yang menempel pada insulasi.
- f. *Recent Important Changes in IEEE Motor and Generator Winding Insulation Diagnostic Testing Standards* [6]. Tes IR dan PI adalah cara yang sangat baik untuk menemukan belitan yang terkontaminasi atau direndam dengan kelembaban. Tentu saja tes ini juga bagus dalam mendeteksi kekurangan utama di mana insulasi retak atau telah dipotong. Dalam stator luka bentuk menggunakan sistem isolasi termoplastik, tes juga dapat mendeteksi kerusakan termal.
- g. *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery, American National Standard* [7]. Terlepas dari kebersihan permukaan belitan, jika suhu belitan berada pada atau di bawah titik embun udara sekitar, lapisan kelembaban dapat terbentuk pada permukaan insulasi, yang dapat menurunkan insulasi indeks resistensi atau polarisasi. Efeknya lebih jelas jika permukaannya juga terkontaminasi, atau jika ada retakan pada insulasi.
- h. Analisis Kondisi Tahanan Isolasi Transformator Daya 125 Mva Menggunakan *Polarization Index* Tangen Delta dan *Breakdown Voltage* Di Pltu Tenayan Raya 2 X 110 Mw [8]. Tujuan dari pengujian *Polarization Index* adalah untuk memastikan peralatan yang digunakan layak digunakan. Umumnya *Polarization Index* membandingkan resistansi dalam satuan menit dan dalam satuan puluhan menit.

2.2 Landasan Teori

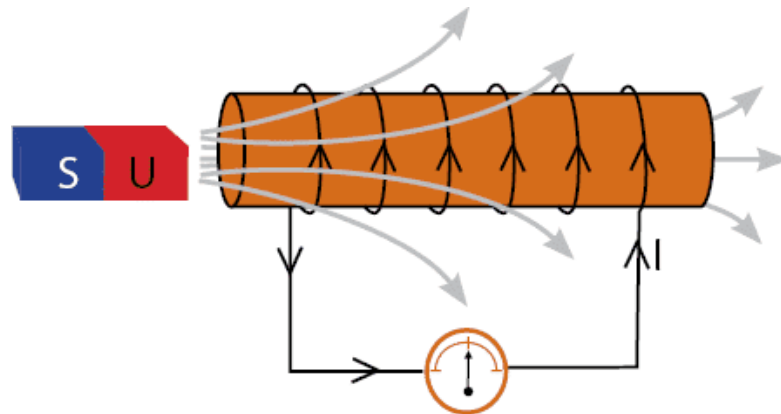
2.2.1. Generator

Generator sinkron merupakan peralatan yang memiliki fungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Dimana energi mekanik didapatkan dari energi potensial dan kinetik yang dihasilkan oleh putaran turbin dimana akan menggerakkan rotor melalui poros penghubung. Untuk PLTA energi potensialnya diperoleh dari air. Energi potensial akan menggerakkan sudu turbin sehingga timbul energi kinetik. Kemudian energi tersebut diubah generator menjadi energi listrik, sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik. Induksi elektromagnetik yaitu peristiwa timbulnya arus listrik akibat terjadi perubahan fluks magnetik, fluks magnetik ini sendiri adalah banyaknya garis gaya magnet yang menembus suatu bidang.

Komponen paling utama dari generator terdiri dari dua bagian yaitu bagian yang stator dan rotor. Rotor adalah bagian generator yang bergerak atau berputar yang juga disebut kutub magnet. Stator adalah bagian yang terdiri dari kumparan tempat terjadinya GGL induksi yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Komponen ini berbentuk sebuah rangka silinder dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak. Rotor dan stator dipisahkan oleh celah udara (air gap). Syarat terjadinya GGL induksi yaitu harus adanya :

- a. Medan Magnet
- b. Penghantar
- c. Gerakan Relatif

Berikut adalah prinsip generator dalam membangkitkan listrik dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Gaya Gerak Listrik.

Hubungan antara gaya gerak listrik induksi (EMF) dan perubahan fluks magnet dikenal sebagai hukum Faraday. Besarnya GGL (electromagnetic force) induksi dapat dinyatakan sebagai perubahan fluks magnetik dalam selang waktu (t), dapat dilihat pada Persamaan (2.1) [9]:

$$\varepsilon = \frac{d\phi_B}{dt} \quad (2.1)$$

Keterangan : ε = Tegangan Elektrik (Volt)

$d\phi$ = Fluks Magnetik

dt = Selang Waktu

Prinsip kerja dari generator sinkron adalah arus searah dialirkan kumparan rotor diputar oleh prime mover dimana menghasilkan medan magnet putar pada stator juga terdapat kumparan. Medan magnet putar menyebabkan medan magnet pada kumparan stator yang berubah secara kontinu. Kemudian perubahan medan magnet secara kontinu ini menginduksikan tegangan pada kumparan di stator. Kemudian akan memotong kumparan stator sehingga menimbulkan gaya gerak listrik dan terjadi gerak bolak balik yang sama antara stator dan juga rotor. Tegangan induksi pada stator ini akan berbentuk sinusoidal dan besarnya medan magnet akan bergantung pada rotor yang berputar.

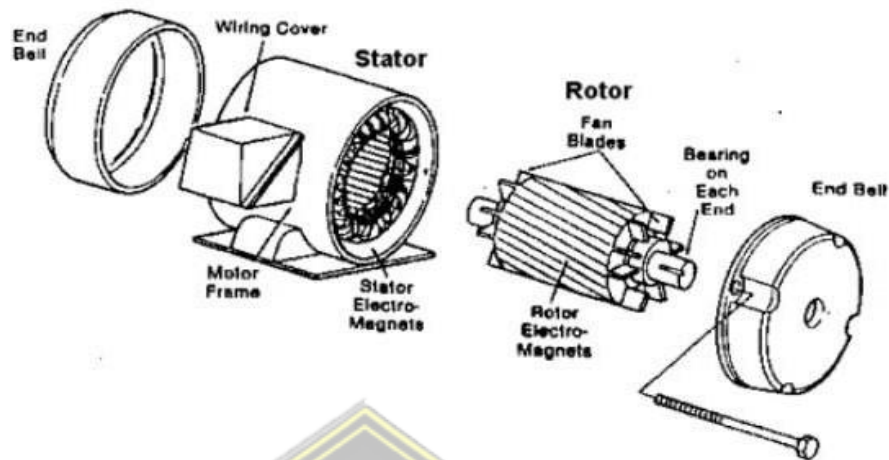
2.2.2. Stator

Stator adalah bagian yang diam pada generator yang berfungsi untuk menangkap medan magnet yang ditimbulkan oleh rotor. Sehingga medan magnet yang terinduksi kemudian mengeluarkan berupa keluaran tegangan maupun arus [10]. Fungsi stator adalah sebagai penerima induksi magnet dari rotor dimana arus AC disalurkan melalui *armature* ke beban, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Stator Tampak Atas.

Kumparan dibagi menjadi tiga alur, yang menghasilkan keluaran dengan tiga fasa. Selain itu, sistem bintang loop (Y) biasanya Inti besi stator terdiri dari laminasi lembaran besi yang ditutup satu sama lain dengan varnish atau kertas isolasi. Laminasi ini digunakan untuk mengurangi arus eddy karena arus eddy dapat menimbulkan panas pada inti stator yang dapat merusak isolasi kumparan penghantar. Di dalam konduktor. Gambar komponen stator generator dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Komponen Stator Generator.

Komponen Stator Generator dapat dilihat pada Gambar 2.3, yang terdiri dari:

- a. Rangka luar stator biasanya terbuat dari baja, berfungsi sebagai penyokong dan juga kaki-kaki.
- b. Inti stator terbuat dari bahan *non-magnetic* yaitu tembaga dalam rangka mengurangi adanya *stray loss*. Inti stator berfungsi sebagai jalur proses terjadinya magnetisasi.
- c. Slot berfungsi untuk meletakkan lilitan kawat stator biasanya dibentuk dengan sistem yang berlaminasi.
- d. Kumputan stator adalah tempat terbentuknya tegangan induksi pada generator dan didesain untuk menghasilkan kutub-kutub elektromagnetik stator yang sinkron dengan kutub magnet rotor.

2.2.3. Kelembaban

Penyinaran yang dilakukan oleh matahari juga menjadi salah satu hal yang mempengaruhi kelembaban suatu udara [11]. Kelembaban adalah kuantitas uap air yang terkandung dalam udara pada suatu waktu dan tempat tertentu. Tingkat kelembaban yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat mempengaruhi berbagai hal. Kelembaban udara pada dataran tinggi seringkali lebih tinggi

dibandingkan dengan daerah dataran rendah. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, seperti tekanan udara yang lebih tinggi pada ketinggian yang lebih tinggi, suhu yang lebih dingin, dan angin yang lebih kencang di dataran tinggi.

Kelembaban udara yang rendah di dataran tinggi dapat memengaruhi kinerja berbagai mesin dan peralatan, termasuk mesin yang digunakan dalam pembangkit listrik. Dampaknya termasuk kondisi isolasi pada peralatan listrik, seperti generator. Oleh karena itu, sangat penting untuk memantau tingkat kelembaban udara di dataran tinggi dan mengambil tindakan yang diperlukan untuk mengurangi efeknya. Pengujian Polarization Index (PI) dapat digunakan dalam industri pembangkit listrik untuk memantau kondisi isolasi generator. Pengujian ini, selain menghitung nilai tahanan isolasi, juga dapat mengidentifikasi apakah kondisi kelembaban mengubah kondisi isolasi generator.

Korelasi suhu udara dan kelembaban udara berdasarkan titik embun (titik uap air) merupakan konsep penting dalam meteorologi. Titik embun adalah suhu saat udara jenuh dengan uap air sehingga uap air mulai mengembun menjadi embun. Dalam hubungan ini, semakin besar perbedaan antara suhu saat ini dan titik embun, semakin rendah kelembapan relatifnya. Ketika suhu dan titik embun mencapai nilainya masing-masing, kelembapan relatif meningkat dan udara tampak lebih lembab. Sebaliknya, perbedaan suhu dan titik embun yang besar menunjukkan udara yang lebih kering. Oleh karena itu, titik embun merupakan indikator penting untuk memahami hubungan antara suhu dan kelembapan serta berperan dalam menentukan kelembapan atau kekeringan lingkungan udara pada waktu tertentu.

2.2.4. Tahanan Isolasi

Isolasi listrik merupakan salah satu komponen kritis dalam pembuatan generator yang bertujuan untuk membatasi arus listrik ke dalam atau keluar dari generator. Konsep dasar mengenai isolasi listrik

dan tahanan isolasi pada generator di PLTA. Di PLTA, generator digunakan untuk menghasilkan energi listrik dari air yang mengalir melalui turbin. Oleh karena itu, isolasi listrik pada generator sangat penting untuk mencegah kebocoran arus listrik. Besarnya nilai arus bocor yang terdeteksi pada saat pengujian, menjadi parameter dari ketahanan kualitas isolasi terhadap tegangan kerja yang diterima [12].

Beberapa jenis bahan isolasi yang digunakan pada generator PLTA termasuk kertas, resin, mica, dan berbagai jenis bahan sintesis seperti polimer. Mika, misalnya, adalah bahan isolasi yang tahan terhadap panas dan memiliki kekuatan mekanik yang tinggi, sehingga sering digunakan pada bagian generator yang menerima tegangan tinggi. Semakin tinggi nilai tahanan isolasi maka semakin tinggi pula nilai PI.

Untuk menjaga tahanan isolasi generator di PLTA, pemilihan bahan isolasi yang tepat dan perawatan yang baik sangat penting. Bahan isolasi yang buruk dapat menyebabkan tahanan isolasi yang rendah pada generator, yang dapat menyebabkan kebocoran arus listrik dan mengancam keamanan operasi generator.

2.2.5. Pengendalian Generator

Menghindarkan dari kegagalan atau kerusakan pada alat-alat listrik harus dilakukan perawatan peralatan secara berkala yang disesuaikan dengan kondisi dan umur dari alat-alat listrik tersebut, supaya alat-alat listrik selalu terjaga kondisinya [12]. Pengendalian kelembaban pada generator sangat penting untuk menjaga kinerja dan masa pakai peralatan. Kelembaban yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat menyebabkan kerusakan pada isolasi dan komponen elektronik pada generator. Beberapa cara untuk mengendalikan kelembaban pada generator antara lain:

- a. Ventilasi yang baik: Ventilasi yang baik dapat membantu sirkulasi udara di sekitar generator dan mengurangi kelembaban yang terperangkap. Hal ini dapat dilakukan dengan menambahkan

ventilasi tambahan pada ruang generator atau dengan memastikan bahwa sistem ventilasi yang ada berfungsi dengan baik.

- b. Perawatan isolasi: Jika isolasi generator tidak dirawat dengan baik, itu dapat menjadi sumber kelembaban yang tidak sehat. Perawatan isolasi termasuk memantau kondisi isolasi secara teratur, membersihkan isolasi secara berkala, dan memperbaikinya jika terjadi kerusakan.
- c. Penggunaan heater: Penggunaan heater pada generator dapat membantu mengurangi kelembaban di dalam ruang generator dan menjaga suhunya pada tingkat yang aman. Penggunaan heater juga dapat membantu mencegah kondensasi, yang dapat menyebabkan kerusakan isolasi, terbentuk pada permukaan generator.
- d. Memastikan kebersihan ruangan generator: Untuk menjaga kelembaban pada tingkat yang sehat, kebersihan generator juga sangat penting. Menjaga ruangan generator bersih dapat membantu mengurangi kelembaban karena kotoran dan debu menahan kelembaban di udara. Pengendalian kelembaban pada generator sangat penting dan harus dilakukan secara teratur.

2.2.6. Pemeliharaan Generator

Pemeliharaan merupakan kebutuhan yang sangat penting untuk memperpanjang umur peralatan dan kehandalan semua peralatan. Pemeliharaan merupakan salah satu hal terpenting yang harus diperhatikan dalam pengoperasian sistem kelistrikan [13]. Kegiatan pemeliharaan yang dilakukan pada mesin listrik berputar terutama pada mesin induksi disebabkan oleh kerusakan isolasi pada *winding* stator. Biasanya disebabkan oleh :

a. Thermal Stresses

Overheating, yang terjadi pada belitan dan berlangsung lama, menekan belitan, membuat isolasi kawat rapuh, dan seiring waktu isolasi retak. Jika gejala ini dikombinasikan dengan munculnya PD (partial discharge), penuaan isolasi akan dipercepat.

b. *Mechanical Stresses*

Pengaruh dari luar, seperti getaran mekanis dan getaran magnet, memengaruhi titik terlemah. Ini terjadi pada belitan yang dicat dengan benar, titik sambungan, dan koil penutup.

c. *Environmental Stresses*

Kontaminasi: Partikel konduktif seperti udara lembab, debu, karbon, minyak, atau bahan kimia lain yang terkumpul di permukaan isolasi dapat menghantar listrik. Karena perbedaan potensial antara rotor dan tanah, partikel ini akan berfungsi sebagai media hantaran untuk mengarahkan arus listrik dari rotor ke tanah. Akibat sifat kotoran ini, jalur hantaran listrik akan terbentuk di lokasi di mana kotoran terkumpul. Pemeliharaan komponen generator di unit pembangkit termal dilakukan dalam 2 kategori, yaitu :

a. Pemeliharaan yang bersifat rutin.

Pemeliharaan rutin adalah pemeliharaan yang dilakukan berulang kali pada interval waktu harian, mingguan, dan bulanan dengan kondisi yang sedang beroperasi, yang mencakup:

- a) Pemeriksaan temperatur belitan stator, bearing, air pendingin, dan sebagainya dilakukan setiap hari.
- b) Pemeriksaan kebocoran pendingin minyak (khusus generator dengan pendingin hidrogen) dalam sekali sebulan.
- c) Pemeriksaan vibrasi sekali sebulan.
- d) Pemeriksaan tekanan hidrogen, *seal oil pump*.
- e) Pemeriksaan *fuse rotating rectifier (Brushless excitation)* atau pemeriksaan sikat arang (*Static Excitation / DC Dinamic Excitation*).

b. Pemeliharaan yang bersifat Periodik.

Pemeriksaan yang bersifat periodik ialah pemeriksaan yang dilakukan berdasarkan lama operasi dari generator, yang diklasifikasikan sebagai berikut:

- a) Pemeriksaan sederhana, setiap 8.000 jam.
- b) Pemeriksaan sedang, setiap 16.000 jam.
- c) Pemeriksaan serius, setiap 32.000 jam.

Pemeriksaan periodik terdiri dari pembongkaran (disassembly), pemeriksaan (inspection), dan pengujian (testing). Tidak selalu setiap komponen dilakukan dengan cara yang sama, tetapi mereka diklasifikasikan sebagai pemeriksaan periodik.

2.2.7. Pengujian Tahanan Isolasi [14]

Salah satu jenis pemeliharaan periodik adalah pengujian ketahanan isolasi. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menemukan kelemahan pada isolasi tahanan melalui pengujian indeks polarisasi dan pengujian tahanan isolasi. Pengujian ini menggunakan Mega Ohm Metter, juga dikenal sebagai Megger.

Nilai *Insulation Resistance* (*IR*) stator diukur pada suhu ruangan, pengukuran dilakukan dengan cara melepas hubungan (*Y*) generator terhadap *ground* terlebih dahulu. Pengukuran dilakukan pada tiap fasa yaitu fasa R, S, dan T masing-masing di ukur langsung terhadap *ground*. Sehingga megger yang digunakan yaitu megger fasa terhadap *ground*. Nilai tahanan isolasi dirumuskan pada persamaan (2.2).

$$IR = \frac{E_{(t)}}{I_{(t)}} \quad (2.2)$$

dengan: *IR* : Tegangan Isolasi (MΩ)

$E_{(t)}$: Nilai pembacaan tegangan DC (Volt)

$I_{(t)}$: Nilai arus setelah tegangan uji (μA/s)

Pengujian tahanan isolasi memiliki tiga jenis tes yang umum dilakukan:

- a. *Short-Time Reading*

Tujuan *Short-Time Reading* adalah untuk mengukur tahanan isolasi dalam rentang waktu 30 hingga 60 detik. Pengecekan fisik dilakukan secara singkat untuk memastikan kondisi fisik isolasi. Setelah itu, data pengujian diambil beberapa kali dalam hitungan detik. Hasil sangat penting jika dibandingkan dengan hasil pembacaan pengujian sebelumnya. Jika hasil pengujian terus menurun, itu menunjukkan bahwa ada kerusakan.

b. *Time-Resistance Reading*

Temperatur dan ukuran media isolasi sangat memengaruhi metode ketahanan waktu ini. Ada kemungkinan bahwa rasio dari pembacaan resistensi waktu menunjukkan kondisi sistem isolasi. Sistem isolasi yang baik akan menunjukkan nilai tahanan isolasi yang lebih tinggi selama periode waktu pengujian megger, sementara sistem isolasi yang kotor, terkelupas, dan terkontaminasi akan menunjukkan hasil pengujian yang rendah. Sistem isolasi yang buruk akan terkena dampak arus absorption yang tinggi, sedangkan sistem isolasi yang buruk akan terkena dampak arus absorption yang tinggi. *PI Test* : pada metode pengujian ini memiliki spesialisasi dari *dielectric absorption test*. *Polarization Index* (PI) dikembangkan untuk membuat suatu interpretasi pengukuran IR yang lebih handal dan lebih tidak sensitif terhadap faktor suhu.

2.2.8. Polarization Index (PI)

Salah satu cara untuk menentukan kualitas winding generator akibat faktor lingkungan seperti penyerapan air dan pengotoran debu adalah dengan menggunakan *Polarization Index* (PI). Pengukuran PI dilakukan dua kali tahap pengukuran, tahap pertama dilakukan pada menit pertama dan tahap kedua dilakukan pada menit ke sepuluh [11]. Dilakukan dua tahap karena sangat berpengaruh terhadap temperatur yang diakibatkan dari panas belitan. Pengukuran pada menit pertama biasanya berbeda dengan menit ke sepuluh dikarenakan adanya

penurunan daya. Semakin tinggi nilai Polarization Index, semakin baik isolasi. Semakin rendah nilainya, semakin buruk isolasi. Sesuai dengan standar IEEE-43-2000 yang dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Nilai Polarization Index.

Polarization Index Value	Insulation Condition
<1.0	Dangerous
1 – 1.4	Poor
1.5 – 1.9	Questionable
2.0 – 2.9	Fair
3.0 – 4.0	Good
>4.0	Excellent

PI di bawah 2 biasanya dianggap sebagai potensi yang dapat menyebabkan masalah, sedangkan nilai PI diatas 4 biasanya dianggap sempurna atau sangat baik, meskipun pada fakta dilapangannya diatas 4 bisa berarti getas atau isolasi dianggap terlalu kering sehingga akan membahayakan isolator. Secara matematis rumus PI dapat digambarkan pada Persamaan (2.3) :

$$PI = \frac{\text{Pengukuran } R_{10 \text{ menit}}}{\text{Pengukuran } R_{1 \text{ menit}}} \quad (2.3)$$

Keterangan: PI = Polarization Index

R_{10} = Pengujian saat menit ke-10

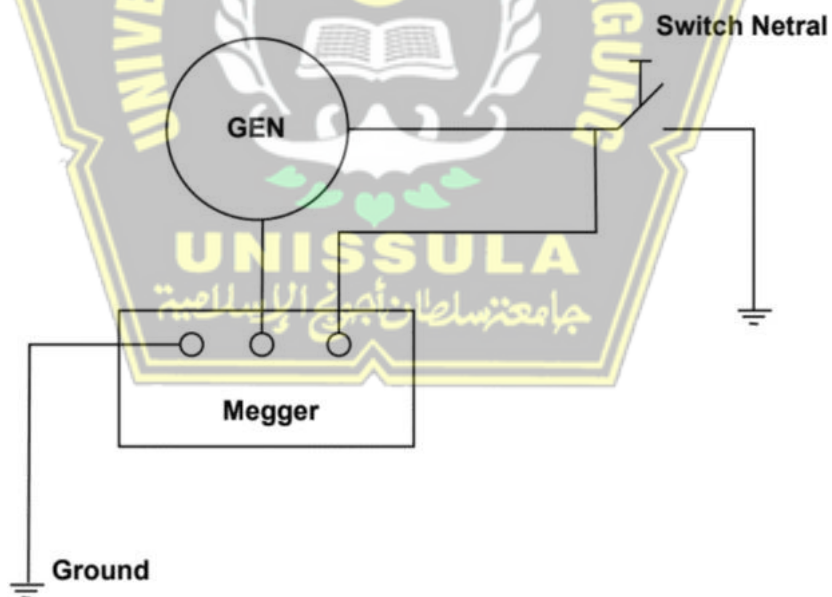
R_1 = Pengujian saat menit ke-1

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Model Penelitian

Data kelembaban dan tahanan isolasi akan dianalisis secara statistik menggunakan teknik regresi dan korelasi untuk mengidentifikasi hubungan antara kelembaban udara dengan kelayakan tahanan isolasi stator generator. Analisis ini akan memberikan wawasan tentang apakah terdapat korelasi yang signifikan antara kelembaban udara dengan penurunan kelayakan tahanan isolasi.

Model penelitian ini akan melibatkan pengumpulan data temperatur dan tahanan isolasi. Data temperatur akan dikumpulkan pada *interval* waktu tertentu selama periode penelitian. Selanjutnya, pengukuran tahanan isolasi stator generator akan dilakukan dengan menggunakan uji *Polarization Index* pada waktu yang sama, berikut modelnya dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Gambar Model.

3.2 Sumber Data

Data primer yang digunakan yaitu hasil pengujian tahanan pada fasa R, S, dan T sebelum dan sesudah pada pemeliharaan terakhir. Dalam penelitian ini adalah dengan melakukan pengumpulan data yang berhubungan dengan penelitian. Dimana sumber data yang digunakan dalam penelitian ini yakni data primer dan data sekunder. Data primer adalah sumber data yang langsung memberikan data kepada pengumpul data sedangkan data sekunder adalah sumber yang tidak langsung memberikan data kepada pengumpul data [15]. Data sekunder yang diperoleh dikumpulkan melalui buku, jurnal, dan penelitian yang relevan. Sedangkan untuk data sekunder pada penelitian ini didapatkan dari data yang diambil langsung pada obyek penelitian.

Lokasi penelitian ini dilaksanakan pada tanggal 1-3 Februari 2023 di PT. PLN Indonesia Power UP Mrica PGU PLTA Panglima Besar Soedirman yang berada di wilayah Kabupaten Banjarnegara Jawa Tengah tepatnya 8 Km sebelah barat Kota Banjarnegara, dengan alamat Jl. Raya Banyumas Km. 08 Banjarnegara, Jawa Tengah. Gambar 3.2 merupakan lokasi penelitian yang dapat dilihat melalui *google earth*.



Gambar 3.2 Lokasi PLTA PBS.

3.3 Alat dan Bahan

Terdapat beberapa alat dan bahan yang dapat dijadikan sebagai penunjang pada melakukan penelitian yaitu sebagai berikut :

3.3.1 Alat Ukur Mega Ohm Meter

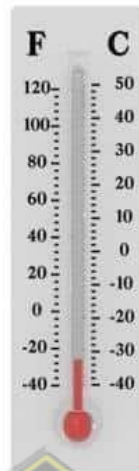
Mega Ohm Meter atau biasa disebut megger merupakan alat ukur yang berfungsi untuk mengukur tahanan isolasi dari alat insulasi suatu instalasi antara fase dan fase, atau fase dengan *ground*. Megger yang digunakan yaitu jenis MT-1025 dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Alat Ukur Mega Ohm.

3.3.2 Termometer Suhu Ruang

Termometer berfungsi untuk mengukur temperatur/suhu pada ruangan. Termometer suhu ruang di dalam generator adalah perangkat pengukur yang dirancang khusus untuk mengukur suhu di dalam ruang generator. Termometer suhu ruang di dalam generator berperan penting dalam memantau dan menjaga suhu yang tepat di dalam generator, meminimalkan risiko kerusakan, meningkatkan efisiensi, dan melindungi keselamatan operasi generator secara keseluruhan, dapat dilihat pada Gambar 3.4 alat ukur termometer suhu ruang.



Gambar 3. 4 Alat Ukur Termometer Suhu Ruang.

3.3.3 RTD

RTD adalah sensor yang resistansinya berubah saat suhunya berubah. Resistansi meningkat saat suhu sensor meningkat. Hubungan resistensi vs suhu sudah terkenal dan dapat diulang dari waktu ke waktu. RTD adalah perangkat pasif. Itu tidak menghasilkan output sendiri. Perangkat elektronik eksternal digunakan untuk mengukur resistansi sensor dengan melewati arus listrik kecil melalui sensor untuk menghasilkan tegangan, dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Alat Ukur RTD.

3.3.4 Laptop

Digunakan untuk menyelesaikan pembuatan laporan penelitian. Berfungsi untuk melakukan penyimpanan data, penulisan skripsi, pengeditan dokumen, melakukan analisis data, mengakses berbagai sumber yang relevan dan juga fitur lainnya yang berfokus pada skripsi sehingga penulis dengan mudah memvisualisasikan hasil skripsi.

3.4 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer yang diperoleh secara langsung dari lokasi penelitian di PT. PLN Indonesia Power UP Mrica PGU PLTA Panglima Besar Soedirman. Data primer mencakup informasi spesifikasi generator, suhu ambient/ruangan, suhu terendah stator saat standby, suhu stator tanpa pemanas, suhu air pendingin, dan hasil pengujian tahanan fasa R, S, dan T sebelum dan setelah pemeliharaan yang tercatat dalam data terbaru pemeliharaan generator. Penelitian ini menggunakan nilai tahanan R, S, dan T pada generator sebagai variabel untuk perhitungan *Polarization Index*. Informasi lebih detail dapat ditemukan dalam lampiran yang berisi tabel rinci tentang data yang dikumpulkan.

Pengumpulan data dilakukan dengan mengacu pada spesifikasi generator, mencatat suhu lingkungan, suhu stator saat standby, suhu stator tanpa pemanas, suhu air pendingin, serta melakukan pengujian tahanan pada fasa R, S, dan T sebelum dan sesudah pemeliharaan. Data tersebut memberikan gambaran yang lengkap mengenai kondisi generator dan perubahan nilai tahanan isolasi seiring waktu. Hal ini memungkinkan peneliti untuk menganalisis dampak kelembaban terhadap tahanan isolasi dan mengidentifikasi perubahan yang perlu diperhatikan dalam menjaga kinerja generator di lingkungan PLTA Panglima Besar Soedirman. Berikut Lampiran Data temperatur stator terdapat pada Tabel 3.1, temperatur pendingin pada Tabel 3.2, spesifikasi generator pada Tabel 3.3, pengukuran tahanan isolasi

pada Tabel 3.4 dan Tabel 3.5 untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 1 sampai dengan 5.

Tabel 3.1 Temperatur Stator.

Time	m s	TEMP STATOR U2-STATOR (R)	TEMP STATOR U2-STATOR (S)	TEMP STATOR U2-STATOR (T)
23/10/2022 00:28:48	0	90.1	89.70005	90.300074
23/10/2022 01:02:24	0	89.600124	89.400074	90.200025
23/10/2022 01:36:00	0	89.6	89.300025	90.00005
23/10/2022 02:09:36	0	89.301534	89.101023	89.801023
23/10/2022 02:43:12	0	89.10005	88.800075	89.60005
23/10/2022 03:16:48	0	88.800074	88.700025	89.300074
23/10/2022 03:50:24	0	88.500074	88.200124	88.800124
23/10/2022 04:24:00	0	88.200074	87.900074	88.60005
23/10/2022 04:57:36	0	88.100025	87.600074	88.40005
23/10/2022 06:04:48	0	87.400074	87.000099	87.700099

Tabel 3.2 Temperatur Pendingin.

Time	m s	TEMP COLD AIR 1- COLD AIR 1 UNIT 2	TEMP COLD AIR 2- COLD AIR 2 UNIT 2
17/10/2022 00:00:00	0	42.200025	40.800025
17/10/2022 00:33:36	0	42.100025	40.8
17/10/2022 01:07:12	0	42.1	40.500074
17/10/2022 01:40:48	0	42.1	41.099851
17/10/2022 02:14:24	0	42.000025	40.700099
17/10/2022 02:48:00	0	41.700074	40.400074
17/10/2022 03:21:36	0	41.7	40.20005
17/10/2022 03:55:12	0	41.799975	40.499926

Tabel 3.3 Spesifikasi Generator

Merk	ASEA
Tipe	AC GENERATOR 3 PHASE 50 Hz
GG5 4230 Z	Nr 253139
Rated Capacity	67.010 kVA
Power Factor	0.9
Nominal Voltage	13.800 V, Y
Stator Current	2.803 A
Excitation	160 V 1.170 A
Rated Speed	230,8 rpm
Runaway Speed	388 rpm
Stored Energy Constant	5.55 WsVA
Insulation Class	Stator F, Rotor F
Standard IEC 34-1 (1963)	

Tabel 3.4 Hasil pengukuran R,S,T Tahanan Isolasi sebelum AI.

PENGUKURAN	Tahanan Isolasi (M Ω)		
	R	S	T
1 menit	3.12	2.52	2.46
2 menit	5.1	4.09	3.93
3 menit	6.49	5.28	5.08
4 menit	7.57	6.27	5.99
5 menit	8.48	7.11	6.77
6 menit	9.28	7.83	7.49
7 menit	9.93	8.51	8.11
8 menit	10.48	9.13	8.65
9 menit	11.06	9.67	9.19
10 menit	11.59	10.17	9.71

Tabel 3.5 Hasil pengukuran R,S,T Tahanan Isolasi setelah AI.

PENGUKURAN	Tahanan Isolasi (M Ω)		
	R	S	T
1 menit	3.72	3.03	2.9
2 menit	6.48	5.11	4.94
3 menit	8.77	6.99	6.7
4 menit	10.8	8.71	8.35
5 menit	12.53	10.33	9.87
6 menit	14.14	11.79	11.2
7 menit	15.7	13.17	12.63
8 menit	17.15	14.59	13.84
9 menit	18.34	15.82	15.12
10 menit	19.8	16.89	16.22

3. 5 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.6 Diagram Flowchart.

Tahapan penelitian pada Gambar 3.6 yang dapat dilakukan berdasarkan deskripsi yang diberikan adalah sebagai berikut :

- a. Pengumpulan Data: Mengumpulkan data yang diperlukan untuk penelitian, termasuk spesifikasi generator, tahanan isolasi, temperatur ambient (lingkungan sekitar), temperatur terendah stator, temperatur stator tanpa heater, dan temperatur air pendingin.
- b. Pengolahan Data: Mengolah data yang telah dikumpulkan menggunakan metode Uji *Polarization Index* (PI) untuk mengevaluasi kondisi tahanan isolasi dalam generator. Menentukan apakah tahanan isolasi berada dalam kondisi yang memadai atau perlu dilakukan perawatan.
- c. Evaluasi Hasil PI: Menentukan apakah nilai PI sudah mencapai tingkat yang dianggap sesuai dengan standar IEEE-42-2000. Jika nilai PI tidak memenuhi standar, maka perlu dilakukan perawatan pada tahanan isolasi untuk meningkatkan nilai PI.
- d. Kesimpulan dan Rekomendasi: Membuat kesimpulan berdasarkan hasil evaluasi tahanan isolasi menggunakan metode PI , termasuk rangkuman temuan penelitian. Memberikan rekomendasi tindakan yang perlu diambil berdasarkan hasil penelitian untuk menjaga kinerja dan keandalan generator.

Dengan mengikuti tahapan penelitian ini , penelitian dapat dilakukan secara sistematis dan menghasilkan kesimpulan yang akurat berdasarkan evaluasi tahanan isolasi menggunakan metode Uji *Polarization Index* .

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Merujuk pada model penelitian sesuai Gambar 3.1 dan mengacu pada data temperatur stator, temperatur pendingin dan tahanan isolasi stator.

a. Pengukuran Tahanan Isolasi

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tahanan isolasi pada generator dengan menggunakan metode *Polarization Index* (PI). *Polarization Index* merupakan metode yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat keandalan tahanan isolasi dalam sistem generator. Berikut data tahanan isolasi pada generator unit 2 yang dilakukan sebelum dan sesudah *Annual Inspection* selama 17-21 Oktober 2022 dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 adalah sebagai berikut.

Tabel 4. 1 Pengukuran Tahanan Isolasi Sebelum AI.

Pengukuran (Menit)	Tahanan Isolasi (MΩ)		
	R	S	T
1	3.12	2.52	2.46
2	5.1	4.09	3.93
3	6.49	5.28	5.08
4	7.57	6.27	5.99
5	8.48	7.11	6.77
6	9.28	7.83	7.49
7	9.93	8.51	8.11
8	10.48	9.13	8.65
9	11.06	9.67	9.19
10	11.59	10.17	9.71
Keterangan:			
Data AI	2022		
Tanggal	17-Oct-22		
Temperatur Ambient	40°C		
Generator	ASEA Sweden PLTA #2		

Tabel 4. 2 Pengukuran Tahanan Isolasi Setelah AI.

Pengukuran (Menit)	Tahanan Isolasi(M Ω)		
	R	S	T
1	3.72	3.03	2.9
2	6.48	5.11	4.94
3	8.77	6.99	6.7
4	10.8	8.71	8.35
5	12.53	10.33	9.87
6	14.14	11.79	11.2
7	15.7	13.17	12.63
8	17.15	14.59	13.84
9	18.34	15.82	15.12
10	19.8	16.89	16.22
Keterangan			
Data AI	2022		
Tanggal	21-Oct-22		
Temperatur Ambient	40°C		
Generator	ASEA Sweden PLTA #2		

Dari data diatas dapat diketahui bahwa data yang diambil merupakan pengukuran tahanan isolasi yang mana diambil dari meni pertama hingga menit ke sepuluh. Pengukuran diatas dapat diketahui bahwa tahanan isolasi beradapada kisaran 2,52 M Ω sampai dengan 11,59 M Ω . Sedangkan setelah dilkauan *Annual Inspection* nilai tahanan isolasi naik menjadi kisaran 2,9 M Ω sampai dengan 18,34 M Ω .

4. 2 Hasil Perhitungan Metode *Polarization Index*

Perhitungan yang dilakukan menggunakan Metode *Polarization Index* melalui beberapa tahap untuk mengetahui kelayakan tahanan isolasi sebagai berikut.

4.2.1 Perhitungan Tahanan Isolasi dengan Metode Uji *Polarization Index*

Nilai *Polarization Index* adalah salah satu parameter atau standar untuk mengetahui tahanan isolasi tersebut layak atau tidak, melalui perhitungan yang didapatkan dari tahanan isolasi yang kemudian diolah dengan metode *Polarization Index*. Menggunakan Persamaan 2.2 tersebut maka dari hasil tahanan isolasi pada Tabel 4.2 dapat diolah dengan *Polarization Index* hasilnya maka:

Nilai PI untuk Phasa R ;

$$PI = \frac{11,59}{3,12}$$

$$PI = 3,71$$

Nilai PI untuk Phasa S ;

$$PI = \frac{10,2}{2,52}$$

$$PI = 4,04$$

Nilai PI untuk Phasa T ;

$$PI = \frac{9,71}{2,46}$$

$$PI = 3,94$$

$$\text{Nilai } PI_{\text{average}} = \frac{3,71+4,04+3,94}{3}$$

$$PI = 4,89$$

Menggunakan persamaan tersebut maka dari hasil tahanan isolasi pada Tabel 4.2 dapat diolah dengan *Polarization Index* hasilnya maka:

Nilai PI untuk Phasa R ;

$$PI = \frac{19,8}{3,72}$$

$$PI = 5,32$$

Nilai PI untuk Phasa S ;

$$PI = \frac{16,9}{3,03}$$

$$PI = 5,57$$

Nilai PI untuk Phasa T;

$$PI = \frac{16,2}{2,9}$$

$$PI = 5,58$$

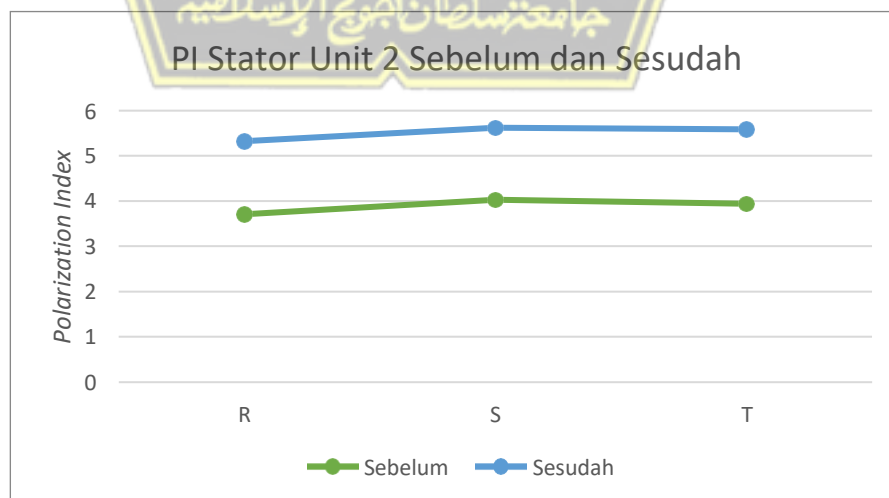
$$\text{Nilai } PI_{\text{average}} = \frac{5,32+5,57+5,58}{3}$$

$$PI = 5,49$$

Dari perhitungan diatas maka didapatkan sesuai dengan Tabel 4.3 dan Gambar 4.1 ditunjukkan pada Tabel 4.3 sebagai berikut:

Tabel 4. 3 Perhitungan PI Sebelum dan Sesudah AI.

Pemeliharaan	Phasa		
	R	S	T
Sebelum	3.71	4.04	3.94
Sesudah	5.32	5.62	5.58



Gambar 4. 1 Grafik Nilai PI.

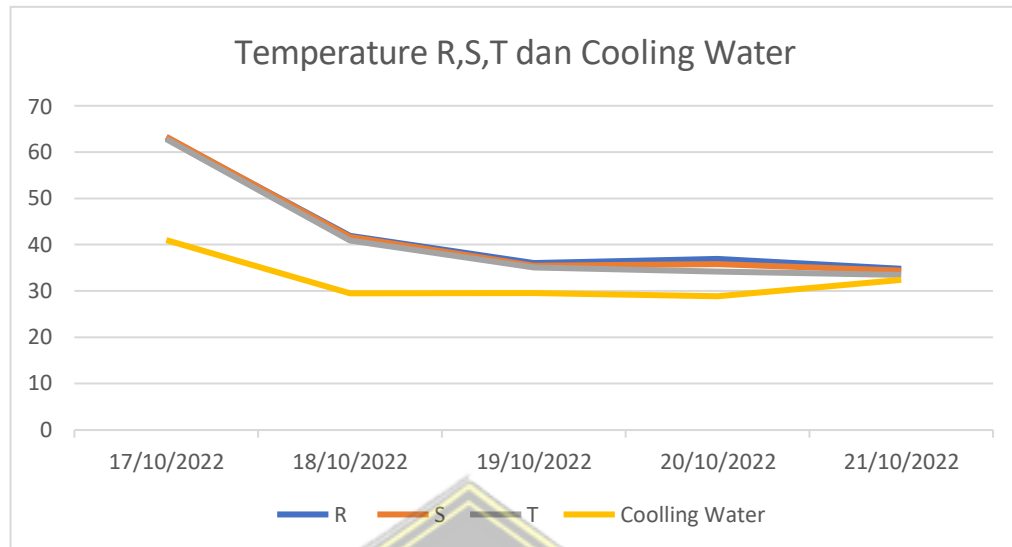
Gambar diatas dapat dilihat bahwa dari perhitungan nilai PI sebelum *Annual Inspection* pada R sebesar 3,71, S sebesar 4,03 dan T sebesar 3,94. Dan untuk hasil setelah *Annual Inspection* didapati bahwa nilai R sebesar 5,32, S sebesar 5,62 dan T sebesar 5,58. . Dapat diketahui bahwa data hasil pengukuran *Polarization Index* sebelum AI yang digambarkan dengan garis berwarna hijau memiliki interval yang berhimpit dengan data hasil pengukuran PI sesudah AI yang ditunjukkan dengan garis berwarna biru. Diketahui setelah dilakukan pemeliharaan nilai PI meningkat.

4.2.2 Melakukan Pengukuran Temperatur

Dari hasil pengukuran *temperatur* yang didapatkan yaitu pada temperatur stator saat tertinggi dan juga temperatur *cooling water* dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.2 sebagai berikut:

Tabel 4. 4 Temperatur Tertinggi R,S,T dan Cooling Water.

Tanggal	Temperatur (°C)			
	R	S	T	Coolling Water
10/17/2022	63.100099	63.300099	62.800099	40.999901
10/18/2022	41.900074	41.700074	40.900074	29.500099
10/19/2022	36.000025	35.50005	35.1	29.59995
10/20/2022	36.887845	35.787845	34.187845	28.875691
10/21/2022	34.799975	34.4	33.5	32.39995

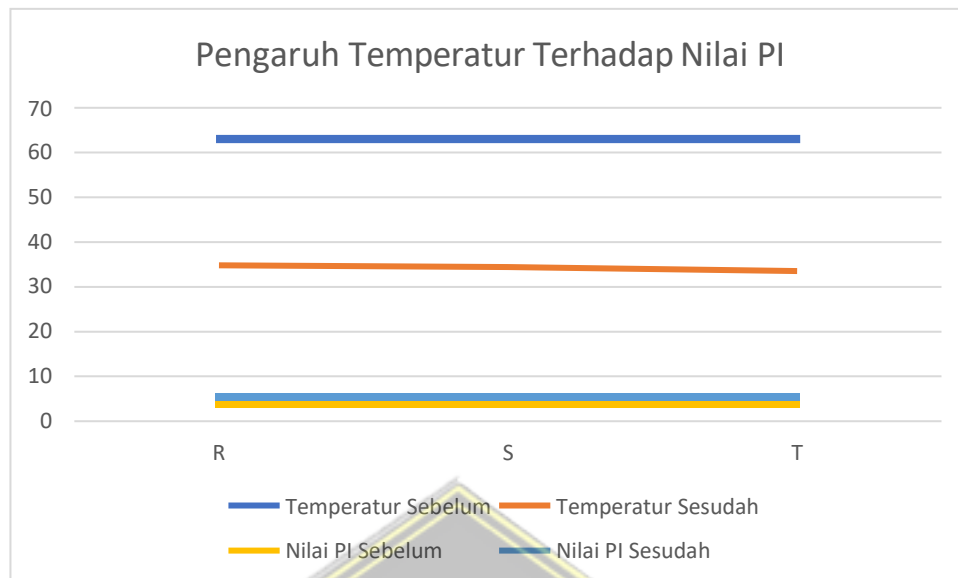


Gambar 4. 2 Grafik Temperatur Tertinggi R,S,T & Cooling Water.

Setelah mengetahui perhitungan tahanan isolasi dengan menggunakan *Polarization Index* maka dapat mengidentifikasi atau mengetahui tahanan isolasi. Nilai PI menunjukkan tingkat keadaan isolasi dan kemampuan material isolasi untuk menahan arus bocor. Dapat dikaitkan dengan suhu atau temperatur. Diketahui pada tabel 4.4 dan Gambar 4.2 nilai temperatur tertinggi ada pada di hari sebelum pemeliharaan yaitu pada tanggal 17 Oktober R,S dan T memiliki suhu hingga mencapai 63°C dan seiring bertahapnya pemeliharaan suhu menurun yaitu pada tanggal 18 Oktober sebesar 41°C, tanggal 19 Oktober sebesar 35°C, tanggal 20 Oktober sebesar 35°C, dan dihari terakhir setelah pemeliharaan selesai di tanggal 21 Oktober sebesar 34°C.

4. 3 Hasil Analisa

Melalui hasil pengukuran dan perhitungan dengan menggunakan *Polarization Index* pengukuran temperatur tertinggi R,S, dan T serta temperatur air pendingin. Dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Pengaruh Temperatur Terhadap Nilai PI.

Dari nilai PI dan temperatur bahwa hasil perhitungan terindikasi masih baik dan diatas standar sehingga aman. Bahwa ketika sebelum dilakukannya pemeliharaan diketahui nilai PI cukup rendah dimana keadaan *temperatur* juga mencapai tertinggi yaitu 63°C dan *temperatur* stator yaitu berada diangka 40°C suhu tertinggi pada air pendingin, sedangkan ketika setelah dilakukannya pemeliharaan nilai PI meningkat dan suhu sudah mengalami penurunan menjadi 34°C yang mana sudah berada pada suhu ambien yang normal dan suhu air pendingin juga berada di 32°C . Diketahui bahwa semakin tingginya *temperatur* stator maupun air pendingin maka tingkat PI menjadi semakin rendah.

Dan dari hasil wawancara dengan teknisi listrik di PLTA Panglima Besar Sudirman. Nilai-nilai tersebut dapat dikorelasikan dengan fenomena yang terjadi, yaitu sebagai berikut.

1. Dapat diketahui bahwa PLTA Panglima Besar Soedirman berada didataran tinggi sehingga memiliki potensi kelembaban yang tinggi, kelembaban tinggi dapat mengganggu sistem pendinginan generator. Generator membutuhkan pendinginan untuk menjaga suhu operasional yang optimal. Namun, jika udara sekitar memiliki kelembaban tinggi, penguapan air

yang biasanya membantu pendinginan menjadi lebih sulit. Akibatnya, suhu generator dapat meningkat karena kurangnya efisiensi pendinginan dapat diketahui dari nilai cooling water yang mencapai 40°C. Selain itu kelembaban tinggi dapat menyebabkan kondensasi di dalam generator. Ketika udara lembap masuk ke dalam generator dan suhunya turun, uap air dalam udara dapat berubah menjadi air cair. Hal ini dapat mengakibatkan pembentukan air di dalam generator, yang pada gilirannya dapat menyebabkan korosi sehingga dapat mengurangi performa dari generator itu sendiri.

2. Suhu operasional generator memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai PI pada tahanan isolasi stator. Peningkatan suhu dapat menyebabkan penurunan nilai PI karena adanya penurunan resistivitas bahan isolasi. Faktor ini dapat terjadi akibat kondisi lingkungan yang panas yaitu suhu tertinggi mencapai 63°C. Dan dapat diketahui bahwa generator PLTA Panglima Besar Sudirman berada di lantai bawah tanah dan umumnya cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan suhu di permukaan tanah. Hal ini dapat terjadi karena adanya keterbatasan ventilasi udara yang baik di lingkungan bawah tanah. Peningkatan suhu lingkungan tersebut akan berdampak pada suhu operasional stator generator. Selain itu, suhu operasional stator generator juga dipengaruhi oleh suhu ruangan di sekitarnya. Jika ruangan tersebut memiliki suhu yang tinggi, maka akan berdampak pada suhu operasional stator generator. Suhu yang tinggi dapat meningkatkan suhu stator generator dan dapat menyebabkan penurunan nilai PI pada tahanan isolasi stator.
3. PLTA Panglima Besar Soedirman menggunakan jenis *cooling sytem openloop*, dimana jenis ini juga memiliki kekurangan yaitu apabila sedang musim hujan maka akan banyak lumpur yang akan ikut masuk kedalam sistem sehingga bisa memblock *air cooler* dan berpotensi kotoran masuk ke dalam sehingga akan menyebabkan generator kotor, dan pada *Annual Inspection* dilakukan pada bulan-bulan hujan maka sangat berpotensi teradampaknya lumpur pada saat itu. Kebersihan dan kontaminasi pada

permukaan stator generator juga berdampak pada nilai PI. Adanya lapisan debu, kotoran, atau bahan kontaminan lainnya dapat menyebabkan peningkatan kelembaban atau konduktivitas, yang pada gilirannya dapat mengurangi nilai PI. Dapat dikorelasikan dari hasil nilai PI bahwa sebelum dilakukannya pemeliharaan nilai PI cenderung rendah yaitu berkisar diangka 4,89 dan ketika sudah dilakukan pemeliharaan sebesar 5,49.



BAB V

PENUTUP

Bab V ini yaitu penutup yang berisi kesimpulan dan juga saran sebagai berikut :

5. 1 Kesimpulan

Kesimpulan dari hasil pengukuran, perhitungan, dan wawancara dengan teknisi listrik di PLTA Panglima Besar Soedirman adalah sebagai berikut:

1. Untuk menentukan kelayakan tahanan isolasi generator di PLTA Panglima Besar Soedirman menjadi perhatian karena pengaruh kelembaban tinggi dan kondisi lingkungan panas di dataran tinggi. Ditunjukkan dengan suhu operasional teringgi yang mencapai 63°C serta penggunaan *cooling system open loop* yang rentan terhadap kontaminan dapat mempengaruhi nilai PI sehingga tidak stabil.
2. Pengaruh kelembaban terhadap kelayakan generator pada PLTA Panglima Besar Soedirman yang menyebabkan kenaikan suhu operasional generator yang mencapai 63°C dan cooling water mencapai nilai 40°C , yang berdampak pada nilai PI yang mencapai nilai terendah pada $3,71\ \text{M}\Omega$ sebelum pemeliharaan. Kondisi ini dapat menurunkan efisiensi dan meningkatkan risiko kerusakan pada komponen isolasi generator. Namun, setelah dilakukan pemeliharaan, suhu stator berhasil diturunkan menjadi 34°C dan cooling water mencapai 32°C serta nilai PI meningkat menjadi $5,6\ \text{M}\Omega$. Pemeliharaan ini berhasil menurunkan suhu dan nilai PI.

5. 2 Saran

Dalam keseluruhan, hasil pengukuran, perhitungan, dan wawancara menunjukkan bahwa nilai PI di PLTA Panglima Besar Soedirman sudah cukup baik dan harus terus dijaga dikarenakan memiliki kelembaban tinggi, kondisi lingkungan, kebersihan generator, dan suhu operasional generator memiliki pengaruh terhadap nilai PI dan suhu generator. Beberapa upaya juga perlu

dilakukan ketika nilai PI anjlok Pemeliharaan yang tepat dan perhatian terhadap faktor-faktor tersebut penting untuk menjaga performa dan keandalan generator di PLTA Panglima Besar Sudirman.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Bimantara, “Analisis Kelayakan Tahanan Isolasi Generator Ac 60 Mw / 13,8 Kv Plta Pb Soedirman Mrica, Banjarnegara Yoga Bimantara A W, Ir. Sri lestari, M.T.,” pp. 12–13, 2016.
- [2] M. Amir and I. W. A. Juliawan, “Analisa Pengaruh Partial Discharge Dan Tan Δ Terhadap Umur Isolasi Belitan Stator Akibat Ikatan Kumparan Generator Longgar 20201210,” *J. Sinusoida*, vol. 20, no. 4, pp. 1–11, 2018.
- [3] D. L. McKinnon, “Simulating insulation systems under various environmental conditions in the laboratory,” *Conf. Rec. IEEE Int. Symp. Electr. Insul.*, pp. 336–340, 2012, doi: 10.1109/ELINSL.2012.6251485.
- [4] Dapis, “Analisis Percepatan Penuaan Isolasi Akibat Pengaruh Kelembaban dan Kontaminan pada Motor Induksi Berbeban,” vol. 2013, pp. 1–34, 2016.
- [5] M. F. Robbani, D. Nugroho, and G. Gunawan, “Penentuan Kelayakan Tahanan Isolasi Pada Transformator 60 MVA Di Gardu Induk 150 kV Tegal Dengan Menggunakan Indeks Polarisasi, Tangen Delta, Dan Breakdown Voltage,” *Elektrika*, vol. 12, no. 2, p. 60, 2020, doi: 10.26623/elektrika.v12i2.2721.
- [6] Electric Machinery Committee, “IEEE 43 - 2000 Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery,” vol. 2000, pp. 1–26, 2004.
- [7] E. M. Committee, *IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation*, vol. 2000. 2001.
- [8] Wiwin A Oktaviani, Taufik Barlian, and Marami Ahmad Gazani, “Pengujian Isolasi Trafo Daya 30 MVA pada GI Sungai Juaro Palembang dengan Indeks Polaritas dan Tangen Delta,” *J. Rekayasa Elektro Sriwij.*, vol. 3, no. 1, pp. 199–204, 2021, doi: 10.36706/jres.v3i1.43.
- [9] J. Aminuddin, “Analisis Tegangan Keluaran Generator Listrik Frekuensi

- Rendah dengan Metode Conjugate-Gradient,” *J. Teras Fis.*, vol. 3, no. 1, p. 142, 2020, doi: 10.20884/1.jtf.2020.3.1.2729.
- [10] H. Asy’ari, B. Handaga, A. Basith, and M. A. Himawan, “Pengaruh Perbandingan Konstruksi Stator terhadap Tegangan Keluaran Generator Linier,” *Emit. J. Tek. Elektro*, vol. 16, no. 1, pp. 32–42, 2016, doi: 10.23917/emit.v16i1.2681.
- [11] E. M. Jesiani, A. Apriansyah, and R. Adriat, “Model Pendugaan Evaporasi dari Suhu Udara dan Kelembaban Udara Menggunakan Metode Regresi Linier Berganda di Kota Pontianak,” *Prism. Fis.*, vol. 7, no. 1, p. 46, 2019, doi: 10.26418/pf.v7i1.32515.
- [12] 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, p. 48, 2021, doi: 10.30591/polektr.v10i2.2584.
- [13] D. Gardu and I. Telukjambe, “JE-UNISLA,” vol. 6, no. 2, pp. 10–13, 2021.
- [14] P. Gill, *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing*. 2016.
- [15] Sugiyono, “Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D,” in *ALFABETA*, 26th ed., Bandung: ALFABETA, 2017, p. 334.