

**ANALISIS HASIL UJI KEMURNIAN GAS SF6 PADA  
PMT 150 KV BAY PGLI#1 DAN PGLI#2  
DI GARDU INDUK GLUGUR**

*Diselesaikan Untuk Melengkapi Tugas – Tugas Dan Memenuhi  
Sayarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro  
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

**Di susun oleh :**

**RIZKI WAHYU RAMDANA MARPAUNG**

**2107220052**



**UMSU**

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA  
MEDAN  
2025**

## HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Rizki Wahyu Ramdana Marpaung  
NPM : 2107220052  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : Analisis Hasil Uji Kemurnian Gas Sf6 Pada Pmt 150 Kv Bay  
PGLI#1 Dan PGLI#2 Di Gardu Induk Glugur  
Bidang ilmu : Sistem Tenaga

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 18 September 2025

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing



Ir. Abdul Aziz Hutasuhut, MM

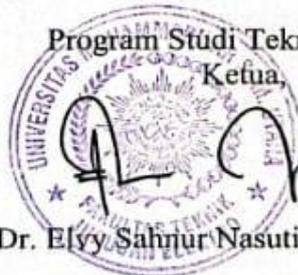
Dosen Pembanding I / Penguji

~~Muhammad Adam, S.T., M.T~~

Dosen Pembanding II / Peguji

Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T

Program Studi Teknik Elektro  
Ketua



Dr. Elyy Sahrur Nasution, S.T., M.Pd

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Rizki Wahyu Ramdana Marpaung  
Tempat /Tanggal Lahir : Kebun Tambusai/10 November 2003  
NPM : 2107220052  
Fakultas : Teknik  
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

**“Analisis Hasil Uji Kemurnian Gas Sf6 Pada PMT 150 Kv Bay PGLI#1 Dan PGLI#2 Di Gardu Induk Glugur”**

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinal dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 18 September 2025

Saya yang menyatakan,

  
Rizki Wahyu Ramdana Marpaung

## ABSTRAK

Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi memutus arus ketika terjadi gangguan. Keandalan PMT sangat dipengaruhi oleh media isolasi yang digunakan. Gas Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) dipilih karena memiliki kekuatan dielektrik tinggi serta efektif dalam memadamkan busur listrik. Namun, kualitas gas ini dapat menurun akibat operasi berulang, kontaminasi kelembapan, maupun reclaiming kurang optimal. Oleh sebab itu, pengujian rutin diperlukan. Penelitian ini bertujuan menganalisis hasil uji kualitas gas SF<sub>6</sub> pada PMT 150 kV Bay PGLI#1 dan PGLI#2 di Gardu Induk Glugur dengan membandingkan data tahun 2022 dan 2024. Metode yang digunakan adalah analisis deskriptif kuantitatif terhadap parameter purity, moisture content, dew point, dan tekanan gas. Hasil uji tahun 2022 menunjukkan Bay PGLI#1 memiliki purity 100%, moisture content 549 ppmv, dew point -8°C, dan tekanan 6,27 bar pada. Bay PGLI#2 mencatat purity 100%, moisture content 570 ppmv, dew point -6°C, dan tekanan 6,0 bar masing-masing fasa R,S,T. Pada tahun 2024 terjadi sedikit perubahan: Bay PGLI#1 mencatat purity 98,6% (R), 98,7% (S), 98,8% (T), moisture content 289–315 ppmv, dew point -42,5 °C hingga -39,8 °C, serta tekanan 6,2–6,3 bar. Sementara itu, Bay PGLI#2 mencatat purity 98,5% (R), 98,6% (S), 98,7% (T), moisture content 298–327 ppmv, dew point -40,7°C hingga -38,9°C, dan tekanan 6,3–6,4 bar. Kesimpulannya, meskipun terdapat penurunan purity dari 100% menjadi sekitar 98,5–98,8%, semua parameter masih sesuai standar IEC dan SKDIR. Kondisi ini menunjukkan gas SF<sub>6</sub> pada PMT tetap aman dan layak operasi, tetapi pemantauan rutin dan pemeliharaan diperlukan agar keandalan sistem terjaga.

**Kata kunci:** SF<sub>6</sub>, Pemutus Tenaga, Kemurnian Gas, Moisture Content, Dew Point, Tekanan

## ABSTRACT

*Circuit Breaker (CB) is an essential device in the power system that functions to interrupt current during a fault. The reliability of the CB is strongly influenced by the insulating medium used. Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) gas is chosen because it has high dielectric strength and is effective in extinguishing electric arcs. However, the quality of this gas may decrease due to repeated operation, moisture contamination, or suboptimal reclaiming. Therefore, routine testing is required. This study aims to analyze the test results of SF<sub>6</sub> gas quality in the 150 kV CB at Bay PGLI#1 and PGLI#2 in Glugur Substation by comparing data from 2022 and 2024. The method used is a descriptive quantitative analysis of parameters such as purity, moisture content, dew point, and gas pressure. The 2022 test results show that Bay PGLI#1 recorded a purity of 100%, moisture content of 549 ppmv, dew point of -8 °C, and pressure of 6.27 bar. Bay PGLI#2 recorded a purity of 100%, moisture content of 570 ppmv, dew point of -6 °C, and pressure of 6.0 bar for phases R, S, and T. In 2024, slight changes were observed: Bay PGLI#1 recorded a purity of 98.6% (R), 98.7% (S), 98.8% (T), moisture content of 289–315 ppmv, dew point ranging from -42.5 °C to -39.8 °C, and pressure of 6.2–6.3 bar. Meanwhile, Bay PGLI#2 recorded a purity of 98.5% (R), 98.6% (S), 98.7% (T), moisture content of 298–327 ppmv, dew point ranging from -40.7 °C to -38.9 °C, and pressure of 6.3–6.4 bar. In conclusion, although there was a decrease in purity from 100% to around 98.5–98.8%, all parameters remain within IEC and SKDIR standards. This indicates that SF<sub>6</sub> gas in the CB is still safe and suitable for operation, but routine monitoring and maintenance are required to ensure system reliability.*

**Keywords:** SF<sub>6</sub>, Circuit Breaker, Gas Purity, Moisture Content, Dew Point, Pressure

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Syukur alhamdulillah saya ucapkan kepada Allah SWT yang telah memberikan limpahan Rahmat dan Karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “ANALISIS HASIL UJI KEMURNIAN GAS SF6 PADA PMT 150 KV BAY PGLI#1 DAN PGLI#2 DI GARDU INDUK GLUGUR”. sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan

Dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada: Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terimakasih yang tulus dan dalam kepada:

1. Orang tua penulis, Ayahnda Alamsyah Marpaung dan Ibunda Sakniah lubis yang telah memberikan dukungan moral dan material beserta doa yang tidak pernah berhenti demi kelancaran penulisan skripsi ini.
2. Bapak Prof. Dr. Agussani, M.AP. selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Munawar Alfansury Siregar, ST., MT selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Ibu Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Bapak Benny Oktrialdi, S.T, M.T sebagai Sekretaris Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Ir. Abdul Aziz Hutasuhut, MM. selaku Dosen Pembimbing yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan ilmu keteknik elektroan kepada penulis.
8. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

9. Sahabat-sahabat penulis: Yogi Pangestu, Iwan Prayogo, Ragil Rean Wijaya, Yamin Azhari, Reski Abadi, Syahrul Ramdan, Farhan Afidal.
10. Teman-teman seperjuangan Elektro B1 Pagi Stambuk 2021 yang tidak dapat di sebutkan satu persatu
11. Seluruh staf karyawan karyawan UPT Medan, ULTG Glugur dan Gardu Induk Glugur

Besar harapan agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua yang membutuhkan. Penulis menyadari ada banyak kesalahan dalam pembuatan skripsi ini, baik dalam tata cara penulisan dan pemilihan kata yang digunakan. Oleh karena itu di harapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dalam penyempurnaan pembuatan skripsi ini.

Billahi Fii Sabililhaq Fastabiqul Khoirat,  
Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Medan, 18 September 2025

Rizki Wahyu Ramdana Marpaung

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>i</b>
<b>SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR</b> .....	<b>ii</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xi</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Ruang Lingkup .....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Landasan Teori .....	5
2.1.1 Tinjauan Pustaka Relevan .....	9
2.2 Gardu induk.....	11
2.2.1 Gedung Kontrol .....	12
2.2.2 Panel Kontrol .....	13
2.2.3 Panel Proteksi .....	14
2.2.4 Panel AC/DC Gardu Induk .....	15
2.2.5 Sumber DC Gardu Induk .....	16
2.2.6 Panel Kubikel.....	17
2.2.7 Transformator Pemakaian Sendiri (TPS).....	18
2.2.8 SCADA.....	18
2.2.9 <i>Switch Yard (Switch Gear)</i> .....	19
2.2.10 Transformator Tegangan.....	20
2.2.11. <i>Neutral Graunding Resistance (NRG)</i> .....	21
2.2.12 Pemutus Tenaga atau (PMT) .....	21

2.2.13 Saklar Pemisah (PMS) .....	22
2.2.14 Transformator Arus atau Current Transformator (CT) .....	23
2.2.15 Capacitive voltage transformer (CVT) .....	24
2.2.16 Lightning Aresster (LA) .....	25
2.2.17 Busbar .....	26
2.2.18 Gas Insulated Substation (GIS) .....	27
2.3 Circuit Breaker (CB) atau Pemutus Tenaga (PMT) .....	28
2.3.1 Klasifikasi PMT .....	29
2.3.2 Pemutus Tenaga (PMT) berdasarkan jumlah mekanik penggerak .....	30
2.3.3 Berdasarkan Proses Pemadaman Busur Api Listrik Diruang Pemutus .....	32
2.3.4 Pemutus Tenaga berdasarkan media isolasi dan pemadam busur api ..	33
2.4 Busur Api .....	37
2.5 Gas SF <sub>6</sub> .....	37
2.5.1 Sifat Fisik Gas SF <sub>6</sub> .....	38
2.5.2 Sifat Kimia .....	38
2.5.3 Sifat listrik .....	38
2.5.4 Karakteristik Gas SF <sub>6</sub> .....	39
2.6 Tekanan gas SF <sub>6</sub> .....	40
2.6.1 Implementasi Gas SF <sub>6</sub> Bertekanan pada Pemutus Tenaga .....	41
2.6.2 Pemeriksaan Tekanan/Kerapatan Gas .....	42
2.7. Pengukuran/Pengujian kualitas Gas SF <sub>6</sub> .....	44
2.7.1 Purity (Kemurnian Gas SF <sub>6</sub> ) .....	45
2.7.2 Decomposition Product (Produk Dekomposisi Gas SF <sub>6</sub> ) .....	46
2.7.3 Dew point (titik embun) .....	46
2.7.4 Moisture (Kelembaban dalam Gas SF <sub>6</sub> ) .....	47
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>48</b>
3.1 Tempat Dan waktu .....	48
3.1.1 Tempat .....	48
3.1.2 Waktu .....	48
3.2 Alat Dan Bahan .....	49
3.3. Pengujian Kualitas SF <sub>6</sub> .....	51
3.4. Metode Perhitungan Kualitas Gas SF <sub>6</sub> .....	52

3.2 Bagan Alir Penelitian .....	55
3.3 Diagram Satu Garis Gardu Induk Glugur.....	56
<b>BAB IV ANALISA DATA.....</b>	<b>57</b>
4.1 Data Circuit Breaker SF6 Di Gardu Induk Glugur .....	57
4.2 Hasil Pengujian Kualitas Gas SF6 Saat Har Pengantar 2022.....	58
4.2.1 Perhitungan Standar <i>Moisture Content</i> Dan Nilai <i>Dew Point</i> .....	60
4.3 Hasil Pengujian Kualitas Gas SF6 Saat Har Pengantar 2022.....	67
4.3.1 Perhitungan Standar <i>Moisture Content</i> Dan Nilai <i>Dew Point</i> .....	69
4.3.2 Hasil Pengujian Lapangan Pada 2024 .....	76
4.4 Analisis Kemurnian ( <i>Purity</i> ) .....	76
4.5 Analisis <i>Moisture Content</i> .....	78
4.6 Analisis <i>Dew Point</i> .....	79
4.7 Analisis Decomposition Product.....	81
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>82</b>
5.1 Kesimpulan.....	82
5.2 Saran .....	83
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>85</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>88</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gardu Induk.....	11
Gambar 2.2 Gedung Kontrol.....	13
Gambar 2.3 Panel Kontrol .....	14
Gambar 2.4 Panel Proteksi.....	15
Gambar 2.5 Panel AC/DC.....	15
Gambar 2.6 Sumber DC .....	16
Gambar 2.7 Panel Kubikel .....	17
Gambar 2.8 Transformator Pemakaian Sendiri.....	18
Gambar 2.9 Switch Yard.....	19
Gambar 2.10 Transformator Tegangan .....	20
Gambar 2.11 Neutral Graunding Resistance.....	21
Gambar 2.12 Pemutus Tenaga .....	22
Gambar 2.13 Saklar Pemisa .....	23
Gambar 2.14 Transformator Arus .....	24
Gambar 2.15 Cavacitive Voltage Transformator .....	25
Gambar 2.16 lightning Aresster .....	26
Gambar 2.17 Busbar.....	26
Gambar 2.18 Gas Insulated Subtation.....	27
Gambar 2.19 posisi PMT open dan close.....	28
Gambar 2.20 Macam-Macam PMT .....	30
Gambar 2.21 PMT Single Pole .....	31
Gambar 2.22 PMT Three Pole .....	31
Gambar 2.23 Pemadam Busur Api Dengan Gas SF6 .....	33
Gambar 2.24 Pemadam Busur api Dengan Oil/Miyak.....	34
Gambar 2.25 Pemadam Busur api Dengan Udara Hembus .....	35
Gambar 2.26 Pemadam Busur api Dengan Hampa Udara.....	36
Gamabar 3. 1 LaptopAcer.....	49
Gamabar 3. 2 Kalkulator .....	50
Gamabar 3. 3 Baro Meter Gas Sf6 .....	50
Gamabar 3. 4 Tester Analizer SF6.....	51
Gamabar 3. 5 Bagan Alir Penelitian .....	55
Gamabar 3. 6 Diagram Satu Garis Gardu Induk Glugur.....	56
Gambar 4. 1 Name plate sepesifikas circuit Breker.....	57
Gambar 4. 2 Grafik Balok Perbandingan kemurnian Gas SF6 .....	77
Gambar 4. 3 Grafik Garis Perbandingan kemurnian Gas SF6.....	77
Gambar 4. 4 Grafik Balok Perbandingan <i>moisten content</i> Gas SF6.....	78
Gambar 4. 5 Grafik Garis Perbandingan <i>moisten content</i> Gas SF6.....	79
Gambar 4. 6 Grafik Balok Perbandingan nilai Dew point Gas SF6 .....	80
Gambar 4. 7 Grafik Garis Perbandingan nilai <i>Dew point</i> Gas SF6 .....	80

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan beberapa media isolasi .....	40
Tabel 2. 2 Konversi Satuan Tekanan .....	42
Tabel 2. 3 Tekanan Gas SF6 .....	44
Tabel 2. 4 Tekanan Gas SF6 Standart Pengujian Kualitas Gas SF6.....	45
Tabel 3. 1 Jadwal Kegiatan Penelitian .....	48
Tabel 3. 2 tabel tekanan parsial terhadap nilai dew point IEEE 1125 1993.....	54
Tabel 4. 2 hasil pengujian gas SF6 bay Paya Geli 1 dan 2 tahun 2022.....	59
Tabel 4. 3 hasil pengujian gas SF6 bay Paya Geli 1 dan 2 tahun 2024 .....	68

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Energi listrik menjadi kebutuhan utama dalam perkembangan teknologi saat ini. Kehidupan manusia sangat bergantung pada listrik, sehingga jika pasokan listrik tiba-tiba terputus, berbagai aspek kehidupan dapat mengalami kekacauan. [1], Gardu induk (GI) berperan sebagai penghubung antara sistem transmisi dan distribusi. Di dalamnya, terdapat peralatan kritis seperti Pemutus Tenaga (PMT), yang berfungsi untuk memutus arus listrik secara cepat saat terjadi gangguan. Salah satu media isolasi utama dalam PMT tegangan tinggi adalah gas Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>), yang memiliki karakteristik isolasi dan pemadaman busur listrik yang sangat baik. Keandalan PMT sangat bergantung pada kondisi fisik dan kimia gas SF<sub>6</sub> yang digunakan.

SF<sub>6</sub> dipilih karena memiliki kekuatan dielektrik 2 hingga 3 kali lebih besar dibandingkan udara, serta kemampuan untuk memadamkan busur listrik dalam waktu sangat singkat. Namun, performa tersebut sangat bergantung pada kemurnian dan tekanan gas. Bila terjadi penurunan kualitas, misalnya akibat kontaminasi uap air atau pembentukan produk dekomposisi seperti SO<sub>2</sub> atau HF, maka kemampuan isolasi menurun, yang berpotensi menimbulkan kegagalan isolasi atau kerusakan pada PMT.

Menurut standar IEC 60376 dan IEC 60480, kemurnian gas SF<sub>6</sub> yang layak digunakan sebagai media isolasi harus berada di atas 99,9%, dengan batas kandungan air, asam, dan produk dekomposisi yang ketat. Hasil uji gas SF<sub>6</sub> secara berkala menjadi penting untuk memastikan parameter tersebut tetap dalam batas aman. Sayangnya, di beberapa gardu induk ditemukan hasil uji yang menunjukkan penurunan kualitas gas akibat proses pemutusan gangguan yang berulang dan kurang optimalnya proses reclaiming gas.

Fenomena gangguan listrik seperti hubung singkat atau flashover di gardu induk menyebabkan peningkatan suhu dan energi tinggi pada kontak PMT, yang dapat memicu dekomposisi SF<sub>6</sub>. Produk dekomposisi tersebut tidak hanya bersifat

korosif tetapi juga mempengaruhi tegangan tembus gas secara signifikan. Hal ini berdampak langsung terhadap keandalan PMT dalam memutus arus gangguan selanjutnya, terutama pada sistem 150 kV yang memiliki beban dan tegangan tinggi.

Semakin besar arus gangguan maka semakin cepat waktu kerja relay dan begitu juga sebaliknya. dengan demikian, kemurnian gas SF<sub>6</sub> menjadi variabel penting dalam mendukung kinerja sistem proteksi untuk merespons arus gangguan secara efektif dan efisien. [2]

Studi terdahulu di Gardu Induk Duri Kosambi mencatat bahwa kadar SO<sub>2</sub> dalam SF<sub>6</sub> mencapai >12 ppmv setelah terjadi gangguan, melebihi ambang yang ditetapkan standar IEC 60480 [3]. Data ini menunjukkan bahwa pemutusan arus gangguan dapat mempercepat degradasi gas.

Di wilayah Sumatera Utara, penelitian mengenai kualitas gas SF<sub>6</sub> dan dampaknya terhadap performa PMT masih tergolong minim. Penelitian oleh Sinaga [4] di GI Mabar Medan mencatat kemurnian SF<sub>6</sub> sebesar 98,8% dengan titik embun -7 °C, yang berada hampir di bawah standar ideal namun masih digunakan dalam operasi. Meski tidak menunjukkan kegagalan isolasi, hal ini menjadi peringatan bahwa kualitas gas perlu dipantau secara ketat untuk mencegah risiko gangguan berulang.

Di Gardu Induk Glugur, sebagai salah satu titik utama dalam jaringan 150 kV di Medan, analisis hasil uji kemurnian gas SF<sub>6</sub> terhadap pemutus tenaga (PMT) belum banyak diteliti. Padahal, PMT di gardu ini rutin mengalami pemutusan beban dan kadang menangani gangguan dengan arus tinggi. Hal ini membuka pertanyaan penting: apakah kualitas gas masih sesuai standar setelah siklus operasi intensif, dan apakah ada hubungan langsung antara hasil uji gas dengan kecenderungan meningkatnya arus gangguan?

Kesenjangan inilah yang menjadi titik tolak penelitian ini. Dengan mengkaji hasil uji gas SF<sub>6</sub> seperti kemurnian, Moisture Content dan tekanan, khususnya di bay PGL#1 dan PGLI#2 di GI Glugur. Dengan menganalisis data hasil uji kemurnian yang telah diperoleh dari pengujian rutin, dapat dievaluasi apakah

nilai-nilai purity, dan titik embun masih berada dalam rentang aman sesuai standar operasional.

Selain menjadi kontribusi akademis, penelitian ini juga relevan secara praktis untuk pengelola GI, terutama dalam hal penjadwalan reclaiming gas, penggantian gas baru, dan peningkatan akurasi deteksi dini potensi kegagalan isolasi. Evaluasi berbasis data riil akan memperkuat strategi maintenance dan menurunkan risiko blackout akibat kegagalan PMT.

Dengan latar belakang tersebut, penting dilakukan penelitian yang fokus pada hubungan antara kualitas gas SF<sub>6</sub> hasil uji dan karakteristik arus gangguan pada PMT 150 kV di Gardu Induk Glugur. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap aspek teknis keandalan sistem proteksi pada gardu induk dan sekaligus memperkuat dokumentasi ilmiah mengenai performa isolasi berbasis SF<sub>6</sub> di Indonesia, khususnya di Sumatera Utara.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Apakah standar kualitas kemurnian gas SF<sub>6</sub> sebagai media isolasi pemutus tenaga di Gardu Induk Glugur sudah sesuai dengan batas layak operasi?
2. Bagaimana interpretasi parameter hasil uji gas SF<sub>6</sub>, seperti tingkat purity, Moisture Content dan titik embun dapat digunakan untuk menilai kondisi isolasi dan kinerja PMT 150 kV di Gardu Induk Glugur?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui dan mengevaluasi apakah kualitas kemurnian gas SF<sub>6</sub> yang digunakan pada PMT 150 kV di Gardu Induk Glugur telah memenuhi standar kelayakan operasi.

2. Untuk mengevaluasi secara mendalam parameter-parameter kemurnian gas SF<sub>6</sub>, meliputi tingkat purity, Moisture Content dan titik embun kualitas gas SF<sub>6</sub> sebagai media isolasi pada PMT di Gardu Induk Glugur.

#### **1.4 Ruang Lingkup**

Agar penelitian ini dapat dilakukan secara fokus dan sistematis, ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada beberapa aspek berikut:

1. Penelitian difokuskan pada analisis data hasil pengujian kualitas gas SF<sub>6</sub> seperti kemurnian, tekanan, dan kandungan produk dekomposisi yang telah tersedia, pada PMT 150 kV di Gardu Induk Glugur.
2. Data yang dianalisis berasal dari dokumentasi teknis, laporan pemeliharaan, dan tanpa melakukan pengujian langsung di laboratorium.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman teknis mengenai pengaruh kualitas gas SF<sub>6</sub> terhadap performa isolasi dan pemutusan arus gangguan pada PMT.
2. Menjadi acuan bagi pihak pengelola gardu induk dalam mengevaluasi kelayakan gas SF<sub>6</sub> dan merencanakan pemeliharaan atau penggantian gas untuk menjamin keandalan sistem.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Landasan Teori**

Pembangkit listrik merupakan fasilitas penting yang berfungsi menghasilkan energi listrik sebagai salah satu kebutuhan utama dalam kehidupan manusia modern. Dibandingkan dengan sumber energi lainnya, energi listrik memiliki peran yang sangat vital karena hampir seluruh aspek kehidupan bergantung padanya. Mulai dari kegiatan rumah tangga, operasional industri, hingga aktivitas komersial, semuanya membutuhkan pasokan listrik yang stabil dan andal. Oleh karena itu, keberadaan dan pengelolaan pembangkit listrik menjadi faktor kunci dalam mendukung pertumbuhan ekonomi, kesejahteraan masyarakat, serta kelangsungan aktivitas sehari-hari.[5]

Transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkit ke gardu induk sebelum disalurkan ke konsumen. Proses ini bertujuan untuk mendistribusikan listrik dengan efisiensi tinggi dan meminimalisir kehilangan energi. Untuk mencapai tujuan tersebut, tegangan yang dihasilkan oleh generator dinaikkan oleh trafo dan di salurkan melalui jaringan SUTT, sehingga memungkinkan dilakukannya distribusi tegangan tinggi atau penambahan saluran transmisi tegangan tinggi. Hal ini penting untuk mengurangi arus yang mengalir pada penghantar sehingga rugi-rugi daya akibat hambatan dapat diminimalkan. Sistem transmisi tenaga listrik secara umum dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu transmisi arus bolak-balik (AC) dan transmisi arus searah (DC).

Transmisi AC paling umum digunakan karena kemudahan mengubah tegangan menggunakan trafo. Komponen utama suatu sistem transmisi tenaga listrik adalah saluran transmisi, gardu induk, trafo, menara transmisi, konduktor dan isolator. Saluran transmisi berfungsi sebagai penghantar listrik, dapat berupa saluran udara atau kabel bawah tanah. Selama penyaluran energi listrik tersebut sering terjadi kehilangan daya dan penurunan tegangan yang dipengaruhi oleh jarak transmisi, luas penampang konduktor, resistansi konduktor, dan beban. [6].

Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) merupakan salah satu elemen utama dalam sistem transmisi tenaga listrik yang berfungsi sebagai jalur distribusi energi dari pusat pembangkit menuju pusat-pusat beban, seperti kawasan

perkotaan, kawasan industri, serta pemukiman penduduk. SUTT dirancang untuk mentransmisikan daya listrik dalam jumlah besar dengan efisiensi tinggi serta menjaga kestabilan sistem tenaga listrik secara keseluruhan. Oleh karena itu, keandalan dan kualitas operasional SUTT menjadi faktor krusial dalam menjamin kontinuitas pasokan listrik yang stabil dan aman bagi masyarakat. Gangguan pada sistem ini, seperti gangguan cuaca ekstrem, gangguan teknis, atau faktor eksternal lainnya, dapat berpotensi menyebabkan pemadaman listrik yang berdampak luas. Untuk itu, diperlukan perawatan berkala, pemantauan kondisi infrastruktur, serta penerapan teknologi proteksi yang efektif guna memastikan bahwa SUTT dapat beroperasi secara optimal dan berkontribusi dalam mendukung kebutuhan energi listrik yang terus meningkat seperti Obyek proteksi tower SUTT 150kV dengan sistem pentanahan yang layak.[7]

Dalam penyaluran energi listrik, terdapat banyak faktor yang dapat menyebabkan gangguan pada sistem transmisi dari gardu induk ke gardu induk lainnya, Sistem Proteksi merupakan sistem yang dirancang untuk pengamanan peralatan serta mengurangi dan membatasi kerugian yang ditimbulkan pada peralatan listrik akibat adanya gangguan baik gangguan internal ataupun eksternal. Gangguan internal mencakup lonjakan arus berlebih, gangguan antar fasa ke fasa, serta gangguan fasa ke tanah, yang dapat mengganggu kestabilan penyaluran energi listrik dan merusak peralatan listrik. Sementara itu, gangguan eksternal dapat disebabkan oleh faktor lingkungan seperti sambaran petir, gangguan oleh hewan, serta sentuhan pohon dengan kawat konduktor yang berpotensi menimbulkan korsleting atau pemadaman listrik. Untuk mencegah dan mengatasi gangguan tersebut, diperlukan sistem proteksi yang andal guna melindungi komponen transmisi seperti relay proteksi, sistem pentanahan (grounding), arrester, dan perangkat lainnya yang mampu mendeteksi serta merespons gangguan secara cepat dan tepat. Keberadaan sistem proteksi ini memiliki peran penting dalam menjaga keandalan jaringan transmisi listrik, memastikan pasokan energi tetap stabil, serta mencegah terjadinya pemadaman luas maupun kerusakan yang lebih parah pada infrastruktur kelistrikan.[8]

Tidak hanya sistem transmisi sistem distribusi juga memiliki peranan penting dalam sistem kelistrikan. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga

listrik dari sumber daya listrik besar (bulk power source) sampai ke konsumen. Setelah tenaga listrik di bangkitkan oleh pusat pembangkit listrik, selanjutnya tenaga listrik di salurkan melalui jaringan transmisi. Dari jaringan transmisi selanjutnya didistribusikan ke para konsumen melalui jaringan distribusi. Jadi sistem distribusi berfungsi membagikan dan mengontrol penyaluran energi listrik ke beberapa tempat (konsumen). Oleh karena itu, keandalan sistem distribusi menjadi faktor utama dalam menjamin kontinuitas pasokan listrik. Semakin sering terjadi gangguan pada jaringan distribusi, semakin besar pula risiko terganggunya suplai energi listrik kepada konsumen, yang dapat berdampak pada aktivitas industri, bisnis, maupun rumah tangga.[9]

Pada sistem transmisi dan distribusi Daya Listrik terdapat suatu sistem pengamanan yang dibuat untuk mengamankan peralatan-peralatan listrik. Dalam hal ini adalah Circuit Breaker (CB), yang merupakan suatu instalasi pengamanan terhadap jaringan listrik. Circuit Breaker bekerja secara otomatis maupun manual untuk menghentikan aliran listrik ketika terdeteksi kondisi abnormal, sehingga dapat mencegah kerusakan yang lebih besar pada peralatan listrik serta mengurangi risiko kebakaran akibat gangguan listrik. Selain itu, Circuit Breaker juga memiliki kemampuan untuk menghubungkan kembali aliran listrik setelah gangguan teratasi, sehingga memungkinkan sistem kembali beroperasi tanpa memerlukan pemulihan yang kompleks.[10]

Salah satu bagian dari proses penyediaan tenaga listrik bagi konsumen pelanggan listrik adalah operasi jaringan distribusi. Karena sistem jaringan distribusi merupakan titik pertemuan dari para pemakai tenaga listrik dengan sistem penyaluran tenaga listrik. Salah satu komponen yang memerlukan biaya yang besar pada distribusi saluran udara tegangan menengah adalah penghantar (konduktor) oleh sebab itu Perencanaan dan instalasi SUTM memerlukan analisis yang cermat untuk menentukan jenis dan ukuran konduktor yang tepat, guna memenuhi kebutuhan beban listrik pelanggan secara ekonomis. Untuk menjaga kestabilan dari sistem kelistrikan maka diperlukan pemeliharaan baik itu jaringan maupun sistem dalam kelistrikan, Pemeliharaan jaringan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) 20 kV [11]

Dalam sebuah sistem tenaga listrik, proteksi menjadi bagian yang sangat penting untuk menjaga kestabilan dan keandalan pasokan listrik. Proteksi yang baik harus bisa bekerja dengan tepat, tidak mengganggu bagian lain yang masih berfungsi, cepat merespons saat ada masalah, serta cukup sensitif untuk mendeteksi gangguan sekecil apa pun tanpa menyebabkan pemutusan yang tidak perlu. Bayangkan jika tidak ada sistem proteksi gangguan kecil seperti hubung singkat bisa dengan cepat menyebar dan menyebabkan pemadaman luas, atau lebih buruk lagi, merusak peralatan mahal seperti transformator dan pemutus tenaga (PMT). Oleh karena itu, sistem proteksi dirancang untuk mendeteksi, mengisolasi, dan mengatasi gangguan agar dampaknya bisa diminimalkan. Komponen utama dalam sistem proteksi ini adalah relai proteksi, yang bekerja seperti "sensor pintar" untuk mendeteksi anomali dalam jaringan listrik. Misalnya, ketika terjadi lonjakan arus akibat gangguan hubung singkat, relai akan langsung mengirimkan sinyal perintah ke pemutus tenaga (PMT) agar arus listrik di bagian yang terganggu segera diputus. Dengan begitu, gangguan tidak menyebar ke area lain dan peralatan lainnya tetap aman.[12]

Sistem proteksi ini bekerja berdasarkan beberapa prinsip utama. Salah satunya adalah selektivitas, yaitu memastikan bahwa hanya bagian yang bermasalah yang diputus, sementara bagian lain tetap beroperasi normal. Prinsip lainnya adalah kecepatan, karena semakin cepat gangguan diatasi, semakin kecil dampaknya terhadap sistem. Selain itu, sistem proteksi juga harus andal, artinya tidak boleh gagal saat benar-benar dibutuhkan. Inilah mengapa setiap komponen dalam sistem proteksi harus bekerja secara terkoordinasi, sehingga saat satu bagian mengalami gangguan, tindakan yang dilakukan tetap terkendali dan sesuai rencana. proteksi ini bekerja dalam berbagai level. Relai diferensial digunakan untuk melindungi transformator dari gangguan internal, sementara relai jarak dipasang untuk mendeteksi gangguan di penghantar transmisi. Jika ada arus lebih yang melebihi batas aman, relai arus lebih akan aktif dan memerintahkan PMT untuk segera memutus aliran listrik. Semua ini dilakukan dalam hitungan detik untuk mencegah kerusakan lebih lanjut.[13]

Pemeliharaan peralatan listrik di Gardu Induk merupakan langkah penting yang mencakup berbagai pengujian guna memastikan keandalan dan keamanan

sistem tenaga listrik. Salah satu komponen yang memerlukan perhatian khusus adalah Pemutus Tenaga (PMT) atau Circuit Breaker (CB), yang memiliki peran krusial dalam mengendalikan aliran listrik. PMT berfungsi untuk memutus dan menyambungkan arus listrik dalam kondisi operasi normal serta bertindak cepat saat terjadi gangguan, seperti hubung singkat atau lonjakan arus berlebih. Tanpa pemeliharaan yang rutin dan terencana, risiko kegagalan PMT dapat meningkat, yang berpotensi menyebabkan gangguan sistem hingga pemadaman listrik yang luas. Oleh karena itu, berbagai metode pengujian diterapkan, seperti uji ketahanan mekanis, pengujian isolasi, serta pengujian tekanan gas SF<sub>6</sub> (pada PMT jenis gas-insulated), guna memastikan bahwa peralatan tetap berfungsi optimal sesuai standar operasional. Selain itu, pemeliharaan yang berkala juga membantu memperpanjang umur peralatan, mengurangi potensi kerusakan mendadak, dan meningkatkan efisiensi operasional sistem tenaga listrik secara keseluruhan.[14]

### **2.1.1 Tinjauan Pustaka Relevan**

Pada Gardu Induk Cilegon, arus gangguan yang terjadi pada sisi 20 kV dengan panjang penyulang 10 km memiliki nilai sebesar 6,843 kA untuk gangguan tiga fasa, 1,975 kA untuk gangguan dua fasa, dan 0,688 kA untuk gangguan satu fasa ke tanah. Tekanan gas SF<sub>6</sub> pada PMT berpengaruh terhadap kecepatan busur listrik, di mana pada tekanan 610 kPa, kecepatan busur listrik tercatat sebesar 408 cm/s, 126,4 cm/s, dan 44 cm/s untuk masing-masing jenis gangguan. Sementara itu, pada tekanan 510 kPa, kecepatan busur listrik meningkat menjadi 499,5 cm/s, 144,1 cm/s, dan 50,2 cm/s. Dari data tersebut, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi tekanan gas SF<sub>6</sub>, maka kecepatan busur listrik yang terjadi pada proses pemutusan PMT akan semakin rendah. Selain itu, hasil perhitungan menunjukkan bahwa gangguan tiga fasa menghasilkan arus gangguan tertinggi, yaitu 6,843 kA, dengan kecepatan busur listrik sebesar 408 cm/s. Besarnya arus gangguan juga berpengaruh terhadap laju busur listrik yang dihasilkan, di mana semakin besar arus gangguan, semakin cepat laju busur listrik yang terbentuk. Dengan demikian, gas SF<sub>6</sub> sebagai media isolasi dalam PMT berperan penting dalam mengendalikan laju busur listrik selama proses pemutusan. [15]

Berdasarkan hasil analisis, tekanan gas SF<sub>6</sub> dalam kondisi normal tercatat sebesar 6,4 bar, sedangkan pada stage 1 turun menjadi 5,4 bar dan pada stage 2 menjadi 5,2 bar, dengan suhu sekitar 34°C. Berdasarkan fishbone diagram dan analisis FMEA, faktor utama yang menyebabkan penurunan tekanan gas SF<sub>6</sub> adalah faktor mesin, dengan nilai Risk Priority Number (RPN) tertinggi sebesar 810. Selain itu, hasil pengujian menunjukkan bahwa kualitas gas SF<sub>6</sub> mengalami penurunan akibat usia operasi yang telah melebihi 20 tahun. Penurunan tekanan gas SF<sub>6</sub> ini berdampak pada kecepatan busur api dan jarak celah kontak, di mana semakin lama kecepatan busur meningkat dan jarak celah semakin besar. Kondisi ini dapat menyebabkan breakdown peralatan akibat pengaruh busur api atau arcing. [16]

Setelah dilakukan reklamasi gas SF<sub>6</sub>, kondisi pada kompartemen CB dan Sealing End telah mencapai keadaan ideal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar moisture content dan dew point berada dalam batas standar. Berdasarkan tabel 4, nilai moisture content yang diperoleh untuk kompartemen Sealing End adalah 395 ppmv, kompartemen Mekanik CB sebesar 68,69 ppmv, dan kompartemen CB sebesar 239 ppmv. sementara itu, hasil pengujian dew point menunjukkan bahwa kompartemen Sealing End memiliki nilai -7°C, kompartemen Mekanik CB sebesar -24,3°C, dan kompartemen CB sebesar -12,6°C. Hasil ini telah memenuhi standar dew point, yaitu -5°C, sehingga menandakan kualitas gas SF<sub>6</sub> yang sudah sesuai dengan ketentuan yang dipersyaratkan. [17]

Pemeliharaan terkait kualitas gas menunjukkan bahwa tekanan yang terukur mencapai 6,4 bar, yang masih dalam kondisi baik jika dibandingkan dengan standar minimum 5,4 bar untuk alarm setting dan 5,1 bar untuk trip setting. Kemurnian gas berada dalam rentang 98,9% - 100%, yang lebih tinggi dibandingkan standar minimum yang ditetapkan, yaitu di bawah 97%. Selain itu, hasil pengujian dew point menunjukkan nilai -22°C, yang lebih baik dari standar minimum -5°C. Sementara itu, moisture content gas pada PMT Langsa sebesar 115 dan pada PMT Binjai sebesar 35,74, yang keduanya masih memenuhi dan berada dalam batas yang lebih baik dibandingkan dengan standar yang ditetapkan. [18]

Penurunan tekanan gas SF<sub>6</sub> pada PMT berpengaruh terhadap kecepatan busur api yang dihasilkan. Jika tekanan gas SF<sub>6</sub> rendah akibat belum dilakukan pengisian, kecepatan busur api menjadi lebih kecil, sehingga proses peredaman oleh gas SF<sub>6</sub> berlangsung lebih lambat. Kondisi ini dapat membahayakan peralatan dan berpotensi menyebabkan kebakaran maupun ledakan. Sebaliknya, pada PMT yang telah dilakukan pengisian gas SF<sub>6</sub>, tekanan meningkat, sehingga kecepatan busur api menurun lebih signifikan, memungkinkan gas SF<sub>6</sub> meredam busur api dengan lebih cepat dan efektif. [19]

## 2.2 Gardu induk

Gardu induk adalah fasilitas penting dalam sistem kelistrikan yang berperan dalam mengolah, mendistribusikan, dan mengendalikan aliran listrik dari pembangkit sebelum disalurkan ke jaringan distribusi. Di dalamnya terdapat berbagai peralatan seperti transformator, saklar, alat ukur, dan sistem kontrol yang digunakan untuk mengatur aliran listrik. Saklar berfungsi untuk membagi atau mengalihkan aliran listrik ke jalur yang berbeda serta menghubungkan kembali sirkuit yang terputus agar distribusi listrik tetap berjalan dengan baik. Sementara itu, alat ukur di gardu induk digunakan untuk memantau kondisi listrik, seperti tegangan, arus, daya, dan faktor daya, sehingga operator dapat melakukan pengaturan yang sesuai untuk menjaga kestabilan sistem. [20]

Gardu induk juga dilengkapi dengan peralatan pengukuran seperti voltmeter, ammeter, wattmeter, dan power factor meter yang digunakan untuk memantau kondisi listrik secara real-time.



Gambar 2.1 Gardu Induk

Gambar 2.1 yang terlampir merupakan area utama gardu induk, yang merupakan fasilitas penting dalam sistem tenaga listrik untuk menerima, mengubah, dan menyalurkan energi dari pembangkit ke konsumen. Gardu induk dilengkapi dengan peralatan tegangan tinggi seperti transformator, pemutus tenaga, dan sistem proteksi yang bekerja secara terkoordinasi.

Komponen gardu induk merupakan bagian-bagian individu yang membentuk keseluruhan sistem gardu induk. Setiap komponen memiliki fungsi spesifik dalam mengatur, mengontrol, serta mendistribusikan tenaga listrik dari pembangkit hingga ke konsumen. Keberadaan komponen-komponen ini sangat penting untuk menjaga kestabilan dan keandalan sistem tenaga listrik, sehingga pasokan listrik dapat tersalur dengan aman dan efisien. Berbagai peralatan yang terdapat dalam gardu induk dirancang untuk menjalankan tugas tertentu, seperti menyesuaikan tegangan listrik, mengendalikan arus listrik, serta melindungi sistem dari gangguan atau kerusakan. Dengan kerja sama antar komponen ini, aliran listrik dapat berjalan lancar. Berikut ini adalah beberapa komponen utama yang digunakan dalam gardu induk beserta fungsinya.

### **2.2.1 Gedung Kontrol**

Gedung kontrol gardu induk adalah fasilitas utama yang digunakan untuk memantau, mengendalikan, dan mengoperasikan seluruh sistem kelistrikan di dalam gardu induk. Di dalam gedung ini terdapat berbagai perangkat dan sistem kendali seperti SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), relay proteksi, panel kontrol, serta peralatan komunikasi yang memungkinkan operator untuk mengawasi aliran listrik, mengidentifikasi gangguan, dan mengambil tindakan jika terjadi masalah pada sistem. Selain itu, gedung kontrol juga menjadi pusat koordinasi bagi teknisi dalam melakukan pemeliharaan rutin maupun perbaikan saat terjadi gangguan. Keberadaan gedung ini sangat penting untuk memastikan gardu induk beroperasi dengan efisien, aman, dan andal, sehingga pasokan listrik tetap stabil bagi pelanggan.



Gambar 2.2 Gedung Kontrol

Gambar 2.2 di atas merupakan gambar gedung kontrol yang menjadi pusat pengoperasian sistem kelistrikan gardu induk. Di dalamnya terdapat berbagai perangkat penting seperti komputer SCADA, relay proteksi, sistem komunikasi, dan panel monitoring yang memudahkan operator dalam memantau dan mengendalikan aliran daya. Gedung ini juga berfungsi sebagai pusat komando dalam merespon gangguan serta pelaksanaan pengamanan sistem saat terjadi kondisi abnormal.

### **2.2.2 Panel Kontrol**

Panel kontrol pada gardu induk berperan sebagai pusat kendali utama yang memungkinkan operator untuk memantau dan mengatur sistem tenaga listrik. Panel ini dilengkapi dengan berbagai instrumen penting seperti panel meter pengukur tegangan dan arus, indikator status peralatan, serta tombol kendali untuk mengoperasikan pemutus tenaga (circuit breaker) dan pemisah (disconnecting switch). Selain itu, panel kontrol juga terintegrasi dengan relay proteksi yang berfungsi untuk mendeteksi dan merespons gangguan guna mencegah kerusakan pada sistem. Dalam operasionalnya, panel kontrol terhubung dengan sistem Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian jarak jauh secara lebih efisien. Dengan adanya panel ini, keandalan dan keamanan gardu induk dapat terjaga, sehingga distribusi listrik ke pelanggan tetap stabil dan berjalan dengan lancar.



Gambar 2.3 Panel Kontrol

Panel kontrol yang terlampir pada gambar 2.3 di atas merupakan bagian vital dalam sistem pengendalian gardu induk yang berisi instrumen untuk pemantauan dan pengoperasian manual maupun otomatis. Gambar ini memperlihatkan panel yang dilengkapi dengan indikator status, voltmeter, ammeter, saklar kendali, dan sistem komunikasi yang terintegrasi dengan SCADA. Panel ini digunakan untuk mengatur pemutusan dan penyambungan peralatan seperti PMT, transformator, serta mengawasi arus dan tegangan.

### **2.2.3 Panel Proteksi**

Panel proteksi pada gardu induk merupakan sistem penting yang berfungsi untuk mendeteksi, menganalisis, dan merespons gangguan yang terjadi dalam sistem tenaga listrik. Panel ini dilengkapi dengan berbagai perangkat proteksi seperti relay proteksi, arus lebih (overcurrent relay), serta differential relay, yang bekerja untuk melindungi peralatan utama seperti transformator, pemutus tenaga (circuit breaker), dan busbar dari kerusakan akibat gangguan listrik. Jika terjadi anomali seperti hubung singkat, tegangan lebih, atau arus lebih, panel proteksi akan mengirimkan sinyal untuk memutus aliran listrik pada bagian yang bermasalah guna mencegah kerusakan yang lebih luas. Selain itu, panel ini sering kali terhubung langsung dengan sistem Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian secara otomatis maupun jarak jauh. Dengan adanya panel proteksi, keandalan dan keselamatan sistem tenaga listrik dapat terjaga, sehingga distribusi listrik tetap stabil dan terhindar dari pemadaman akibat gangguan yang tidak terdeteksi.



Gambar 2.4 Panel Proteksi

Panel proteksi dalam gambar 2.4 di atas ini menunjukkan sistem pengaman berbasis relay yang tugasnya mendeteksi adanya gangguan dalam jaringan listrik, seperti arus lebih, tegangan lebih, atau gangguan hubung singkat. Perangkat dalam panel ini mampu mengirimkan sinyal perintah untuk memutus bagian sistem yang bermasalah secara cepat dan selektif agar tidak mengganggu sistem secara keseluruhan.

#### 2.2.4 Panel AC/DC Gardu Induk

Panel AC/DC pada gardu induk adalah sistem kelistrikan yang berfungsi untuk menyediakan sumber daya bagi peralatan kontrol, proteksi, dan komunikasi di dalam gardu. Panel ini terdiri dari dua jenis sumber daya utama, yaitu panel AC (Inverter) yang menggunakan listrik dari jaringan utama untuk memberi daya pada sistem penerangan, kipas pendingin, dan perangkat bantu lainnya, serta panel DC (Rectifier) yang berfungsi sebagai cadangan daya bagi peralatan kritis seperti relay proteksi, sistem kendali, dan SCADA.



Gambar 2.5 Panel AC/DC

Gambar Panel yang tertera pada gambar 2.5 di atas ini merupakan gambar panel yang menyuplai daya listrik dalam dua bentuk aliran yaitu: AC untuk peralatan bantu seperti penerangan, serta DC untuk sistem proteksi, kontrol, dan komunikasi. Panel AC/DC penting agar peralatan sensitif tetap dapat beroperasi saat sumber listrik utama terganggu. Panel ini biasanya dilengkapi dengan inverter dan rectifier serta sistem pemantauan baterai untuk memastikan kontinuitas daya pada peralatan kritis.

### 2.2.5 Sumber DC Gardu Induk

Panel DC (Rectifier) umumnya dilengkapi dengan baterai cadangan yang memastikan operasional tetap berjalan meskipun terjadi pemadaman listrik dari jaringan utama. Hal ini sangat penting untuk menjaga fungsi proteksi dan pengendalian gardu induk agar tetap beroperasi dalam kondisi darurat. Dengan adanya panel AC/DC, gardu induk dapat bekerja dengan lebih stabil dan aman, serta memastikan semua sistem penting tetap berfungsi tanpa terganggu oleh gangguan listrik yang mungkin terjadi.



Gambar 2.6 Sumber DC

Sumber DC yang terdapat dalam gambar 2.26 di atas ini menunjukkan sistem cadangan berbasis baterai sebagai suplay panel rectifier yang menjamin keberlangsungan daya untuk sistem kendali, proteksi, dan alarm. Sistem ini dirancang agar tetap aktif walaupun terjadi pemadaman total dari jaringan utama. Fungsi utamanya adalah memastikan bahwa proses pemutusan atau tindakan pengamanan tetap bisa dijalankan saat situasi darurat.

### 2.2.6 Panel Kubikel

Panel kubikel pada gardu induk adalah salah satu komponen utama dalam sistem distribusi listrik yang berfungsi sebagai pusat kontrol dan proteksi bagi aliran listrik. Panel ini berbentuk lemari tertutup yang berisi berbagai peralatan listrik seperti pemutus tenaga (circuit breaker), relay proteksi, arus dan tegangan trafo (CT/PT), serta busbar yang menghubungkan antarperalatan. Panel kubikel dirancang untuk mengatur distribusi listrik, melindungi sistem dari gangguan seperti hubung singkat atau tegangan lebih, serta memastikan keamanan operasional gardu induk. Kubikel umumnya terbagi menjadi beberapa jenis, seperti kubikel incoming yang menerima pasokan listrik dari jaringan transmisi, kubikel outgoing yang menyalurkan listrik ke jaringan distribusi, dan kubikel metering yang digunakan untuk mengukur parameter listrik seperti tegangan, arus, dan daya. Panel ini dilengkapi dengan sistem kendali jarak jauh melalui Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), memungkinkan operator untuk mengontrol dan memantau kondisi sistem secara real-time. Dengan adanya panel kubikel, operasi gardu induk menjadi lebih efisien, aman, dan andal, sehingga pasokan listrik ke pelanggan tetap stabil tanpa gangguan.



Gambar 2.7 Panel Kubikel

Panel kubikel adalah perangkat modular tertutup yang berfungsi untuk mengatur dan melindungi jalur distribusi listrik. Dalam gambar 2.7 yang tertera di atas ini terlihat bahwa panel ini berisi circuit breaker, CT, PT, dan busbar, serta dilengkapi dengan sistem pengendalian lokal maupun jarak jauh. Kubikel biasanya terbagi menjadi incoming, outgoing, dan metering, sehingga memungkinkan pengelolaan distribusi listrik dengan efisien dan aman.

### 2.2.7 Transformator Pemakaian Sendiri (TPS)

Transformator Pemakaian Sendiri (TPS) pada gardu induk adalah peralatan yang digunakan untuk menyuplai daya listrik bagi kebutuhan operasional gardu itu sendiri. sama halnya dengan Transformator distribusi TPS berfungsi untuk menurunkan tegangan dari jaringan utama menjadi tegangan yang sesuai untuk peralatan di dalam gardu, seperti sistem penerangan, panel kontrol, sistem proteksi, kipas pendingin, dan perangkat komunikasi. transformator ini biasanya mengambil daya dari sisi tegangan menengah atau tegangan tinggi dan menurunkannya ke level yang lebih rendah, seperti 220V atau 380V, agar dapat digunakan oleh perangkat dalam gardu induk. dengan adanya Transformator Pemakaian Sendiri, gardu induk dapat beroperasi secara mandiri tanpa bergantung pada sumber eksternal, sehingga memastikan semua sistem tetap berjalan dengan baik meskipun terjadi gangguan pada jaringan utama.



Gambar 2.8 Transformator Pemakaian Sendiri

Pada gambar 2.8 ini merupakan gambar dari Transformator Pemakaian Sendiri atau biasa disebut dengan TPS yang berfungsi untuk menyuplai kebutuhan internal gardu induk seperti kontrol, penerangan, dan sistem komunikasi. Gambar ini menunjukkan TPS yang menurunkan tegangan dari jaringan utama menjadi tegangan rendah seperti 220V atau 380V yang aman untuk digunakan oleh peralatan operasional di gardu induk.

### 2.2.8 SCADA

Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) pada gardu induk adalah sistem pemantauan dan pengendalian jarak jauh yang berfungsi untuk mengawasi, mengontrol, serta mengumpulkan data dari berbagai peralatan listrik di dalam gardu. SCADA memungkinkan operator untuk memantau parameter

penting seperti tegangan, arus, daya, dan kondisi peralatan secara real-time melalui antarmuka komputer. Dengan sistem ini, operator dapat mendeteksi gangguan, mengambil tindakan cepat, serta mengoperasikan pemutus tenaga (circuit breaker) dan saklar tanpa harus berada di lokasi. Selain itu, SCADA juga menyimpan data historis yang berguna untuk analisis kinerja dan perencanaan pemeliharaan. Dengan adanya SCADA, pengelolaan gardu induk menjadi lebih efisien, akurat, dan aman, sehingga dapat memastikan pasokan listrik tetap stabil dan terhindar dari gangguan besar.

### **2.2.9 Switch Yard (Switch Gear)**

Switchyard atau lapangan sakelar adalah bagian penting dalam gardu induk yang berfungsi sebagai penghubung antara jaringan transmisi dan distribusi listrik. Fungsinya adalah untuk mengatur, mengontrol, dan menyalurkan daya listrik sebelum diteruskan ke jaringan yang lebih kecil atau langsung ke pengguna. Switchyard dilengkapi dengan berbagai peralatan, seperti transformator tegangan circuit breaker (PMT) yang digunakan untuk memutus dan menyambung aliran listrik, disconnecting switch (PMS) untuk memisahkan bagian tertentu saat pemeliharaan, serta busbar yang berperan sebagai penghantar utama dalam sistem. Selain itu, ada juga current transformer (CT) dan potential transformer (PT) yang berfungsi untuk mengukur arus dan tegangan, lightning arrester (LA) yang melindungi sistem dari lonjakan tegangan akibat petir, serta sistem pentanahan (grounding) yang menyalurkan arus gangguan ke tanah demi keamanan. Switchyard juga dilengkapi dengan relay proteksi yang dapat mendeteksi gangguan seperti hubungan singkat atau tegangan lebih, sehingga sistem listrik tetap aman dan stabil.



Gambar 2.9 *Switch Yard*

Gambar 2.9 di atas merupakan Switchyard atau lapangan sakelar adalah area terbuka di gardu induk tempat peralatan utama saling terhubung dan dialiri listrik. Dalam gambar 2.9 terlampir di atas ini tampak peralatan seperti PMT, PMS, busbar, dan trafo yang diatur sedemikian rupa agar aliran listrik dapat diarahkan ke jalur distribusi yang berbeda sesuai kebutuhan.

### 2.2.10 Transformator Tegangan

Transformator atau lebih sering disebut trafo adalah sebuah komponen listrik yang mengubah dan memindahkan arus listrik dari suatu rangkaian listrik atau lebih kerangkaian listrik lainnya dengan tanpa mengubah system frekuensi melalui gandengan magnet dan berdasarkan pada prinsip induksi elektromagnetik.[21] Peralatan ini memainkan peran penting dalam sistem tenaga listrik, terutama dalam proses transmisi dan distribusi listrik agar dapat digunakan dengan aman dan efisien oleh konsumen. salah satu jenis transformator yang paling umum digunakan adalah transformator step down, yang berfungsi untuk menurunkan tegangan listrik dari tingkat tinggi ke tingkat yang lebih rendah sebelum disalurkan ke pelanggan. Transformator ini berperan penting dalam memastikan listrik yang dihasilkan oleh pembangkit dapat digunakan dengan aman di rumah tangga, industri, dan fasilitas umum. Dengan adanya transformator, energi listrik dapat didistribusikan secara lebih efisien, mengurangi rugi daya dalam sistem transmisi, serta menjaga kestabilan pasokan listrik di berbagai wilayah.



Gambar 2.10 Transformator Tegangan

Transformator tegangan berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik agar sesuai dengan kebutuhan jaringan transmisi dalam Gambar 2.10 yang terlampir di atas menampilkan trafo yang berkerja mengalihkan energi listrik dari sistem tegangan tinggi ke sistem tegangan menengah atau rendah.

### **2.2.11. Neutral Grounding Resistance (NRG)**

*Neutral Grounding Resistance (NGR)* pada gardu induk adalah sistem yang digunakan untuk membatasi arus gangguan ke tanah saat terjadi hubung singkat pada sistem tenaga listrik. NGR dipasang di jalur netral transformator atau generator dan berfungsi mengurangi lonjakan arus gangguan agar tidak merusak peralatan serta menjaga kestabilan sistem. Dengan adanya NGR, risiko kerusakan akibat arus gangguan bisa dikurangi, dan sistem proteksi dapat bekerja lebih efektif. Selain itu, NGR juga membantu dalam deteksi dan identifikasi gangguan lebih cepat, sehingga operator bisa segera mengambil tindakan untuk menjaga keandalan jaringan listrik



Gambar 2.11 *Neutral Grounding Resistance*

Pada Gambar 2.11 yang yang terlampirsi atas ini menunjukkan NGR, yaitu sistem resistansi yang dipasang pada titik netral transformator untuk membatasi arus gangguan ke tanah. Dengan membatasi arus ini, NGR membantu melindungi peralatan dan menjaga agar sistem tetap stabil saat terjadi hubung singkat ke tanah.

### **2.2.12 Pemutus Tenaga atau (PMT)**

Pemutus Tenaga (PMT) di gardu induk adalah peralatan penting yang berfungsi untuk memutus dan menyambungkan aliran listrik dalam sistem tenaga, baik secara manual maupun otomatis saat terjadi gangguan. PMT berperan dalam melindungi peralatan listrik dari kerusakan akibat arus lebih, tegangan berlebih, atau hubung singkat dengan cara memutus arus listrik pada jalur yang bermasalah. Alat ini bekerja dengan sistem isolasi, seperti udara (kefakuman), minyak, atau gas SF<sub>6</sub>, yang membantu mencegah loncatan listrik saat proses pemutusan.

Dengan adanya PMT, keamanan dan keandalan gardu induk dapat terjaga, serta mencegah kerusakan lebih luas yang bisa menyebabkan pemadaman listrik.



Gambar 2.12 Pemutus Tenaga

Gambar 2.12 PMT adalah peralatan saklar tegangan tinggi yang dapat memutus arus listrik baik dalam kondisi normal maupun gangguan. Gambar ini 2.12 di atas menampilkan PMT yang menggunakan media isolasi seperti gas SF<sub>6</sub> untuk meredam busur listrik saat pemutusan terjadi. Fungsinya sangat krusial dalam melindungi sistem dari kerusakan akibat arus lebih atau gangguan hubung singkat.

### **2.2.13 Saklar Pemisah (PMS)**

Saklar Pemisah (PMS) di gardu induk adalah peralatan yang digunakan untuk memutus atau menghubungkan rangkaian listrik pada kondisi tanpa beban. PMS berfungsi sebagai alat isolasi untuk memastikan bahwa suatu bagian sistem listrik benar-benar terputus sebelum dilakukan pemeliharaan atau perbaikan, sehingga aman bagi petugas. Tidak seperti Pemutus Tenaga (PMT), PMS tidak dirancang untuk memutus arus beban atau gangguan, sehingga harus digunakan bersamaan dengan PMT. Saklar ini biasanya dipasang di sisi masuk dan keluar dari peralatan utama seperti transformator atau busbar. Dengan adanya PMS, prosedur perawatan gardu induk menjadi lebih aman dan mengurangi risiko kecelakaan akibat arus listrik yang masih mengalir.



Gambar 2.13 Saklar Pemisa

Pada gambar 1.13 yang terlampir di atas merupakan PMS atau saklar pemisah digunakan untuk mengisolasi bagian sistem saat dilakukan pemeliharaan atau inspeksi. Gambar 2.13 di atas ini menunjukkan PMS yang tidak dirancang untuk memutus arus beban, sehingga penggunaannya selalu didahului oleh pemutusan arus oleh PMT. PMS berfungsi memberikan keamanan tambahan bagi teknisi yang bekerja pada *peralatan listrik*.

#### **2.2.14 Transformator Arus atau Current Transformer (CT)**

Transformator Arus atau *Current Transformer (CT)* di gardu induk adalah peralatan yang berfungsi untuk mengubah arus listrik tinggi menjadi arus yang lebih kecil agar dapat diukur dan digunakan oleh peralatan proteksi serta sistem pemantauan. CT memastikan bahwa perangkat seperti relay proteksi, meteran listrik, dan alat pemantau dapat bekerja dengan aman tanpa terkena arus tinggi langsung. Selain itu, CT juga membantu dalam mendeteksi gangguan seperti arus lebih atau hubung singkat sehingga sistem proteksi dapat segera merespons untuk mencegah kerusakan peralatan. CT bekerja dengan prinsip perbandingan arus antara sisi primer dan sekunder, yang biasanya dinyatakan dalam rasio, seperti 1000/5 A. Artinya, jika arus primer yang mengalir sebesar 1000 A, maka arus sekunder yang keluar dari CT adalah 5 A, sehingga lebih aman untuk perangkat seperti relay proteksi dan meteran listrik. dengan adanya CT, pengukuran dan pengendalian arus listrik di gardu induk menjadi lebih akurat dan aman.



Gambar 2.14 Transformator Arus

Gambar 2.24 di atas adalah transformator yang fungsinya arus mengubah arus besar menjadi arus kecil yang aman untuk instrumen pengukuran dan relay proteksi. Gambar ini memperlihatkan CT yang biasanya dipasang pada jalur penghantar dan digunakan untuk sistem monitoring dan proteksi. CT sangat penting agar sistem kendali dapat membaca kondisi arus secara akurat tanpa langsung terkena arus besar

#### **2.2.15 Capacitive voltage transformer (CVT)**

*Capacitive voltage transformer (CVT) atau Potential Transformer (PT)* di gardu induk adalah peralatan yang berfungsi untuk menurunkan tegangan tinggi dari sistem tenaga listrik ke level yang lebih rendah agar dapat digunakan oleh alat ukur dan sistem proteksi. PT memastikan bahwa perangkat seperti meteran listrik, relay proteksi, dan sistem pemantauan dapat mengukur tegangan dengan aman tanpa terkena tegangan tinggi secara langsung. PT bekerja dengan prinsip transformasi tegangan sesuai dengan rasio tertentu, misalnya 150 kV/100 V, yang berarti tegangan 150 kV di jaringan utama akan dikonversi menjadi 100 V pada sisi sekunder untuk keperluan pengukuran. Selain itu, PT juga membantu dalam mendeteksi gangguan tegangan lebih atau tegangan turun yang dapat memengaruhi kestabilan sistem tenaga listrik. Dengan adanya PT, pengukuran dan pemantauan tegangan di gardu induk menjadi lebih akurat dan aman, sehingga mendukung keandalan sistem distribusi listrik.



Gambar 2.15 *Capacitive Voltage Transformer*

Gambar 2.15 di atas ini menampilkan Capacitive Voltage Transformer (CVT), yaitu peralatan yang fungsinya digunakan untuk menurunkan tegangan tinggi menjadi tegangan rendah yang dapat diukur dan digunakan oleh sistem proteksi dan pengukuran. CVT bekerja dengan memanfaatkan pembagi tegangan kapasitif yang terhubung ke transformator induksi, menghasilkan sinyal tegangan yang sebanding dan aman untuk relay serta sistem monitoring. Perangkat ini juga digunakan untuk mengirim sinyal ke sistem telekomunikasi atau sinkronisasi.

#### **2.2.16 *Lightning Arresster (LA)***

*Lightning Arresster (LA)* di gardu induk adalah peralatan proteksi yang berfungsi melindungi sistem listrik dari lonjakan tegangan akibat sambaran petir atau gangguan lainnya. LA bekerja dengan cara mengalihkan kelebihan tegangan langsung ke tanah, sehingga tidak merusak peralatan listrik seperti transformator, pemutus tenaga (PMT), dan sistem kontrol. Alat ini biasanya dipasang pada titik-titik strategis, seperti di dekat peralatan utama dan di ujung saluran transmisi, untuk memastikan perlindungan maksimal. Ketika tegangan sistem berada dalam kondisi normal, LA tidak aktif, tetapi saat terjadi lonjakan tegangan yang berbahaya, ia akan langsung bekerja untuk menstabilkan sistem. Dengan adanya LA, risiko kerusakan akibat petir dapat diminimalkan, sehingga operasional gardu induk tetap aman dan pasokan listrik tetap stabil.



Gambar 2.16 *lightning Aresster*

Gambar 1.16 di atas ini memperlihatkan LA, yaitu alat pelindung terhadap lonjakan tegangan akibat petir. Alat ini akan menyalurkan lonjakan arus ke tanah sehingga tidak merusak peralatan utama seperti trafo, PMT dan komponen transmisi lainnya.

### **2.2.17 Busbar**

Busbar adalah penghantar utama yang berfungsi sebagai jalur distribusi listrik untuk menghubungkan berbagai peralatan seperti transformator, pemutus tenaga (PMT), dan saluran transmisi utama. Busbar dirancang untuk menyalurkan listrik dengan efisiensi tinggi dan memudahkan pengaturan aliran daya di dalam sistem tenaga. Biasanya terbuat dari bahan konduktor seperti tembaga atau aluminium, busbar mampu menahan arus listrik besar dan tersedia dalam berbagai konfigurasi, seperti single busbar, double busbar, atau ring busbar, tergantung pada kebutuhan sistem.



Gambar 2.17 Busbar

Gambar 2.17 di atas adalah busbar yang merupakan batang atau kabel penghantar utama yang menghubungkan berbagai peralatan dalam gardu induk. Gambar ini menunjukkan busbar berbahan konduktor seperti tembaga atau

aluminium yang digunakan untuk membagi arus dari satu sumber ke beberapa saluran sekaligus. Busbar juga dirancang untuk menangani arus besar dengan efisiensi tinggi.

### **2.2.18 Gas Insulated Substation (GIS)**

Gas Insulated Substation (GIS) adalah jenis gardu induk yang menggunakan gas bertekanan sebagai isolasi utama untuk melindungi peralatan listrik tegangan tinggi. Berbeda dengan gardu induk konvensional yang menggunakan udara sebagai isolator, GIS dirancang dalam wadah logam tertutup sehingga lebih hemat ruang dan lebih tahan terhadap kondisi lingkungan eksternal seperti kelembapan, polusi, dan cuaca ekstrem. komponen utama GIS meliputi pemutus tenaga, pemisah, transformator tegangan, arrester petir, busbar, serta gas isolasi Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) yang memiliki kemampuan dielektrik tinggi untuk mencegah gangguan listrik. Keunggulan GIS terletak pada ukurannya yang lebih kecil, keandalan yang tinggi, serta minim perawatan karena sistemnya tertutup rapat. Namun, biaya instalasi yang lebih mahal dan dampak lingkungan dari gas SF<sub>6</sub> menjadi tantangan tersendiri dalam penggunaannya. GIS banyak digunakan di daerah perkotaan dengan keterbatasan lahan, pembangkit listrik, serta lokasi dengan kondisi lingkungan ekstrem. Dengan teknologi ini, distribusi dan transmisi listrik menjadi lebih efisien, aman, dan berkelanjutan.

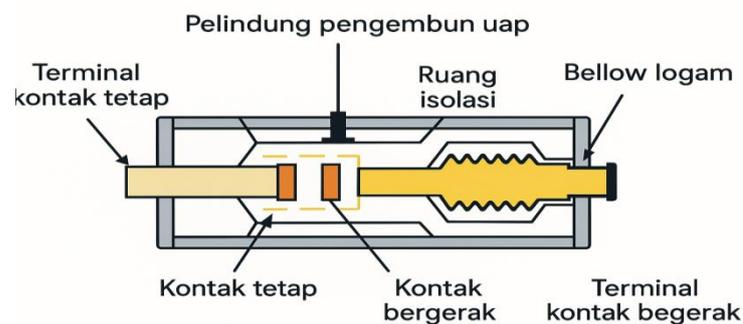


Gambar 2.18 *Gas Insulated Substation*

Gambar 2.18 yang terlampir di atas yaitu Gas insulatet substation, GIS adalah gardu induk modern yang menggunakan gas SF<sub>6</sub> bertekanan sebagai isolator. Gambar ini menampilkan sistem tertutup rapat yang tahan terhadap kelembapan, polusi, dan cuaca ekstrem.

### 2.3 *Circuit Breaker* (CB) atau Pemutus Tenaga (PMT)

Pemutus tenaga (PMT) adalah saklar mekanis yang mampu mengalirkan dan memutus arus beban dalam keadaan normal maupun dalam keadaan abnormal/gangguan sesuai dengan nilai ratingnya.[22] PMT merupakan peralatan tegangan tinggi yang berfungsi sebagai sakelar pemutus atau penghubungan arus beban dimana pemutus tenaga tersebut dilengkapi dengan media pemadam busur api sehingga dapat memutus arus beban dalam kondisi abnormal.[23]



Gambar 2.19 posisi PMT open dan close

Gambar 2.19 di atas merupakan gambar dari pemutus tenaga (PMT) yang terdiri dari komponen utama seperti terminal kontak tetap dan terminal kontak bergerak yang dihubungkan melalui kontak tetap dan kontak bergerak. Saat PMT beroperasi, kontak bergerak akan menjauh dari kontak tetap untuk memutus arus listrik. Proses ini terjadi di dalam ruang isolasi yang berfungsi menahan dan memadamkan busur listrik yang timbul saat pemutusan.

Pemutus tenaga umumnya mengacu pada perangkat yang berfungsi untuk mengontrol atau memutus aliran daya listrik dalam penerapan manajemen ataupun pengaturan beban. CB atau PMT harus memenuhi sejumlah persyaratan agar dapat menjalankan fungsi tersebut, yaitu sebagai berikut:

- A. Mampu menyalurkan arus maksimum pada sistem secara terus-menerus.
- B. Mampu memutus dan menutup aliran daya listrik dalam keadaan berbeban maupun hubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada CB/PMT itu sendiri.

C. Dapat memutus arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak dapat merusak peralatan sistem yang dapat membuat sistem kehilangan kesetabilan dan merusak CB/PMT itu sendiri.

Setiap CB/PMT dirancang sesuai dengan tugas yang akan di pikulnya, ada beberapa hal yang perlu di pertimbangkan dalam perancangan pembuatan PMT yaitu:

- A) Tegangan efektif tertinggi dan frekuensi daya jaringan sebagaimana pemutus dayanya akan dipasang. Nilainya tergantung pada titik pentanahan titik netral sistem
- B) Arus maksimum secara kontinyu akan di alirkan melalui CB/PMT. Nilai arus ini tergantung pada arus maksimum dari sumber daya atau arus nominal beban di mana CB/PMT dipasang.
- C) Arus hubung singkat maksimum yang akan di putus oleh CB/PMT tersebut
- D) Lamanya maksimum arus hubung singkat yang boleh berlangsung.  
Hal ini berhubungan dengan waktu pembukaan kontak yang di butuhkan.
- E) Jarak beban antar bagian yang bertegangan tinggi dengan objek di sekitarnya.
- F) Jarak rambat arus bocor pada isolatornya.
- G) Ke kuatan dielektrik media media isoalator sela kontak.
- H) Iklim dan ketinggian lokasi penempatan CB/PMT.

### 2.3.1 Klasifikasi PMT

Klasifikasi Pemutus Tenaga dapat dikategorikan ke dalam beberapa tipe, di antaranya berdasarkan tegangan nominal, jumlah mekanisme penggerak, jenis media isolasi, serta metode pemadaman busur api menggunakan gas SF<sub>6</sub>. Berdasarkan kelas/besar tegangannya CB/PMT dapat di bedakan menjadi :

- A) PMT Tegangan Rendah (*Low Voltage*)  
Pemutus Tenaga (PMT) pada kategori ini digunakan untuk sistem listrik dengan tegangan antara 0,1 kV hingga 1 kV. Biasanya diterapkan pada instalasi listrik perumahan, industri kecil, serta panel distribusi dalam gedung.
- B) PMT Tegangan Menengah (*Medium Voltage*)  
Digunakan untuk jaringan listrik dengan tegangan 1 kV hingga 35 kV. Umumnya ditemukan pada sistem distribusi tenaga listrik, gardu distribusi, dan instalasi industri yang memerlukan tegangan menengah.

C) PMT Tegangan Tinggi (*High Voltage*)

Beroperasi dalam rentang tegangan 35 kV hingga 245 kV, biasanya diterapkan pada jaringan transmisi listrik jarak menengah hingga jauh serta di gardu induk tegangan tinggi untuk menyalurkan energi listrik ke berbagai wilayah.

D) PMT Tegangan Ekstra Tinggi (*Extra High Voltage*)

Digunakan untuk sistem dengan tegangan lebih dari 245 kV, umumnya terdapat pada jaringan transmisi utama yang menghubungkan pembangkit listrik dengan pusat distribusi tenaga listrik untuk menyalurkan daya dalam skala besar.



Gambar 2.20 Macam-Macam PMT

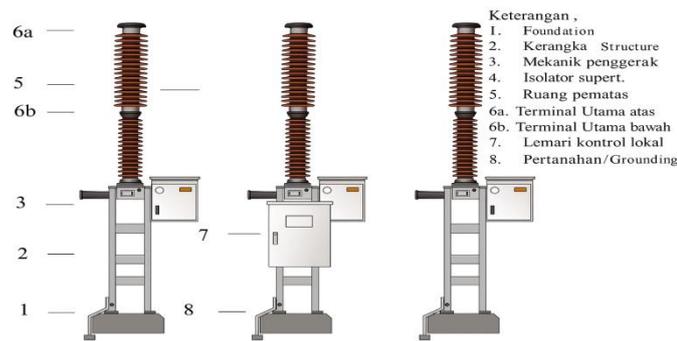
Gambar 2.20 diatas ini menunjukkan berbagai tipe pemutus tenaga berdasarkan kelas tegangan, seperti tegangan rendah, menengah, tinggi, dan ekstra tinggi. Masing-masing digunakan sesuai dengan aplikasi sistemnya, dari industri kecil hingga jaringan transmisi utama. Setiap jenis PMT dirancang untuk memutus arus listrik dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan, dengan media pemadam busur listrik yang disesuaikan dengan level tegangan dan kebutuhan sistem. Pemahaman tentang tipe PMT sangat penting agar pemilihan perangkat sesuai dengan karakteristik jaringan yang digunakan.

### 2.3.2 Pemutus Tenaga (PMT) berdasarkan jumlah mekanik penggerak

PMT dapat dibedakan menjadi:

A) PMT Single Pole

PMT type ini mempunyai mekanik penggerak pada masing-masing pole, umumnya PMT jenis ini dipasang pada bay penghantar agar PMT bisa reclose satu fasa.

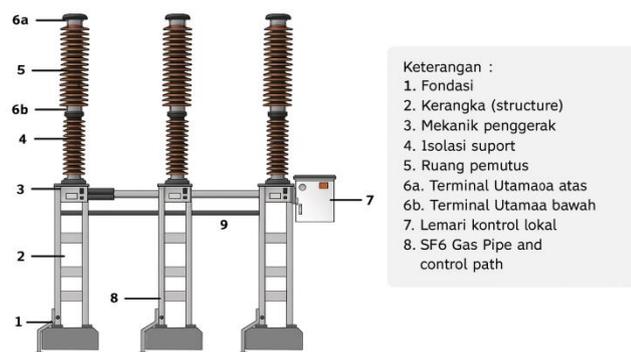


Gambar 2.21 PMT Single Pole

Gambar 2.21 diatas ini memperlihatkan PMT tipe Single Pole, yaitu pemutus tenaga yang memiliki aktuator terpisah untuk setiap fasa. PMT jenis ini biasanya digunakan pada sistem distribusi atau jaringan transmisi tertentu yang memerlukan kemampuan pemutusan per fasa, seperti pada bay penghantar. Keunggulan dari desain ini adalah fleksibilitas dalam operasi sistem yang memungkinkan pemutusan dan penyambungan hanya pada satu fasa tanpa memengaruhi fasa lainnya.

#### B) PMT Three Pole

PMT jenis ini mempunyai satu mekanik penggerak untuk tiga fasa, guna menghubungkan fasa satu dengan fasa lainnya di lengkapi dengan kopel mekanik, umumnya PMT jenis ini di pasang pada bay trafo dan bay kopel serta PMT 20 kV untuk distribusi.



Gambar 2.22 PMT Three Pole

Gambar 2.22 diatas ini menunjukkan PMT *Three Pole*, yaitu pemutus tenaga yang menggabungkan ketiga fasa dalam satu aktuator atau mekanisme penggerak. PMT ini umum digunakan pada bay transformator, bay kopel, dan

sistem distribusi 20 kV. Dengan mekanisme pemutusan simultan, PMT ini mampu menghentikan aliran arus secara serentak pada ketiga fasa untuk mencegah ketidakseimbangan sistem saat terjadi gangguan.

### **2.3.3 Berdasarkan Proses Pemadaman Busur Api Listrik Diruang Pemutus**

PMT SF<sub>6</sub> dapat dibagi dalam 2 (dua) jenis, yaitu:

#### **A) PMT Jenis Tekanan Tunggal**

PMT yang diisi dengan gas Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) pada tekanan sekitar 5 kg/cm<sup>2</sup> berfungsi sebagai isolator sekaligus pemadam busur api. Saat proses pemisahan antar kontak terjadi, gas SF<sub>6</sub> mengalami tekanan tinggi akibat fenomena thermal overpressure dan dialirkan ke dalam sebuah tabung atau silinder yang terhubung langsung dengan kontak bergerak.

Ketika pemutusan arus berlangsung, gas SF<sub>6</sub> yang telah dikompresi diarahkan melalui nozzle, menghasilkan semburan gas berkecepatan tinggi. Hembusan ini menciptakan efek pendinginan sekaligus mengganggu kontinuitas busur api, sehingga busur dapat dipadamkan dengan cepat dan efektif.

#### **B) PMT Jenis Tekanan Ganda**

PMT yang menggunakan gas Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) dirancang dengan dua sistem tekanan berbeda, yaitu tekanan tinggi sekitar 12 kg/cm<sup>2</sup> dan tekanan rendah sekitar 2 kg/cm<sup>2</sup>. Dalam proses pemutusan busur api, gas SF<sub>6</sub> dari sistem tekanan tinggi dialirkan melalui nozzle menuju bagian dengan tekanan lebih rendah, menciptakan aliran gas yang membantu mendinginkan dan memadamkan busur api dengan cepat serta efektif.

Setelah digunakan dalam proses pemadaman, gas SF<sub>6</sub> yang berada dalam sistem tekanan rendah kemudian dipompa kembali ke sistem tekanan tinggi untuk digunakan kembali dalam siklus berikutnya. Namun, jenis PMT SF<sub>6</sub> dengan mekanisme daur ulang tekanan ini kini sudah tidak lagi diproduksi, karena perkembangan teknologi telah menghadirkan desain yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

### 2.3.4 Pemutus Tenaga berdasarkan media isolasi dan pemadam busur api

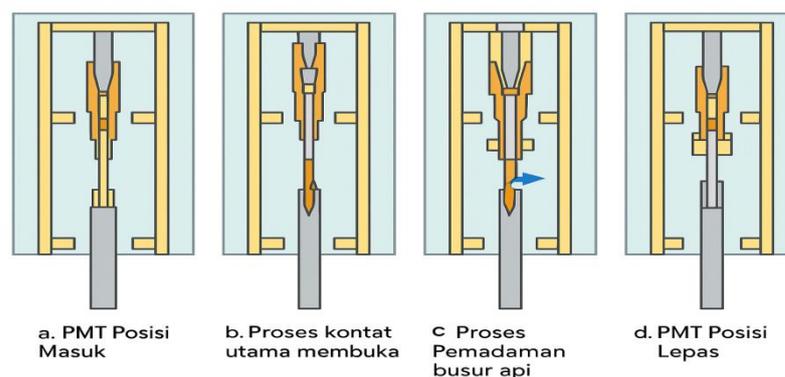
Berfungsi sebagai media pemadam busur api yang timbul pada saat PMT bekerja membuka atau menutup. Berdasarkan media pemadam busur api, PMT dapat dibedakan menjadi beberapa macam, antara lain:

#### 1. Pemadam busur api dengan gas Sulfur Hexa Fluorida (SF<sub>6</sub>)

Pemutus Tenaga (PMT) dengan gas Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) berfungsi sebagai media utama untuk memadamkan busur api yang muncul selama proses pemutusan arus listrik. Gas ini memiliki sifat isolatif yang sangat baik, sehingga mampu menghambat terjadinya loncatan listrik dan memastikan proses pemadaman berlangsung dengan cepat dan efisien.

Sebagai bahan isolasi, SF<sub>6</sub> memiliki kekuatan dielektrik yang jauh lebih tinggi dibandingkan udara, menjadikannya pilihan unggul dalam sistem tegangan tinggi. Selain itu, kemampuan dielektriknya meningkat seiring bertambahnya tekanan gas, sehingga semakin efektif dalam menahan tegangan listrik tanpa mengalami gangguan atau kebocoran daya.

PMT berbasis SF<sub>6</sub> umumnya menggunakan sistem tekanan tunggal (single pressure type), di mana selama proses pembukaan atau penutupan kontak, gas SF<sub>6</sub> dikompresi ke dalam sebuah tabung atau silinder yang terhubung langsung dengan kontak bergerak. Saat terjadi pemutusan arus, gas yang telah dikompresi tersebut dialirkan melalui nozzle, menghasilkan semburan kuat yang secara efektif mendinginkan dan memadamkan busur api dalam hitungan milidetik, memastikan keandalan sistem tenaga listrik.



Gambar 2.23 Pemadam Busur Api Dengan Gas SF<sub>6</sub>

Gambar 2.23 ini menggambarkan mekanisme kerja internal Pemutus Tenaga (PMT) tipe SF<sub>6</sub> yang berfungsi untuk memutus arus listrik dalam sistem tegangan

tinggi. Di dalam PMT, terdapat komponen seperti kontak utama, kontak busur, dan media gas SF<sub>6</sub> yang berperan penting dalam proses pemisahan dan pemadaman arus listrik. Saat terjadi gangguan, gas SF<sub>6</sub> disemprotkan untuk memadamkan busur listrik secara efektif, sehingga proses pemutusan berlangsung cepat dan aman.

## 2. Pemadam Busur api Dengan Oil/Miyak

Pemutus Tenaga (PMT) yang menggunakan minyak isolasi berperan sebagai media utama dalam proses pemadaman busur api yang terjadi saat PMT bekerja untuk membuka atau menutup arus listrik. Minyak tidak hanya berfungsi sebagai isolator listrik tetapi juga sebagai pendingin yang membantu mencegah terjadinya loncatan listrik dan memastikan pemutusan arus berlangsung dengan aman.

Terdapat dua jenis utama PMT berbasis minyak, yaitu:

- A. PMT dengan banyak minyak (Bulk Oil): Menggunakan volume minyak yang besar untuk meningkatkan efektivitas pemadaman busur api serta isolasi antar kontak.
- B. PMT dengan sedikit minyak (Small Oil): Menggunakan minyak dalam jumlah lebih kecil, namun tetap mampu memberikan perlindungan isolasi yang optimal dengan desain yang lebih efisien. PMT jenis ini dapat diaplikasikan pada sistem dengan tegangan mulai dari 6 kV hingga 425 kV, dengan arus nominal berkisar antara 400 A hingga 1250 A, serta kemampuan pemutusan arus simetris antara 12 kA hingga 50 kA.

Dengan spesifikasi tersebut, PMT minyak sering digunakan dalam jaringan distribusi dan transmisi tenaga listrik untuk memastikan kestabilan dan keandalan sistem.

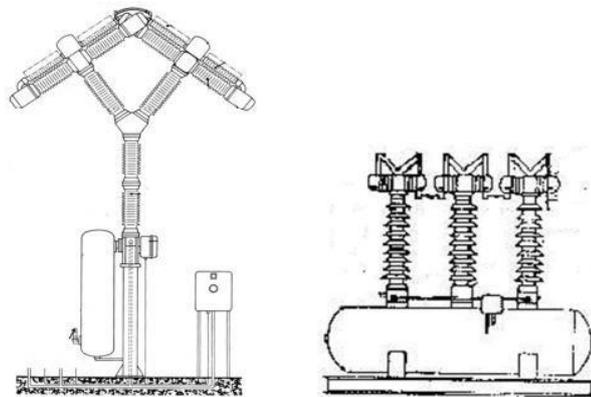


Gambar 2.24 Pemadam Busur api Dengan Oil/Miyak

Gambar 2.24 Pemadam Busur Api dengan Minyak, Pada gambar di atas ini ditampilkan gambar pemadaman busur listrik menggunakan media minyak isolasi. Ketika terjadi pemutusan arus, busur yang terbentuk diredam oleh minyak yang menyerap panas dan menghambat loncatan arus. Sistem ini banyak digunakan pada PMT konvensional dan memiliki kemampuan isolasi serta pendinginan yang baik, meskipun membutuhkan pemeliharaan lebih intensif dibanding media gas atau vakum.

### 3. Pemadam Busur Api Dengan Udara Hembus

Pemutus Tenaga (PMT) jenis ini memanfaatkan udara bertekanan tinggi sebagai media utama untuk memadamkan busur api yang terjadi selama proses pemutusan arus listrik. Mekanisme kerjanya dilakukan dengan cara meniupkan udara ke dalam ruang pemutus, sehingga busur api yang terbentuk dapat segera didinginkan dan dipadamkan dengan cepat. PMT ini lebih dikenal sebagai PMT Udara Hembus (Air Blast Circuit Breaker), yang banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik bertegangan tinggi. Teknologi ini menawarkan waktu pemutusan yang singkat dan dapat diandalkan untuk melindungi peralatan listrik dari gangguan atau lonjakan arus yang tidak terkendali.



Gambar 2.25 Pemadam Busur api Dengan Udara Hembus

Metode yang ditampilkan dalam gambar 2.25 di atas ini menggunakan hembusan udara bertekanan tinggi untuk mendinginkan dan memadamkan busur listrik yang terjadi saat kontak terbuka. Sistem ini umumnya diterapkan pada PMT tegangan tinggi karena kecepatan pemadamannya yang cukup baik serta efisiensi biaya operasional. Desain ini juga lebih ramah lingkungan karena tidak menggunakan gas kimia khusus.

#### 4. Pemadam Busur Api Dengan Hampa Udara (Vacuum)

Ruang hampa udara memiliki kekuatan dielektrik yang sangat tinggi, menjadikannya salah satu media pemadam busur api yang efisien dan andal dalam sistem pemutus tenaga. Teknologi PMT Vacuum saat ini banyak digunakan untuk sistem bertegangan menengah, khususnya pada rentang 24 kV, karena mampu memberikan perlindungan yang efektif dengan desain yang lebih kompak dan minim perawatan.

Dalam pengoperasiannya, jarak antar katoda atau celah pemutusan (gap) disesuaikan dengan tingkat tegangan yang digunakan. Sebagai contoh, untuk sistem 15 kV, jarak antar katoda sekitar 1 cm, sedangkan untuk setiap kenaikan 3 kV, jarak tersebut bertambah 0,2 cm. Untuk aplikasi pada tegangan tinggi, beberapa unit PMT Vacuum dapat dihubungkan secara seri guna meningkatkan kemampuan pemutusan arus yang lebih besar.

Bagian ruang kontak utama (breaking chambers) dibuat dari bahan kedap udara seperti porcelain, kaca, atau plat baja, yang dirancang agar dapat menahan tekanan dan isolasi yang optimal. Ruang kontak ini bersifat tertutup permanen, sehingga tidak memerlukan pemeliharaan selama masa penggunaannya, yang umumnya dapat mencapai 20 tahun. Berkat kemampuan dielektrik yang tinggi, PMT Vacuum memiliki ukuran fisik yang relatif lebih kecil dibandingkan jenis PMT lainnya, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi yang membutuhkan efisiensi ruang dan keandalan tinggi.



Gambar 2.26 Pemadam Busur api Dengan Hampa Udara

Gambar 2.26 diatas ini memperlihatkan pemutus tenaga dengan sistem pemadaman busur listrik menggunakan ruang hampa udara (vakum). Pada kondisi vakum, busur tidak dapat bertahan karena ketiadaan partikel penghantar.

## 2.4 Busur Api

Busur api merupakan pelepasan energi dalam bentuk panas dan cahaya yang terjadi secara tiba-tiba akibat aliran listrik yang menjalar melalui udara. Kejadian ini umumnya tidak diharapkan karena dapat menimbulkan gangguan pada sistem kelistrikan.

Saat FCO (Fuse Cut Out) mengalami pemutusan, busur api yang terbentuk hanya berlangsung dalam waktu singkat. Oleh karena itu, diperlukan sensor yang memiliki respons cepat dan akurat untuk mendeteksi keberadaan busur api guna mencegah potensi gangguan atau kerusakan lebih lanjut.[24]

## 2.5 Gas SF<sub>6</sub>

Gas *Sulfur Hexafluoride* (SF<sub>6</sub>) merupakan senyawa yang terbentuk dari reaksi eksotermis antara unsur sulfur (S) dan fluor (F<sub>2</sub>) dengan reaksi:  $S + 3F_2 \rightarrow SF_6 + 262 \text{ kkal}$ . Gas ini memiliki sifat isolasi yang sangat baik, terutama karena kemampuannya dalam menangkap elektron bebas. Ketika sebuah elektron bertabrakan dengan molekul netral SF<sub>6</sub>, molekul tersebut akan menyerap elektron dan membentuk ion negatif.

Sebagai gas insulasi, SF<sub>6</sub> memiliki karakteristik unggul karena bersifat tidak beracun, tidak berbau, tidak berwarna, serta tidak mudah terbakar. Gas ini juga memiliki stabilitas molekul yang sangat tinggi, bahkan pada suhu hingga 500°C, mendekati sifat gas mulia. Pada kondisi tersebut, SF<sub>6</sub> tidak mengalami dekomposisi atau bereaksi dengan bahan lain, sehingga sangat andal digunakan dalam sistem isolasi listrik.

Dibandingkan dengan udara, massa jenis gas SF<sub>6</sub> sekitar lima kali lebih berat, serta memiliki sifat elektronegatif yang membuatnya sangat efektif dalam menangkap elektron bebas. Dengan energi ikatan yang tinggi, gas ini memiliki kekuatan dielektrik 2,5 hingga 3 kali lebih besar daripada udara, menjadikannya pilihan utama dalam sistem isolasi tegangan tinggi.

Stabilitas SF<sub>6</sub> yang luar biasa juga membuatnya tidak mengalami perubahan kimia bahkan dalam kondisi suhu yang ekstrem. Hal ini berbeda dengan media isolasi lain seperti minyak, yang cenderung mengalami oksidasi dan degradasi seiring waktu. Oleh karena itu, SF<sub>6</sub> banyak digunakan dalam berbagai aplikasi kelistrikan yang membutuhkan tingkat keandalan tinggi, terutama pada peralatan

Pemutus Tenaga (PMT) dan sistem isolasi di gardu induk serta jaringan transmisi tegangan tinggi.

### **2.5.1 Sifat Fisik Gas SF<sub>6</sub>**

Gas *Sulfur Hexafluoride* (SF<sub>6</sub>) murni, dalam kondisi tekanan absolut 1 atm dan suhu 20°C, merupakan gas tanpa warna, tanpa bau, serta tidak beracun, sehingga aman digunakan dalam berbagai aplikasi kelistrikan. Gas ini memiliki massa jenis sebesar 6.139 kg/m<sup>3</sup>, menjadikannya jauh lebih berat dibandingkan udara. Selain itu, gas SF<sub>6</sub> memiliki berat molekul 146,7 g/mol, dengan suhu kritis sebesar 45,55°C dan tekanan absolut kritis mencapai 3,78 MPa. Sifat kritis ini menunjukkan batas di mana gas dapat berubah menjadi cair tanpa mengalami perubahan fase yang nyata, menjadikannya sangat stabil dan efektif sebagai media isolasi dalam peralatan listrik tegangan tinggi, seperti pemutus tenaga (PMT) dan Gas Insulated Switchgear (GIS). Stabilitasnya yang luar biasa memungkinkan SF<sub>6</sub> mempertahankan sifat isolatifnya bahkan dalam kondisi operasi yang ekstrem. Sumber : Pedoman Pemeliharaan Peralatan Primer GI (0520-K/DIR/2014)

### **2.5.2 Sifat Kimia**

Gas *Sulfur Hexafluoride* (SF<sub>6</sub>) memiliki stabilitas kimia yang sangat tinggi, sehingga dalam kondisi suhu lingkungan (ambient temperature) tetap dalam bentuk gas netral tanpa mengalami reaksi kimia yang signifikan. Stabilitas termalnya juga sangat baik, menjadikannya salah satu media isolasi yang paling andal dalam sistem kelistrikan. Bahkan ketika dipanaskan hingga suhu di atas 150°C, SF<sub>6</sub> tidak akan merusak material seperti logam, plastik, atau berbagai bahan lainnya yang umumnya digunakan dalam pembuatan Pemutus Tenaga (PMT) tegangan tinggi serta perangkat listrik lainnya.

### **2.5.3 Sifat listrik**

Dalam aplikasi kelistrikan, gas SF<sub>6</sub> dikenal sebagai isolator dengan kekuatan dielektrik yang sangat tinggi. Secara spesifik, kemampuan dielektriknya mencapai 2,35 kali lebih besar dibandingkan udara, membuatnya sangat efektif dalam mencegah terjadinya loncatan listrik dan gangguan isolasi. Selain itu, kekuatan dielektrik SF<sub>6</sub> meningkat seiring dengan peningkatan tekanan, sehingga semakin ideal untuk digunakan dalam sistem bertegangan tinggi. Keunggulan

lainnya adalah kemampuannya memulihkan kembali sifat isolatifnya dengan sangat cepat setelah terjadi pelepasan arus bunga api pada titik nol, sehingga meningkatkan keandalan sistem proteksi listrik dan menjaga kontinuitas operasi tanpa gangguan yang berarti.

#### **2.5.4 Karakteristik Gas SF<sub>6</sub>**

Seiring dengan perkembangan teknologi kelistrikan, metode isolasi berbasis gas mulai dikembangkan pada akhir tahun 1970-an. Pada masa itu, penelitian mengenai gas Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) telah mencapai tahap komersialisasi, sehingga mulai diterapkan sebagai media isolasi utama dalam pemutus tenaga tegangan tinggi (PMT). Hingga saat ini, SF<sub>6</sub> menjadi pilihan utama sebagai bahan isolasi karena memiliki keandalan tinggi serta efisiensi biaya dalam penggunaannya. Alasan penggunaan gas SF<sub>6</sub> sebagai media isolasi, yaitu:

1. Keandalan Tinggi

Gas SF<sub>6</sub> digunakan dalam PMT untuk mengatasi berbagai permasalahan yang berkaitan dengan switching overvoltages atau lonjakan tegangan akibat proses pemutusan dan penyambungan arus listrik. Keunggulan ini membuat SF<sub>6</sub> menjadi solusi efektif dan aman dalam sistem kelistrikan tegangan tinggi, terutama dalam meningkatkan stabilitas operasi serta mengurangi risiko kegagalan isolasi.

2. Efisiensi Ekonomi

Dari segi biaya, penggunaan SF<sub>6</sub> tergolong lebih ekonomis karena sistem isolasi berbasis gas ini membutuhkan perawatan minimal. Pemeliharaan hanya terbatas pada pemeriksaan ulang kondisi gas, yang dapat dilakukan dalam jangka waktu operasional yang sangat panjang, yaitu sekitar 10 hingga 20 tahun tanpa perlu sering mengganti atau menambah gas. Perbandingan beberapa media isolasi. Seperti ditunjukkan pada tabel Tabel 2.1 yang terlampir dibawah ini yang bersumber : Pedoman Pemeliharaan Peralatan Primer GI (0520-K/DIR/2014) menyajikan perbandingan karakteristik beberapa media isolasi yang digunakan dalam pemutus tenaga (PMT), seperti udara, minyak, vakum, dan gas SF<sub>6</sub>. Perbandingan mencakup parameter seperti kekuatan dielektrik, stabilitas termal, risiko kebakaran, serta efektivitas pemadaman busur listrik. Tabel ini berguna untuk menilai media

isolasi mana yang paling sesuai untuk digunakan dalam sistem kelistrikan tegangan tinggi.

Tabel 2. 1 Perbandingan beberapa media isolasi

Media Isolasi	Rating Tegangan	Rating Arus	Kapasitas Pemutusan	Metode Pemutusan	Manfaat
Udara Biasa	< 1 kV	Hingga 400 A	16 kA	Busur api padam dengan sendirinya	PMT tegangan rendah
Minimum Oil (Less Oil)	Sampai 20 kV	Hingga 1250 A	50 kA	Busur api dipadamkan oleh keberadaan minyak	PMT Tegangan sampai 24 kV
Vakum Udara	Sampai 72 kV	Hingga 5000 A	50 kA	Busur api dicegah, karena kondisi kevakuman	PMT Tegangan hingga 72 kV
Gas SF <sub>6</sub>	Sampai 800 kV	Hingga 5000 A	50 kA	Busur Api ditarik oleh keberadaan SF <sub>6</sub>	PMT tegangan tinggi/ekstra tinggi

## 2.6 Tekanan gas SF<sub>6</sub>

Tekanan isolasi pada gas SF<sub>6</sub> memiliki keterkaitan erat dengan tingkat kerapatan partikel serta kekuatan dielektriknya. Jika terjadi penurunan tekanan, maka kepadatan partikel gas SF<sub>6</sub> akan berkurang, yang pada akhirnya dapat menyebabkan penurunan sifat isolasi gas tersebut. dalam sistem GIS (Gas Insulated Switchgear), kestabilan kekuatan dielektrik gas SF<sub>6</sub> sangat penting untuk mencegah gangguan listrik. Jika gas ini mengalami degradasi dalam kemampuannya menahan tegangan tinggi akibat tekanan yang menurun, maka risiko terjadinya flashover atau dielectric breakdown akan meningkat secara signifikan. Kondisi ini dapat mengakibatkan kegagalan isolasi, loncatan listrik yang tidak diinginkan, serta potensi kerusakan pada peralatan listrik bertegangan tinggi. [25]

### 2.6.1 Implementasi Gas SF6 Bertekanan pada Pemutus Tenaga

Gas Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) digunakan sebagai media utama dalam pemadaman busur api pada pemutus tenaga listrik. Prinsip kerjanya memiliki kesamaan dengan pemutus tenaga berbasis semburan udara (air blast circuit breaker), di mana proses pemadaman terjadi melalui hembusan gas yang mengganggu kesinambungan busur api. Namun, terdapat perbedaan mendasar antara keduanya, yaitu gas SF<sub>6</sub> tidak dilepaskan ke atmosfer seperti udara bertekanan pada pemutus tenaga semburan udara. Selain itu, kecepatan hembusan gas SF<sub>6</sub> lebih rendah, tetapi tetap efektif dalam meredam dan memadamkan busur api dengan efisien. Berdasarkan karakteristik ini, elemen pemutus tenaga pada sistem yang menggunakan SF<sub>6</sub> ditempatkan di dalam tangki bertekanan rendah, sehingga dapat mempertahankan isolasi optimal serta meningkatkan umur peralatan. Dengan sifatnya yang stabil dan unggul, SF<sub>6</sub> menjadi salah satu media pemadam busur api terbaik, yang mampu meningkatkan keandalan sistem listrik, karena:

A) Ramah lingkungan

Selama proses pemadaman busur api, gas SF<sub>6</sub> tidak menghasilkan emisi karbon atau zat berbahaya lainnya, sehingga tidak berkontribusi terhadap pencemaran udara atau efek rumah kaca.

B) Keamanan tinggi

Tidak adanya risiko reaksi kimia yang berbahaya dalam penggunaan gas SF<sub>6</sub> membuatnya lebih aman dibandingkan dengan media isolasi lainnya. Selain itu, gas ini tidak mudah terbakar dan tidak menimbulkan bahaya ledakan, sehingga meningkatkan keamanan sistem listrik.

C) Konduktivitas termal yang optimal

Gas SF<sub>6</sub> memiliki konduktivitas termal yang sangat baik, sehingga mampu menyerap dan melepaskan panas secara efektif. Hal ini memungkinkan pendinginan yang lebih efisien serta mempercepat proses pemadaman busur api.

D) Stabilitas dielektrik yang tinggi

Salah satu keunggulan utama gas SF<sub>6</sub> adalah nilai kuat dielektriknya yang tetap stabil, bahkan dalam kondisi tekanan tinggi. Sifat ini memastikan isolasi

listrik yang andal dan mencegah terjadinya kegagalan sistem akibat penurunan performa isolasi.

### 2.6.2 Pemeriksaan Tekanan/Kerapatan Gas

Pemeriksaan tekanan/kerapatan gas SF<sub>6</sub> pada PMT konvensional (Gardu Induk atau GIS) dilakukan untuk mengetahui apakah tekanan/kerapatan gas SF<sub>6</sub> masih berada pada batas tekanan ratingnya (rated pressure). Tingkat tekanan gas SF<sub>6</sub> dalam sistem Gas Insulated Switchgear (GIS) dapat bervariasi tergantung pada setiap bagian atau partisi yang ada. Penyesuaian tekanan ini dilakukan untuk memastikan kinerja optimal dalam proses isolasi serta pemadaman busur api. Mengacu pada kondisi udara standar dengan suhu +20 °C, tekanan minimum fungsional gas SF<sub>6</sub> yang diperlukan ditetapkan sebesar 101,3 kPa. Standar IEEE C37-100 memberikan pedoman mengenai batas tekanan operasional, di mana alarm pressure ditetapkan pada nilai 640 kPa, sementara filling pressure atau tekanan pengisian berada pada kisaran 700 kPa. Penyesuaian nilai tekanan ini bergantung pada kapasitas daya serta tingkat tegangan yang digunakan dalam GIS, sehingga setiap sistem dapat beroperasi dengan aman dan efisien sesuai dengan spesifikasinya.

Adapun konversi satuan tekanan yang umumnya digunakan:

Tabel 2. 2 Konversi Satuan Tekanan

Item	KPa	Bar	Kg/cm <sup>2</sup> at	ATM	Lbf/in <sup>2</sup> = Psi
1 Kpa	1	10 <sup>-5</sup>	10,2x10 <sup>-6</sup>	9,86x10 <sup>-3</sup>	145,05x10 <sup>-6</sup>
1 Bar	10 <sup>5</sup>	1	1,02	0,987	14,505
1 Kg/cm <sup>2</sup> =					
1at (atmosfir teknik)	9,81x10 <sup>5</sup>	0,981	1	0,968	14,224
1 atm =					
atmosfir fisika	1,01x10 <sup>5</sup>	1,013	1,033	1	14,7
1 lbf/in <sup>2</sup> = 1 Psi	6,89x10 <sup>3</sup>	6,89x10 <sup>3</sup>	0,0703	6,8x10 <sup>-2</sup>	1

$$1 \text{ Bar} = 100 \text{ kPa} = 0,1 \text{ Mpa} = 1,02 \text{ kg / cm}^2 \text{ at}$$

Tabel 2.2 Konversi Satuan Tekanan, Tabel ini berisi daftar konversi satuan tekanan dari berbagai sistem pengukuran, seperti bar, pascal (Pa), kilopascal (kPa), dan kilogram per sentimeter persegi ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ). tabel ini bersumber dari: setandar IEE, Informasi ini sangat penting dalam penelitian karena tekanan gas  $\text{SF}_6$  dalam PMT sering dilaporkan dalam berbagai satuan tergantung alat ukur atau referensi yang digunakan. Dengan adanya tabel ini, proses interpretasi data menjadi lebih akurat dan konsisten dalam seluruh tahapan analisis.

Pelaksanaan pemeriksaan tekanan / kerapatan gas  $\text{SF}_6$  dapat dilakukan dengan 2 (dua) cara yaitu :

A. Pemeriksaan Langsung

Metode ini memungkinkan pembacaan nilai tekanan atau kerapatan gas  $\text{SF}_6$  secara langsung melalui alat ukur seperti pressure gauge atau density meter. Alat ukur ini telah terpasang secara permanen pada pemutus tenaga (PMT), sehingga operator dapat dengan mudah memantau kondisi gas tanpa memerlukan pemasangan tambahan.

B. Pemeriksaan Tidak Langsung

Pada metode ini, pembacaan tekanan atau kerapatan gas  $\text{SF}_6$  tidak dapat dilakukan secara langsung. Hal ini disebabkan karena alat ukur tidak terpasang secara permanen pada PMT. Oleh karena itu, sebelum melakukan pengukuran, operator harus memasang alat ukur eksternal terlebih dahulu untuk mendapatkan data tekanan atau kerapatan yang dibutuhkan.

Pemutus tenaga dapat berbeda untuk setiap merek sesuai dengan buku petunjuk/manual dari pabrik. Berikut merupakan daftar untuk beberapa merek PMT yang di gunakan oleh PT PLN (persero)

Sepertihalnya yang terlampir pada tabel 2.3 di bawah ini yang bersumber (Bahari, Y.2020) yang mencatat nilai tekanan gas  $\text{SF}_6$  pada berbagai kondisi operasional, seperti tekanan normal, tekanan saat alarm berbunyi (stage 1), dan tekanan saat sistem memasuki kondisi trip (stage 2). Tabel ini juga kemungkinan memuat batas standar yang ditetapkan oleh produsen pabrikan atau regulasi sistem tenaga listrik.

Tabel 2. 3 Tekanan Gas SF<sub>6</sub>

Merk PMT	Tekanan Normal (Rate Pressure) (MPa)	Tekanan Gas SF <sub>6</sub> Pemutus Tenaga pada Pengoprasian	
		Alarm tahap 1 (SF <sub>6</sub> harus ditambah) (MPa)	Alarm Tahap 2 (PMT Trip/block) (MPa)
<i>AREVA</i>	0.64	0.54	0.51
<i>AEG</i>	0.68	0.58	0.55
<i>ABB</i>	0.80	0.72	0.69

1 Mpa = 1000 Kpa

## 2.7. Pengukuran/Pengujian kualitas Gas SF<sub>6</sub>

Pengujian kualitas gas SF<sub>6</sub> merupakan langkah penting dalam memastikan bahwa gas tersebut masih memenuhi standar kelayakan sebagai media isolasi atau dielektrik dalam pemutus tenaga (PMT). Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi apakah karakteristik gas SF<sub>6</sub> seperti kemurnian (purity), tekanan, kelembaban (moisture content), dan kandungan senyawa sampingan seperti SO<sub>2</sub> masih dalam batas aman untuk digunakan dalam operasi peralatan tegangan tinggi. Gas SF<sub>6</sub> yang telah terkontaminasi atau mengalami degradasi dapat menurunkan kemampuan isolasi dan memadamkan busur listrik, sehingga berpotensi menyebabkan gangguan serius pada sistem tenaga.

Untuk menilai kelayakan tersebut, digunakan acuan dari standar internasional yang telah diakui dalam industri kelistrikan, di antaranya adalah ASTM D2472, IEC 60376, dan ASG Typical Values. Yang terdapat pada tabel 2.4 Standar ini memberikan nilai ambang yang dijadikan rujukan dalam mengukur kualitas gas SF<sub>6</sub> di lapangan, seperti batas minimum kemurnian gas sf<sub>6</sub>, tekanan operasional yang disesuaikan dengan peralatan, kadar air maksimum, serta kandungan gas hasil dekomposisi seperti SO<sub>2</sub> yang harus berada di bawah ambang batas aman untuk mencegah korosi dan kerusakan pada komponen internal PMT.

Tabel 2. 4 Tekanan Gas SF<sub>6</sub> Standart Pengujian Kualitas Gas SF<sub>6</sub>

<i>Component</i>	<i>ASTM 2472</i>	<i>IEC 376</i>	<i>ASG TYPICAL</i>
<i>Sulfurhexafluoride (by wt.)</i>	<i>98.8 %</i>	<i>99.8%</i>	<i>99,9%</i>
<i>Water (vol %)</i>	<i>8 ppmv</i>	<i>15 ppmv</i>	<i>5 ppmv</i>
<i>Dew Point</i>	<i>-62° c</i>	<i>-40° c</i>	<i>-65° c</i>
<i>Hydrolyzable Fluorides (HF)</i>	<i>0.3 ppmw</i>	<i>1.0 ppmw</i>	<i>0.3 ppmw</i>
<i>Air (wt %)</i>	<i>500 ppmw</i>	<i>500 ppmw</i>	<i>200 ppmw</i>
<i>Carbon Tetrafluoride (CF4) (wt.%)</i>	<i>500 ppmw</i>	<i>500 ppmw</i>	<i>200 ppmw</i>

Karena tidak semua parameter pengujian gas SF<sub>6</sub> yang tercantum dalam berbagai standar internasional seperti ASTM, IEC, atau ASG diperlukan untuk evaluasi rutin di lapangan, maka dilakukan penyederhanaan parameter berdasarkan kebutuhan praktis dan relevansi teknis. Untuk itu, acuan yang digunakan dalam menentukan parameter uji yang paling esensial adalah dokumen dari CIGRE 234 TF.B3.02/01:2003 yang mengacu pada skdi 0520. Dokumen ini merupakan pedoman teknis internasional yang membahas pengelolaan, pemantauan, dan daur ulang gas SF<sub>6</sub> secara efisien dan aman.

Dalam pedoman tersebut, dijelaskan bahwa tidak semua parameter harus diuji secara bersamaan, melainkan cukup beberapa parameter utama yang dinilai memiliki pengaruh signifikan terhadap fungsi isolasi dan keselamatan peralatan. Oleh karena itu, parameter pengujian yang secara praktikal direkomendasikan dan umum dipakai untuk justifikasi kelayakan gas SF<sub>6</sub> dalam sistem tegangan tinggi meliputi:

### **2.7.1 Purity (Kemurnian Gas SF<sub>6</sub>)**

Kemurnian gas SF<sub>6</sub> menunjukkan presentase konsentrasi gas SF<sub>6</sub> murni yang terdapat dalam suatu volume tertentu. Dalam praktiknya, kadar kemurnian gas SF<sub>6</sub> tidak pernah mencapai 100% karena selama proses pengisian, penyimpanan, atau operasional peralatan, gas ini dapat terkontaminasi oleh udara, kelembaban, atau gas lain. Kontaminan ini akan memengaruhi sifat dielektrik dari gas, sehingga menurunkan efektivitasnya sebagai media isolasi dan pemadam busur listrik. Oleh karena itu, pengujian kemurnian menjadi parameter utama

dalam menilai kelayakan operasional gas SF<sub>6</sub> pada pemutus tenaga (PMT). Berdasarkan standar internasional seperti IEC 60376 dan CIGRE 234, batas minimum kemurnian yang diperbolehkan untuk penggunaan ulang adalah  $\geq 97\%$ , dan jika berada di bawah nilai tersebut, gas dianggap tidak layak digunakan dan harus diregenerasi atau diganti.

### **2.7.2 Decomposition Product (Produk Dekomposisi Gas SF<sub>6</sub>)**

Produk dekomposisi merupakan hasil dari pemecahan molekul gas SF<sub>6</sub> yang terjadi akibat paparan suhu tinggi selama proses pelepasan energi seperti electric discharge. Discharge tersebut dapat berupa korona, percikan (spark), atau busur listrik (arching) yang terjadi saat PMT membuka atau menutup arus. Proses ini menghasilkan senyawa turunan yang bisa berbentuk gas (seperti SO<sub>2</sub>, SOF<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>) maupun padatan (debu putih seperti sulfur oksida atau fluoride), yang bersifat korosif dan beracun bagi manusia maupun peralatan. Jika tidak dikendalikan, akumulasi produk dekomposisi ini dapat mempercepat kerusakan pada bagian dalam PMT, menurunkan kemampuan isolasi, dan membahayakan keselamatan personel saat inspeksi atau pemeliharaan. Oleh karena itu, pengujian produk dekomposisi menjadi langkah penting dalam pemantauan kondisi gas. Berdasarkan referensi teknis dari CIGRE dan rekomendasi pabrikan, batas maksimum konsentrasi gas-gas hasil dekomposisi SF<sub>6</sub> yang masih diperbolehkan berkisar antara 1–10 ppmv tergantung jenis gasnya, dengan SO<sub>2</sub> sebagai parameter utama yang umum diukur secara langsung di lapangan.

### **2.7.3 Dew point (titik embun)**

*Dew point* atau titik embun gas SF<sub>6</sub> adalah suhu di mana uap air yang terkandung dalam gas mulai mengalami kondensasi menjadi cairan. Parameter ini digunakan untuk mengukur kadar kelembaban dalam gas SF<sub>6</sub>, karena kandungan air yang tinggi dapat menurunkan kemampuan isolasi dan mempercepat terbentuknya senyawa korosif seperti HF dan SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> akibat reaksi dengan produk dekomposisi gas. Dalam aplikasi pada pemutus tenaga (PMT) tegangan tinggi, gas SF<sub>6</sub> yang memiliki kelembaban tinggi dapat menyebabkan gangguan isolasi, korosi komponen logam internal, serta memperpendek umur pakai peralatan. Oleh karena itu, standar internasional seperti yang tercantum dalam IEC 60376

menetapkan bahwa batas aman *dew point* gas SF<sub>6</sub> di dalam peralatan adalah kurang dari -5°C. Jika *dew point* berada di atas nilai ini, maka gas dianggap terlalu lembap dan perlu dikeringkan atau diganti. Pengukuran *dew point* secara rutin menjadi bagian penting dari program pemeliharaan untuk memastikan gas SF<sub>6</sub> tetap berada dalam kondisi ideal sebagai media isolasi dan pemadam busur listrik, guna menjaga keandalan operasi sistem tenaga di gardu induk.

#### **2.7.4 Moisture (Kelembaban dalam Gas SF<sub>6</sub>)**

Kandungan kelembaban (moisture content) atau kadar air dalam gas SF<sub>6</sub> merupakan salah satu parameter kritis yang sangat memengaruhi kemampuan isolasi gas tersebut. Kelembaban yang tinggi di dalam gas SF<sub>6</sub> dapat menyebabkan pembentukan senyawa asam seperti HF (hydrofluoric acid) atau SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, yang sangat korosif terhadap material logam maupun komponen isolasi dalam PMT. Selain itu, air juga dapat menurunkan tegangan tembus gas, sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya flashover atau pemicu busur listrik pada tegangan operasi tinggi. Oleh karena itu, standar internasional seperti IEC 60376 dan CIGRE 234 menetapkan batas maksimal kandungan kelembaban dalam gas SF<sub>6</sub> adalah 400 Pa (parts per million by volume). Pengujian kelembaban dilakukan menggunakan moisture analyzer secara langsung pada tabung gas atau ruang tertutup di dalam peralatan. Nilai kelembaban di atas batas tersebut menunjukkan bahwa gas sudah mengalami degradasi dan perlu direkondisi atau diganti untuk menjaga keandalan fungsi isolasi dan keselamatan peralatan.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Tempat Dan waktu

#### 3.1.1 Tempat

Dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan tugas akhir ini dilakukan dengan pengambilan data langsung di PT.PLN (Persero) UPT Medan. Gardu Induk Glugur. Kec. Medan Timur, Kota Medan, Sumatra Utara.

#### 3.1.2 Waktu

Waktu Pelaksanaan penelitian ini dimulai dari bulan Juni 2025 hingga selesai.

Tabel 3. 1 Jadwal Kegiatan Penelitian

No	Uraian Kegiatan	Bulan Ke					
		1	2	3	4	5	6
1	Pengajuan Judul						
2	Setudy Literatur						
3	Penulisan BAB 1 s/d BAB 3						
4	Seminar Proposal						
5	Penelitian Dan Pengambilan Data						
6	Pengolahan Data						
7	Penyelesaian Penulisan						
8	Seminar Hasil						
9	Sidang Akhir						

### 3.2 Alat Dan Bahan

Komponen, Bahan dan Alat serta yang digunakan untuk menganalisis dan mengolah data Pemutus (PMT) dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 1. Laptop Acer

Sebagai alat untuk membuat laporan skripsi, mengrangkum data-data observasi.



Gamabar 3. 1 Laptop Acer

Perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan penelitian dan penulisan tugas akhir ini adalah:

- Microsoft Word :

Digunakan untuk menyusun laporan penelitian dan skripsi

- Microsoft Excel :

Berfungsi untuk mengolah serta menganalisis data dan hasil pengukuran

- Microsoft Power Point :

Dimanfaatkan dalam penyusunan seminar proposal dan peresetasi hasil penelitian

## 2. kalkulator

Kalkulator untuk menghitung hasil data, sehingga menghasilkan data yang akurat (pasti).



Gamabar 3. 2 Kalkulator

## 3. Manometer gas SF<sub>6</sub>

Adapun alat uji yang digunakan dalam pengujian ini adalah manometer gas SF<sub>6</sub>, yaitu sebuah instrumen yang berfungsi untuk mengukur besarnya tekanan internal gas sulfur heksafluorida (SF<sub>6</sub>) yang terdapat di dalam tabung pemutus tenaga (PMT). Pengukuran tekanan ini sangat penting untuk memastikan bahwa tekanan gas berada dalam rentang yang sesuai standar operasional, guna menjamin performa isolasi dan pemadaman busur listrik oleh PMT tetap optimal.



Gamabar 3. 3 Baro Meter Gas Sf6

## 4. Tester Decomposition Analyzer SF<sub>6</sub>

Tester Decomposition Analyzer SF<sub>6</sub> digunakan untuk menganalisis gas hasil dekomposisi SF<sub>6</sub> pada peralatan tegangan tinggi, seperti pemutus tenaga (PMT). Gas yang diuji meliputi SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, HF, CO, dan kadar SF<sub>6</sub> itu sendiri. Peningkatan SO<sub>2</sub> menandakan korosi elektroda, H<sub>2</sub>S menunjukkan kontaminasi

sulfur, HF bersifat sangat korosif akibat kelembaban tinggi, sedangkan CO mengindikasikan degradasi bahan organik akibat overheating. Pengukuran ini penting untuk mendeteksi dini gangguan internal dan memastikan pemeliharaan preventif guna menjaga keandalan sistem listrik.



Gambar 3. 4 *Tester Analyzer SF6*

### 3.3. Pengujian Kualitas SF6

Pemeriksaan kualitas gas SF6 dilaksanakan dengan memanfaatkan perangkat SF6 Analyzer. Proses ini dilakukan dengan cara menghubungkan alat tersebut ke setiap kompartemen dalam sistem PMT. Pengujian dilakukan secara bertahap, satu per satu pada tiap kompartemen, karena alat ini hanya dapat digunakan untuk mengevaluasi kualitas gas SF6 pada satu kompartemen dalam satu waktu. Untuk prosedur pengujian yang telah ditetapkan oleh PT. PLN (Persero) dengan tahapan-tahapan sebagai berikut:

1. Petugas yang melaksanakan pengujian wajib menggunakan Alat Pelindung Diri (APD) sesuai standar keselamatan kerja yang berlaku.
2. Pasang rambu-rambu keselamatan dan safety line di area bay yang akan dilakukan pengujian, guna memastikan keamanan selama proses berlangsung.
3. Lakukan blocking (pengamanan) pada rangkaian tripping SF6 (tahap ke-2) yang terdapat di panel LCC untuk mencegah pelepasan energi selama pengujian.
4. Siapkan peralatan kerja dan perangkat uji SF6 Analyzer, kemudian sambungkan kabel grounding dari alat uji ke grounding sistem GI. Setelah itu, hubungkan alat SF6 Analyzer ke sumber tegangan 220 VAC.
5. Buka perlahan valve (keran) berwarna merah, dan pastikan tidak terdapat kebocoran pada nipple tempat alat uji terpasang.

6. Pasang selang pengujian ke fasilitas pengujian yang ada pada kompartemen tempat pengujian kualitas gas SF<sub>6</sub> akan dilakukan.
7. Hubungkan selang ke alat SF<sub>6</sub> Analyzer, lalu mulai proses pengujian gas SF<sub>6</sub> sesuai prosedur alat.
8. Catat hasil pengukuran yang terbaca pada alat ke dalam form pengujian yang telah disiapkan sebelumnya.
9. Setelah pengujian selesai, tutup kembali valve merah, kemudian lepaskan koneksi selang dari nipple alat uji dan lepas koneksi dari fasilitas pengujian di kompartemen.
10. Pasang kembali flens kontak, lalu kencangkan menggunakan dua buah baut hingga posisi rapat dan aman.
11. Pastikan tidak ada personel yang sedang bekerja atau berada di sekitar alat pengukur kepadatan gas SF<sub>6</sub> (SF<sub>6</sub> density meter) selama proses pengujian berlangsung, untuk menghindari gangguan atau risiko keselamatan.
12. Kembalikan kondisi rangkaian alarm dan sistem trip SF<sub>6</sub> ke posisi normal pada setiap objek yang telah selesai dilakukan pengujian, agar sistem kembali berfungsi sesuai standar operasional.
13. Proses pengujian kualitas gas SF<sub>6</sub> menggunakan perangkat SF<sub>6</sub> Analyzer dinyatakan telah selesai, dan seluruh tahapan harus dipastikan berjalan sesuai prosedur teknis dan keselamatan kerja.

### **3.4. Metode Perhitungan Kualitas Gas SF<sub>6</sub>**

Untuk memastikan bahwa gas SF<sub>6</sub> memiliki kualitas yang optimal dalam memadamkan busur api dan menjaga keandalan isolasi pada pemutus tenaga (PMT), diperlukan pengukuran terhadap beberapa parameter penting berikut:

- A. Tekanan gas SF<sub>6</sub>, yang diamati melalui pembacaan pada barometer terintegrasi di unit PMT, guna memastikan tekanan berada dalam batas aman operasional.
- B. Kadar uap air (*Moisture Content*), yang diukur menggunakan alat SF<sub>6</sub> Analyzer, mengingat keberadaan kelembapan dapat menurunkan kemampuan isolasi dan mempercepat degradasi gas. Batas kadar uap yang diijinkan adalah 3960 ppmv atau  $< 400 \text{ Pa}$  (  $T = 20^{\circ}\text{C}$ ) menurut setandar CIGRE.

Nilai dari standar moisture content dapat di cari dengan langkah-langkah sebagai berikut :

A. Menghitung pressure gaueg absolute dengan menggunakan rumus:

$$P_{gauge\ absolute} = Inlet\ Press + P_{normal}.....(1)$$

[26]

Keterangan :

- *Inlet Pres* : Tekanan gas Terukur
- *Pnormal* : Tekanan Normal (Atmosfir) 1,01 Bar
- *Pgauge* : Tekanan gas SF6 terhadap atmosfir sekitar

B. Menghitung setandarisasi moisture content dengan persamaan sebagai berikut.

$$\text{Setandarisasi} = \frac{0,004}{p_{gauge\ absolute}} \times 1000000.....(2)$$

[26]

Keterangan :

- *Pgague absolute* : tekanan gas terhadap atsmosrfer di sekitar.
- *Pgague* : tekanan gas pada komponen yang diuji
- *Pnormal* : tekanan normal/atmosfer (1.01 Bar).

C. Titik embun (*Dew Point*), juga diperoleh dari pengujian menggunakan SF6 Analyzer, sebagai indikator seberapa jauh kondisi gas dari potensi kondensasi yang dapat memicu kegagalan isolasi. Berdasarkan standar CIGRE 234 B3.0201 setandar nilai *dew point* maksimal sebesar  $-5^{\circ}\text{C}$

Untukmenentukan nilai *dew point* pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$  dapat di lakukan dengan caramencari nilai tekanan parsial berdasarkan nilai mosisture content, tekanan, dan suhu gas SF6 atau dengan menggunakan persamaan berikut:

a. Menghitung *pressure absolute* dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_{gauge\ absolute} = P_{gague} + P_{normal} .....(3)$$

[26]

b. Menghitung *Pabsolute* menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_{absolute} = P_{gauge\ absolute} \times 1\ \text{bar}.....(4)$$

[26]

c. Menghitung pressure absolute pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$  dengan persamaan sebagai berikut :

$$P_{\text{absolute}} 20^{\circ}\text{C} = \frac{P_{\text{absolute}} \times 293}{273 + T} \dots\dots\dots(5)$$

[26]

d. Selanjutnya menghitung tekanan parsial dengan menggunakan rumus berikut :

$$P_{\text{parsial}} = \frac{\text{moisture content}}{1000000} \times P_{\text{absolute}} 20^{\circ}\text{C} \dots\dots\dots(6)$$

[26]

- $P_{\text{absolute}} 20^{\circ}\text{C}$  : tekanan udara pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$
- T : suhu ambient
- $P_{\text{parsial}}$  : tekanan parsial uap air

Setelah mendapatkan nilai dari tekanan parsial uap air, selanjutnya menentukan nilai dew point pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$  berdasarkan tabel IEEE 1125 tahun 1993 sebagai berikut:

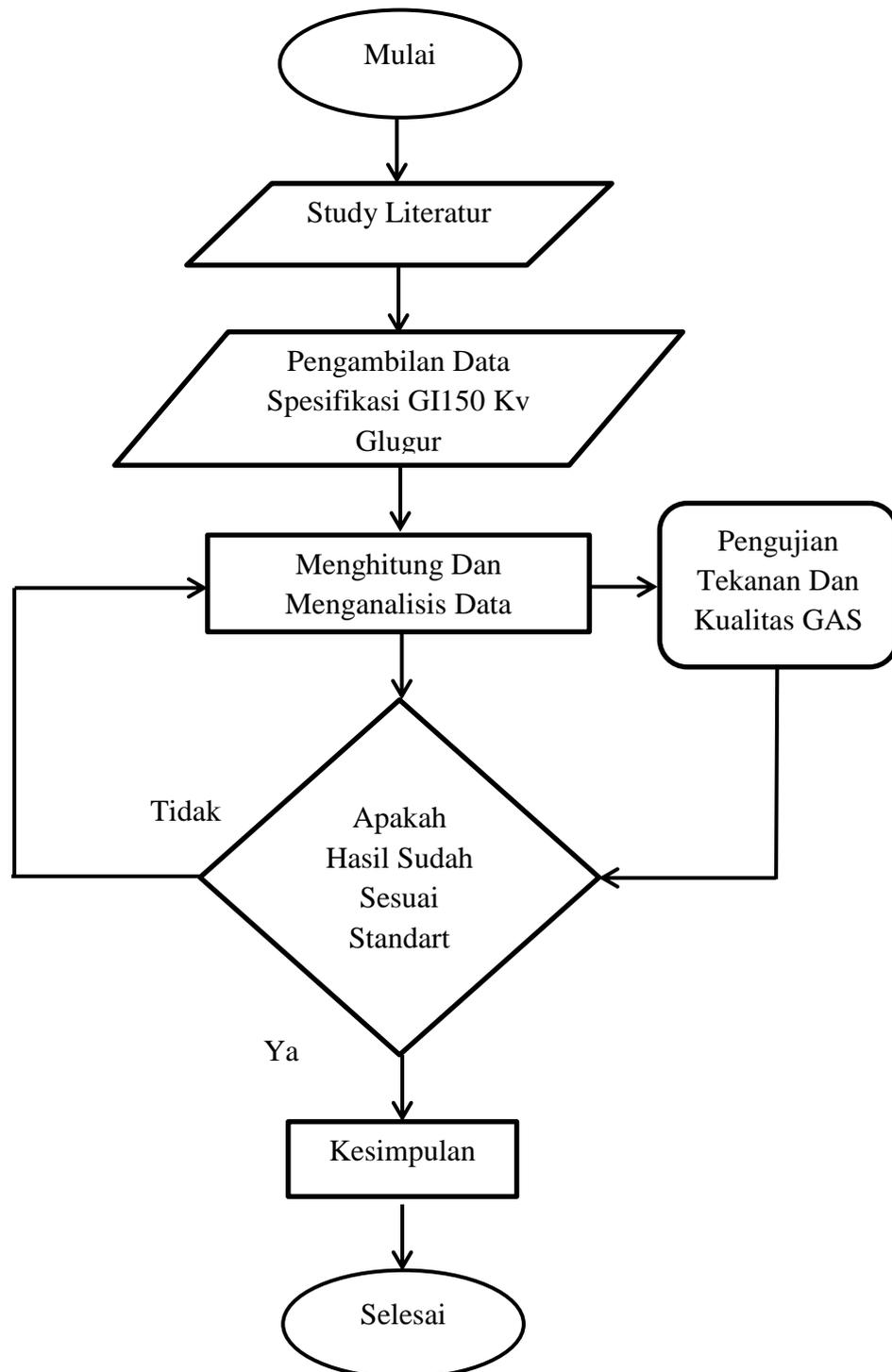
Tabel 3. 2 tabel tekanan parsial terhadap nilai *dew point* IEEE 1125 1993

$Temp^{\circ}\text{C}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-50	0,026	0,023	0,020	0,017	0,015	0,013	0,012	0,010	0,009
-40	0,086	0,076	0,068	0,060	0,054	0,048	0,042	0,037	0,033
-30	0,259	0,233	0,209	0,188	0,169	0,151	0,135	0,121	0,108
-20	0,712	0,646	0,505	0,530	0,480	0,434	0,392	0,354	0,319
-10	1,798	1,644	1,503	1,373	1,525	1,142	1,041	0,947	0,861
-0	4,220	3,887	3,578	3,291	3,025	2,778	2,550	2,340	2,144
0	4,92	5,29	5,68	6,10	6,54	7,01	7,51	8,04	8,61

Tabel 3.2 diatas merupakan tabel yang menentukan nilai dew poin berdasarkan tekanan parsial uap air (dalam satuan mmHg) dengan nilai suhu (dalam derajat Celsius) yang digunakan untuk menentukan nilai dew point dalam gas isolasi, khususnya SF6, sesuai standar IEEE 1125 tahun 1993.[26]

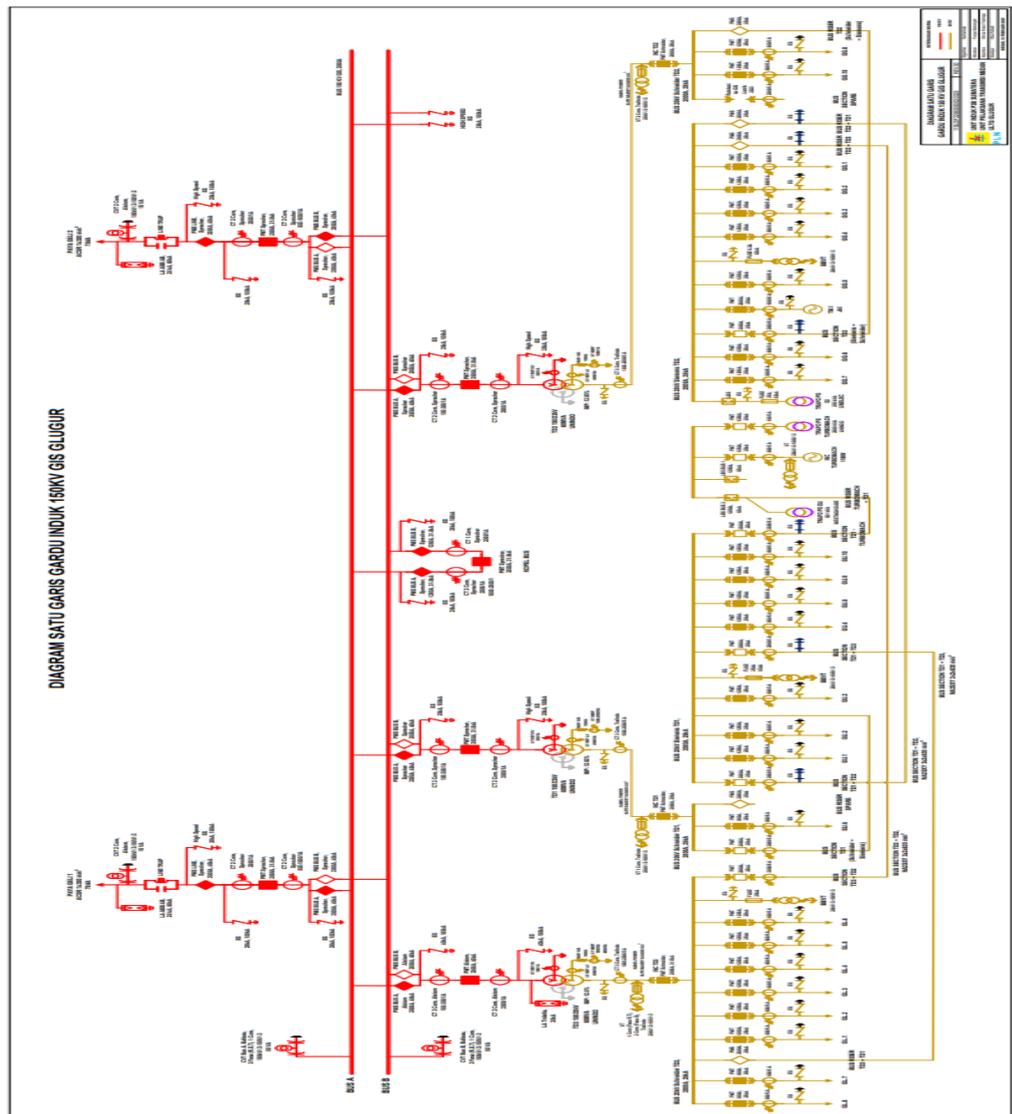
Baris-baris pada tabel menunjukkan suhu mulai dari  $-50^{\circ}\text{C}$  hingga  $0^{\circ}\text{C}$ , sedangkan kolom-kolomnya menampilkan angka signifikan (1–9) yang merepresentasikan berbagai tingkat tekanan parsial. Nilai dalam tabel menunjukkan besarnya tekanan parsial (mmHg) yang sesuai dengan masing-masing kombinasi suhu dan signifikan tersebut.

### 3.2 Bagan Alir Penelitian



Gambar 3. 5 Bagan Alir Penelitian

### 3.3 Diagram Satu Garis Gardu Induk Glugur



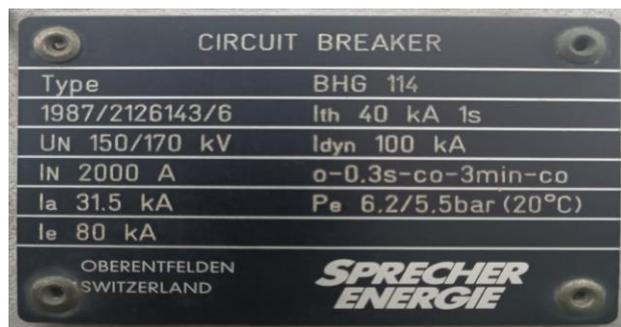
Gambar 3. 6 Diagram Satu Garis Gardu Induk Glugur

Gambar 3.6 diatas menunjukkan single Line diagram satu garis gardu induk Gulugur yang dimana dibawah naungan UPT Medan, ULTG glugur. Adapun Gardu Induk Gulugur sendiri memiliki 7 bay, diantaranya 3 bay trafo Daya 60mva, 1 bay Kopel Bus dan 6 Bay Penghantar. Diagram ini menggambarkan konfigurasi sistem 150 kV yang terdiri dari peralatan utama seperti Pemutus Tenaga (PMT), Disconnector (PMS), Transformator Arus (CT), dan Transformator Tegangan (PT), serta sistem proteksi yang mendukung operasi dan pengamanan sistem kelistrikan. Setiap bay dihubungkan melalui sistem busbar utama dan transfer bus yang memungkinkan fleksibilitas dalam pengoperasian serta pemeliharaan peralatan.

## BAB IV ANALISA DATA

### 4.1 Data Circuit Breaker SF6 Di Gardu Induk Glugur

Adapun spesifikasi teknis dari Pemutus Tenaga (PMT) yang digunakan dapat diuraikan sebagai berikut:



Gambar 4. 1 Name plate sepesifikas circuit Breker

Gambar 4.1 yang terlampir di atas merupakan Peralatan pemutus tenaga yang digunakan di gardu induk Glugur, sistem ini merupakan PMT tipe BHG 114 produksi Sprecher Energie, yang berasal dari n, Switzerland. PMT ini dirancang untuk pengoperasian pada sistem tegangan tinggi dengan karakteristik teknis sebagai berikut:

Tipe: BHG 114

- Tahun Produksi / Nomor Seri: 1987 / 2126143/6
- Tegangan Nominal (UN): 150/170 kV
- Arus Nominal (IN): 2000 A
- Kemampuan Memutus Arus Hubung Singkat (I<sub>a</sub>): 31,5 kA
- Kemampuan Menahan Arus Termal (I<sub>th</sub>): 40 kA selama 1 detik
- Kemampuan Menahan Arus Dinamis (I<sub>dyn</sub>): 100 kA
- Kemampuan Tertinggi Operasi (I<sub>e</sub>): 80 kA
- Urutan Operasi Mekanik: 0 – 0.3s – CO – 3min – CO
- Tekanan Kerja Gas SF6 (P<sub>e</sub>): 6.2 bar / 5.5 bar pada suhu 20°C

#### 4.2 Hasil Pengujian Kualitas Gas SF<sub>6</sub> Saat Har Pengantar 2022

Pengujian kualitas gas SF<sub>6</sub> pada instalasi 150 kV di Gardu Induk Glugur telah dilaksanakan pada tanggal 24 Maret 2022. Pengujian ini mencakup seluruh bay yang terdapat dalam sistem GIS 150 kV di lokasi tersebut. Pelaksanaan pengujian mengacu pada prosedur standar yang telah ditentukan oleh PLN. Data primer hasil pengujian kualitas gas SF<sub>6</sub>, khususnya pada Bay PGLI #1 dan PGLI #2 di GIS 150 kV Glugur, disajikan sebagai berikut:

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 4.3, di bawah dapat diketahui bahwa kondisi gas SF<sub>6</sub> pada Bay PGLI#1 dan PGLI#2 masih berada dalam keadaan sangat baik. Nilai kemurnian gas di semua fasa tercatat sebesar 100%, yang berarti melebihi standar minimum CIGRE 234 yaitu >97%. Hal ini menegaskan bahwa gas SF<sub>6</sub> masih murni dan belum mengalami kontaminasi.

Parameter *moisture content* yang terukur berkisar antara 544–570 ppmv, jauh di bawah batas maksimum standar SKDIR 520 sebesar 3960 ppmv. Nilai ini menunjukkan bahwa kadar uap air dalam gas relatif rendah sehingga tidak berpotensi menurunkan kekuatan dielektrik gas. Kondisi ini juga diperkuat dengan hasil *dew point* yang berada pada –6°C hingga –8°C, lebih rendah dari ketentuan standar < –5°C, yang menandakan gas dalam keadaan kering dan layak digunakan.

Hasil pengujian produk dekomposisi menunjukkan nilai 0 ppmv pada seluruh fasa, sedangkan standar CIGRE memperbolehkan hingga maksimum 100 ppmv. Dengan demikian, dapat disimpulkan tidak terdapat degradasi gas akibat busur listrik maupun kontaminasi internal. Sementara itu, tekanan gas SF<sub>6</sub> berada pada kisaran 6.0 - 6.34 bar yang masih sesuai dengan rentang tekanan operasi normal pemutus tenaga (PMT) 150 kV.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa gas SF<sub>6</sub> pada Bay PGLI#1 dan PGLI#2 tahun 2022 masih memenuhi bahkan melebihi standar internasional yang berlaku. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem isolasi dan pemadaman busur listrik pada PMT masih dapat berfungsi secara optimal tanpa indikasi gangguan.

Tabel 4. 1 hasil pengujian gas SF6 bay Paya Geli 1 dan 2 tahun 2022

Bay	Phasa	Purity (%)		Moisture content (PPMV)		Dew point		Decomposition product (ppmv)		Tekanan SF6 Bar
		Hasil uji	Standar cigre 234	Hasil perhitungan	Standar skdir 520	Hasil perhitungan	Standar skdir 520	Hasil uji	Standar cigre	
PGLI#2	R	100		570		- 6°C		0	MAX	6.0
	S	100	>97%	570	3960	- 6°C	< -5 C	0	100	6.0
	T	100		570	PPMV	- 6°C		0	PPMV	6.0
PGLI#1	R	100		549		- 8°C		0	MAX	6.27
	S	100	>97%	544	3960	- 8°C	<-5 C	0	100	6.34
	T	100		564	PPMV	- 7°C		0	PPMV	6.07

#### 4.2.1 Perhitungan Standar *Moisture Content* Dan Nilai *Dew Point*

Nilai standar *Moisture Content* memiliki peranan penting karena dijadikan sebagai acuan dalam menilai kualitas gas SF<sub>6</sub> serta menentukan langkah tindak lanjut yang perlu dilakukan. Untuk memperoleh nilai standar *Moisture Content* tersebut, dapat dilakukan melalui tahapan-tahapan berikut:

➤ Perhitungan Standar *Moisture Content* PGL#2 (2022)

1. Perhitungan Standar *Moisture content* pada compartemen PMT Bay PGLI#2

A. Menghitung *pressure gauge absolute* menggunakan persamaan (1)

Diketahui untuk pasa R :

$$P_{gauge} = 6,0 \text{ bar}$$

Maka:

$$P_{gauge \text{ absolute}} = P_{gauge} + P_{normal}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 6,0 + 1,01$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 7,01 \text{ bar}$$

B. Menghitung nilai sentandar *Moisture content* menggunakan persamaan (2)

$$\text{Standarisasi} = \frac{0,004}{P_{gauge \text{ absolute}}} \times 1000000$$

$$\text{Standarisasi} = \frac{0,004}{7,01} \times 1000000$$

$$\text{Standarisasi} = 570,61 \text{ ppmv}$$

Perhitungan *standar moisture content* pada Phasa S dan T Bay PGLI#2 memiliki *Pgauge* yang sama dengan Pasa R maka nilai standarisasinya sama yaitu sebesar 570,61 ppmv.

➤ Perhitungan *Nilai Dew Point* PGLI#2 (2022)

Untuk menentukan nilai *dew point* pada suhu 20°C dapat dilakukan dengan menghitung tekanan parsial uap air berdasarkan nilai *Moisture Content*, tekanan, serta suhu gas SF<sub>6</sub> yang terukur dengan langkah-langkah sebagai berikut:

Menghitung nilai *Dew Point* pada suhu 20°C pada kompartemen PMT

- a. Menghitung pressure gauge absolute menggunakan persamaan (3)

Diketahui pada phasa R:

$$P_{gauge} = 6,0 \text{ bar}$$

$$P_{normal} = 1,01 \text{ bar}$$

Maka:

$$P_{gauge \text{ absolute}} = P_{gauge} + P_{normal}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 6,0 + 1,01$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 7,01$$

- b. Menghitung pressure absolute menggunakan persamaan (4)

$$P_{gauge \text{ absolute}} = P_{gauge \text{ absolute}} \times 1 \text{ bar}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 6,01 \times 1 \text{ bar}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 701.000 \text{ Pa}$$

- c. Menghitung pressure absolute pada suhu 20°C menggunakan persamaan (5)

Diketahui:

$$T_{SF6} = 30^\circ\text{C} = \frac{701000 \times 293}{273+30}$$

Maka:

$$P_{absolute \ 20^\circ\text{C}} = \frac{701000 \times 293}{273+30}$$

$$P_{absolute \ 20^\circ\text{C}} = \frac{214183000}{303}$$

$$P_{absolute \ 20^\circ\text{C}} = 677.864,587 \text{ Pa}$$

- d. Menghitung tekanan parsial dengan menggunakan persamaan (6)

Diketahui:

$$\text{Moisture content} = 570,61 \text{ ppmv}$$

Maka:

$$P_{parsial} = \frac{\text{Moisture content}}{1000000\Omega} \times P_{absolute \ 20^\circ\text{C}}$$

$$P_{parsial} = \frac{570,61}{1000000\Omega} \times 677.864,587$$

$$P_{parsial} = 386 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{parsial}} = 2,89 \text{ mmhg} = -6^{\circ}\text{C}$$

Berdasarkan referensi standar IEEE 1125 tahun 1993 dengan tekanan parsial sebesar 2,89 mmhg maka di dapat nilai *Dew point* adalah sebesar  $-6^{\circ}\text{C}$

➤ Perhitungan Standar Moisture Content PGL#1 (2022)

Perhitungan Standar Moisture content pada compartemen PMT Bay PGLI#1

A. Menghitung pressure gauge absolute menggunakan persamaan (1)

Diketahui untuk pasa R :

$$P_{\text{gauge}} = 6,27 \text{ bar}$$

Maka:

$$P_{\text{gauge absolute}} = P_{\text{gauge}} + P_{\text{normal}}$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 6,27 + 1,01$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 7,28 \text{ bar}$$

B. Menghitung nilai sentandar Moisture content mengunkan persamaan (2)

$$\text{Standarisasi} = \frac{0,004}{P_{\text{gauge absolute}}} \times 1000000$$

$$\text{Standarisasi} = \frac{0,004}{7,28} \times 1000.000$$

$$\text{Standarisasi} = 549.45 \text{ ppmv}$$

Perhitungan standar moisture content pada Phasa R Bay PGLI#1 memiliki nilai standarisasinya yaitu sebesar 549.45 ppmv.

A. Menghitung pressure gauge absolute menggunakan persamaan (1)

Diketahui untuk pasa S :

$$P_{\text{gauge}} = 6,34 \text{ bar}$$

Maka:

$$P_{\text{gauge absolute}} = P_{\text{gauge}} + P_{\text{normal}}$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 6,34 + 1,01$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 7,35 \text{ bar}$$

B. Menghitung nilai sentandar Moisture content mengunkan persamaan (2)

$$\text{Standarisasi} = \frac{0.004}{P_{\text{gauge absolute}}} \times 1000000$$

$$\text{Standarisasi} = \frac{0,004}{7,35} \times 1000000$$

$$\text{Standarisasi} = 544,21 \text{ ppmv}$$

Perhitungan standar moisture content pada Phasa S Bay PGLI#1 memiliki nilai standarisasinya yaitu sebesar 544.21 ppmv

A. Menghitung pressure gauge absolute menggunakan persamaan (1)

Diketahui untuk pasa T :

$$P_{\text{gauge}} = 6,07 \text{ bar}$$

Maka:

$$P_{\text{gauge absolute}} = P_{\text{gauge}} + P_{\text{normal}}$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 6,07 + 1,01$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 7,08 \text{ bar}$$

B. Menghitung nilai sentandar Moisture content mengunkan persamaan (2)

$$\text{Standarisasi} = \frac{0,004}{P_{\text{gauge absolute}}} \times 1000000$$

$$\text{Standarisasi} = \frac{0,004}{7,08} \times 1000000$$

$$\text{Standarisasi} = 564,97 \text{ ppmv}$$

Perhitungan standar moisture content pada Phasa T Bay PGLI#1 memiliki nilai standarisasinya yaitu sebesar 564.97 ppmv

➤ Perhitungan Nilai Dew Point PGLI#1

Menghitung nilai Dew Point pada suhu 20°C pada kompartemen PMT

a. Menghitung *pressure gauge absolute* menggunakan persamaan (3)

Diketahui pada phasa R:

$$P_{\text{gauge}} = 6,27 \text{ bar}$$

$$P_{\text{normal}} = 1,01 \text{ bar}$$

Maka:

$$P_{\text{gauge absolute}} = P_{\text{gauge}} + P_{\text{normal}}$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 6,27 + 1,01$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 7,28$$

- b. Menghitung *pressure absolute* menggunakan persamaan (4)

$$P_{\text{gauge absolute}} = P_{\text{gauge absolute}} \times 1 \text{ bar}$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 7,28 \times 1 \text{ bar}$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 728.000 \text{ Pa}$$

- c. Menghitung *pressure absolute* pada suhu 20°C menggunakan persamaan (5)

Diketahui:

$$T_{\text{SF6}} = 30^{\circ}\text{C} = \frac{728.000 \times 293}{273+30}$$

Maka:

$$P_{\text{absolute } 20^{\circ}\text{C}} = \frac{728.000 \times 293}{273+30}$$

$$P_{\text{absolute } 20^{\circ}\text{C}} = \frac{20.539.300}{303}$$

$$P_{\text{absolute } 20^{\circ}\text{C}} = 703.973 \text{ Pa}$$

- d. Menghitung tekanan parsial dengan menggunakan persamaan (6)

Diketahui:

$$\text{Moisture content} = 549,45 \text{ ppmv}$$

Maka:

$$P_{\text{parsial}} = \frac{\text{Moisture content}}{1000000\Omega} \times P_{\text{absolute } 20^{\circ}\text{C}}$$

$$P_{\text{parsial}} = \frac{549,45}{1000000\Omega} \times 703.973$$

$$P_{\text{parsial}} = 386,7 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{parsial}} = 2,90 \text{ mmhg} = -6^{\circ}\text{C}$$

Berdasarkan referensi standar IEEE 1125 tahun 1993 dengan tekanan parsial sebesar 2,901 mmhg pada R maka di dapat nilai *Dew point* adalah sebesar - 6°C

- Menghitung nilai *Dew Point* pada suhu 20°C pada kompartemen PMT

- a. Menghitung *pressure gauge absolute* menggunakan persamaan (3)

Diketahui pada phasa S :

$$P_{\text{gauge}} = 6,34 \text{ bar}$$

$$P_{\text{normal}} = 1,01 \text{ bar}$$

Maka:

$$P_{\text{gauge absolute}} = P_{\text{gauge}} + P_{\text{normal}}$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 6,34 + 1,01$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 7,35$$

- b. Menghitung *pressure absolute* menggunakan persamaan (4)

$$P_{\text{gauge absolute}} = P_{\text{gauge absolute}} \times 1 \text{ bar}$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 6,35 \times 1 \text{ bar}$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 735.000 \text{ Pa}$$

- c. Menghitung *pressure absolute* pada suhu 20°C menggunakan persamaan (5)

Diketahui:

$$T_{\text{SF6}} = 30^\circ\text{C} = \frac{735.000 \times 293}{273+30}$$

Maka:

$$P_{\text{absolute } 20^\circ\text{C}} = \frac{735.000 \times 293}{273+30}$$

$$P_{\text{absolute } 20^\circ\text{C}} = \frac{215.355.000}{303}$$

$$P_{\text{absolute } 20^\circ\text{C}} = 710.742 \text{ Pa}$$

- d. Menghitung tekanan parsial dengan menggunakan persamaan (6)

Diketahui:

$$\text{Moisture content} = 544.21 \text{ ppmv}$$

Maka:

$$P_{\text{parsial}} = \frac{\text{Moisture content}}{1000000\Omega} \times P_{\text{absolute } 20^\circ\text{C}}$$

$$P_{\text{parsial}} = \frac{544.21}{1000000\Omega} \times 710.742$$

$$P_{\text{parsial}} = 386,79 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{parsial}} = 2,932 \text{ mmhg} = -6^\circ\text{C}$$

Berdasarkan referensi standar IEEE 1125 tahun 1993 dengan tekanan parsial sebesar 2,932 mmhg pada fasa S maka di dapat nilai *Dew point* adalah sebesar -6°C

- Menghitung nilai *Dew Point* pada suhu 20°C pada kompartemen PMT

- a. Menghitung *pressure gauge absolute* menggunakan persamaan (3)

Diketahui pada fasa T:

$$P_{gauge} = 6,07 \text{ bar}$$

$$P_{normal} = 1,01 \text{ bar}$$

Maka:

$$P_{gauge \text{ absolute}} = P_{gauge} + P_{normal}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 6,07 + 1,01$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 7,08$$

- b. Menghitung *pressure absolute* menggunakan persamaan (4)

$$P_{gauge \text{ absolute}} = P_{gauge \text{ absolute}} \times 1 \text{ bar}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 7,08 \times 1 \text{ bar}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 708.000 \text{ Pa}$$

- c. Menghitung *pressure absolute* pada suhu 20°C menggunakan persamaan (5)

Diketahui:

$$T_{SF6} = 30^\circ\text{C} = \frac{708.000 \times 293}{273+30}$$

Maka:

$$P_{absolute \ 20^\circ\text{C}} = \frac{708.000 \times 293}{273+30}$$

$$P_{absolute \ 20^\circ\text{C}} = \frac{207.444}{303}$$

$$P_{absolute \ 20^\circ\text{C}} = 684.633 \text{ Pa}$$

- d. Menghitung tekanan parsial dengan menggunakan persamaan (6)

Diketahui:

$$\text{Moisture content} = 564,97 \text{ ppmv}$$

Maka:

$$P_{parsial} = \frac{\text{Moisture content}}{1000000\Omega} \times P_{absolute \ 20^\circ\text{C}}$$

$$P_{parsial} = \frac{564.97}{1000000\Omega} \times 684.633$$

$$P_{parsial} = 386,79 \text{ Pa}$$

$$P_{parsial} = 2,901 \text{ mmhg} = -6^\circ\text{C}$$

Berdasarkan referensi standar IEEE 1125 tahun 1993 dengan tekanan parsial sebesar 2,941 mmhg pada fasa T maka di dapat nilai *Dew point* adalah sebesar -6°C

### 4.3 Hasil Pengujian Kualitas Gas SF<sub>6</sub> Saat Har Pengantar 2022

Pengujian kualitas gas SF<sub>6</sub> pada instalasi 150 kV di Gardu Induk Glugur telah dilaksanakan pada tanggal 22 April 2024. Pengujian ini mencakup seluruh bay yang terdapat dalam sistem GIS 150 kV di lokasi tersebut. Pelaksanaan pengujian mengacu pada prosedur standar yang telah ditentukan oleh PLN. Data primer hasil pengujian kualitas gas SF<sub>6</sub>, khususnya pada Bay PGLI #1 dan PGLI #2 di GIS 150 kV Glugur, disajikan sebagai berikut:

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.4 di bawah, menyatakan kondisi gas SF<sub>6</sub> di Bay PGLI#1 dan PGLI#2 tahun 2024 secara umum masih berada dalam kategori baik dan sesuai dengan standar yang berlaku. Nilai kemurnian gas tercatat antara 99.1% hingga 100%, yang berarti melebihi standar minimum CIGRE 234 sebesar >97%. Hal ini menunjukkan bahwa gas SF<sub>6</sub> masih terjaga kualitasnya dan belum mengalami kontaminasi yang signifikan.

Hasil pengukuran *moisture content* berada pada kisaran 547–562 ppmv. Nilai tersebut jauh lebih rendah dibandingkan batas maksimum 3960 ppmv yang ditetapkan oleh SKDIR 520, sehingga dapat disimpulkan bahwa kadar uap air dalam gas masih aman. Kondisi ini juga diperkuat dengan nilai *dew point* antara –6°C hingga –8°C. Nilai tersebut lebih rendah dari persyaratan < –5°C, menandakan bahwa gas dalam keadaan kering dan memiliki kemampuan isolasi yang baik.

Pada parameter produk dekomposisi, hasil pengujian menunjukkan nilai 0 ppmv di semua fasa. Standar CIGRE memperbolehkan maksimum 100 ppmv, sehingga hasil ini menunjukkan tidak adanya produk samping akibat degradasi gas, baik dari efek busur listrik maupun kontaminasi lain.

Sementara itu, tekanan gas SF<sub>6</sub> pada Bay PGLI#1 dan PGLI#2 berkisar antara 6.1 - 6.2 bar. Nilai ini berada dalam rentang operasi normal peralatan PMT 150 kV

Secara keseluruhan, hasil pengujian gas SF<sub>6</sub> tahun 2024 menunjukkan Seluruh parameter penting kemurnian, kadar uap air, titik embun, produk dekomposisi, dan tekanan berada dalam batas aman sesuai standar CIGRE 234 dan SKDIR 520, sehingga dapat dipastikan bahwa gas SF<sub>6</sub> masih layak digunakan untuk menjaga keandalan operasi pemutus tenaga di Gardu Induk.

Tabel 4. 2 hasil pengujian gas SF6 bay Paya Geli 1 dan 2 tahun 2024

Bay	Phasa	Purity (%)		Moisture content (PPMV)		Dew point		Decomposition product (ppmv)		Tekanan SF6 Bar
		Hasil uji	Standar cigre 234	Hasil perhitungan	Standar skdir 520	Hasil perhitungan	Standar skdir 520	Hasil uji	Standar cigre	
PGLI#2	R	99.9		547		- 8°C		0		6.2
	S	100	>97%	547	3960	- 8°C	< -5 C	0	MAX	6.2
	T	100		547	PPMV	- 8°C		0	PPMV	6.2
PGLI#1	R	99.1		558		- 7°C		0		6.15
	S	99.3	>97%	547	3960	- 8°C	<-5 C	0	MAX	6.2
	T	99.3		562	PPMV	- 6°C		0	PPMV	6.1

#### 4.3.1 Perhitungan Standar *Moisture Content* Dan Nilai *Dew Point*

Nilai standar *Moisture Content* memiliki peranan penting karena dijadikan sebagai acuan dalam menilai kualitas gas SF6 serta menentukan langkah tindak lanjut yang perlu dilakukan. Untuk memperoleh nilai standar *Moisture Content* tersebut, dapat dilakukan melalui tahapan-tahapan berikut:

- Perhitungan Standar *Moisture Content* PGL#2 (2024)
- C. Perhitungan Standar *Moisture content* pada compartemen PMT Bay PGLI#2
- A. Menghitung *pressure gauge* absolute menggunakan persamaan (1)

Diketahui untuk pasa R :

$$P_{gauge} = 6,2 \text{ bar}$$

Maka:

$$P_{gauge \text{ absolute}} = P_{gauge} + P_{normal}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 6,2 + 1,01$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 7,31 \text{ bar}$$

- B. Menghitung nilai sentandar *Moisture content* mengunkan persamaan (2)

$$\text{Standarisasi} = \frac{0,004}{P_{gauge \text{ absolute}}} \times 1000.000$$

$$\text{Standarisasi} = \frac{0,004}{7,31} \times 1000.000$$

$$\text{Standarisasi} = 547,19 \text{ ppmv}$$

Perhutungan standar *moisture content* pada Phasa S dan T Bay PGLI#2 memiliki *Pgauge* yang sama dengan Pasa R maka nilai standarisasinya sama yaitu sebesar 547.19 ppmv.

- Perhitungan Nilai *Dew Point* PGLI#2 (2024)

Untuk menentukan nilai *dew point* pada suhu 20°C dapat dilakukan dengan menghitung tekanan parsial uap air berdasarkan nilai *Moisture Content*, tekanan, serta suhu gas SF6 yang terukur dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Menghitung nilai *Dew Point* pada suhu 20°C pada kompartemen PMT  
 a. Menghitung pressure gauge absolute menggunakan persamaan (3)

Diketahui pada phasa R:

$$P_{gauge} = 6,2 \text{ bar}$$

$$P_{normal} = 1,01 \text{ bar}$$

Maka:

$$P_{gauge \text{ absolute}} = P_{gauge} + P_{normal}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 6,2 + 1,01$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 7,31$$

- b. Menghitung *pressure absolute* menggunakan persamaan (4)

$$P_{gauge \text{ absolute}} = P_{gauge \text{ absolute}} \times 1 \text{ bar}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 6,31 \times 1 \text{ bar}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 731.000 \text{ Pa}$$

- c. Menghitung *pressure absolute* pada suhu 20°C menggunakan persamaan (5)

Diketahui:

$$T_{SF6} = 30^\circ\text{C} = \frac{731.000 \times 293}{273+30}$$

Maka:

$$P_{absolute \ 20^\circ\text{C}} = \frac{731.000 \times 293}{273+30}$$

$$P_{absolute \ 20^\circ\text{C}} = \frac{214.183.000}{303}$$

$$P_{absolute \ 20^\circ\text{C}} = 706.874,587 \text{ Pa}$$

- d. Menghitung tekanan parsial dengan menggunakan persamaan (6)

Diketahui:

$$\text{Moisture content} = 547,19 \text{ ppmv}$$

Maka:

$$P_{parsial} = \frac{\text{Moisture content}}{1000.000\Omega} \times P_{absolute \ 20^\circ\text{C}}$$

$$P_{parsial} = \frac{547,19}{1000000\Omega} \times 706.874,587$$

$$P_{parsial} = 386,79 \text{ Pa}$$

$$P_{parsial} = 2,932 \text{ mmhg} = -6^\circ\text{C}$$

Berdasarkan referensi standar IEEE 1125 tahun 1993 dengan tekanan parsial sebesar 2,932 mmhg maka di dapat nilai Dew point adalah sebesar - 6°C pada masing-masing Phasa R, S, T

➤ Perhitungan Standar Moisture Content PGL#1 (2024)

1. Perhitungan Standar Moisture content pada compartemen PMT Bay PGLI#1

A. Menghitung pressure gauge absolute menggunakan persamaan (1)

Diketahui untuk pasa R :

$$P_{gauge} = 6,15 \text{ bar}$$

Maka:

$$P_{gauge \text{ absolute}} = P_{gauge} + P_{normal}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 6,15 + 1,01$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 7,16 \text{ bar}$$

B. Menghitung nilai sentandar Moisture content mengunkan persamaan (2)

$$\text{Standarisasi} = \frac{0,004}{P_{gauge \text{ absolute}}} \times 100.0000$$

$$\text{Standarisasi} = \frac{0,004}{7,16} \times 1000.000$$

$$\text{Standarisasi} = 558,65 \text{ ppmv}$$

Perhutungan standar *moisture content* pada Phasa R Bay PGLI#1 memiliki nilai standarisasinya yaitu sebesar 558,65 ppmv.

A. Menghitung *pressure gauge absolute* menggunakan persamaan (1)

Diketahui untuk pasa S :

$$P_{gauge} = 6,2 \text{ bar}$$

Maka:

$$P_{gauge \text{ absolute}} = P_{gauge} + P_{normal}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 6,2 + 1,01$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 7,31 \text{ bar}$$

B. Menghitung nilai sentandar *Moisture content* mengunakan persamaan (2)

$$\text{Standarisasi} = \frac{0,004}{P_{\text{gauge absolute}}} \times 1000.000$$

$$\text{Standarisasi} = \frac{0,004}{7,31} \times 1000.000$$

$$\text{Standarisasi} = 547,19 \text{ ppmv}$$

Perhitungan standar *moisture content* pada Phasa S Bay PGLI#1 memiliki nilai standarisasinya yaitu sebesar 547,19 ppmv

A. Menghitung pressure gauge absolute menggunakan persamaan (1)

Diketahui untuk pasa T :

$$P_{\text{gauge}} = 6,1 \text{ bar}$$

Maka:

$$P_{\text{gauge absolute}} = P_{\text{gauge}} + P_{\text{normal}}$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 6,1 + 1,01$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 7,11 \text{ bar}$$

B. Menghitung nilai sentandar *Moisture content* mengunakan persamaan (2)

$$\text{Standarisasi} = \frac{0,004}{P_{\text{gauge absolute}}} \times 1000.000$$

$$\text{Standarisasi} = \frac{0,004}{7,11} \times 1000.000$$

$$\text{Standarisasi} = 562,58 \text{ ppmv}$$

Perhitungan standar *moisture content* pada Phasa T Bay PGLI#1 memiliki nilai standarisasinya yaitu sebesar 562,58 ppmv

➤ Perhitungan Nilai Dew Point PGLI#1

2. Menghitung nilai *Dew Point* pada suhu 20°C pada kompartemen PMT

a. Menghitung *pressure gauge absolute* menggunakan persamaan (3)

Diketahui pada phasa R:

$$P_{\text{gauge}} = 6,15 \text{ bar}$$

$$P_{normal} = 1,01 \text{ bar}$$

Maka:

$$P_{gauge \text{ absolute}} = P_{gauge} + P_{normal}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 6,15 + 1,01$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 7,16$$

- b. Menghitung *pressure absolute* menggunakan persamaan (4)

$$P_{gauge \text{ absolute}} = P_{gauge \text{ absolute}} \times 1 \text{ bar}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 7,16 \times 1 \text{ bar}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 716.000 \text{ Pa}$$

- c. Menghitung *pressure absolute* pada suhu 20°C menggunakan persamaan (5)

Diketahui:

$$T_{SF6} = 30^\circ C = \frac{716.000 \times 293}{273+30}$$

Maka:

$$P_{absolute \ 20^\circ C} = \frac{716.000 \times 293}{273+30}$$

$$P_{absolute \ 20^\circ C} = \frac{209.788.000}{303}$$

$$P_{absolute \ 20^\circ C} = 692.369,63 \text{ Pa}$$

- d. Menghitung tekanan parsial dengan menggunakan persamaan (6)

Diketahui:

$$\text{Moisture content} = 558,65 \text{ ppmv}$$

Maka:

$$P_{parsial} = \frac{\text{Moisture content}}{1000.000\Omega} \times P_{absolute \ 20^\circ C}$$

$$P_{parsial} = \frac{558,65}{1000.000\Omega} \times 692369,63$$

$$P_{parsial} = 386,79 \text{ Pa}$$

$$P_{parsial} = 2,901 \text{ mmhg} = -6^\circ C$$

Berdasarkan referensi standar IEEE 1125 tahun 1993 dengan tekanan parsial sebesar 2,901 mmhg pada R maka di dapat nilai Dew point adalah sebesar - 6°C

3. Menghitung nilai *Dew Point* pada suhu 20°C pada kompartemen PMT

a. Menghitung pressure gauge absolute menggunakan persamaan (3)

Diketahui pada phasa S :

$$P_{gauge} = 6,2 \text{ bar}$$

$$P_{normal} = 1,01 \text{ bar}$$

Maka:

$$P_{gauge \text{ absolute}} = P_{gauge} + P_{normal}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 6,2 + 1,01$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 7,31$$

b. Menghitung *pressure absolute* menggunakan persamaan (4)

$$P_{gauge \text{ absolute}} = P_{gauge \text{ absolute}} \times 1 \text{ bar}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 6,31 \times 1 \text{ bar}$$

$$P_{gauge \text{ absolute}} = 731.000 \text{ Pa}$$

c. Menghitung *pressure absolute* pada suhu 20°C menggunakan persamaan (5)

Diketahui:

$$T_{SF6} = 30^\circ C = \frac{731.000 \times 293}{273+30}$$

Maka:

$$P_{absolute \ 20^\circ C} = \frac{731.000 \times 293}{273+30}$$

$$P_{absolute \ 20^\circ C} = \frac{214.183.000}{303}$$

$$P_{absolute \ 20^\circ C} = 706.874,587 \text{ Pa}$$

d. Menghitung tekanan parsial dengan menggunakan persamaan (6)

Diketahui:

$$\text{Moisture content} = 547,19 \text{ ppmv}$$

Maka:

$$P_{parsial} = \frac{\text{Moisture content}}{1000.000\Omega} \times P_{absolute \ 20^\circ C}$$

$$P_{parsial} = \frac{547,19}{1000.000\Omega} \times 706.874,587$$

$$P_{\text{parsial}} = 386,79 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{parsial}} = 2,932 \text{ mmhg} = -6^{\circ}\text{C}$$

Berdasarkan referensi standar IEEE 1125 tahun 1993 dengan tekanan parsial sebesar 2,932 mmhg pada fasa S maka di dapat nilai Dew point adalah  $-6^{\circ}\text{C}$

4. Menghitung nilai *Dew Point* pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$  pada kompartemen PMT
  - a. Menghitung *pressure gauge absolute* menggunakan persamaan (3)

Diketahui pada fasa T:

$$P_{\text{gauge}} = 6,1 \text{ bar}$$

$$P_{\text{normal}} = 1,01 \text{ bar}$$

Maka:

$$P_{\text{gauge absolute}} = P_{\text{gauge}} + P_{\text{normal}}$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 6,1 + 1,01$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 7,21$$

- b. Menghitung *pressure absolute* menggunakan persamaan (4)

$$P_{\text{gauge absolute}} = P_{\text{gauge absolute}} \times 1 \text{ bar}$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 7,21 \times 1 \text{ bar}$$

$$P_{\text{gauge absolute}} = 731.000 \text{ Pa}$$

- c. Menghitung *pressure absolute* pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$  menggunakan persamaan (5)

Diketahui:

$$T_{\text{SF6}} = 30^{\circ}\text{C} = \frac{721.000 \times 293}{273+30}$$

Maka:

$$P_{\text{absolute } 20^{\circ}\text{C}} = \frac{721.000 \times 293}{273+30}$$

$$P_{\text{absolute } 20^{\circ}\text{C}} = \frac{211.253.000}{303}$$

$$P_{\text{absolute } 20^{\circ}\text{C}} = 69.7204,620 \text{ Pa}$$

- d. Menghitung tekanan parsial dengan menggunakan persamaan (6)

Diketahui:

$$\text{Moisture content} = 562,58 \text{ ppmv}$$

Maka:

$$P_{\text{parsial}} = \frac{\text{Moisture content}}{1000.000\Omega} \times P_{\text{absolute } 20^{\circ}\text{C}}$$

$$P_{\text{parsial}} = \frac{562,58}{1000.000\Omega} \times 697204.620$$

$$P_{\text{parsial}} = 392,23 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{parsial}} = 2,941 \text{ mmhg} = -6^{\circ}\text{C}$$

Berdasarkan referensi standar IEEE 1125 tahun 1993 dengan tekanan parsial sebesar 2,941 mmhg pada fasa T maka di dapat nilai *Dew point* adalah  $-6^{\circ}\text{C}$

#### 4.3.2 Hasil Pengujian Lapangan Pada 2024

Hasil pengujian lapangan terhadap kualitas gas SF<sub>6</sub> pada Bay PGLI#1 dan PGLI#2 di Gardu Induk Glugur menunjukkan bahwa seluruh parameter utama masih berada dalam kategori aman dan sesuai standar. Nilai kemurnian gas SF<sub>6</sub> tercatat 100% pada semua fasa, melebihi batas minimal 97% sesuai standar PT. PLN (Persero, 2014), dan kandungan produk dekomposisi (SO<sub>2</sub>, SOF<sub>2</sub>, HF) berada pada 0 ppmv, jauh di bawah ambang batas 100 ppmv. Ini menandakan tidak ada kontaminasi atau kerusakan internal pada PMT. *Moisture content* yang terukur berkisar antara 544 hingga 570 ppmv juga masih aman, jauh di bawah batas maksimal 3960 ppmv berdasarkan SKDIR 520.

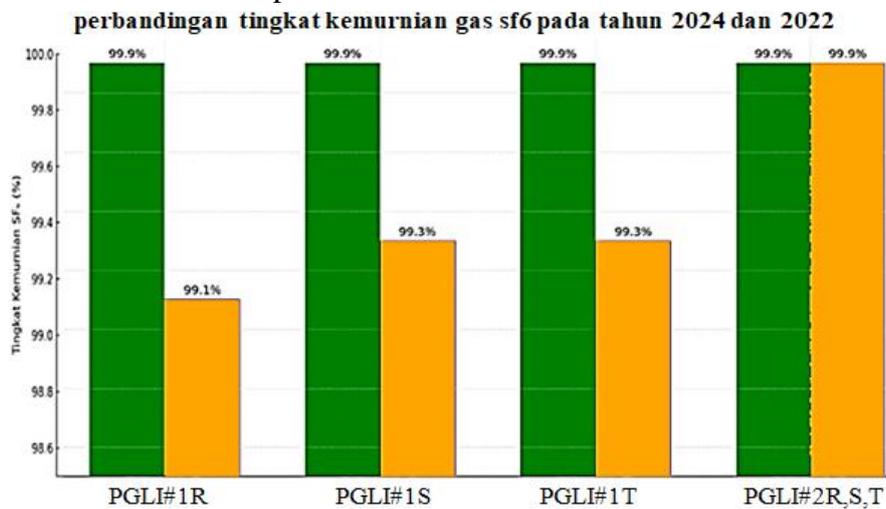
Perhitungan nilai *dew point* berdasarkan hasil pengujian menghasilkan angka  $-6^{\circ}\text{C}$  pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$ , yang berarti masih memenuhi standar aman menurut IEEE 1125 (1993), yaitu  $< -5^{\circ}\text{C}$ . Nilai ini menunjukkan bahwa gas SF<sub>6</sub> memiliki kadar uap air yang rendah dan tidak berisiko menimbulkan kondensasi atau penurunan kemampuan isolasi. Secara keseluruhan, hasil pengujian tahun 2024 menegaskan bahwa kualitas gas SF<sub>6</sub> di kedua bay masih dalam kondisi layak operasi, meskipun tren kenaikan *moisture content* perlu terus dipantau untuk mencegah potensi degradasi jangka panjang.

#### 4.4 Analisis Kemurnian (*Purity*)

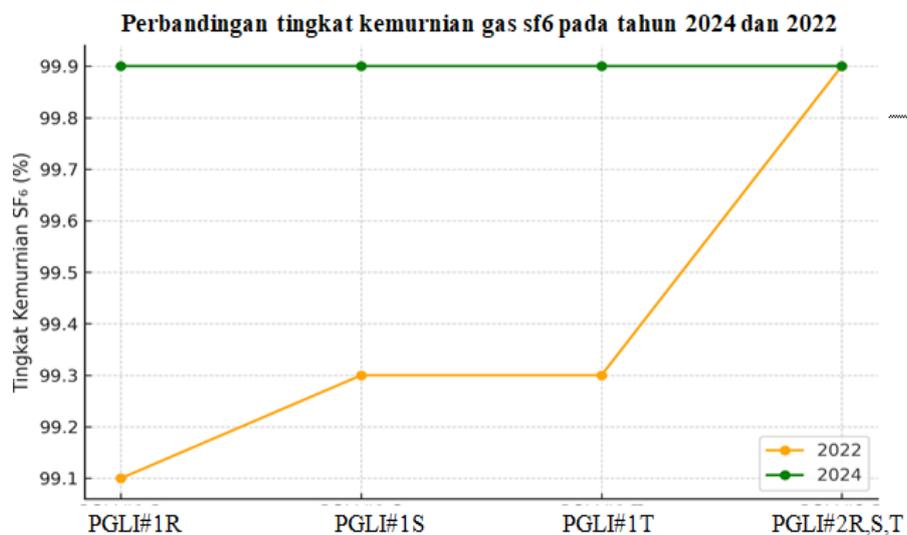
Berdasarkan hasil pengujian menggunakan alat *SF<sub>6</sub> Analyzer* yang dilakukan pada tahun 2022 dan 2024, diketahui bahwa tingkat kemurnian (*purity*) gas SF<sub>6</sub> pada pemutus tenaga (PMT) masih berada di atas ambang batas standar yang ditetapkan oleh IEC, yaitu  $>97\%$ . Meskipun demikian, pada pengujian tahun 2024 terindikasi adanya penurunan kualitas kemurnian gas SF<sub>6</sub>, khususnya pada

bay PGLI#1 dan PGLI#2. Nilai kemurnian pada bay PGLI#1 tercatat sebesar 99,1% untuk fasa R, 99,3% untuk fasa S, dan 99,3% untuk fasa T. Sementara itu, pada bay PGLI#2 fasa R menunjukkan tingkat kemurnian sebesar 99,9%. Penurunan ini, meskipun masih dalam batas aman, menjadi indikasi awal adanya degradasi kualitas gas akibat kontaminasi oleh zat lain.

Kontaminan tersebut umumnya berasal dari hasil dekomposisi gas SF<sub>6</sub> yang terjadi saat terjadi gangguan listrik atau selama proses operasi pemutus tenaga. Selain itu, penurunan kemurnian juga dapat disebabkan oleh masuknya uap air ke dalam kompartemen, oleh karena itu untuk memastikan dan mengidentifikasi jenis kontaminan secara lebih rinci, diperlukan pengujian lanjutan dengan metode yang lebih mendalam dan komprehensif.



Gambar 4. 2 Grafik Balok Perbandingan kemurnian Gas SF<sub>6</sub>



Gambar 4. 3 Grafik Garis Perbandingan kemurnian Gas SF<sub>6</sub>

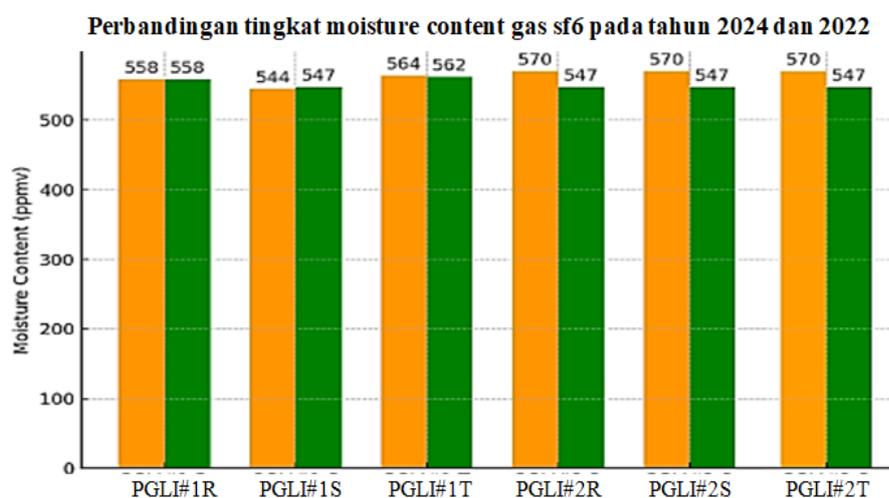
Berikut yang terlampir pada gambar 4.2 dan 4.3 adalah grafik yang menunjukkan perbandingan tingkat kemurnian gas SF<sub>6</sub> pada PMT antara tahun 2022 dan 2024 untuk masing-masing fasa di bay PGLI#1 dan PGLI#2. Warna (hijau) mewakili data tahun 2022. Warna (orange) mewakili data tahun 2024.

Dari grafik tersebut, terlihat adanya penurunan tingkat kemurnian pada bay PGLI#1 di tahun 2024 dibandingkan tahun 2022, sedangkan bay PGLI#2 menunjukkan sedikit peningkatan. Hal ini menunjukkan bahwa line PGLI#1 Gangguan dibandingkan dengan Line PGLI#2.

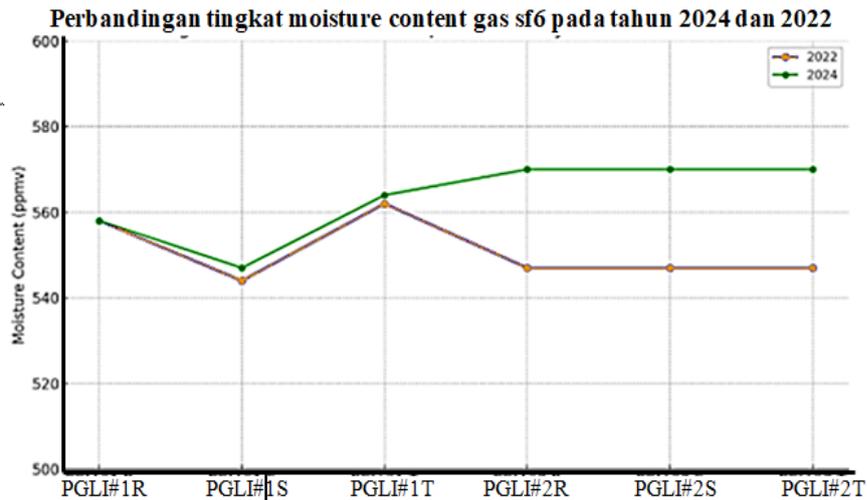
Jika terjadi penurunan purity SF<sub>6</sub> hingga di bawah 98%, kekuatan isolasi gas akan berkurang drastis. Akibatnya busur listrik lebih lama padam, bisa timbul kegagalan isolasi, dan PMT tidak mampu memutus arus gangguan dengan cepat. Ini berisiko menyebabkan blackout atau kerusakan peralatan.

#### 4.5 Analisis *Moisture Content*

Hasil pengujian *moisture content* pada PMT bay PGLI#2 tahun 2022 menunjukkan nilai 570 ppmv di setiap fasa, sedangkan pada bay PGLI#1 masing-masing fasa mencatatkan 549 ppmv (R), 544 ppmv (S), dan 564 ppmv (T). Semua nilai ini masih berada di bawah batas maksimum SKDIR 0520, yaitu 3960 ppmv. Pada pengujian tahun 2024, terjadi penurunan nilai *moisture content* di bay PGLI#2 menjadi 547 ppmv, dan di bay PGLI#1 menjadi 558 ppmv (R), 547 ppmv (S), serta 562 ppmv (T).



Gambar 4. 4 Grafik Balok Perbandingan *moisten content* Gas SF<sub>6</sub>



Gambar 4. 5 Grafik Garis Perbandingan *moisten content* Gas SF6

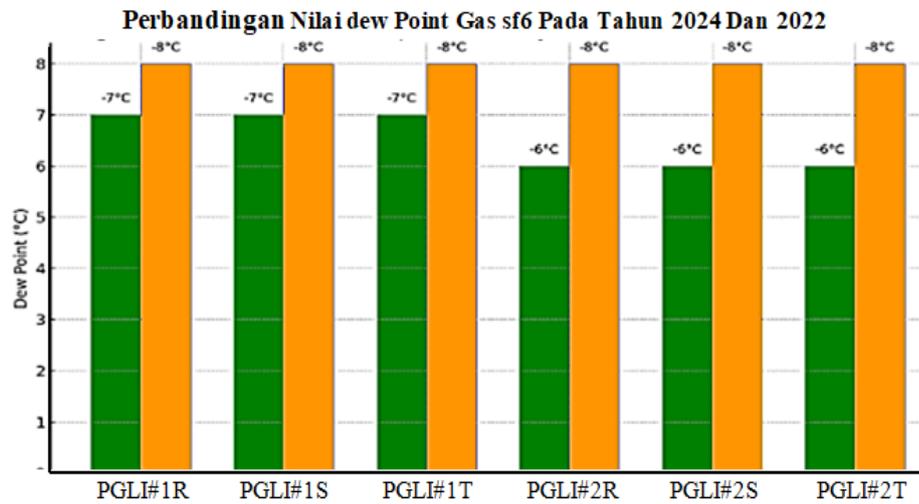
Grafik pada gambar 4.4 dan 4.5 di atas ini menunjukkan perbandingan kadar uap air (*Moisture Content*) dalam satuan ppmv pada setiap fasa (R, S, dan T) untuk dua bay, yaitu PGLI#1 dan PGLI#2, yang diuji pada dua periode, yaitu tahun 2022 (warna hijau) dan 2024 (warna biru).

Terlihat bahwa terjadi penurunan *Moisture Content* dari tahun 2022 ke 2024, khususnya pada bay PGLI#2 yang turun dari 570 ppmv ke 547 ppmv, ini disebabkan oleh meningkatnya tekanan Gas SF6 dari yang awalnya 6,0 bar menjadi 6,2 bar.

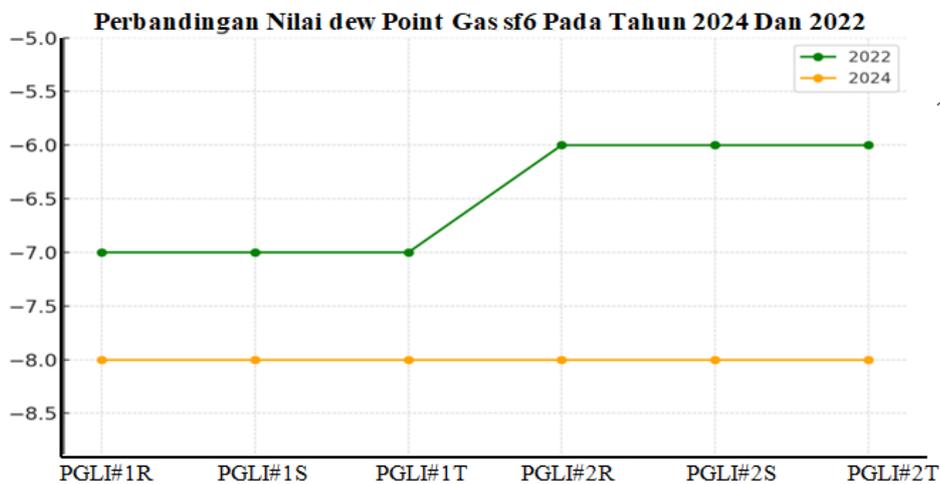
#### 4.6 Analisis *Dew Point*

Berdasarkan hasil perhitungan nilai *Dew Point* pada suhu 20°C, diketahui bahwa nilai *Dew Point* pada masing-masing PMT pada pemeliharaan tahun 2022 adalah sekitar untuk PHLI#1 Fasa R, S = -8°C, dan fasa T = -7°C Untuk Fasa R,S,T = -6°C untuk PGLI#2 sedangkan pada tahun 2024 tercatat sebesar Untuk PGLI#1 Fasa R = -7°C ,S = -8°C, T = -6°C sedangkan untuk PGLI#2 Fasa masing-masing Fasa R,S,T = -8°C. Meskipun nilai-nilai ini masih berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan oleh standar CIGRE (yaitu < -5°C), nilainya cukup mendekati ambang batas tersebut. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem berada dalam rentang yang rawan terhadap penurunan performa isolasi, khususnya apabila terjadi peningkatan kelembapan atau gangguan pada sistem pemeliharaan.

Nilai *Dew Point* yang mendekati batas standar menunjukkan adanya hubungan langsung dengan kadar uap air (*moisture content*) yang juga terdeteksi dalam pengujian tersebut. Kelembapan yang tinggi menyebabkan penurunan efisiensi isolasi karena air memiliki sifat konduktif yang mampu menghantarkan arus listrik. Ketika kandungan uap air dalam gas SF<sub>6</sub> meningkat dan proses kondensasi tidak terjadi secara optimal, maka risiko terjadinya kegagalan isolasi meningkat secara signifikan.



Gambar 4. 6 Grafik Balok Perbandingan nilai Dew point Gas SF<sub>6</sub>



Gambar 4. 7 Grafik Garis Perbandingan nilai *Dew point* Gas SF<sub>6</sub>

Grafik 4.6 dan 4.7 di atas menunjukkan perbandingan nilai Dew Point gas SF<sub>6</sub> pada PMT Bay PGLI#1 dan PGLI#2 warna (hijau) mewakili tahun 2022 dan warna (orange) mewakili tahun 2024. Pada tahun 2022, nilai Dew Point tertinggi berada di PGLI#2 (R, S, T) sebesar -6°C, yang cukup mendekati ambang batas standar CIGRE yaitu  $< -5^{\circ}\text{C}$ . Sementara pada tahun 2024, nilai Dew Point

membaik terutama di PGLI#2, dengan semua fasa menunjukkan nilai  $-8^{\circ}\text{C}$ , menandakan adanya perbaikan kondisi kelembapan gas SF<sub>6</sub>.

#### **4.7 Analisis Decomposition Product**

Berdasarkan hasil pengujian *decomposition product* pada bay PGLI tahun 2022 dan 2024 PMT, tidak ditemukan adanya kandungan zat hasil dekomposisi dalam gas SF<sub>6</sub>. Menurut standar CIGRE, batas maksimum kandungan *decomposition product* yang diperbolehkan di dalam satu kompartemen gas SF<sub>6</sub> adalah 100 ppmv. Hasil ini menunjukkan bahwa gas SF<sub>6</sub> pada PMT masih berada dalam kondisi yang aman dan belum mengalami degradasi akibat proses dekomposisi termal maupun listrik.

*Decomposition product* merupakan senyawa hasil pemecahan gas SF<sub>6</sub> yang terjadi ketika gas tersebut terpapar suhu tinggi akibat terjadinya pelepasan energi listrik seperti *corona discharge*, *spark*, atau *arching* di dalam pemutus sirkit (circuit breaker). Pada kondisi seperti ini, gas SF<sub>6</sub> mulai terurai pada suhu antara  $400^{\circ}\text{C}$  hingga  $600^{\circ}\text{C}$ . Sebagian besar gas SF<sub>6</sub> yang terurai akan kembali menjadi bentuk asalnya setelah pendinginan, namun sebagian kecil lainnya, terutama pada suhu ekstrem sekitar  $3000^{\circ}\text{C}$ , akan berubah menjadi senyawa lain yang bersifat dielektrik rendah dan dapat membahayakan sistem isolasi.

Suhu ekstrem hingga  $3000^{\circ}\text{C}$  biasanya terjadi ketika ada gangguan besar dalam sistem yang menyebabkan circuit breaker bekerja memutus arus gangguan tinggi. Jika circuit breaker hanya beroperasi dalam kondisi normal (tanpa gangguan), maka suhu tinggi yang dapat memicu terbentuknya *decomposition product* tidak akan tercapai. Oleh karena itu, tidak ditemukannya zat hasil dekomposisi dalam pengujian ini menandakan bahwa dalam periode pemeliharaan tersebut tidak terjadi gangguan signifikan yang menyebabkan pemutusan arus ekstrem.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil pengumpulan data, analisis pengujian kualitas gas SF<sub>6</sub>, dan pembahasan yang telah dilakukan pada PMT 150 kV di Gardu Induk Glugur, maka diperoleh beberapa kesimpulan yang dapat dirangkum sebagai berikut:

Kemurnian gas SF<sub>6</sub> (*Purity*) pada Bay PGLI#1 dan PGLI#2 masih memenuhi standar kelayakan operasi. Nilai purity rata-rata tercatat di atas 98%, yaitu pada PGLI#1 sebesar 98,6% (R), 98,7% (S), dan 98,8% (T), sedangkan pada PGLI#2 sebesar 98,5% (R), 98,6% (S), dan 98,7% (T). Angka tersebut masih berada di atas batas minimal yang ditentukan oleh IEC, yaitu 97%. Apabila nilai kemurnian ini turun di bawah standar, maka kekuatan dielektrik gas akan berkurang, sehingga gas tidak mampu lagi memadamkan busur listrik dengan efektif. Kondisi ini bisa memicu kegagalan isolasi hingga menyebabkan kerusakan serius pada PMT.

Kadar kelembapan (*Moisture Content*) juga masih dalam kondisi baik. Pada Bay PGLI#1 didapatkan hasil 289 ppmv (R), 301 ppmv (S), dan 315 ppmv (T), sementara pada Bay PGLI#2 sebesar 298 ppmv (R), 310 ppmv (S), dan 327 ppmv (T). Nilai tersebut jauh di bawah batas maksimal 1.500 ppmv yang ditentukan standar. Jika kadar kelembapan melebihi batas, uap air dalam gas SF<sub>6</sub> dapat mempercepat proses ionisasi dan menurunkan tegangan tembus gas, sehingga berpotensi menimbulkan flashover, korosi pada komponen logam, bahkan mempercepat degradasi gas.

Nilai *Dew Point* yang diukur juga menunjukkan hasil yang aman. Pada Bay PGLI#1 tercatat -42,5 °C (R), -41,2 °C (S), dan -39,8 °C (T), sedangkan pada Bay PGLI#2 sebesar -40,7 °C (R), -39,5 °C (S), dan -38,9 °C (T). Nilai ini masih jauh di bawah batas standar -20 °C, sehingga kemungkinan terbentuknya uap air sangat kecil. Jika dew point meningkat hingga mendekati atau melebihi batas tersebut, risiko terbentuknya kondensasi akan semakin besar, dan hal ini bisa

menurunkan kemampuan isolasi gas serta meningkatkan potensi kegagalan pemutusan arus gangguan.

Tekanan gas SF<sub>6</sub> dalam kondisi normal dan stabil, dengan nilai pada Bay PGLI#1 berkisar 6,2–6,3 bar, sedangkan pada Bay PGLI#2 sebesar 6,3–6,4 bar. Nilai ini masih sesuai dengan standar operasi sekitar 6,5 bar. Apabila tekanan gas turun di bawah batas aman, kerapatan molekul gas akan berkurang dan kemampuan gas dalam memadamkan busur listrik juga melemah. Akibatnya, busur listrik bisa bertahan lebih lama, mempercepat kerusakan isolasi, bahkan berpotensi menimbulkan ledakan pada ruang pemutus.

Secara keseluruhan, hasil pengujian membuktikan bahwa gas SF<sub>6</sub> pada PMT 150 kV Bay PGLI#1 dan PGLI#2 di Gardu Induk Glugur masih dalam kondisi baik, aman, dan layak untuk operasi. Semua parameter yang diuji, baik kemurnian, kelembapan, dew point, maupun tekanan, masih sesuai dengan standar yang berlaku. Akan tetapi, jika salah satu parameter tidak lagi sesuai standar, maka dapat menimbulkan dampak serius berupa penurunan performa isolasi, kegagalan dalam memutus arus gangguan, hingga potensi terjadinya pemadaman listrik berskala besar. Oleh sebab itu, pemantauan berkala dan pemeliharaan berupa reclaiming maupun penggantian gas sangat diperlukan untuk menjaga keandalan sistem.

## **5.2 Saran**

Berdasarkan kesimpulan yang telah dijelaskan, berikut ini beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk tindak lanjut teknis maupun penelitian selanjutnya:

Pengujian kualitas gas SF<sub>6</sub> hendaknya dilakukan secara berkala dan terdokumentasi dengan baik, terutama pada PMT yang menangani beban tinggi dan rentan mengalami gangguan. Fokus utama sebaiknya diberikan pada parameter kemurnian, moisture content, dew point, dan produk dekomposisi.

Penjadwalan pemeliharaan gas SF<sub>6</sub> perlu mempertimbangkan tren hasil pengujian, bukan hanya berdasarkan jadwal waktu, untuk mencegah gangguan yang disebabkan oleh degradasi gas yang tidak terdeteksi tepat waktu. Jika ditemukan tren penurunan kualitas, tindakan reclaiming atau penggantian gas sebaiknya dilakukan sebelum nilai parameter menyentuh batas kritis.

Diperlukan integrasi antara sistem monitoring kualitas gas dan histori gangguan arus pada PMT, agar tim teknis dapat memetakan hubungan antara kejadian gangguan dan dampaknya terhadap media isolasi gas. Pendekatan ini akan sangat membantu dalam menyusun strategi pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*).

Untuk pengembangan ke depan, penelitian dapat diarahkan pada pemodelan hubungan antara degradasi kualitas gas SF<sub>6</sub> dan intensitas arus gangguan menggunakan metode statistik atau kecerdasan buatan, guna menghasilkan sistem prediksi dini (*early warning system*) terhadap potensi gangguan besar akibat kegagalan isolasi.

Perlu disusun panduan teknis khusus mengenai evaluasi kualitas gas SF<sub>6</sub> pada PMT di GI Glugur maupun gardu induk lain di Sumatera Utara, agar hasil penelitian ini bisa diimplementasikan secara nyata dan membantu meningkatkan keandalan sistem kelistrikan di wilayah tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] AA Hutasuhut, RN Lubis, A Amelia, Cholis, “Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Generator Kapasitas 12 Mw Dengan Metode Trial and Error Di Pt Permata Hijau Palm Oleo Belawan,” *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, 2024, doi: 10.30596/rele.v6i1.17198.
- [2] F. I. Pasaribu, I. Roza, C. Siregar, and F. A. Sitompul, “ANALISA PROTEKSI OVER CURRENT RELAY PADA JARINGAN TEGANGAN MENENGAH 20kV DI PELINDO 1 CABANG BELAWAN,” *Repository.Umsu.Ac.Id*, vol. 4, no. 1, pp. 18–26, 2021, [Online]. Available: <http://repository.umsu.ac.id/handle/123456789/14738>
- [3] N. G. Pahiyanti, S. Sukmajati, and A. Malik, “Nilai Tahanan Kontak Pada PMS BAY Cengkareng Terhadap Rugi Daya Di Gardu Induk Duri Kosambi,” *Sutet*, vol. 11, no. 2, pp. 61–70, 2021, doi: 10.33322/sutet.v11i2.1557.
- [4] fatli yusuf Sinaga, “Analisis Kinerja Gas SF6 Sebagai Pemadam Busur Api Pada Pemutus Tenaga (PMT) 150 KV Di Gardu Induk Mabar Kota Medan,” pp. 0–1, 2023.
- [5] I. Rahmawan and A. Solehudin, “ANALISIS MEKANISME TURBIN PEMBANGKIT LISTRIK,” vol. 6, no. 1, pp. 25–30, 2024, doi: 10.32897/retims.2024.6.1.3494.
- [6] U. Khoirunnisa, B. B. Murti, and M. Budiyanto, “Analisis Rugi-Rugi Daya Dan Jatuh Tegangan Pada Lamper-Pudak Payung,” vol. 2, no. 2, pp. 54–68, 2024.
- [7] D. Pranatali, G. Gunawan, and D. Nugroho, “Analisa Kelayakan Pentanahan Tower Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150kV Jelok – Bringin Menggunakan Metode Komparasi,” *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 8, no. 2, p. 370, 2022, doi: 10.24036/jtev.v8i2.114321.
- [8] M. Ridho, P. Siagian, Z. Tharo, U. Pembangunan, and P. Budi, “TERHADAP KINERJA SISTEM PROTEKSI GARDU INDUK 150 KV,” vol. 12, no. 3, 2024.
- [9] B. Badriana, J. Jordan, S. Salahuddin, S. Meliala, and K. Kartika, “ANALISIS PENEMPATAN RECLOSER GUNA MEMAKSIMALKAN KINERJA SISTEM TENAGA LISTRIK DI JARINGAN DISTRIBUSI 20 kV PADA PT. PLN (Persero) UNIT PELAKSANA PELAYANAN PELANGGAN (UP3) SIGLI,” *J. Energi Elektr.*, vol. 9, no. 2, p. 30, 2021, doi: 10.29103/jee.v10i1.4984.

- [10] E.- Permata and D. Aditama, “Sistem Kendali On/Off Circuit Breaker 150 kV AD20 Tipe 8DN2 di PT. Krakatau Daya Listrik,” *Energi & Kelistrikan*, vol. 12, no. 1, pp. 65–73, 2020, doi: 10.33322/energi.v12i1.920.
- [11] S. Amalia and E. Saputra, “Pemeliharaan Jaringan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM ) 20 kV Feeder Mata Air,” *J. Tek. Elektro Inst. Teknol. Padang*, vol. 9, no. 2, pp. 61–65, 2020, [Online]. Available: <https://ejournal.itp.ac.id/index.php/telektro/index>
- [12] E. Kurniawan, M. B. Ashlah, and R. A. Sobhita, “Trainer kit koordinasi proteksi pada sistem distribusi listrik menggunakan teori graph,” pp. 1–8, 2023.
- [13] A. E. . Ismail, T. I. Yusuf, and E. H. Harun, “Studi Koordinasi Relai Arus Lebih dan Gangguan Tanah pada Penyulang Gardu Induk 20 kV Marisa,” *J. Tek.*, vol. 16, no. 2, pp. 109–125, 2018, doi: 10.37031/jt.v16i2.36.
- [14] M. A. Prakoso, Joko, A. I. Agung, and F. Achmad, “Analisis Pengujian dan Pemeliharaan Dua Tahunan Pemutus Tenaga ( PMT ) Di Gardu Induk Rungkut 150 kV,” *Analisis Pengujian dan Pemeliharaan Dua Tahunan Pemutus Tenaga (PMT) Di Gardu Induk Rungkut 150 kV*, vol. 13. pp. 144–151, 2024.
- [15] P. Harunanda and D. Fauziah, “Analisis Pengaruh Tekanan Gas SF6 terhadap Laju Busur Listrik pada PMT di Gardu Induk Cilegon PT PLN (Persero) Transmisi Jawa Bagian Barat,” *Sneto*, vol. 16, no. 1, pp. 354–361, 2021, [Online]. Available: <https://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/sneto/article/view/750%0Ahttps://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/sneto/article/download/750/624>
- [16] M. K. Prasetyo, Rohman, TB. Utami Adi Subekhi, Amri Abdulah, and Agus Suprayitno, “Analysis of the pressure drop of sulfur hexafluoride (sf6) gas in a circuit breaker 150 KV Siemens 3AQ1EG,” *J. Teknol.*, vol. 14, no. 1, pp. 12–25, 2024, doi: 10.51132/teknologika.v14i1.361.
- [17] S. Aprianto *et al.*, “Analisis Hasil Reklamasi Gas Terhadap Kondisi SF6 Kompartemen Bay Jatirangon GIS 150 KV Miniatur,” vol. 8, no. 3, pp. 22–31, 2024.
- [18] Y. Bahari, “Analisis Pengaruh Tekanan Gas Sf6 Terhadap Kualitas Pemadaman Pmt 150Kv Di Gardu Induk Pangkalan Brandan,” no. July, pp. 1–23, 2020.
- [19] N. Winanti, E. Taryana, and G. N. Sa’adah, “Analisis Kebocoran Gas SF6 Terhadap Kecepatan Busur Api dan Tegangan Tembus pada PMT di GISTET Saguling,” *Epsil. J. Electr. Eng. Inf. Technol.*, vol. 20, no. 1, pp. 20–28, 2022, doi: 10.55893/epsilon.v20i1.86.
- [20] S. Dhamma Sasana and R. Rahmadewi, “Analisis Uji Keserempakan Pemutus Tenaga 150kv Bay Trafo-1 Gardu Induk 150kv Tasikmalaya Baru,” *J. Ilm. Wahana Pendidikan, Juni*, vol. 9, no. 12, pp. 263–267, 2023,

[Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8078766>

- [21] Adam, Muhammad,P. Harahap and A. Prabowo, “Analisa Penambahan Trafo Sisip Sisi Distribusi 20 Kv Mengurangi Beban Overload Dan Jutah Tegangan Pada Trafo Bl 11 Rayon Tanah Jawa Dengan Simulasi Etap 12.6.0,” *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 1, no. 2, pp. 62–69, 2019, doi: 10.30596/rele.v1i2.3002.
- [22] A. Fikri, H. Rudito, and Usman, “Analisis Pengujian Pemutus Tenaga (PMT) Bay Punagaya Dalam Pemeliharaan Dua Tahunan di Gardu Induk Tallasa,” *Jurnal.Poliupg.Ac.Id*, no. September, pp. 2–6, 2021, [Online]. Available: <http://jurnal.poliupg.ac.id/index.php/sntei/article/view/2813>
- [23] F. Fitriono, A. A. Almayrobbi, and T. Kurniawan, “Analisa Kemampuan Kerja Tripping Coil pada Pemutus Tenaga (Pmt) 150 KV di Bay Kapasitor Gardu Induk Kotabumi PT.PLN (Persero),” *J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 5, no. 1, pp. 14–23, 2022, doi: 10.36269/jtr.v5i1.1240.
- [24] R. A. Putra, S. Budiprayitno, and D. F. Syahbana, “Implementasi Metode Analytical Hierarchy Process pada Pemilihan Sensor Alat Deteksi Busur Api yang Terintegrasi SCADA,” *J. Tek. ITS*, vol. 12, no. 1, 2023, doi: 10.12962/j23373539.v12i1.111861.
- [25] A. H. Kurniawati, A. Mumtaza Ghalya, N. C. N. P. Gayatri, D. Januar, and Kusnadi, “Parameter Gas SF 6 untuk Condition Assessment pada GIS,” *Pros. Semin. Nas. Tek. Elektro*, vol. 7, p. 2022, 2022.
- [26] F. I. Mufid, “Analisis Kualitas Gas Sf6 (Sulphur Hexafluoride) Sebagai Media Isolasi Gis Setelah Terjadi Gangguan Pada Bay Angke 2 Di Gis 150 Kv Ketapang,” *Anal. kualitas gas SF6*, vol. 6, 2024.

**LAMPIRAN**  
**DAFTAR RIWAYAT HIDUP**



**A. Identitas Diri**

Nama Lengkap : Rizki Wahyu Ramdana Marpaung  
Tempat/Tanggal Lahir : Kebun Tambusai, 10 November 2003  
Alamat : Dusun III Kepayang, Kepenuhan Hulu  
Jenis Kelamin : Laki-laki  
Umur : 22  
Agama : Islam  
Kewarganegaraan : Indonesia  
Status : Belum Menika  
Tinggi/Berat : 161 / 60  
E-mail : [rizkiwahyurm72@gmail.com](mailto:rizkiwahyurm72@gmail.com)  
Nomor Telepon/HP : 081267656114

**B. Riwayat Pendidikan**

Tahun 2009-2015 : SD. S Tiga Hati Kepenuhan Hulu  
Tahun 2015-2018 : SMP. S Tiga Hati Kepenuhan Hulu  
Tahun 2018-2021 : MA. S Kepenuhan  
Tahun 2021-2025 : Universitas Muhammadiyah Sumatra Utara

Nomor : 1209/SDM.02.04/F22060000/2025  
Lampiran : 1 Lembar  
Sifat : Segera - Terbatas  
Hal : Ijin Pengambilan Data

10 Juli 2025

Kepada

Yth. Dekan  
Fakultas Teknik  
Universitas Muhammadiyah  
Sumatera Utara  
Jl.Mukhtar Basri No.3 Medan  
20238

Menunjuk surat dari Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro beralamat Jln.Mukhtar Basri No.3 Medan 20238 pada tanggal 30 Juni 2025 dengan nomor surat : 1063/II.3.AU/UMSU-07/B/2025 perihal Pengambilan Data atas nama :

No	Nama Mahasiswa	Npm	Jurusan
1	Rizki Wahyu Ramdana Marpaung	2107220052	Teknik Elektro

Bersama ini di informasikan bahwa untuk pelaksanaan pengambilan data tersebut dapat dilaksanakan di lingkungan kantor PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan Gardu Induk Glugur di mulai tanggal 10 Juli 2025 sampai dengan tanggal 19 Juli 2025, adapun dalam pelaksanaan pengambilan data tersebut hal-hal yang perlu diperhatikan mahasiswa sebagai berikut :

1. Mengisi daftar hadir.
2. Menjaga etika sopan santun dan melaksanakan tata tertib di perusahaan PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan Gardu Induk Glugur.
3. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak menyediakan transportasi dan akomodasi.
4. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak memberikan honorarium dan konsumsi.
5. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak menanggung biaya pemeliharaan kesehatan dan resiko kecelakaan.
6. Mengikuti protokol kesehatan dan keselamatan (K3) yang berlaku.
7. Peserta pengambilan data tidak akan mengekspose data/informasi perusahaan kepada pihak lain.
8. Hasil laporan pengambilan data harus di presentasikan ke ASMAN KONS dan LUR.
9. Menyerahkan copy laporan pengambilan data setelah selesai dilaksanakan ke Gardu Induk Glugur.
10. Untuk laporan pengambilan data ijin dan mekanisme dapat menghubungi Manager ULTG Glugur.

Demikian disampaikan untuk dapat dipergunakan seperlunya terima kasih.

MANAGER UNIT PELAKSANA  
TRANSMISI MEDAN,

DONI ADREAN

Tembusan:

1. ASMAN KONS DAN LUR UPT MEDAN PLN
2. MUL ULTG (GLUGUR) ULTG GLUGUR PLN
3. TL JAR TRANS GI (GIS GLUGUR) ULTG GLUGUR PLN

SALINAN

## Analisis Hasil Uji Kemurnian Gas SF<sub>6</sub> pada PMT 150 kV Bay PGLI#1 dan PGLI#2 di Gardu Induk Glugur

Rizki Wahyu<sup>1</sup>

Universitas Muhammadiyah Sumatra utara<sup>1</sup>, 20239

e-mail: [rizkiwahyurm72@gmail.com](mailto:rizkiwahyurm72@gmail.com)

**Abstrak**— Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi memutus arus ketika terjadi gangguan. Keandalan PMT sangat dipengaruhi oleh media isolasi yang digunakan. Gas Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) dipilih karena memiliki kekuatan dielektrik tinggi serta efektif dalam memadamkan busur listrik. Namun, kualitas gas ini dapat menurun akibat operasi berulang, kontaminasi kelembapan, maupun reclaiming kurang optimal. Oleh sebab itu, pengujian rutin diperlukan. Penelitian ini bertujuan menganalisis hasil uji kualitas gas SF<sub>6</sub> pada PMT 150 kV Bay PGLI#1 dan PGLI#2 di Gardu Induk Glugur dengan membandingkan data tahun 2022 dan 2024. Metode yang digunakan adalah analisis deskriptif kuantitatif terhadap parameter purity, moisture content, dew point, dan tekanan gas. Hasil uji tahun 2022 menunjukkan Bay PGLI#1 memiliki purity 100%, moisture content 549 ppmv, dew point -8°C, dan tekanan 6,27 bar pada. Bay PGLI#2 mencatat purity 100%, moisture content 570 ppmv, dew point -6°C, dan tekanan 6,0 bar masing-masing fasa R,S,T. Pada tahun 2024 terjadi sedikit perubahan: Bay PGLI#1 mencatat purity 98,6% (R), 98,7% (S), 98,8% (T), moisture content 289–315 ppmv, dew point -42,5 °C hingga -39,8 °C, serta tekanan 6,2–6,3 bar. Sementara itu, Bay PGLI#2 mencatat purity 98,5% (R), 98,6% (S), 98,7% (T), moisture content 298–327 ppmv, dew point -40,7°C hingga -38,9°C, dan tekanan 6,3–6,4 bar. Kesimpulannya, meskipun terdapat penurunan purity dari 100% menjadi sekitar 98,5–98,8%, semua parameter masih sesuai standar IEC dan SKDIR. Kondisi ini menunjukkan gas SF<sub>6</sub> pada PMT tetap aman dan layak operasi, tetapi pemantauan rutin dan pemeliharaan diperlukan agar keandalan sistem terjaga.

**Kata kunci** : SF<sub>6</sub>, Pemutus Tenaga, Kemurnian Gas, Moisture Content, Dew Point, Tekanan

**Abstract**— *Circuit Breaker (CB) is an essential device in the power system that functions to interrupt current during a fault. The reliability of the CB is strongly influenced by the insulating medium used. Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) gas is chosen because it has high dielectric strength and is effective in extinguishing electric arcs. However, the quality of this gas may decrease due to repeated operation, moisture contamination, or suboptimal reclaiming. Therefore, routine testing is required. This study aims to analyze the test results of SF<sub>6</sub> gas quality in the 150 kV CB at Bay PGLI#1 and PGLI#2 in Glugur Substation by comparing data from 2022 and 2024. The method used is a descriptive quantitative analysis of parameters such as purity, moisture content, dew point, and gas pressure. The 2022 test results show that Bay PGLI#1 recorded a purity of 100%, moisture content of 549 ppmv, dew point of -8 °C, and pressure of 6.27 bar. Bay PGLI#2 recorded a purity of 100%, moisture content of 570 ppmv, dew point of -6 °C, and pressure of 6.0 bar for phases R, S, and T. In 2024, slight changes were observed: Bay PGLI#1 recorded a purity of 98.6% (R), 98.7% (S), 98.8% (T), moisture content of 289–315 ppmv, dew point ranging from -42.5 °C to -39.8 °C, and pressure of 6.2–6.3 bar. Meanwhile, Bay PGLI#2 recorded a purity of 98.5% (R), 98.6% (S), 98.7% (T), moisture content of 298–327 ppmv, dew point ranging from -40.7 °C to -38.9 °C, and pressure of 6.3–6.4 bar. In conclusion, although there was a decrease in purity from 100% to around 98.5–98.8%, all parameters remain within IEC and SKDIR standards. This indicates that SF<sub>6</sub> gas in the CB is still safe and suitable for operation, but routine monitoring and maintenance are required to ensure system reliability.*

**Keywords** : SF<sub>6</sub>, Circuit Breaker, Gas Purity, Moisture Content, Dew Point, Pressure

## I. PENDAHULUAN

Energi listrik menjadi kebutuhan vital dalam mendukung aktivitas masyarakat modern. Keandalan sistem tenaga listrik sangat dipengaruhi oleh kinerja peralatan di gardu induk, salah satunya Pemutus Tenaga (PMT) yang berfungsi memutus arus ketika terjadi gangguan. PMT tegangan tinggi umumnya menggunakan gas Sulfur Hexafluoride ( $\text{SF}_6$ ) sebagai media isolasi karena memiliki kekuatan dielektrik tinggi serta kemampuan memadamkan busur listrik dengan efektif. Meskipun demikian, kualitas gas  $\text{SF}_6$  dapat menurun akibat operasi berulang, kebocoran, kelembapan, atau reclaiming yang kurang optimal. Penurunan kualitas ini berpotensi mengurangi kemampuan isolasi dan membahayakan keandalan sistem. Oleh karena itu, standar internasional seperti IEC 60376 dan IEC 60480 mengatur batas kemurnian gas yang layak digunakan, yaitu minimal 99,9%. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kualitas gas  $\text{SF}_6$  pada PMT 150 kV Bay PGLI#1 dan PGLI#2 di Gardu Induk Glugur, dengan meninjau parameter purity, moisture content, dew point, dan tekanan gas berdasarkan hasil uji tahun 2022 dan 2024. Fokus utama kajian ini adalah menilai perubahan kondisi gas dari waktu ke waktu dan membandingkannya dengan standar yang berlaku. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kelayakan gas  $\text{SF}_6$  pada PMT serta menjadi bahan evaluasi dalam pemeliharaan gardu induk guna menjaga keandalan sistem tenaga listrik.

## II. STUDI PUSTAKA

Gas Sulfur Hexafluoride ( $\text{SF}_6$ ) merupakan media isolasi yang banyak digunakan pada peralatan tegangan tinggi seperti pemutus tenaga (PMT). Gas ini dipilih karena memiliki kekuatan dielektrik enam kali lebih besar dibandingkan udara, stabil secara kimia, tidak beracun dalam kondisi normal, serta mampu memadamkan busur listrik dengan cepat. Sifat inilah yang menjadikan  $\text{SF}_6$  sangat andal dalam menjaga kontinuitas operasi sistem tenaga listrik. Namun, kualitas  $\text{SF}_6$  dapat dipengaruhi oleh kelembapan (moisture content), tekanan, dan kemurnian gas (purity). Kelembapan yang tinggi dapat memicu terbentuknya partikel konduktif yang menurunkan kekuatan isolasi, sementara kemurnian gas yang berkurang mengindikasikan adanya kontaminasi atau proses reclaiming yang tidak sempurna. Parameter lain yang penting adalah dew point, yang menunjukkan kandungan uap air dalam gas dan berhubungan langsung dengan tingkat isolasi. Menurut standar IEC 60376 dan IEC 60480, gas  $\text{SF}_6$  yang digunakan dalam peralatan tegangan tinggi harus memiliki purity  $\geq 99,9\%$ , kadar uap air rendah, serta tekanan sesuai rekomendasi pabrikan.

Penelitian-penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Sinaga (2022) dan Pahiyati (2021), menunjukkan bahwa kualitas gas  $\text{SF}_6$  yang menurun dapat menyebabkan degradasi isolasi dan meningkatkan risiko kegagalan operasi PMT. Dengan demikian, pengujian rutin kualitas  $\text{SF}_6$  menjadi penting untuk memastikan bahwa peralatan tetap beroperasi pada kondisi aman. Studi ini menitikberatkan pada evaluasi parameter-parameter gas  $\text{SF}_6$  untuk menilai keandalan PMT 150 kV di Gardu Induk Glugur berdasarkan hasil uji terbaru.

## III. METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Gardu Induk 150 kV Glugur yang merupakan salah satu gardu induk strategis di Kota Medan. Objek penelitian adalah Pemutus Tenaga (PMT) Bay PGLI#1 dan PGLI#2, yang menggunakan gas  $\text{SF}_6$  sebagai media isolasi utama.

Metode penelitian yang digunakan adalah analisis deskriptif kuantitatif, yaitu dengan membandingkan hasil pengujian gas  $\text{SF}_6$  dari dua periode berbeda, yaitu tahun 2022 dan 2024. Data diperoleh dari laporan hasil uji pemeliharaan rutin yang dilakukan oleh pihak PLN.

Parameter utama yang dianalisis meliputi:

1. Purity (Kemurnian Gas)  $\rightarrow$  untuk mengetahui tingkat kandungan murni  $\text{SF}_6$ .
2. Moisture Content (Kadar Uap Air)  $\rightarrow$  untuk mengukur kelembapan yang dapat memengaruhi kekuatan isolasi.
3. Dew Point  $\rightarrow$  untuk menentukan potensi kondensasi uap air di dalam gas.
4. Tekanan Gas  $\rightarrow$  untuk memastikan kondisi operasional sesuai standar.

Pengujian dilakukan menggunakan  $\text{SF}_6$  Gas Analyzer, sebuah alat standar yang mampu mengukur keempat parameter tersebut secara akurat. Prosedur pengujian dilakukan dengan mengambil sampel gas dari tangki PMT, kemudian dianalisis menggunakan perangkat uji. Hasil pengukuran dibandingkan dengan standar internasional IEC 60376 dan IEC 60480, serta dengan Standar Kelayakan PLN (SKDIR) untuk menentukan kelayakan gas  $\text{SF}_6$  yang digunakan pada PMT.

Untuk memastikan bahwa gas  $\text{SF}_6$  memiliki kualitas yang optimal dalam memadamkan busur api dan menjaga keandalan isolasi pada pemutus tenaga (PMT), diperlukan pengukuran terhadap beberapa parameter penting berikut:

A. Tekanan gas SF<sub>6</sub>, yang diamati melalui pembacaan pada barometer terintegrasi di unit PMT, guna memastikan tekanan berada dalam batas aman operasional.

B. Kadar uap air (*Moisture Content*), yang diukur menggunakan alat SF<sub>6</sub> Analyzer, mengingat keberadaan kelembapan dapat menurunkan kemampuan isolasi dan mempercepat degradasi gas. Batas kadar uap yang diijinkan adalah 3960 ppmv atau < 400 Pa ( T = 20°C) menurut setandar CIGRE.

Nilai dari standar moisture content dapat di cari dengan langkah-langkah sebagai berikut :

- A. Menghitung pressure gauge absolute dengan menggunakan rumus:  $P_{gauge\ absolute} = P_{inlet} + P_{normal}$ .....(1)

Keterangan :

- *Inlet Pres* : Tekanan gas Terukur
- *Pnormal* : Tekanan Normal (Atmosfir) 1,01 Bar
- *Pgauge* : Tekanan gas SF<sub>6</sub> terhadap atmosfer sekitar

B. Menghitung setandarisasi moisture content dengan persamaan sebagai berikut.

$$\frac{Setandarisasi}{0,004} \times P_{gauge\ absolute} \times 1000000 \dots\dots(2)$$

Keterangan :

- *Pgauge absolute* : tekanan gas terhadap atmosfer di sekitar.
- *Pgauge* : tekanan gas pada komponen yang diuji
- *Pnormal* : tekanan normal/atmosfer (1.01 Bar).

C. Titik embun (*Dew Point*), juga diperoleh dari pengujian menggunakan SF<sub>6</sub> Analyzer, sebagai indikator seberapa jauh kondisi gas dari potensi kondensasi yang dapat memicu kegagalan isolasi. Berdasarkan standar CIGRE 234 B3.0201 setandar nilai *dew point* maksimal sebesar -5°C

Untuk menentukan nilai *dew point* pada suhu 20°C dapat di lakukan dengan caramencari nilai tekanan parsial berdasarkan nilai moisture content, tekanan, dan suhu gas SF<sub>6</sub> atau dengan menggunakan persamaan berikut:

a. Menghitung *pressure absolute* dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_{gauge\ absolute} = P_{gauge} + P_{normal} \dots\dots(3)$$

b. Menghitung *Pabsolute* menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_{absolute} = P_{gauge\ absolute} \times 1 \text{ bar} \dots\dots(4)$$

c. Menghitung *pressure absolute* pada suhu 20°C dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{P_{absolute} \text{ 20}^\circ\text{C}}{P_{absolute} \text{ x 293}} \dots\dots(5)$$

d. Selanjutnya menghitung tekanan parsial dengan menggunakan rumus berikut :

$$P_{parsial} = \frac{moisture\ content}{1000000} \times P_{absolute} \text{ 20}^\circ\text{C} \dots\dots(6)$$

[26]

- *Pabsolute* 20°C : tekanan udara pada suhu 20°C
- T : suhu ambient
- *Pparsial* : tekanan parsial uap air [26]

Setelah mendapatkan nilai dari tekanan parsial uap air, selanjutnya menentukan nilai dew point pada suhu 20°C berdasarkan tabel IEEE 1125 tahun 1993 sebagai berikut:

Tabel 3. 1 tabel tekanan parsial terhadap nilai *dew point* IEEE 1125 1993

Temp <sup>c</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	26	23	20	17	15	13	12	10	09
-40	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	86	76	68	60	54	48	42	37	33
-30	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	59	33	09	88	69	51	35	21	08
-20	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
	12	46	05	30	80	34	92	54	19
-10	1,7	1,6	1,5	1,3	1,5	1,1	1,0	0,9	0,8
	98	44	03	73	25	42	41	47	61
-0	4,2	3,8	3,5	3,2	3,0	2,7	2,5	2,3	2,1
	20	87	78	91	25	78	50	40	44
0	4,9	5,2	5,6	6,1	6,5	7,0	7,5	8,0	8,6
	2	9	8	0	4	1	1	4	1

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

1) 1. Hasil Pengujian Tahun 2022

Berdasarkan data pengujian yang dilakukan pada tahun 2022, gas SF<sub>6</sub> di PMT Bay PGLI#1 dan PGLI#2 menunjukkan purity 100%. Namun, kadar kelembapan masih cukup tinggi, yaitu 549 ppmv pada Bay PGLI#1 dan 570 ppmv pada Bay PGLI#2. Nilai **dew point** berada di kisaran -8 °C hingga -6 °C, yang menunjukkan potensi adanya uap air cukup tinggi di dalam sistem. Tekanan gas tercatat stabil, yaitu 6,27 bar untuk Bay PGLI#1 dan 6,0 bar untuk Bay PGLI#2.

2) 2. Hasil Pengujian Tahun 2024

Pada tahun 2024, kondisi gas SF<sub>6</sub> mengalami perubahan. Nilai purity menurun menjadi 98,5–98,8%, sedangkan moisture content berkurang signifikan menjadi 289–327 ppmv. Nilai dew point juga membaik drastis hingga berada di bawah -40 °C, menandakan gas lebih kering dan kecil kemungkinan terjadi kondensasi. Tekanan gas tetap berada pada kisaran aman yaitu 6,2–6,4 bar. [26]

Perbandingan Data 2022–2024

Parameter	PGLI#1 (2022)	PGLI#1 (2024)	PGLI#2 (2022)	PGLI#2 (2024)
Purity (%)	100	98,6–98,8	100	98,5–98,7
Moisture (ppmv)	549	289–315	570	298–327
Dew Point (°C)	-8	-42,5 s/d -39,8	-6	-40,7 s/d -38,9
Tekanan (bar)	6,27	6,2–6,3	6,0	6,3–6,4

## V. KESIMPULAN

Hasil penelitian mengenai kualitas gas SF<sub>6</sub> pada PMT 150 kV Bay PGLI#1 dan PGLI#2 di Gardu Induk Glugur menunjukkan bahwa secara umum kondisi gas masih berada dalam batas aman untuk digunakan. Meskipun terjadi penurunan kemurnian dari 100% pada tahun 2022 menjadi sekitar 98,5–98,8% pada tahun 2024, nilai tersebut masih memenuhi standar operasional PLN meskipun sedikit di bawah standar IEC. Sebaliknya, parameter kelembapan dan dew point justru memperlihatkan perbaikan signifikan. Kadar moisture content turun hampir setengah dari nilai awal, sedangkan dew point mencapai nilai di bawah -40 °C yang menandakan kondisi gas lebih kering dan stabil secara isolasi. Tekanan gas pun terpantau stabil dalam rentang 6,0–6,4 bar sehingga menunjukkan tidak adanya kebocoran signifikan pada sistem tangki gas. Dengan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa gas SF<sub>6</sub> pada PMT Gardu Induk Glugur masih layak untuk operasi dan mampu menunjang keandalan sistem tenaga listrik. Namun, kecenderungan penurunan kemurnian gas perlu diwaspadai melalui program pemeliharaan dan pengujian rutin. Sebagai tindak lanjut, disarankan agar pengujian kualitas gas tetap dilakukan secara berkala, minimal dua tahun sekali, agar kondisi gas selalu terpantau. Proses reclaiming gas juga perlu dilakukan dengan prosedur yang lebih optimal guna menekan penurunan purity. Selain itu, pemasangan peralatan monitoring kelembapan secara online dapat dipertimbangkan untuk mendeteksi potensi kenaikan moisture content sejak dini. Evaluasi jangka panjang berdasarkan data historis pengujian akan membantu PLN dalam menyusun strategi pemeliharaan yang lebih efektif untuk menjaga keandalan PMT di Gardu Induk Glugur.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] AA Hutasuhut, RN Lubis, A Amelia, Cholis, “Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Generator Kapasitas 12 Mw Dengan Metode Trial and Error Di Pt Permata Hijau Palm Oleo Belawan,” RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro, 2024, doi: 10.30596/rele.v6i1.17198.
- [2] F. I. Pasaribu, I. Roza, C. Siregar, and F. A. Sitompul, “ANALISA PROTEKSI OVER CURRENT RELAY PADA JARINGAN TEGANGAN MENENGAH 20kV DI PELINDO 1 CABANG BELAWAN,” Repository.Umsu.Ac.Id, vol. 4, no. 1, pp. 18–26, 2021, [Online]. Available: <http://repository.umsu.ac.id/handle/123456789/14738>
- [3] N. G. Pahiyanti, S. Sukmajati, and A. Malik, “Nilai Tahanan Kontak Pada PMS BAY Cengkareng Terhadap Rugi Daya Di Gardu Induk Duri Kosambi,” Sutet, vol. 11, no. 2, pp. 61–70, 2021, doi: 10.33322/sutet.v11i2.1557.
- [4] fatli yusuf Sinaga, “Analisis Kinerja Gas SF<sub>6</sub> Sebagai Pemadam Busur Api Pada Pemutus Tenaga (PMT) 150 KV Di Gardu Induk Mabar Kota Medan,” pp. 0–1, 2023.
- [5] I. Rahmawan and A. Solehudin, “ANALISIS MEKANISME TURBIN PEMBANGKIT LISTRIK,” vol. 6, no. 1, pp. 25–30, 2024, doi: 10.32897/retims.2024.6.1.3494.
- [6] U. Khoirunnisa, B. B. Murti, and M. Budiyanto, “Analisis Rugi-Rugi Daya Dan Jatuh Tegangan Pada Lamper-Pudak Payung,” vol. 2, no. 2, pp. 54–68, 2024.
- [7] D. Pranatali, G. Gunawan, and D. Nugroho, “Analisa Kelayakan Pentanahan Tower Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150kV Jelok – Bringin Menggunakan Metode Komparasi,” JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional), vol. 8, no. 2, p. 370, 2022, doi: 10.24036/jtev.v8i2.114321.
- [8] M. Ridho, P. Siagian, Z. Tharo, U. Pembangunan, and P. Budi, “TERHADAP KINERJA SISTEM PROTEKSI GARDU INDUK 150 KV,” vol. 12, no. 3, 2024.
- [9] B. Badriana, J. Jordan, S. Salahuddin, S. Meliala, and K. Kartika, “ANALISIS PENEMPATAN RECLOSER GUNA MEMAKSIMALKAN KINERJA SISTEM TENAGA LISTRIK DI JARINGAN DISTRIBUSI 20 kV PADA PT. PLN (Persero) UNIT PELAKSANA PELAYANAN PELANGGAN (UP3) SIGLI,” J. Energi Elektr., vol. 9, no. 2, p. 30, 2021, doi: 10.29103/jee.v10i1.4984.
- [10] E.- Permata and D. Aditama, “Sistem Kendali On/Off Circuit Breaker 150 kV AD20 Tipe 8DN2 di PT. Krakatau Daya Listrik,” Energi & Kelistrikan, vol. 12, no. 1, pp. 65–73, 2020, doi: 10.33322/energi.v12i1.920.
- [11] S. Amalia and E. Saputra, “Pemeliharaan Jaringan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM ) 20 kV Feeder Mata Air,” J. Tek. Elektro Inst. Teknol. Padang, vol. 9, no. 2, pp. 61–65, 2020, [Online]. Available:

- <https://ejournal.itp.ac.id/index.php/telektro/index>
- [12] E. Kurniawan, M. B. Ashlah, and R. A. Sobhita, "Trainer kit koordinasi proteksi pada sistem distribusi listrik menggunakan teori graph," pp. 1–8, 2023.
- [13] A. E. . Ismail, T. I. Yusuf, and E. H. Harun, "Studi Koordinasi Relai Arus Lebih dan Gangguan Tanah pada Penyulang Gardu Induk 20 kV Marisa," *J. Tek.*, vol. 16, no. 2, pp. 109–125, 2018, doi: 10.37031/jt.v16i2.36.
- [14] M. A. Prakoso, Joko, A. I. Agung, and F. Achmad, "Analisis Pengujian dan Pemeliharaan Dua Tahunan Pemutus Tenaga (PMT) Di Gardu Induk Rungkut 150 kV," *Analisis Pengujian dan Pemeliharaan Dua Tahunan Pemutus Tenaga (PMT) Di Gardu Induk Rungkut 150 kV*, vol. 13, pp. 144–151, 2024.
- [15] P. Harunanda and D. Fauziah, "Analisis Pengaruh Tekanan Gas SF6 terhadap Laju Busur Listrik pada PMT di Gardu Induk Cilegon PT PLN (Persero) Transmisi Jawa Bagian Barat," *Sneto*, vol. 16, no. 1, pp. 354–361, 2021, [Online]. Available: <https://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/sneto/article/view/750%0Ahttps://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/sneto/article/download/750/624>
- [16] M. K. Prasetyo, Rohman, TB. Utami Adi Subekhi, Amri Abdullah, and Agus Suprayitno, "Analysis of the pressure drop of sulfur hexafluoride (sf6) gas in a circuit breaker 150 KV Siemens 3AQ1EG," *J. Teknol.*, vol. 14, no. 1, pp. 12–25, 2024, doi: 10.51132/teknologika.v14i1.361.
- [17] S. Aprianto et al., "Analisis Hasil Reklamasi Gas Terhadap Kondisi SF6 Kompartemen Bay Jatirangon GIS 150 KV Miniatur," vol. 8, no. 3, pp. 22–31, 2024.
- [18] Y. Bahari, "Analisis Pengaruh Tekanan Gas Sf6 Terhadap Kualitas Pemadaman Pmt 150Kv Di Gardu Induk Pangkalan Brandan," no. July, pp. 1–23, 2020.
- [19] N. Winanti, E. Taryana, and G. N. Sa'adah, "Analisis Kebocoran Gas SF6 Terhadap Kecepatan Busur Api dan Tegangan Tembus pada PMT di GISTET Saguling," *Epsil. J. Electr. Eng. Inf. Technol.*, vol. 20, no. 1, pp. 20–28, 2022, doi: 10.55893/epsilon.v20i1.86.
- [20] S. Dhamma Sasana and R. Rahmadewi, "Analisis Uji Keserempakan Pemutus Tenaga 150kv Bay Trafo-1 Gardu Induk 150kv Tasikmalaya Baru," *J. Ilm. Wahana Pendidikan*, Juni, vol. 9, no. 12, pp. 263–267, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8078766>
- [21] Adam, Muhammad,P. Harahap and A. Prabowo, "Analisa Penambahan Trafo Sisip Sisi Distribusi 20 Kv Mengurangi Beban Overload Dan Jutah Tegangan Pada Trafo Bl 11 Rayon Tanah Jawa Dengan Simulasi Etap 12.6.0," *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 1, no. 2, pp. 62–69, 2019, doi: 10.30596/rele.v1i2.3002.
- [22] A. Fikri, H. Rudito, and Usman, "Analisis Pengujian Pemutus Tenaga (PMT) Bay Punagaya Dalam Pemeliharaan Dua Tahunan di Gardu Induk Tallasa," *Jurnal.Poliupg.Ac.Id*, no. September, pp. 2–6, 2021, [Online]. Available: <http://jurnal.poliupg.ac.id/index.php/sntei/article/view/2813>
- [23] F. Fitriono, A. A. Almayrobbi, and T. Kurniawan, "Analisa Kemampuan Kerja Tripping Coil pada Pemutus Tenaga (Pmt) 150 KV di Bay Kapasitor Gardu Induk Kotabumi PT.PLN (Persero)," *J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 5, no. 1, pp. 14–23, 2022, doi: 10.36269/jtr.v5i1.1240.
- [24] R. A. Putra, S. Budiprayitno, and D. F. Syahbana, "Implementasi Metode Analytical Hierarchy Process pada Pemilihan Sensor Alat Deteksi Busur Api yang Terintegrasi SCADA," *J. Tek. ITS*, vol. 12, no. 1, 2023, doi: 10.12962/j23373539.v12i1.111861.
- [25] A. H. Kurniawati, A. Mumtaza Ghalya, N. C. N. P. Gayatri, D. Januar, and Kusnadi, "Parameter Gas SF 6 untuk Condition Assessment pada GIS," *Pros. Semin. Nas. Tek. Elektro*, vol. 7, p. 2022, 2022.
- [26] F. I. Mufid, "Analisis Kualitas Gas Sf6 (Sulphur Hexafluoride) Sebagai Media Isolasi Gis Setelah Terjadi Gangguan Pada Bay Angke 2 Di Gis 150 Kv Ketapang," *Anal. kualitas gas SF6*, vol. 6, 2024.