

Perbaikan Prosedur Pemeliharaan Kualitas Gas Isolasi Conventional Circuit Breaker Dengan Improved Gas Handling Untuk Mitigasi Efek SO₂ Dan Meningkatkan Keandalan Operasi

Aru Mandala^{1*}; Ignatius Rendroyoko¹

1. Institut Teknologi PLN, Menara PLN, Jl. Lingkar Luar Barat, Duri Kosambi,
Cengkareng, Jakarta Barat, DKI Jakarta 11750 Indonesia

*Email: aru2210520@itpln.ac.id

Received: 14 April 2025 | Accepted: 18 Desember 2025 | Published: 7 Januari 2026

ABSTRACT

SO₂ (Sulfur monofluoride) gas is a decomposition product formed from the reaction of SF₆ decomposition products with oxygen or water vapor in conventional 150 kV PMT equipment. This study aims to [1] determine the main cause of SO₂ interference in SF₆ gas insulation media of 150 kV PMT, and [2] to develop improvements in the 150 kV PMT maintenance procedure so that similar interference can be reduced significantly. The research methodology uses descriptive research with an applied research approach, which provides a comprehensive picture of the quality of SF₆ gas and validation of new procedures for handling SO₂. The results of the study indicate that [1] the improved SF₆ gas handling method successfully reduced SO₂ levels below 40 ppmv, with a faster reconditioning duration (6-8 hours), fewer personnel (5 people), SF₆ gas purity increased to 99.9%, and the risk of gas decomposition was minimized thanks to a modern vacuum pump and effective filtration system, [2] binary logistic regression analysis shows an effective model for predicting SO₂ content, with the age of the equipment and the PPMV Dew Point contributing 60.1% while 39.9% is influenced by other variables [3] regular monitoring of SF₆ gas quality, especially SO₂ content and humidity, is very important to maintain the performance and reliability of the 150 kV PMT.

Keywords: SF₆ gas, 150 kV circuit breaker, SO₂ product decomposition

ABSTRAK

Gas SO₂ (Sulfur monofluoride) merupakan produk dekomposisi yang terbentuk dari reaksi produk penguraian SF₆ dengan oksigen atau uap air dalam peralatan PMT 150 kV konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk [1] mengetahui penyebab utama gangguan SO₂ pada media isolasi gas SF₆ PMT 150 kV, dan [2] dapat mengembangkan perbaikan pada prosedur pemeliharaan PMT 150 kV sehingga gangguan serupa dapat berkurang secara signifikan. Metodologi penelitian menggunakan descriptive research dengan pendekatan applied research, yang memberikan gambaran komprehensif mengenai kualitas gas SF₆ serta validasi prosedur baru untuk penanganan SO₂. Hasil penelitian menunjukkan bahwa [1] metode improved gas handling SF₆ berhasil menurunkan kadar SO₂ di bawah 40 ppmv, dengan durasi rekondisi lebih cepat (6-8 jam), jumlah personel lebih sedikit (5 orang), kemurnian gas SF₆ meningkat hingga 99,9%, dan risiko dekomposisi gas diminimalkan berkat vacuum pump modern dan sistem filtrasi yang efektif, [2] analisis regresi logistik biner menunjukkan model efektif memprediksi kandungan SO₂, dengan usia alat dan Dew Point PPMV berkontribusi sebesar 60,1% sementara 39,9% dipengaruhi variabel lain [3] pemantauan berkala terhadap kualitas gas SF₆, terutama kandungan SO₂ dan kelembaban, sangat penting untuk menjaga performa dan keandalan PMT 150 kV.

Kata kunci : gas SF₆, pemutus tenaga 150 kV, dekomposisi produk SO₂

1. PENDAHULUAN

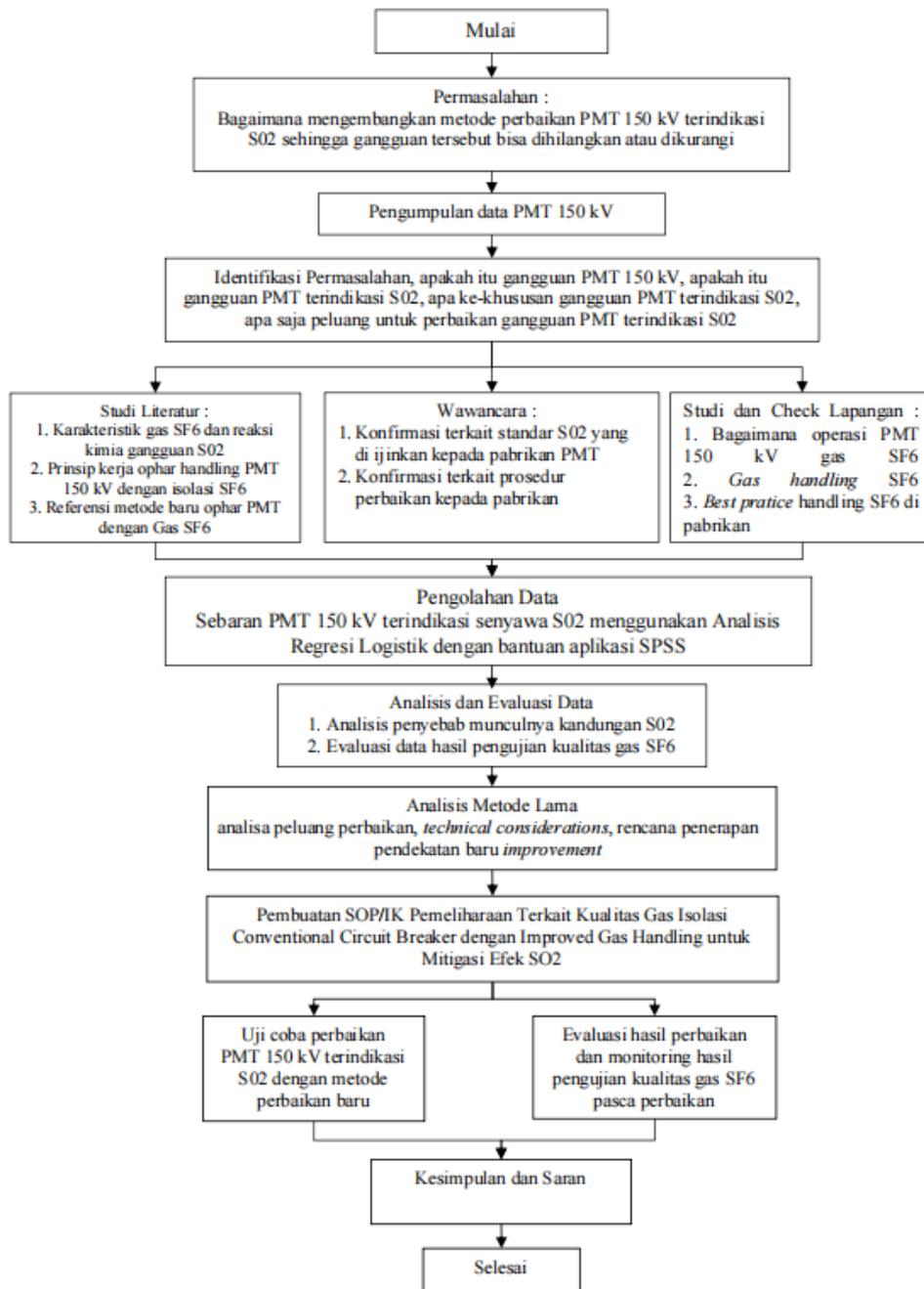
Dalam penyaluran tenaga listrik diperlukan suatu gardu induk yang berfungsi untuk mengatur tegangan yang disalurkan dari pembangkit ke pusat beban. Pada gardu induk terdapat berbagai peralatan listrik tegangan tinggi yang mempunyai fungsi pada masing-masing peralatan. Pemutus tenaga merupakan suatu alat pengalih mekanis, yang mampu menghasilkan, mengalirkan, dan memutus arus pada kondisi sirkit normal dan juga, mengalirkan dan mengalirkan selama waktu tertentu dan memutus arus pada kondisi sirkit abnormal. Fungsi utamanya adalah sebagai alat pembuka atau penutup suatu rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta mampu membuka atau menutup saat terjadi arus gangguan (Chair & Vice Chair, 2012). Pemeliharaan pada pemutus tenaga 150 kV merupakan hal yang penting, dikarenakan setelah PMT beroperasi secara terus menerus dan dalam waktu lama, akan menurunkan tingkat keandalan PMT tersebut. Untuk penjaminan terhadap keandalan operasinya, PMT harus selalu dan terus dievaluasi dan diuji kinerjanya setelah sekian lama beroperasi (Goeritno, 2000).

Kegagalan pada pemutus tenaga bisa disebabkan oleh dua faktor yaitu kegagalan mekanis dan kegagalan media isolasi nya (Antoun, 2018). Kegagalan media isolasi pemutus tenaga (PMT) 150 kV disebabkan oleh pemburukan kualitas gas SF₆. Di mana pemburukan kualitas gas SF₆ akibat dari produk sampingan SF₆ yang tercipta dari campuran gas SF₆, panas dan kelembaban. Produk sampingan SF₆ yang paling stabil adalah SO₂ (Bhandari, Myers, Cawthorne, & Hilliard, 1999). Berhubungan dengan hal tersebut, di PLN ULTG Bali Selatan terdapat 9 Gardu Induk dengan 17 PMT merk Areva Tipe GL313 yang mengalami pemburukan media isolasi gas sf₆ nya, di mana nilai kandungan SO₂nya tinggi. Untuk melakukan perbaikan, kita perlu mengetahui berapa ppmv standar kandungan SO₂ yang di izinkan pada pemutus tenaga 150 kV. Sedangkan standar sesuai Kepdir 0520.2 – Buku Pedoman Pemeliharaan PMT kandungan dekomposisi produk total yang di izinkan (SOF₄ + SO₂F₂ + SOF₂ + SO₂ + HF) ≤ 1000 ppmv sesuai Cigre 234, 2003 (Buku Pedoman Pemutus Tenaga, 2014) dan Buku Pedoman Pemeliharaan GIS kandungan dekomposisi produk nya yang di izinkan SO₂ + SOF₂ ≤ 12 ppmv IEC 60480 (Buku Pedoman Pemeliharaan Gas Insulated Substation (GIS), 2014). Dari dua acuan tersebut tidak menunjukan spesifik terkait berapa nilai kandungan SO₂ sendiri yang di izinkan. Selain itu juga acuan di Kepdir 0520.2 – Buku Pedoman Pemeliharaan PMT dan Buku Pedoman Pemeliharaan GIS terkait anomali SO₂ melebihi standar belum di paparkan secara terperinci prosedur untuk perbaikannya.

Sehingga dalam penelitian ini membahas terkait perbaikan prosedur pemeliharaan pemutus tenaga 150 kV konvensional yang terindikasi senyawa SO₂ dengan improved Gas Handling SF₆, untuk mencegah dampak dari gas sf₆ yang terkontaminasi SO₂ tersebut serta kegagalan media isolasi pemutus tenaga 150 kV. Perlu diketahui bahwa Gas Handling SF₆ dirancang dan dibangun untuk menangani dan memproses gas SF₆ dengan aman. Untuk lebih meningkatkan penanganan dan pemrosesan gas SF₆ yang aman dan mencegah gas handling terkontaminasi dengan kerusakan gas, gas handling dilengkapi dengan pra-scrubber, selang berlapis Teflon, dan tekanan tinggi yang disetujui perlengkapannya (Bhandari, Myers, Cawthorne, & Hilliard, 1999). Penelitian ini bertujuan mengetahui penyebab utama terjadinya gangguan SO₂ pada media isolasi gas SF₆ PMT 150 kV, dan mengetahui dan dapat mengembangkan perbaikan (improvement) pada prosedur pemeliharaan circuit breaker atau PMT 150 kV sehingga gangguan yang sama tidak terjadi atau kejadiannya berkurang secara signifikan .

1. METODE/PERANCANGAN PENELITIAN

1.1. Desain Penelitian



Gambar 1. Kerangka Langkah Penelitian

1.2. Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data ini memperoleh informasi dari berbagai sumber, seperti jurnal ilmiah, hasil perbaikan di lapangan, dan data pemeliharaan PLN ULTG Bali Selatan. Metode pengumpulan data menggunakan pendekatan kuantitatif, data-data yang dikumpulkan seperti hasil pengujian kualitas gas SF6, jumlah PMT yang di perbaiki dan sebaran PMT yang mengalami anomali SO2.

1. Observasi

Metode ini melibatkan pengamatan langsung terhadap subjek penelitian. Observasi dapat dilakukan secara partisipatif, di mana peneliti terlibat secara langsung dalam situasi yang diamati. Dalam penelitian ini, peneliti melakukan observasi hasil uji kualitas gas SF₆ PMT 150 kV. Di mana peneliti melakukan pengujian kualitas gas SF₆ dengan 3 alat uji berbeda, hal ini dilakukan untuk memvalidasi hasil pengujian kualitas gas SF₆.

2. Wawancara

Dalam metode ini, peneliti mengajukan pertanyaan kepada responden, dengan tujuan untuk mendapatkan data standar SO₂ pada PMT 150 kV. Peneliti melakukan wawancara untuk mengonfirmasi kepada PT. Unindo, Areva, dan Alstom selaku sample pabrikan PMT guna mendapatkan acuan yang baku terkait standar SO₂ yang diizinkan, dan prosedur tindak lanjut terkait kondisi tersebut.

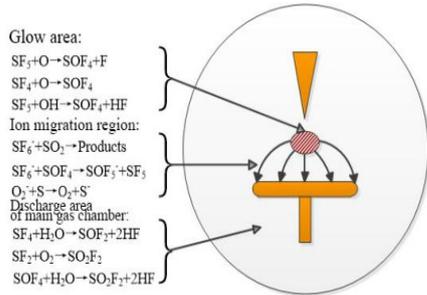
3. Studi Literatur

Studi literatur ini dilakukan untuk mengumpulkan informasi tentang teori dasar dan teori terkait dengan gas SF₆ pada PMT 150kV (Buku Pedoman Pemutus Tenaga, 2014) dan prosedur gas handling SF₆ (Glaubitz & Siebert, SF₆ , Its Handling Procedures and Regulations, 2019). Peneliti mendapatkan referensi teori tersebut dari buku, laporan penelitian, dan jurnal penelitian, untuk mendapatkan materi yang dapat dijadikan referensi dalam pengembangan cara atau metode baru yang lebih baik dalam penanganan anomali SO₂ pada PMT 150 kV konvensional. Studi Literatur meliputi langkah-langkah:

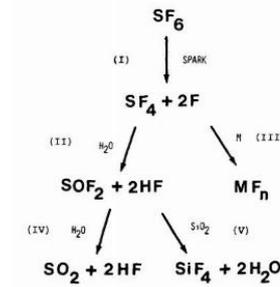
1. Karakteristik gas SF₆ dan seperti apa reaksi kimia gangguan SO₂ (Jakob & Perjanik, 2016)
2. Prinsip kerja operasi pemeliharaan handling CB 150kV dengan isolasi SF₆ (Buku Pedoman Pemutus Tenaga, 2014)
3. Referensi metode-metode pemeliharaan CB dengan Gas SF₆ (Bhandari, Myers, Cawthorne, & Hilliard, 1999) (GE, 2017)

1.3. Senyawa SO₂ pada Media Isolasi Gas SF₆ PMT 150 kV

Pelepasan sebagian dalam peralatan listrik berinsulasi SF₆ menghasilkan berbagai produk sampingan gas dan padat. SF₆ yang terurai di bawah pengaruh pelepasan parsial atau busur listrik menghasilkan gas seperti SF₄, SOF₄, SO₂F₂, dan SO₂, serta padatan seperti fluorida logam. Pembentukan SO₂ terjadi akibat reaksi antara produk penguraian SF₆ dengan oksigen atau uap air yang terdapat sebagai kotoran dalam peralatan tersebut (lihat gambar 1 dan gambar 2) yang penjelasan produk dekomposisinya di ditampilkan pada Tabel (Fu & Guan, 2021). Produk sampingan gas tetap berada di SF₆ selama operasi, mengurangi kapasitas isolasi dan konduksi panasnya, dan menyebabkan kerusakan bahan padat yang ada di peralatan (Mattoso & Wilhelm, 2016).



Gambar 2. Reaksi kimia terbentuknya decomposition products SF6



Gambar 3. Mekanisme penguraian pelepasan sebagian gas SF6

Tabel 1. Decomposition Products SF6 (Jakob & Perjanik, 2016)

Gas	Senyawa	Sumber
Carbon tetrafluoride	CF ₄	By product, arc tip erosion, komponen berunsur karbon, minyak, pelumas
Hydrofluoric acid	HF	Terbentuk di SF6 jika ada busur api
Sulfur dioxide	SO ₂	Terbentuk jika SOF2 bereaksi dengan air
Sulfur monofluoride	S ₂ F ₂	Dapat tidak terdeteksi karena sangat reaktif / tak stabil
Sulfur difluoride	SF ₂	Mudah bereaksi lagi
Sulfur tetrafluoride	SF ₄	Sangat mudah bereaksi lagi
Disulfur decafluoride	S ₂ F ₁₀	Sangat beracun, keberadaannya dalam SF6 diragukan
Thionyl Fluoride (!)	SOF ₂	Jika ada busur api dan air
Sulfuryl Fluoride	SO ₂ F ₂	Jika ada busur api dan air
Thionyl tetrafluoride	SOF ₄	Jika ada busur api dengan oksigen
Tungsten hexafluoride	WF ₆	Erosi kontak
Silicon tetrafluoride	SiF ₄	Busur api, jika ada silikon
Carbon disulfide	CS ₂	Busur api, jika ada silikon
Carbon dioxide	CO ₂	Dari senyawa yang mengandung karbon
Carbon monoxide	CO	Dari senyawa yang mengandung karbon

1.4. Improved Gas Handling SF6

Merujuk pada penjelasan pada bagian 2.3 diatas, dimana unsur SO2 terjadi akibat reaksi antara SF6 dengan gas O2 dan atau uap air, maka diketahui bahwa kelemahan prosedur pemeliharaan eksisting adalah pada SOP / IK dan peralatan yang digunakan memungkinkan masuknya kontaminasi oksigen dan uap air kedalam chamber PMT 150 kV. Penelitian ini secara khusus membahas pengertian metode improved gas handling SF6 dan pelaksanaannya pada perbaikan PMT 150 kV konvensional seperti yang terlihat pada gambar 4. Metode improved gas handling SF6 adalah sebuah metode pemeliharaan untuk PMT yang terindikasi gas SO2. Metode ini melibatkan pembersihan gas hasil dekomposisi SF6 dengan meminimalkan emisi gas SF6. Pelaksanaannya mencakup proses pemulihan, pemurnian, dan penyimpanan gas SF6, serta pengisian kembali gas SF6 ke dalam kompartemen peralatan. Metode ini dirancang untuk mengurangi terjadinya gangguan oleh gas SO2 dengan memastikan gas yang terkontaminasi diproses sesuai standar yang telah ditetapkan (Barbier & Micozzi, 2012).

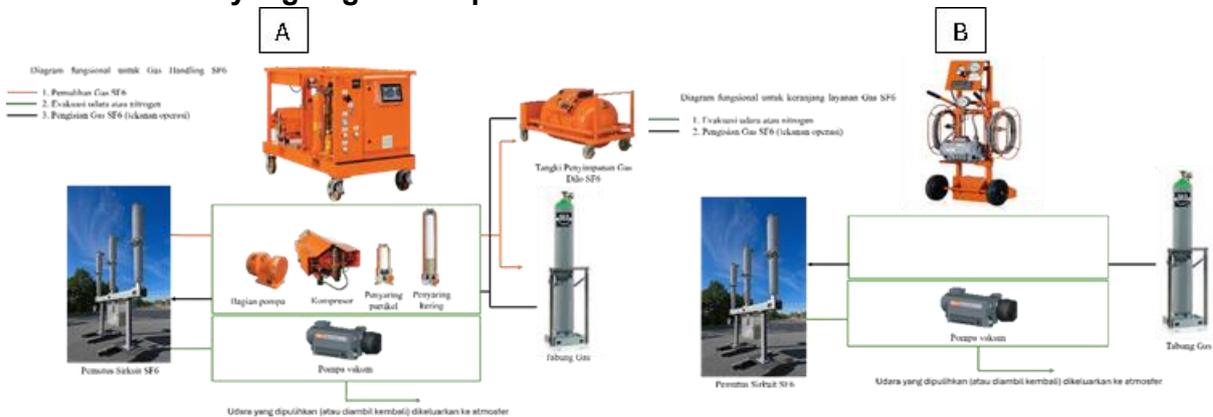
1.4.1. Perbandingan Metode lama dan Baru

Pada tabel 2 di jelaskan perbedaan antara metode lama, yang masih menghasilkan kerusakan PMT terindikasi SO2, dibandingkan dengan metode baru, yang akan mengurangi kondisi gangguan PMT terindikasi SO2.

Tabel 2. Perbandingan Metode Lama dan Baru

Aspek	Metode Lama Overhaul PMT	Metode Gas Handling PMT
Pembongkaran dan Assembling	Melibatkan pembongkaran seluruh komponen breaking chamber PMT	Replacing the Adsorption filter Chamber PMT
Pengujian	Menggunakan alat-alat uji seperti Dew Point, Tahanan kontak, Beraker Analyzer	Menggunakan alat uji seperti SF6 analyzer merk Dilo, Tahanan Kontak, Breaker Analyzer.
Pengisian dan Penggantian Material	Penggantian seluruh seal chamber PMT dan absorbent.	Penggantian seal area absorbent, filter sleeve, filter bag dan absorbent.
Penggunaan Gas SF6	Pengisian dan pengujian dilakukan tanpa prosedur evakuasi gas yang spesifik.	Fokus pada evakuasi dan pengisian gas SF6 dengan prosedur khusus.
Evakuasi Gas SF6	Evakuasi gas hanya menggunakan gas cart tanpa fungsi recovery gas SF6, dilakukan secara manual, dan gas cart tanpa filter gas SF6	Evakuasi gas SF6 dari kompartemen PMT ke dalam botol reservoir menggunakan gas handling unit yang dilengkapi dengan filter khusus.
Prosedur Penggantian Komponen	Fokus pada pembongkaran dan perakitan kembali komponen tanpa prosedur khusus untuk gas(IK over houl PMT ABB)	Melibatkan prosedur detil untuk evakuasi gas sebelum membuka kompartemen dan pengisian kembali gas setelah perbaikan

1.4.2. Peralatan yang di gunakan pada Metode lama dan Baru



Gambar 1. Gas Handling SF6 Dilo L057R01 Economy Series (Metode Baru) (A) dan Gas Cart DILO Type 3-001-4-R002 (Metode Lama) (B)

1.4.3. Karakteristik Gas SF6 Metode Lama dan Baru

Pada Tabel 3 ini di tampilkan karakteristik gas SF6 yang di hasilkan dari dua jenis alat yang digunakan pada metode perbaikan lama dan metode perbaikan baru.

Tabel 3. Perbandingan Karakteristik Gas SF6 Metode Eksisting dan Metode (Glaubitz & Siebert, SF6 , Its Handling Procedures and Regulations, 2019)

Karakteristik	Metode Lama (Tanpa Filter)	Metode Baru (Dengan Filter)	Keterangan
Kemurnian Gas	Relatif lebih rendah karena tidak adanya filtrasi.	Lebih tinggi karena adanya filtrasi yang efektif.	Penggunaan filtrasi meningkatkan kemurnian gas dan mengurangi kontaminan, mengurangi potensi emisi.
Kandungan Kontaminan	Lebih tinggi, termasuk partikel, kelembaban, dan asam fluorida.	Lebih rendah, dengan filtrasi mengurangi partikel, kelembaban, dan asam fluorida.	Kontaminan yang lebih rendah meningkatkan efisiensi dan mengurangi risiko kebocoran gas SF6.
Kandungan Kelembaban	Tinggi, dapat menyebabkan degradasi isolasi dan korosi.	Rendah, menjaga kualitas isolasi dan mencegah korosi.	Kandungan kelembaban yang rendah memperpanjang umur peralatan listrik dan mengurangi kebutuhan perawatan.
Dampak Emisi	Lebih tinggi karena efisiensi penanganan gas yang lebih rendah.	Lebih rendah karena efisiensi penanganan gas yang lebih baik.	Efisiensi penanganan gas yang lebih baik mengurangi emisi SF6, membantu memenuhi regulasi lingkungan.
Keamanan dan Keandalan	Risiko lebih tinggi terhadap kegagalan peralatan listrik.	Keamanan dan keandalan lebih baik dengan gas yang lebih bersih dan kering.	Keandalan yang lebih baik mengurangi risiko kegagalan sistem dan meningkatkan keselamatan operasional.
Efisiensi Operasional	Lebih rendah, membutuhkan lebih banyak perawatan.	Lebih tinggi, mengurangi frekuensi perawatan.	Peningkatan efisiensi operasional mengurangi biaya dan waktu perawatan, serta meningkatkan kinerja peralatan.
Regulasi dan Kepatuhan	Lebih sulit memenuhi regulasi emisi gas rumah kaca.	Lebih mudah memenuhi regulasi emisi gas rumah kaca.	Metode baru membantu dalam kepatuhan terhadap regulasi lingkungan dan menghindari penalti.

1.5. Metode Analisis Data

Dalam penelitian ini, analisis data kuantitatif akan dilakukan untuk memeriksa hasil pengujian kualitas gas SF6 pada PMT 150 kV konvensional. Untuk memverifikasi hasil uji kualitas gas SF6 yang telah diuji menggunakan alat uji SF6 analyzer merek DILO oleh PLN UPT Bali, dilakukan pengujian tambahan menggunakan alat uji SF6 analyzer yang sama mereknya milik UPT Probolinggo dan merek lainnya milik UPT Gresik, sebagaimana yang tercantum pada Tabel 4. Hal ini dilakukan guna memastikan validitas hasil uji tersebut.

Tabel 4. Validasi Hasil Kandungan SO2

Gardu Induk	Bay	Merek	Hasil Pengujian Kandungan SO2 (PPMV)						KET
			Alat Uji Merek Dilo UPT Bali		Alat Uji Merek Dilo UPT Probolinggo		Alat Uji Merek WikULTG Sampang		
			Pengujian ke-1	Pengujian ke-2	Pengujian ke-1	Pengujian ke-2	Pengujian ke-1	Pengujian ke-2	
AMPRA	T/L BAY 150 KV CAPASITOR 1	AREVA	26	35	28	27	7,1	11	Pengujian dilakukan tgl 13/03/2021
AMPRA	T/L BAY 150 KV COUPLE	AREVA	24	36	20	34	11,9	12,5	
AMPRA	T/R BAY 150/20 KV TRAF0 1	ALSTOM	0	0	0	0	4,4	7,3	
GNYAR	AMPRA 2	ALSTOM	12	30	15	28	5,3	6,8	
GNYAR	KAPASITOR 1	ALSTOM	36	48	25	38	6,1	7,1	
PBIAN	KAPASITOR	ALSTOM	36	56	30	48	3,8	7,4	
PBIAN	Trafo-2 150/20 kV 60 MVA	AREVA	25	37	36	40	14,1	15,2	
PKLOD	Capasitor 1x25 MVAR	ALSTOM	30	50	24	35	2,1	2,5	
PKLOD	GIS Bandara	AREVA	47	55	18	30	6,4	9,6	
PKLOD	Kapel	AREVA	50	65	23	42	12	25	
PKLOD	Kopel	AREVA	0	0	0	0	0	0	Kondisi normal pasca dilakukan perbaikan tanggal 9/03/2021, pengujian ulang 13/03/2021
PKLOD	Trafo-1	AREVA	0	0	0	0	0	0	Kondisi normal pasca dilakukan perbaikan tanggal 9/03/2021, pengujian ulang 1/01/2021

2. HASIL DAN PEMBAHASAN

2.1. Hasil Analisa Penyebab Munculnya Kandungan SO2

2.1.1. Analisis Regresi Logistik Biner

Analisis regresi logistik (logistic regression) merupakan regresi yang menguji apakah terdapat probabilitas terjadinya variabel dependen dapat diprediksi oleh variabel independen. Analisis regresi logistik tidak memerlukan distribusi normal dalam variabel independen (Ghozali, 2016). Oleh karena itu, analisis regresi logistik tidak memerlukan uji normalitas, uji heteroskedastisitas, dan uji asumsi klasik pada variabel independennya seperti pada regresi linear. Hipotesis penelitian ini akan diuji dengan analisis regresi logistic biner. Hal ini bertujuan untuk melihat faktor-faktor yang cenderung mempengaruhi munculnya kandungan senyawa SO2 pada PMT 150 kV konvensional

2.1.2. Uji Kelayakan Model

Tabel 5. Hosmer and Lemeshow Test

Hosmer and Lemeshow Test

Step	Chi-square	df	Sig.
1	2.542	8	.960

Berdasarkan tabel 5 uji Hosmer dan Lemeshow tersebut diperoleh nilai signifikansi sebesar 0.960. Hal ini berarti nilai signifikansi 0,960 > 0,05 sehingga H0 diterima yang bermakna bahwa model tersebut layak atau FIT. Model regresi logistic biner tersebut layak dipakai untuk analisis selanjutnya karena tingkat kejadian yang diamati sesuai dengan tingkat kejadian yang diharapkan dalam subkelompok populasi.

2.1.3. Uji Signifikansi Parameter

1. Uji Koefisien Determinasi

Tabel 6. Uji Koefisien Determinasi

Model Summary

Step	-2 Log likelihood	Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
1	51.882 ^a	.196	.601

Estimation terminated at iteration number 7 because parameter estimates changed by less than .001.

Berdasarkan tabel 6 tersebut didapatkan nilai koefisien determinasi yang tampak pada Nagelkerke R Square sebesar 0,601. Hal tersebut mengindikasikan bahwa kemampuan variabel independen dalam penelitian ini mempengaruhi variabel dependen sebesar 60,10%, sedangkan sisanya sebesar 39,90% (1 – 0,601) dijelaskan oleh variabel lain selain variabel independen dalam penelitian.

2. Uji Simultan dengan Chi-Square

Tabel 7. Omnibus Tests of Model Coefficients

Omnibus Tests of Model Coefficients

		Chi-square	df	Sig.
Step 1	Step	25.060	8	.002
	Block	25.060	8	.002
	Model	25.060	8	.002

Dari tabel 7 Omnibus Test tersebut tampak bahwa nilai signifikansi sebesar 0,002. Hal tersebut menunjukkan bahwa p-value < 0,05 (0,002 < 0,05) yang berarti H0 ditolak dan H1 diterima. Hal ini bermakna bahwa variable independen secara simultan mempengaruhi variable dependen SO2.

3. Uji Wald (Uji Parsial t)

Tabel 8. Variables in the Equation

Variables in the Equation

		B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Step 1 ^a	UMUR PMT	.211	.089	5.632	1	.018	1.235
	COUNTER KERJA	-.004	.003	2.099	1	.147	.996
	TAHANAN KONTAK	.076	.173	.190	1	.663	1.079
	ISOLASI	.000	.000	.074	1	.786	1.000
	PURITY	-.547	1.231	.198	1	.657	.579
	KERAPATAN GAS SF6	.004	.001	5.941	1	.015	1.004
	TEKANAN	-	1.618	.727	1	.394	.252
			1.379				
	KELEMBABAN	-	1.148	1.331	1	.249	.266
			1.325				

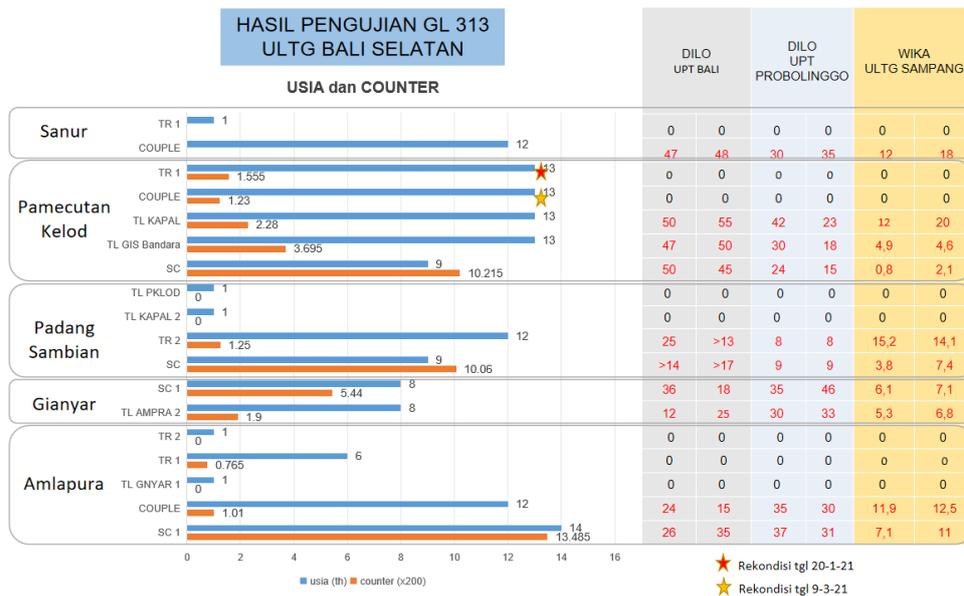
Constant	58.11	121.434	.229	1	.632	17283772
	2					95682954
						30000000
						00.000

a. Variable(s) entered on step 1: UMURALAT, COUNTER, PHASAR, ISOLASI, PIRITY, PPMV, TEKANAN, CATM.

Dari tabel 8 *Variables in the Equation*, hanya variabel umur alat dan Dew Point PPMV yang signifikan mempengaruhi variabel terikat SO₂, dengan nilai signifikansi masing-masing 0,018 dan 0,015 (< 0,05). Variabel bebas lainnya tidak berpengaruh karena nilai signifikansinya > 0,05. Uji statistik logistik biner menunjukkan variabel independen mempengaruhi variabel dependen sebesar 60,10%, sedangkan 39,90% dijelaskan oleh variabel lain. Secara simultan, semua variabel bebas berpengaruh terhadap SO₂, namun secara parsial hanya umur alat dan Dew Point PPMV yang signifikan.

2.1.4. Analisa faktor penyebab gangguan dengan indikasi kandungan SO₂

Dari analisis regresi logistik biner, dimana variabel bebasnya (independen) yaitu usia PMT, jumlah kali kerja PMT, hasil uji tahanan kontak, hasil uji tahanan isolasi, kemurnian gas SF₆, kelembaban, kerapatan gas SF₆ dan tekanan gas SF₆ PMT terlihat bahwa hanya variable umur alat dan dew point PPMV (kerapatan gas SF₆) yang memiliki pengaruh terhadap variable terikat SO₂ lihat tabel 3 - 6.



Gambar 5. Grafik usia terhadap counter kerja PMT

Gambar 5 menunjukkan bahwa kombinasi usia PMT yang lebih tua dan jumlah counter kerja yang tinggi berkontribusi signifikan terhadap anomali SO₂ pada PMT 150 kV konvensional. Peralatan yang mengalami anomali SO₂ rata-rata berusia di atas 10 tahun, sesuai kriteria penggantian MTU (Burhan & Pramono, 2013), dan dianggap perlu pemantauan ketat. Sebagian besar counter kerja sudah melebihi 500, tergolong sedang dalam klasifikasi kebutuhan pemeliharaan PMT (GE, 2017), dengan 3 PMT pada bay kapasitor mencapai kategori tinggi. Dengan demikian, mekanisme dan faktor-faktor yang

diuraikan dalam kedua jurnal mendukung hasil analisis regresi logistik biner, menunjukkan bahwa usia peralatan dan dew point ppmv (kerapatan gas SF6) secara signifikan mempengaruhi kandungan SO2. Temuan ini penting untuk prediksi dan mitigasi risiko dalam operasional peralatan yang diinsulasi gas SF6, serta menunjukkan perlunya pemantauan kontinu dan perawatan preventif untuk mengurangi risiko gangguan operasional.

2.1.5. Cara Mencegah dan Mengantisipasi Kandungan SO2

Bredasarkan hasil analisa munculnya senyawa SO2, maka perlu dilakukan pencegahan dan antisipasi munculnya kandungan SO2 dalam media isolasi gas SF6 pada PMT 150 kV konvensional dimana memerlukan pemeliharaan berkala yang komprehensif dan tepat waktu lihat tabel 9. Tujuan pemeliharaan berkala agar risiko kontaminasi SO2 dapat diminimalkan, memastikan operasional peralatan yang aman dan efisien. Implementasi langkah-langkah ini akan membantu menjaga keandalan dan keselamatan operasional peralatan listrik bertegangan tinggi.

Tabel 9. Cara mencegah dan mengantisipasi kandungan SO2

No.	Langkah Pencegahan	Frekuensi	Metode	Alat	Penjelasan
1.	Monitoring Komposisi Gas SF6 Pemantauan Kelembaban (Dew Point) Pengujian Produk Dekomposisi	Triwulanan	Pengukuran komposisi gas, Pengukuran kadar uap air Pengujian produk dekomposisi	Gas SF6 analyzer	Mendapatkan data kemurnian gas SF6 dan mendeteksi adanya kontaminan atau produk dekomposisi seperti SO2. Menjaga kadar uap air di bawah batas yang diizinkan untuk menghindari reaksi dekomposisi yang menghasilkan SO2. Mendeteksi keberadaan SO2 dan produk dekomposisi lainnya untuk mencegah kerusakan peralatan dan menurunkan efisiensi operasional.

2.	Pemeriksaan Integritas Peralatan	Bulanan	Pemeriksaan visual dan deteksi kebocoran	Leakage detector	Deteksi dini kebocoran gas untuk mencegah masuknya kelembaban dan kontaminan yang dapat memicu dekomposisi SF6.
3.	Kalibrasi Alat Ukur	Tahunan	Kalibrasi alat ukur	Standard calibration tools	Memastikan akurasi alat ukur untuk pengukuran komposisi gas dan kelembaban.

2.1.6. Analisis Mekanisme dan Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Dekomposisi SF6 dan Pembentukan SO2

Tabel 10. Analisis Mekanisme dan Faktor yang Mempengaruhi Pembentukan SO2

No.	Faktor	Mekanisme dan Pengaruh	Sumber
1	Usia Peralatan (Tahun)		
	Degradasi Insulasi	Peralatan yang lebih tua mengalami degradasi bahan insulasi, seperti retakan mikro dan keausan. Hal ini meningkatkan kemungkinan terjadinya discharge parsial, yang melepaskan energi cukup untuk memecah molekul SF6 menjadi produk dekomposisi seperti SO2.	<i>"Study on the Mechanism and Influencing Factors of SF6 Decomposition Products"</i>
	Frekuensi Discharge Parsial	Seiring bertambahnya usia, frekuensi discharge parsial pada peralatan meningkat karena penurunan kualitas bahan insulasi. Discharge parsial ini menghasilkan suhu lokal yang cukup tinggi untuk memecah SF6 dan menghasilkan produk dekomposisi, termasuk SO2 (lihat gambar 3-3).	
	Penuaan Absorbent	Absorbent yang digunakan untuk mengurangi produk dekomposisi SF6 seperti SO2 kehilangan efektivitasnya seiring waktu. Absorbent yang menua tidak dapat menyerap produk dekomposisi dengan efisien, yang mengarah pada peningkatan kandungan SO2.	<i>"The SF6 Decomposition Mechanism Background and Significance"</i>
2	Dew Point (PPMV)		

	Reaksi Kimia yang Dipercepat	Kelembaban tinggi dalam bentuk dew point tinggi mempercepat reaksi kimia dekomposisi SF6. Kelembaban dapat bereaksi dengan SF6 dan produk antara seperti SF4 untuk menghasilkan SO2 dengan lebih cepat. Molekul air berperan sebagai katalis dalam proses ini (lihat tabel 3-3).	<i>"Study on the Mechanism and Influencing Factors of SF6 Decomposition Products"</i>
	Kelembaban dan Discharge Parsial	Kelembaban yang tinggi juga meningkatkan konduktivitas listrik dalam sistem insulasi, yang meningkatkan kemungkinan dan intensitas discharge parsial. Ini mempercepat dekomposisi SF6 menjadi SO2.	<i>"The SF6 Decomposition Mechanism Background and Significance"</i>
3	Hubungan dengan Hasil Analisis Regresi Logistik Biner		
	Usia Peralatan	Analisis regresi logistik biner menunjukkan bahwa usia peralatan memiliki koefisien positif yang signifikan, menunjukkan bahwa peralatan yang lebih tua meningkatkan risiko munculnya SO2. Ini didukung oleh kedua jurnal yang menguraikan bagaimana degradasi insulasi, peningkatan frekuensi discharge parsial, dan penuaan absorbent pada peralatan yang lebih tua memicu dekomposisi SF6 menjadi SO2.	<i>"Study on the Mechanism and Influencing Factors of SF6 Decomposition Products"</i> <i>"The SF6 Decomposition Mechanism Background and Significance"</i>
	Dew Point (PPMV)	Analisis regresi logistik biner juga menunjukkan bahwa dew point memiliki koefisien positif yang signifikan, menunjukkan bahwa kelembaban yang lebih tinggi meningkatkan risiko munculnya SO2. Kedua jurnal mendukung temuan ini dengan menjelaskan bahwa kelembaban tinggi mempercepat reaksi dekomposisi SF6 dan meningkatkan frekuensi discharge parsial, yang keduanya menghasilkan peningkatan produksi SO2.	<i>"Study on the Mechanism and Influencing Factors of SF6 Decomposition Products"</i> <i>"The SF6 Decomposition Mechanism Background and Significance"</i>

Sumber : (Xiaoxing, Ju, & Song, 2018), (Lijun, Guan, & Zhang, 2021)

Dengan demikian, mekanisme dan faktor-faktor yang diuraikan dalam kedua jurnal mendukung hasil analisis regresi logistik biner, menunjukkan bahwa usia peralatan dan dew point ppmv (kerapatan gas SF6) secara signifikan mempengaruhi kandungan SO2. Temuan ini penting untuk prediksi dan mitigasi risiko dalam operasional peralatan yang diinsulasi gas SF6, serta menunjukkan perlunya pemantauan kontinu dan perawatan preventif untuk mengurangi risiko gangguan operasional.

2.1.7. Evaluasi Prosedur Baru Penanganan Gas SF6 dan Pengaruhnya terhadap Pengendalian Kandungan SO2 pada PMT 150 kV

Setelah proses pengisian gas SF6 selesai, dilakukan beberapa pengujian penting pada PMT 150 kV, antara lain pengujian kualitas gas SF6, keserempakan, tahanan isolasi, dan tahanan kontak PMT (GE, 2017; Bhandari, Myers, Cawthorne, & Hilliard, 1999). Berdasarkan analisa yang dijelaskan pada point 3.1 ditemukan bahwa faktor-faktor seperti kelembaban, umur peralatan, dan dew point ppmv (moisture content) merupakan penyebab utama terbentuknya senyawa SO₂ pada PMT 150 kV.

Implementasi prosedur baru secara langsung menjawab tantangan-tantangan tersebut. Prosedur ini dirancang untuk secara signifikan mengurangi risiko degradasi gas SF6 dan pembentukan senyawa SO₂, yang umumnya dihasilkan dari kelembaban serta dekomposisi gas. Melalui prosedur ini, pengelolaan kelembaban dan kontaminan dalam gas SF6 dapat dioptimalkan untuk menjaga kualitas isolasi. Tabel 11 merangkum langkah-langkah perbaikan yang diterapkan dalam prosedur baru ini, serta perannya dalam mengatasi permasalahan pembentukan senyawa SO₂ pada PMT 150 kV.

Tabel 11. Evaluasi Prosedur Baru Penanganan Gas SF6

Langkah Prosedur Baru	Tujuan Utama	Kemampuan Teknis Gas Handling Unit	Pengaruh Terhadap Kandungan SO ₂	Referensi
Pengosongan Gas SF ₆ dengan Gas Handling Unit	Menghilangkan gas yang terkontaminasi atau berpotensi terkontaminasi sebelum pengisian ulang.	Kemampuan pengosongan gas hingga 1 mbar (1.0×10^{-3} mbar), memastikan gas SF ₆ yang tersisa sangat sedikit untuk mencegah potensi pembentukan senyawa SO ₂ .	Mengurangi kandungan residu gas SF ₆ yang terdekomposisi, mencegah terjadinya reaksi pembentukan SO ₂ .	(Bhandari, Myers, Cawthorne, & Hilliard, 1999)
Vacuuming yang Lebih Efektif	Menghilangkan kelembaban dan kontaminan lain dari sistem sebelum pengisian ulang gas SF ₆ .	Mampu mencapai kevakuman hingga <1 mbar (1.0×10^{-3} mbar), sesuai dengan standar internasional untuk meminimalisir kontaminasi yang dapat menyebabkan dekomposisi SF ₆ .	Menghilangkan kelembaban yang tersisa dalam sistem, mengurangi potensi terbentuknya senyawa SO ₂ dari dekomposisi gas SF ₆ .	(Bhandari, Myers, Cawthorne, & Hilliard, 1999) (Glaubitz & Siebert, 2019)
Injeksi N ₂ dan Penggantian Absorben	Menginjeksikan nitrogen untuk membersihkan residu dan mengganti absorben untuk menyerap produk dekomposisi.	Tekanan injeksi nitrogen terkontrol hingga mencapai tingkat pembersihan optimal, dan absorben dirancang untuk menyerap senyawa dekomposisi seperti SO ₂ dan SOF ₂ .	Membantu menyerap dan mengurangi senyawa dekomposisi yang sudah terbentuk, menjaga sistem dari penumpukan SO ₂ .	(Glaubitz & Siebert, 2019)
Pengisian Ulang Gas SF ₆ yang Murni	Menghindari Kontaminasi Kelembaban, Unit dilengkapi dengan sistem filtrasi untuk menghilangkan kelembaban dari gas sebelum diinjeksikan ke dalam sistem, menjaga gas tetap kering.	Tekanan pengisian gas SF ₆ dapat dikontrol sesuai standar spesifikasi, umumnya hingga 0.5 – 1 MPa, memastikan gas yang digunakan murni dan bebas kontaminan.	Menghindari pembentukan senyawa SO ₂ di masa mendatang dengan menggunakan gas SF ₆ yang murni, memastikan tidak ada kontaminasi yang dapat menyebabkan dekomposisi.	(Bhandari, Myers, Cawthorne, & Hilliard, 1999) (Glaubitz & Siebert, 2019)

Setelah penerapan prosedur baru pada tabel 11, pengujian kualitas gas SF6 dan pemantauan SO2 dilakukan untuk mengevaluasi efektivitasnya. Hasil uji kualitas gas SF6 yang dirangkum dalam tabel 12 menunjukkan peningkatan kemurnian gas hingga 99,9% dan penurunan signifikan pada tingkat kelembaban (titik embun hingga -528°C), yang secara efektif mencegah pembentukan senyawa dekomposisi seperti SO2. Pemantauan SO2 dalam tabel 13 memperkuat hasil ini, dengan kadar SO2 setelah rekondisi berada pada 0 ppmv. Data ini menunjukkan bahwa prosedur baru dapat menjaga kualitas gas dan mencegah terbentuknya SO2, yang sebelumnya menjadi faktor degradasi peralatan PMT 150 kV (Lijun, Guan, & Zhang, 2021). Keberhasilan ini konsisten di beberapa unit PMT.

Tabel 12. Hasil Uji Kualitas Gas SF6 Metode Perbaikan Baru

NO	UPT	GITET/GI	BAY	TEG	FASA	MERK	KUALITAS GAS SF6				
							PIURITY (%)	DEW POINT (° C ATM)	DEW POINT (PPMV)	SO2	Tekanan (Bar)
1	BALI	AMLAPURA	KAPASITOR	150	R	AREVA	99.9	-52,4	45	0	6.8
2	BALI	AMLAPURA	KAPASITOR	150	S	AREVA	99.9	-52,4	45	0	6.8
3	BALI	AMLAPURA	KAPASITOR	150	T	AREVA	99.9	-52,4	45	0	6.8
4	BALI	AMLAPURA	KOPEL	150	R	AREVA	99.9	-48,2	48	0	6.98
5	BALI	AMLAPURA	KOPEL	150	S	AREVA	99.9	-48,2	48	0	6.98
6	BALI	AMLAPURA	KOPEL	150	T	AREVA	99.9	-48,2	48	0	6.98
7	BALI	SANUR	KOPEL	150	R	AREVA	99.8	-52,8	35	0	6.69
8	BALI	SANUR	KOPEL	150	S	AREVA	99.8	-52,8	35	0	6.69
9	BALI	SANUR	KOPEL	150	T	AREVA	99.8	-52,8	35	0	6.69
10	BALI	NUSADUA	KOPEL	150	RST	AREVA	99.6	-52,3	42	0	6.83
11	BALI	SANUR	TRF 4	150	RST	AREVA	99.9	-56,4	38	0	6.92
12	BALI	PEMECUTAN KELOD	TRF 1	150	RST	AREVA	99.9	-48,6	46	0	6.53

Tabel 13. Monitoring SO2 PMT 150 kV

GI	BAY	SO2 (PPMV)					
		2021	2022	2023	2024	Setelah Rekondisi	Hari/Tgl Rekondisi
AMPRA	T/L BAY 150 KV CAPASITOR 1	26	27	29	0	0	Kamis. 22 Feb 2024
AMPRA	T/L BAY 150 KV COUPLE	24	25	28	0	0	Rabu. 21 Feb 2024
GNYAR	AMPRA 2	12	22	25	0	0	Kamis. 2 Mar 2023
GNYAR	KAPASITOR 1	36	33	33	0	0	Rabu. 8 Mar 2023
NSDUA	BUS COUPLE	23	23	23	0	0	Senin, 14 Agust 2023
NSDUA	Trafo 3 150/20 kV 60 MVA	0	40	40	0	0	Kamis, 10 Agust 2023
PBIAN	KAPASITOR	64	42	42	0	0	Rabu. 18 Okt 2023
PBIAN	Trafo-2 150/20 kV 60 MVA	25	25	25	0	0	Selasa. 17 Okt 2023
PKLOD	Capasitor 1x25 MVAR	50	60	60	0	0	Rabu, 20 Sept 2023
PKLOD	GIS Bandara	47	53	53	0	0	Senin, 18 Sept 2023
PKLOD	Kapal	50	55	55	0	0	Rabu, 24 Sept 2023
PKLOD	Kopel Bus	42	0	0	0	0	Selasa, 09 Maret 2021
PKLOD	Trafo-1	15	0	0	0	0	Rabu, 20 Januari 2021
SANUR	Kopel Bus	47	47	47	0	0	Selasa, 08 Agustus 2023
SANUR	Trafo-4 150/20 kV 60 MVA	0	31	31	0	0	Jum'at, 14 Juli 2023
SANUR	Gianyar 2	0	0	0	25		BELUM REKONDISI
SANUR	Pesanggaran#2	0	0	0	8		BELUM REKONDISI
GI PESANGGARAN	INCOMER TIMUR	0	18	20	22		BELUM REKONDISI

3. KESIMPULAN DAN SARAN

3.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa yang telah dilakukan, beberapa kesimpulan dapat ditarik sebagai berikut :

- A. Penerapan metode baru dalam penanganan gas SF₆, yaitu metode improved gas handling SF₆, menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan metode lama (overhaul PMT). Metode ini berhasil menurunkan kadar SO₂ pada PMT 150 kV hingga mencapai tingkat yang lebih rendah dan stabil, yaitu di bawah 40 ppmv, sehingga tidak memerlukan tindakan perbaikan lebih lanjut. Proses rekondisi gas SF₆ juga mempercepat durasi pekerjaan dari 3-6 hari menjadi hanya 6-8 jam, dengan jumlah personel yang lebih sedikit, dari 11 orang menjadi 5 orang. Selain itu, metode baru ini mampu menghasilkan kemurnian gas SF₆ hingga 99,9% dengan titik embun yang lebih rendah, yang membantu meminimalkan risiko dekomposisi gas SF₆ menjadi SO₂. Penggunaan vacuum pump yang lebih modern serta sistem filtrasi memastikan gas SF₆ yang digunakan bebas dari kelembaban dan partikel, sehingga risiko gangguan operasional pada PMT 150 kV dapat ditekan secara signifikan.
- B. Analisa regresi logistik biner menunjukkan bahwa model ini efektif untuk memprediksi kemunculan kandungan SO₂ pada PMT 150 kV. Hasil uji statistik menunjukkan bahwa variabel independen, seperti usia alat dan Dew Point PPMV, secara signifikan mempengaruhi kadar SO₂ dengan kontribusi sebesar 60,1%. Sisanya sebesar 39,9% dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak dimasukkan dalam penelitian ini. Variabel usia alat dan Dew Point PPMV (kerapatan gas SF₆) terbukti memiliki pengaruh yang signifikan secara parsial terhadap variabel dependen, sedangkan variabel bebas lainnya tidak menunjukkan pengaruh signifikan.
- C. Pemantauan berkala terhadap kualitas gas SF₆ yang sudah ada pada prosedur pemeliharaan sebelumnya, khususnya kandungan SO₂ dan kelembaban, menjadi faktor penting dalam menjaga performa dan keandalan PMT 150 kV sehingga harus dilaksanakan dengan tertib dan disiplin. Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan prosedur baru dalam pemeliharaan PMT 150 kV dengan mengutamakan penggunaan alat gas handling SF₆ yang memadai dapat mengurangi risiko kerusakan akibat kontaminasi gas dan memastikan bahwa sistem isolasi tetap berada dalam kondisi yang optimal.

3.2. Saran

Berdasarkan hasil analisa dan pembahasan pada Bab IV, beberapa saran yang diharapkan dapat menjadi masukan bagi pihak terkait dalam peningkatan penanganan gas SF₆ pada PMT 150 kV adalah sebagai berikut:

3.2.1. Penyiapan Alat Gas Handling SF₆

Disarankan agar setiap Unit Pelaksana Transmisi (UPT) dapat disiapkan alat gas handling SF₆ dengan fitur pengisian, pengosongan, dan pemvakuman yang dilengkapi vacuum pump modern serta sistem filtrasi. Fitur ini memungkinkan proses rekondisi gas SF₆ dilakukan secara efisien tanpa harus membawa gas ke lokasi lain, memastikan gas SF₆ tetap murni dan bebas kelembaban yang dapat menyebabkan pembentukan SO₂.

3.1.2. Evaluasi Metode Improved Gas Handling SF6

Evaluasi berkala terhadap metode improved gas handling SF6 yang dikembangkan dalam penelitian ini diperlukan untuk memastikan optimalisasi yang berkelanjutan. Evaluasi ini bertujuan agar metode tersebut dapat diterapkan secara luas di seluruh unit PLN, sehingga kualitas penanganan gas SF6 dapat ditingkatkan dan risiko gangguan operasional dapat diminimalkan dalam jangka panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan ini saya menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada yang terhormat bapak **Dr. Ignatius Rendroyoko M.Eng.Sc.IPU Selaku Pembimbing**. Yang telah memberikan petunjuk, saran-saran serta bimbingannya sehingga pelaksanaan penelitian dalam penulisan artikel ini dapat diselesaikan. Terima kasih yang sama, saya sampaikan kepada PT PLN (Persero) UIT-JBM Unit Pelaksana Transmisi Bali yang telah mengizinkan untuk pengambilan data pada penulisan artikel ini..

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Antoun, C. (2018). High Voltage Circuit Breaker and Power Transformer Failure Modes and Their Detection. 2018 Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2018 - Proceedings, 1-6.
- [2] Barbier, E., & Micozzi, J. (2012). Implementation Of Treatment & Recovery Of the SF 6 Gas Containing A High Amount Of Decomposition Products Due To High Voltage Electrical Interruptions . 1-10.
- [3] Bhandari, R., Myers, N., & Cawthome, G. (1999). Maintenance of Power Circuit Breakers. Amerika: US Department of the Interior Bureau of Reclamation.
- [4] Chair, G., & Vice Chair, A. (2012). IEEE guide for sulphur hexafluoride (SF₆) gas handling for high-voltage (over 1000 Vac) equipment. AMERIKA: IEEE Power & Energy Society.
- [5] Fu, L., & Guan, Y. (2021). Study on the mechanism and influencing factors of SF6 decomposition products. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 6.
- [6] GE. (2017). SF6 circuit-breaker GL313 With spring operating mechanism FK3-1 Instruction Manual. CHINA: GE High Voltage Switchgear (Suzhou). C0. Ltd.
- [7] Ghozali, I. (2016). Aplikasi Analisis Multivariate Dengan Program. Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro.
- [8] (GIS), B. P. (2014). Buku Pedoman Pemeliharaan Gas Insulated Substation (GIS). Jakarta: PT. PLN (Persero).
- [9] Glaubitz, P., Siebert, C., & Zuber, K. (2019). SF 6 , Its Handling Procedures and Regulations. Dalam P. Glaubitz, C. Siebert, & K. Zuber, SF 6 , Its Handling Procedures and Regulations (hal. 451-460). Germany.
- [10] Jakob, F., & Perjanik, N. (2016). Sulfur Hexafluoride : A Unique Dielectric. Analytical ChemTech International, Inc, 5-16.
- [11] Lijun, F., Guan, Y., & Zhang, L. (2021). Study on the mechanism and influencing factors of SF6 decomposition products. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 6.
- [12] Mattoso, & Wilhelm, M. (2016). Accelerated aging of so2 switchgear seals. IEEE Electrical Insulation Magazine, 21-27.

- [13] Xiaoxing, Z., Ju, T., & Song, X. (2018). The SF 6 Decomposition Mechanism : Background and Significance. Intech, 1-12.