

Penilaian Kualitas Gas SF₆ Pada GISTET 500/150 kV

Rahman Azis Prasajo^{*a)}, Devi Soviati Mahmudah^{a)}, Imron Ridzki^{a)}, Muhammad Fahmi

Hakim^{a)}, Priya Surya Harijanto^{a)}

(Artikel diterima: Agustus 2022, direvisi: Oktober 2022)

Abstrak:

The number of Gas Insulated Switchgear (GIS) in operation is increasing in Indonesia. GIS failure requires expensive costs and extensive blackouts. Asset reliability management such as SF₆ is needed to ensure GIS performance. Several studies have tested the quality of SF₆ gas to assess the feasibility and operation of the GIS. However, a complete GIS feasibility study based on SF₆ gas quality parameters has not found. In this study, a condition assessment of the GISTET Kembangan 500/150 kV was carried out based on applicable international standards. There is an interesting phenomenon in the form of dew point anomaly and moisture content in several compartments, indicating that the gas is moist. The results of this study indicate the operational feasibility of the GISTET Kembangan 500/150 kV, the effect of high humidity on GIS operations, and maintenance recommendations.

Kata-kata kunci : GIS, dew point, humidity, condition assessment.

1. Pendahuluan

Gas Insulated Switchgear (GIS) merupakan gardu induk yang menggunakan bahan gas sulphur hexafluoride (SF₆) sebagai media isolasinya, yang dikemas dalam tabung non-ferro. Gas SF₆ memiliki karakteristik sifat elektronegatif yang berperan dalam menghambat busur api, gas SF₆ memiliki kekuatan dielektrik hampir 2,3 kali udara yaitu sebesar 8,9 kV/mm [1]. GIS memiliki peranan penting dari suatu sistem penyaluran listrik, dimana pada tempat ini tenaga listrik dikonversi dari tegangan tinggi ke tegangan yang lebih rendah untuk diteruskan menuju sisi incoming kubikel yang selanjutnya akan diteruskan menuju penyulang, atau sebaliknya mengkonversi tegangan menjadi lebih tinggi untuk disalurkan menuju sistem atau subsistem transmisi. GIS memiliki ukuran yang kompak dibandingkan GI konvensional sehingga sangat cocok dipasang pada daerah perkotaan.

Dalam studi kasus Jawa-Bali (JABA) populasi GIS dalam rentang waktu operasi dari 1 hingga 30 tahun, dengan waktu operasi rata-rata 21 tahun untuk GIS 500 kV dan 17 tahun untuk GIS 150 kV [2]. Pengoperasian GIS di iklim tropis perlu diperhatikan, berdasarkan data statistik kegagalan GIS di PLN dari tahun 1997 hingga 2009 menyebutkan bahwa tercatat 35 kegagalan mayor, dimana 25 kegagalan terjadi pada GIS 150 kV, sedangkan sisanya pada GIS 500 kV [3].

Beberapa penelitian telah melakukan pengujian kualitas gas SF₆ pada kompartemen GIS. Penelitian pada [4] melakukan pengujian kualitas gas SF₆ pada kompartemen pemutus tenaga (PMT) dengan menggunakan parameter *purity*, *dew point*, SO₂, dan *pressure* ditemukan adanya anomali yaitu kemurnian gas SF₆ tidak normal (melebihi standart yang berlaku). Penelitian pada [5] menganalisis hasil uji parameter *moisture content* dan *dew point* pada sealind ditemukan penurunan tekanan SF₆ pada pole A sehingga akan berpengaruh kepada kualitas gas SF₆. Penelitian pada [6] menilai kelayakan PMT berdasarkan pengujian kualitas gas SF₆ menggunakan parameter *pressure gauge*, *purity*, *dew point*, dan produk dekomposisi dari hasil pengujian menunjukkan bahwa kondisi PMT dalam batas standar yang berlaku.

Indonesia merupakan negara beriklim tropis yang memiliki ciri

khas lingkungan yang lembab, curah hujan yang tinggi dan sinar matahari yang intens dengan suhu hangat yang konstan sepanjang tahun sehingga membuat GIS rentan terhadap kegagalan kelembaban tinggi. Kelembaban yang berlebihan dalam peralatan berinsulasi SF₆ mempercepat pembentukan gas produk sampingan seperti HF, SF₄, SO₂F₂, SOF₂, dan SOF₄ senyawa tersebut bersifat korosif, sehingga menjadi kritis ketika menumpuk di permukaan isolator yang terpapar medan listrik sebagai lapisan yang konduktif hal ini dapat menurunkan resistansi permukaan isolator[7] Selain itu kegagalan akibat kelembaban yang tinggi dapat mempengaruhi kemampuan switching PMT dan kontaminan tersebut juga dapat mempengaruhi kemampuan transfer panas dari isolasi[1]

Meskipun demikian, penelitian tentang penilaian kondisi GISTET yang menggunakan parameter kualitas gas SF₆ seperti *purity*, *moisture content*, *dew point*, produk dekomposisi, tekanan SF₆ dan suhu masih belum ditemui. Dikarenakan adanya kemungkinan kegagalan yang diakibatkan oleh kelembaban tinggi pada GIS di iklim tropis maka perlu dilakukan pengujian kualitas gas SF₆ guna mengetahui layak atau tidaknya GIS beroperasi.

Pada penelitian ini dilakukan pengujian kualitas gas SF₆ di beberapa kompartemen GISTET Kembangan 500/150 kV. Harapannya, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar acuan dalam menganalisis kondisi GIS dan menjadi upaya tindakan mitigasi petugas sebelum terjadi kegagalan pada GISTET Kembangan 500/150 kV sehingga dapat menjamin keandalan sistem penyaluran tenaga listrik.

2. Metodologi

Penelitian ini dilaksanakan di PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Transmisi (UPT) Durikosambi, Gas Insulated Switchgear Tegangan Ekstra Tinggi Kembangan 500/150 kV.

2.1 Parameter Penilaian Kondisi

Dalam penelitian ini parameter yang perlu diperhatikan dalam penilaian kondisi GISTET Kembangan 500/150 kV antara lain *purity*, *dew point*, *moisture content*, tekanan gas SF₆, suhu SF₆, dan produk dekomposisi. Setiap parameter penilaian kondisi memiliki standar internasional yang berlaku ditunjukkan pada Tabel 2.

* Korespondensi: rahmanazisp@polinema.ac.id

a) Prodi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro, Polinema.
Jalan Soekarno-Hatta No. 9 Malang 65141

Tabel 2. Standar Internasional Pengujian Kualitas Gas SF₆

Parameter	Standar Internasional		
Purity (%)	IEC 60376:2005	≥ 97%	
Dew Point (°C)	IEEE Std C37.122. 5-2013	Suhu 20 °C ≤ -5 °C	
Moisture content (ppmv)	IEEE Std C37.122. 1-2014	≤ 610 ppmv (non-CB) ≤ 350 ppmv (CB)	
Tekanan Gas SF ₆ (Bar Rel)	CIGRE 723-2008	1-12 bar	
Produk dekomposisi	CIGRE 234-2003	Normal (Purity OK)	≤ 500 ppmv
		Normal (Purity OK)	500 - 1000 ppmv
		Kontaminasi Rendah	1000 - 2000 ppmv
		Kontaminasi Tinggi	≥ 2000 ppmv

2.2 Dew Point (°C)

Dalam pengujian kualitas gas SF₆ nilai parameter dew point masih belum diketahui maka, dilakukan perhitungan dew point berdasarkan [8] sebagai berikut :

$$P_{absolute} = P_{gauge} \times 1 \text{ bar} \dots\dots\dots (3-1)$$

Dengan :

P absolute : Tekanan udara terhadap tekanan ruang hampa (mmHg).

1 Bar : 750.0617 mmHG.

$$e = \frac{ppm_v \times p}{ppm_v + 10^6} \dots\dots\dots (3-2)$$

Dengan :

e: water vapor partial pressure (tekanan uap air) dalam Pa

ppm_v : moisture content

p : tekanan gas SF₆ dalam Pa

$$t_d = 272.62 \times \frac{\ln\left(\frac{e}{611.2}\right)}{22.46 - \ln\left(\frac{e}{611.2}\right)} \dots\dots\dots (3-3)$$

Dengan :

t_d: dew point (°C)

2.3 Analisis Pengaruh Kelembaban Tinggi Terhadap Operasional GIS.

Untuk menguji hipotesis penulis dalam menganalisis pengaruh kelembaban tinggi terhadap operasi GIS maka, digunakan teknik analisis statistik *annova* atau *analysis of varian* (anonova). *Annova* adalah tergolong analisis komparatif lebih dari dua variable atau lebih dari dua rata-rata. Tujuannya ialah untuk membandingkan lebih dari dua rata-rata. Gunanya untuk menguji kemampuan generalisasi artinya data sampel dianggap dapat mewakili populasi. Adapun langkah dalam analisis *annova* sebagai berikut :

Kuadrat Rerata (KR) rumus sistematisnya :

$$KR = \frac{JK}{dk} \dots\dots\dots (3-4)$$

Dengan :

JK = Jumlah Kuadrat (*same of square*)

dk = Derajat Kebebasan (*degree of freedom*)

Menghitung nilai *annova* dengan rumus :

$$F_{hitung} = \frac{V_A}{V_D} = \frac{KR_A}{KR_D} = \frac{JK_A : dk_A}{JK_D : dk_D} = \frac{Varians Antar Group}{Varians Dalam Group} \dots\dots (3-5)$$

Varian Dalam Group dapat juga disebut Varians Kesalahan (Varians Galat), dituliskan dalam rumus :

$$JK_A = \sum \frac{(\sum X_{Ai})^2}{n_{Ai}} - \frac{(\sum X_T)^2}{N} \dots\dots\dots (3-6)$$

Untuk dk_D = A - 1

$$JK_D = \sum X_T^2 - \sum \frac{(\sum X_{Ai})^2}{n_{Ai}} \dots\dots\dots (3-7)$$

Untuk dk_D = N - A

$$\frac{(\sum X_T)^2}{N} = \text{sebagai faktor koreksi} \dots\dots\dots (3-8)$$

Dengan :

N = Jumlah keseluruhan sample (jumlah kasus dalam penelitian)

A = Jumlah keseluruhan group sample.

Dan untuk kaidah pengujian :

Jika *F_{hitung}* ≥ *F_{tabel}* , maka tolak Ho artinya signifikan.

Jika *F_{hitung}* ≤ *F_{tabel}* , maka terima Ho artinya tidak signifikan.

3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian kualitas gas SF₆ dengan menggunakan beberapa semple pada kompartemen di bay Gandul 2. Pengujian kualitas gas SF₆ dilakukan dalam kondisi peralatan masih beroperasi dan periode pengujian dilakukan secara tahunan dengan menggunakan alat uji Dilo SF₆ Multi Analyzer 3-038R-R302.

3.1 Penilaian Kondisi GISTET Kembangan 500/150 kV Berdasarkan Parameter Kualitas Gas SF₆

3.1.1 Pengujian Purity Gas SF₆

Tabel 3. Hasil Pengujian Purity Gas SF₆

Kompartemen	Fasa	Purity (%)	Results
DS 7AB2.1 (G7)	R	99.00	Good
	S	99.00	Good
	T	99.00	Good
DS 7B2.2 (G4)	R	99.00	Good
	S	99.00	Good
	T	99.00	Good
DS 7B2.1 (G5)	R	99.00	Good
	S	99.00	Good
	T	99.00	Good
CB 7AB2 (G0)	R	99.00	Good
	S	99.00	Good
	T	99.00	Good
CB 7B2 (G11)	R	99.00	Good
	S	99.00	Good
	T	99.00	Good
CB 7A2 (G13)	R	99.00	Good
	S	99.00	Good

	T	99.00	Good
--	---	-------	------

Dalam pengujian *purity* (kemurnian) gas SF₆ berdasarkan IEC 60376:2005 yang diizinkan untuk gas baru >99.7 % dan untuk gas SF₆ yang sudah digunakan untuk beroperasi adalah >97%. Dari hasil pengujian *purity* pada Tabel 3 bahwa seluruh kompartemen bernilai 99% sehingga mengindikasikan bahwa kadar kemurnian pada kompartemen tersebut dalam kondisi baik dan masih layak beroperasi secara normal. Apabila terdapat anomali maka dapat berdampak terciptanya korosi pada kompartemen, dan dapat menjadi jalan masuknya suhu udara luar yang dapat menciptakan *moisture* tinggi di dalam kompartemen yang dapat mempengaruhi kemampuan isolasi gas, kemampuan *switching* PMT dan dapat mempengaruhi kemampuan transfer panas dari isolasi SF₆.

3.1.2 Pengujian Moisture Content

Tabel 4. Hasil Pengujian *Moisture Content*

Kompartemen	Fasa	Moisture content (PPMV)	Results
DS 7AB2.1 (G7)	R	1428	High
	S	1318	High
	T	1079	High
DS 7B2.2 (G4)	R	160	Good
	S	120	Good
	T	120	Good
DS 7B2.1 (G5)	R	1230	High
	S	1315	High
	T	1194	High
CB 7AB2 (G0)	R	20	Good
	S	20	Good
	T	20	Good
CB 7B2 (G11)	R	20	Good
	S	20	Good
	T	20	Good
CB 7A2 (G13)	R	20	Good
	S	20	Good
	T	20	Good

Keterangan : PPMv = part per million volume

Pengujian *moisture content* (kandungan uap air) dilakukan untuk mengetahui kadar uap air yang terdapat pada kompartemen. Berdasarkan IEEE Std C37. 122. 5-2013 hasil pengujian pada Tabel 4. menunjukan bahwa pada kompartemen DS 7B2.2, CB 7AB2, CB 7B2, CB 7A2 nilai kadar uap air masih berada dalam kategori baik. Kompartemen DS 7AB2.1 dan DS 7B2.1 menunjukkan adanya anomali sehingga, pada kompartemen DS 7AB2.1 dan DS 7B2.1 terindikasi kelembaban tinggi, hal ini perlu dilakukan tindakan korektif karena kadar uap air yang tinggi di dalam kompartemen bisa mengalami kondensasi sehingga kekuatan isolasi gas SF₆ akan menurun. Apabila kekuatan isolasi gas SF₆ turun maka dapat menurunkan kekuatan menahan tegangan flashover yang dapat mengganggu kinerja GIS [7].

3.1.3 Pengujian Produk Dekomposisi

Tabel 5. Hasil Pengujian Produk Dekomposisi

Kompartemen	Fasa	Produk dekomposisi (PPMV)	Results
DS 7AB2.1 (G7)	R	0.0	Good
	S	0.0	Good
	T	0.0	Good
DS 7B2.2 (G4)	R	0.0	Good
	S	0.0	Good
	T	0.0	Good
DS 7B2.1 (G5)	R	0.0	Good
	S	0.0	Good
	T	0.0	Good
CB 7AB2 (G0)	R	0.0	Good
	S	0.0	Good
	T	0.0	Good
CB 7B2 (G11)	R	0.0	Good
	S	0.0	Good
	T	0.0	Good
CB 7A2 (G13)	R	0.0	Good
	S	0.0	Good
	T	0.0	Good

Produk dekomposisi terjadi karena ketidaksempurnaan pembentukan kembali gas SF₆. akibat *electric discharge* (*corona*, *spark* dan *arcing*). Hasil produk dekomposisi dapat berupa gas dan padat. Berdasarkan CIGRE 234-2003 hasil pengujian produk dekomposisi pada Tabel 5 bahwa seluruh kompartemen bernilai 0.0 ppmv sehingga mengindikasikan bahwa produk dekomposisi pada kompartemen tersebut dalam kondisi layak. Jika terdapat anomali maka kekuatan dielektrik dari isolasi gas SF₆ akan mengalami penurunan. Selain itu senyawa hasil produk dekomposisi bersifat korosif, sehingga menjadi kritis ketika menumpuk di permukaan isolator yang terpapar medan listrik sebagai lapisan yang konduktif hal ini dapat menurunkan resistansi permukaan isolator[7].

3.1.4 Pengujian Tekanan Gas SF₆

Tabel 6. Hasil Pengujian Tekanan Gas SF₆

Kompartemen	Fasa	Tekanan Gas SF ₆ (Bar Rel)	Results
DS 7AB2.1 (G7)	R	6.24	Good
	S	6.24	Good
	T	5.72	Good
DS 7B2.2 (G4)	R	5.81	Good
	S	5.8	Good
	T	5.66	Good
DS 7B2.1 (G5)	R	6.00	Good
	S	6.01	Good
	T	5.94	Good
CB 7AB2 (G0)	R	7.05	Good
	S	7.02	Good
	T	6.77	Good
CB 7B2 (G11)	R	6.83	Good
	S	6.80	Good
	T	6.86	Good
CB 7A2 (G13)	R	6.73	Good

	S	6.79	Good
	T	6.78	Good

Berdasarkan CIGRE 723-2008 hasil pengujian tekanan gas SF₆ pada Tabel 6 bahwa seluruh kompartemen masih dalam kondisi layak sesuai dengan standar pada [9]. Apabila terdapat anomali nilai tekanan gas SF₆ berpengaruh pada kekuatan dielektrik dari gas SF₆ itu sendiri. Apabila nilai tekanan tinggi maka kemampuan kekuatan dielektriknya akan tinggi juga. Jika terjadi penurunan kekuatan dielektrik gas SF₆ maka pada saat menahan medan listrik homogen yang tinggi akan rentan terjadi *breakdown*.

3.1.5 Perhitungan Dew Point

Dew point (titik embun) menunjukkan titik dimana gas SF₆ berubah menjadi cair. Hal ini terkait dengan tingkat kelembaban gas SF₆, yaitu berapa banyak partikel air yang terkandung dalam isolasi gas SF₆. Semakin tinggi nilai *dew point* maka dapat menurunkan nilai isolasi gas SF₆ karena kontaminasi kelembaban air. Berdasarkan [8] perhitungan *dew point* pada salah satu kompartemen sebagai berikut :

DS 7AB2.1 (G7)

Fasa R

Hitung tekanan absolute (P absolute) dengan persamaan 3-1 :

$$P_{absolute} = 6.24 \times 750.0617$$

$$= 4680.385 \text{ mmHG}$$

Hitung tekanan uap air (e) dengan persamaan 3-2 :

$$e = \frac{1428 \times 4680.385}{1428 + 10^6}$$

$$e = 6.67 \text{ mmHG}$$

$$e = 6.67 \times 133.322$$

$$e = 889.8 \text{ Pa}$$

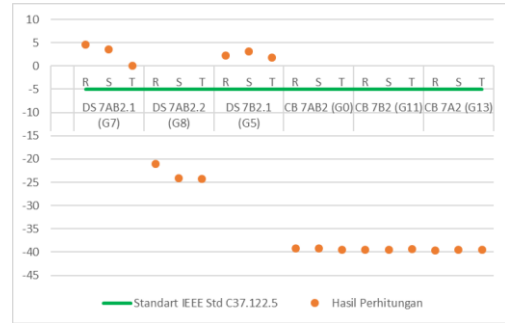
Hitung *dew point* (°C) dengan persamaan 3-3 :

$$t_d = 272.62 \times \frac{\ln\left(\frac{889.8}{611.2}\right)}{\left(22.46 - \ln\left(\frac{889.8}{611.2}\right)\right)}$$

$$t_d = 4.6^\circ\text{C}$$

Maka, didapatkan hasil *dew point* pada fasa R di kompartemen DS 7AB2.1 bernilai 4.6 °C.

Setelah dilakukan perhitungan dew point pada seluruh kompartemen maka, didapatkan hasil pada Gambar 4.



Gambar 4. Scatter Plot Perhitungan *Dew Point*

Nilai *dew point* mengacu pada standar [7] pada suhu lingkungan 20 °C batas limit yang diizinkan untuk kompartemen GIS adalah ≤ -5 °C. Dari hasil perhitungan yang dilakukan didapati bahwa kompartemen DS 7AB2.1 dan DS 7B2.1 memiliki nilai *dew point* diatas standar yang berlaku. Sehingga, pada kompartemen DS 7AB2.1 dan DS 7B2.1 terindikasi gas lembab. Nilai *dew point* pada kompartemen tersebut memiliki nilai dew point yang tinggi dan dapat berakibat terjadinya penurunan nilai isolasi gas SF₆ karena kontaminasi kelembaban tinggi.

3.2 Pengaruh Kelembaban Terhadap Operasional GIS

Dalam menganalisis hipotesis penulis tentang pengaruh kelembaban tinggi terhadap operasional GISTET Kembangan 500/150 kV penulis menggunakan teknik analisis statistic *annova* (*analysis of varian*). Pada GISTET Kembangan 500/150 kV terdapat nilai *dew point* dan *moisture content* yang melebihi batas standar yang berlaku, adapun analisis statistic *annova* di tunjukan pada Tabel 7 dan Tabel 8.

Tabel 7. Analisis *Annova* Terhadap Dew Point Pada Seluruh Kompartemen

Fasa	DS 7AB2 .1	DS 7B2 .1	DS 7B2. 2	CB 7AB2	CB 7A2	CB 7B2
R	4.6	2.3	-21.1	-39.2	-39.6	-39.5
S	3.6	3.1	-24	-39.2	-39.5	-39.5
T	-1	1.8	-24.3	-39.5	-39.5	-39.4
STATISTIK						
Total	7.2	7.2	-69.4	-118	-119	-118
n	3	3	3	3	3	3
$\sum X$	7.2	7.2	-69.4	-118	-119	-118
$\sum X^2$	35.1 2	18.1 4	1611. 7	4633. 53	4688.6	4672.8 6
\bar{X}	2.4	2.4	-23.1	-39.3	-39.5	-39.4
$\frac{(\sum X_{Ai})}{n_{Ai}}$	411.1	109. 7	8658 59	71565 33	732784 4.2	727854 0.2
Varian	8.92	0.43	3.17	0.04	0.02	0.001

(S)						
-----	--	--	--	--	--	--

Mencari jumlah kuadrat antar group (JK_A), menggunakan persamaan 3-6 sebagai berikut :

$$JK_A = \sum \frac{(\sum X_{Ai})^2}{n_{Ai}} - \frac{(\sum X_T)^2}{N} = 6301.63$$

Mencari derajat kebebasan antar group (dk_A) = A - 1 = 6-1 = 5

Kemudian mencari jumlah Kuadrat Rerata antar group, menggunakan persamaan 3-4 sebagai berikut :

$$(KR_A) = \frac{JK_A}{dk_A} = \frac{6301.63}{5} = 1260.33$$

Mencari jumlah kuadrat dalam antar group (JK_D), menggunakan persamaan 3-7 sebagai berikut :

$$JK_D = \sum X_T^2 - \sum \frac{(\sum X_{Ai})^2}{n_{Ai}} = 25.13$$

Mencari derajat kebebasan dalam antar group (dk_D) = N - A = 13 - 1 = 12

Mencari kuadrat Rerata dalam antar group, menggunakan persamaan 3-4 sebagai berikut :

$$(KR_D) = \frac{JK_D}{dk_D} = \frac{25.13}{12} = 2.09$$

menentukan nilai F hitung = $\frac{KR_A}{KR_D} = \frac{1260.33}{2.09} = 601.806$

Dengan menentukan kaidah pengujian

Jika F_{hitung} ≥ F_{tabel} maka tolak Ho artinya signifikan.

Jika F_{hitung} ≤ F_{tabel} maka terima Ho artinya tidak signifikan.

Dimana F_{tabel} = F_{(1-α)(dkA,dkD)}

Jika α = 0,05, maka F_{tabel} = F_{(1-0,05)(5,13)} = F_{tabel} = 3.105

Hasilnya, ternyata F_{hitung} lebih besar daripada F_{tabel} atau 601.806 ≥ 3.105 maka tolak Ho artinya signifikan.

Tabel 8. Analisis *Annova* Terhadap Moisture Content Pada Seluruh Kompartemen

Fasa	DS 7AB2 .1	DS 7B2 .1	DS 7B2. 2	CB 7AB2	CB 7A2	CB 7B2
R	1428	1230	160	20	20	20
S	1318	1315	160	20	20	20
T	1079	1194	160	20	20	20
STATISTIK						
Total	3825	3739	400	60	60	60
n	3	3	3	3	3	3
∑ X	3825	3739	400	60	60	60

∑ X ²	35.1 2	18.1 4	1611. 7	4633. 53	4688.6	4672.8 6
\bar{X}	2.4	2.4	-23.1	-39.3	-39.5	-39.4
$\frac{(\sum X_{Ai})}{n_{Ai}}$	411.1	109. 7	8658 59	71565 33	732784 4.2	727854 0.2
Varian (S)	8.92	0.43	3.17	0.04	0.02	0.001

Mencari jumlah kuadrat antar group (JK_A), menggunakan persamaan 3-6 sebagai berikut :

$$JK_A = \sum \frac{(\sum X_{Ai})^2}{n_{Ai}} - \frac{(\sum X_T)^2}{N} = 5909141$$

Mencari derajat kebebasan antar group (dk_A) = A - 1 = 6-1 = 5

Kemudian mencari jumlah Kuadrat Rerata antar group, menggunakan persamaan 3-4 sebagai berikut :

$$(KR_A) = \frac{JK_A}{dk_A} = \frac{5909141}{5} = 1181828$$

Mencari jumlah kuadrat dalam antar group (JK_D), menggunakan persamaan 3-7 sebagai berikut :

$$JK_D = \sum X_T^2 - \sum \frac{(\sum X_{Ai})^2}{n_{Ai}} = 72461.33$$

Mencari derajat kebebasan dalam antar group (dk_D) = N - A = 13 - 1 = 12

Mencari kuadrat Rerata dalam antar group, menggunakan persamaan 3-4 sebagai berikut :

$$(KR_D) = \frac{JK_D}{dk_D} = \frac{72461.33}{12} = 3.105$$

menentukan nilai F hitung = $\frac{KR_A}{KR_D} = \frac{1181828}{3.105} = 195.71$

Dengan menentukan kaidah pengujian

Jika F_{hitung} ≥ F_{tabel} maka tolak Ho artinya signifikan.

Jika F_{hitung} ≤ F_{tabel} maka terima Ho artinya tidak signifikan.

Dimana F_{tabel} = F_{(1-α)(dkA,dkD)}

Jika α = 0,05, maka F_{tabel} = F_{(1-0,05)(5,13)} = F_{tabel} = 3.105

Hasilnya, ternyata F_{hitung} lebih besar daripada F_{tabel} atau 195.71 ≥ 3.105 maka tolak Ho artinya signifikan.

Sehingga, dapat disimpulkan bahwa ada perbedaan yang signifikan dew point dan moisture pada tiap fasa di kedua kompartemen. Dengan adanya perbedaan yang signifikan pada parameter dew point dan moisture content di tiap fasa pada kompartemen DS 7AB2.1 dan DS 7B2 serta nilai tersebut telah melebihi batas standar yang berlaku maka, dalam pengujian kualitas gas SF₆ pada kompartemen tersebut terindikasi gas lembab. Penelitian terdahulu [7], [10]–[12] menyebutkan bahwa gas SF₆ memiliki kemampuan untuk mengembalikan diri saat terjadi arcing atau bisa disebut 'self healing'. Namun, apabila gas

SF₆ terindikasi kelembaban tinggi (gas lembab) maka dapat mempercepat pembentukan gas produk sampingan seperti HF, SO₂F₂, SOF₂, dan SOF₄. Gas produk sampingan tersebut merupakan termasuk gas reaktif yang bersifat korosif. Selain itu, saat terjadi kelembaban tinggi pada gas SF₆, uap air akan mengembun pada permukaan terminasi yang dapat mengakibatkan degradasi isolator.

3.3 Rekomendasi Pemeliharaan Berdasarkan Hasil Analisis Pengujian Kualitas Gas SF₆

Penurunan kualitas gas SF₆ mengakibatkan GIS mengalami kegagalan fungsi operasional apabila tidak mampu mengisolasi tegangan antar peralatan.

Tabel 9. Data Nilai *Moisture content*, *Dew point* dan Produk Dekomposisi

Kompartemen	Fasa	Moisture Content	Dew Point	Produk Dekomposisi
DS 7AB2.1	R	1428	4.6	0.0
	S	1318	3.6	0.0
	T	1079	-1	0.0
DS 7B2.1	R	1230	2.3	0.0
	S	1315	3.1	0.0
	T	1194	1.8	0.0

Dari hasil pengujian produk dekomposisi pada DS 7AB2.1 dan DS 7B2.1 bernilai 0.0 ppmv hal tersebut masih menandakan bahwa masih berada pada standar yang diizinkan. Namun, tidak menutup kemungkinan kedepannya saat GISTET mengalami gangguan akan terjadi fenomena partial discharge (PD) karena terdapat *by produk* pada kompartemen DS 7AB2.1 dan DS 7B2.1. Terlebih pada kompartemen tersebut telah memiliki riwayat kelembaban tinggi. Dalam [1] jika terdapat anomali pada nilai *dew point* maka direkomendasikan untuk dilakukan pengukuran PD, apabila PD tidak ditemukan, maka perlu dilakukan reklamasi gas SF₆ atau absorbent (untuk kompartemen PMT dan PMS). Apabila terdapat PD di dalam kompartemen, maka diperlukan pengukuran PD lanjutan dengan interval waktu tertentu untuk memonitor pertumbuhan (pola dan magnitude) partial discharge.

Selain itu, peneliti merekomendasikan untuk menambah filter/saringan pada saat pengisian/reklamasi gas SF₆ agar dapat menjaga parameter *dew point* tetap rendah. Pengujian berikutnya direkomendasikan untuk dilakukan pengukuran tahanan kontak untuk melihat trend/kecenderungan kemampuan isolasi gas SF₆ di GISTET Kembangan 500/150 kV.

4. Kesimpulan

Telah dilakukan penilaian kondisi GISTET Kembangan 500/150 kV berdasarkan parameter kualitas gas SF₆. Dari pengujian kualitas gas SF₆ yang dilakukan, beberapa parameter menunjukkan hasil dalam kondisi baik dan masih layak beroperasi secara normal. Sementara itu dari pengujian *dew point* dan *moisture content* ditemukan bahwa terdapat anomali di kompartemen DS 7AB2.1 dan DS 7B2.1. Analisis statistik *anova* telah dilakukan pada hasil pengujian di kedua kompartemen tersebut, menunjukkan terdapat perbedaan yang signifikan antara kompartemen CB dan DS. Kelembaban tinggi dalam peralatan berinsulasi SF₆ dapat mempercepat pembentukan senyawa hasil produk dekomposisi, mempengaruhi kemampuan 'self healing' SF₆, dan kemampuan menahan tegangan flashover. Rekomendasi pemeliharaan yang diberikan disarankan untuk dilakukan penggantian gas SF₆,

penambahan filter saat pengisian gas SF₆, dan pengukuran tahanan kontak. Selanjutnya, dapat dilakukan eksplorasi lebih lanjut terkait pengujian partial discharge dengan menganalisis interval waktu tertentu untuk memonitor pertumbuhan (pola dan magnitude) partial discharge, sehingga monitoring yang dihasilkan lebih lengkap.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis kepada pihak UPT Durikosambi – GISTET Kembangan 500/150 kV atas data dan diskusi yang dilakukan.

Daftar Pustaka

- [1] PT. PLN (Persero), *Petunjuk Operasi & Pemeliharaan GIS Compartment*. 2014.
- [2] A. P. Purnomoadi, "Asset Health Index and Risk Assessment Models for High Voltage Gas-Insulated Switchgear Operating in Tropical Environment," *Asset Heal. Index Risk Assess. Model. High Volt. Gas-Insulated Switchg. Oper. Trop. Environ.*, vol. 231, 2020.
- [3] A. Pharmatrisanti, "Long Term Performance of Gas-Insulated Switchgear Operating under Tropical Conditions," TU Delft, 2012.
- [4] D. S. Nurjannah, D. B. Santoso, and I. A. Bangsa, "Analisa Pengujian Kualitas Gas SF₆ Pada Pemutus Tenaga (PMT) 66 KV Bay Reaktor 4R2 di GITET," vol. 10, no. 2, pp. 57–59, 2021.
- [5] A. T. Aditia Irvan, "Analisis Pads Sealingend Terhadap Tekanan Moisture Content Dan Dewpoint GIS Kiaracandong," 2019.
- [6] A. Goeritno and B. I. Syaputra, "Kelayakan Operasi Pemutus Tenaga (PMT) Tegangan Ekstra Tinggi Bermedia Gas Sulphur Hexaflourite (Sf₆) Berdasarkan Kualitas Gas, Keserempakan Titik Titik Kontak, dan Parameter Resistans," *di JUTEKS (Jurnal Tek. Elektro dan Sains)*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2014.
- [7] IEEE Std C37.122.5, *IEEE Guide for Moisture Measurement and Control in SF₆ Gas-Insulated Equipment*, vol. 2013. 2013.
- [8] CIGRE, *Tb 723 - Sf₆ Measurement Guide*, no. April. 2018.
- [9] "GIS The State Of Art," *CIGRE 381*, 2008.
- [10] CIGRE, "SF₆ Recycling Guide," *Power*, no. July 1997, pp. 2–3, 2000.
- [11] A. P. Purnomoadi, *Model Health-Index untuk Gas-Insulated Switchgear (GIS) Tegangan Tinggi Beroperasi di Lingkungan Tropis Penulis*. Jakarta, 2020.
- [12] X. Pang, L. Zhen, Y. Long, K. Yu, and S. Xiu, "Study on Gas Decomposition Characteristics of SF₆ with Moisture after Current Interruption," *Proc. 2019 5th Int. Conf. Electr. Power Equip. - Switch. Technol. Front. Switch. Technol. a Futur. Sustain. Power Syst. ICEPE-ST 2019*, pp. 565–569, 2019, doi: 10.1109/ICEPE-ST.2019.8928685.