ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan
Vol. xx No. x, ISSN: 2407-232X, E-ISSN: 2407-2338

Evaluasi Operasional Pemutus Tenaga Gas SF_6 di Gardu Induk 150 kV

Rachmat Sutjipto*[a)], Heri Sungkowo[a)], Muhammad Khairan[b)], Slamet Nurhadi[a)], Muhammad Fahmi Hakim[b)]

(Received 31 Desember 2025 || Revised 12 Februari 2025 || Published 28 Februari 2025)

Abstract: *Circuit Breaker (CB) is a critical component in high-voltage substations that functions to switch and disconnect electrical currents under normal and fault conditions. Over time, operational aging and environmental factors may degrade the performance of CB, potentially impacting power system reliability. This study aimed to evaluate the feasibility of 150 kV CB at Probolinggo Substation, particularly in Transformer Bay 1 and Transformer Bay 3, through a comparative analysis of insulation resistance, contact resistance, contact simultaneity, and SF_6 gas purity based on tests conducted in 2021 and 2023. The study employed experimental methods and standard-based evaluations, referring to VDE (Catalogue 228/4), IEC 60694, SKDIR-0520/2014, and CIGRE standards. The findings revealed that although insulation resistance values showed slight degradation in 2023, they remained above the minimum threshold, ensuring safe operation. Contact resistance increased marginally due to dust accumulation and aging but still met the IEC 60694 standard. Contact simultaneity remained well within SKDIR-0520/2014 limits, indicating proper switching operation. SF_6 gas purity tests showed a minor increase in moisture content due to condensation, yet all parameters complied with CIGRE standards. These results align with previous studies that highlight CB degradation over time but confirm that regular maintenance can sustain its operational reliability. This research underscores the importance of periodic monitoring and predictive maintenance strategies. Future work should explore real-time IoT-based monitoring and numerical simulations to enhance failure prediction models and optimize maintenance strategies for high-voltage circuit breakers.*

Keywords: *CB, Insulation Resistance, Contact Resistance, Contact Simultaneity, SF_6 Gas Purity*

1. Pendahuluan

Pada Gardu Induk (GI), Pemutus Tenaga (PMT) mempunyai peran vital sebagai *switching* untuk mengalirkan atau memutuskan arus beban dalam kondisi normal dan dapat memutus arus gangguan dalam kondisi tidak normal akibat hubung singkat [1], [2]. Keandalan PMT sangat krusial dalam memastikan kontinuitas suplai energi listrik, terutama di gardu induk yang berperan sebagai penghubung antara pusat pembangkitan dan jaringan distribusi [3]. Dengan semakin meningkatnya beban listrik dan tuntutan stabilitas sistem tenaga listrik, pemeliharaan PMT harus dilakukan secara berkala untuk menghindari gangguan yang dapat menyebabkan pemadaman listrik berskala luas [4]. Oleh karena itu, penelitian mengenai kelayakan operasional PMT menjadi hal yang sangat penting untuk memastikan bahwa peralatan ini tetap berfungsi sesuai dengan standar yang ditetapkan.

Seiring bertambahnya usia operasional, komponen di dalam PMT mengalami degradasi yang berpotensi menurunkan kinerja dan keandalannya [5]. Di GI Probolinggo, PMT pada bay trafo 1 dan bay trafo 3 telah beroperasi selama lebih dari 15 tahun, yang berarti perangkat ini rentan terhadap penurunan kualitas isolasi, peningkatan tahanan kontak, serta perubahan karakteristik gas isolasi yang dapat mempengaruhi efektivitas pemadaman busur api. Jika tidak dilakukan evaluasi secara menyeluruh, kondisi ini dapat meningkatkan risiko gangguan sistem tenaga listrik yang berdampak pada keandalan jaringan secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan suatu kajian komprehensif yang mampu mengidentifikasi kondisi aktual dari PMT tersebut melalui berbagai metode pengujian yang sesuai dengan standar internasional.

Penelitian mengenai pengujian kelayakan operasional PMT telah banyak dilakukan dengan berbagai pendekatan. Firdaus et al. [6] dan Rahman et al [7] sama-sama menguji sinkronisasi waktu kerja kontak PMT tapi pada GI yang berbeda. Firdaus et al. menemukan hasil pengujian PMT di GI Sunyaragi menunjukkan adanya anomali pada sinkronisasi kontak sedangkan Rahman et al menyatakan PMT 150 kV di Gardu Induk Jeneponto tersebut masih layak digunakan. Prakoso et al. [8] dan Fikri et al [9] melakukan pengujian PMT di GI yang berbeda dengan berfokus pada tahanan isolasi, tahanan kontak, keserempakan kontak, dan tahanan pentanahan. Beberapa studi terdahulu tersebut pada umumnya berfokus pada pengujian tahanan isolasi, tahanan kontak, keserempakan kontak, dan tahanan pentanahan. Namun, penelitian yang mengeavaluasi kelayakan PMT berdasarkan pengujian kemurnian gas SF_6 dari periode yang berbeda, khususnya pada rentang waktu dua tahun atau lebih, masih terbatas. Selain itu, penelitian terdahulu juga kurang memberikan analisis yang mendalam mengenai faktor-faktor penyebab perubahan parameter pengujian, seperti pengaruh lingkungan, usia operasional, serta kondisi pemeliharaan yang dilakukan.

Untuk mengatasi kesenjangan tersebut, penelitian ini menawarkan pendekatan yang lebih komprehensif dengan membandingkan hasil pengujian PMT dari dua periode berbeda, yaitu tahun 2021 dan 2023 yang juga mencakup pengujian kemurnian gas SF_6. Selain itu, analisis terhadap berbagai faktor yang berkontribusi terhadap perubahan nilai parameter pengujian juga akan dilakukan guna memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai degradasi kinerja PMT seiring waktu. Dengan demikian, penelitian ini dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan strategi pemeliharaan yang lebih efektif.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan operasional PMT 150 kV di GI Probolinggo pada bay trafo 1 dan bay trafo 3 melalui serangkaian pengujian yang mencakup tahanan isolasi, tahanan kontak, keserempakan kontak, serta kemurnian gas SF_6. Hasil pengujian dari tahun 2021 dan 2023 akan dibandingkan dengan standar internasional yang berlaku guna menentukan apakah PMT masih layak beroperasi atau memerlukan tindakan pemeliharaan lebih lanjut. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan bagi industri tenaga listrik dalam meningkatkan keandalan sistem transmisi melalui evaluasi berkala terhadap perangkat pemutus tenaga.

2. Metode

2.1 Data Uji dan Standar Pengujian

Proses pengambilan data pengujian dilakukan pada saat

*Korespondensi: rachmat.sutjipto@polinema.ac.id
a) Prodi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Malang, Indonesia
b) Prodi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Malang, Indonesia

pelaksanaan pemeliharaan rutin 2 tahunan pada GI Probolinggo pada tahun 2021 dan 2023 dan terdapat beberapa pengujian yang dilakukan terhadap PMT pada bay trafo 1 dan bay trafo 3, yaitu pengujian tahanan isolasi, pengujian tahanan kontak, pengujian keserempakan kontak [10] dan pengujian kemurnian gas SF_6 [11]. Setelah mendapatkan data dari hasil pengujian yang dilakukan pada tahun 2021 dan 2023, dilakukan perbandingan dengan standar yang digunakan pada masing-masing pengujian di PMT bay trafo 1 dan bay trafo 3.

Standar-standar yang digunakan dalam proses pengujian ini antara lain: Standar VDE (catalogue 228/4) untuk pengujian tahanan isolasi [12], Standar IEC 60694 untuk pengujian tahanan kontak [13], SKDIR-0520/2014 untuk pengujian keserempakan kontak [14], dan Standar CIGRE untuk pengujian kemurnian gas SF_6 [15].

2.2 Pengujian Tahanan Isolasi

Pengujian tahanan isolasi digunakan untuk mengukur ketahanan dari isolasi menggunakan *High Voltage Insulation Tester* [16]. Perhitungan arus bocor (I_b) menggunakan Persamaan (2-1) [6] berikut.

$$Ib = \frac{Q}{R} \quad (2\text{-}1)$$

Keterangan:
Ib = Arus bocor (mA)
Q = Tegangan *insulation tester* (V)
R = Hasil tahanan isolasi (MΩ)

Standar yang digunakan pada pengujian tahanan isolasi ini adalah standar VDE (*catalogue* 228/4) dengan minimal besarnya tahanan isolasi pada suhu operasi dihitung 1 KV = 1 MΩ. Kebocoran arus yang diijinkan setiap kV = 1 mA.

TABEL 2.1 STANDAR TAHANAN ISOLASI VDE (CATALOGUE 228/4)

No	Titik ukur	Ket.	Rekomendasi
1	>1MΩ/1kV	*Good*	Normal
2	<1MΩ/1kV	*Bad*	Lakukan pengujian lebih lanjut

2.3 Pengujian Tahanan Kontak

Pengujian tahanan kontak bertujuan untuk mengetahui nilai resistansi akibat sambungan antara konduktor yang dapat menyebabkan ruigi-rugi daya. Pada titik sambungan konduktor terjadi hambatan arus yang mengalir, sehingga dapat terjadi panas pada titik sambungan konduktor tersebut, jika sambungan konduktor tersebut memiliki suhu yang tinggi maka akan menyebabkan nilai tahanan kontak tinggi. Pada saat pengukuran tahanan kontak dari PMT harus dilakukan dengan kondisi PMT tertutup agar nilai tahanan kontaknya dapat terukur [17]. Pengujian tahanan kontak menggunakan alat ukur Mjolner 600 *micro-ohmmeter* dan standar yang digunakan adalah IEC 60694 dengan batasan nilai tahanan kontak untuk PMT sebesar R ≤ 50 μΩ / 120 % Nilai FAT seperti di Tabel 2.2. Nilai FAT (*Factory Acceptance Test*) merupakan nilai hasil dari pengujian yang dilakukan oleh pabrikan untuk memastikan apakah sesuai dengan standar penerimaan pabrikan dan sudah memenuhi persyaratan untuk dikirimkan.

TABEL 2.2 STANDAR TAHANAN KONTAK IEC 60694

No	Titik ukur	Ket.	Rekomendasi
1	R≤50μΩ/120%Nilai FAT	*Good*	Normal
2	R>50μΩ/120%Nilai FAT	*Bad*	Lakukan pengujian lebih lanjut

2.4 Pengujian Keserempakan Kontak

Pengujian keserempakan pada PMT untuk mengetahui waktu kerja dari PMT dan mengetahui keserempakan kontak dari PMT pada saat kondisi menutup maupun kondisi terbuka dengan menggunakan *breaker analyzer*. Ketika terjadi gangguan pada penghantar fasa ke fasa maupun tiga fasa ke tanah, maka kontak PMT harus trip semua 3 fasa secara serempak. Jika PMT tidak terputus atau trip secara serempak maka akan menyebabkan gangguan pada sistem jaringan tenaga listrik. Untuk itu biasanya pada PMT dilengkapi dengan sistem proteksi semacam relai yang akan memberikan sinyal untuk trip menuju PMT [18]. Jika kinerja keserempakan dari PMT tidak bekerja secara serempak atau tidak menutup maupun membuka secara serempak pada fasa R, S dan T maka dapat menyebabkan gangguan pada sistem gardu induk. Selain itu, dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan sistem gardu induk karena terjadi lonjakan arus beban pada pole atau fasa yang memiliki waktu tertinggi [19]. Ketika dilakukan pengujian keserempakan didapatkan hasil *closing time dan open time*. Nilai toleransi perbedaan waktu pada pengujian keserempakan kontak PMT, yang terjadi antar fasa R, S dan T maka dapat dilihat dari nilai *delta time* (Δt) antar fasa R, S dan T sewaktu membuka atau menutup kontak, dengan persamaan sebagai berikut (2-2) [10]:

$$\Delta t = t2 - t1 \quad (2\text{-}2)$$

Keterangan:
Δt : Selisih waktu
t2 : Waktu tertinggi
t1 : Waktu terendah

Standar yang digunakan untuk pengujian keserempakan kontak adalah SKDIR-0520/2014 dengan batasan selisih waktu keserempakan yaitu Δt ≤ 10 ms seperti di Tabel 2.3.

TABEL 2.3 STANDAR KESEREMPAKAN KONTAK KEPDIR PT PLN 0520 TAHUN 2014

No	Titik ukur	Ket.	Rekomendasi
1	∆t≤10ms	*Good*	Normal
2	∆t>10ms	*Bad*	Lakukan pengujian lebih lanjut

2.5 Pengujian Kemurnian Gas SF6

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kualitas gas SF_6 sebagai isolator dalam PMT. Gas SF_6 yang terkontaminasi dapat menyebabkan penurunan kemampuan dielektrik serta peningkatan risiko kegagalan isolasi. Pengujian dilakukan menggunakan SF_6 Multi Analyzer DILO 3-038R-R303, dengan mengukur dew point, moisture content, dan purity. Standar CIGRE menetapkan bahwa nilai dew point harus lebih kecil dari -5°C (Tabel 2.4), sedangkan moisture content ≤3960 ppmv, dan kemurnian gas SF6 harus lebih dari 99% [20].

TABEL 2.4 STANDAR *DEW POINT* CIGRE

No	Titik ukur	Ket.	Rekomendasi
1	$<-5^0$C	*Good*	Normal
2	$>-5^0$C	*Bad*	Lakukan pengujian lebih lanjut

TABEL 2.5 STANDAR *MOISTURE CONTENT* CIGRE

No	Titik ukur	Ket.	Rekomendasi
1	≤3960 ppmv	*Good*	Normal
2	>3960 ppmv	*Bad*	Lakukan pengujian lebih lanjut

3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan hasil pengujian yang dilakukan terhadap PMT 150 kV pada bay trafo 1 dan bay trafo 3 di GI Probolinggo, berdasarkan empat parameter utama: tahanan isolasi, tahanan kontak, keserempakan kontak, dan kemurnian gas SF6. Pengujian dilakukan dalam dua periode berbeda, yakni tahun 2021 dan 2023, untuk mengevaluasi tren perubahan kondisi PMT seiring waktu serta menentukan apakah masih memenuhi standar yang dipersyaratkan.

3.1 Pengujian Tahanan Isolasi

Pengujian tahanan isolasi bertujuan untuk menilai kualitas isolasi pada PMT dalam mencegah kebocoran arus akibat degradasi material isolasi. Tabel 3.1 menyajikan hasil pengukuran tahanan isolasi pada PMT bay trafo 1 di dua periode pengujian.

TABEL 3.1 HASIL PENGUJIAN TAHANAN ISOLASI PMT BAY TRAFO 1

Standar VDE: >>1MΩ/1KV	Hasil Pengujian tahun 2021 (MΩ)			Kondisi
Titik Uji	R	S	T	
Terminal atas - Ground	31.000	87.000	83.000	Baik
Terminal bawah - Ground	26.400	124.000	261.000	Baik
Terminal atas - Terminal bawah	73.000	106.000	200.000	Baik
Standar VDE: >>1MΩ/1KV	**Hasil Pengujian tahun 2023 (MΩ)**			**Kondisi**
Titik Uji	**R**	**S**	**T**	
Terminal atas - Ground	185.000	178.000	123.000	Baik
Terminal bawah - Ground	68.300	84.900	72.600	Baik
Terminal atas - Terminal bawah	149.000	162.000	142.000	Baik

Dari Tabel 3.1, terlihat terdapat penurunan nilai tahanan isolasi pada beberapa titik ukur di tahun 2023 dibandingkan dengan hasil pengukuran tahun 2021. Penurunan terbesar terjadi pada titik bawah-ground fasa S sebesar 39.100 MΩ dan fasa T sebesar 188.400 MΩ, serta titik atas-bawah fasa T sebesar 58.000 MΩ. Penurunan ini dapat disebabkan PMT telah beroperasi selama lebih dari 15 tahun, sehingga kemungkinan terjadi degradasi bahan isolasi. Selain itu faktor kelembapan udara, suhu, dan polutan dapat mempercepat degradasi material isolasi. Namun, meskipun terjadi penurunan nilai tahanan isolasi, hasil pengukuran masih berada di atas nilai standar yang dipersyaratkan oleh VDE (Catalogue 228/4), yakni minimal 1 MΩ per kV. Dengan demikian, PMT bay trafo 1 masih dalam kondisi operasional yang baik.

Selain itu, Tabel 3.2 menunjukkan hasil perhitungan arus bocor (Ib) berdasarkan Persamaan (2-1). Dari hasil perhitungan, rata-rata arus bocor yang dihasilkan masih jauh di bawah batas maksimum yang diperbolehkan (1 mA/kV). Dengan demikian, meskipun terdapat penurunan nilai tahanan isolasi, arus bocor yang dihasilkan masih dapat diminimalkan sehingga tidak berdampak signifikan pada performa PMT.

TABEL 3.2 HASIL PERHITUNGAN ARUS BOCOR (IB) PADA PMT BAY TRAFO 1

Standar VDE: 1 mA	Ib (mA) tahun 2021			Kondisi
Titik Uji	R	S	T	
Terminal atas – Ground	0,16	0,06	0,06	Baik
Terminal bawah – Ground	0,19	0,04	0,02	Baik
Terminal atas - Terminal bawah	0,07	0,05	0,03	Baik
Standar VDE: 1 mA	**Ib (mA) tahun 2023**			**Kondisi**
Titik Uji	**R**	**S**	**T**	
Terminal atas - Ground	0,027	0,028	0,041	Baik
Terminal bawah - Ground	0,073	0,058	0,068	Baik
Terminal atas - Terminal bawah	0,034	0,031	0,035	Baik

TABEL 3.3 HASIL PENGUJIAN TAHANAN ISOLASI PMT BAY TRAFO 3

Standar VDE: >>1MΩ/1KV	Hasil Pengujian tahun 2021 (MΩ)			Kondisi
Titik Uji	R	S	T	
Terminal atas - Ground	22.700	28.500	23.300	Baik
Terminal bawah - Ground	23.400	59.300	41.300	Baik
Terminal atas - Terminal bawah	43.300	53.400	45.500	Baik
Standar VDE: >>1MΩ/1KV	**Hasil Pengujian tahun 2023 (MΩ)**			Kondisi
Titik Uji	**R**	**S**	**T**	
Terminal atas - Ground	149.000	104.000	57.200	Baik
Terminal bawah - Ground	19.000	40.800	108.000	Baik
Terminal atas - Terminal bawah	127.000	403.000	121.000	Baik

TABEL 3.4 HASIL PERHITUNGAN ARUS BOCOR (IB) PADA PMT BAY TRAFO 3

Standar VDE: 1 mA	Ib (mA) tahun 2021			Kondisi
Titik Uji	R	S	T	
Terminal atas – Ground	0,22	0,18	0,21	Baik
Terminal bawah – Ground	0,21	0,08	0,12	Baik
Terminal atas - Terminal bawah	0,11	0,09	0,11	Baik
Standar VDE: 1 mA	**Ib (mA) tahun 2023**			**Kondisi**
Titik Uji	**R**	**S**	**T**	
Terminal atas - Ground	0,03	0,05	0,09	Baik
Terminal bawah - Ground	0,26	0,12	0,05	Baik
Terminal atas - Terminal bawah	0,04	0,01	0,04	Baik

Hasil yang serupa juga diperoleh untuk PMT bay trafo 3, sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 3.3 dan Tabel 3.4. Nilai tahanan isolasi yang diperoleh masih memenuhi standar, dan kondisi operasional PMT dapat dikategorikan masih layak digunakan.

3.2 Pengujian Tahanan Kontak

Pengujian tahanan kontak bertujuan untuk menilai resistansi antar kontak dalam PMT, yang berpengaruh pada efisiensi transfer daya serta mencegah rugi-rugi daya akibat pemanasan lokal pada titik sambungan. Tabel 3.5 dan Tabel 3.6 menyajikan hasil pengukuran tahanan kontak pada bay trafo 1 dan bay trafo 3.

TABEL 3.5 HASIL PENGUJIAN TAHANAN KONTAK PMT BAY TRAFO 1

Standart IEC 60694: R ≤ 50 μΩ / 120 % Nilai FAT Titik Uji	Hasil Pengujian tahun 2021 (μΩ)			Kondisi
	R	S	T	
Terminal atas - Terminal bawah	37,1	38,8	39,4	Baik
Standart IEC 60694: R ≤ 50 μΩ / 120 % Titik Uji	**Hasil Pengujian tahun 2023 (μΩ)**			**Kondisi**
	R	**S**	**T**	
Terminal atas - Terminal bawah	38,23	36,73	35,93	Baik

Dari Tabel 3.5, diketahui bahwa terjadi kenaikan tahanan kontak pada tahun 2023, terutama pada fasa R sebesar 1,13 μΩ dibandingkan dengan hasil tahun 2021. Faktor utama yang menyebabkan kenaikan ini antara lain: adanya faktor kotoran atau debu yang menempel pada kontak-kontak dalam PMT sehingga dapat mengganggu konduktivitas listrik dan dapat menyebabkan peningkatan resistansi kontak. Selain itu dengan adanya faktor penuaan dari material pada PMT tersebut maka dapat berpengaruh pada besarnya tahanan kontak. Namun, meskipun terjadi peningkatan nilai tahanan kontak, hasil pengujian masih di bawah batas maksimum yang diperbolehkan oleh IEC 60694 (≤ 50 μΩ). Dengan demikian, kondisi tahanan kontak masih memenuhi standar operasional dan tidak menunjukkan indikasi perlunya perawatan mendesak. Hasil serupa juga terlihat pada PMT bay trafo 3 (Tabel 3.6), di mana meskipun terdapat sedikit kenaikan nilai tahanan kontak, nilainya masih dalam rentang yang diperbolehkan.

TABEL 3.6 HASIL PENGUJIAN TAHANAN KONTAK PMT BAY TRAFO 3

Standart IEC 60694: R ≤ 50 μΩ / 120 % Nilai FAT Titik Uji	Hasil Pengujian tahun 2021 (μΩ)			Kondisi
	R	S	T	
Terminal atas - Terminal bawah	37,0	37,8	39,1	Baik
Standart IEC 60694: R ≤ 50 μΩ / 120 % Titik Uji	**Hasil Pengujian tahun 2023 (μΩ)**			**Kondisi**
	R	**S**	**T**	
Terminal atas - Terminal bawah	37,0	38,68	38,65	Baik

3.3 Pengujian Keserempakan Kontak

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah kontak PMT pada tiga fasa (R, S, T) bekerja secara serempak saat operasi buka dan tutup. Perbedaan waktu yang signifikan dapat menyebabkan lonjakan tegangan yang berbahaya dalam sistem tenaga listrik. Tabel 3.7 dan Tabel 3.8 menyajikan hasil pengukuran keserempakan kontak pada bay trafo 1 dan bay trafo 3. Dari Tabel 3.7, dapat dilihat bahwa nilai selisih waktu (Δt) mengalami kenaikan pada tahun 2023, dengan peningkatan sebesar 2,64 ms saat kondisi open dan 0,15 ms saat kondisi close. Kenaikan ini masih tergolong kecil dan jauh di bawah batas maksimum yang diperbolehkan oleh SKDIR-0520/2014 (Δt ≤ 10 ms). Hasil yang serupa juga terlihat pada PMT bay trafo 3 (Tabel 3.8). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa keserempakan kontak PMT masih dalam kondisi yang baik, dan tidak terdapat indikasi gangguan signifikan pada mekanisme *switching*.

TABEL 3.7 HASIL PENGUJIAN KESEREMPAKAN KONTAK PMT BAY TRAFO 1

Standart Kepdir PT PLN 0520 tahun 2014: Δt ≤10 ms Kriteria Uji	Hasil Pengujian tahun 2021 (ms)			Δt (ms)
	R	S	T	
Open	28,80	27,90	29,25	Baik
Close	70,00	68,70	66,85	Baik
STANDART KEPDIR PT PLN 0520 TAHUN 2014: ΔT ≤10 MS Kriteria Uji	**Hasil Pengujian tahun 2023 (ms)**			**ΔT (ms)**
	R	**S**	**T**	
Open	24,15	23,65	27,65	Baik
Close	67,05	68,95	70,35	Baik

TABEL 3.8 HASIL PENGUJIAN KESEREMPAKAN KONTAK PMT BAY TRAFO 3

Standart Kepdir PT PLN 0520 tahun 2014: Δt ≤10 ms Kriteria Uji	Hasil Pengujian tahun 2021 (ms)			Δt (ms)
	R	S	T	
Open	39,90	40,40	41,05	Baik
Close	101,10	100,95	100,95	Baik
STANDART KEPDIR PT PLN 0520 TAHUN 2014: ΔT ≤10 MS Kriteria Uji	**Hasil Pengujian tahun 2023 (ms)**			**ΔT (ms)**
	R	**S**	**T**	
Open	39,70	40,35	40,95	BAIK
Close	102,15	102,40	103,20	BAIK

3.4 Pengujian Kemurnian Gas SF6

Pengujian ini bertujuan untuk menilai kualitas gas SF6 sebagai isolator PMT, dengan memperhatikan tiga parameter utama: dew point, moisture content, dan purity. Hasil pengujian disajikan dalam Tabel 3.9, Tabel 3.10, dan Tabel 3.11.

TABEL 3.9 HASIL PENGUJIAN *DEW POINT* DAN *MOISTURE CONTENT* PMT BAY TRAFO 1 TAHUN 2021 DAN TAHUN 2023

Kriteria Uji	Standart CIGRE	Hasil uji		Selisih 2021 & 2023
		2021	2023	
		Fasa S		
Dew Point	<-5°C	-53,6	-41,2	-12,4 ^{0}C
Moisture Content	≤ 3960 ppmv	24	111	87 ppmv
Purity	>97%;>99,7 % untuk gas SF6 baru	99,2	99,9	0,7

TABEL 3.10 HASIL PENGUJIAN *DEW POINT* DAN *MOISTURE CONTENT* PMT BAY TRAFO 3 TAHUN 2021 DAN TAHUN 2023

Kriteria Uji	Standart CIGRE	Hasil uji		Selisih 2021 & 2023
		2021	2023	
		Fasa S		
Dew Point	<-5°C	-51,9	-42,9	-9 °C

Moisture Content	≤ 3960 ppmv	30	91	61 ppmv
Purity	>97%;>99,7 % untuk gas SF6 baru	99	99,6	0,6

Berdasarkan pada Tabel 3.9 dan Tabel 3.10 dapat diketahui bahwa terdapat selisih hasil pengujian pada tahun 2021 dan 2023 baik berupa kenaikan dan penurunan pada masing – masing kriteria uji. Pada parameter uji *dew point* atau titik embun gas SF6 dapat dilihat bahwa terjadi penurunan dengan selisih sebesar -12,4°C (Bay 1) dan -9°C (Bay 3), namun kondisi tersebut masih dalam kondisi yang normal karena masih jauh nilainya dari standar yang ditentukan berdasarkan standar CIGRE yaitu nilai *dew point* <-5°C. Pada parameter uji *moisture content* atau kadar uap air terdapat kenaikan sebesar 87 ppmv (Bay 1) dan 61 ppmv (Bay 3), namun kenaikan tersebut tidak signifikan karena masih jauh dari standar yang ditentukan berdasarkan standar CIGRE yaitu ≤ 3960 ppmv, sehingga *moisture content* atau kadar uap air masih dalam kondisi yang aman. Kenaikan dari nilai pengujian *moisture content* tersebut terjadi diakibatkan karena adanya proses kondensasi yang terjadi ketika terjadi proses pemadaman busur api yang telah dilakukan selama 2 tahun. Sedangkan nilai pengujian *Purity* atau kadar kemurnian gas SF6 juga menunjukkan nilai yang bagus yaitu sebesar 99,9% (Bay 1) dan 99,6% (Bay 3), sehingga nilai *Purity* atau kadar kemurnian gas SF6 masih dalam kondisi yang bagus dilihat dari standar yang ada.

TABEL 3.11 HASIL PENGUJIAN DAN PERHITUNGAN *DEW POINT* DAN *MOISTURE CONTENT* PMT BAY TRAFO 1 DAN BAY TRAFO 3

PMT	*Moisture Content* (ppmv)		*Dew point* (°C)	
	Pengujian	Perhitungan	Pengujian	Perhitungan
Bay trafo 1 (2021)	24	493,83	-53,6	-36
Bay trafo 1 (2023)	111	495,05	-41,2	-21
Bay trafo 3 (2021)	30	548,7	-51,9	-35
Bay trafo 3 (2023)	91	551,72	-42,9	-25

Dilihat pada Tabel 3.11 dapat diketahui bahwa hasil pengujian berbeda jauh nilainya dibandingkan dengan hasil dari perhitungan pada suhu 20°C. Pada perhitungan *dew point* pada PMT bay trafo 1 dan PMT bay trafo 3 nilai hasil perhitungan berkisar antara -21°C sampai dengan -36°C pada tahun 2021 dan 2023. Namun pada hasil pengujian nilai yang didapatkan berkisar antara -41,2°C sampai dengan -53,6°C pada tahun 2021 dan 2023. Hal ini dapat terjadi karena faktor pengaruh dari suhu lingkungan yang dapat menyebabkan turunnya titik embun pada tempat lokasi dari gas SF6. Faktor tersebut juga sejalan dengan karakteristik dari gas SF6 karena gas SF6 pada temperatur yang rendah akan mencair. Namun demikian hasil dari nilai *dew point* tersebut pada PMT bay trafo 1 dan PMT bay trafo 3 masih dalam kondisi yang baik atau aman, sesuai dengan parameter pengujian dari karakteristik gas SF6 untuk PMT dengan standar yang sudah ditentukan menurut standar CIGRE yaitu <-5°C.

Pada hasil perhitungan *moisture content* pada PMT bay trafo 1 dan PMT bay trafo 3 juga memiliki perbedaan nilai yang saat perhitungan pada tahun 2021 dan tahun 2023. Pada PMT bay trafo 1 pada perhitungan data tahun 2021 sebesar 493,83 ppmv dan pada perhitungan data tahun 2023 sebesar 495,05 ppmv. Kemudian pada PMT bay trafo 3 pada perhitungan data tahun 2021 sebesar 548,7 ppmv dan pada perhitungan data tahun 2023 sebesar 551,72 ppmv. Dari perhitungan tersebut untuk masing – masing PMT diketahui bahwa semua mengalami kenaikan pada tahun 2023. Hal tersebut dapat diartikan bahwa PMT bay trafo 1 dan PMT bay trafo 3 yang mempunyai waktu kerja yang cukup lama mengakibatkan kenaikan nilai dari *moisture content* yang diakibatkan adanya kandungan dari uap air akibat kondensasi yang cukup besar pada PMT yang terjadi saat proses pemadaman busur api. Walaupun demikian nilai dari *moisture content* masih sesuai dengan standar yang digunakan sesuai standar CIGRE (standar *moisture content* ≤ 3960 ppmv), sehingga gas SF_6 masih aman untuk digunakan

4. Kesimpulan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa tahanan isolasi masih memenuhi standar VDE (Catalogue 228/4), dengan nilai yang tetap di atas ambang batas meskipun mengalami penurunan pada tahun 2023, sedangkan tahanan kontak masih berada dalam batas yang dipersyaratkan oleh IEC 60694, meskipun terdapat sedikit kenaikan akibat faktor lingkungan dan penuaan material. Pengujian keserempakan kontak menunjukkan bahwa waktu respons switching antar fasa masih berada jauh di bawah batas maksimum yang diizinkan menurut SKDIR-0520/2014, sehingga PMT masih bekerja secara optimal. Selain itu, analisis kualitas gas SF6 mengindikasikan bahwa dew point, moisture content, dan purity masih dalam batas standar CIGRE, dengan sedikit peningkatan moisture content yang diperkirakan terjadi akibat proses kondensasi selama dua tahun operasi. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menegaskan bahwa PMT yang telah beroperasi lebih dari satu dekade masih dapat berfungsi dengan baik apabila dilakukan pemeliharaan yang memadai, tetapi juga menyoroti pentingnya pemantauan jangka panjang terhadap degradasi isolasi dan kualitas gas SF_6. Beberapa studi terdahulu hanya mengevaluasi kondisi PMT tanpa pengujian gas SF_6 [8], [9], sedangkan penelitian ini memberikan kontribusi baru dengan menguji kondisi gas SF_6 serta membandingkan tren perubahan dalam dua periode yang berbeda, yang dapat menjadi dasar dalam pengambilan keputusan perawatan berbasis data. Dengan demikian, penelitian ini mendukung temuan sebelumnya yang menunjukkan bahwa penurunan nilai isolasi dan peningkatan moisture content merupakan fenomena umum pada PMT yang telah lama beroperasi, namun tetap dalam batas aman jika ditangani dengan strategi pemeliharaan yang tepat. Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar penelitian masa depan menerapkan sistem pemantauan online berbasis sensor IoT untuk menganalisis perubahan parameter PMT secara real-time, serta melakukan simulasi numerik terhadap dampak degradasi isolasi dan kontak listrik terhadap performa switching PMT, guna meningkatkan efektivitas strategi pemeliharaan berbasis prediksi dalam sistem tenaga listrik.

Referensi

[1] R. M. Arias Velásquez and J. V. Mejia Lara, “Circuit breakers

500 kV degradation in substation reactors caused by inductive current," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 90, pp. 64–81, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2018.03.002.

[2] E. A. L. Vianna, A. R. Abaide, L. N. Canha, and V. Miranda, "Substations SF6 circuit breakers: Reliability evaluation based on equipment condition," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 142, pp. 36–46, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.EPSR.2016.08.018.

[3] R. A. Prasojo, D. S. Mahmudah, I. Ridzki, M. F. Hakim, and P. S. Harijanto, "Penilaian Kualitas Gas SF6 Pada GISTET 500/150 kV," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 9, no. 3, pp. 93–98, Oct. 2022, doi: 10.33795/ELPOSYS.V9I3.643.

[4] D. A. Saputra, J. Joko, A. I. Agung, and S. I. Haryudo, "Analisis Kelayakan Pemutus Tenaga Bay Trafo 2 Berdasarkan Hasil Uji Shutdown Measurement di Gardu Induk 150 KV Kenjeran Surabaya," *J. Tek. ELEKTRO*, vol. 11, no. 3, pp. 440–446, Aug. 2022, doi: 10.26740/JTE.V11N3.P440-446.

[5] J. Zhong, W. Li, R. Billinton, and J. Yu, "Incorporating a Condition Monitoring Based Aging Failure Model of a Circuit Breaker in Substation Reliability Assessment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 6, pp. 3407–3415, Nov. 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2387334.

[6] A. Galih Firdaus, R. Hidayat, J. Teknik Elektro, U. H. Singaperbangsa Karawang Jl Ronggowaluyo, T. Timur, and C. Author, "Analisa Pengujian Kelayakan PMT 150 kV Bay Mandirancan I Berdasarkan Parameter Breaker Analyzer di Gardu Induk Sunyaragi," *Elektron J. Ilm.*, vol. 13, pp. 17–24, Jun. 2021, doi: 10.30630/EJI.0.0.217.

[7] E. S. Rahman, M. Y. Mappeasse, and H. Hasrul, "STUDI PENGUJIAN KESEREMPAKAN PEMUTUS TENAGA (PMT) 150 KV MENGGUNAKAN BREAKER ANALYZER DI GARDU INDUK," *J. Media Elektr.*, vol. 20, no. 2, pp. 119–127, Apr. 2023, doi: 10.59562/METRIK.V20I2.5537.

[8] M. Aldi Prakoso, A. Imam Agung, and F. Achmad, "Analisis Pengujian dan Pemeliharaan Dua Tahunan Pemutus Tenaga (PMT) Di Gardu Induk Rungkut 150 kV," *J. Tek. ELEKTRO*, vol. 13, no. 2, pp. 144–151, Apr. 2024, doi: 10.26740/JTE.V13N2.P144-151.

[9] A. M. Fikri, H. Rudito, T. Listrik, P. Negeri, and U. Pandang, "Analisis Pengujian Pemutus Tenaga (PMT) Bay Punagaya Dalam Pemeliharaan Dua Tahunan di Gardu Induk Tallasa," *Semin. Nas. Tek. Elektro dan Inform.*, pp. 1–5, Oct. 2021, Accessed: Feb. 12, 2025. [Online]. Available: https://jurnal.poliupg.ac.id/index.php/sntei/article/view/2813

[10] B. Hasil Uji Tahanan Isolasi, T. Kontak Dan Keserempakan Kontak, A. Susanto, R. Kurnianto, M. Rajagukguk, and P. Studi Sarjana Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro, "ANALISA KELAYAKAN PEMUTUS TENAGA (PMT) 150 KV BERDASARKAN HASIL UJI TAHANAN ISOLASI, TAHANAN KONTAK DAN KESEREMPAKAN KONTAK DI GARDU INDUK SINGKAWANG," *J. Electr. Eng. Energy, Inf. Technol.*, vol. 9, no. 2, Oct. 2021, doi: 10.26418/J3EIT.V9I2.49769.

[11] A. SEWAGETRA and D. FAUZIAH, "Analisis Moisture Content dan Dew Point Gas SF6 Pada PMT di Gardu Induk Cigereleng PT PLN (Persero) Transmisi Jawa Bagian Tengah," *Pros. Semin. Nas. Energi, Telekomun. dan Otomasi*, pp. 305–315, 2021, Accessed: Feb. 12, 2025. [Online]. Available: https://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/sneto/article/view/745

[12] A. Alghifari, A. P. Putra, A. F. Pratama, and S. Sujito, "ANALISIS PENGUJIAN KUALITAS TAHANAN ISOLASI PADA TRANSFORMATOR TEGANGAN 150 KV BAY GUNUNG SARI 2 DI GARDU INDUK WARU," *Power Elektron. J. Orang Elektro*, vol. 13, no. 1, pp. 22–25, Feb. 2024, doi: 10.30591/POLEKTRO.V13I1.6248.

[13] M. S. Irawan and T. Arfianto, "Analisis Kinerja Pemutus Tenaga pada Gardu Induk 6,3 kV di PT Indonesia Power Kamojang," *Pros. Semin. Nas. Energi, Telekomun. dan Otomasi*, pp. 116–116, 2023, Accessed: Feb. 12, 2025. [Online]. Available: https://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/sneto/article/view/2409

[14] S. Sasana, Ibrahim, and R. Rahmadewi, "Analisis Uji Keserempakan Pemutus Tenaga 150kv Bay Trafo-1 Gardu Induk 150kv Tasikmalaya Baru," *J. Ilm. Wahana Pendidik.*, vol. 9, no. 12, pp. 263–267, Jun. 2023, doi: 10.5281/ZENODO.8078766.

[15] S. Aprianto and N. K. . N. K.N, "Analisis Hasil Reklamasi Gas Terhadap Kondisi SF6 Kompartemen Bay Jatirangon GIS 150 KV Miniatur," *IKRA-ITH Teknol. J. Sains dan Teknol.*, vol. 8, no. 3, pp. 22–31, Oct. 2024, doi: 10.37817/IKRAITH-TEKNOLOGI.V8I3.4162.

[16] D. Aribowo, "Analisis Hasil Uji PMT 150kV Pada Gardu Induk Cilegon Baru BAY KS 1," *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 5, no. 1.1, pp. 59–65, 2019.

[17] M. Mursal Fikri *et al.*, "Pengujian Tahanan Kontak Pemutus Tenaga 70 KV Di Gardu Induk Rengas Dengklok Karawang," *JE-Unisla*, vol. 6, no. 2, pp. 6–9, Sep. 2021, doi: 10.30736/JE-UNISLA.V6I2.688.

[18] D. S. Nurjannah *et al.*, "ANALISA PENGUJIAN KUALITAS GAS SF6 PADA PEMUTUS TENAGA (PMT) 66 KV BAY REAKTOR 4R2 DI GITET BANDUNG SELATAN," *Power Elektron. J. Orang Elektro*, vol. 10, no. 2, pp. 57–59, Jul. 2021, doi: 10.30591/POLEKTRO.V10I2.2568.

[19] D. E. Salam and E. Mulyana, "ANALISIS UJI KELAYAKAN PMT PADA JARINGAN TENAGA LISTRIK 150 KV," *Gunahumas*, vol. 4, no. 2, pp. 1–9, 2021, doi: 10.17509/GHM.V4I2.43713.

[20] M. Ridwan, "Analisis Moisture Content dan Dew Point Gas SF6 PMT di GITET Gresik PT PLN (Persero) Transmisi Jawa Bagian Timur dan Bali," *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 4, no. 2, pp. 694–704, 2023.