

Analisis Kemampuan Minyak Isolasi Transformator Daya Merek Unindo Dengan Pengujian Dissolved Gas Analysis dan Breakdown Voltage di Gardu Induk Serpong

Christiono, M. Reza Hidayat, Bagus Widiyantoro

Program Sarjana Teknik Elektro
Institut Teknologi PLN (IT-PLN)

Menara PLN, Jl. Lingkar Luar Barat Duri Kosambi, Jakarta, Indonesia, 11750
christiono@itpln.ac.id.

Abstract

The increasing demand for electric energy will always coincide with increasing equipment performance at electrical substation. Power Transformer is one of the tools that really feels the impact, namely the increasing temperature of it is conductor in the form of transformer windings. That is the reason why the transformer has insulation in it, in the form of cellulose paper and transformer oil. To know the indication of failure on the transformer, we can test one of the transformer insulation, namely transformer oil. By doing the DGA testing and Breakdown Voltage of Transformer Oil Testing. After doing the DGA test by analyzing the testing result using TDCG, Key Gas, Doernenburg Ratio, Rogers Ratio, and Duval Triangle Methods. It can be seen that transformer 1 and 3 have experienced a failure indication in the form of temperature failure (Thermal Fault). It can be seen from the high content of methane and ethane gas. And after testing the voltage of the transformer oil breakdown, it can be seen that the condition of the transformer oil breakdown voltage 1 and 3 in the first test are still in good condition. Contrast with the second test, value of the breakdown voltage from both transformer are very bad. That is because the distance between the time of sampling with the testing is very far away and it causes many contaminants in the transformer oil.

Keywords : *BDV, DGA, Failure, Insulation, Oil, Transformer*

Abstrak

Semakin meningkatnya angka permintaan energi listrik, maka akan semakin meningkat juga kinerja peralatan yang berada di Gardu Induk. Transformator daya adalah salah satu alat yang sangat merasakan dampaknya yaitu dengan semakin meningkatnya suhu konduktor berupa lilitan transformator. Oleh karena itu trafo memiliki isolasi di dalamnya dalam bentuk kertas selulosa dan minyak trafo. Untuk mengetahui indikasi kegagalan pada trafo, kita dapat menguji salah satu jenis isolasi pada trafo yaitu minyak trafo. Dengan cara pengujian DGA dan pengujian Tegangan Tembus Minyak Trafo. Setelah dilakukan pengujian DGA dengan menganalisa hasil pengujian menggunakan metode TDCG, metode Key Gas, metode Rasio *Doernenburg*, Metode Rasio Rogers, dan metode Segitiga Duval. Dapat diketahui bahwa transformator 1 dan 3 mengalami indikasi kegagalan berupa kegagalan akibat suhu (*Thermal Fault*). Hal tersebut dapat dilihat dari kandungan gas metana dan etana yang nilainya cukup tinggi. Dan setelah dilakukan pengujian tegangan tembus minyak trafo, dapat diketahui bahwa kondisi tegangan tembus minyak trafo 1 dan 3 pada pengujian pertama masih dalam kondisi baik. Sebaliknya pada pengujian kedua nilai tegangan tembus kedua trafo sangat buruk. Hal tersebut dikarenakan jarak antara waktu pengambilan sampel dengan pengujian sangat jauh sekali dan hal tersebut menyebabkan banyaknya kontaminan di dalam minyak trafo tersebut.

Kata kunci : *BDV, DGA, Isolasi, Kegagalan, Minyak, Transformator*

I. PENDAHULUAN

Permintaan energi listrik selalu tumbuh lebih tinggi dibandingkan dengan jenis energi lainnya, dengan porsi terbesar di sektor rumah tangga, kemudian sektor industri, sektor komersial,

sektor transportasi dan sektor lainnya. [1] Dengan semakin meningkatnya angka permintaan energi listrik, maka akan semakin meningkat juga tingkat pembebanan pada trafo. Semakin tinggi tingkat pembebanan trafo maka semakin tinggi temperatur minyak trafo dan hal

tersebut mampu menimbulkan tegangan tembus dari minyak trafo akan semakin mengecil. Dan kenaikan temperatur juga memberikan penurunan kualitas isolasi dari minyak transformator yang terpasang pada transformator daya.

Di dalam pengoperasian trafo berpendingin minyak, menghasilkan senyawa-senyawa gas sebagai hasil dari proses penuaan dan dampak dari gangguan dan ketidaknormalan operasi trafo. Seperti pada trafo 1 di gardu induk trafo yang mengalami kelonggaran pada bagian *drain valve* trafo yang bisa menjadi jalan masuknya udara ke dalam trafo sehingga trafo bisa terkontaminasi oleh kandungan gas tersebut.

DGA (*Dissolved Gas Analysis*) merupakan metode analisis untuk melihat kondisi pada transformator dengan melihat kandungan dari gas terlarut di dalam minyak transformator yang diuji dan sampel minyak trafo yang digunakan berasal dari trafo yang sedang tidak beroperasi. [2] Gas-gas terlarut tersebut diekstrak dan didapatkan hasil uji dalam satuan ppm. Dengan mengetahui jenis senyawa gas yang dihasilkan dari pengoperasian trafo, maka hal tersebut mampu menjadi dasar untuk mengetahui dampaknya terhadap suatu trafo. [3]

II. METODE

A. Proses Penentuan Gas Terlarut Minyak Trafo

Setelah dilakukan pengambilan sampel minyak sesuai dengan langkah-langkah yang tertera dalam buku pedoman pemeliharaan Transformator Tenaga PT.PLN (Persero). Langkah selanjutnya yang dilakukan yaitu menentukan kandungan gas terlarut di dalam sampel minyak tersebut. Terdapat dua langkah dalam menentukan kandungan gas terlarut minyak trafo, yang pertama yaitu dengan memisahkan campuran gas dari minyak trafo dengan menggunakan *Gas Extractor*. Langkah yang kedua yaitu dengan menggunakan metode penguraian komponen gas (*chromatography*).

B. Analisa pada Metode DGA (*Dissolved Gas Analysis*)

DGA (*Dissolved Gas Analysis*) merupakan analisis kondisi transformator yang dilihat dari hasil perhitungan jumlah gas terlarut pada minyak trafo. Jumlah gas terlarut yang mudah terbakar atau TDCG (*Total Dissolved Combustible Gas*) akan menunjukkan apakah transformator yang diuji masih dalam kondisi

normal, waspada atau kondisi kritis [2]. Terdapat 4 kriteria tingkatan kondisi telah dikembangkan untuk mengklasifikasikan kondisi trafo pada hasil pengujian minyak isolasi. Masing-masing kondisi antara lain sebagai berikut:

Setelah didapatkan hasil pengujian, selanjutnya dilakukan interpretasi data hasil pengujian.

1) Metode Key Gas

Key gas atau gas kunci didefinisikan sebagai gas-gas yang terbentuk pada trafo berdasarkan jenis gas yang khas atau lebih dominan terbentuk pada temperature yang menghasilkan indikasi gas tertentu [4]. Perlu dihitung persentase gas dominan yang terkandung dengan rumus di bawah ini:

$$\text{Gas Terlarut} = \frac{\text{Nilai gas terlarut}}{\text{TDCG}} \times 100 \% \dots\dots\dots(1)$$

Terdapat 4 kondisi yang mampu menggambarkan kondisi trafo dilihat dari persentase gas terlarut yang telah dihitung antara lain sebagai berikut:

- a) Thermal Oil, tanda menunjukkan adanya pemanasan lebih pada minyak. Gas dominan yang terkandung adalah Etilen (C_2H_4).
- b) Thermal Selulose, sejumlah karbon dioksida terlibat akibat pemanasan selulosa. Gas dominan yang terkandung adalah Karbon Monoksida (CO).
- c) Electrical Partial Discharge, terjadi gejala partial discharge pada minyak isolasi akibat konsentrasi hidrogen. Gas dominan yang terkandung adalah Hidrogen (H_2).
- d) Electrical Arcing, terjadi gejala busur api pada minyak akibat konsentrasi asetilen tersebut. Gas dominan yang terkandung adalah Asetilen (C_2H_2).

2) Metode Rasio Doernenburg

Metode rasio doernenburg merupakan metode guna menganalisis indikasi kegagalan dengan menggunakan empat perhitungan gas rasio dari lima jenis gas yang dihitung untuk menentukan tipe kegagalan yang terjadi sesuai standar IEEE C57.104 tahun 2008.

$$\text{Rasio 1 (R1)} = \frac{CH_4}{H_2} \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{Rasio 2 (R2)} = \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{Rasio 3 (R3)} = \frac{C_2H_2}{CH_4} \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{Rasio 4 (R4)} = \frac{C_2H_6}{C_2H_2} \dots\dots\dots(5)$$

TABEL 1. RASIO DOERNENBURG [5]

No	Saran Diagnosa Kegagalan	Rasio 1	Rasio 2	Rasio 3	Rasio 4
		Minyak	Minyak	Minyak	Minyak
1	Dekomposisi	>1,0	<0,75	<0,3	>0,4

	Thermal				
2	Partial Discharge	<0,1	Not Significant	<0,3	>0,4
3	Arching	>0,1 <1,0	>0,75	>0,3	<0,4

3) Metode Rasio Roger

Metode rasio roger menggunakan tiga perhitungan gas rasio dari lima gas individu untuk mengindikasikan salah satu dari enam tipe kegagalan.

$$\text{Rasio 2 (R2)} = \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{Rasio 1 (R1)} = \frac{CH_4}{H_2} \dots\dots\dots(7)$$

$$\text{Rasio 5 (R5)} = \frac{C_2H_4}{C_2H_6} \dots\dots\dots(8)$$

TABEL 2. KODE RASIO ROGER [5]

Rentang Kode Roger	R2 $\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	R1 $\frac{CH_4}{H_2}$	R5 $\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
<0,1	0	1	0
0,1 – 1	1	0	0
1 – 3	1	2	1
>3	2	2	2

4) Metode Segitiga Duval

Metode segitiga duval menggunakan analisa komposisi gas CH₄, C₂H₄, C₂H₂ dalam bentuk persen. Persentase tersebut diperoleh dari rumusan sebagai berikut:

$$\% C_2H_2 = \frac{100 x}{x + y + z} \dots\dots\dots(9)$$

$$\% C_2H_4 = \frac{100 y}{x + y + z} \dots\dots\dots(10)$$

$$\% CH_4 = \frac{100 z}{x + y + z} \dots\dots\dots(11)$$

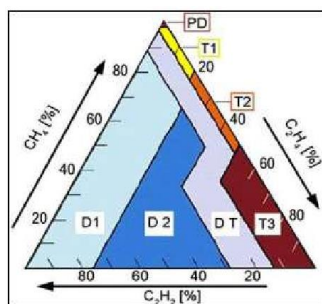
Dimana:

untuk x = C₂H₂ dalam ml/L

untuk y = C₂H₄ dalam ml/L

untuk z = CH₄ dalam ml/L

Terdapat 6 area yang terbagi pada segitiga duval,



Gambar 1. Grafik Segitiga Duval

TABEL 3. AREA DIAGNOSA FAULT PADA SEGITIGA DUVAL [2]

Area	Diagnosa Fault
(PD)	Partial Discharge
(D1)	Low Energy Discharge
(D2)	High Energy Discharge
(T1)	Thermal Fault Temperature less than 300°C
(T2)	Thermal Fault Temperature Range 300°C - 700°C
(T3)	Thermal Fault Temperature over than 700°C

C. Pengujian Tegangan Tembus

Pengujian tegangan tembus dilakukan untuk mengetahui kemampuan minyak isolasi dalam menahan stress tegangan. Alat yang biasa digunakan dalam pengujian tegangan tembus bernama Breakdown Voltage [2] Pengujian ini mengacu pada standar IEC 60156.

TABEL 4. STANDAR TEGANGAN TEMBUS [6]

Tegangan Operasi (kV)	Jarak Gap (mm)	Nilai Minimum (kV)
Vn ≤ 36	2,5	30
36 < Vn ≤ 70	2,5	35
70 < Vn ≤ 170	2,5	40
Vn ≥ 170	2,5	50

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Transformator 1

1) Pengujian Pertama

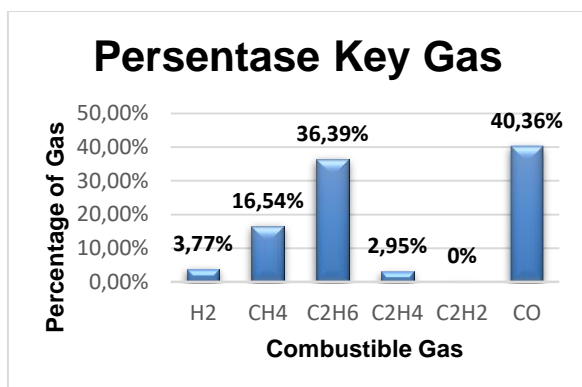
TABEL 5. HASIL PENGUJIAN PERTAMA TRANSFORMATOR 1

No	Parameter	Hasil Pengujian (Ppm)	Kondisi Transformator Standard IEEE C57 104 2008
1	Hydrogen (H ₂)	29,03	Kondisi 1
2	Methane (CH ₄)	127,4	Kondisi 2
3	Ethane (C ₂ H ₆)	280,31	Kondisi 4
4	Ethylene (C ₂ H ₄)	22,74	Kondisi 1
5	Acetylene (C ₂ H ₂)	0	Kondisi 1
6	Carbon Monoxyde (CO)	310,92	Kondisi 1
7	Carbon Dioxyde (CO ₂)	4464,07	Kondisi 3
TDCG		770,4	Kondisi 2

a) Analisis TDCG

Jika dilihat dari tabel 5 didapatkan jumlah nilai TDCG sebesar 770,4 ppm dan jika disesuaikan dengan standar IEEE C57.104, 2008 berada di kondisi 2 dimana dalam kondisi ini merupakan tingkat gas mulai tinggi dimana gas-gas yang terlarut mudah terbakar dan perlu kewaspadaan.

b) Analisis Key Gas



Gambar 2. Grafik Hasil Pengujian Pertama Trafo 1

Dari gambar 2 gas yang dominan yaitu gas Karbon monoksida (CO). Jika berdasarkan standar acuan IEEE C57.104, 2008 maka trafo 1 mengalami pemanasan lebih pada isolasi kertasnya atau biasa disebut dengan *overheated selulose (thermal selulose)*.

c) Analisis Rasio Doernenburg

$$(R1) = 4,39 \quad (R3) = 0$$

$$(R2) = 0 \quad (R4) = \text{undefined}$$

Berdasarkan standar IEEE C57.104, 2008 maka indikasi kegagalan yang terjadi pada trafo 1 tidak dapat ditentukan karena salah satu hasil perhitungan tidak dapat didefinisikan.

d) Analisis Rasio Roger

$$(R2) = 0 \quad (R1) = 4,39 \quad (R5) = 0,08$$

Di lihat dari ketiga rasio jika disesuaikan dengan standar IEEE C57.104,2008 tipe gangguan yang diketahui yaitu *thermal fault* yang diakibatkan pemanasan berlebih pada suhu antara 150° C-300°C.

e) Analisis Segitiga Duval

$$\% C_2H_2 = 0$$

$$\% C_2H_4 = 15,15$$

$$\% CH_4 = 84,85$$

Dari hasil perhitungan persentase rasio, jika disesuaikan dengan gambar 1 maka diagnosis yang terjadi pada trafo 1 adalah *thermal fault < 300°C*

2) Pengujian Kedua

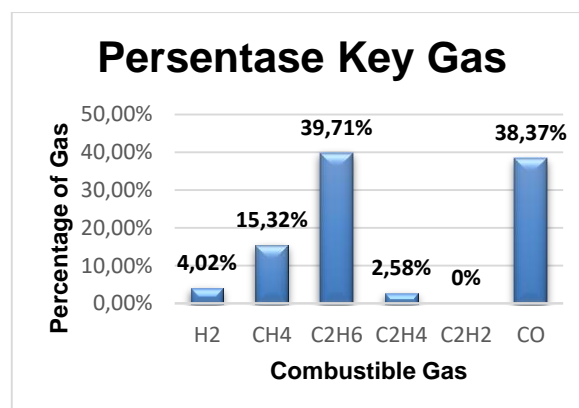
TABEL 6. HASIL PENGUJIAN KEDUA TRANSFORMATOR 1 .

No	Parameter	Hasil Pengujian (Ppm)	Kondisi Transformator Standard IEEE C57 104 2008
1	Hydrogen (H ₂)	29,33	Kondisi 1
2	Methane (CH ₄)	111,78	Kondisi 1
3	Ethane (C ₂ H ₆)	289,67	Kondisi 4
4	Ethylene (C ₂ H ₄)	18,85	Kondisi 1
5	Acethylene (C ₂ H ₂)	0	Kondisi 1
6	Carbon Monoxyde (CO)	279,92	Kondisi 1
7	Carbon Dioxyde (CO ₂)	3805,88	Kondisi 3
TDCG		729,55	Kondisi 2

a) Analisis TDCG

Jika dilihat dari tabel 6 didapatkan jumlah nilai TDCG sebesar 729,55 ppm dan jika disesuaikan dengan standar IEEE C57.104, 2008 berada di kondisi 2 dimana dalam kondisi ini merupakan tingkat gas mulai tinggi dimana gas-gas yang terlarut mudah terbakar dan perlu kewaspadaan.

b) Analisis Key Gas



Gambar 3. Grafik Hasil Pengujian Pertama Trafo 1

Dari gambar 3 gas yang dominan yaitu gas Karbon monoksida (CO). Jika berdasarkan standar acuan IEEE C57.104, 2008 maka trafo 1 mengalami

Analisis Kemampuan Minyak Isolasi Transformator
(Christiono, M. Reza Hidayat, Bagus Widiyantoro : 100 - 106)

pemanasan lebih pada isolasi kertasnya atau biasa disebut dengan *overheated selulose (thermal selulose)*.

c) Analisis Rasio Doernenburg

$$(R1) = 3,81 \quad (R3) = 0$$

$$(R2) = 0 \quad (R4) = \text{undefined}$$

Berdasarkan standar IEEE C57.104, 2008 maka indikasi kegagalan yang terjadi pada trafo 1 tidak dapat ditentukan karena salah satu hasil perhitungan tidak dapat didefinisikan.

d) Analisis Rasio Roger

$$(R2) = 0 \quad (R1) = 3,81 \quad (R5) = 0,02$$

Di lihat dari ketiga rasio jika disesuaikan dengan standar IEEE C57.104,2008 tipe gangguan yang diketahui yaitu *thermal fault* yang diakibatkan pemanasan berlebih pada suhu antara 150° C-300°C.

e) Analisis Segitiga Duval

$$\% C_2H_2 = 0$$

$$\% C_2H_4 = 14,43$$

$$\% CH_4 = 85,56$$

Dari hasil perhitungan persentase rasio, jika disesuaikan dengan gambar 1 maka diagnosa yang terjadi pada trafo 1 adalah *thermal fault < 300°C*

B. Transformator 3

1) Pengujian Pertama

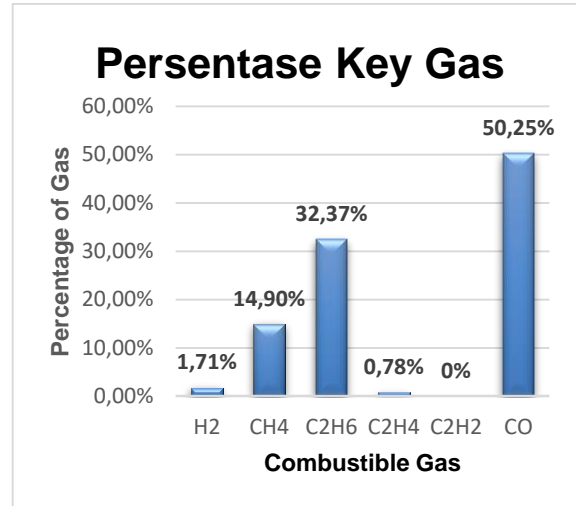
TABEL 7. HASIL PENGUJIAN PERTAMA TRANSFORMATOR 3

No	Parameter	Hasil Pengujian (Ppm)	Kondisi Transformator Standard IEEE C57 104 2008
1	Hydrogen (H ₂)	18,71	Kondisi 1
2	Methane (CH ₄)	163,01	Kondisi 2
3	Ethane (C ₂ H ₆)	354,01	Kondisi 4
4	Ethylene (C ₂ H ₄)	8,48	Kondisi 1
5	Acetylene (C ₂ H ₂)	0	Kondisi 1
6	Carbon Monoxyde (CO)	549,6	Kondisi 2
7	Carbon Dioxyde (CO ₂)	8010,91	Kondisi 3
TDCG		1093,81	Kondisi 2

a) Analisis TDCG

Jika dilihat dari tabel 7 didapatkan jumlah nilai TDCG sebesar 1093,81 ppm dan jika disesuaikan dengan standar IEEE C57.104, 2008 berada di kondisi 2 dimana dalam kondisi ini merupakan tingkat gas mulai tinggi dimana gas-gas yang terlarut mudah terbakar dan perlu kewaspadaan

b) Analisis Key Gas



Gambar 4. Grafik Hasil Pengujian Pertama Trafo 3

Dari gambar 3 gas yang dominan yaitu gas Karbon monoksida (CO). Jika berdasarkan standar acuan IEEE C57.104, 2008 maka trafo 1 mengalami pemanasan lebih pada isolasi kertasnya atau biasa disebut dengan *overheated selulose (thermal selulose)*.

c) Analisis Rasio Doernenburg

$$(R1) = 8,71 \quad (R3) = 0$$

$$(R2) = 0 \quad (R4) = \text{undefined}$$

Berdasarkan standar IEEE C57.104, 2008 maka indikasi kegagalan yang terjadi pada trafo 3 tidak dapat ditentukan karena salah satu hasil perhitungan tidak dapat didefinisikan

d) Analisis Rasio Roger

$$(R2) = 0 \quad (R1) = 8,71 \quad (R5) = 0,02$$

Di lihat dari ketiga rasio jika disesuaikan dengan standar IEEE C57.104,2008 tipe gangguan yang diketahui yaitu *thermal fault* yang diakibatkan pemanasan berlebih pada suhu antara 150° C-300°C.

e) Analisis Segitiga Duval

$$\% C_2H_2 = 0$$

$$\% C_2H_4 = 4,95$$

$$\% CH_4 = 95,06$$

Dari hasil perhitungan persentase rasio, jika disesuaikan dengan gambar 1 maka diagnosa yang terjadi pada trafo 1 adalah *thermal fault < 300°C*

2) *Pengujian Kedua*

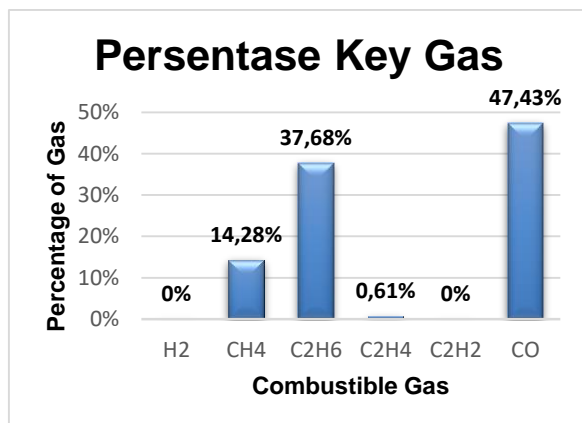
TABEL 8. HASIL PENGUJIAN KEDUA TRANSFORMATOR 3

No	Parameter	Hasil Pengujian (Ppm)	Kondisi Transformator Standard IEEE C57 104 2008
No	Parameter	Hasil Pengujian (Ppm)	Kondisi Transformator Standard IEEE C57 104 2008
1	Hydrogen (H ₂)	0	Kondisi 1
2	Methane (CH ₄)	141,88	Kondisi 2
3	Ethane (C ₂ H ₆)	374,31	Kondisi 4
4	Ethylene (C ₂ H ₄)	6,07	Kondisi 1
5	Acetylene (C ₂ H ₂)	0	Kondisi 1
6	Carbon Monoxide (CO)	471,15	Kondisi 2
7	Carbon Dioxide (CO ₂)	5908,44	Kondisi 3
TDCG		993,41	Kondisi 2

a) *Analisis TDCG*

Jika dilihat dari Tabel. 8 didapatkan jumlah nilai TDCG sebesar 993,41 ppm dan jika disesuaikan dengan standar IEEE C57.104, 2008 berada di kondisi 2 dimana dalam kondisi ini merupakan tingkat gas mulai tinggi dimana gas-gas yang terlarut mudah terbakar dan perlu kewaspadaan

b) *Analisis Key Gas*



Gambar 5. Grafik Hasil Pengujian Kedua Trafo 3

Dari gambar 3 gas yang dominan yaitu gas Karbon monoksida (CO). Jika berdasarkan standar acuan IEEE C57.104, 2008 maka trafo 1 mengalami pemanasan lebih pada isolasi kertasnya atau biasa disebut dengan *overheated selulose (thermal selulose)*.

c) *Analisis Rasio Doernenburg*

$$(R1) = \text{undefined} \quad (R3) = 0$$

$$(R2) = 0 \quad (R4) = \text{undefined}$$

Berdasarkan standar IEEE C57.104, 2008 maka indikasi kegagalan yang terjadi pada trafo 3 tidak dapat ditentukan karena salah satu hasil perhitungan tidak dapat didefinisikan

d) *Analisis Rasio Roger*

$$(R2) = 0 \quad (R1) = \text{undefined} \quad (R5) = 0,02$$

Di lihat dari ketiga rasio jika disesuaikan dengan standar IEEE C57.104,2008 tidak dapat ditentukan akibat salah satu hasil perhitungan rasionya tidak dapat terdefiniskan.

e) *Analisis Segitiga Duval*

$$\% C_2H_2 = 0$$

$$\% C_2H_4 = 4,01$$

$$\% CH_4 = 95,90$$

Dari hasil perhitungan persentase rasio, jika disesuaikan dengan gambar 1 maka diagnosa yang terjadi pada trafo 1 adalah *thermal fault < 300°C*

C. *Pengujian Tegangan Tembus*

1) *Transformator 1*

Pengujian pertama = 73,8
 Pengujian kedua = 14,7

Setelah di analisa dari masing-masing hasil pengujian tegangan tembus minyak transformator 1. Penulis mencoba menyimpulkan bahwa, perbedaan nilai tegangan tembus yang terjadi diakibatkan oleh perlakuan eksternal terhadap sampel minyak setelah di ambil, dan jarak waktu pengambilan ke pengujian yang sangat jauh pada sampel minyak pengujian kedua

2) *Transformator 3*

Pengujian pertama = 62,4
 Pengujian kedua = 12,79

Setelah di analisa dari masing-masing hasil pengujian tegangan tembus minyak transformator 1. Penulis

mencoba menyimpulkan bahwa, perbedaan nilai tegangan tembus yang terjadi diakibatkan oleh perlakuan eksternal terhadap sampel minyak setelah di ambil, dan jarak waktu pengambilan ke pengujian yang sangat jauh pada sampel minyak pengujian kedua

IV. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan penulis bisa menyimpulkan bahwa dilihat dari hasil analisis DGA (*Dissolved Gas Analysis*) Transformator 1 dan Transformator 3 di Gardu Induk Serpong di diagnosa mengalami kegagalan berupa *Thermal Fault*. Hal tersebut bisa terjadi akibat pemanasan berlebih mencapai lebih dari 500°C. Dan kondisi tegangan tembus pada kedua trafo masih dalam kondisi baik, meskipun nilai pengujian tegangan tembus kedua mengalami penurunan nilai yang drastis, namun hal itu tidak bisa dijadikan sebagai acuan karena bilai pengujian kedua bukanlah nilai yang sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Soebagio, Transformator, Surabaya: ITS Press, 2012.
- [2] H. Raka Budi Satrio and A. Nugroho, "Studi Pengaruh Peluahan Parsial Terhadap Penuaan Kualitas Minyak Transformator," *Jurnal Transient*, 2018.
- [3] J. O. Wuwung, "Pengaruh Pembebanan Terhadap Kenaikan Suhu pada Belitan Transformator Daya Jenis Terendam Minyak," *Tekno*, 2010.
- [4] W. L. Abdul Syakur, "Penerapan Metode Interpretasi Rasio Roger, Segitiga Duval, Breakdown Test untuk Diagnosis Kelayakan Minyak Transformator," *Jurnal Teknik*, 2019.
- [5] 4.-1. SPLN, Pedoman Penerapan Spesifikasi dan Pemeliharaan Minyak Isolasi, 1982.
- [6] IEEE C57.104, "Guide for the interpretation of Gases Generated in Oil Immersed Transformers," 2008.
- [7] R. Hardityo, "Deteksi dan Analisis Indikasi Kegagalan Transformator dengan Metode Analisis Gas Terlarut," Universitas Indonesia, Jakarta, 2008.
- [8] PT PLN (Persero), Buku Petunjuk Batasan Operasi dan Pemeliharaan Peralatan Penyaluran Tenaga Listrik: Transformator Tenaga (No. Dokumen: 1-22/HARLUR-PST/2009), Jakarta: Author, 2009.
- [9] PT PLN (Persero), Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga, Jakarta, 2014.
- [10] PT PLN (Persero), Buku Pedoman Pemeliharaan Pemutus Tenaga (No. Dokumen: PDM/PGI/07:2014), Jakarta: Author, 2014.
- [11] B. Wijonarko, "Analisis Pengaruh Kenaikan Temperatur dan Umur Minyak Transformator Terhadap Degradasi Tegangan Tembus Minyak Transformator," Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta, 2018.
- [12] B. T. Setiawan, "Analisis Pengaruh Besar Pembebanan Transformator Terhadap Kandungan Gas Terlarut pada Minyak Berdasarkan Uji DGA (Dissolved Gas Analysis) Dengan Metode TDCG, Rogers Ratio dan Duvals Triangle pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap UBJOM Tanjung Awar-Awar JATIM," 2019.
- [13] T. K. Siatan, "Analisis Indikasi Kegagalan pada Transformator Tenaga 150/20 kV pada Gardu Induk APP Cawang dengan Menggunakan Metode DGA (Dissolved Gas Analysis)," STT-PLN Jakarta, Jakarta, 2017.
- [14] A. D. B. Kholqi, "Analisa Keadaan Minyak Isolasi Transformator 70 kV Dengan Metode Dissolved Gas Analysis (DGA) dan Tegangan Tembus (Breakdown Voltage) pada Pemabngkit Listrik Tenaga Air (PLTA) di PT. PJB UP Brantas SUB - Unit PLTA Mendalan," Universitas Jember, Jember, 2019.
- [15] Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, *Outlook Energi Indonesia*, 2019.
- [16] IEC 60156, in *IEC International Standard*, 1995.