

Research Article

Analisis Indikasi Kegagalan Transformator Dengan Metode Oil Analysis Pada PT Kilang Pertamina Internasional RU II Dumai

Antonius Rajagukguk¹, Anisah Risle Munte^{1,*}, Althaf Iskandar¹

ABSTRAK: Dalam operasi penyaluran listrik, Transformator tidak lepas dari kegagalan. Salah satunya adalah panas berlebih pada sistem isolasinya. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui apakah minyak isolasi yang di gunakan pada PT. Kilang Pertamina masih dalam kondisi bagus atau perlu dilakukan pergantian. Artikel ini menggunakan dua metode pengujian minyak yaitu *Dissolved Gas Analysis* (DGA) dan *Breakdown Voltage* (BDV) yang dilakukan di PT. Kilang Pertamina Internasional RU II Dumai untuk mengetahui kondisi isolasi minyak yang sedang digunakan. Pada DGA, metode analisis yang dilakukan adalah TDCG, *Key Gas*, *Roger's Ratio* dan Segitiga Duval untuk mendeteksi kegagalan pada isolasi minyak transformator. Sedangkan pada BDV, mekanisme analisis dilakukan dari rata – rata hasil pengujian untuk melihat kualitas isolasi minyak tersebut. Dari penelitian ini, didapatkan hasil analisis DGA menunjukkan bahwa suhu isolasi minyak transformator melebihi 700° C. Berdasarkan standar IEEE C.57-104.2008, suhu di atas 100°C mengindikasikan *overheating*. Pada uji BDV, nilai tegangan tembus transformator sebesar 24,48 kV. Berdasarkan standar IEC 60156, isolasi minyak yang baik seharusnya memiliki tegangan tembus diatas 30 kV. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kualitas isolasi minyak buruk. Pada hasil uji validasi gas C₂H₄ dan C₂H₆ terhadap waktu dengan penelitian terdahulu menunjukkan adanya tren kenaikan.

Kata kunci: Breakdown Voltage, Dissolved Gas Analysis, Isolasi Minyak, Overheating, Transformator

1. PENDAHULUAN

Transformator merupakan aset penting dalam sistem tenaga listrik karena berperan dalam menaikkan dan menurunkan level tegangan. Selama operasi, transformator rentan mengalami kegagalan termal maupun elektrik yang dapat menurunkan umur pakai, menyebabkan kerusakan, dan menimbulkan kerugian finansial akibat biaya perbaikan yang tinggi dan waktu henti operasional yang lama [4]. Oleh karena itu, pemantauan kondisi transformator secara berkala sangat diperlukan.

Salah satu penyebab utama kegagalan adalah panas berlebih pada minyak isolasi. Faktor-faktor seperti pembebanan berlebih, pelepasan beban mendadak, arus eddy, oksidasi, serta kondisi lingkungan dapat meningkatkan suhu operasi transformator [2]. Peningkatan suhu ini mempercepat degradasi minyak isolasi, menghasilkan gas terlarut, partikel padat, dan uap air yang menurunkan kualitas isolasi dan dapat memicu terjadinya *breakdown* [3].

OPEN ACCESS



Afiliasi:

¹Program Studi Teknik Elektro, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia

Korespondensi:

Email: anisah.risle5580@student.unri.ac.id

Diterima Redaksi:

06-08-2025

Selesai Revisi:

02-12-2025

Diterbitkan Online:

28-12-2025

Cara mengutip artikel ini (IEEE):

A. Rajagukguk, A. R. Munte, and A. Iskandar, "Analisis Indikasi Kegagalan Transformator Dengan Metode Oil Analysis Pada PT Kilang Pertamina Internasional RU II Dumai", *ET*, vol. 1, no. 02, Dec. 2025.

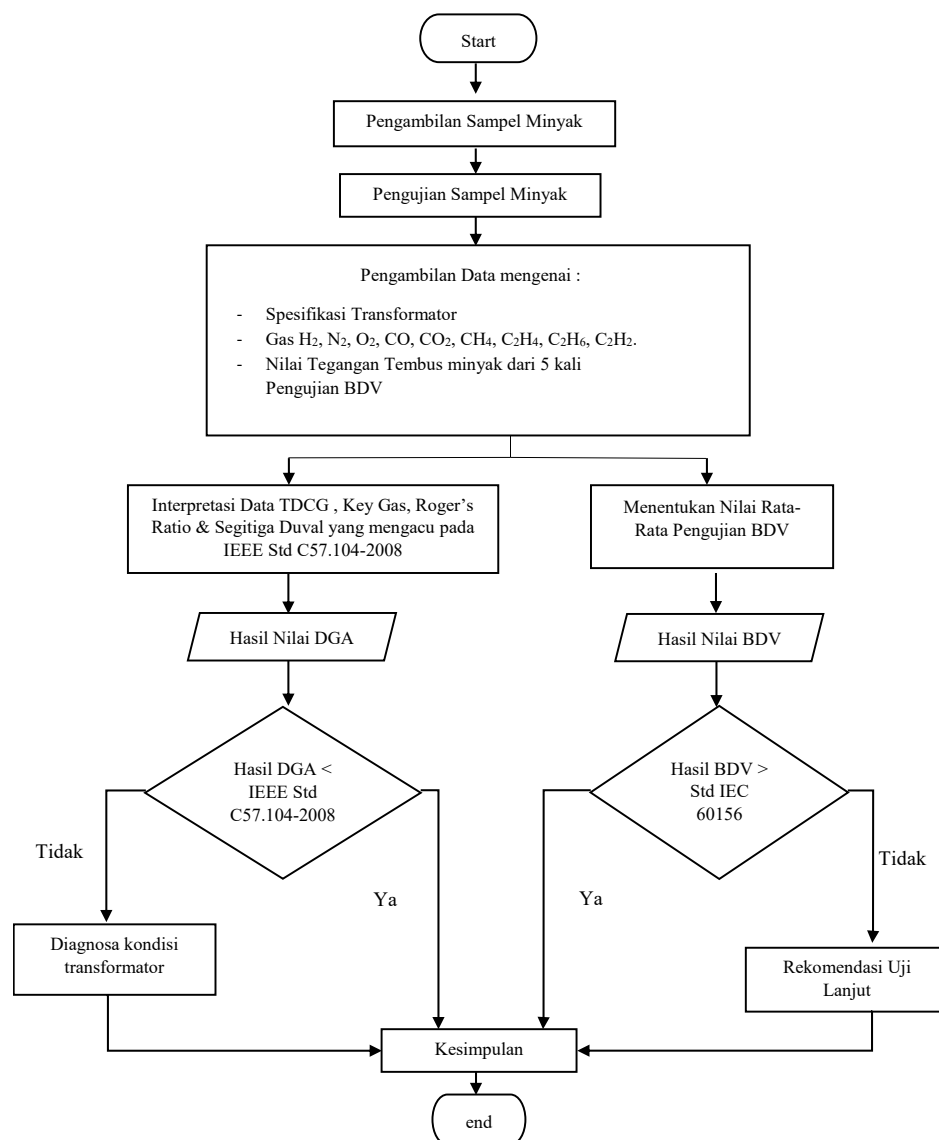
This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Seiring dengan kemajuan teknologi, ditemukan metode untuk menguji kondisi minyak transformator, yaitu dengan menggunakan pengujian *dissolved gas analysis* (DGA) untuk mengukur jumlah gas yang terlarut dalam minyak, dan pengujian *Breakdown Voltage* (BDV) untuk mengukur kekuatan isolasi. Kedua metode pengujian ini telah digunakan di PT. Kilang Pertamina Internasional Rinery Unit II Dumai. Hasil dari pengujian DGA akan dapat menentukan dan memprediksi jenis gangguan yang terjadi pada transformator. Sedangkan untuk hasil pengujian BDV akan dapat menunjukkan apakah isolasi minyak mengandung kontaminan atau masih memiliki kekuatan dielektrik yang baik.

2. METODE PENELITIAN

Dalam bagian ini akan dijelaskan *Flowchart* serta langkah – langkah dari pengujian isolasi minyak transformator berupa *Dissolved Gas Analysis* (DGA) dan *Breakdown Voltage* (BDV). Gambar 1 merupakan *flowchart* yang berfungsi sebagai acuan untuk memastikan bahwa setiap tahapan penelitian dilakukan dengan terstruktur dan berurutan.



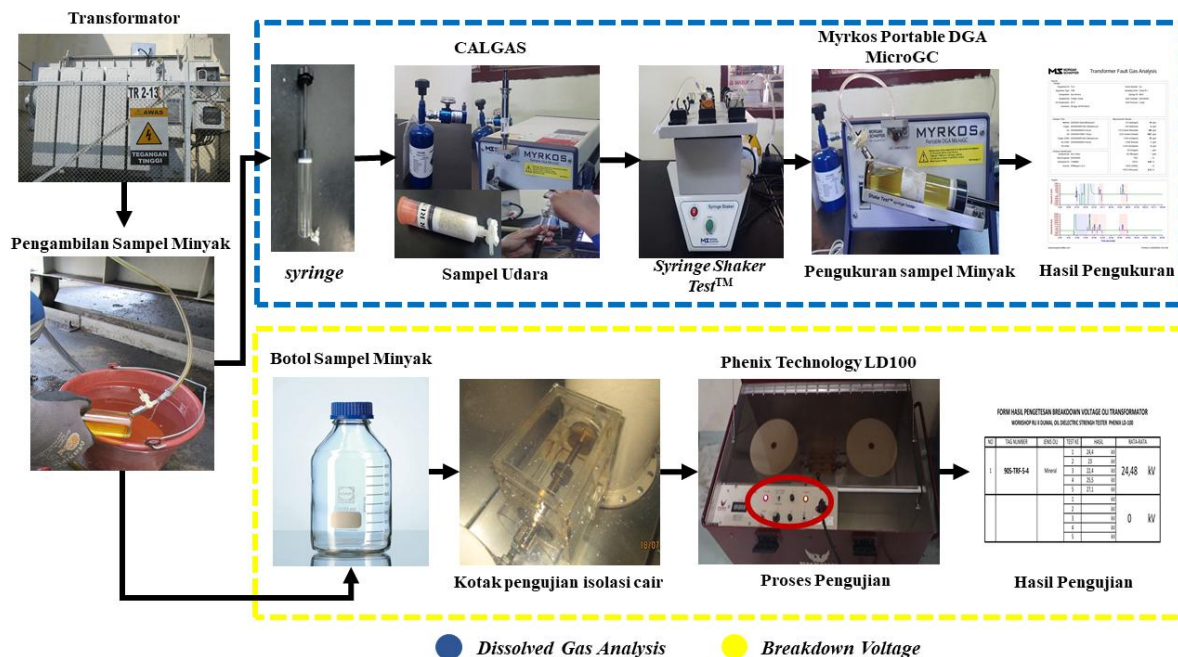
Gambar 1. Flowchart Penelitian

Proses diawali dengan pengambilan sampel minyak yang akan diuji. Sampel minyak yg telah diambil akan dilakukan pengujian berupa DGA dan BDV. Setelah Pengujian selesai dilakukan, maka selanjutnya adalah melakukan pengumpulan data hasil dari pengujian DGA berupa kandungan gas yang terdeteksi pada saat pengujian dan data hasil dari lima kali pengujian BDV untuk melihat nilai rata – rata yang dihasilkan nanti. Selain itu, data berupa spesifikasi transformator dan pembebanan dapat diperoleh dari hasil wawancara dengan karyawan PT. Kilang Pertamina Internasional RU II yang berkompeten mengenai transformator.

Setelah data yang diperoleh dari hasil observasi dan pengujian lengkap, data akan diolah untuk memastikan bahwa hasil uji DGA (*Dissolved Gas Analysis*) masuk ke dalam kondisi yang ditetapkan, sesuai dengan IEEE std.C57 104.2008. Adapun metode interpretasi data uji DGA yang digunakan adalah TDCG, *Key Gas*, *Roger's Ratio* dan Segitiga Duval yang nantinya akan diketahui keadaan minyak transformator yang sedang diujikan tersebut. Lalu dilanjut dengan mengelolah data pengujian *Breakdown Voltage* dengan mencari rata – rata dari hasil pengujian BDV sebanyak lima kali untuk mengetahui keadaan minyak transformator. Adapun untuk nilai hasil pengujian DGA dikatakan baik apabila nilai hasil dari pengujian kurang dari standar IEEE std.C57 104.2008. dan untuk BDV, nilai hasil dikatakan baik apabila besar dari standar IEC 60156.

2.1. Diagram Blok Pengujian DGA dan BDV

Untuk memahami proses dan prosedur dari kedua jenis pengujian ini, *Standard Operating Procedure* (SOP) yang berlaku akan dijelaskan melalui diagram blok yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Blok Pengujian DGA dan BDV

Berdasarkan Gambar 2 dapat terlihat alur dari pengujian DGA dan BDV yang sesuai dengan *Standard Operating Procedure* di PT. Kilang Pertamina Internasional RU II Dumai.

Bagian yang berwarna biru merupakan alur dari pengujian *Dissolved Gas Analysis*. Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat DGA Analyzer bernama Myrkos Morgan Schaffer produk dari perusahaan Doble Engineering yang berasal dari Negara Canada. Proses dimulai dengan pengambilan sampel minyak dengan menggunakan *syringe* berbentuk seperti suntikan. Nantinya saluran *drain valve* akan disambungkan selang untuk jalur jalannya

minyak tersebut yang dihubungkan juga ke *syringe*. Setelah itu Minyak dari *syringe* dikeluarkan dan diambil ulang hingga tidak ada gelembung, biasanya dilakukan sebanyak tiga kali.

Setelah dilanjutkan dengan proses kalibrasi alat Myrkos Morgan Schaffer menggunakan CALGAS dengan menyuntikkan sekitar 4-3 cc. Kemudian akan dilakukan injeksi ke alat Myrkos agar dapat menentukan nilai awal untuk konversi. Setelah kalibrasi CALGAS, selanjutnya adalah kalibrasi menggunakan *syringe AIR*, yang berbeda dengan *syringe* CALGAS. Sebelum melakukan injeksi ke alat, *syringe AIR* yang telah dihubungkan dengan CO₂ *trap* akan menarik sampel udara bebas sehingga yang masuk ke *syringe AIR* hanya O₂ dan N₂. Dan setelah itu, dilanjutkan dengan injeksi ke alat Myrkos.

Proses selanjutnya adalah proses *Shake TestTM* untuk mendapatkan perbandingan volume tetap antara gas dan air. Pencampuran ini dilakukan dengan acara yaitu, dilakukan dengan cara manual menggunakan tangan berupa mengocok *syringe* selama 30 detik dan menggunakan mesin *Shake TestTM* yang dilakukan selama 2 menit. Tahap terakhir, sampel minyak diukur dengan menempatkan *syringe* pada posisi yang benar di alat Myrkos. Selang yang menghubungkan ke Myrkos dilengkapi dengan *oil trap* untuk mencegah oli masuk ke alat. Setelah proses pengukuran selesai, dan hasilnya ditampilkan di laptop yang terhubung ke alat pengujian, dilanjutkan dengan menyusun laporan (*report*) dari hasil pengujiannya.

Setelah mengetahui proses dari pengujian DGA, selanjutnya dapat dilihat pada bagian berwarna kuning yang merupakan alur dari proses pengujian *Breakdown Voltage* (BDV). Pengujian Tegangan Tembus ini menggunakan alat berupa LD Phenix 100 Produk dari perusahaan Phenix Technologies yang berasal dari US. Proses pengujian *Breakdown Voltage* (BDV) dimulai dengan pengambilan sampel minyak yang langsung dimasukkan ke dalam botol tanpa perlu *flushing*, berbeda dari pengujian DGA. Sampel minyak yang sudah diambil tadi selanjutnya akan diuji menggunakan alat Phenix LD100. Sampel minyak yang sudah di ambil akan dimasukkan kedalam wadah yang berisikan dua elektroda yang ada di dalam alat. Sebelum memasukkan sampel, elektroda pada wadah minyak akan di atur jaraknya menjadi 2,5 mm. Proses berikutnya adalah pengujian Breakdown dengan menghidupkan saklar daya

AC untuk mengalirkan daya ke alat pengujian. Tegangan akan di tambah hingga terjadi kegagalan. Jika terjadi kegagalan, tegangan akan mati dan lampu "*failure*" akan menyala serta muncul percikan sebelum lampu menyala seperti pada gambar 3.2 yang dilingkari. Pengujian dilakukan sebanyak lima kali untuk mendapatkan nilai rata – rata tegangan tembusnya. Selalu berikan jeda selama sekitar 2-3 menit sebelum melanjutkan ke pengujian selanjutnya agar tidak ada sisa – sisa tegangan yang dapat mempengaruhi nilai pengujian selanjutnya.

2.2. Metode Interpretasi Data Pengujian DGA

Analisis gas terlarut atau *Dissolved Gas Analysis* (DGA) adalah analisis kondisi transformator yang didasarkan pada jumlah gas terlarut pada minyak transformator. Gas yang diekstrak dari sampel minyak yang diambil dari transformator kemudian dipisahkan menurut individual gasnya dan kemudian dihitung jumlahnya dalam satuan ppm (*part permillion*). Gas – gas yang terdeteksi dari hasil pengujian DGA adalah H₂, CH₄, N₂, O₂, CO, CO₂, C₂H₄, C₂H₆, dan C₂H₂. Jenis dan konsentrasi gas-gas tersebut memberikan indikasi terhadap tipe dan tingkat kerusakan transformator, seperti peluahan parsial, spark discharge, busur listrik, serta panas berlebih.

Terdapat beberapa metode untuk melakukan interpretasi data dan analisa seperti yang tercantum pada Standar IEEE std.C57 – 104.2008 dan IEC 60599, yaitu:

1. Standar IEEE TDCG (*Total Dissolved Combustible Gas*)

Total Dissolved Combustible Gas adalah metode yang menjumlahkan gas terlarut yang mudah terbakar. Standar IEEE telah menetapkan batas konsentrasi yang telah tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1. Konsentrasi Gas Terlarut Standar IEEE C57 – 104.2008

Status	Batas Konsentrasi Gas Utama Terlarut (ppm)							
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG
Keadaan 1	100	120	35	50	65	350	2500	720
Keadaan 2	100-700	121-400	36-50	51-100	66-100	351-570	2500-4000	721-1920
Keadaan 3	701-1800	401-1000	51-80	101-200	101-150	571-1400	4001-10.000	1921-4630
Keadaan 4	> 1800	> 1000	> 80	> 200	> 150	> 1400	> 10.000	> 4630

Menurut klasifikasi IEEE, kondisi operasional transformator berdasarkan nilai *Total Dissolved Combustible Gas* (TDCG) dibagi menjadi empat tingkatan. keadaan 1 menunjukkan operasi normal dan aman. keadaan 2 mengindikasikan adanya peningkatan gas mudah terbakar yang memerlukan investigasi awal. keadaan 3 menunjukkan potensi kerusakan serius dan membutuhkan investigasi segera. Sementara itu, keadaan 4 mencerminkan kerusakan berat pada isolasi atau minyak, dengan risiko tinggi terjadinya kegagalan total jika operasi dilanjutkan.

2. Key Gas

IEEE Std. C57-104.2008 menjelaskan bahwa gas-gas yang terbentuk dalam minyak trafo dapat digunakan secara kualitatif untuk mengidentifikasi jenis kegagalan yang terjadi, dengan mengamati gas-gas dominan yang terbentuk pada berbagai suhu seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Jenis – jenis Kegagalan Menurut Analisis Key Gas

Kegagalan	Key Gas	Kriteria	Jumlah Persen Gas
<i>Arcing</i>	<i>Acetylene (C₂H₂)</i>	Sejumlah besar H ₂ dan C ₂ H ₂ , serta sedikit CH ₄ dan C ₂ H ₄ . CO dan CO ₂ mungkin juga ada jika selulosa terlibat.	H ₂ : 60% C ₂ H ₂ : 30%
<i>Corona (Low Energy PD)</i>	<i>Hydrogen (H₂)</i>	Sejumlah besar H ₂ , beberapa CH ₄ , dengan sedikit C ₂ H ₆ dan C ₂ H ₄ . Serta, CO dan CO ₂ mungkin sebanding jika selulosa terlibat.	H ₂ : 85% CH ₄ : 13%
<i>Overheating of Oil</i>	<i>Ethylene (C₂H₄)</i>	Sejumlah besar C ₂ H ₄ , jumlah C ₂ H ₆ yang lebih sedikit, serta beberapa CH ₄ dan H ₂ .	C ₂ H ₄ : 63% C ₂ H ₆ : 20%
<i>Overheating of Cellulose</i>	<i>Carbon Monoxide (CO)</i>	Sejumlah besar CO dan CO ₂	CO : 92%

3. Roger's Ratio

Metode ini dilakukan dengan melakukan perbandingan untuk mendapatkan tiga digit kode yang akan menunjukkan indikasi dari penyebab munculnya *Fault Gas*. Berikut merupakan rasio perbandingan yang digunakan pada metode *Roger's Ratio* dimana jenis jenis kegagalan dapat ditunjukkan pada Tabel 3.

$$R_2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{CH_4}{H_2} \quad (2)$$

$$R_5 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6} \quad (3)$$

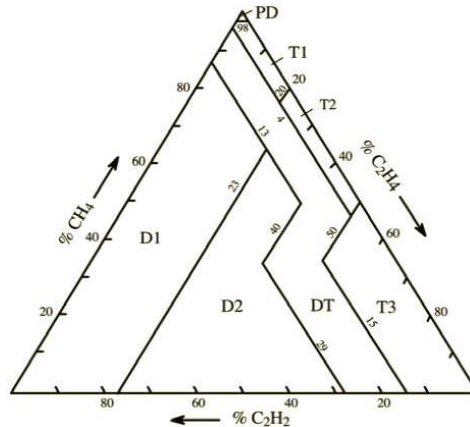
Tabel 3. Jenis – Jenis Kegagalan Menurut Analisis Roger's Ratio

Rentang Kode Ratio		$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
<0,1		0	1	0
0, 1-1		1	0	0
1-3		1	2	1
≥ 3		2	2	2

Kasus	Tipe Gangguan	Kode Roger Rasio		
0	Normal	0	0	0
1	Peluhan parsial rendah	0	1	0
2	Peluhan parsial tinggi	1	1	0
3	Busur listrik, pelepasan, percikan rendah	1-2	0	1-2
4	Busur listrik, pelepasan, percikan tinggi	1	0	2
5	Panas pada temperatur <150° C	0	0	1
6	Panas pada temperatur antara 150° C - 300° C	0	2	0
7	Panas pada temperatur antara 300° C - 700° C	0	2	1
8	Panas pada temperatur >700° C	0	2	2

4. Duval's Triangle (Segitiga Duval)

Metode ini menganalisa tiga gas hidrokarbon yaitu gas Metana (CH₄), gas Etien (C₂H₄), gas Asetilen (C₂H₂) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Metode Segitiga Duval

Segitiga ini menunjukkan proporsi relatif CH_4 , C_2H_4 , dan C_2H_2 untuk masing-masing gas dari 0 hingga 100. Metode ini merubah konsentrasi gas menjadi presentase, lalu memasukkan nilai konsentrasi gas dan menyesuaikan dengan batasan segitiga. [1].

$$\% \text{CH}_4 = \frac{g_1}{g_1 + g_2 + g_3} \times 100 \quad (4)$$

$$\% \text{C}_2\text{H}_4 = \frac{g_2}{g_1 + g_2 + g_3} \times 100 \quad (5)$$

$$\% \text{C}_2\text{H}_2 = \frac{g_3}{g_1 + g_2 + g_3} \times 100 \quad (6)$$

Dimana :

Untuk $g_1 = \text{CH}_4$ dalam ml/L

Untuk $g_2 = \text{C}_2\text{H}_4$ dalam ml/L

Untuk $g_3 = \text{C}_2\text{H}_2$ dalam ml/L.

Tabel 4. merupakan kode kegagalan yang terdeteksi pada pengujian *Dissolved Gas Analysis* (DGA) menggunakan metode segitiga Duval.

Tabel 4. Kode Gangguan Metode Segitiga Duval

NO	Gangguan	Diagnosis
1	PD	Peluahan Parsial
2	D1	Pelepasan Listrik Energi Rendah
3	D2	Pelepasan Listrik Energi Tinggi
4	T1	Panas dengan Temperatur ($> 300^\circ\text{C}$)
5	T2	Panas dengan Temperatur ($300^\circ\text{C} < T < 700^\circ\text{C}$)

6	T3	Panas dengan Temperatur ($> 700^{\circ}\text{C}$)
7	D + T	Tidak dapat ditentukan – kerusakan termal atau listrik

2.3. Metode Pengujian Breakdown Voltage

Kemampuan minyak isolasi dalam menahan stres tegangan dapat diukur melalui pengujian tegangan tembus. Minyak dengan kondisi baik akan menunjukkan nilai tegangan tembus yang tinggi. Adapun standar tegangan tembus dapat ditunjukkan pada Tabel 5. Beberapa metode pengujian tegangan tembus dibedakan berdasarkan bentuk dan jarak antar elektroda, antara lain:

1. Standar IEC 60156-02 Tahun 1995. Pengujian menggunakan elektroda jamur dengan jarak elektroda 2,5 mm (umum digunakan di PLN)
2. Standar ASTM D1816 - 12 (VDE *electrode*). Pengujian menggunakan elektroda jamur dengan jarak elektroda 1 atau 2 mm.
3. Standar ASTM D877 - 02 Tahun 2007 (*Disc-electrodes*). Pengujian menggunakan elektroda silindris dengan jarak elektroda 2,54 mm

Tabel 5. Standar Tegangan Tembus

Tegangan Operasi (kV)	Jarak (mm)	Nilai minimum (kV)
$V_n \leq 36$	2,5	30
$36 < V_n \leq 70$	2,5	35
$70 < V_n \leq 170$	2,5	40
$V_n \geq 170$	2,5	50

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 6 merupakan data spesifikasi dari transformator yang di lakukan pengujian minyak pada PT. Kilang Pertamina Internasional RU II Dumai :

Tabel 6. Data Spesifikasi Transformator

Transformer type	TDA
No. of Phase/Frequency	3/50Hz
Rate Power	2000/1600 KVA
Voltages : a) Primary	3.300 V
b) Secondary	400 – 230 V
Current : a) Primary	280 A
b) Secondary	2.310 A
Vector Group	Dyn - 11
Standard	IEC – 60076
Type of Cooling	ONAN
Type of Insulating Liquid Used	Mineral
Insulation Class	A

Dari Tabel 6. dapat dilihat bahwa transformator yang dilakukan pengujian minyak transformator adalah transformator distribusi dengan kapasitas 2000 kV. Transformator memiliki tipe pendingin berupa ONAN dengan tipe minyak isolasinya berupa minyak mineral.

3.1. Data Hasil Pengujian *Dissolved Gas Analysis* (DGA)

Table 7. merupakan data hasil dari pengujian Dissolved Gas Analysis yang di dapat dari PT. Kilang Pertamina Internasional RU II Dumai :

Tabel 7. Hasil Pengujian *Dissolved Gas Analysis*
Parameter Gas (ppm)

Pengujian	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂	N ₂
04-04-2022	10	6	0	43	7	168	1627	-	-
08-08-2022	31	52	1	206	27	132	2159	-	-
22-11-2022	755	1370	12	3219	433	370	2538	-	-

Pengujian ini mencatat kandungan berbagai jenis gas terlarut dalam satuan ppm (*parts per million*). Pada 4 April 2022, kadar dari gas H₂ dan CH₄ cukup rendah dengan masing- masing kadar sebesar 10 ppm dan 6 ppm. Pada pengujian 8 Agustus 2022 terjadi peningkatan kadar gas yang signifikan terutama pada gas CH₄ yang naik menjadi 52 ppm dan C₂H₄ yang naik mencapai 206 ppm. Kadar pada gas CO₂ juga meningkat menjadi 2159 ppm. Hal ini menunjukkan kemungkinan adanya degradasi pada isolasi minyak. Selanjutnya pada 22 November 2022 menunjukkan peningkatan yang drastis pada setiap parameter gas. Dimana H₂ mencapai 755 ppm, CH₄ sebesar 1370 ppm dan C₂H₄ mencapai 3219 ppm. Terlihat juga terjadi peningkatan besar pada gas C₂H₆ dan C₂H₂. Selain itu, gas CO₂ juga terus naik menjadi 2538 ppm, yang dapat menunjukkan terjadinya degradasi lebih lanjut pada isolasi minyak. Perubahan drastis ini dapat mengindikasikan bahwa kondisi isolasi minyak terus mengalami degradasi dari waktu ke waktu.

Tabel 8. menunjukan analisis dari masing – masing metode interpretasi pengujian *Dissolved Gas Analysis* :

1. Analisis Kondisi Isolasi Transformator dengan Metode TDCG

Metode TDCG merupakan metode interpretasi data DGA dengan menjumlahkan gas terlarut mudah terbakar, yang dapat menunjukkan apakah transformator masih beroperasi dalam kondisi normal, waspada, peringatan, atau sudah dalam kondisi kritis. Berikut adalah hasil penjumlahan gas mudah terbakar (TDCG).

Tabel 8. Hasil Pengujian TDCG
Parameter Gas (ppm)

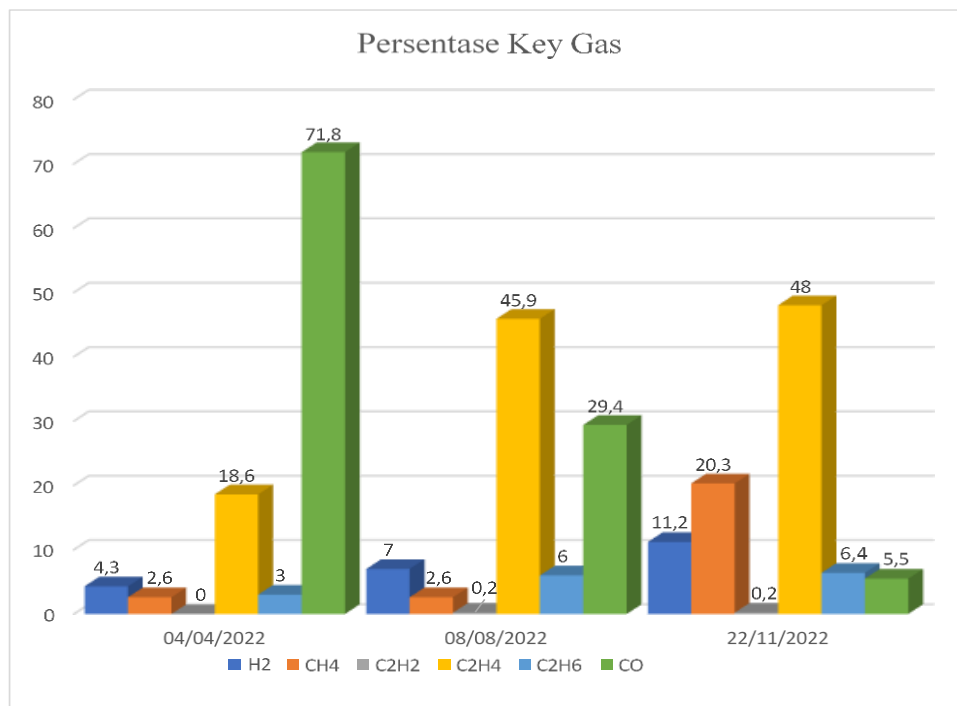
Pengujian	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂	N ₂	TDCG
04-04-2022	10	6	0	43	7	168	1627	-	-	234
08-08-2022	31	52	1	206	27	132	2159	-	-	449
22-11-2022	755	1370	12	3219	433	370	2538	-	-	6734

Pada Tabel 8. terlihat bahwa nilai TDCG mengalami peningkatan yang signifikan dari waktu ke waktu. Nilai TDCG pada 4 April 2022 tercatat sebesar 234 ppm, pada 8 Agustus 2022 naik menjadi 449 ppm, dan pada 22 November 2022 melonjak drastis hingga 6734 ppm. Berdasarkan tabel standar nilai TDCG pada Tabel 1, nilai TDCG di bawah 720 ppm menandakan bahwa transformator berada pada kondisi satu, artinya beroperasi secara normal. Sebaliknya, jika nilai TDCG yang melebihi 4630 ppm menunjukkan bahwa transformator berada pada kondisi empat, yang menandakan kegagalan dan potensi kerusakan serius pada transformator.

Dengan demikian, berdasarkan standar yang telah ditetapkan dapat disimpulkan nilai TDCG pada 4 April 2022 dan 8 Agustus 2022 yang masih di bawah 720 ppm menunjukkan bahwa transformator beroperasi dalam kondisi normal atau kondisi satu. Namun, untuk nilai TDCG pada 22 November 2022 yang melampaui 4630 ppm menunjukkan bahwa transformator telah mengalami kerusakan serius karena sudah berada pada kondisi empat

2. Analisis Kondisi Isolasi Transformator dengan Metode *Key Gas*

Setelah melakukan analisis menggunakan metode interpretasi TDCG, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis dengan metode *Key Gas*. Gambar 4. menunjukkan hasil dari metode *Key Gas*.



Gambar 4. Diagram Persentase Key Gas

Dari Gambar 4. dapat dilihat persentase gas kunci dari tiga waktu yang berbeda. Pada 4 April 2022, gas yang paling dominan adalah gas CO dengan persentase sebesar 71,8% lalu diikuti oleh gas C₂H₄ sebesar 18%. Merujuk pada tabel standar *key gas* pada II, dikatakan terjadinya kegagalan berupa *Overheating of cellulose* jika kriterianya adalah banyak gas CO dan CO₂ serta persentase dari gas CO mencapai 92%. Dengan demikian karena nilai persentase dari gas CO belum mencapai batas standar, maka dapat dikatakan transformator tidak mengalami kegagalan, namun terdapat kriteria *Overheating of cellulose*.

Pada 8 Agustus 2022, gas yang paling dominan persentasenya adalah gas C₂H₄ dengan persentase sebesar 45,9%. Merujuk pada tabel standar *key gas* pada II, dikatakan terjadinya kegagalan berupa *Overheating of oil* jika munculnya gas C₂H₄ yang tinggi lalu diiringi dengan sedikit gas C₂H₆ dan beberapa gas CH₄ dan H₂. Namun jumlah persentasi gas C₂H₄ dan C₂H₆ tidak memenuhi standar yang ditetapkan IEEE C57.104-2008, maka kondisi transformator pada 8 Agustus 2022 dapat memungkinkan terjadinya *Overheating of oil*.

Selanjutnya pada 22 November 2022 terjadi peningkatan signifikan pada hampir semua gas terutama gas C₂H₄ dengan persentase sebesar 48%, lalu gas CH₄ dengan persentase gas sebesar 20,3%, gas H₂ sebesar 11,2% dan gas C₂H₆ sebesar 6,4%. Merujuk pada tabel standar *key gas* pada II, dikatakan terjadinya kegagalan berupa *Overheating of oil* jika kriteria gas yang dominan adalah C₂H₄ dan CH₄, disertai dengan sejumlah kecil dari gas H₂ dan C₂H₆. Berdasarkan hasil diatas, nilai C₂H₄ yang tinggi dan CH₄ yang cukup signifikan menunjukkan bahwa kegagalan yang mungkin terjadi adalah *Overheating of oil*.

Berdasarkan analisis dari tiga periode waktu tersebut, dapat disimpulkan bahwa isolasi minyak transformator ini mendekati indikasi dari kegagalan dengan kondisi panas berlebih. Merujuk pada tabel 2, hal ini terlihat dari gas-gas dominan dan pendukung yang menunjukkan nilai mendekati kriteria untuk *overheating of oil*. Untuk memastikan apakah kegagalan ini benar berupa panas berlebih, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis lebih lanjut menggunakan metode *Roger's Ratio*.

3. Analisis Kondisi Isolasi Transformator dengan Metode *Roger's Ratio*

Pada metode ini, dilakukan perbandingan nilai antar gas yang terlarut dalam minyak. Tabel 8. merupakan hasil dari penerapan metode *roger's ratio*.

Tabel 9. Hasil *Roger's Ratio* Pengujian DGA

Pengujian	Rasio			Kode
	R2 (C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄)	R1 (CH ₄ /H ₂)	R5 (C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆)	
04-04-2022	0	0,6	6,1	0-0-2
08-08-2022	0,004	1,6	7,6	0-2-2
22-11-2022	0,003	1,8	7,4	0-2-2

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode *roger's ratio*, terlihat bahwa pada 4 April 2022 hasilnya menunjukkan pada kode 0-0-2. Mengacu pada standar yang terdapat dalam tabel III, tidak ada kategori untuk kode 0-0-2. Sehingga metode ini tidak dapat menentukan jenis kegagalan yang terjadi pada transformator. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa pada 4 April 2022 transformator dalam kondisi yang normal atau baik. Sementara itu, pada 8 Agustus 2022 dan 22 November 2022 hasilnya menunjukkan kode yang sama, yaitu kode 0-2-2. Berdasarkan tabel 3, kode 0-2-2 termasuk dalam kategori 8 yang berarti transformator mengalami *overheating* dengan suhu di atas 700°C.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa transformator telah menunjukkan indikasi *overheating* sejak 8 Agustus 2022. Hal ini sesuai dengan standar yang ditetapkan pada tabel 3 yang mengatakan kode 0-2-2 menunjuk pada kasus 8 yang menandakan transformator mengalami indikasi kegagalan berupa panas berlebih dengan suhu diatas 700°C.

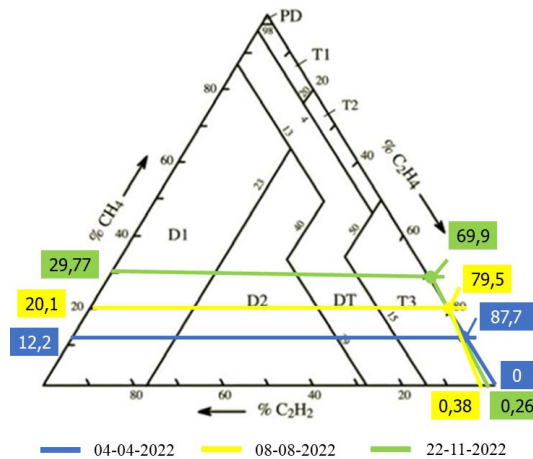
4. Analisis Kondisi Isolasi Transformator dengan Metode Segitiga Duval

Dalam metode ini, perhitungan dilakukan dengan menggunakan tiga jenis gas berupa gas CH₄, C₂H₂ dan C₂H₄. Tabel 10. merupakan hasil persentase dari setiap gas berdasarkan metode *Duval Triangle*.

Tabel 10. Hasil Duval Triangle Pengujian DGA

Pengujian	Gas			Kode
	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	
04-04-2022	12,2 %	87,7 %	0 %	T3
08-08-2022	20,1 %	79,5 %	0,38 %	T3
22-11-2022	29,77 %	69,9 %	0,26 %	T3

Pada Tabel 10. tersebut, bagian yang berwarna biru menunjukkan hasil persentase setiap gas pada 4 April 2022. Bagian berwarna kuning menunjukkan hasil persentase pada 8 Agustus 2022, sedangkan bagian berwarna hijau menunjukkan hasil persentase pada 22 November 2022. Dari ketiga waktu pengujian tersebut, dapat dilihat bahwa semuanya memiliki kode yang sama, yaitu T3. Untuk mengetahui asal usul kode tersebut dapat dilakukan menggunakan Gambar 5.



Gambar 5. Daerah Hasil Segitiga Duval

Dari Gambar 5., terlihat ada tiga garis yang ditandai dengan warna berbeda, yaitu biru, kuning, dan hijau, yang mewakili hasil pengukuran pada tiga tanggal yang berbeda. Dapat dilihat pada gambar diatas bahwa ketiga garis ini menyentuh area T3. Berdasarkan standar dalam tabel 4, T3 menunjukkan daerah dengan kegagalan akibat *overheating* dengan suhu lebih dari 700°C.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa hasil dari perhitungan dengan metode ini menunjukkan transformator mengalami indikasi kegagalan berupa *overheating* di atas 700°C. Secara keseluruhan, hasil pengukuran dalam tiga waktu ini menunjukkan bahwa transformator mengalami kerusakan termal dan metode ini merupakan validasi dari tiga metode yang telah dilakukan sebelumnya.

3.2. Data Hasil Pengujian Breakdown Voltage

Setelah melakukan analisis dari hasil pengujian *Dissolved Gas Analysis*, selanjutnya adalah melakukan analisis dengan menggunakan hasil pengujian *Breakdown Voltage*. Tabel 11. merupakan data hasil pengujian *Breakdown Voltage* yang di dapat dari PT.Kilang Pertamina Internasional RU II Dumai.

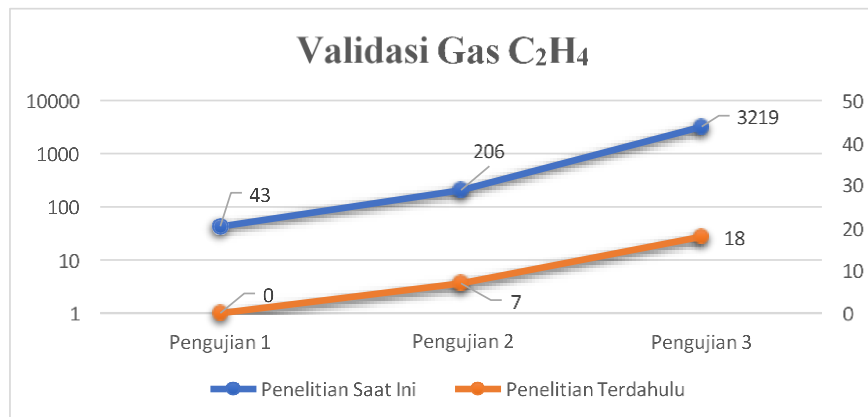
Tabel 11. Pengujian Breakdown Voltage

Tes Ke	Hasil Tegangan Tembus	Rata-Rata Tegangan Tembus
1	24,4 kV	24,48 kV
2	23 kV	
3	22,4 kV	
4	25,5 kV	
5	27,1 kV	

Berdasarkan hasil pengujian *Breakdown Voltage* (BDV) yang tercantum dalam Tabel 11 tersebut, maka dapat dilihat bahwa hasil rata-rata tegangan tembus adalah sebesar 24,48 kV. Mengacu pada standar IEC 60156 untuk tegangan operasi di bawah 36 kV dengan jarak elektroda 2,5 mm, nilai tegangan tembus minimum yang harus dicapai adalah 30 kV. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kualitas isolasi minyak transformator yang diuji adalah buruk. Hal ini menunjukkan adanya potensi kontaminasi pada isolasi minyak transformator tersebut.

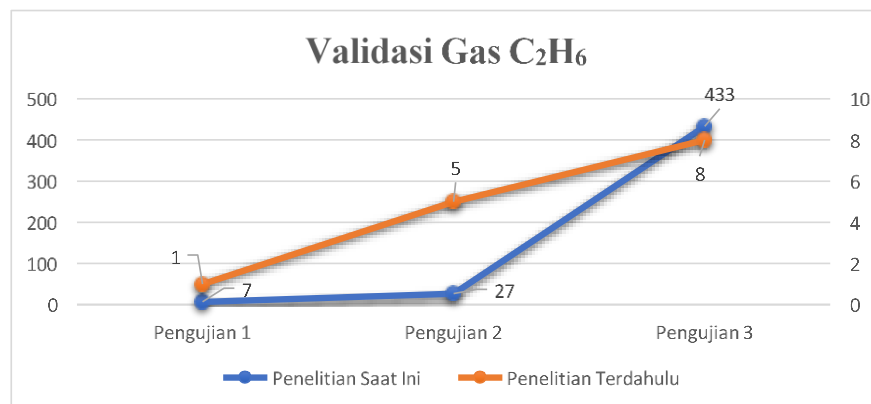
3.3. Validasi Dengan Penelitian Terdahulu

Setelah melakukan analisis dengan menggunakan metode interpretasi pengujian DGA, selanjutnya adalah melakukan validasi dengan hasil penelitian terdahulu untuk mengetahui apakah hasil yang didapat sama dengan hasil dari penelitian yang dilakukan sebelumnya. Validasi yang dilakukan hanya menggunakan dua parameter gas yaitu C_2H_4 dan C_2H_2 . Validasi ini dilakukan dengan melihat perbandingan jumlah gas terhadap waktu pengujian seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Validasi Gas C_2H_4

Pada Gambar 6. Dapat diketahui bahwa setiap melakukan pengujian selalu terjadi kenaikan pada jumlah gas C_2H_4 . Munculnya gas C_2H_4 ini menunjukkan bahwa isolasi minyak transformator mengalami kegagalan berupa *overheating* atau panas berlebih. Dalam penelitian ini, hasil dari analisa pengujian *Dissolved Gas Analysis* (DGA) terutama pada metode *roger's ratio* menunjukkan transformator mengalami kegagalan berupa *overheating*. Hasil ini juga didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Bagus Tri Setiawan pada tahun 2019 dengan hasil yang menunjukkan bahwa isolasi minyak transformator yang diteliti mengalami *overheating*. Selain itu, terjadinya kegagalan *overheating* ini juga di dukung dengan meningkatnya gas C_2H_6 pada setiap pengujiannya yang dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik validasi Gas C_2H_6

Berdasarkan pada Gambar 6. dan Gambar 7. serta penjelasan yang telah disampaikan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa penelitian yang dilakukan saat ini valid. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Bagus Tri Setiawan yang menunjukkan trend kenaikan yang sama dan didukung oleh teori dalam buku karya James H. Harlow, yang menyatakan bahwa pada kasus gangguan termal, gas CH_4 diproduksi

bersama dengan C_2H_6 dan C_2H_4 . Selain itu, rasio antara C_2H_6 dan C_2H_4 akan meningkat seiring dengan bertambahnya suhu gangguan.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat di ambil dari penelitian ini ialah sebagai berikut :

1. Pengujian DGA menggunakan empat metode interpretasi menunjukkan bahwa suhu pada isolasi minyak transformator mencapai lebih dari $700^{\circ}C$. Berdasarkan standar IEEE C.57-104.2008, suhu di atas $100^{\circ}C$ menunjukkan adanya indikasi kegagalan berupa overheating. Hal ini disebabkan oleh peningkatan yang signifikan pada gas CH_4 , C_2H_6 , dan C_2H_4 . Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa isolasi minyak pada transformator mengalami kegagalan akibat overheating.
2. Pada pengujian BDV, hasil tegangan tembus menunjukkan nilai sebesar 24,48 kV. Berdasarkan standar IEC 60156, isolasi minyak yang baik seharusnya memiliki tegangan tembus diatas 30 kV. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kualitas minyak yang telah di uji adalah buruk. Hal ini dapat disebabkan oleh kontaminasi pada isolasi minyak transformator tersebut.
3. Pada hasil pengujian validasi gas C_2H_4 dan C_2H_6 terhadap waktu menunjukkan adanya tren kenaikan pada kedua gas tersebut. Pada penelitian Bagus Tri Setiawan juga menunjukkan tren kenaikan yang sama. Begitu juga dengan teori yang diungkapkan oleh James H. Harlow yang menjelaskan bahwa kenaikan gas C_2H_4 dan C_2H_6 terjadi seiring dengan meningkatnya gangguan suhu. Berdasarkan pernyataan diatas, maka dapat dinyatakan bahwa penelitian yang dilakukan ini valid.

❖ DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Akbari, A. Setayeshmehr, H. Borsi, and E. Gockenbach, "A software implementation of the Duval triangle method," *Conf. Rec. IEEE Int. Symp. Electr. Insul.*, no. July, pp. 124–127, 2008, doi: 10.1109/ELINSL.2008.4570294.
- [2] N. Hardani and F. Murdiya, "Karakteristik Pengujian Tegangan Tembus Arus Bolak Balik (AC) pada Minyak Kedelai (Soybean Oil)," *Jom Fteknik*, vol. 6, pp. 1–10, 2019.
- [3] I. N. Oksa Winanta, A. A. N. Amrita, and W. G. Ariastina, "Studi Tegangan Tembus Minyak Transformator," *J. SPEKTRUM*, vol. 6, no. 3, p. 10, 2019, doi: 10.24843/spektrum.2019.v06.i03.p02.
- [4] M. . Akbar, "Analisa Karakteristik Minyak Isolasi Transformator Daya 11 kVA Menggunakan Metode Dga Dan Breakdown Voltage Pada Gardu Kilang Pertamina Ru-Ii Dumai," *Inst. Teknol. Sepuluh Nop.*, 2018.
- [5] A. H. Nurul Hidayani, Iqbal Hasanuddin, "Analisis Kualitas Minyak Transformator Pada Pt. Pln Ultg Panakkukang," vol. 01, no. 03, 2023.
- [6] R. Ondrialdi and U. Situmeang, "Analisis Pengujian Kualitas Isolasi Transformator Daya di PT . Indah Kiat Pulp and Paper Perawang," vol. 4, no. 2, pp. 72–81, 2020.
- [7] Irwanto, "Sistem Maintenance Transformator 60 Mva Pada Electric Arc Furnace (Eaf) 7 Slab Steel Plant 1," *J. Mech. Eng. Mechatronics*, vol. 5, no. 2, pp. 75–89, 2020, doi: 10.33021/jmem.v5i2.1260.
- [8] I. M. Y. Negara, *Teknik Tegangan Tinggi Prinsip Dan Aplikasi Praktis*, 1st ed. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2013.
- [9] P. (Persero) PLN, *Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga*. Jakarta: PT PLN (Persero), 2014.
- [10] C. Widyastuti and R. A. Wisnuaji, "Analisis Tegangan Tembus Minyak Transformator Di PT. PLN (Persero) Bogor," *Elektron J. Ilm.*, vol. 11, no. 2, pp. 75–78, 2019, doi: 10.30630/eji.11.2.128.
- [11] IEEE, *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers*, vol. 1991, no. 3. New York, 2009. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stampPDF/getPDF.jsp?tp=&arnumber=29023%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:IEEE+Guide+for+the+Interpretation+of+Gases+Generated+in+Oil-Immersed+Transformers#0>
- [12] R. Furqaranda, A. Bintoro, A. Asri, W. K. A. Al-Ani, and A. Shrestha, "Analysis Oil Condition of Transformer PT-8801-A by Using the Method TDCG, Rogers Ratio, Key Gas, and Duval Triangle: A

Case Study at PT. Perta Arun Gas,” *J. Renew. Energy, Electr. Comput. Eng.*, vol. 2, no. 2, p. 47, 2022, doi: 10.29103/jreece.v2i2.8567.

- [13] J. Winders, *Power transformers: principles and applications*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [14] C. Cekdin and T. Barlian, “Transmisi Daya Listrik,” *Yogyakarta Andi*, 2013.
- [15] IEC 60156, *Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method*, 3.0. Switzerland, 2018.