

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Tinjauan Studi

#### 2.1.1 *Impact of Oil Velocity on Partial Discharge Characteristics Induced by Bubbles in Transformer Oil* (Tang et al., 2018)

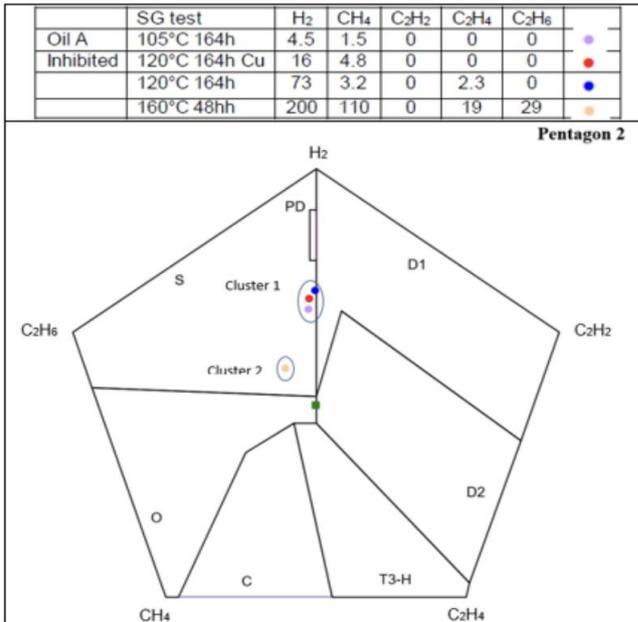
- Masalah yang dibahas dalam jurnal ini adalah mengenai pengaruh *bubble* yang mengakibatkan munculnya *partial discharge* di mana *bubble* tersebut tersebar di seluruh minyak transformer. Penulis ingin mencari pengaruh efek minyak yang bergerak terhadap *partial discharge* yang berasal dari *bubble* tersebut. Dari hasil penelitian, didapati bahwa pergerakan oli pada minyak transformer memperkecil *partial discharge* dan distorsi medan elektrik yang disebabkan oleh *bubble* pada minyak transformer. Selain itu, *bubble* dianggap sebagai permasalahan yang tidak dapat dihindari dalam transformer minyak.

#### 2.1.2 *New Apparatus for Detecting H<sub>2</sub>, CO, and CH<sub>4</sub> Dissolved in Transformer Oil* (Tsukioka et al., 1983)

- Jurnal ini membahas cara mendeteksi gas H<sub>2</sub>, CO, dan CH<sub>4</sub> melalui membran. Caranya adalah dengan menggunakan minyak transformer yang dimasukkan ke sebuah *chamber*. Pemisahan gas akan menggunakan *polymer membrane*. Gas hasil pemisahan dideteksi dengan teknik gas kromatograf (*DGA Test*).

#### 2.1.3 *Identification of Stray Gassing of Inhibited and Unhibited Mineral Oils in Transformers* (Duval & Heizmann, 2020).

- Jurnal ini membahas mengenai cara melakukan tes *stray gassing* pada *inhibited* dan *unhibited oil*. *Stray gassing* pada minyak didefinisikan sebagai gas yang muncul dari minyak *insulation* yang muncul karena adanya pemanasan pada suhu yang rendah yaitu 90°C – 200°C. Pengujian dilakukan dengan memkondisikan minyak terlebih dahulu dalam suhu yang rendah untuk memunculkan gas dari *stray gassing* tersebut. Jika sudah dikondisikan, minyak akan dites menggunakan tes DGA dengan metode analisis *Duval Pentagon 2*.



Gambar 2. 1 Tes *Stray Gassing* pada *Inhibited Oil* yang dilakukan oleh *High Voltage Testing and Engineering Commission of Switzerland (FKH)* menggunakan *Duval Pentagon 2*

Sumber: Duval, M., & Heizmann, T. (2020). *Identification of stray gassing of inhibited and uninhibited mineral oils in transformers*. *Energies*, 13(15).

## 2.2. Transformer

Transformer merupakan komponen listrik yang digunakan untuk memindahkan daya dari satu kumparan ke kumparan lainnya pada frekuensi yang sama. Biasanya, kedua kumparan memiliki jumlah lilitan yang berbeda agar adanya perbedaan nominal tegangan dan arus listrik. Transformer bekerja dengan prinsip Induksi Elektromagnetik dan hanya bisa digunakan pada sistem kelistrikan arus bolak balik (*alternating current*). Transformer memegang peranan kunci dalam proses transmisi dan distribusi listrik mulai dari gardu induk hingga ke pelanggan.

Komponen utama transformer antara lain sebagai berikut:

- Inti besi (*Electromagnetic Circuit*)
 

Inti besi transformer digunakan sebagai alur Bergeraknya *flux* yang timbul dari arus bolak balik yang terhubung dengan salah satu kumparan. Dengan adanya pergerakan *flux*, maka kumparan lainnya dapat terinduksi. Inti besi transformator dibuat dari lempengan besi tipis yang disusun. Komponen ini berpengaruh terhadap rugi-rugi pada kondisi tidak berbeban (Al-Badi et al., 2011).
- *Transformer Winding*

Lilitan transformer merupakan kumparan yang dibuat dari tembaga berisolasi yang disusun mengelilingi inti besi.

- Isolator *Bushing*

*Bushing* merupakan sarana penghubung jaringan di luar transformer dengan belitan transformer. *Bushing* terdiri dari konduktor yang diselubungi dengan isolator. Isolator di sini berguna agar konduktor tidak terhubung langsung dengan tangki transformer.

- Minyak Isolasi Transformer

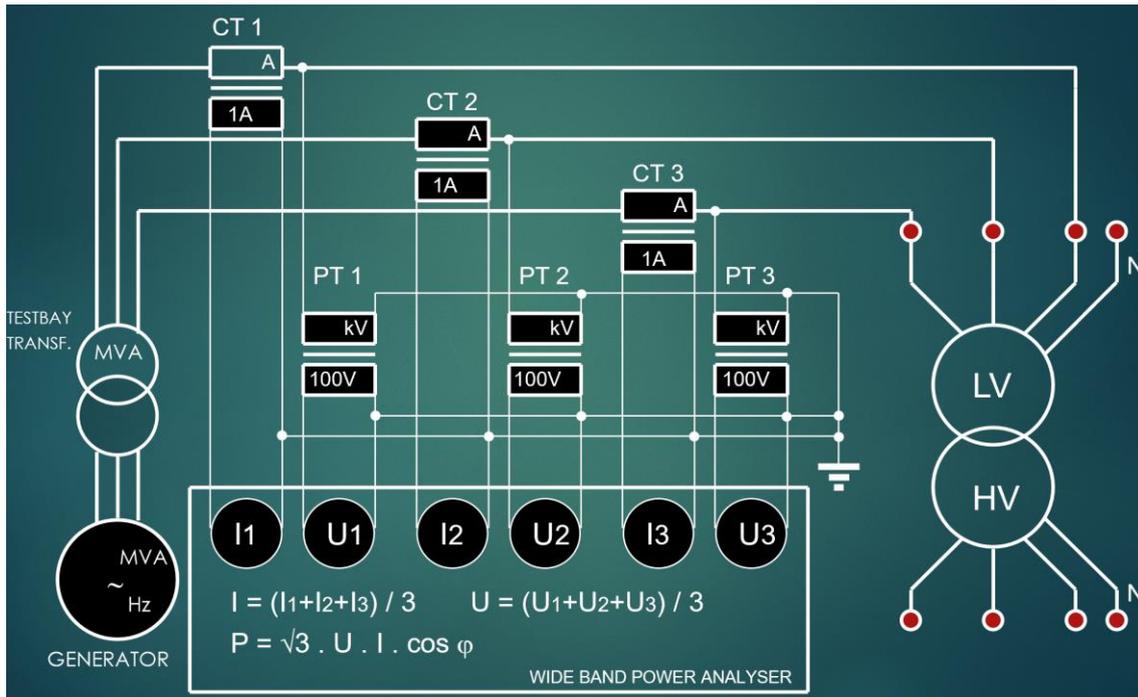
Minyak transformer merupakan minyak yang difungsikan sebagai pendingin dari transformer tersebut. Pemilihan minyak karena minyak bukan merupakan cairan yang menghantarkan listrik. Minyak transformer harus memenuhi IEC 60296 dengan standar tegangan tembus  $\geq 50 \text{ kV}/2,5 \text{ mm}$ . (PT. PLN Persero, 2020).

- *Tap Changer*

*Tap changer* merupakan komponen transformer yang berfungsi melakukan penyesuaian tegangan pada sisi primer jika terjadinya kenaikan atau penurunan tegangan pada sisi primer. Pengaturan tegangan tersebut dilakukan tanpa proses pemutusan sehingga bisa disebut juga *On Load Tap Changer (OLTC)*.

### 2.3. **No Load Test**

*No Load Losses Test* merupakan tes rutin yang harus dilakukan pada semua transformer. Tes ini dilakukan untuk menguji performa transformer yang berpusat pada inti besi transformer dengan mengeliminasi faktor beban transformer. Tes ini dilakukan dengan pada kondisi *rated voltage* dengan batasan tegangan 90% dan 110% dari *rated voltage* (*International Electrotechnical Commission. & International Electrotechnical Commission. Technical Committee 14.*, 2011). Tes ini biasanya digunakan untuk melihat nilai *core losses* yang ada di dalam transformer. Dalam pengujian ini, *no load test* yang dilakukan digunakan sebagai pengkondisian transformer dengan durasi 24 jam untuk membuktikan kemunculan *bubble* pada minyak transformator. Suplai dapat diberikan baik di sisi LV maupun HV. Namun, pada pengujian ini akan dilakukan dari sisi LV sehingga alat ukur (*voltmeter dan amperemeter*) dipasang di sisi LV juga.



Gambar 2. 2 Rangkaian tes *No Load* transformer

Sumber: Data Perusahaan

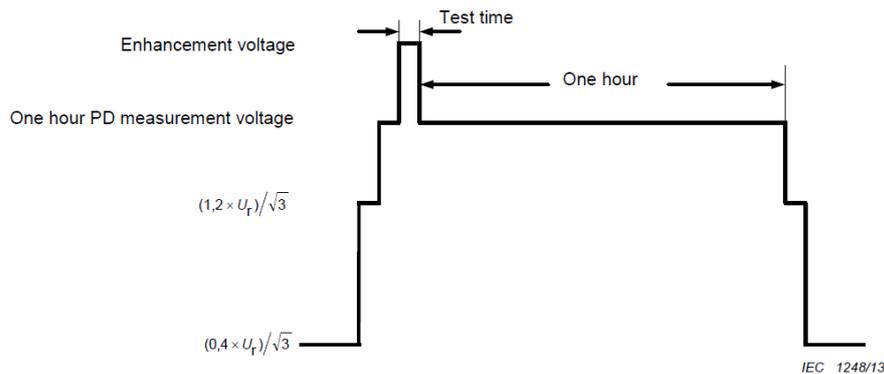
Tes *No Load* dilakukan dengan memberikan suplai dengan tegangan nominal di sisi LV. Tegangan disuplai dari generator dihubungkan dengan *testbay* transformer untuk mengubah tegangan *output* generator menjadi tegangan *rating* sisi LV. Data arus dan tegangan akan diambil melalui 3 *Current Transformer* (CT) dan 3 *Potensial Transformer* (PT) yang dihubungkan dengan *Wide Band Power Analyser*.

#### 2.4. ***Induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)***

*Partial Discharge* merupakan pelepasan sebagian muatan listrik yang terjadi diantara 2 konduktor yang terpisahkan oleh isolator. Tes untuk mencari tahu *partial discharge* adalah *Induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)* yang termasuk ke dalam salah satu *dielectric test*. Menurut IEC 60076-3 tahun 2013 (*International Electrotechnical Commission. & International Electrotechnical Commission. Technical Committee 14 : Power transformers.*, 2013), tes IVPD dilakukan dengan urutan sebagai berikut:

- a) Tegangan harus dinyalakan dan dinaikkan perlahan menjadi  $(0,4 \times U_r) / \sqrt{3}$  dan pengukuran PD awal dicatat.

- b) Tegangan harus dinaikkan menjadi  $(1,2 \times U_r)/\sqrt{3}$  dan ditahan di sana selama durasi minimal 1 menit. Tes dengan tegangan ini dilakukan sampai nilai *partial discharges* stabil.
  - c) *Partial discharges* harus diukur dan dicatat.
  - d) Tegangan harus dinaikkan ke tegangan pengukuran PD  $(1,58 \times U_r)/\sqrt{3}$  dengan durasi maksimal satu jam dan minimum 5 menit. Tes dengan tegangan  $(1,58 \times U_r)/\sqrt{3}$  dilakukan sampai nilai *partial discharges* stabil.
  - e) *Partial discharges* harus diukur dan dicatat.
  - f) Tegangan harus dinaikkan ke *enhancement voltage*  $(1,8 \times U_r) / \sqrt{3}$  dan ditahan di sana *test time*.
  - g) Setelah *test time enhancement voltage*, tegangan harus dikurangi menjadi tegangan pengukuran PD  $(1,58 \times U_r)/\sqrt{3}$ .
  - h) *Partial discharges* harus diukur dan dicatat.
  - i) Tegangan harus dipertahankan pada tegangan pengukuran PD  $(1,58 \times U_r)/\sqrt{3}$  untuk durasi paling sedikit satu jam.
  - j) *Partial discharges* harus diukur dan dicatat setiap 5 menit selama periode satu jam.
  - k) Setelah pengukuran PD terakhir dalam jangka waktu satu jam, tegangan harus diturunkan menjadi  $(1,2 \times U_r) / \sqrt{3}$  dan ditahan di sana selama minimal 1 menit. Tes dengan tegangan  $(1,2 \times U_r)/\sqrt{3}$  dilakukan sampai nilai *partial discharges* stabil.
  - l) *Partial discharges* harus diukur dan dicatat.
  - m) Tegangan harus dikurangi menjadi  $(0,4 \times U_r) / \sqrt{3}$  dan level PD awal harus diukur dan dicatat. Setelah itu, tegangan dikurangi hingga tegangan suplai mati.
- Ur merupakan nilai tegangan rating *line to line* dari transformer yang diujikan.



Gambar 2. 3 *Time Sequence* untuk pengukuran IVPD

Sumber: *International Electrotechnical Commission, & International Electrotechnical Commission. Technical Committee 14 : Power transformers. (n.d.). Power transformers. Part 3, Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air.*

Menurut IEC 60076-3 tahun 2013 (*International Electrotechnical Commission. & International Electrotechnical Commission. Technical Committee 14 : Power transformers., 2013*), standar bahwa nilai hasil tes *partial discharges* dapat dikatakan berhasil adalah sebagai berikut:

- a. tidak terjadi jatuhnya tegangan uji;
- b. tidak ada satu pun *partial discharges* yang tercatat selama periode satu jam yang melebihi 250 pC;
- c. *partial discharges* yang diukur selama periode satu jam tidak menunjukkan tren meningkat dan tidak terjadi lonjakan nilai *partial discharges* dalam kurun waktu 20 menit terakhir pengujian;
- d. *partial discharges* yang diukur selama periode satu jam tidak meningkat lebih dari 50 pC;
- e. level PD diukur pada level tegangan  $(1,2 \times U_r)$  setelah periode satu jam tidak melebihi 100 pC.

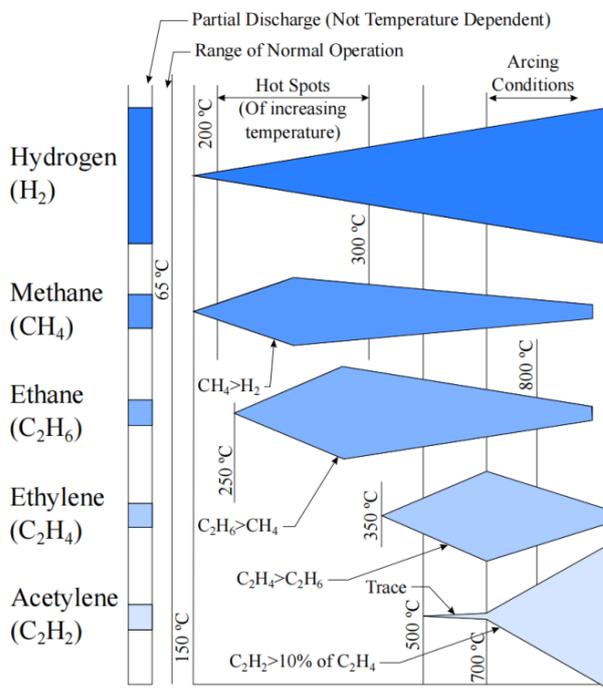
$U_r$  merupakan nilai tegangan rating *line to line* dari transformer yang diujikan. Satuan pC (pico Coulomb) merupakan satuan ukuran untuk *partial discharges*. Pico artinya adalah nilai yang tertera adalah nilai dikalikan  $10^{-12}$ .

## 2.5. ***Dissolved Gas Analysis (DGA) Test***

Pengujian *Dissolved Gas Analysis* (DGA) merupakan pengujian yang dilakukan untuk mendeteksi kandungan gas dalam minyak transformer. Tes DGA dilakukan sebagai salah satu

cara melihat gangguan pada transformmer. Kemunculan gas di dalam minyak transformmer (dalam hal ini adalah *mineral oil*) terjadi karena rantai hidrokarbonnya yang terurai akibat adanya gangguan di dalam transformmer. Gas yang dihasilkan ini akan dijadikan penanda gangguan yang terjadi pada transformmer. Salah satu jenis tes DGA yang sering dilakukan adalah tes kromatografi.

Hasil dari tes kromatografi ini adalah jumlah gas yang terlarut dalam minyak transformmer. Jenis gas-gas yang terlarut dalam minyak transformmer antara lain, karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ), karbonmonoksida ( $\text{CO}$ ), hidrogen ( $\text{H}_2$ ), etana ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), metana ( $\text{CH}_4$ ), etilen ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), dan asetilen ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) (IEEE *Power and Energy Society*, 2019). Gas yang diukur tersebut akan dinyatakan dalam satuan ppm (*part per million*). *Part per million* ini diartikan sebagai jumlah gas dalam  $\mu\text{L}$  (mikro liter) yang terkandung dalam 1 liter minyak transformmer. Tes ini akan menggunakan alat yang bernama Myrkos.



Gambar 2. 4 Pembentukan skema gas dan temperatur

Sumber : United States Department of the Interior Bureau of Reclamation (2000). *Transformer Maintenance, Standards, and Techniques*. Washington, DC, USA.



Gambar 2. 5 Myrkos Portable DGA Micro GC

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Myrkos akan melakukan pengolahan data dan menyajikan data tersebut dalam sesuai komponen gas dengan satuan ppm. Hasil pembacaan komponen gas dari Myrkos tersebut nantinya akan dilihat korelasinya dengan gangguan pada transformer. Ada beberapa metode yang sering digunakan seperti *Duval Triangle*, *Key Gas Method*, *Duval Pentagon*, dan Doernenburg, dan lain-lain. Bentuk paling sederhana adalah rasio antar gas yang muncul pada minyak transformer.

Tabel 2. 1

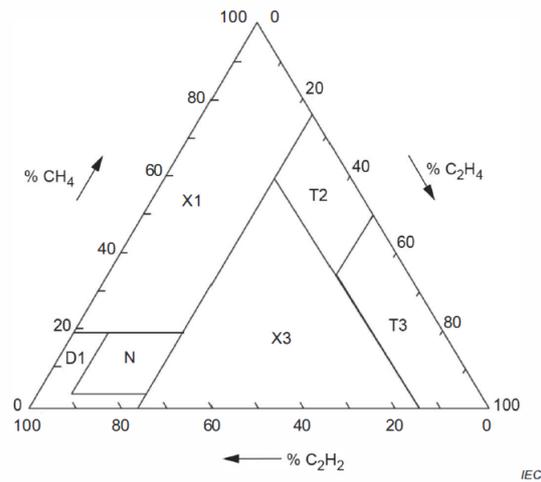
Tabel intepretasi data DGA yang disederhanakan

Case	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
PD		< 0,2	
D	> 0,2		
T	< 0,2		

Sumber: IEC (2022). IEC 6059-2022 *Mineral oil-filled electrical equipment in service - Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis*. Eds. 4.0.

Di mana PD merupakan gangguan *partial discharges*, D merupakan gangguan *electrical fault*, dan T merupakan gangguan *thermal fault*.

Metode *Duval Triangle* yang sesuai dengan IEC 60599-2022 dan IEEE Std C.57.104 -2019 membantu menginterpretasikan kadar gas yang muncul pada hasil tes DGA ke dalam bentuk segitiga sama sisi. Setiap sisi merepresentasikan satu jenis gas beserta kadarnya.



**Key**

N normal operation

T3 severe coking of contacts at  $t > 700^\circ\text{C}$

T2 severe coking of contacts at  $t > 300^\circ\text{C}$

X3 coking in progress or abnormal arcing D2

D1 abnormal arcing D1

X1 overheating at  $t < 300^\circ\text{C}$

NOTE See Figure B.3 for calculation of triangular coordinates.

Limits of zones				
N	19 % CH <sub>4</sub>	23 % C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2 % CH <sub>4</sub>	6 % C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
T3	50 % C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	15 % C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>		
X3	23 % C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	15 % C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>		
T2	23 % C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	15 % C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>		
D1	19 % CH <sub>4</sub>	6 % C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2 % CH <sub>4</sub>	23 % C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
X1	19 % CH <sub>4</sub>	23 % C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		

Gambar 2. 6 Duval Triangle Gas Interpretation Method

Sumber: IEC (2022). IEC 6059-2022 Mineral oil-filled electrical equipment in service - Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis. Eds. 4.0.

Selain Duval Triangle, ada pula Key Gas Method yang berfokus pada komposisi gas yang dominan dari hasil pengujian DGA. Metode ini akan melihat kadar dari 4 jenis gas yaitu H<sub>2</sub>, CO, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, dan CH<sub>4</sub>. Selain itu, metode ini juga memberitahukan tipikal proporsi gas hasil analisa DGA.

Tabel 2. 2

*Key Gas Method*

Key Gas	Fault type	Typical proportions of generated combustible gases
Ethylene (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	Thermal mineral oil	Predominantly Ethylene with smaller proportions of Ethane, Methane, and Hydrogen. Traces of Acetylene at very high fault temperatures.
Carbon-Monoxide (CO)	Thermal mineral oil and cellulose	Predominantly Carbon Monoxide with much smaller quantities of Hydrocarbon Gases Predominantly Ethylene with smaller proportions of Ethane, Methane, and Hydrogen
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	Electrical low energy partial discharge (PD)	Predominantly Hydrogen with small quantities of Methane and traces of Ethylene and Ethane.
Hydrogen and Acetylene (H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	Electrical high energy (arcing)	Predominantly Hydrogen and Acetylene with minor traces of Methane, Ethylene and Ethane. Also, Carbon Monoxide if cellulose is involved.

Sumber: IEEE Power and Energy Society. (2019). *C.57.104-2019 - IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers*. IEEE.

Anomali pada transformer juga dapat dilihat dengan melihat kondisi rasio gas oksigen terhadap gas nitrogen. Menurut IEC 60599-2022 (IEC, 2022), gas oksigen dan nitrogen yang ada muncul akibat kontak dengan udara atmosfer karena perlengkapan yang terhubung dengan udara luar atau melalui celah pada *seal* transformer. Pada kondisi ekuilibrium, kadar O<sub>2</sub> adalah 32.000 ppm dan N<sub>2</sub> adalah 64.000 ppm yang menunjukkan bahwa rasio O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> adalah 0,5. Dalam penggunaannya, rasio dapat menurun akibat oksidasi minyak dan/atau penurunan kualitas kertas isolasi akibat umur penggunaan. Rasio di bawah 0,3 dianggap sebagai penggunaan gas oksigen yang berlebihan.

**2.6. Stray Gassing**

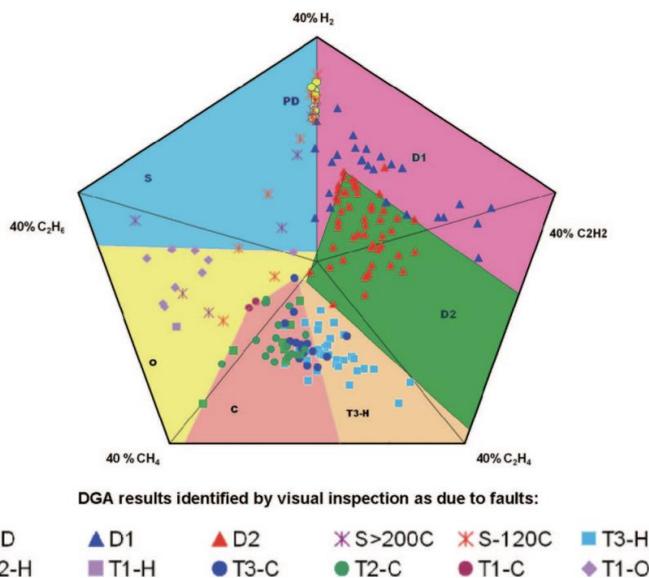
*Stray gassing* merupakan komponen gas yang muncul karena pemanasan dalam suhu yang rendah yaitu 90°C – 200°C. Prosedur pelaksanaan pengkondisian minyak adalah sebagai berikut:

- Prosedur 1: minyak akan dipanaskan di dalam *syringe* di dalam sebuah oven pada temperatur 120°C selama 164 jam. (CIGRE D1-01/A2.11, 2006).
- Prosedur 2: minyak akan dipanaskan di dalam *syringe* dengan atau tanpa *copper foil* di dalamnya dengan temperatur 105°C selama 48 jam. Donald Hepburn dari *Glasgow Caledonian University* yang menciptakan metode pemanasan minyak ini di tahun 2004 untuk keperluan *National Grid Transco UK* (IEC, 2020).

Setelah itu minyak dikondisikan oleh salah satu prosedur, minyak tersebut akan dites dengan *DGA Test* untuk melihat penyebab kemunculan gas beserta komponen gas pada minyak

tersebut. Dengan bantuan *Duval Pentagon*, H<sub>2</sub> dapat diketahui penyebab asalnya dari *stray gassing*. Untuk gangguan *Stray Gassing*, terletak pada zona S atau gangguan yang muncul karena T1. Gangguan yang umum terjadi menurut IEC, IEEE, dan *Duval Triangle 2* ada 6 antara lain:

- PD : *corona partial discharges*,
- D1 : *low energy discharges*,
- D2 : *high energy discharges*,
- T3-H : *thermal faults in oil only*,
- C : *thermal faults with carbonization of paper*,
- O : *overheating*,
- S : *stray gassing of mineral oil at 90 and 200°C*.



Gambar 2. 7 *Duval Pentagon 2* dengan 7 gangguan yang umum

Sumber: Duval, M & Lamarre (2014). *The duval pentagon-a new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers*. IEEE Electrical Insulation Magazine, 30(6), 9–12.

Untuk mengetahui gangguan yang terjadi, diperlukan koordinat dari titik pusat dari pentagon tersebut. Dalam menghitung koordinat, setiap gas perlu dihitung dalam persentasenya. Perhitungan persentase setiap gas didapat dari kadar gas tertentu dibagi total gas hasil *DGA test* dalam satuan ppm. Rumus untuk menghitung koordinat adalah (Duval & Lamarre, 2014):

$$X_i = (\%) \text{ gas} \cdot \cos \alpha \quad (2.1)$$

$$Y_i = (\%) \text{ gas} \cdot \cos(90 - \alpha) \quad (2.2)$$

Di mana  $\alpha$  berarti sudut yang terbentuk dari garis suatu gas terhadap sumbu X. Misalnya, gas  $C_2H_6$  memiliki kadar 30% dengan sudut  $\alpha$  yang terbentuk dari garis gas  $C_2H_6$  dengan sumbu X yaitu  $18^\circ$ .

$$X_i = 30 \times \cos(18^\circ) = 28,53 \quad (2.3)$$

$$Y_i = 30 \times \cos(90^\circ - 18^\circ) = 9,27 \quad (2.4)$$