

## **BAB II**

### **MINYAK ISOLASI TRANSFORMATOR**

#### **2.1 Transformator**

Keberadaan transformator sangatlah penting karena manfaatnya dalam sebuah rangkaian listrik. Transformator adalah komponen elektronik yang berfungsi untuk mentransfer daya listrik di dalam rangkaian. Proses transfer ini umumnya melibatkan dua atau lebih rangkaian listrik. Pemindahan daya dilakukan melalui mekanisme induksi elektromagnetik.



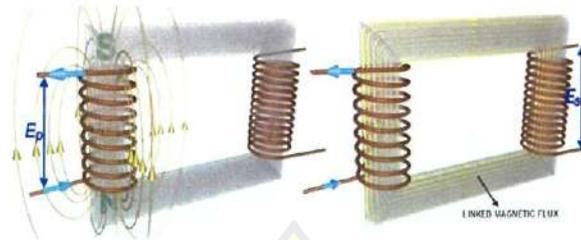
Gambar 2.1 Transformator

Pemindahan daya listrik dapat terjadi antara dua rangkaian listrik jika terdapat perbedaan kebutuhan daya di antara keduanya. Perbedaan ini biasanya disebabkan oleh perubahan tegangan arus listrik dalam suatu rangkaian. Oleh karena itu, transfer daya diperlukan untuk menyesuaikan impedansi antara sirkuit listrik yang tidak sinkron. Proses ini pada akhirnya akan membuat tegangan listrik dalam dua atau lebih rangkaian menjadi lebih stabil. Inilah alasan mengapa transformator memegang peran penting dalam proses transfer daya listrik pada sebuah rangkaian. (Idham A.Jufri, 2022)

#### **2.2 Prinsip Kerja Transformator**

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Ketika lilitan primer dialiri arus AC, perubahan arus listrik akan terjadi. Perubahan ini memengaruhi medan magnet yang terbentuk, sehingga memperkuat inti besi. Inti besi tersebut kemudian menyalurkan perubahan ke lilitan sekunder. Hal ini

menyebabkan terjadinya GGL induksi pada lilitan sekunder. Proses ini sering disebut sebagai induksi bolak-balik dan memiliki prinsip kerja yang serupa dengan induksi elektromagnetik. Baik induksi bolak-balik maupun induksi elektromagnetik memiliki penghubung magnetik antara lilitan primer dan sekunder.



Gambar 2.2 Prinsip Kerja Transformator

(Sumber : [www.learnengineering.org](http://www.learnengineering.org))

Hukum Faraday menyatakan bahwa gaya listrik yang melewati lintasan tertutup sebanding dengan perubahan waktu terhadap arus induksi yang mengelilingi lintasan tersebut. Di sisi lain, hukum Lorentz menjelaskan bahwa arus AC yang mengalir di sekitar inti besi dapat mengubah inti tersebut menjadi magnet. Jika inti magnet dililit dengan kawat, lilitan tersebut akan memiliki perbedaan tegangan pada kedua ujungnya. Kedua hukum ini, yang sering dipelajari dalam fisika, juga diterapkan dalam prinsip kerja transformator untuk memastikan fungsinya berjalan dengan baik. (Idham A.Jufri, 2022)

### 2.3 Komponen Transformator

Komponen transformator terdiri dari dua bagian, yaitu peralatan utama dan peralatan bantu. Peralatan utama transformator terdiri dari :

### 2.4 Kumbaran Transformator

Kumbaran pada transformator terdiri dari sejumlah lilitan kawat tembaga yang dilapisi bahan isolasi, seperti karton atau pertinax, untuk memberikan perlindungan terhadap inti besi maupun kumbaran lainnya. Pada transformator berdaya besar, lilitan ini biasanya direndam dalam minyak transformator yang berfungsi sebagai media pendingin. (Idham A.Jufri, 2022)



Gambar 2.3 Kumparan Transformator

(Sumber : Wikielektronika.com)

Jumlah lilitan pada transformator akan memengaruhi besar tegangan dan arus di sisi sekunder. Dalam beberapa kasus, transformator dilengkapi dengan kumparan tertier. Kumparan tertier ini digunakan untuk mendapatkan tegangan tambahan atau keperluan lainnya. Untuk kedua tujuan tersebut, kumparan tertier selalu dihubungkan dalam konfigurasi delta. Selain itu, kumparan tertier sering dimanfaatkan untuk menyambungkan peralatan tambahan, seperti kondensor sinkron, penghamburan shunt, dan reaktor shunt. (Idham A.Jufri, 2022)

## 2.5 Inti Besi

Inti besi pada transformator dibuat dari lapisan-lapisan tipis bahan feromagnetik yang berfungsi untuk mempermudah aliran fluks magnetik yang dihasilkan oleh arus listrik dalam kumparan. Inti besi ini juga dilapisi bahan isolasi guna mengurangi panas yang disebabkan oleh arus eddy atau 'Eddy Current,' sehingga dapat meminimalkan kerugian energi pada inti besi. (Idham A.Jufri, 2022)

## 2.6 Minyak Transformator

Minyak transformator adalah salah satu jenis bahan isolasi cair yang digunakan untuk fungsi isolasi dan pendinginan pada transformator. Sebagai bahan isolasi, minyak ini harus memiliki kemampuan menahan tegangan tembus, sementara sebagai media pendingin, minyak harus mampu menyerap dan meredam panas yang dihasilkan oleh penghantar tembaga. Dengan kedua fungsi tersebut, minyak transformator diharapkan dapat melindungi transformator dari gangguan yang mungkin terjadi. (Idham A.Jufri, 2022)



Gambar 2.4 Minyak Tangki Transformator  
(Sumber : [www.learnengineering.org](http://www.learnengineering.org))

Peningkatan suhu pada transformator dapat memicu terjadinya proses pembentukan karbondioksida dalam minyak. Tegangan tembus dan kerapatan konduksi merupakan beberapa indikator atau parameter yang digunakan untuk mengevaluasi apakah minyak transformator memiliki ketahanan listrik yang sesuai dengan persyaratan yang telah ditetapkan. (Idham A.Jufri, 2022)

## 2.7 Karakteristik Umum Minyak Isolasi Transformator

Pada transformator, terutama yang berkapasitas besar, kumparan dan inti besi biasanya dicelupkan dalam minyak trafo. Beberapa kriteria perlu dipenuhi agar suatu cairan dapat digunakan sebagai minyak trafo, yaitu:

1. Isolasi harus memiliki ketahanan yang tinggi ( $>30$  kV/mm).
2. Densitas cairan harus rendah agar partikel-partikel inert dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
3. Viskositas minyak harus rendah agar sirkulasi menjadi lebih lancar dan efisiensi pendinginan meningkat.
4. Minyak harus memiliki titik nyala yang tinggi dan tidak mudah menguap, untuk mencegah potensi bahaya.
5. Tidak merusak bahan isolasi padat yang digunakan.
6. Memiliki sifat kimiawi yang stabil

## 2.8 Bushing

Bushing adalah sebuah konduktor porselin yang menghubungkan kumparan transformator dengan sistem jaringan eksternal. Bushing dilapisi oleh isolator dan berfungsi sebagai penghubung antara konduktor tersebut dengan tangki transformator. Selain itu, bushing juga berperan sebagai pengaman untuk mencegah terjadinya hubungan singkat antara kabel bertegangan dengan tangki trafo. (Idham A.Jufri, 2022)

## 2.9 Tangki dan Konservator (Khusus Transformator Basah)

Biasanya, komponen-komponen transformator yang terendam minyak ditempatkan dalam tangki yang terbuat dari baja. Tangki pada transformator distribusi umumnya dilengkapi dengan sirip pendingin (fin) yang berfungsi untuk meningkatkan luas permukaan dinding tangki, sehingga proses konveksi panas minyak dapat berlangsung lebih efektif. Untuk menampung ekspansi minyak, tangki tersebut juga dilengkapi dengan konservator. (Idham A.Jufri, 2022)

## 2.10 Peralatan Bantu Transformator

Adapun peralatan bantu transformator terdiri dari :

1. Peralatan pendingin pada transformator diperlukan untuk mengatasi panas yang dihasilkan oleh rugi-rugi besi dan tembaga pada inti serta kumparan. Jika panas tersebut menyebabkan suhu meningkat secara berlebihan, dapat merusak isolasi di dalam transformator. Oleh karena itu, untuk mencegah kenaikan suhu yang berlebihan, transformator dilengkapi dengan sistem pendingin yang berfungsi untuk mengalirkan panas keluar. Sistem pendingin ini dapat menggunakan berbagai media, seperti udara/gas, minyak, atau air.
2. Tap Changer; yaitu suatu alat yang berfungsi untuk mengubah kedudukan tap (sadapan) dengan maksud mendapatkan tegangan keluaran yang stabil walaupun beban berubah-ubah. Tap changer selalu diletakkan pada posisi tegangan tinggi dari trafo pada posisi tegangan tinggi. Tap changer dapat dilakukan baik dalam keadaan berbeban (on-load) atau dalam keadaan tak berbeban (of load), tergantung jenisnya.

3. Peralatan Proteksi; peralatan yang mengamankan trafo terhadap bahaya fisis, listrik maupun kimiawi. Yang termasuk peralatan proteksi transformator antara lain sebagai berikut :
  1. Relai Buchholz: Merupakan relai yang berfungsi mendeteksi dan melindungi transformator dari gangguan internal yang menghasilkan gas. Gas ini dapat muncul akibat gangguan seperti hubungan singkat antar-lilitan (baik dalam satu fasa maupun antar fasa), hubungan singkat antar fasa ke tanah, busur listrik antar laminasi, atau busur listrik akibat kontak yang tidak sempurna.
  2. Relai Tekanan Lebih: Relai ini berfungsi mendeteksi gangguan pada transformator apabila terjadi kenaikan tekanan gas secara mendadak, yang kemudian secara otomatis memutuskan pemutus sirkuit (CB) di sisi upstream.
  3. Relai Diferensial: Relai ini mendeteksi gangguan pada transformator yang disebabkan oleh flash over antara lilitan dengan lilitan, lilitan dengan tangki, atau antar belitan di dalam kumparan.
  4. Relai Beban Lebih: Berfungsi melindungi transformator dari kondisi beban berlebih. Relai ini menggunakan rangkaian simulator untuk mendeteksi kondisi lilitan transformator. Apabila terjadi gangguan, relai akan memicu alarm pada tahap awal dan memutuskan pemutus tenaga (PMT) jika diperlukan.
  5. Relai Arus Lebih: Relai ini melindungi transformator dari gangguan hubungan singkat antar fasa, baik di dalam maupun di luar area proteksi transformator. Relai ini juga dirancang untuk melengkapi fungsi relai beban lebih. (Idham A.Jufri, 2022)
4. Peralatan Indikator untuk mengawasi selama transformator beroperasi maka perlu adanya indikator pada transformator seperti indikator suhu minyak, indikator level minyak.

## 2.11 Perawatan dan Pemantauan Transformator

Dengan melakukan perawatan secara berkala dan memantau kondisi transformator pada saat beroperasi akan banyak keuntungan yang didapat antara lain :

1. Meningkatkan bantuan dari transformator tersebut.
2. Memperpanjang masa pakai.
3. Jika masa pakai lebih panjang maka secara otomatis akan dapat menghemat biaya penggantian unit trafo.

Adapun langkah-langkah perawatan dari transformator, antara lain adalah:

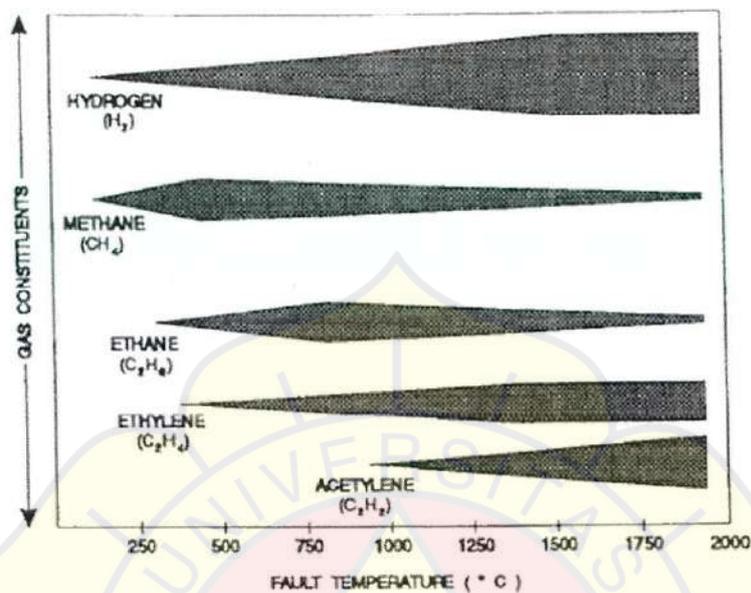
1. Periksa berkala kualitas isolasi minyak.
2. Pemeriksaan / pemeriksaan berkala secara langsung (Visual Inspection).
3. Pemeriksaan-pemeriksaan secara teliti (overhauls) yang terjadwal.

## 2.12 Analisis Gas Terlarut (DGA)

Transformator sebagai perangkat tegangan tinggi memiliki potensi mengalami kondisi abnormal yang dapat dipicu oleh faktor internal maupun eksternal. Kondisi abnormal ini dapat memengaruhi kinerja transformator, dengan dampak umum berupa overheating, corona, dan arcing. Salah satu cara untuk mendeteksi adanya kondisi abnormal pada transformator adalah dengan menganalisis dampak yang ditimbulkan. Untuk keperluan tersebut, digunakan metode Dissolved Gas Analysis (DGA). Ketika terjadi kondisi abnormal, minyak isolasi sebagai rantai hidrokarbon akan terurai akibat energi yang dihasilkan, menghasilkan gas-gas hidrokarbon yang terlarut dalam minyak isolasi (Sizwe Magiya, 2007).

DGA merupakan metode untuk mengukur konsentrasi gas-gas hidrokarbon yang terbentuk akibat kerusakan minyak isolasi menggunakan perangkat uji DGA. Dari komposisi dan konsentrasi gas-gas tersebut, dapat diidentifikasi jenis ketidaknormalan yang terjadi pada transformator, seperti overheating, arcing, atau corona. Secara umum, gas-gas yang terlarut dalam minyak isolasi transformator

diekstraksi terlebih dahulu sehingga gas tersebut dapat dianalisis. Setelah gas dipisahkan dari minyak isolasi, jenis dan konsentrasi gas tersebut diidentifikasi menggunakan metode kromatografi.



Gambar 2.5 Perbandingan Konsentrasi Gas dengan Temperatur  
(Sumber : SK DIR PLN 0520)

Berdasarkan Gambar 2.5, dapat dilihat perbandingan antara konsentrasi gas terlarut dalam minyak transformator terhadap suhu. Gas hidrogen (H) adalah gas yang paling awal terbentuk, diikuti oleh gas metana (CH) yang konsentrasinya berkurang seiring meningkatnya suhu. Selanjutnya, gas etana (C H), etilena (C H), dan terakhir gas asetilena (C H) yang kehadirannya menunjukkan adanya overheating pada bagian dalam transformator. Hal-hal yang menjadi perhatian dalam pengujian ini meliputi:

1. Rasio konsentrasi antara gas-gas tertentu.
2. jenis gas yang terbentuk dan konsentrasinya.

Dengan mempertimbangkan kedua faktor tersebut, dilakukan interpretasi mengenai tingkat pengaruh gas terhadap gangguan atau kerusakan yang terjadi, sekaligus menentukan jenis gangguan yang berhubungan dengan pembentukan gas dalam minyak isolasi (SPLN, 2007). Gas-gas yang telah terbentuk akan terdeteksi

oleh alat detektor sebagai sinyal. Sinyal tersebut digunakan untuk menghitung konsentrasi gas dengan mengukur luas sinyal masing-masing gas. Pada pengujian DGA menggunakan skema kromatografi, terdapat sembilan jenis gas yang dianalisis untuk menentukan kondisi minyak isolasi transformator. Ketidaknormalan yang terdeteksi dianalisis berdasarkan konsentrasi gas yang dihasilkan oleh DGA dan dibandingkan dengan standar IEEE.

### **2.13 Metode Pengklasifikasian TDCG (Total Dissolved Combustible Gas)**

Metode pengklasifikasian TDCG (Total Dissolved Combustible Gas) pada minyak isolasi transformator adalah salah satu metode yang digunakan dalam analisis gas terlarut (Dissolved Gas Analysis/DGA). TDCG mengacu pada jumlah total gas terlarut yang dapat terbakar dalam minyak isolasi transformator. Metode ini digunakan untuk menentukan apakah transformator dalam kondisi normal atau mengalami masalah. Pengujian DGA dilakukan dengan mengambil sampel minyak isolasi dari transformator dan menganalisis gas-gas yang terlarut di dalamnya. Hasil analisis ini dapat memberikan informasi tentang kemungkinan adanya gangguan atau kegagalan pada transformator. Hasil pengujian DGA dibandingkan dengan nilai batasan standar untuk mengetahui apakah transformator berada pada kondisi normal atau ada indikasi kondisi yang tidak normal. (Demmassabu, 2014)

TDCG dapat digunakan sebagai salah satu parameter dalam pengklasifikasian kondisi transformator. Standar IEEE menetapkan batas konsentrasi gas terlarut berdasarkan jenis gas yang terdeteksi dalam minyak isolasi transformator.

Dalam pengujian DGA, gas-gas terlarut dalam minyak isolasi diekstrak, dipisahkan, diidentifikasi komponen-komponen individu, dan dihitung kuantitasnya dalam satuan part per million (ppm). Dengan demikian, pengklasifikasian TDCG pada minyak isolasi transformator merupakan salah satu bentuk analisis gas terlarut (DGA) yang penting untuk memastikan kinerja transformator tetap optimal dan mencegah terjadinya kegagalan yang dapat berdampak pada sistem penyaluran tenaga listrik. (Demmassabu, 2014)

**Tabel 2.1** Standart kondisi pada metode TDCG

No	Parameter Uji		Batasan IEEE std. C.57-104.2008			
			Kategori			
			1 Normal	2 Peringatan	3 Kritis	4 Darurat
1	Hydrogen	H <sub>2</sub>	100	101-700	701-1800	> 1800
2	Methane	CH <sub>4</sub>	120	121-400	401-1000	> 1000
3	Carbon monoxide	CO	350	351-570	571-1400	> 1400
4	Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	2500	2500-4000	4001-10000	> 10000
5	Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	50	51-100	101-200	> 200
6	Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	65	66-100	101-150	> 150
7	Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1	2-9	10-35	> 35
	TDCG (Total Dissolved Combustible Gas)		720	721-1920	1921-4630	> 4630

Untuk bisa mengetahui nilai TDCG bisa menjumlahkan semua kandungan gas (kecuali CO<sub>2</sub>) sehingga total dari penjumlahan dapat dikomparasi dengan tabel kategori TDCG.

$$\text{TDCG} = \text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{CO} + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_2\text{H}_2$$

**Catatan :** Sesuai standart IEEE std. C.57-104.2008 Dalam TDCG CO<sub>2</sub> tidak dihitung karna bukan merupakan gas yang mudah terbakar

1. Kondisi Normal (Normal Condition):

- TDCG Nilai Rendah : Jumlah gas yang terlarut dalam minyak transformator berada dalam kisaran normal.
- Interpretasi : Kondisi normal menunjukkan bahwa transformator berfungsi secara baik tanpa adanya masalah yang signifikan. Ini adalah kondisi yang diinginkan.

## 2. Kondisi Peringatan (Warning Condition):

- TDCG Nilai Menengah : Terjadi peningkatan gas-gas tertentu dalam minyak transformator, tetapi belum mencapai tingkat yang mengkhawatirkan.
- Interpretasi : Kondisi peringatan menandakan adanya potensi masalah atau perubahan dalam transformator. Perlu dilakukan pemantauan lebih lanjut atau investigasi untuk menentukan penyebabnya.

## 3. Kondisi Kritis (Critical Condition):

- TDCG Nilai Tinggi : Terjadi peningkatan yang signifikan dalam jumlah gas tertentu, melebihi batas yang ditetapkan.
- Interpretasi : Kondisi kritis menunjukkan bahwa transformator mengalami masalah serius. Peningkatan gas tertentu dapat menunjukkan adanya masalah seperti overloading, over-heating, atau kerusakan isolasi. Tindakan perbaikan segera mungkin diperlukan.

## 4. Kondisi Darurat (Emergency Condition):

- TDCG Nilai Sangat Tinggi : Terjadi peningkatan gas yang sangat signifikan, melebihi batas darurat yang ditetapkan.
- Interpretasi : Kondisi darurat menunjukkan adanya masalah serius dan mendesak pada transformator. Mungkin terjadi kebocoran atau kegagalan isolasi yang dapat menyebabkan kegagalan transformator. Tindakan perbaikan segera dan mungkin penggantian transformator bisa diperlukan.

Pada metode TDCG hasil dan kesimpulan yang bisa diambil hanya berbentuk kategori apakah kandungan gas terlarut pada minyak isolasi masih dalam kategori normal, peringatan, waspada, atau darurat sehingga tidak bisa membuat hasil dan kesimpulan kegagalan atau kesalahan apa yang ada pada minyak transformator maka perlu dilakukan metode interpretasi lain agar bisa menentukan kesalahan atau kegagalan apa yang terindikasi pada transformator.

## 2.14 Metode Interpretasi data DGA

Interpretasi data hasil pengujian gas terlarut didasarkan pada alasan bahwa kondisi pada tabung transformator yang terendam cairan minyak isolasi apakah menghasilkan sedikit atau tidak ada gas gangguan pada kondisi operasional normal. Metode TDCG, Segita Duval dan Roger Ratio adalah beberapa metode interpretasi untuk mendeteksi terjadinya kesalahan pada minyak isolasi transformator

## 2.15 Metode Rogers Ratio

Metode interpretasi Roger Rasio dalam analisis gas terlarut (Dissolved Gas Analysis/DGA) pada minyak isolasi transformator merupakan salah satu pendekatan yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi transformator berdasarkan hasil pengujian DGA. Metode ini melibatkan perhitungan rasio gas-gas terlarut tertentu dalam minyak isolasi transformator untuk menentukan kemungkinan adanya masalah atau kegagalan pada transformator gas. Gas – gas yang digunakan untuk perhitungan dalam metode ini ialah  $C_2H_2$  (asetilena),  $C_2H_4$  (etilena),  $CH_4$  (metana), dan  $H_2$  (hidrogen). Perbandingan kuantitas gas-gas ini akan memberikan nilai rasio suatu gas kunci terhadap gas lainnya, yang kemudian digunakan dalam interpretasi kondisi transformator berdasarkan standar yang telah ditetapkan.

**Tabel 2.2** Kasus kesalahan metode Roger Ratio

No	$C_2H_2/C_2H_4$	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$	Diagnosa Kesalahan
1	< 0.1	0.1 s/d 1.0	< 0.1	Normal
2	< 0.1	< 0.1	< 0.1	Busur api dengan densitas energi rendah (PD)
3	0.1 s/d 3.0	0.1 s/d 1.0	> 3.0	Arcing – dengan energi tinggi
4	< 0.1	0.1 s/d 1.0	1.0 s/d 3.0	Termal suhu rendah
5	< 0.1	> 1.0	1.0 s/d 3.0	Pemanasan < 700 °C
6	< 0.1	> 1.0	> 3.0	Pemanasan > 700 °C

### 1. Rasio 1

Untuk mengetahui nilai Ratio 1 bisa menggunakan perbandingan gas sebagai berikut :

$$R1 = \frac{C2H2}{C2H4}$$

Ratio ini Mengindikasikan potensi gangguan dalam transformator. Asetilen ( $C_2H_2$ ) umumnya dihasilkan dari dekomposisi termal yang lebih ekstrem dari pada etilena ( $C_2H_4$ ). Oleh karena itu, perbandingan konsentrasi asetilen dengan etilena memberikan gambaran tentang sejauh mana isolasi transformator telah mengalami dekomposisi termal. Tingginya nilai rasio dapat mengindikasikan peningkatan produksi asetilen yang dapat terkait dengan proses busur listrik (arcing) dalam transformator.

### 2. Ratio 2

Untuk mengetahui nilai Ratio 2 bisa menggunakan perbandingan gas sebagai berikut :

$$R2 = \frac{CH4}{H2}$$

Interaksi minyak dengan material padat, seperti serat selulosa dalam isolasi, atau dengan gas tertentu dapat menghasilkan metana dan hidrogen sebagai produk reaksi. Reaksi-reaksi ini dapat dipicu oleh kondisi operasional abnormal atau gangguan dalam transformator, Peningkatan konsentrasi  $CH_4$  dan  $H_2$  dapat menunjukkan adanya kebocoran atau gangguan termal dalam transformator rasio ini dapat membantu dalam memahami tingkat suhu dan energi yang terlibat dalam proses dekomposisi atau gangguan.

### 3. Ratio 3

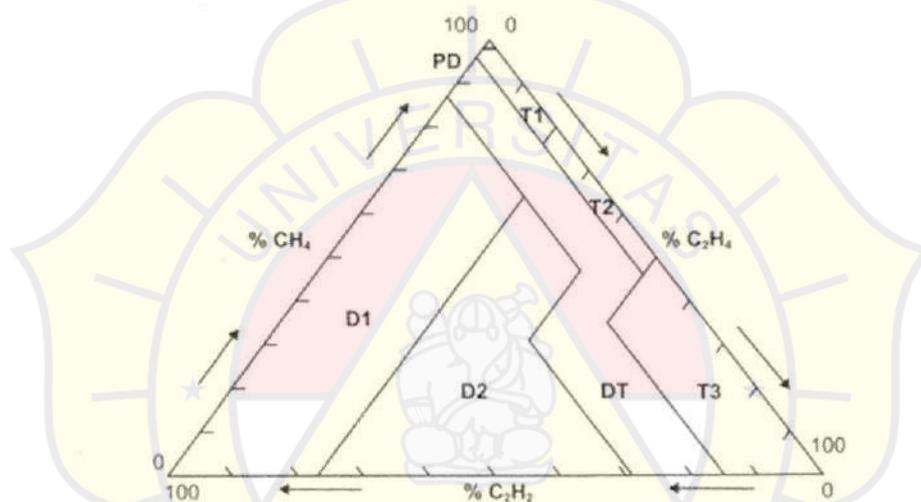
Untuk mengetahui nilai Ratio 3 bisa menggunakan perbandingan gas sebagai berikut :

$$R3 = \frac{C2H4}{C2H6}$$

Rasio  $C_2H_4/C_2H_6$  memberikan informasi tambahan tentang perubahan dalam komposisi hidrokarbon minyak dan isolasi. Mengidentifikasi potensi gangguan termal atau kebocoran yang memengaruhi degradasi minyak dan isolasi.

### 2.16 Duval Triangle

Metode Duval Triangle menggunakan tiga gas yang sesuai dengan peningkatan kandungan energi atau kesalahan suhu : metana ( $CH_4$ ) untuk kesalahan suhu rendah, etilena ( $C_2H_4$ ) untuk kesalahan suhu tinggi, dan asetilena ( $C_2H_2$ ) untuk suhu / energi sangat tinggi / kesalahan busur api. Di setiap sisi segitiga diplot persentase relatif dari ketiga gas ini.



Gambar 2.6 Segitiga Duval  
(Sumber : IEEE Std. C57.104-2019)

Perhitungan presentase dari ketiga gas tersebut bisa menggunakan rumus sebagai berikut :

Persentase  $C_2H_2$

$$\% C_2H_2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4} \times 100\%$$

Persentase  $C_2H_4$

$$\% C_2H_4 = \frac{C_2H_4}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4} \times 100\%$$

Persentase  $CH_4$

$$\% CH_4 = \frac{CH_4}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4} \times 100\%$$

Metode Duval Triangle memfokuskan pada tiga gas spesifik, yaitu Metana ( $\text{CH}_4$ ), Etilena ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), dan Asetilen ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ), dalam analisis Gas Dalam Minyak (DGA) pada transformator daya. Pemilihan ketiga gas ini didasarkan pada kemampuannya untuk memberikan indikasi tentang kondisi transformator dan jenis dekomposisi yang mungkin terjadi. Berikut adalah alasan di balik pemilihan ketiga gas ini:

1. Metana ( $\text{CH}_4$ ): Mewakili dekomposisi termal umum dan normal. Konsentrasi metana yang tinggi dapat mengindikasikan adanya panas yang cukup untuk menyebabkan dekomposisi minyak, tetapi tidak mencukupi untuk menyebabkan dekomposisi kelistrikan yang signifikan.
2. Etilena ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ): Mewakili dekomposisi kelistrikan. Konsentrasi etilena yang tinggi dapat menunjukkan adanya isolasi yang rusak atau korona yang terjadi dalam transformator.
3. Asetilen ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ): Mewakili proses oksidasi termal yang ekstrim. Asetilen seringkali dihasilkan oleh reaksi oksidasi yang melibatkan suhu tinggi, dan konsentrasi yang tinggi dapat mengindikasikan kondisi yang merugikan.

Dengan memonitor perubahan konsentrasi relatif dari ketiga gas ini, metode Duval Triangle memberikan indikasi awal tentang kondisi transformator dan memungkinkan operator untuk mengidentifikasi potensi masalah seperti overheating, korona, atau oksidasi.

Meskipun ada lebih banyak gas yang dapat diukur dalam analisis DGA, fokus pada tiga gas tersebut memberikan pendekatan yang cukup sederhana namun informatif untuk pemantauan kondisi transformator. Pemilihan gas ini telah terbukti efektif dalam mendeteksi perubahan kondisi transformator dan memberikan petunjuk terhadap masalah potensial

Tabel 2.3 Tabel persentase kesalahan metode Duval Triangle

Tipe Kegagalan	%CH <sub>4</sub>	%C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	%C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
PD	≥98	-	-
T1	< 98	< 20	< 4
T2	-	≥20 dan < 50	< 4
T3	-	≥50	< 15
DT	-	< 50	≥4 dan < 13
	-	≥40 dan < 50	≥13 dan < 29
	-	≥50	≥15 dan < 29
D1	-	< 23	> 13
D2	-	≥23	≥29
	-	≥23 and < 40	≥13 and < 29

Penjelasan pada tabel persentase kesalahan metode segitiga duval :

1. Kesalahan PD dimana pada kandungan CH<sub>4</sub> akan mencapai lebih besar sama dengan 98%
2. Kesalahan T1 dimana pada kandungan CH<sub>4</sub> berada dibawah 98% dan C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> berada di bawah 20% dan C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> berada dibawah 4%
3. Kesalahan T2 dimana pada kandungan C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> berada di atas sama dengan 20% dan dibawah 50%, serta kandungan C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> berada dibawah 4%
4. Kesalahan T3 dimana pada kandungan C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> berada di atas sama dengan 50% dan kandungan C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> berada dibawah 15%.
5. Kesalahan DT memiliki 3 karakteristik :
  - Dimana pada kandungan C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> berada di bawah sama dengan 50%, kandungan C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> berada diatas sama dengan 4% dan dibawah 13%.
  - Dimana pada kandungan C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> berada di atas sama dengan 40% dan dibawah 50%, kandungan C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> berada diatas sama dengan 13% dan dibawah 29%.
  - Dimana pada kandungan C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> berada di atas sama dengan 50%. Kandungan C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> berada diatas sama dengan 15% dan dibawah 29%.
6. Kesalahan D1 dimana pada kandungan C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> berada di bawah sama dengan 23% dan kandungan C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> berada diatas 13%.
7. Kesalahan D2 memiliki 2 karakteristik :

1. dimana pada kandungan  $C_2H_4$  berada diatas sama dengan 23% dan kandungan  $C_2H_2$  berada diatas sama dengan 29%.
2. dimana pada kandungan  $C_2H_4$  berada di atas sama dengan 40% dan dibawah 50%, kandungan  $C_2H_2$  berada diatas sama dengan 13% dan dibawah 29%.

Enam jenis kesalahan dasar yang di tunjukkan dibawah dan disingkat dalam tabel yang dapat diidentifikasi dengan hasil DGA menggunakan metode – metode interpretasi

Tabel 2.4 Tabel pejelasan kesalahan pada metode Duval Triangle

PD	Pembentukan sebagian tipe corona
D1	Pelepasan energi rendah atau sebagian jenis percikan
D2	Pelepasan energi tinggi
T1	Kesalahan termal $t < 300 \text{ }^\circ\text{C}$
T2	Kesalahan termal $t > 300 \text{ }^\circ\text{C} < 700 \text{ }^\circ\text{C}$
T3	Kesalahan Termal $t > 700 \text{ }^\circ\text{C}$

1. *Partial Discharge* (PD) adalah fenomena kebocoran arus listrik yang terjadi di dalam isolasi transformator. Kebocoran ini dapat menghasilkan gas-gas tertentu, termasuk metana ( $CH_4$ ) dan etilena ( $C_2H_4$ ), yang kemudian dapat terdeteksi melalui analisis DGA.
2. *Discharges of Low Energy* (D1), Pelepasan parsial dari jenis percikan bisa menyebabkan terbentuknya lubang kecil atau karbonisasi pada kertas. Energi yang rendah dari percikan listrik bisa menyebabkan terjadinya karbonisasi atau pelacakan permukaan kertas, bahkan pembentukan partikel karbon dalam minyak.
3. Pelepasan energi tinggi (D2), Kesalahan ini terjadi ketika ada arus bocor ke dalam minyak isolasi transformator dengan energi tinggi. dalam minyak mineral atau kertas, dengan Peningkatan daya, dibuktikan dengan penghancuran dan karbonisasi kertas yang luas, ekstremitas pelepasan pada fusi logam, karbonisasi yang sangat tinggi dalam minyak mineral dan, dalam beberapa kasus dapat menyebabkan trip Transformator hal tersebut mengkonfirmasi tindak lanjut arus besar.

4. Kerusakan termal, dalam minyak mineral dan kertas, di bawah 300 °C jika kertas berubah menjadi kecoklatan (T1), dan di atas 300 °C jika telah terkarbonisasi (T2).
5. Kesalahan termal suhu di atas 700 °C (T3) jika ada bukti kuat karbonisasi minyak mineral, perubahan warna logam (800 °C) atau fusi logam (>1000 °C).

### **2.17 Pengujian Tegangan Tembus (Breakdown Voltage)**

Tegangan tembus adalah tegangan di mana isolator tidak lagi mampu menahan medan listrik antara elektroda yang memiliki perbedaan potensial, sehingga isolator berubah fungsi menjadi konduktor. Proses tembus listrik pada minyak transformator dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satunya adalah keberadaan kontaminan yang bergerak menuju area dengan medan listrik tinggi di antara kedua elektroda. Tegangan tembus pada isolator cair juga dipengaruhi oleh karakteristik tegangan, sistem tegangan yang digunakan, serta durasi penerapan tegangan tersebut.

Selain itu, nilai tegangan tembus bergantung pada kekuatan dielektrik bahan dan keberadaan unsur lain. Kandungan air dalam minyak transformator dapat menurunkan daya tahan listriknya, memicu ionisasi, dan menyebabkan kerusakan pada isolasi cair maupun padat. Jika terjadi hubungan singkat antar lilitan, isolasi kertas pada lilitan dapat terbakar dan menghasilkan karbon.

Kandungan air dan oksigen yang terbentuk juga berpotensi menghasilkan asam, yang dapat menyebabkan korosi endapan, serta mempercepat penurunan usia transformator. Oleh karena itu, pengujian tegangan tembus minyak transformator perlu dilakukan untuk menilai kualitas minyak tersebut. Berdasarkan standar uji PLN (SPLN) 49-1/1982, minyak transformator yang digunakan sebagai bahan isolasi harus memiliki tegangan tembus minimum sebesar 30 kV/2,5 mm.

Tabel 2.5 Standart Uji Tegangan Tembus SPLN 49 – 1 : 1982

No	Sifat Minyak Isolasi	Tegangan Peralatan	Batas yang diperbolehkan	Metode Uji	Tempat Uji
1	Tegangan Tembus	$\geq 170$ kV	$\geq 50$ kV / 2,5mm	IEC 156	Ditempat / Laboratorium
2		$>70 - < 170$ kV	$\geq 40$ kV / 2,5mm	IEC 156	Ditempat / Laboratorium
3		$\leq 70$ kV	$\geq 30$ kV / 2,5mm	IEC 156	Ditempat / Laboratorium

Pada uji tegangan tembus metode pengujian dan pengambilan sample mengacu pada IEC 156 dan satuan yang digunakan adalah kV/2,5mm dimana ini merujuk pada jarak antar elektroda mesin uji tegangan tembus dimana pada jarak 2,5mm minyak isolasi harus bisa menahan tegangan hingga diatas tegangan yang diperbolehkan. Untuk transformator yang tegangan pada sisi primernya di atas sama dengan 170 kV maka minyak isolasi harus memiliki ketahanan tegangan tembus minyak diatas sama dengan 50kV / 2,5mm, untuk transformator yang pada sisi primernya di atas sama dengan 70 kV samapai 170 kV maka minyak isolasi harus memiliki ketahanan tegangan tembus minyak diatas sama dengan 40kV / 2,5mm dan untuk transformator yang tegangan pada sisi primernya dibawah sama dengan 70 kV maka minyak isolasi harus memiliki ketahanan tegangan tembus minyak diatas sama dengan 30kV / 2,5mm adapun lokasi pengujian bisa dilakukan ditempat atau di laboratorium jika tidak memiliki alat uji tegangan tembus.