

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Transformator tenaga adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga atau daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Dalam operasi penyaluran tenaga listrik transformator dapat dikatakan jantung dari transmisi dan distribusi. Dalam kondisi ini suatu transformator diharapkan dapat beroperasi secara maksimal (kalau bias secara terus menerus tanpa berhenti). Mengingat kerja keras dari suatu transformator seperti itu, maka cara pemeliharaan juga dituntut sebaik mungkin. Oleh karena itu transformator harus dipelihara dengan menggunakan system dan peralatan yang benar, baik dan tepat. Untuk itu regu pemeliharaan harus mengetahui bagian-bagian transformator dan bagian-bagian mana yang perlu diawasi melebihi bagian lainnya.

Berdasarkan tegangan operasinya dapat dibedakan menjadi transformator 500/150 kV dan 150/70 kV biasa disebut *Interbus Transformator* (IBT). Transformator 150/20 kV dan 70/20 kV disebut juga trafo distribusi. Titik netral transformator ditanahkan sesuai dengan kebutuhan untuk system proteksi, sebagai contoh transformator 150/70 kV ditanahkan secara langsung di sisi netral 150 kV

dan transformator 70/20 kV ditanahkan dengan tahanan rendah atau tahanan tinggi atau langsung disisi netral 20 kV nya.

Di dalam transformator juga terdapat minyak transformator. Minyak transformator memiliki dua fungsi antara lain sebagai isolator dan sebagai pendingin. Kebanyakan transformator pada sistem tenaga listrik merupakan transformator dengan inti terendam. Transformator daya tentunya berhubungan dengan daya yang sangat besar. Hal tersebut menyebabkan kenaikan temperatur (panas) yang tinggi pada transformator. Untuk menghindari terjadinya kerusakan akibat temperatur tinggi, maka digunakan minyak trafo sebagai pendingin. Kelebihan daripada minyak trafo yaitu bersifat sebagai media pemindah panas dengan cara sirkulasi dan dapat menjangkau celah-celah sempit sekalipun. Sebagai isolator, minyak transformator mencegah terjadinya hubung singkat antara coil pada konduktor dan sebagai pengaman apabila terjadi percik api (*sparks*) di dalam transformator.

Pada transformator daya dapat terjadi gangguan- gangguan yang dapat menyebabkan kegagalan transformator. Untuk itu diperlukan perawatan dan pemeliharaan pada transformator daya, salah satunya dengan melakukan pengujian minyak transformator yaitu pengujian DGA (*Dissolved Gas Analysis*). Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui ada tidaknya ketidaknormalan pada transformator. Uji DGA merupakan analisis kondisi transformator yang dilakukan berdasarkan jumlah gas terlarut pada minyak transformator. Pada

tulisan ini menggunakan empat metode untuk analisa kegagalan transformator yaitu metode TDCG, Key Gass, Roger's Ratio, Duval's Triangle.

Uji DGA dilakukan pada suatu sampel minyak diambil dari unit transformator kemudian gas-gas terlarut (*Dissolved Gas*) tersebut diekstrak. Gas yang telah diekstrak lalu dipisahkan, diidentifikasi komponen-komponen individual, dan dihitung kualitasnya (dalam satuan Part Per Million-ppm). Keuntungan utama uji DGA adalah deteksi dini akan adanya fenomena kegagalan yang ada pada transformator yang diujikan. Namun kelemahan utamanya adalah diperlukan tingkat kemurnian yang tinggi dari sampel minyak yang diujikan. Rata-rata alat uji DGA memiliki sensitivitas yang tinggi, sehingga ketidakmurnian sampel akan menurunkan tingkat akurasi dari hasil uji DGA.

Roberto, (2014), melakukan penelitian tentang analisis kegagalan transformator daya berdasarkan hasil uji dengan metode TDCG, Key Gass, Roger's Ratio, Duval's Triangle pada gardu induk.

Faishal (2011), melakukan penelitian tentang analisis indikasi kegagalan transformator dengan metode *Dissolved Gas Analysis*.

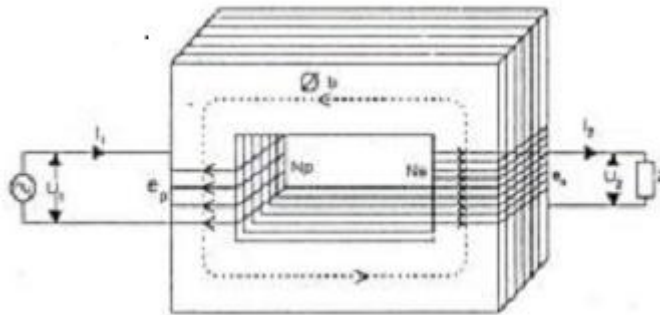
Hardityo, (2008) melakukan penelitian tentang analisis indikasi kegagalan transformator dengan menggunakan metode analisis gas terlarut.

## **2.2 Landasan Teori**

### **2.2.1 Transformator Tenaga**

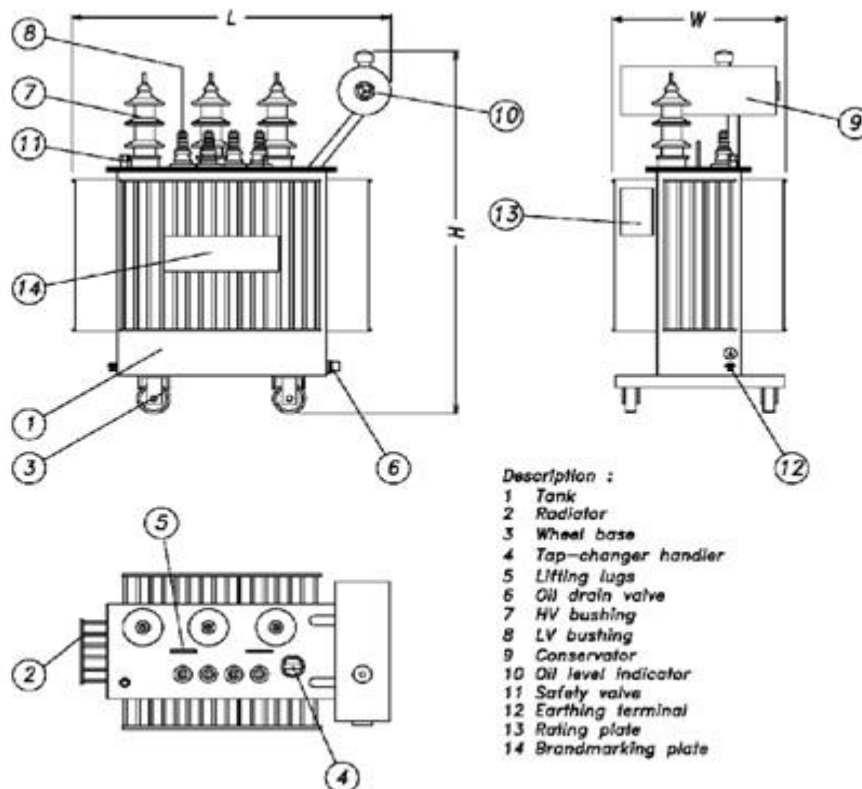
Transformator merupakan peralatan statis untuk memindahkan energi listrik dari satu rangkaian listrik ke rangkaian lainnya dengan mengubah tegangan tanpa merubah frekuensi. Transformator disebut peralatan statis karena tidak ada bagian yang bergerak/berputar, tidak seperti rotor atau generator. Penguahan tegangan dilakukan dengan memanfaatkan prinsip induktansi elektromagnetik pada lilitan. Fenomena induksi elektromagnetik yang terjadi dalam satu waktu pada transformator adalah induktansi sendiri pada masing-masing lilitan diikuti oleh induktansi bersama yang terjadi antar lilitan.

Secara sederhana transformator dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu lilitan primer, lilitan sekunder, dan inti besi. Lilitan primer merupakan bagian transformator yang terhubung dengan rangkaian sumber energi (catu daya). Lilitan sekunder merupakan bagian transformator yang terhubung dengan rangkaian beban. Inti besi merupakan bagian transformator yang bertujuan untuk mengarahkan keseluruhan fluks magnet yang dihasilkan oleh lilitan primer agar masuk ke lilitan sekunder. Rangkaian transformator sederhana ditunjukkan pada gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Rangkain Transformator Sederhana

Salah satu bagian penting dari sistem tenaga listrik adalah transformator yang disebut sebagai transformator daya atau *power transformer*. Transformator daya dapat didefinisikan sebagai sebuah transformator yang digunakan untuk memindahkan energi listrik yang terletak di berbagai bagian dari rangkaian listrik antara generator dengan rangkaian primer dari sistem distribusi. Berikut adalah gambar dari sebuah transformator daya



Gambar 2.2 Konstruksi Transformator Tenaga

### 2.2.2 Sistem Pendingin

Transformator daya merupakan komponen yang menahan daya listrik yang sangat besar. Daya yang besar akan berakibat pada kenaikan temperatur pada transformator. Apabila temperatur transformator bernilai tinggi dalam jangka waktu yang relatif lama, maka dapat mengakibatkan kerusakan pada transformator itu sendiri seperti pada kumparan dan inti besi. Untuk mencegah terjadinya kerusakan pada komponen di dalam transformator, maka sistem pendingin sangat dibutuhkan dalam rangka memperpanjang masa operasi dan *maintenance* daripada transformator. Pengoperasian transformator daya tidak terlepas dari adanya daya-daya yang hilang. Daya-daya hilang ini terkonversi dalam bentuk panas. Panas

timbul pada bagian inti, belitan, minyak isolator dan tangki transformator. Panas yang timbul ini biasanya akan dibuang ke atmosfer/lingkungan sekitar melalui tangki transformator dan sistem pendingin. Sistem pendingin pada transformator digunakan untuk mengurangi panas dan menjaga kenaikan temperatur agar tetap berada dibawah batasan tertentu. Temperatur maksimum bahan isolator pada belitan dan minyak sangat tergantung dari pembebanan, jenis sistem pendingin, serta temperatur lingkungan sekitar.

### 2.2.2.1 Klasifikasi Sistem Pendingin

*Pendingin* dapat diklasifikasikan berdasarkan cara kerja sirkulasinya, antara lain:

- Alamiah (*Natural*)
- Tekanan/Paksa (*Forced*)

**Tabel 2.1** Klasifikasi sistem pendingin pada transformator tenaga

No.	Macam Sistem Pendingin	Media			
		Di dalam Transformator		Di luar Transformator	
		Sirkulasi Alami	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alami	Sirkulasi Paksa
1.	AN	-	-	Udara	-
2.	AF	-	-	-	Udara
3.	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4.	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5.	OFAN	-	Minyak	Udara	-

**Tabel 2.1** Klasifikasi sistem pendingin pada transformator daya (Lanjutan)

6.	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7.	OFWF	-	Minyak	-	Air
8.	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9.	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10.	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11.	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

#### **2.2.2.2. Perubah Tap (*Tap Changer*)**

*Tap changer* merupakan bagian transformator yang berfungsi untuk merubah perbandingan transformator, dengan begitu dapat merubah tegangan sisi sekunder sesuai dengan yang diinginkan. *Tap Changer* berdasarkan pengoperasiannya ada dua jenis, yaitu OLTC (*On Load Tap Changer*) yang dioperasikan pada saat kondisi trafo tidakdikenai beban.

#### **2.2.2.3 Dehydrating Breather**

Alat pernafasan (*Dehydrating Breather*) pada konservator minyak sangat dibutuhkan dimana pada saat suhu transformator meningkat, minyak trafo akan mengalami penuaian sehingga dibutuhkan alat pernafasan yang berfungsi mengatur tekanan dalam konservator. Permukaan minyak akan selalu bersinggungan dengan udara. Udara yang lembab dan mengandung uap air dapat berakibat buruk pada kondisi minyak, oleh sebab itu pada ujung pipa penghubung minyak dengan udara luar ditempatkan *silica gel* untuk menyerap kelembaban



dalam udara sehingga udara yang masuk ke dalam konservator merupakan udara yang benar-benar kering.

### **2.2.3 Minyak Sebagai Bahan Isolator Cair pada Transformator**

Isolator merupakan suatu sifat bahan yang mampu untuk memisahkan dua buah penghantar atau lebih yang berdekatan untuk mencegah adanya kebocoran arus/hubung singkat, maupun sebagai pelindung mekanis dari kerusakan yang diakibatkan oleh korosi atau *stressing*. Minyak isolator yang dipergunakan dalam transformator daya mempunyai beberapa tugas utama, yaitu :

1. Media Isolator
2. Media pendingin
3. Media / alat untuk memadamkan busur api
4. Perlindungan terhadap korosi dan oksidasi

Minyak isolator transformator dapat dibedakan atas dua jenis, yaitu minyak mineral dan minyak sintetis. Pemilihan jenis minyak didasarkan pada keadaan lingkungan dimana transformator digunakan, misal askarel adalah jenis minyak sintetis yang tidak dapat terbakar, sehingga pemakaian askarel memungkinkan transformator distribusi dapat digunakan pada lokasi dimana bahaya api sangat besar, tetapi dari segi kesehatan minyak ini dinilai sangat membahayakan. Oleh karena itu di beberapa negara ada larangan mempergunakan askarel.

Minyak trafo jenis minyak mineral biasanya merupakan campuran kompleks dari molekul-molekul hidrokarbon, baik dalam bentuk linear (*paraffinic*) atau siklis (*cycloaliphatic* atau *aromatic*), mengandung kelompok molekul  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$ ,

dan CH yang terikat. Formula umum dari minyak trafo adalah  $C_nH_{2n+2}$  dengan n bernilai antara 20 s.d 40.

### **2.2.3.1 Sifat-Sifat Listrik Cairan Isolasi**

Sifat-sifat listrik yang menentukan unjuk kerja cairan sebagai isolasi adalah :

#### *1. Withstand Breakdown*

Withstand Breakdown kemampuan untuk tidak mengalami kegagalan dalam kondisi tekanan listrik (electric stress) yang tinggi.

#### *2. Kapasitansi Listrik*

Kapasitansi Listrik per unit volume yang menentukan permitivitas relatifnya

Minyak petroleum merupakan substansi nonpolar yang efektif karena merupakan campuran cairan hidrokarbon. Minyak ini memiliki permitivitas kira-kira 2 atau 2.5. Ketidak bergantungan permitivitas substansi nonpolar pada frekuensi membuat bahan ini lebih banyak dipakai dibandingkan dengan bahan yang bersifat polar. Misalnya air memiliki permitivitas 78 untuk frekuensi 50 Hz, namun hanya memiliki permitivitas 5 untuk gelombang mikro.

#### *3. Faktor Daya*

Faktor disipasi daya dari minyak dibawah tekanan bolak balik dan tinggi akan menentukan unjuk kerjanya karena dalam kondisi berbeban terdapat sejumlah rugi-rugi dielektrik. Faktor disipasi sebagai ukuran rugi-

rugi daya merupakan parameter yang penting bagi kabel dan kapasitor. Minyak trafo murni memiliki faktor disipasi yang bervariasi antara  $10^{-4}$  pada  $20^{\circ}\text{C}$  dan  $10^{-3}$  pada  $90^{\circ}\text{C}$  pada frekuensi 50 Hz.

#### 4. Resistivitas

Suatu cairan dapat digolongkan sebagai isolasi cair bila resistivitasnya lebih besar dari 109 W-m. Pada sistem tegangan tinggi resistivitas yang diperlukan untuk material isolasi adalah  $10^{16}$  W-m atau lebih. ( $W = \text{Ohm}$ ).

### 2.2.4 Jenis Minyak Trafo

#### a) Minyak Trafo Mineral

Minyak yang berbahan dasar dari pengolahan minyak bumi yaitu antara fraksi minyak diesel dan turbin yang mempunyai struktur kimia yang sangat kompleks.

#### b) Minyak Trafo Sintetis (*Askarel*)

Minyak jenis ini mempunyai sifat lebih menguntungkan antara lain tidak mudah terbakar dan tidak mudah teroksidasi. Namun beracun dan dapat melukai kulit.

### 2.4 Klasifikasi Minyak Isolasi

Pada tabel 2.2 diperlihatkan klasifikasi minyak isolasi

**Tabel 2.2** Klasifikasi Minyak Isolasi

Gas(ppm)\Kondisi	1	2	3	4
H <sub>2</sub>	<100	101-700	701-1800	>1800
CH <sub>4</sub>	<120	121-400	401-1000	>1000
CO	<350	351-570	571-1400	>1400
CO <sub>2</sub>	<2500	2500-4000	4001-10000	>10000
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	<50	51-100	101-200	>200
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	<65	66-100	101-150	>150
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1	1 – 9	10 – 35	>35
TDCG	<720	721-1920	1921-4630	>4630

Keterangan Tabel:

**Kategori 1:**

Kondisi minyak isolasi sangat memuaskan untuk meneruskan operasi, semua parameter dibawah limit yang direkomendasikan IEC 422-1991

**Kategori 2:**

Kondisi minyak isolasi perlu untuk dilakukan reconditioning (*purifier/vacum filter*). Indikasinya kadar air tinggi, tegangan tembus rendah dan parameter yang lain memuaskan.

### **Kategori 3:**

Kondisi minyak isolasi perlu dilakukan *reclaiming*, Indikasinya parameter keasaman dan faktor kebocoran dielektrik sudah tinggi.

### **Kategori 4:**

Kondisi minyak isolasi sudah tidak memenuhi spesifikasi sebagai minyak isolasi pakai dan tidak bisa digunakan lagi.

## **2.2.6 Gangguan pada Transformator**

Adanya gangguan pada transformator dapat berpengaruh besar pada kinerja sistem, bahkan dapat menyebabkan kerusakan pada transformator. Gangguan yang terjadi pada transformator dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis antara lain:

### **2.2.6.1 Gangguan Internal**

Gangguan internal merupakan jenis gangguan yang terjadi atau disebabkan oleh transformator itu sendiri. Jenis gangguan internal yang terdapat pada trafo dapat berupa percikan dan lompatan api yang dapat mempengaruhi sistem pendingin, kerusakan pada isolator, kondisi bushing dan kumparan yang kurang tepat.

### **2.2.6.2 Gangguan Eksternal**

Gangguan eksternal yang terjadi pada trafo disebabkan oleh adanya faktor-faktor eksternal di luar trafo seperti terjadinya hubung singkat pada *feeder*,

gelombang petir (surge) dan beban berlebih (*overload*) yang menyebabkan terjadinya kenaikan temperatur secara drastis. Jenis hubung singkat yang umum terjadi pada sistem tenaga listrik yaitu hubung singkat antar fasa dan hubung singkat fasa ke tanah.

Faktor eksternal antara lain yang dapat mengganggu operasi transformator yaitu faktor lingkungan seperti cuaca, debu, gangguan mekanis seperti kerusakan pada bagian luar transformator dan getaran pada transformator.

### **2.2.7 Peralatan Proteksi**

Peralatan proteksi pada transformator dibutuhkan untuk mencegah terjadinya gangguan yang dapat berakibat pada kerusakan sistem secara meluas. Adapun proteksi eksternal yang terdapat pada transformator berupa rele-rele proteksi yang mana difungsikan untuk mencegah transformator atau mengamankan sistem dari hubung singkat. Beberapa jenis rele yang digunakan untuk proteksi transformator antara lain:

#### **2.2.7.1 Rele Bucholz**

Rele bucholz merupakan jenis rele yang umum digunakan sebagai alat proteksi pada transformator jenis terendam dengan *rating* diatas 500 kV. Rele bucholz berfungsi untuk mendeteksi dan mengamankan transformator dari gangguan yang berpotensi menimbulkan gas. Gangguan yang terjadi di dalam transformator seperti hubung singkat dapat disebabkan oleh kegagalan minyak insulator di dalam transformator atau kerusakan luminasi inti besi. Prinsip kerja daripada rele bucholz ialah dengan mendeteksi adanya gas yang terbentuk pada

tangki minyak transformator. Besarnya kadar gas dalam minyak akan mengindikasikan seberapa parah kondisi gangguan yang terjadi dalam transformator.

#### **2.2.7.2 Rele Jansen**

Rele tekanan lebih berfungsi untuk mengamankan transformator dari gangguan dalam *tap changer* yang menimbulkan gas, dan dipasang pada pipa yang menuju konservator.

Rele tekanan lebih berupa *membrane* yang dibuat dari kaca, plastic, tembaga atau katup berpegas yang berfungsi sebagai pengaman tangki trafo terhadap kenaikan tekanan gas yang timbul di dalam tangki. Semakin besar gangguan yang terjadi dalam trafo, maka semakin besar gas yang dihasilkan. Gas tersebut akan menghasilkan tekanan yang akan memecah *membrane* rele.

#### **2.2.7.3 Rele Tekanan Tambah (*Sudden Pressure Relay*)**

Rele ini berfungsi hampir sama seperti rele buchholz, yakni pengaman terhadap gangguan di dalam trafo. Bedanya rele ini hanya bekerja oleh kenaikan tekanan gas yang tiba-tiba dan langsung mentripping PMT.

#### **2.2.7.4 Rele Differensial (*Differential Relay*)**

Rele ini berfungsi mengamankan trafo dari gangguan di dalam trafo akibat hubung singkat antara kumparan dengan kumparan, kumparan dengan tangki, atau belitan di dalam kumparan ataupun beda kumparan.

#### **2.2.7.5 Rele Arus Lebih (*Over Current Relay/OCR*)**

Berfungsi mengamankan trafo dari arus yang melebihi dari arus yang telah diperkenankan lewat dari trafo tersebut dan arus lebih ini dapat terjadi oleh karena beban lebih atau gangguan hubung singkat.

#### **2.2.7.6 Rele Tangki Tanah**

Berfungsi untuk mengamankan trafo bila ada hubung singkat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada trafo.

#### **2.2.7.7 Rele Gangguan Tanah (*Ground Fault Relay/GFR*)**

Berfungsi untuk mengamankan trafo bila terjadi gangguan hubung singkat satu ke fasa tanah.

#### **2.2.7.8 Relai Gangguan Tanah Terbatas (*Restricted Earth Fault/REF*)**

Rele ini berfungsi untuk mengamankan kumparan trafo bila ada gangguan asat fasa ke tanah di dekat titik netral trafo yang tidak bias dirasakan rele differensial.

#### **2.2.7.9 Rele Temperature/Suhu**

Rele temperatur berfungsi mendeteksi kenaikan temperatur belitan sisi primer/sekunder dan minyak, biasa disebut *winding temperatur* dan *oil temperature*.



Bila suhu telah mencapai 60°C akan menggerakkan kipas. Fan kemudian pada setting tertentu, misalnya 80°C diset alarm sehingga bila alarm bekerja masih ada kesempatan untuk menurunkan beban dan terakhir di setting untuk trip misalnya pada suhu 90°C tergantung desain trafo, hal ini untuk menghindari kerusakan pada trafo akibat panas akibat berlebihan.

Rele *winding temperature* bekerja apabila suhu kumparan trafo melebihi setting rele. Rele *oil temperature* bekerja apabila suhu minyak trafo melebihi setting rele.

#### **2.2.7.10 Rele Beban Lebih (*Over Load Relay/OLR*)**

Rele ini berfungsi untuk mengamankan trafo dari kerusakan isolasi kumparan, akibat adanya arus beban lebih, dan rele ini bekerja secara termis.

#### **2.2.7.11 Pengaman Lebur (*Fuse*)**

Sekering di tegangan menengah pada dasarnya untuk mengamankan bila tersaji hubungan singkat di dalam distribusi.

#### **2.2.7.12 Arrester**

Arrester berfungsi untuk mengamankan trafo terhadap tegangan impuls yang disebabkan oleh surja petir dan surja hubung.

## 2.2.8 Metode Pengujian *Dissolved Gas Analysis (DGA)*

### 2.2.8.1 Definisi DGA

DGA secara harfiah dapat diartikan sebagai analisis kondisi transformator yang dilakukan berdasarkan jumlah gas terlarut pada minyak trafo. DGA pada dunia industri dikenal juga sebagai tes darah atau blood test pada transformator. Darah manusia adalah suatu senyawa yang mudah untuk melarutkan zat-zat lain yang berada di sekitarnya. Melalui pengujian zat-zat terlarut pada darah, maka akan diperoleh informasi-informasi terkait tentang kesehatan manusia. Begitu pula dengan transformator, pengujian zat-zat terlarut (biasanya gas) pada minyak trafo (minyak trafo dianalogikan sebagai darah manusia) akan memberikan informasi-informasi terkait akan kesehatan dan kualitas kerja transformator secara keseluruhan.

Uji DGA dilakukan pada suatu sampel minyak diambil dari unit transformator kemudian gas-gas terlarut (*dissolved gas*) tersebut diekstrak. Gas yang telah diekstrak lalu dipisahkan, diidentifikasi komponen-komponen individual, dan dihitung kualitasnya (dalam satuan Part Per Million – ppm). Keuntungan utama uji DGA adalah deteksi dini akan adanya fenomena kegagalan yang ada pada transformator yang diujikan. Namun kelemahan utamanya adalah diperlukan tingkat kemurnian yang tinggi dari sampel minyak yang diujikan. Rata-rata alat uji DGA memiliki sensitivitas yang tinggi, sehingga ketidakmurnian sampel akan menurunkan tingkat akurasi dari hasil uji DGA.

### 2.2.8.2 Jenis Kegagalan Dideteksi Dengan Uji Dga

Dari berbagai kasus kegagalan (fault) yang terjadi pada transformator dan terdeteksi melalui uji DGA, maka kegagalan pada transformator dapat digolongkan menjadi beberapa kelas:

**Tabel 2.3** Jenis kegagalan (fault) yang terjadi dengan uji DGA

Simbol	Kegagalan	Contoh
PD	<i>Partial Discharge</i>	Pelepasan muatan ( <i>discharge</i> ) dari plasma dingin ( <i>corona</i> ) pada gelembung gas (menyebabkan pengendapan <i>X-wax</i> pada isolasi kertas) ataupun tipe percikan (menyebabkan proses perforasi atau kebolongan pada kertas yang bisa saja sulit untuk dideteksi)
D1	<i>Discharge of Low Energy</i>	PD tipe percikan / <i>spark</i> (menyebabkan perforasi karbon pada isolasi kertas dalam skala yang lebih besar). <i>Arching</i> pada energy rendah memacu perforasi karbon pada permukaan isolasi kertas sehingga muncul banyak partikel karbon pada minyak (terutama akibat pengoperasian <i>tap-changer</i> ).
D2	<i>Discharge of High Energy</i>	Discharge yang mengakibatkan kerusakan dan karbonisasi yang meluas pada kertas minyak. Pada kasus yang lebih ekstrem terjadi penggabungan metal ( <i>metalfusion</i> ), pemutusan ( <i>tripping</i> ) peralatan dan pengaktifan alarm gas.

**Tabel 2.3** Jenis kegagalan (fault) yang terjadi dengan uji DGA (lanjutan)

T1	<i>Thermal fault,</i> $T < 300^{\circ}\text{C}$	Isolasi kertas berubah warna menjadi coklat pada temperatur $> 200^{\circ}\text{C}$ (T1) dan pada temperatur $> 300^{\circ}\text{C}$
T2	<i>Thermal fault,</i> $300 < T < 700^{\circ}\text{C}$	terjadi karbonisasi kertas munculnya formasi partikel karbon pada minyak (T2).
T3	<i>Thermal fault,</i> $T > 700^{\circ}\text{C}$	Munculnya formasi partikel karbon pada minyak secara meluas, pewarnaan pada metal ( $200^{\circ}\text{C}$ ) ataupun penggabungan metal ( $> 1000^{\circ}\text{C}$ ).

### 2.2.9 Analisis Kondisi Transformator Berdasarkan Hasil Pengujian DGA

Setelah diketahui karakteristik dan jumlah dari gas-gas terlarut yang diperoleh dari sampel minyak, selanjutnya perlu dilakukan interpretasi dari data-data tersebut untuk selanjutnya dilakukan analisis kondisi transformator. Terdapat beberapa metode untuk melakukan interpretasi data dan analisis seperti yang tercantum pada IEEE std.C57 – 104.1991 dan IEC 60599, yaitu :

1. *Standart IEEE*
2. *Key Gas*
3. *Roger's Ratio*
4. *Duval's Triangle.*

### 2.2.9.1 Standar IEE

Selain itu IEEE Standard C57.104-1991 telah menetapkan standarisasi untuk menentukan kondisi transformator berdasarkan hasil analisis konsentrasi gas terlarut pada sampel minyak.

**Tabel 2.4** Batas konsentrasi gas terlarut dalam minyak transformator

Status	Konsentrasi Gas Terlarut (ppm)							
	H	CH	CH	CH	CH	CO	CO	TDCG
Kondisi 1	100	120	35	2-250	2-4-65	2-6-350	2500	2-720
Kondisi 2	101-700	121-400	36-50	51-100	66-100	351-570	2501-4000	721-1920
Kondisi 3	701-1800	401-1000	51-80	101-200	101-150	571-1400	4001-10000	1921-4630
Kondisi 4	>1800	>1000	>80	>200	>150	>1400	>10000	>4630

**Catatan: Total Dissolved Combustible Gasses (TDCG)**

Jumlah gas terlarut yang mudah terbakar atau TDGC (*Total Dissolved Combustible Gas*) akan menunjukkan apakah transformator yang diujikan masih berada pada kondisi operasi normal, waspada, peringatan atau kondisi gawat/kritis. Sebagai catatan, hanya gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) saja yang tidak termasuk kategori TDGC. IEEE membuat pedoman untuk mengklasifikasikan kondisi operasional transformator yang terbagi dalam empat kondisi, yaitu :

**Pada Kondisi 1**, transformator beroperasi normal, namun tetap perlu dilakukan pemantauan kondisi gas-gas tersebut.

**Pada Kondisi 2**, tingkat TDCG mulai tinggi dimana kemungkinan timbul gejala-gejala kegagalan yang harus mulai diwaspadai sehingga perlu dilakukan pengambilan sampel minyak yang lebih rutin dan sering.

**Pada Kondisi 3**, TDCG menunjukkan adanya dekomposisi dari isolasi kertas minyak transformator. Berbagai kegagalan pada kondisi ini mungkin sudah terjadi dan transformator harus sudah diwaspadai dan diperlukan perawatan yang lebih lanjut.

**Pada Kondisi 4**, TDCG pada tingkat ini menunjukkan adanya kerusakan pada isolator kertas dan atau kerusakan minyak trafo pada kondisi ini sudah meluas.

Standar IEEE ini juga menetapkan tentang tindakan operasional yang disarankan berdasarkan jumlah TDCG-nya dalam satuan ppm dan rata-rata pertambahan TDCG dalam satuan ppm per hari (ppm/day) yang mengacu pada table 2.5 berikut :

**Tabel 2.5** Tabel Pertambahan TDCG

Kondisi	Tingkat TDCG, atau nilai tertinggi dari masing-masing gas	Tingkat Kenaikan TDCG (ppm/hari)	Interval sampling dan tindakan pengoperasian
---------	---	----------------------------------	--

**Tabel 2.5** Tabel Pertambahan TDCG (lanjutan)

1.	Nilai TDCG < 720 ppm, atau nilai tertinggi dari masing-masing gas	<10.0	Tahunan. 6 Bulanan untuk transformator tegangan ekstra tinggi	Operasi Normal
		10.0-30.0	Tiga Bulanan	
		>30	Satu Bulanan	Perhatian, analisa penyebab dari masing-masing gas
2.	721-1920 ppm, atau nilai tertinggi dari masing-masing gas	<10	Tiga Bulanan	Perhatian, analisa penyebab dari masing-masing gas
		10.0-30.0	Bulanan	
		>30	Bulanan	
3.	1921-4630 ppm, atau nilai tertinggi dari masing-masing gas	<10	Bulanan	Awat. Rencanakan untuk mematikan transformator, hubungi produsen pembuat atau konsultan untuk mengetahui tindakan yang harus dilakukan
		10.0-30.0	Mingguan	
		>30	Mingguan	

**Tabel 2.5** Tabel Pertambahan TDCG (lanjutan)

4.	>4630 ppm, atau nilai tertinggi dari masing masing gas	<10	Mingguan	Awat. Rencanakan untuk mematikan transformator, hubungi produsen pembuat atau konsultan untuk mengetahui tindakan yang harus dilakukan
		10.0-30.0	Harian	
		>30	Harian	Awat. Lakukan Servis, hubungi produsen pembuat atau konsultan untuk mengetahui tindakan yang harus dilakukan

Kondisi transformator disesuaikan dengan nilai-nilai yang tercantum pada table. Sebagai contoh, jika jumlah TDCG bernilai diantara 1921 ppm sampai dengan 4630 ppm, maka transformator berada pada kondisi 3. Namun, jika jumlah hidrogen lebih dari 1800 ppm sedangkan jumlah TDCG dibawah 4630 ppm, maka transformator berada pada kondisi 4.

Pada table 4.7 terdapat kata-kata “*determine load dependence*” yang artinya adalah sebisa mungkin dicari jumlah rata-rata gas yang timbul per harinya (ppm/day) dan disesuaikan dengan naik-turunnya beban. Ada kemungkinan transformator diberikan beban adalah (overload). Sampel minyak harus diambil setiap kali terjadi perubahan beban. Namun jika perubahan beban terlalu sering, maka tindakan ini mungkin sulit untuk dilakukan.



Standar IEEE merupakan standar utama yang digunakan dalam analisis DGA. Namun fungsinya hanyalah sebagai acuan, karena hanya menunjukkan dan menggolongkan tingkat konsentrasi gas dan jumlah TDCG dalam berbagai tingkatan kewaspadaan. Standar ini tidak memberikan proses analisis yang lebih pasti akan indikasi kegagalan yang sebenarnya terjadi. Ketika konsentrasi gas terlarut sudah melewati kondisi 1 ( $TDCG > 720$  ppm), maka perlu dilakukan proses analisis lebih lanjut untuk mengetahui indikasi kegagalan yang terjadi pada transformator.

#### **2.2.9.2 Key Gas**

Key Gas didefinisikan oleh IEEE std.C57 – 104.1991 sebagai “gas-gas yang terbentuk pada transformator pendingin minyak yang secara kualitatif dapat digunakan untuk menentukan jenis kegagalan yang terjadi, berdasarkan jenis gas yang khas atau lebih dominan terbentuk pada berbagai temperature”. Pendefinisian tersebut jika dikaitkan dengan berbagai kasus kegagalan transformator yang seringkali terjadi. Maka dapat dibuat menjadi tabel 2.6 sebagai berikut :

**Tabel 2.6** Jenis-jenis Kegagalan Pada Transformator Tenaga

Gangguan	Gas Kunci	Kriteria	Jumlah Presentase Gas
Busur api ( <i>Arching</i> )	Asetilen ( $C_2H_2$ )	Hidrogen ( $H_2$ ) dan Asetilen ( $C_2H_2$ ) dalam jumlah besar dan sedikit metana ( $CH_4$ ) dan etilen ( $C_2H_4$ )	Hidrogen ( $H_2$ ) : 60%  Asetilen ( $C_2H_2$ ) : 30%
Korona ( <i>Partial Discharge</i> )	Hidrogen ( $H_2$ )	Hidrogen dalam jumlah besar, metana jumlah sedang, dan sedikit etilen	Hidrogen : 85% Metana : 13%
Pemanasan lebih minyak	Etana	Etana dalam jumlah besar dan etilen dalam jumlah kecil	Etana : 63% Etilen : 20%
Pemanasan lebih Selulosa	Karbon monoksida	CO dalam jumlah besar	CO : 92%

### 2.2.8.3 Roger's Ratio

Magnitude rasio empat jenis fault gas digunakan untuk mencitakan empat digit kode. Kode-kode tersebut akan menunjukkan indikasi dari penyebab munculnya fault gas. Beberapa catatan (note) mengenai interpretasi dari table 2.7 rasio roger's:

**Tabel 2.7** Kode Rasio Roger's

Rentang kode roger	$C_2H_2/C_2H_4$	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$
< 0.1	0	1	0
0,1-1	1	1	0
1-3	1	2	1
>3	2	2	2

1. Ada kecenderungan rasio  $C_2H_2/C_2H_4$  naik dari 0.1 sampai dengan > 3 dan rasio  $C_2H_4/C_2H_6$  untuk naik dari 1-3 sampai dengan > 3 karena meningkatnya intensitas percikan (*spark*). Sehingga kode awalnya bukan lagi 0 0 0 melainkan 1 0 1.
2. Gas-gas yang timbul mayoritas dihasilkan oleh proses dekomposisi kertas, sehingga muncul angka 0 pada kode rasio roger.

3. Kondisi kegagalan ini terindikasi dari naiknya konsentrasi fault gas  $CH_4/H_2$  nomornya bernilai 1, namun nilai ini tergantung dari berbagai faktor seperti kondisi konservator, selimut  $N_2$ , temperatur minyak dan kualitas minyak.
4. Naiknya nilai  $C_2H_2$  (lebih dari nilai yang terdeteksi), pada umumnya menunjukkan adanya hot-spot dengan temperature lebih dari  $700^\circ C$ , sehingga timbul arcing pada transformator. Jika konsentrasi dan rata-rata pembentukan gas asetilen naik, maka transformator harus segera diperbaiki (*de-energized*). Jika dioperasikan lebih lanjut kondisinya akan sangat berbahaya.
5. Transformator dengan *OLTC (On-Load Tap Changer)* bias saja menunjukkan kode 2 0 2 ataupun 1 0 2 tergantung jumlah dari pertukaran minyak antara tangki tap changer dan tangki utama.

Seringkali digunakan rasio lain seperti rasio  $CO_2/CO$ . Rasio ini digunakan untuk mendeteksi keterlibatan isolasi kertas pada fenomena kegagalan. Normalnya rasio  $CO_2/CO$  bernilai sekitar 7. Jika rasio  $0 < 3$ , ada indikasi yang kuat akan adanya kegagalan elektrik sehingga menimbulkan karbonisasi pada kertas (hot-spot atau arcing dengan temperature  $> 200^\circ C$ ). Jika rasio  $> 10$ , mengindikasikan adanya kegagalan thermal pada isolasi kertas pada belitan.

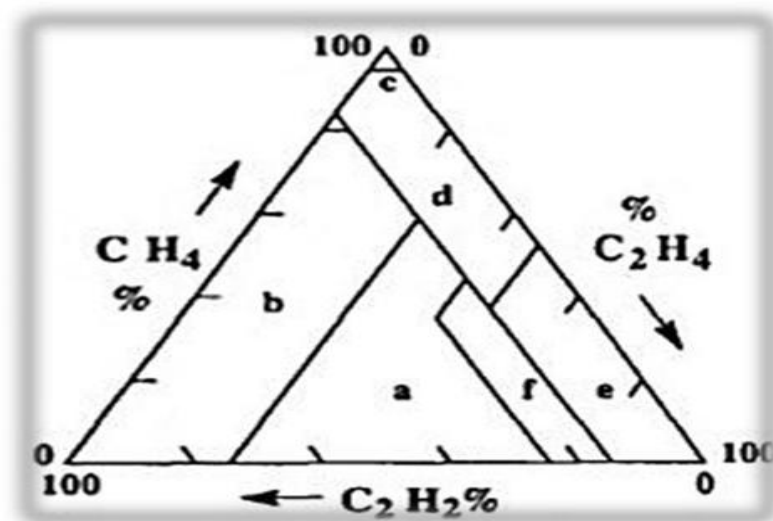
Nilai rasio ini tidaklah selalu akurat karena nilai  $CO_2$  dan CO dipengaruhi oleh berbagai faktor luar seperti oksidasi minyak akibat pemanasan, penuaan isolasi kertas, gas  $CO_2$  yang masuk akibat tangki transformator yang bocor atau

kurang rapat. Walaupun kurang akurat, namun rasio  $CO_2/CO$  sangat membantu identifikasi awal akan adanya kasus degradasi kualitas isolasi kertas.

#### 2.2.9.4 Duval's Triangle

Metode segitiga duval diciptakan untuk membantu metode-metode analisis lain. Metode ini merupakan sistem yang tertutup (*closed system*) sehingga mengurangi presentase kasus diluar kriteria ataupun analisis yang salah.

Metode segitiga duval diciptakan oleh Michel Duval pada 1974. Kondisi khusus yang diperhatikan adalah konsentrasi metana ( $C_2H_4$ ), etilen ( $C_2H_4$ ), dan asetilen ( $C_2H_2$ ). Konsentrasi total ketiga gas ini adalah 100%, namun perubahan komposisi dari ketiga jenis gas ini menunjukkan kondisi fenomena kegagalan yang mungkin terjadi pada unit yang diujikan.



Gambar 2.3 Cara Kerja Duval's Triangle