



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaannya dalam sistem tenaga memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap tiap keperluan.

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi :

1. Transformator daya

Transformator daya memiliki peranan sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Transformator daya digunakan untuk menyalurkan daya dari generator bertegangan menengah ke transmisi jaringan distribusi. Kebutuhan transformator daya bertegangan tinggi dan berkapasitas besar, menimbulkan persoalan dalam perencanaan isolasi, ukuran bobotnya.

2. Transformator distribusi.

Transformator distribusi digunakan untuk mengubah tegangan menengah menjadi tegangan rendah. Sebagaimana halnya dengan komponen-komponen lain dari rangkaian distribusi, rugi-rugi energi dan turun tegangan yang disebabkan arus listrik mengalir menuju beban merupakan penentuan untuk pemilihan dan lokasi transformator.

3. Transformator Instrumen/Pengukuran

Dalam prakteknya tidaklah aman menghubungkan instrumen, alat ukur atau peralatan kendali langsung ke rangkaian tegangan tinggi. Transformator Instrumen umumnya digunakan untuk mengurangi tegangan tinggi dan arus hingga harga aman dan dapat digunakan untuk kerja peralatan demikian. Transformator instrumen melakukan dua fungsi yakni : (1) digunakan sebagai alat perbandingan (*ratio device*) yang



memungkinkan digunakannya alat ukur dan instrumen tegangan rendah dan arus rendah baku. (2) digunakan sebagai alat pemisah (*insulating device*) untuk melindungi peralatan dan operator dari tegangan tinggi. Ada dua macam transformator instrumen yaitu transformator tegangan dan transformator arus.

Daya transformator bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \dots \dots \dots (2.1)$$

Sehingga untuk menghitung arus beban penuh (*full load*) dapat menggunakan rumus :

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \dots \dots \dots (2.2)$$

dimana:

I_{FL} = Arus beban penuh (A)

S = Daya transformator (kVA)

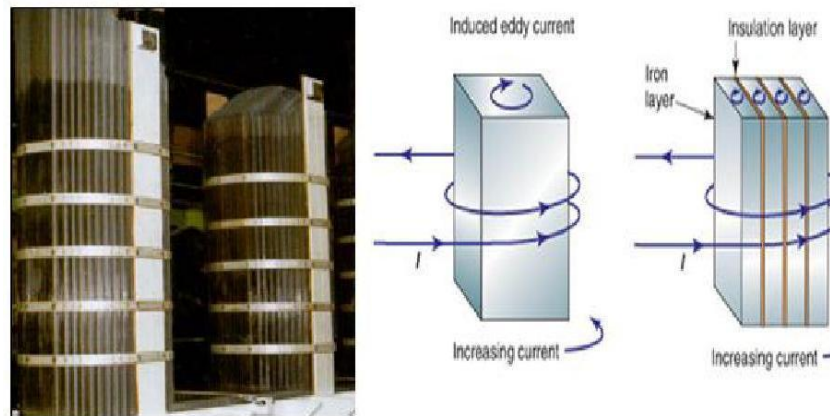
V = Tegangan sisi sekunder transformator (kV)

2.2 Bagian – Bagian Transformator⁶

2.2.1 Inti Besi

Inti besi digunakan sebagai media mengalirnya flux yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan – lempengan besi tipis berisolasi dengan maksud untuk mengurangi eddy current yang merupakan arus sirkulasi pada inti besi hasil induksi medan magnet, dimana arus tersebut akan mengakibatkan rugi – rugi.

⁶ PT PLN (Persero). 2014. Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga. Hal. 2.



Gambar 2.1. Inti Besi

Luas penampang inti trafo akan menentukan daya trafo. Jadi semakin luas penampang suatu trafo akan mempunyai kapasitas daya yang semakin besar pula. Luas penampang inti trafo harus mampu mengalirkan fluksi magnet seluruhnya tanpa menimbulkan panas yang berlebihan. Untuk menentukan luas penampang inti yang diperlukan ,dapat digunakan rumus emperis sebagai berikut :

$$A = 7 \sqrt{\frac{P}{f}} \quad \text{atau} \quad P = \frac{A^2 \times 50}{7^2} \dots\dots\dots (2.3)$$

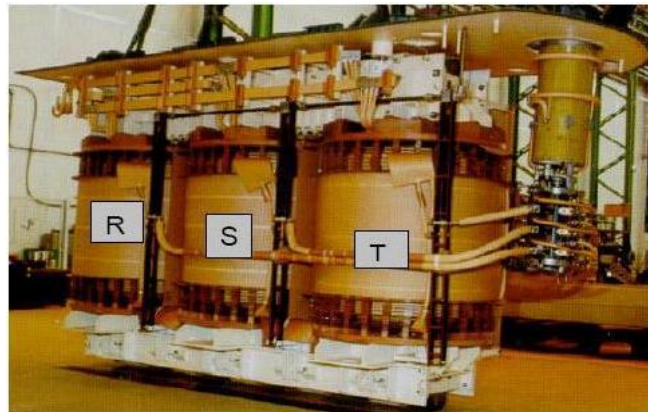
Dimana: A = Luas penampang dalam satuan mm²

P = Daya out put (VA)

f = Frekuensi (Hz)

2.2.2 Belitan

Belitan terdiri dari batang tembaga berisolasi yang mengelilingi inti besi, dimana saat arus bolak balik mengalir pada belitan tembaga tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan flux magnetik.



Gambar 2.2. Belitan Transformator

2.2.3 Bushing

Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar. Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan body main tank transformator.



Gambar 2.3. Bushing

2.2.4 Pendingin

Suhu pada trafo yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, rugi-rugi pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada trafo. Oleh karena itu pendinginan yang efektif sangat diperlukan. Minyak isolasi trafo selain merupakan media isolasi juga berfungsi sebagai pendingin. Pada saat minyak



bersirkulasi, panas yang berasal dari belitan akan dibawa oleh minyak sesuai jalur sirkulasinya dan akan didinginkan pada sirip – sirip radiator. Adapun proses pendinginan ini dapat dibantu oleh adanya kipas dan pompa sirkulasi guna meningkatkan efisiensi pendinginan.

Tabel 2.1 Macam–macam pendingin pada transformator

No.	Macam Sistem Pendingin	Media			
		Dalam Transformator		Diluar Transformator	
		Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa
1.	AN	-	-	Udara	-
2.	AF	-	-	-	Udara
3.	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4.	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5.	OFAN	-	Minyak	Udara	-
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			

2.2.5 Konservator

Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada transformator, minyak isolasi akan memuai sehingga volumenya bertambah. Sebaliknya saat terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak akan menyusut dan volume minyak akan turun. Konservator digunakan untuk menampung minyak pada saat transformator mengalami kenaikan suhu.



Gambar 2.4. Konservator

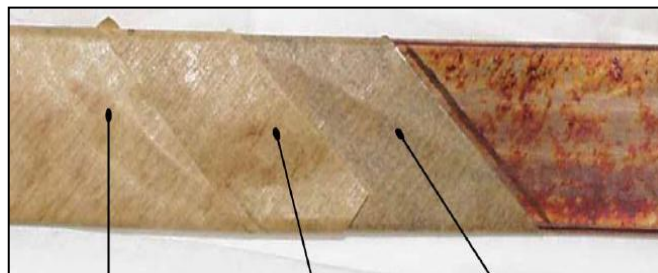
2.2.6 Minyak isolasi transformator & Isolasi kertas

2.2.6.1 Minyak transformator

Minyak Transformator berfungsi sebagai media isolasi, pendingin dan pelindung belitan dari oksidasi. Minyak transformator mempunyai sifat sebagai media pemindah panas (disirkulasi) dan juga berfungsi pula sebagai isolasi (memiliki daya tegangan tembus tinggi) sehingga berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi.

2.2.6.2 Kertas isolasi transformator

Isolasi kertas berfungsi sebagai isolasi, pemberi jarak, dan memiliki kemampuan mekanis.



Gambar 2.5. Tembaga yang dilapisi kertas isolasi

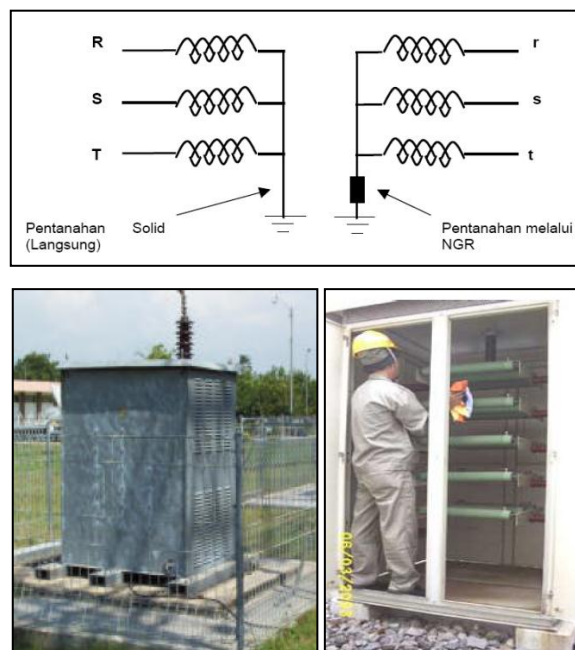


2.2.7 Tap Changer

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Transformator dituntut memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan pada sisi primer diharapkan dapat mengubah ratio antara belitan primer dan sekunder dan dengan demikian tegangan output/sekunderpun dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem berapapun tegangan input/primernya. Penyesuaian ratio belitan ini disebut Tap changer. Proses perubahan ratio belitan ini dapat dilakukan pada saat transformator sedang berbeban (*On load tap changer*) atau saat transformator tidak berbeban (*Off load tap changer*).

2.2.8 NGR (*Netral Grounding Resistant*)

Salah satu metode pentanahan adalah dengan menggunakan NGR. NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang serial dengan netral sekunder pada transformator sebelum terhubung ke ground/tanah. Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi netral ke tanah.



Gambar 2.6 Netral Grounding Resistance (NGR)



2.3 Minyak Transformator⁴

Minyak transformator terbuat dari bahan kimia organik, merupakan senyawa atom-atom C dan H. Kondisi operasi transformator dimana terdapat suhu tinggi (bisa mencapai 80°C), adanya busur listrik misalnya pada *On Load Tap Changer* serta udara disekitarnya yang lembab, menyebabkan timbulnya berbagai gas dan air dalam minyak transformator. Gas-gas yang timbul adalah: H₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, CO, dan CO₂.

Adanya gas-gas ini menandakan terjadinya degradasi kualitas minyak transformator khususnya tegangan tembusnya. Degradasi kualitas ini bisa disebabkan adanya kontak sambungan yang longgar pada sambungan atau pada *On Load Tap Changer* yang menimbulkan busur listrik. Pembebanan lebih (*Over load*) dan gangguan hubung singkat pada saluran beban yang dilayani transformator dapat menimbulkan suhu tinggi yang bisa menyebabkan degradasi kualitas minyak transformator. Pada waktu OLTC bekerja memindah sadapan (tap) dari kumparan, timbul busur listrik yang suhunya tinggi. Busur listrik ini diredam oleh minyak transformator karena OLTC diredam dalam minyak transformator. Hal ini menyebabkan timbulnya karbon dalam minyak transformator. Karena karbon bersifat penghantar maka karbon yang timbul menyebabkan daya isolasi dari minyak transformator menurun. Oleh karenanya pengamatan kualitas minyak transformator secara online dengan menggunakan dissolved gas analyser sangat diperlukan untuk memprediksi kondisi minyak transformator.

Minyak transformator harus memenuhi persyaratan, yaitu:

1. Memiliki kekuatan isolasi tinggi.
2. Merupakan media penyalur panas yang baik, berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
3. Memiliki viskositas yang rendah, agar lebih mudah bersirkulasi dan memiliki kemampuan pendinginan menjadi lebih baik.

⁴ Marsudi Djieng. 2011. Pembangkit Energi Listrik. Jakarta : Erlangga. Hal. 249



4. Titik nyala yang tinggi dan tidak mudah menguap yang dapat menimbulkan bahaya.
5. Tidak merusak bahan isolasi padat.
6. Memiliki sifat kimia yang stabil.

Kenaikan temperatur akan mengkatalis terjadinya oksidasi di dalam minyak transformator. Dengan semakin tingginya pembebanan transformator maka reaksi kimia yang terjadi didalam minyak transformator akan semakin cepat sehingga kandungan asam akan semakin tinggi. Dengan meningkatnya kandungan asam dalam minyak, maka kualitas minyak menjadi menurun. Untuk mengetahui nilai temperatur, menurut IEEE Std. C57. 104-1991 dapat menggunakan rumus :

$$T (^{\circ}\text{C}) = (100 \times \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6) + 150 \dots\dots\dots (2.4)$$

Dengan :

T = Nilai temperatur ($^{\circ}\text{C}$)

C_2H_4 = Nilai gas etilen

C_2H_6 = Nilai gas etana

Kenaikan temperatur yang terjadi pada transformator dapat dipengaruhi oleh arus yang mengalir pada transformator, dimana kinerja transformator dapat dipengaruhi oleh temperatur. Kenaikan temperatur yang berpengaruh oleh arus dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\theta = \frac{I_s^2 \cdot \rho \cdot t}{\alpha_s^2 \cdot g \cdot h} (^{\circ}\text{C}) \dots\dots\dots (2.5)$$

Dengan:

θ : kenaikan temperatur ($^{\circ}\text{C}$)

I_s : arus yang mengalir (Ampere)

ρ : resistivitas (Ωm)

α_s : luas penampang konduktor (mm^2)



t : waktu (detik)

g : rapat material konduktor (kg/m^3)

h : panas material konduktor ($\text{J/kg-}^\circ\text{C}$)

Kenaikan temperatur pada transformator dipengaruhi pula oleh besarnya arus yang mengalir pada kumparan transformator tersebut yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$I_{LS} = \frac{P_{out\ trafo}}{\sqrt{3} \cdot V_{LS} \cdot \cos \varphi} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dengan:

I_{LS} : Arus line sekunder (A)

P_{out} : Daya keluaran transformator (W)

V_{LS} : Tegangan sekunder (V)

$\cos \varphi$: Faktor daya

Besarnya arus yang mengalir pada kumparan transformator tersebut bergantung pada luas penampang penghantar karena dapat mempengaruhi nilai dari kerapatan arus. Kerapatan arus dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\delta = \frac{I}{A} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dengan:

δ : Rapat arus (A/mm^2);

I : Besarnya arus (A);

A : Luas penampang (mm^2).



2.4 Jenis - Jenis Kegagalan Transformator Akibat Kontaminasi Minyak Isolasi

1. Overheating

Ketika transformator yang beroperasi kelebihan beban, maka akan menghasilkan panas yang berlebih dan dapat memperburuk isolasi. Berdasarkan hasil penelitian yang pernah dilakukan hasil DGA menunjukkan karbon monoksida dan karbon dioksida tinggi. Dalam kasus dengan suhu yang lebih hasil penelitian menunjukkan gas metana dan etilena berada pada tingkat yang lebih tinggi.

2. Korona

Korona adalah terlepasnya muatan listrik dari permukaan konduktor. Modus terlepasnya muatan ini dalam skala besar dapat terlihat oleh mata telanjang, sedangkan dalam skala kecil tidak dapat terlihat oleh mata. Korona terjadi dikarenakan kadar hidrogen yang tinggi pada minyak isolasi. Gas hidrogen adalah gas satu - satunya yang menghasilkan korona namun terkadang gas hidrogen juga terbentuk akibat adanya reaksi kimia antara kandungan air yang berada dalam minyak logam.

3. Arcing (busur api)

Arcing adalah gangguan yang paling berbahaya pada minyak isolasi dan transformator yang diakibatkan oleh gas asetilena pada minyak isolasi (Arismunandar, 1975). Gas - gas yang timbul karena gangguan ini adalah : H_2 , C_2H_2 , (C_2H_4 , C_2H_6 , CH_4), munculnya busur api dalam minyak isolasi ditandai dengan pembentukan gas - gas hidrogen dan asetilena sebagai gas - gas yang paling dominan.



2.5 Pengujian Kualitas Minyak Transformator

Oksidasi dan kontaminan adalah hal yang dapat menurunkan kualitas minyak yang berarti dapat menurunkan kemampuannya sebagai isolator. Oksidasi pada minyak transformator juga akan ikut andil dalam penurunan kualitas kertas isolasi transformator. Pada saat minyak isolasi mengalami oksidasi, maka minyak akan menghasilkan asam. Asam ini apabila bercampur dengan air pada suhu tertentu akan mengakibatkan proses hidrolisis pada isolasi kertas. Proses hidrolisis ini akan menurunkan kualitas kertas isolasi.

Untuk mengetahui kehadiran kontaminan atau terjadinya oksidasi didalam minyak, maka dilakukanlah pengujian oil quality test (karakteristik).

2.5.1. Pengujian Kadar Air

Fungsi minyak transformator sebagai media isolasi di dalam transformator dapat menurun seiring banyaknya air yang mengotori minyak. Oleh karena itu dilakukan pengujian kadar air untuk mengetahui seberapa besar kadar air yang terlarut / terkandung di minyak. Metode yang dipakai adalah metoda *Karl Fischer*.

2.5.2. Pengujian Tegangan Tembus

Pengujian tegangan tembus dilakukan untuk mengetahui kemampuan minyak isolasi dalam menahan tegangan. Minyak yang jernih akan menunjukkan nilai tegangan tembus yang tinggi. Dapat dikatakan bahwa pengujian ini dapat menjadi indikasi keberadaan kontaminan seperti kadar air. Rendahnya nilai tegangan tembus dapat mengindikasikan keberadaan salah satu kontaminan tersebut, dan tingginya tegangan tembus belum tentu juga mengindikasikan bebasnya minyak dari semua jenis kontaminan.

2.5.3. Pengujian Kadar Asam

Minyak yang rusak akibat oksidasi akan menghasilkan senyawa asam yang akan menurunkan kualitas kertas isolasi pada transformator. Asam ini juga dapat menjadi penyebab proses korosi pada tembaga dan bagian transformator yang terbuat dari bahan metal. Untuk mengetahui seberapa besar asam yang terkandung di dalam minyak, dilakukan pengujian kadar asam pada minyak isolasi. Besarnya



kadar asam pada minyak juga dapat dijadikan sebagai dasar apakah minyak isolasi transformator tersebut harus segera dilakukan reklamasi atau diganti.

Pada dasarnya minyak yang akan diuji dicampur dengan larutan alkohol dengan komposisi tertentu lalu campuran tersebut (bersifat asam) di titrasi (ditambahkan larutan) dengan larutan KOH (bersifat basa). Perhitungan berapa besar asam yang terkandung didalam minyak didasarkan dari berapa banyak KOH yang dilarutkan.

2.5.4. Pengujian Warna Minyak

Warna minyak isolasi transformator akan berubah seiring penuaan yang terjadi pada minyak dan dipengaruhi oleh material material pengotor seperti karbon. Pengujian warna minyak pada dasarnya membandingkan warna minyak terpakai dengan minyak yang baru.

2.5.5. Pengujian Sediment

Banyak material yang dapat mengkontaminasi minyak transformator, seperti karbon dan endapan lumpur (*sludge*). Pengujian sediment ini bertujuan mengukur seberapa banyak (%) zat pengotor yang terdapat pada minyak isolasi transformator. Pengujian ini pada dasarnya membandingkan berat endapan yang tersaring dengan berat minyak yang diuji.

2.5.6. Pengujian Titik Nyala

Pengujian titik nyala dilakukan dengan menggunakan sebuah perangkat yang berfungsi memanaskan minyak secara manual (*heater* atau kompor). Dimana diatas cawan pemanas tersebut di letakan sumber api yang berasal dari gas. Sumber api ini berfungsi sebagai pemancing saat mulai terbakarnya minyak. Seiring dengan lamanya proses pemanasan, suhu minyak pun akan mengalami peningkatan. Pada suhu tertentu minyak akan terbakar dengan sumber api.



2.5.7. Tangen Delta Minyak (δ)

Salah satu pengujian yang dilakukan terhadap minyak isolasi adalah pengujian tangen delta. Dari hasil pengujian tangen delta dapat diketahui sejauh mana minyak isolasi mengalami penuaan.

2.5.8. *Metal in Oil*

Pengujian *metal in oil* digunakan sebagai pelengkap dari pengujian DGA. Saat DGA mengindikasikan timbulnya kemungkinan gangguan, pengujian *metal in oil* akan membantu menentukan jenis gangguan dan lokasinya. Gangguan tidak hanya menurunkan kualitas isolasi transformator (minyak, kertas, kayu) tapi juga menghasilkan partikel partikel metal yang tersebar dalam minyak.

Partikel ini akan didistribusikan kesemua bagian transformator karena proses sirkulasi. Beberapa komponen transformator yang secara khusus menghasilkan partikel metal. Partikel metal ini dapat ditemukan sebagai unsur tunggal atau sebagai senyawa. Jenis metal yang ditemukan dalam pengujian dapat membantu dalam menentukan komponen mana yang mengalami gangguan.

2.6 DGA (*Dissolved Gas Analysis*)

Salah satu metoda untuk mengetahui ada tidaknya ketidaknormalan pada transformator adalah dengan mengetahui dampak dari ketidaknormalan transformator itu sendiri. Untuk mengetahui dampak ketidaknormalan pada transformator digunakan metoda DGA (*Dissolved Gas Analysis*).

Pada saat terjadi ketidaknormalan pada transformator, minyak isolasi sebagai rantai hidrokarbon akan terurai akibat besarnya ketidaknormalan dan akan membentuk gas-gas hidrokarbon yang larut dalam minyak isolasi itu sendiri. Pada dasarnya DGA adalah proses untuk menghitung kadar/nilai dari gas-gas hidrokarbon yang terbentuk akibat ketidaknormalan. Dari komposisi kadar gas-gas itulah dapat diprediksi dampak-dampak ketidaknormalan apa yang ada di dalam transformator, apakah *overheat*, *arcing* atau *corona*.

DGA secara harafiah dapat diartikan sebagai analisis kondisi transformator yang dilakukan berdasarkan jumlah gas terlarut pada minyak transformator.



Pengujian kandungan gas terlarut pada minyak transformator akan memberi informasi terkait dengan kondisi dan kualitas kerja transformator.

Uji DGA dilakukan pada sampel minyak yang diambil dari transformator, kemudian gas-gas terlarut (*dissolved gas*) tersebut diekstrak. Gas yang telah diekstrak lalu dipisahkan, diidentifikasi komponen-komponen individualnya, selanjutnya dihitung kuantitasnya (dalam satuan part per million – ppm). Dari komposisi kadar / nilai gas - gas itulah dapat diprediksi dampak - dampak ketidaknormalan apa yang ada di dalam transformator, apakah *overheat*, *arcing* atau *corona*. Gas gas yang terdeteksi dari hasil pengujian DGA ditunjukkan pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Jenis gas yang terlarut dalam minyak isolasi

No.	Nama Gas	Lambang Kimia
1.	Hidrogen	H ₂
2.	Metana	CH ₄
3.	Karbon Monoksida	CO
4.	Karbon Dioksida	CO ₂
5.	Etilena	C ₂ H ₄
6.	Ethana	C ₂ H ₆
7.	Asetilena	C ₂ H ₂

Analisis kondisi transformator berdasarkan hasil pengujian DGA, setelah diketahui karakteristik dan jumlah dari gas-gas terlarut yang diperoleh dari sampel minyak, selanjutnya dilakukan analisis kondisi transformator. Ada beberapa metode untuk melakukan interpretasi data dan analisis seperti yang tercantum pada IEEE standard. C57-104.2008, adalah Metode TDCG, *key gas*, *roger's ratio*, *duval's triangle*.



2.6.1 Metode TDCG (*Total Dissolved Combustible Gas*)

Analisa hasil pengujian DGA mengacu pada standar IEEE C57-104. Batasan standar hasil pengujian DGA dengan menggunakan standar IEEE C57 104.2008 adalah seperti terlihat pada Tabel 2.3. Hasil pengujian DGA dibandingkan dengan nilai batasan standar untuk mengetahui apakah transformator berada pada kondisi normal atau ada indikasi kondisi 2, 3 atau 4 (lihat Tabel 2.3). Nilai batasan standar TDCG (*Total Dissolved Combustible Gas*) adalah jumlah gas mudah terbakar yang terlarut.

Berdasarkan standard IEEE yang membuat pedoman untuk mengklasifikasikan kondisi operasional transformator yang terbagi dalam 4 kondisi yaitu :

1. Kondisi 1 transformator beroperasi normal. Namun perlu dilakukan pemantauan kondisi gas-gas tersebut.
2. Kondisi 2 tingkat TDCG mulai tinggi. Ada kemungkinan timbul gejala-gejala kegagalan yang harus diwaspadai. Perlu dilakukan pengambilan sampel minyak yang lebih rutin dan sering.
3. Kondisi 3, TDCG pada tingkat ini menunjukkan adanya dekomposisi dari isolasi kertas/isolasi minyak transformator. Berbagai kegagalan mungkin dapat terjadi, oleh karena itu perlu diwaspadai dan perlu perawatan lebih lanjut.
4. Kondisi 4, TDCG pada tingkat ini menunjukkan adanya dekomposisi/kerusakan pada isolasi kertas/minyak transformator yang telah meluas.

Standard 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 tingkat kewaspadaan. Standar ini tidak memberikan proses analisis yang lebih pasti akan indikasi kegagalan yang sebenarnya terjadi. Ketika konsentrasi gas terlarut telah melewati kondisi 1 (TDCG >720 ppm), maka perlu dilakukan proses analisis lebih lanjut untuk mengetahui indikasi kegagalan yang terjadi pada transformator.



Berdasarkan hasil pengujian dapat dilakukan investigasi kemungkinan terjadi kelainan dengan metoda *key gas, ratio (Roger dan Doernenburg) dan duval's triangle*.

Tabel 2.3 Konsentrasi Gas Terlarut Minyak Transformator

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

2.6.2 Metode Key Gas

Key gas didefinisikan oleh IEEE standar C57-104.2008 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 yang terbentuk pada berbagai temperatur”. diperlihatkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Jenis Kegagalan Menurut Metode *Key Gas*

Gangguan	Gas Kunci	Kriteria	Jumlah Persentase Gas
Busur Api (Arcing)	Asetilen (C ₂ H ₂)	Hidrogen (H ₂) dan Asetilen (C ₂ H ₂) dalam jumlah besar dan sedikit metana (CH ₄) dan etilen (C ₂ H ₄)	Hidrogen (H ₂) : 60% Asetilen (C ₂ H ₂) : 30%



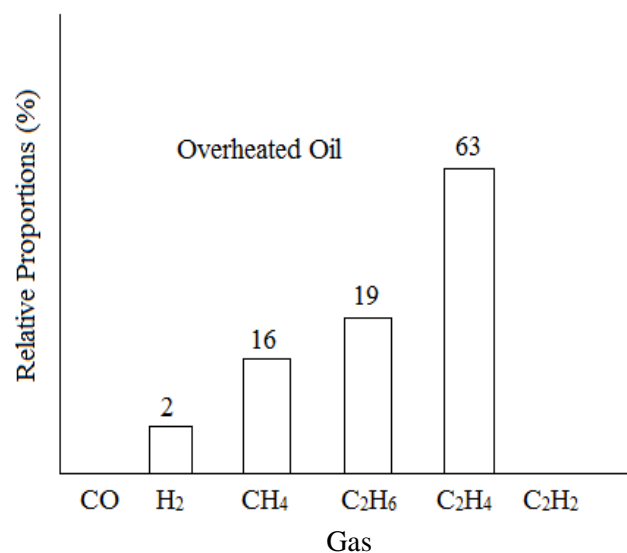
Korona (Partial Discharge)	Hidrogen (H ₂)	Hidrogen dalam jumlah besar, metana jumlah sedang, dan sedikit etilen	Hidrogen : 85% Metana : 13%
Pemanasan Lebih (Minyak)	Etana (C ₂ H ₆)	Etana dalam jumlah besar dan etilen dalam jumlah kecil	Etana: 63% Etilen : 20%
Pemanasan Lebih (Selulosa)	Karbon Monoksida (CO)	CO dalam jumlah besar	CO : 92%

Jenis jenis kegagalan tersebut dapat digambarkan pada grafik dibawah ini :

1. Thermal – Oil

Dekomposisi produk termasuk *ethylene* dan *methane* dengan sedikit kuantitas hidrogen dan *ethane*. Tanda keberadaan acetylene mungkin terbentuk jika fault yang terjadi parah atau diikuti dengan kontrak elektrik.

Gas dominan: *Ethylene*



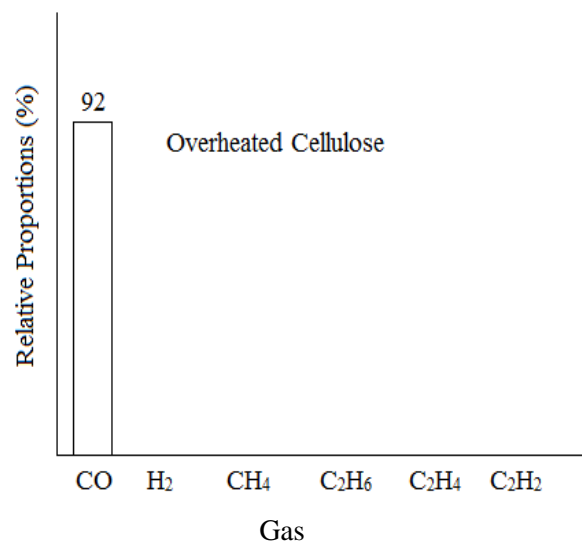
Gambar 2.7 *Overheated in Oil*



2. Thermal –Selulosa:

Sejumlah karbon dioksida dan karbon monoksida terlibat akibat pemanasan selulosa. Gas hidrokarbon, seperti metana dan ethylene akan terbentuk jika fault melibatkan struktur minyak.

Gas dominan: Karbon monoksida

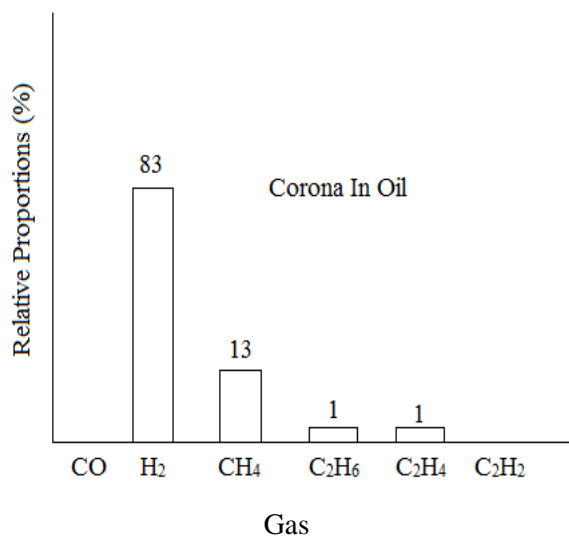


Gambar 2.8 *Overheated Cellulose*

3. Electrical – Partial Discharge:

Discharge elektrik tenaga rendah menghasilkan hydrogen dan metana dengan sedikit kuantitas ethane dan ethylene. Jumlah yang sebanding antara karbon monoksida dan karbon dioksida mungkin dihasilkan dari discharge pada selulosa.

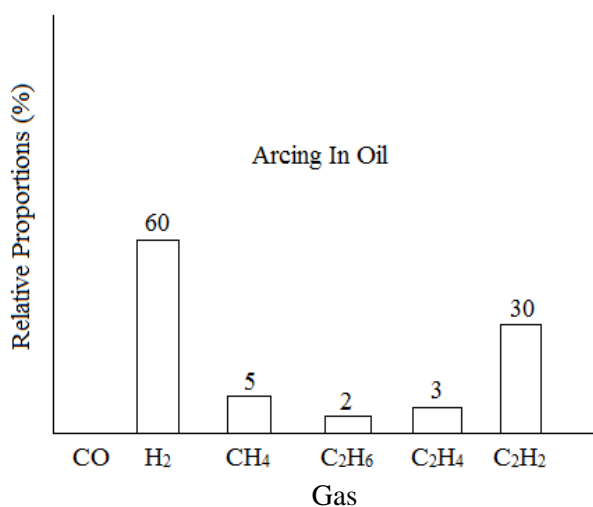
Gas dominan: Hidrogen.

Gambar 2.9 *Corona in Oil*

4. Electrical -Arching:

Sejumlah hidrogen dan acetylene terproduksi dan sejumlah methane dan ethylene. Karbon dioksida dan karbon monoksida akan selalu dibentuk jika melibatkan fault selulosa. Minyak mungkin terkarbonisasi.

Gas dominansi: Acetylene.

Gambar 2.10 *Arching in Oil*



2.6.3 Metode *Roger's Ratio*

Metode *roger's ratio* merupakan salah satu cara untuk menganalisis gas terurai dari suatu minyak transformator. Metode ini membandingkan nilai-nilai satu gas dengan gas dengan gas yang lain. Gas-gas yang digunakan dalam analisis menggunakan roger's ratio adalah sebagai berikut : C_2H_2 / C_2H_4 , CH_4 / H_2 , C_2H_4 / C_2H_6 . Setelah didapatkan nilai perbandingan dari gas-gas tersebut, selanjutnya dimasukkan kedalam kode ratio yang diperlihatkan pada Tabel 2.5. Setelah dikonversi kedalam kode-kode seperti pada Tabel diatas, maka untuk analisis gangguan yang terjadi pada minyak transformator dapat diketahui dari Tabel 2.6 seperti berikut :

Tabel 2.5 Kode Kode Metode *Roger's Ratio*

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	0	0
1-3	1	2	1
>3	2	2	2

Tabel 2.6 Tipe Gangguan Pada Transformator Menurut Metode *Roger's Ratio*

Kasus	Tipe Gangguan	C_2H_2 / C_2H_4	CH_4 / H_2	C_2H_4 / C_2H_6
0	Tak ada gangguan	0	0	0
1	Low Energy Partial discharge	1	1	0
2	High Energy Partial discharge	0	1	0
3	Low Energy discharges, sparking, arcing	1-2	0	1-2
4	High Energy discharges, arcing	1	0	2



5	<i>Overheating</i> <150 °C	0	0	1
6	<i>Overheating</i> 150-300 °C	0	2	0
7	Kegagalan Suhu 300-700°C	0	2	1
8	Kegagalan Suhu > 700 °C	0	2	2

Metode *Roger's Ratio* dan *Key Gas* cukup mudah untuk dilakukan, namun kelemahan utamanya adalah metode tersebut hanya dapat mendeteksi kasus-kasus kegagalan yang sesuai dengan Tabel 3 dan Tabel 4. Jika muncul konsentrasi gas diluar Tabel III dan IV maka metode ini tidak dapat mendeteksi jenis kegagalan yang ada. Hal ini terjadi karena metode *roger's ratio* dan *key gas* merupakan sebuah sistem yang terbuka (*open system*). Metode segitiga duval diciptakan untuk membantu metode-metode analisis lain. Kondisi khusus yang diperhatikan adalah konsentrasi metana (CH₄), etilen (C₂H₄) dan asetilen (C₂H₂). Konsentrasi total ketiga gas ini adalah 100% namun perubahan komposisi dari ketiga gas ini menunjukkan kondisi fenomena kegagalan. Metode ini merupakan sistem tertutup (*closed system*) sehingga mengurangi persentase kasus di luar kriteria analisis.

2.6.4 Metode *Duval's Triangle*

Untuk menganalisis dengan metode ini yaitu menggunakan gas CH₄, C₂H₂, C₂H₄. Berikut ini adalah cara menganalisis suatu transformator yang bermasalah menggunakan metode *duval's triangle* adalah jumlahkan nilai-nilai dari ketiga gas tersebut (H₄, C₂H₂, C₂H₄). Selanjutnya bandingkan harga masing-masing nilai dari tiap gas-gas tersebut dan buat dalam bentuk persen (%). Gambarkan garis pada *Duval's Triangle* untuk ketiga gas tersebut sesuai nilai prosentase tadi. Daerah pertemuan dari ketiga gas tersebut menunjukkan kondisi yang terjadi pada transformator.



Metode segitiga duval ditemukan oleh Michel Duval pada 1974. Kondisi khusus yang diperhatikan adalah konsentrasi metana (CH_4), etilen (C_2H_4) dan asetilen (C_2H_2). Konsentrasi total ketiga gas ini adalah 100% namun perubahan komposisi dari ketiga gas ini menunjukkan kondisi fenomena kegagalan yang mungkin terjadi pada unit yang diujikan. Syarat menggunakan metode ini adalah setidaknya satu dari ketiga gas hidrokarbon harus berada pada kondisi diatas kondisi 1 (metode TDCG). Yang mungkin terjadi pada unit yang diujikan dan diperlihatkan pada Gambar 2.10.

Perhitungan titik koordinat *Duval Triangle*

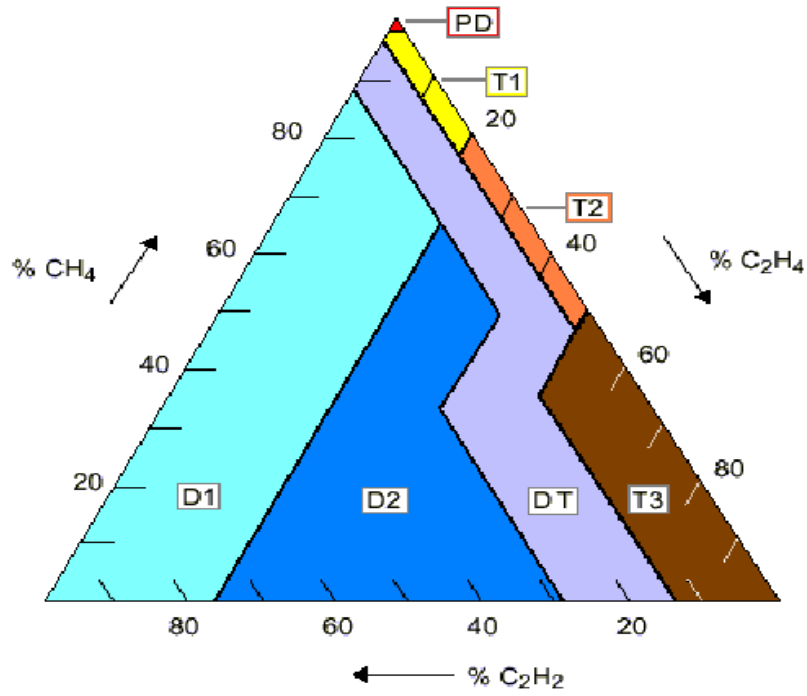
$$\% \text{CH}_4 = \text{CH}_4 / (\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_2) \times 100\%$$

$$\% \text{C}_2\text{H}_4 = \text{C}_2\text{H}_4 / (\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_2) \times 100\%$$

$$\% \text{C}_2\text{H}_2 = \text{C}_2\text{H}_2 / (\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_2) \times 100\%$$

Terdapat tujuh gangguan yang menjadi interpretasi dari komposisi ketiga gas tersebut yaitu :

1. PD = Partial Discharge
2. T1 = Thermal Fault Less than 300 °C
3. T2 = Thermal Fault Between 300 °C and 700 °C
4. T3 = Thermal Fault Greater than 700 °C
5. D1 = Low Energy Discharge (Sparking)
6. D2 = High Energy Discharge (Arcing)
7. DT = Mix of Thermal and Electrical Faults



Gambar 2.11 Metode Duval's Triangle