

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Rahmat Hardityo UI, 2008 melakukan penelitian tentang analisis indikasi kegagalan transformator dengan menggunakan metode analisis gas terlarut. Hasil yang didapat, bahwa pada awalnya transformator diindikasikan mengalami kerusakan dalam tingkat yang cukup parah. Hal ini terindikasi dari tingginya nilai gas etilen, karbon monoksida, dan karbon dioksida. Seiring pertambahan temperatur minyak, maka nilai konsentrasi *fault* gas juga semakin tinggi. Hal ini seharusnya tidak terjadi mengingat kondisi transformator dan minyak isolator yang masih baru. Ketika sudah dilakukan proses perbaikan transformator dan pembersihan minyak, maka nilai konsentrasi *fault* gas turun dengan drastis. Beberapa waktu setelah proses pembersihan minyak, kondisi ini terus berlanjut. Hal ini menunjukkan bahwa transformator berada dalam kondisi normal. Sehingga dapat diambil kesimpulan akhir bahwa ada proses yang menyalahi prosedur ketika transformator belum diaktifkan, baik dari saat perangkaian, pemvakuman ataupun proses pengisian minyak.

Bangun Adi Ismono, T. Haryono, Suharyanto UGM, 2010 melakukan penelitian tentang perawatan minyak pada transformator daya menggunakan metode *DGA (Dissolved Gas Analysis)*. Hasil yang didapat, trafo menunjukkan dalam kondisi yang tidak normal. Langkah pertama yang diambil yaitu dengan

purifikasi minyak trafo, satu bulan setelah *purifikasi* dan trafo dioperasikan dengan beban penuh, kondisi konsentrasi gas-gas tetap pada batas normal sehingga dapat disimpulkan bahwa trafo dalam keadaan yang normal. Kondisi gas-gas yang tinggi pada saat sebelum *purifikasi* dapat diakibatkan oleh *purifikasi* yang tidak maksimal saat penambahan minyak trafo pada tahun 2007, sehingga masih banyak partikel pengotor, partikel pengotor inilah yang menyebabkan *fault* gas naik.

Yustinus Pranata Sinuhaji Universitas Jember, 2012 melakukan penelitian tentang analisis keadaan minyak isolasi transformator daya 150 kV menggunakan metode *Dissolved Gas Analysis (DGA)* dan logika *fuzzy* pada Gardu Induk wilayah Sidoarjo. Hasil yang didapat, keadaan minyak isolasi yang diperoleh dengan menggunakan logika *fuzzy* akan dibandingkan dengan karakteristik tegangan tembusnya untuk membuktikan keakuratan hasil keadaan minyak isolasi yang diperoleh menggunakan logika *fuzzy*, dimana untuk derajat keanggotaan 0-20 maka keadaan minyak isolasi berada pada keadaan normal, untuk derajat keanggotaan 21-60 keadaan minyak isolasi agak buruk sehingga harus segera dilakukan perbaikan seperti pencucian minyak (*purification/filter*) untuk mencegah kegagalan transformator, dan untuk derajat keanggotaan diatas 60 keadaan minyak isolasi berada pada tingkat berbahaya sehingga harus dilakukan penggantian minyak isolasi. Sedangkan untuk karakteristik tegangan tembus akan disesuaikan dengan Standar IEC 156, dimana untuk tegangan tembus diatas 50 kV, keadaan minyak isolasi transformator “bagus”, untuk minyak isolasi yang tegangan tembusnya berada diantara 40-50 kV, keadaan minyak isolasi

“kurang bagus/agak buruk”, dan untuk minyak isolasi yang tegangan tembusnya dibawah 30 kV maka keadaan minyak isolasi “tidak layak” dan harus diganti dengan minyak isolasi yang baru. Sedangkan keadaan minyak isolasi yang diperoleh dari data *Dissolved Gas Analysis (DGA)* yang diolah menggunakan logika *fuzzy* yang dibandingkan dengan karakteristik tegangan tembusnya membuktikan bahwa hasil keadaan minyak isolasi yang diperoleh menggunakan metode *DGA* dan logika *fuzzy* cukup akurat dalam menentukan keadaan minyak isolasi transformator, hal ini bisa dikatakan karena hasil logika *fuzzy* untuk menentukan keadaan minyak isolasi sesuai dengan hasil karakteristik tegangan tembus minyak isolasi transformator, dengan ketentuan semakin rendah nilai hasil keadaan minyak isolasi melalui *DGA* dan *fuzzy* (semakin baik/bagus keadaan minyak isolasi), maka semakin tinggi nilai tegangan tembusnya.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Transformator Daya

Transformator daya merupakan peralatan atau mesin listrik yang berfungsi untuk mengubah energi listrik dengan cara memindahkan dan mengubah level tegangan bolak-balik (*Alternating Circuit*) melalui induksi elektromagnetik.

Konstruksi transformator terdiri dari inti besi dengan lilitan-lilitan konduktor yang membentuk dua kumparan pada sisi yang berlawanan. Kumparan-kumparan tersebut merupakan kumparan primer dan kumparan sekunder.

Kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan AC, sementara kumparan sekunder dihubungkan dengan beban.

Prinsip kerja daripada transformator yaitu induksi elektromagnetik bersesuaian dengan Hukum Faraday dimana suatu tegangan dapat di induksikan dari suatu konduktor ke konduktor lain. Transformator terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang terpisah tetapi secara magnet terhubung oleh suatu *path* yang memiliki reaktansi rendah. Saat tegangan diberikan pada kumparan primer, sesuai dengan hukum *Lens* dan *Biot Savart*, ketika ada arus yang mengalir pada konduktor, maka akan dihasilkan medan magnet di sekitar kumparan. Karena tegangan yang diberikan merupakan tegangan bolak-balik, maka akan terjadi medan magnet yang arahnya berubah-ubah berdasarkan polaritas tegangan. Medan magnet akan memotong permukaan inti besi dan kumparan sekunder yang menyebabkan dihasilkannya *fluks* magnetik yang berubah-ubah. *Fluks* magnetik yang berubah-ubah terhadap waktu menyebabkan terinduksinya tegangan di kumparan sisi primer. Besarnya tegangan induksi yang dihasilkan di sisi sekunder berbanding lurus dengan kelajuan perubahan *fluks* dan jumlah lilitan kumparan sekunder. Sementara itu, untuk transformator ideal, daya pada kedua kumparan sama besar. Pada kenyataannya, tidak ada transformator yang memiliki efisiensi $n=1$ sehingga daya keluaran akan lebih kecil dibanding daya masukan.



Gambar 2.1 Transformator Daya

2.2.1.1 Klasifikasi Transformator

Secara umum, transformator di klasifikasikan berdasarkan tujuan penggunaannya, antara lain:

a. Transformator Elektronik

Transformator elektronik merupakan transformator yang umumnya digunakan pada peralatan-peralatan elektronik yang membutuhkan daya DC yang relatif kecil. Transformator elektronik digunakan untuk mengubah level tegangan dari tegangan tinggi menjadi tegangan rendah (*step-down*).

b. Transformator Pengukuran

Transformator pengukuran merupakan jenis transformator yang umumnya digunakan untuk keperluan khusus. Transformator pengukuran yang digunakan dalam sistem tenaga listrik antara lain:

a) Current Transformer

Transformator arus merupakan transformator yang umumnya dihubungkan dengan rele arus lebih. Rele arus lebih berfungsi untuk mendeteksi (*sensing*) adanya arus lebih atau *overcurrent*. Namun, rele arus lebih dapat mengalami kerusakan apabila nilai arus sangat besar, untuk itu diperlukan transformator arus yang akan memperkecil nilai arus di sisi sekunder agar dapat dideteksi oleh rele arus lebih.

b) Potential Transformer

Transformator tegangan merupakan transformator *step-down* yang menurunkan level tegangan di sisi sekundernya dimana tegangan sekunder sebanding dengan tegangan primernya. Pada dasarnya, potential transformer sama dengan transformator daya, hanya saja, potential transformer (PT) di desain untuk nilai arus yang sangat kecil.

c. Transformator Daya

Transformator daya merupakan transformator yang digunakan dalam sistem tenaga listrik khususnya sistem tegangan tinggi. Berdasarkan tujuan penggunaannya dalam sistem tenaga listrik, transformator daya dibedakan menjadi:

- a) *Unit transformer*, yaitu transformator yang digunakan untuk level transmisi lebih dari 110 kV dan biasanya dihubungkan langsung dengan tegangan *output* generator.
- b) *Substation transformer*, yaitu transformator yang digunakan di ujung jalur transmisi dan merupakan jenis *step-down* yang menghubungkan transmisi dan distribusi.
- c) *Distribution transformer*, yaitu transformator *step-down* yang menurunkan level tegangan dari tegangan menengah menjadi tegangan rendah.

2.2.2 Komponen Transformator Daya



Gambar 2.2 Bagian-bagian Transformator Daya

(<http://ravanio.blogspot.co.id/2013/01/jenis-gangguan-trafo.html>)

2.2.2.1 Inti Besi

Inti besi pada transformator merupakan tempat melekatnya kumparan primer dan kumparan sekunder. Inti besi transformator terdiri dari lempengan inti besi yang dilaminasi. Fungsi daripada inti besi ini ialah untuk menguatkan *fluks* yang ditimbulkan oleh arus yang mengalir pada kumparan.

Pada saat tegangan diberikan pada kumparan primer, maka pada inti besi juga terjadi induksi elektromagnetik yang menyebabkan arus pusar (*eddy current*) yang merupakan rugi-rugi daya. Arus putar disebabkan oleh ketidakmurnian pada inti besi. Untuk mengurangi rugi-rugi daya akibat arus pusar, maka lempengan-lempengan inti besi dilaminasi satu sama lain.

2.2.2.2 Kumparan Transformator

Kumparan transformator dibentuk dari lilitan-lilitan *coil* atau konduktor. Terdapat dua buah kumparan pada transformator AC satu fasa yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Tiap-tiap kumparan dilaminasi atau diberi isolasi yang dapat berupa kertas insulasi (*insulation paper*) terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain untuk mencegah terjadinya lompatan listrik atau hubung singkat antar *coil*.

2.2.2.3 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. Minyak transformator yang digunakan merupakan minyak mineral seperti minyak *Diala*, *Esso*, *Univolt* dan *Nynas*.

2.2.2.4 Bushing

Bushing merupakan konduktor yang berfungsi untuk menghubungkan transformator dengan jaringan luar. Konstruksi *bushing* terdiri dari konduktor yang diselubungi oleh isolator yang berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator. *Bushing* dilengkapi dengan fasilitas untuk pengujian kondisi *bushing* yang disebut dengan *centre tap*, *Bushing* berfungsi untuk mencegah terjadinya lompatan api pada transformator.

2.2.2.5 Tangki dan Konservator

Transformator memiliki tangki utama dan konservator untuk menyimpan minyak. Konservator berfungsi untuk menampung uap dan udara yang dihasilkan dari pemanasan transformator akibat arus beban yang tinggi. Antara konservator dan transformator diletakkan rele Bucholz yang akan menyerap gas produksi akibat terjadinya kerusakan isolasi.

Untuk mencegah minyak di dalam konservator terkontaminasi air dalam udara dari luar transformator, maka pada konservator dilengkapi dengan *silica gel* yang akan menyerap kadar air atau kelembaban pada udara sehingga udara yang masuk ke dalam konservator merupakan udara yang kering. Kandungan air dalam minyak konservator dapat berakibat pada menurunnya kualitas minyak sebagai isolator transformator.

Berdasarkan jenis konstruksinya, tangki minyak dibedakan menjadi:

- a. Jenis sirip (*tank corrugated*). Badan tangki terbuat dari plat baja berkanai dingin yang menjalani pembengkokan, pemotongan dan proses pengelasan otomatis, untuk membentuk badan tangki bersirip dengan siripnya berfungsi sebagai radiator pendingin dan alat bernafas pada saat yang sama. Tutup dan dasar tangki terbuat dari plat baja berkanai panas yang kemudian di las sambung kepada badan tangki bersirip membentuk tangki *corrugated* ini. Umumnya transformator di bawah 4000 kVA dibuat dengan bentuk tangki *corrugated*.
- b. Jenis *Conventional Beradiator*, merupakan jenis tangki yang terdiri dari badan tangki, tutup dan umumnya dilengkapi dengan konservator.
- c. *Hermetically Sealed Tank with N₂ Cushined*. Jenis tangki ini mirip dengan jenis konvensional, akan tetapi menggunakan gas Nitrogen pada permukaan minyak untuk mencegah terjadinya kontak minyak dengan udara luar transformator.

2.2.2.6 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.

a) Klasifikasi Sistem Pendingin

Pendingin dapat diklasifikasikan berdasarkan cara kerja sirkulasinya, antara lain:

1. Alamiah (Natural)
2. Tekanan/Paksa (*Forced*)

Tabel 2.1 Klasifikasi Sistem Pendingin Pada Transformator Daya

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	-
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			

b) **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 tidak dikenai beban.

c) ***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 Gangguan Pada Transformator Daya

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:

a. 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.

b. 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.

2.2.4 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:

- 1) Rele Bucholz
- 2) Rele Jansen
- 3) Rele Tekanan Lebih (*Sudden Pressure Relay*)
- 4) Rele Differensial (*Differential Relay*)
- 5) Rele Arus Lebih (*Over Current Relay/OCR*)
- 6) Rele Tangki Tanah
- 7) Rele Gangguan Tanah (*Ground Fault Relay/GFR*)
- 8) Rele Gangguan Tanah Terbatas (*Restricted Earth Fault/REF*)
- 9) Rele Temperatur/Suhu
- 10) Rele Beban Lebih (*Over Load Relay/OLR*)
- 11) Pengaman Lebur (*Fuse*)
- 12) Arrester

2.2.5 Kegagalan Pada Transformator

2.2.5.1 Teori Kegagalan Zat Isolasi Cair

Karakteristik pada isolasi minyak trafo akan berubah jika terjadi ketidakmurnian di dalamnya. Hal ini akan mempercepat terjadinya proses kegagalan isolasi. Secara teori mekanisme kegagalan isolasi cair kurang banyak diketahui dibandingkan dengan teori kegagalan isolasi gas atau zat padat. Hal tersebut disebabkan karena sampai saat ini belum didapatkan teori yang dapat menjelaskan proses kegagalan dalam zat cair yang benar-benar sesuai antara keadaan secara teoritis dengan keadaan sebenarnya. Teori kegagalan zat isolasi cair dapat dibagi menjadi empat jenis sebagai berikut :

a. Teori Kegagalan Zat Murni atau Elektrik

Jika diantara elektroda diterapkan suatu kuat medan yang sangat kuat, sedangkan pada elektroda tersebut terdapat bagian yang tidak rata, maka kuat medan yang terbesar terdapat pada bagian yang tidak rata tersebut. Kuat medan maksimum tersebut akan mengeluarkan elektron yang akan memulai terbentuknya banjir elektron. Dalam teori kegagalan elektronik dianggap bahwa elektron-elektron tertentu akan memperoleh energi dari medan yang lebih besar dari pada energi pada energi yang hilang karena benturan dengan molekul-molekul. Perolehan ini digunakan untuk mengionisasikan molekul karena benturan dan mengawali banjir.

b. Teori Kegagalan Gelembung Gas

Yaitu ketakmurnian (misalnya gelembung udara) mempunyai tegangan gagal yang lebih rendah dari zat cair. Adanya gelembung udara dalam

cairan merupakan awal dari pencetus kegagalan total dari zat cair. Kegagalan gelembung merupakan bentuk kegagalan isolasi cair yang disebabkan oleh gelembung-gelembung gas didalamnya.

c. Teori Kegagalan Uap Air

Air dan uap air terdapat pada minyak, terutama pada minyak yang telah lama digunakan. Jika terdapat medan listrik, maka molekul uap air yang terlarut memisah dari minyak dan terpolarisasi membentuk suatu dipole. Jika jumlah molekul-molekul uap air ini banyak, maka akan tersusun semacam jembatan yang menghubungkan kedua elektroda, sehingga membentuk suatu kanal peluahan. Kanal ini akan merambat dan memanjang sampai menghasilkan tembusan listrik.

d. Teori Kegagalan Partikel Padat

Partikel debu atau serat selulosa yang ada di sekeliling isolasi padat (kertas) sering kali ikut tercampur dengan minyak. Selain itu partikel padat ini pun dapat terbentuk ketika terjadi pemanasan dan tegangan lebih. Pada saat terjadi medan listrik, partikel-partikel ini akan terpolarisasi dan membentuk jembatan. Arus akan mengalir melalui jembatan dan menghasilkan pemanasan lokal serta menyebabkan terjadinya kegagalan.

2.2.5.2 Karakteristik Isolasi Cair

Ada beberapa alasan mengapa isolasi cair digunakan antara lain :

- a) Isolasi cair memiliki kerapatan 1000 kali atau lebih dibandingkan dengan isolasi gas, sehingga memiliki kekuatan dielektrik yang lebih tinggi menurut hukum *paschen*.
- b) Isolasi cair akan mengisi celah atau ruang yang akan diisolasi dan secara serentak melalui proses konversi menghilangkan panas yang timbul akibat rugi energi.
- c) Isolasi cair cenderung dapat memperbaiki diri sendiri (*self healing*) jika terjadi pelepasan muatan (*discharge*).

Namun kekurangan utama isolasi cair adalah mudah terkontaminasi. Beberapa macam faktor yang diperkirakan memengaruhi kegagalan minyak transformator seperti :

- a. Luas daerah elektroda,
- b. Jarak celah (*gap spacing*),
- c. Pendinginan,
- d. Perawatan sebelum pemakaian (elektroda dan minyak),
- e. Pengaruh kekuatan dielektrik dari minyak trafo yang diukur serta kondisi pengujian atau minyak trafo itu sendiri juga memengaruhi kekuatan dielektrik minyak trafo.

2.2.5.3 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°C dan 10^{-3} pada 90°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 10¹⁶ W-m atau lebih. (W=Ohm)

2.2.5.4 Jenis Minyak Transformator

a) Minyak Transformator 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 Transformator Sintetis (*Askarel*)

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

2.2.5.5 Tingkatan Standar Minyak Transformator

Tabel 2.2 Tingkatan Standar Minyak Transformator

No.		Standar
1.	IEC	International Standard
2.	BS, ASTM, JIS, SNI	National Specifications
3.	ABB, GEC-Ahlstom, Unindo	Transformer Producer Specifications
4.	TNB, PLN	Power Distributor Specifications

2.2.5.6 Klasifikasi Minyak Isolasi Pakai

Tabel 2.3 Klasifikasi Minyak Isolasi Pakai

Gas(ppm)/Kondisi	1	2	3	4
H ₂	<100	101-700	701-1800	>1800
CH ₄	<120	121-400	401-1000	>1000
CO	<350	351-570	571-1400	>1400
CO ₂	<2500	2500-4000	4001-10000	>10000

Tabel 2.3 Klasifikasi Minyak Isolasi Pakai (lanjutan)

C_2H_4	<50	51-100	101-200	>200
C_2H_6	<65	66-100	101-150	>150
C_2H_2	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.

Catatan : CO₂ tidak termasuk dalam TDCG, H₂O Metoda IEC 814 : <25

2.2.6 Keandalan Transformator

a. Transformator akan rusak dengan cepat, karena:

- 1) Hot Spot akan menyebabkan *Arcing*
- 2) Terjadinya *Arcing*
- 3) *Overheating* pada trafo
- 4) Isolasi yang basah
- 5) Terjadi kerusakan menyeluruh pada isolasi.

b. Transformator lebih cepat penuaan (*Aging*) dari wajarnya, karena:

- 1) Tingginya angka asam
- 2) Kotoran dan hasil oksidasi lain yang terjadi
- 3) Tingginya jumlah *moisture*
- 4) Tidak adanya anti oksidan
- 5) Terjadi kerusakan menyeluruh

2.2.7 Dissolved Gas Analysis (DGA)

2.2.7.1 Definisi DGA

Dissolved Gas Analysis (DGA) atau analisis gas terlarut adalah salah satu cara yang paling mudah dan efektif untuk mendiagnosis gangguan permulaan pada transformator daya. Dengan ditemukannya gangguan yang lebih awal pada transformator akan memudahkan pemeliharaan rutin, dan dapat memperpanjang usia transformator. Salah satu uji yang dilakukan untuk pengujian kandungan gas terlarut pada material minyak isolasi adalah dengan uji kromatografi. Dengan adanya uji kromatografi ini akan diperoleh kandungan gas yang terlarut dalam minyak transformator. Gas yang dapat diperoleh dari uji *DGA* adalah Oksigen (O_2), Karbondioksida (CO_2), Karbonmonoksida (CO), Hidrogen (H_2), Etana (C_2H_6), Metana (CH_4), Etilen (C_2H_4), dan Asetilen (C_2H_2). Gas yang dihasilkan diukur dalam satuan ppm (*part per milion*). Konsentrasi dari beberapa jenis gas yang dihasilkan tergantung pada jenis gangguan yang terjadi. Tetapi dapat dikatakan pula bahwa setiap jenis gangguan akan menghasilkan gas, yang dikenal dengan *key gas*.

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*.

2.2.7.2 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:

Tabel 2.4 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>	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
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.
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°C) ataupun penggabungan metal ($> 1000^{\circ}\text{C}$).

2.2.7.3 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. Standar IEEE
2. *Key Gas*
3. *Roger's Ratio*
4. *Duval's Triangle*.

1) Standar IEEE

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

Tabel 2.5 Batas Konsentrasi Gas Terlarut Dalam Minyak Transformator

Status	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂ ¹	TDCG
Kondisi 1	100	120	35	50	65	350	2,500	720
Kondisi 2	101-700	121-400	36-50	51-100	66-100	351-570	2,500-4,000	721-1,920
Kondisi 3	701-1,800	401-1,000	51-80	101-200	101-150	571-1,400	4,001-10,000	1,921-4,630
Kondisi 4	>1,800	>1,000	>80	>200	>150	>1,400	>10,000	>4,630

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 (CO₂) 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 tabel 2.6 berikut:

Tabel 2.6 TDCG

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

Tabel 2.6 TDCG (lanjutan)

3.	1941-4630 ppm, atau nilai tertinggi dari masing-masing gas	<10	Bulanan	Awas. Rencanakan untuk mematikan transformator, hubungi produsen pembuat atau konsultan untuk mengetahui tindakan yang harus dilakukan
		10.0-30.0	Mingguan	
		>30	Mingguan	
4.	>4630 ppm, atau nilai tertinggi dari masing-masing gas	<10	Mingguan	Awas. Rencanakan untuk mematikan transformator, hubungi produsen pembuat atau konsultan untuk mengetahui tindakan yang harus dilakukan
		10.0-30.0	Harian	
		>30	Harian	Awas. Lakukan Servis, hubungi produsen pembuat atau konsultan untuk mengetahui tindakan yang harus dilakukan

Kondisi transformator disesuaikan dengan nilai-nilai yang tercantum pada tabel. 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 tabel 2.6 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) *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 temperatur”. Pendefinisian tersebut jika dikaitkan dengan berbagai kasus kegagalan transformator yang seringkali terjadi, maka dapat dibuat menjadi tabel 2.7 sebagai berikut:

Tabel 2.7 Key Gas

Gangguan	Gas Kunci	Kriteria	Jumlah Presentase 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 (<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%

3) Rasio Roger

Magnitude rasio empat jenis *fault* gas digunakan untuk menciptakan empat digit kode. Kode-kode tersebut akan menunjukkan indikasi dari penyebab munculnya *fault* gas. Beberapa catatan (*note*) mengenai interpretasi dari tabel 2.8 rasio roger (1):

Tabel 2.8 Rasio Roger (1)

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

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. Gas-gas yang timbul mayoritas dihasilkan oleh proses *dekomposisi* kertas, sehingga muncul angka 0 pada kode rasio roger.

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.

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.

Transformator dengan OLTC (*On-Load Tap Changer*) biasa saja menunjukkan kode 2 0 2 ataupun 1 0 2 tergantung jumlah dari pertukaran minyak antara tangki *tap changer* dan tangki utama.

Tabel 2.9 Rasio Roger (2)

Kasus	Tipe Gangguan	Kode Rasio Roger		
		C_2H_2/C_2H_4	CH_4/CH_2	C_2H_4/C_2H_6
1	Tidak Ada Gangguan	0	0	0
2	<i>Low Energy Partial Discharge</i>	1	1	0
3	<i>High Energy Partial Discharge</i>	1-2	1	0
4	<i>Low Energy Discharges, Sparking, Arching</i>	1-2	0	1-2
5	<i>High Energy Discharges, Sparking, Arching</i>	1	0	2
6	<i>Thermal Fault</i> Suhu dibawah 150°C	0	0	1
7	<i>Thermal Fault</i> Suhu antara 150° -300°C	1	2	1
8	<i>Thermal Fault</i> Suhu antara 300° -700°C	0	2	0
9	<i>Thermal Fault</i> Suhu diatas 700°C	0	2	2

Selain rasio pada tabel 2.9 diatas, seringkali digunakan rasio lain seperti rasio CO_2/CO . Rasio ini digunakan untuk mendeteksi keterlibatan isolasi

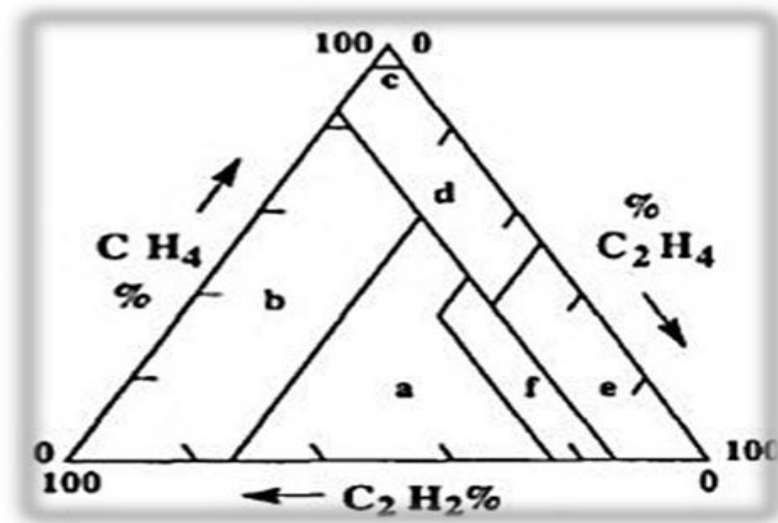
kertas pada fenomena kegagalan. Normalnya rasio CO_2/CO bernilai sekitar 7. Jika rasio $0 < 3$, ada indikasi yang kuat akan adanya kegagalan elektrik sehingga menimbulkan karbonisasi pada kertas (hot-spot atau *arcing* dengan temperature $> 200^\circ\text{C}$). Jika rasio > 10 , mengindikasikan adanya 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.

4.) Segitiga Duval

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_6), 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 Segitiga Duval