



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator¹

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 berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga listrik memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai, dan ekonomis untuk berbagai keperluan misalnya keperluan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

- 1) Transformator daya
- 2) Transformator distribusi
- 3) Transformator pengukuran

Kerja transformator yang berdasarkan induksi-elektromagnet, menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama.

Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, dikenal dua macam transformator, yaitu transformator tipe inti dan transformator tipe cangkang.

2.2 Minyak Transformator

Minyak transformator merupakan salah satu bahan isolasi cair yang dipergunakan sebagai isolasi dan pendingin pada transformator. Sebagian bahan isolasi minyak harus memiliki kemampuan untuk menahan tegangan tembus, sedangkan sebagai pendingin minyak transformator harus mampu meredam panas yang ditimbulkan, sehingga dengan kedua kemampuan ini maka minyak diharapkan

¹ Administrator. *Engineering Cours Program*. (Bandung: Erlangga, 2002), hal 38.



akan mampu melindungi transformator dari gangguan. Minyak transformator mempunyai unsur atau senyawa hidrokarbon yang terkandung dalam minyak transformator ini adalah senyawa hidrokarbon parafinik, senyawa hidrokarbon naftenik dan senyawa hidrokarbon aromatik. Selain ketiga senyawa diatas minyak transformator masih mengandung senyawa yang disebut zat aditif meskipun kandungannya sangat kecil.

Minyak transformator adalah cairan yang dihasilkan dari proses pemurnian minyak mentah. Selain itu minyak ini juga berasal dari bahan bahan organik, misalnya minyak piranol dan silikon, berapa jenis minyak transformator yang sering dijumpai dilapangan adalah minyak transformator jenis Diala A, Diala B dan Mectrans.

Kenaikan suhu pada transformator akan menyebabkan terjadinya proses hidrokarbon pada minyak, nilai tegangan tembus dan kerapatan arus konduksi merupakan beberapa indikator atau variable yang digunakan untuk mengetahui apakah suatu minyak transformator memiliki ketahanan listrik yang memahami persyaratan yang berlaku.

Secara analisa kimia ketahanan listrik suatu minyak transformator dapat menurun akibat adanya pengaruh asam dan pengaruh tercampurnya minyak dengan air. Untuk menetralsir keasaman suatu minyak transformator dapat menggunakan potas hidroksida (KOH). Sedangkan untuk menghilangkan kandungan air yang terdapat dalam minyak tersebut yaitu dengan cara memberikan suatu bahan higroskopis yaitu selikagel.

Dalam menyalurkan perannya sebagai pendingin, kekentalan minyak transformator ini tidak boleh terlalu tinggi agar mudah bersikulasi, dengan demikian proses pendinginan dapat berlangsung dengan baik. Kekentalan relatif minyak transformator tidak boleh lebih dari 4,2 pada suhu 20°C dan 1,8 dan 1,85 dan maksimum 2 pada suhu 50°C. Hal ini sesuai dengan sifat minyak transformator yakni semakin lama dan berat operasi suatu minyak transformator, maka minyak akan akan semakin kental. Bila kekentalan minyak tinggi maka sulit untuk bersikulasi sehingga akan menyulitkan proses pendinginan transformator.



Sebagai bahan isolasi minyak transformator memiliki beberapa kekentalan, hal ini sebagaimana dijelaskan dalam SPLN (49-1:1980) Adapun persyaratan yang harus dipenuhi oleh minyak transformator adalah sebagai berikut.

1. Kejernihan

Kejernihan minyak isolasi tidak boleh mengandung suspensi atau endapan (sedimen).

2. Massa jenis

Massa jenis dibatasi agar air dapat terpisah dari minyak isolasi dan tidak melayang.

3. Viskositas kinematika

Viskositas memegang peranan penting dalam pendinginan, yakni untuk menentukan kelas minyak.

4. Titik nyala

Titik nyala yang rendah menunjukkan adanya kontaminasi zat gabar yang mudah terbakar.

5. Titik tuang

Titik tuang dipakai untuk mengidentifikasi dan menentukan jenis peralatan yang akan menggunakan minyak isolasi.

6. Angka kenetralan

Angka kenetralan merupakan angka yang menunjukkan penyusutan asam minyak dan dapat mendeteksi kontaminasi minyak, menunjukkan kecenderungan perubahan kimia atau indikasi perubahan kimia dalam bahan tambahan.

7. Korosi belerang

Korosi belerang kemungkinan dihasilkan dari adanya belerang bebas atau senyawa belerang yang tidak stabil dalam minyak isolasi.

8. Tegangan tembus

Tegangan tembus yang terlalu rendah menunjukkan adanya kontaminasi seperti air, kotoran atau partikel konduktif dalam minyak.



9. Kandungan air

Adanya air dalam dalam isolasi menyebabkan menurunnya tegangan tembus dan tahanan jenis minyak isolasi akan mempercepat kerusakan kertas pengisolasi.

2.3 Transformator tegangan²

Pada transformator tegangan, impedansinya kecil sehingga hanya tergantung kepada beban. Transformator untuk menaikkan tegangan disebut *step up transformer* dan yang menurunkan tegangan disebut *step down transformer*.

— — (2.1)

Keterangan :

E_1 = tegangan *input*, volt.

E_2 = tengangan *output*, volt.

N_1 = banyaknya lilitan dalam kumparan *primer*.

N_2 = banyaknya lilitan dalam kumparan *sekunder*.

2.4 Transformator daya

Transformator daya adalah transformator yang cara kerjanya menitik beratkan pada efisiensi daya, dipakai untuk suatu beban tertentu yang besarnya tidak begitu berubah-ubah. Pada transformator daya atau power trafo ini, efisiensi daya tadi dapat kecil sekitar 50% dan dapat juga besar sekitar 80%, sesuai dengan penggunaannya.

Daya primer x efisiensi = Daya sekunder (2.2)

² Suryanto, Ali. *Pembuatan Transformator Sederhana*. (Jakarta: 2002), hal 1.



2.5 Transformator arus³

Transformator arus adalah transformator yang impedansinya besar, sehingga kuat arus hanya ditentukan oleh transformator itu sendiri. Impedansi ialah besarnya hambatan listrik pada arus bolak-balik.

$$Z = R^2 + (X_L - X_C)^2 \quad (2.3)$$

Keterangan :

R = besarnya hambatan listrik, jika arus searah.

$X_L = 2\pi f L$ = reaktansi induktif

$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ = reaktansi kapasitif

f = 2π, dan f adalah frekwensi arus bolak-balik.

Daya yang dihasilkan oleh arus bolak-balik, besarnya adalah :

$$P = U \cdot I \cdot \cos \phi$$

Di mana :

$\cos \phi$ = faktor daya

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos \phi} \text{ dan } U = \frac{P}{I \cdot \cos \phi}$$

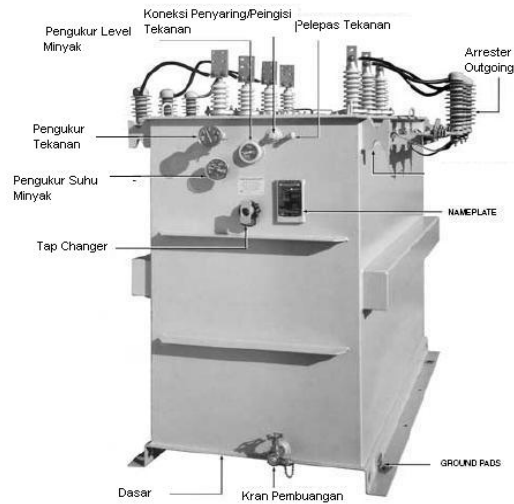
Sedangkan I_m dan U_m , masing-masing adalah besarnya arus maksimum dan tegangan maksimum dari arus bolak-balik tadi.

2.6 Bagian-bagian dari transformator⁴

Bagian-bagian dari sebuah peralatan transformator, adalah :

³ Suryanto, Ali. *Transformator*. (Jakarta: 2002), hal 4.
⁴ Suryanto, Ali. *Transformator*. (Jakarta: 2002), hal 12.

- a. Bhusing Primer
- b. Indikator Tinggi Permukaan Minyak
- c. Penapas Pengering
- d. Kran untuk Pemasukkan/Pengeluaran Minyak
- e. Pelat Nama
- f. Thermometer
- g. Tap Trafo (Alat untuk Merubah Tegangan)



Gambar 2.1

- a. **Persyaratan Konstruksi**⁵
 1. Dapat memindahkan panas dari inti dan belitan sehingga kenaikan temperatur dapat dibatasi pada nilai yang diizinkan
 2. Penurunan kualitas isolasi harus dapat dicegah

Note :

⁵ Pusri, File.Persyaratan Kontruksi pada Transformator.(Bandung: 2002), hal 6.

- Keduanya ini dapat dipenuhi oleh transformator daya dibanding transformator-transformator ukuran kecil, dengan mencelupkan transformator ke dalam tangki tertutup yang berisi minyak transformator
- Agar terjadi sirkulasi alami dan meningkatkan permukaan pendingin ke udara sekitar tangki transformator dilengkapi dengan sirip-sirip
- Pada transformator berukuran besar pendingin dilakukan secara paksa.

b. Konstruksi Transformator⁶

1. Inti Transformator

- Terbuat dari lapisan plat dinamo dari baja ally atau baja silicon yang mempunyai sifat resistansi tinggi dan histerisis kecil
- Tebal plat 0,35 – 0,5 mm, untuk menghindari / mengurangi Arus Pular (Eddy Current), diantara plat diisolasi (vernish) yang tahan terhadap suhu tinggi



Gambar 2.2

2. Belitan/Kumparan

- Beberapa lilitan kawat yang berisolasi digunakan sebagai kumparan pada transformator daya

⁶ Pusri, File.Persyaratan Kontruksi pada Transformator.(Bandung: 2002), hal 8.

- Kumbaran tersebut diisolasi baik terhadap inti besi maupun kumbaran lain dengan isolasi padat seperti pertinax dan lain-lain
- terdapat dua jenis kumbaran, yaitu kumbaran primer dan kumbaran sekunder



Gambar 2.3

3. Lilitan⁷

- Pada umumnya digunakan tembaga yang memiliki keuntungan-keuntungan:
- Tahanan jenis kecil $0,0175 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
- Kekuatan mekanis yang lebih besar dari aluminium
- Tahan terhadap korosi dari atmosfer
- Titik cair atau titik lebur lebih tinggi (1083°C)
- Mudah pengerjaannya: dibengkokkan, diratakan, dibor, dipres, disolder, dilas dsb.

⁷ Pusri, File.Persyaratan Kontruksi pada Transformator.(Bandung: 2002), hal 10.

4. Bushing

- Untuk menghubungkan kumparan transformator dengan jaringan luar
- Merupakan sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator yang berfungsi sebagai penyekat antara konduktor dengan tangki transformator.
- Bahan utama untuk bushing adalah dari bahan keramik. Dan pada bushing tegangan tinggi biasanya dilengkapi Arcing Horn

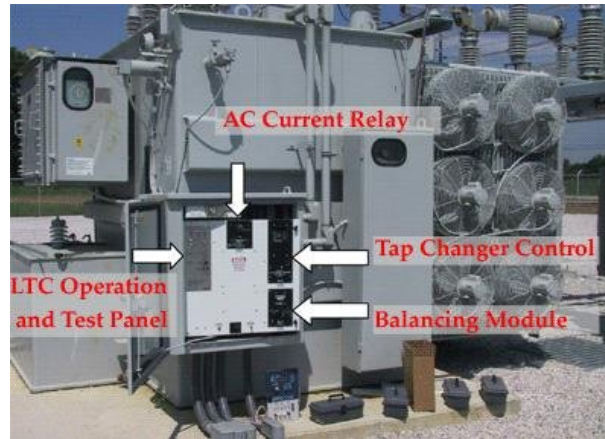


Gambar 2.4

5. Tap Changer⁸

- Pengubah Tap
- Alat perubah perbandingan transformator untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang lebih baik (diinginkan) dari tegangan jaringan yang berubah-ubah.
- Ada dua macam:
 - On-Load Tap Changer: Beroperasi dalam keadaan berbeban
 - Off-Load Tap Changer
- Untuk Menghindari terjadinya spark, ketika pemindahan tap tidak boleh terdapat celah

⁸ Pusri, File. *Persyaratan Kontruksi pada Transformator*. (Bandung: 2002), hal 12.



Gambar 2.5

6. Alat Pernafasan (Dehydrating Breather)⁹

- Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara diatas permukaan, dan minyak keluar dari dalam tangki. Bila suhu minyak turun, minyak menyusut dan udara luar akan masuk ke dalam tangki, kedua proses ini disebut pernafasan trafo.
- Akibat dari pernafasan ini, minyak akan bersinggungan dengan udara luar, mengakibatkan turunnya nilai tegangan tembus minyak trafo, maka dari itu pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi dengan alat pernafasan, berupa tabung berisi kristal zat hygroskopis (silicagel).

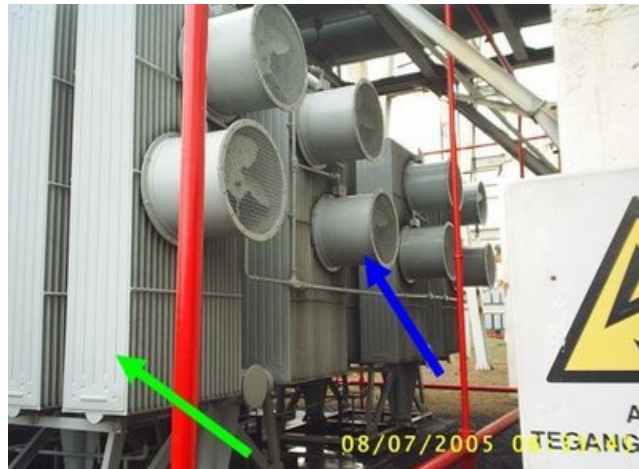


Gambar 2.6

⁹Administrator."Termo Dinamika Teknik".(<http://listrikindonesia.com>, diakses 14 april 2013).

7. Pendingin¹⁰

- Panas merupakan salah satu yang paling menyebabkan rusaknya transformator.
- Operasi yang hanya 10°C di atas rating transformator akan mengurangi usia transformator hingga 50%
- Panas disebabkan oleh rugi-rugi internal akibat pembebanan, temperatur lingkungan yang tinggi dan radiasi matahari.
- Panas mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan transformator dilengkapi dengan sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator.
- ANSI dari IEEE memberikan klas pendingin pada masing-masing transformator yang dicantumkan pada nameplat trafo.
- Huruf-huruf klas menunjukkan tipe-tipe pendingin.
- Huruf A menunjukkan “Air” (Udara), FA udara paksa (fans), “O” menunjukkan minyak. FO menunjukkan minyak paksa (pompa), sedang G menunjukkan Gas dan W menunjukkan Water/Oil Heat Exchanger.
- Pendingin dengan Udara Paksa
- Memerlukan Bidang perpindahan panas dengan menambah sirip-sirip (Radiator)



Gambar 2.7

¹⁰Administrator.”Termo Dinamika Teknik”.(<http://listrikindonesia.com>, diakses 14 april 2013).

8. Minyak Transformator

Minyak transformator harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

- IEC 296, minyak baru dan belum difilter >30 kV/2,5 mm dan setelah difilter yaitu >50 kV/2,5 mm
- Penyalur panas yang baik, berat jenis kecil sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
- Titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yang dapat membahayakan. Sesuai IEC (Standar Listrik Internasional) 296 Titik Api (Flash Point) minyak transformator di atas 163°C dan Titik Beku (Pour Point) adalah dibawah -30°C .
- Tidak Merusak bahan isolasi padat.



Gambar 2.8

Sifat Dari Minyak Trafo

- Besar Jenis = $0,85-0,9$ gr/cm pada $13,5^{\circ}\text{C}$
- Titik didih tidak kurang dari 135°C
- Titik beku tidak lebih dari -45°C
- Tekanan tembus minyak trafo tidak kurang dari 30 kV/2,5 mm atau 120 kV/cm

- Ketetapan Volume / Coefisien Volume (CV) = 0,069 % per 1°C
- Titik Api (Flash Point) = 180°C - 190°C
- Titik Nyala (Burning Point) = 205°C
- Kelembaban udara terhadap uap air (moisture) = nihil

9. Tangki Transformator¹¹

Kumparan dan intinya direndam dalam minyak transformator yang selain berfungsi sebagai pemindah panas, juga bersifat sebagai isolasi.



Gambar 2.9

Fungsi Minyak Trafo:

- Sebagai bahan isolasi.
- Sebagai Pendingin
- Sebagai penghantar panas dari bagian yang panas (coil dan inti) ke dinding bak

Pendingin transformator dengan minyak dapat merata pada tiap bagian yang aktif, dan memasuki semua celah-celah yang ada dalam transformator

¹¹ Maintenance of Electrical System. *Pengukuran Tahanan Isolasi*. (Bandung: Engineering Courses Program, 2002), hal 8.



sehingga jika dibandingkan dengan sistem udara, sistem dengan minyak lebih baik.

2. 7 Standar IEC-156¹²

IEC-156 otomatis Minyak Transformer Dielektrik Kekuatan Tester, Insulation / isolasi Pengujian Minyak IJ-II sepenuhnya otomatis tester minyak transformator adalah khusus untuk menguji minyak isolasi dielektrik strength, minyak ini tester mengadopsi IEC 156 standar internasional dan tembus tinggi tegangan uji presisi. Itu juga equps chip tunggal industri sebagai pengendali, menerapkan mengintegrasikan sirkuit besar, jenis baru I / O interface, LCD displayer, built-in printer dll

fitur:

1. Operasisederhana, otomatisasi tingkattinggi (hanya tekan tombol)
2. Menggunakan manajemen menu, mudah untuk memahami parameter input
3. Dapat menyimpan 99 kelompok data uji sampel minyak untuk memfasilitasi aksesmasa depan untuk dan cetak, data uji dapat disimpan dengan daya dimatikan selama 10 tahun.
4. Sistem jam di daya dimatikan dapat terus berjalan.
5. Kemampuan anti-gangguan
6. Deteksi dengan presisi tinggi
7. Ukuran kecil, ringan, operasi mudah

Parameter Teknis:

1. Power supply: AC 220V \pm 10%, 50Hz
2. Tegangan output: 0 ~ 100kV (60KV, 80kV, 100kV)
3. Kapasitas: 1.2KVA (1.6KVA, 2.0KVA)
4. Kecepatan kenaikan tekanan: sekitar 2KV / S
5. Presisi uji tegangan: \pm 3%

¹²Google. "IEC156". (<http://TranslatorToolkitWebsiteTranslatorGlobalMarket>)

2.8 OTS60SX (Semi Automatic Oil Test Set)¹³

Penjelasan Umum Mengenai OTS60SX

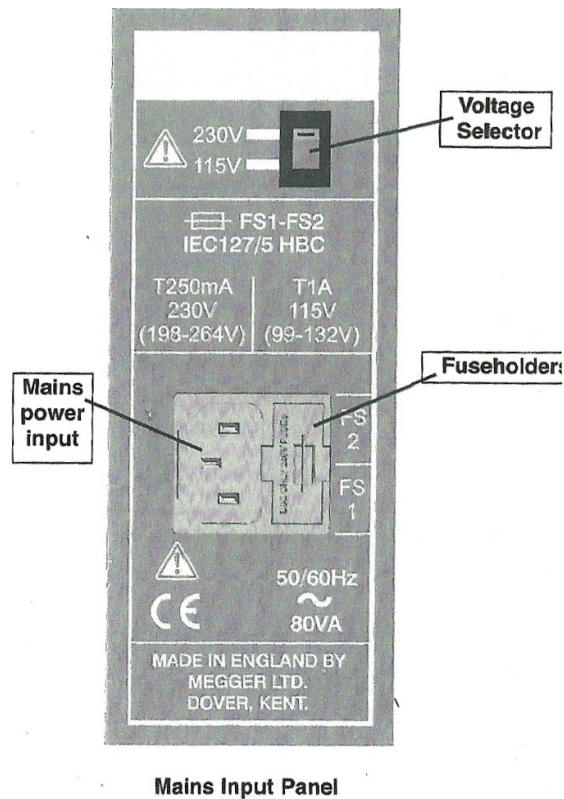


Gambar 2.10

OTS60SX adalah sebuah peralatan uji minyak yang ringan dan beroperasi secara semi-automatic. Maksimal hingga 60 kV kekuatan dari minyak yang bisa dideteksi dari berbagai perlengkapan instalasi listrik seperti transformator, circuit breaker dan perlengkapan lainnya. Pengoperasian dari peralatan ini sangat mudah dan hasilnya ditampilkan di dalam tampilan LED. Berbagai pilihan untuk bejana (wadah) memungkinkan alat ini mampu mengukur untuk berbagai macam uji minyak.

Pengoperasian semi-automatic dari peralatan ini, memungkinkan kita untuk melakukan semua tipe pengujian. Sebuah timer automatic akan beroperasi dalam waktu 1 menit ketika tegangan tinggi diberi jeda untuk pengujian Withstand. Minyak yang akan diuji juga bisa diuji berdasarkan spesifikasi kekuatan kerusakan dari minyak tersebut dengan berbagai macam serangkaian percobaan (Breakdown testing).

¹³Pusri, File.hypoelectronic.(Bandung: Politeknik, 2002), hal 37.



Gambar 2.11

Peralatan ini memiliki konstruksi yang kuat, badan yang terbuat dari lembaran baja. Sebuah kantung terdapat di samping peralatan, digunakan untuk menyimpan berbagai macam aksesoris, seperti kabel listrik, elektroda tambahan dan aksesoris lainnya.

Berbagai macam wadah atau bejana tersedia dan cocok digunakan untuk berbagai macam pengujian berdasarkan beberapa standar internasional. Ada tiga macam tipe elektroda yang digunakan; spherical (tipe IEC), mushroom (VDE/ASTM D1816), dan cylindrical (ASTM D877). Sampel minyak dapat diaduk oleh sebuah pengaduk yang digerakkan oleh sebuah motor. Bejana (wadah) terletak di dalam peralatan uji, dilindungi oleh sebuah pintu transparan yang terbuat dari polycarbonate, sehingga pengujian minyak ini dapat terlihat. Sebuah pengaman interlock dipasang guna memastikan bahwa tegangan tinggi akan terputus saat pintu transparan ini terbuka.



2.9 Besaran-besaran Minyak Transformator dan Pengujian

Tabel 2.1 Form pengujian minyak trafo PT.Pusri

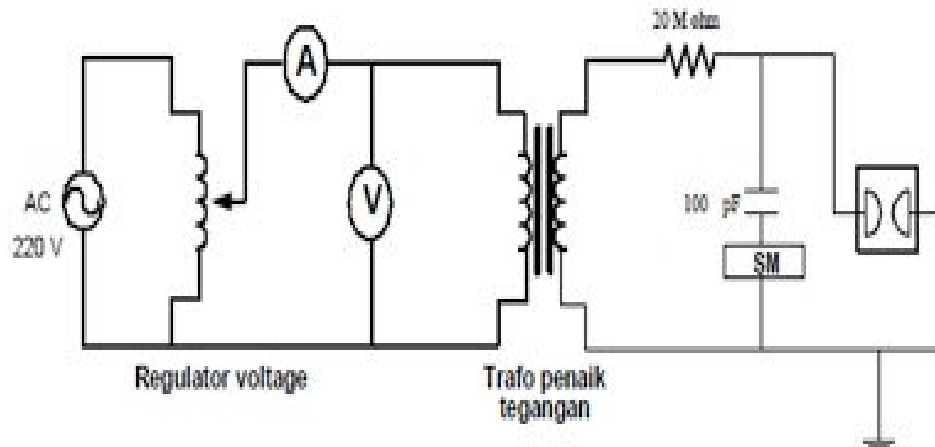
NO.	TRAFO NO.	SPEC	AC - KV	RATA-RATA	KETERANGAN
1	TR, 51 AMMONIA P IB 13800 / 480 V	IEC 156	24,8	30,16 KV	Trafo; TR;51 Ammonia P IB Warna Minyak Trafo Kuning Merek Trafo TRAFINDO Minyak Trafo di test dengan Electroda gap 2,5 mm Hasil test Minyak; BAIK
			37,6		
			36,5		
			31,6		
			24,1		
			26,4		
2	TR, 52 AMMONIA P IB 13800 / 480 V	IEC 156	42,8	43,75 KV	Trafo; TR 52 Ammonia P IB Warna Minyak Trafo Kuning Merek Trafo TRAFINDO Minyak Trafo di test dengan Electroda gap 2,5 mm Hasil test Minyak; BAIK
			41,1		
			47,4		
			36,8		
			46,7		
3	TR, 58 AMMONIA P IB 13800 / 2400 V	IEC 156	29,9	31,36 KV	Trafo; TR 58 Ammonia P IB Warna Minyak Trafo Kuning Merek Trafo TRAFINDO Minyak Trafo di test dengan Electroda gap 2,5 mm Hasil test Minyak; BAIK
			32,5		
			29,5		
			29,6		
			33,2		
4	TR, 51 A AMMONIA P IB 13800 / 2400 V	IEC 156	48,1	41,46 KV	Trafo; TR 51 A Ammonia P IB Warna Minyak Trafo Kuning Merek Trafo TRAFINDO Minyak Trafo di test dengan Electroda gap 2,5 mm Hasil test Minyak; BAIK
			47,7		
			33,9		
			34,2		
			41		
5	TR, 511 AMMONIA P IB 2400 / 480 V	IEC 156	50	48,23 KV	Trafo; TR 511 Ammonia P IB Warna Minyak Trafo Kuning Merek Trafo TRAFINDO Minyak Trafo di test dengan Electroda gap 2,5 mm Hasil test Minyak; BAIK
			42,7		
			35,8		
			55,9		
			53,4		
6	TR, 53 OFFSITE P IB 13800 / 2400 V	IEC 156	38,8	36,5 KV	Trafo; TR 53 Ammonia P IB Warna Minyak Trafo Kuning Merek Trafo TRAFINDO Minyak Trafo di test dengan Electroda gap 2,5 mm Hasil test Minyak; BAIK
			44,6		
			36,6		
			35,3		
			30,5		
			33,2		

2.10 Pengujian Tegangan Tembus Minyak



Gambar 2.12

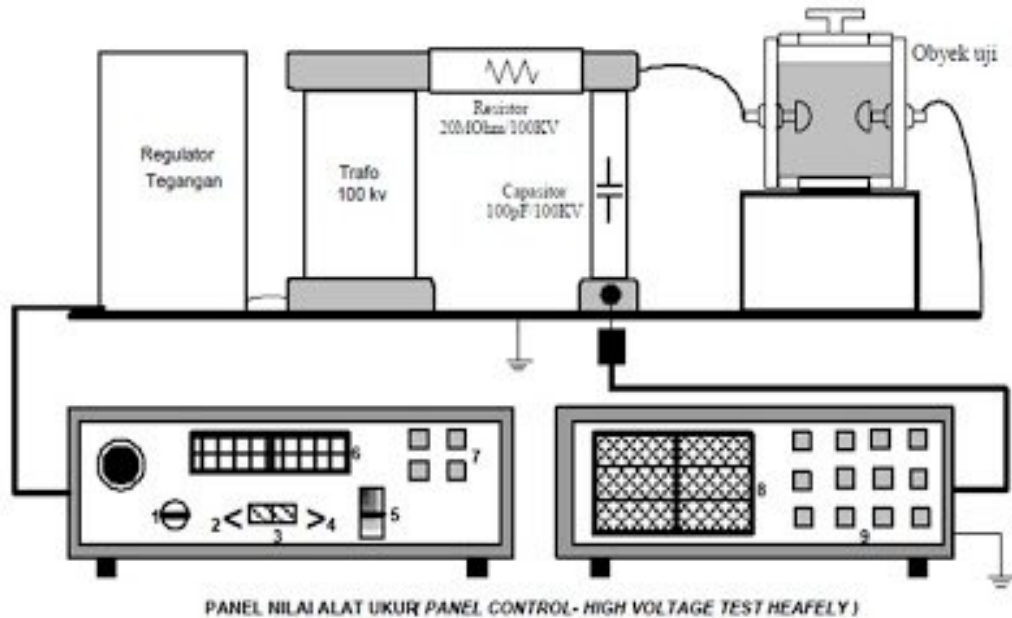
Didalam transformator daya yang digunakan di gardu induk, terdapat minyak trafo yang berfungsi untuk memisahkan secara listrik kumparan primer dengan kumparan sekundernya agar tidak terjadi tegangan tembus (*breakdown*). Minyak trafo ini memiliki tingkat isolasi yang lebih baik jika dibandingkan dengan udara bebas. Salah satu parameter yang dapat menunjukkan baik buruknya tingkat isolasi suatu bahan adalah tegangan tembusnya.



Gambar 2.13

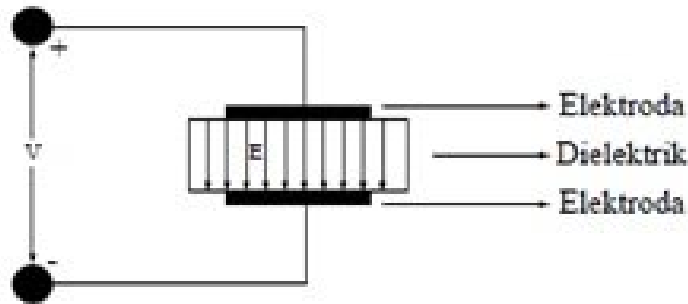
Untuk memastikan kelayakan tegangan tembus dari minyak trafo tersebut, harus dilakukan pengujian. Pengujian tegangan tembus minyak ini dilakukan dengan

memberi tegangan tinggi AC. Untuk membangkitkan tegangan tinggi arus bolak balik, trafo uji yang digunakan adalah trafo satu fasa. Hal ini disebabkan karena pengujian biasanya dilakukan untuk setiap fasanya.



Gambar 2.14

Suatu bahan dielektrik tidak mempunyai elektron-elektron bebas, melainkan elektron – elektron yang terikat dengan inti atom unsur dielektrik tersebut. Misalnya suatu dielektrik ditempatkan diantara dua elektroda kemudian elektroda diberi tegangan, maka akan timbul medan listrik di dalam dielektrik. Medan listrik ini akan memberi gaya kepada elektron-elektron agar terlepas dari ikatannya dan menjadi elektron bebas. Maka dapat dikatakan bahwa medan listrik merupakan suatu beban yang menekan dielektrik agar berubah sifat menjadi konduktor.



Gambar 2.15

Beban yang dipikul dielektrik disebut juga terpaan medan listrik. Setiap dielektrik mempunyai batas kekuatan untuk memikul terpaan listrik. Jika terpaan listrik yang dipikulnya melebihi batas tersebut dan terpaan berlangsung lama, maka dielektrik akan menghantar arus atau gagal melaksanakan fungsinya sebagai isolator. Dalam hal ini dielektrik mengalami tembus listrik atau “breakdown”.

Karakteristik pada isolasi cair akan berubah jika terjadi ketidakmurnian di dalamnya. Hal ini akan mempercepat terjadinya proses kegagalan. Faktor-faktor yang mempengaruhi kegagalan isolasi antara lain adanya partikel padat, uap air dan gelembung gas. Teori kegagalan zat isolasi cair dapat dibagi menjadi empat jenis sebagai berikut :

a. Teori Kegagalan Zat Murni atau Elektronik

Teori ini merupakan perluasan teori kegagalan dalam gas, artinya proses kegagalan yang terjadi dalam zat cair dianggap serupa dengan yang terjadi dalam gas. Oleh karena itu supaya terjadi kegagalan diperlukan elektron awal yang dimasukkan ke dalam zat cair. Elektron awal inilah yang akan memulai proses kegagalan.



b. Teori Kegagalan Gelembung Gas

Kegagalan gelembung atau kavitasi merupakan bentuk kegagalan yang disebabkan oleh adanya gelembung-gelembung gas didalam isolasi cair. Gelembung-gelembung udara yang ada dalam cairan tersebut akan memanjang searah dengan medan. Hal ini disebabkan karena gelembung-gelembung tersebut berusaha membuat energi potensialnya minimum.

Gelembung gelembung yang memanjang tersebut kemudian akan saling sambung-menyambung dan membentuk jembatan yang akhirnya akan mengawali proses kegagalan.

c. Teori Kegagalan Bola Cair

Jika suatu zat isolasi mengandung sebuah bola cair dari jenis cairan lain, maka dapat terjadi kegagalan akibat ketidakstabilan bola cair tersebut dalam medan listrik. Medan listrik akan menyebabkan tetesan bola cair yang tertahan di dalam minyak yang memanjang searah medan dan pada medan yang kritis tetesan ini menjadi tidak stabil. Setelah menjadi tidak stabil bola air akan memanjang, dan bila panjangnya telah mencapai dua pertiga celah elektroda maka saluran - saluran lucutan akan timbul sehingga kemudian kegagalan total akan terjadi.

d. Teori Kegagalan Tak murnian Padat

Kegagalan tak murnian padat adalah jenis kegagalan yang disebabkan oleh adanya butiran zat padat (partikel) di dalam isolasi cair yang akan memulai terjadi kegagalan.

e. Jenis Minyak Trafo

Jenis – jenis minyak yang dapat digunakan untuk bahan isolasi terdiri dari :

1. Minyak isolasi Dari Bahan Olahan Bumi, terdiri dari :
 - Minyak Isolasi Mineral

Minyak isolasi mineral adalah minyak yang berasal dari minyak bumi yang diproses secara fraksinasi dan destilasi. Biasanya digunakan pada peralatan tegangan



tinggi seperti trafo daya, kapasitor daya, kabel daya, dan Circuit breaker (Pemutus Daya). Minyak isolasi ini berfungsi sebagai bahan dielektrik dan media pemadaman busur api.

- Minyak Isolasi Sintesis

Minyak isolasi sintesis adalah minyak isolasi yang diproses secara kimia untuk mendapatkan karakteristik yang lebih baik dari minyak isolasi mineral. Berikut ini beberapa contoh dari minyak isolasi sintesis adalah askarel, silikon cair, fluorinasi cair, ester sintesis.

2. Minyak Isolasi Dari Bahan Olahan Nabati, contohnya :

- Minyak jarak
- Minyak kelapa murni (VCO)
- Minyak kelapa sawit (CPO)
- Minyak kedelai
- Minyak jagung

Untuk mengetahui sampel minyak masih dalam keadaan baik maka dibutuhkan perbandingan hasil uji dengan suatu standarisasi. Standarisasi yang digunakan untuk minyak trafo adalah Standar IEC 156 yang dapat terlihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 2.2 Standar Pengujian Minyak Trafo

Tegangan Operasi Trafo (kV)	Jarak Gap (mm)	Nilai Minimum (kV)
$Un \leq 36$	2,5	30
$36 < Un \leq 70$	2,5	35
$70 < Un \leq 170$	2,5	40
$170 < Un$	2,5	45

Standar yang biasa digunakan di lapangan adalah untuk trafo yang sudah dipakai adalah 40 kV / 2,5 mm dan minyak baru adalah 50 kV / 2,5 mm.

2.11 Gas-gas Terlarut dalam Minyak Transformator

Minyak trafo merupakan sebuah campuran kompleks dari molekul-molekul hidrokarbon, dimana merupakan hasil tambang (minyak tambang) yang mengandung kelompok molekul CH₃, CH₂ dan CH yang terikat. Terjadinya kegagalan termal ataupun elektrik pada transformator mengakibatkan pemecahan beberapa ikatan unsur hidrokarbon yang nantinya akan berkombinasi dan menghasilkan molekul-molekul gas mudah terbakar (*combustible gas*) yang dikenal dengan istilah *fault gas*. Gas-gas tersebut adalah

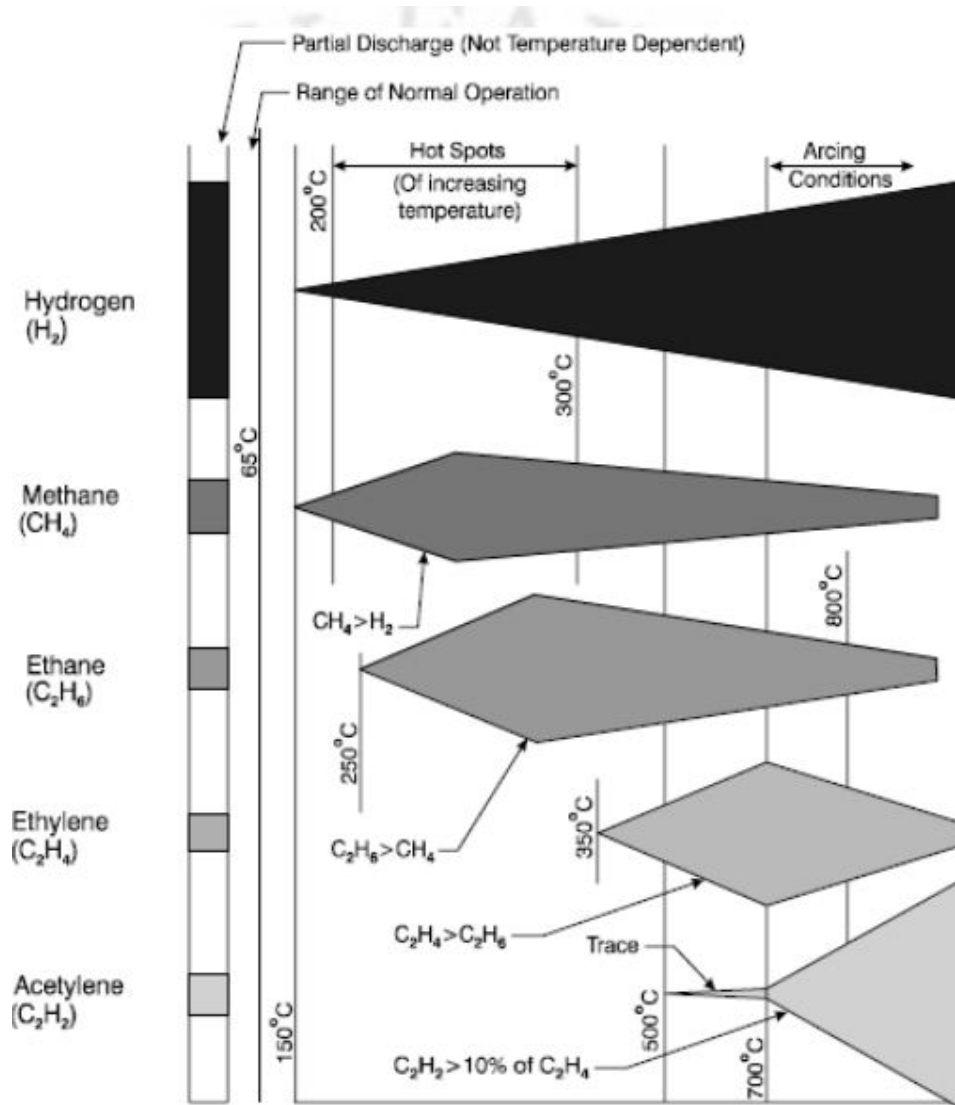
Tabel 2.3 Kandungan unsur kimia pada minyak trafo

Mineral Oil	$\left. \begin{array}{cccccccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & & & & & \\ -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}-\text{H} \\ & & & & & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} \right\} \text{C}_n\text{H}_{2n+2}$	Ethylene	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} & = & \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array}$	C ₂ H ₄	
Hydrogen	H-H	H ₂	Acetylene	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} & = & \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array}$	C ₂ H ₂
Methane	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$	CH ₄	Carbon Dioxide	O=C=O	CO ₂
			Carbon Monoxide	C≡O	CO
Ethane	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{H}-\text{C} & - & \text{C}-\text{H} \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array}$	C ₂ H ₆	Oxygen	O=O	O ₂
			Nitrogen	N≡N	N ₂

Gas-gas tersebut sangatlah berbahaya apabila terkandung dalam jumlah yang banyak. Mengingat gas-gas tersebut mudah terbakar, apabila timbul percikan (misal *patrial discharge*) maka akan terjadi pembakaran yang dapat membahayakan trafo.

Semakin banyak jumlah ikatan karbon maka semakin banyak energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan gas-gas tersebut. Gas Hidrogen (H_2), Metana (CH_4) dan Etana (C_2H_6) terbentuk oleh fenomena kegagalan tingkat energi yang rendah, seperti *partial discharge* atau *corona*. Etilen (C_2H_4) terbentuk oleh pemanasan minyak pada temperatur menengah, dan Asetilen (C_2H_2) terbentuk pada temperatur yang sangat tinggi.

Gambar berikut menjelaskan jenis gas-gas yang timbul dan jumlah relatifnya yang terbentuk saat kenaikan temperatur.



Gambar 2.16



Gas Hidrogen dan Metana mulai terbentuk pada temperatur sekitar 150° C. Gas Etana mulai terbentuk pada temperatur sekitar 250° C dan gas Etilen terbentuk pada temperatur 350° C. Setelah melewati titik maksimumnya maka pembentukan metana, etana dan etilen akan terus menurun seiring bertambahnya temperatur. Gas Asetilen merupakan indikator adanya daerah dengan temperatur paling tidak 700° C. Pada beberapa kasus kegagalan termal (*hot spot*) dengan temperatur 500° C ternyata juga memacu pembentukan gas asetilen walaupun jumlahnya sedikit. Gas asetilen dalam jumlah besar dihasilkan jika temperatur di atas 700° C yang biasanya disebabkan karena busur api (*arcing*).

Gas etana dan etilen sering disebut sebagai "gas logam panas" (*hot metal gases*). Biasanya saat ditemukan adanya gas tersebut maka permasalahan yang timbul di dalam trafo umumnya melibatkan logam panas. Hal ini mungkin terjadi akibat adanya kontak yang buruk pada *tap changer* atau sambungan yang buruk pada suatu titik pada rangkaian di dalam trafo. Fluks magnetis bocor yang mengenai tangki transformator atau struktur magnetis lainnya juga memicu pembentukan gas tersebut. Penyebab lainnya adalah kerusakan pada rangkaian *grounding* sehingga muncul arus lebih yang bersikulasi karena tidak disalurkan ke tanah.

Material isolasi kertas biasanya merupakan substansi polimer yang struktur kimianya $[C_{12}H_{14}O_4(OH)_6]_n$ dengan nilai n antara 300 sampai 750. Umumnya berbentuk siklis yang mengandung senyawa CH_2 , CH dan CO . Ikatan molekul C-O merupakan ikatan yang lemah, sehingga menghasilkan komponen pembentuk *fault gas* pada temperatur 100° C dan karbonasi sempurna dari isolasi kertas pada temperatur 300° C. CO_2 terbentuk pada temperatur rendah, sedangkan CO mulai terbentuk pada temperatur $\geq 200^\circ C$.



Mengidentifikasi serta menganalisis jenis dan jumlah *fault gas* pada transformator merupakan hal yang sangat penting karena jenis *fault gas* menunjukkan pemicu atau jenis kegagalan yang muncul sedangkan jumlah konsentrasi gas tersebut menunjukkan seberapa parah kegagalan tersebut.

Metode untuk mengetahui dan menginterpretasi jenis-jenis kegagalan yang terjadi berdasarkan jumlah *fault gas* yaitu dengan metode *Dissolve Gas Analysis*.

Tabel 2.4 klasifikasi minyak trafo standard ASTM standard

No	TEST ITEM	ASTM Std	ACCEPTABLE	QUESTIONABLE	UN ACCEPTABLE
1	ACID	D 974	$\leq 0,5$	0,60-0,10	$> 0,10$
2	IFT	D 971	$\geq 32,0$	28,0-31,9	$< 27,90$
3	Dielectric str	D 877	≥ 40	25 - 29	< 25
4	Colour	D 1524	$\leq 3,50$	-	$> 3,50$
5	Spesific grv	D 1298	0,84-0,91	$< 0,84$	$> 0,91$
6	Visual	D 1524	Clear	Tea	Dark
7	DBPC	D 2668	$\geq 0,20$	0,19-0,11	$\leq 0,10$
8	Power Factor	D 924	25°c $< 0,1$ 100°c $< 2,99$	0,1-0,3 3,0-3,99	$> 3,0$ $> 4,0$
9					
10	Karl Fisher	D 1533	69KV ≤ 30 69-288KV ≤ 30 > 345 KV ≤ 15	30 - 34,9 20 - 24,9 15 - 19,9	≥ 35 ≥ 25 ≥ 20
11	Gas Content	D 3612	**	**	**
12	ICP		**	**	**
13	Metal Content		< 100		101 - 249
14	Furan (Optional)	D 5837	≤ 100	101 - 249	> 250
15	PCB	D 4059	≥ 140 °c		
16	Flash Point	D 72	≤ -40 °c		
17	Pour Point	D 97	12,00		
18	Viscosity	D 88	0,30		
19	Inhibitor (%)	D 2668	35		
20	Water (ppm)	D 1533			



2.12 Pengujian Kualitas Isolasi Trafo

Peralatan trafo tenaga merupakan bagian penting dalam jaringan tenaga listrik. Peralatan ini perlu untuk dijaga kondisinya agar dapat beroperasi optimal. Salah satu bagian penting yang dapat menggambarkan kondisi trafo secara keseluruhan adalah peralatan isolasi. Peralatan isolasi trafo terdiri dari isolasi cair (minyak) dan isolasi padat (kertas). Saat ini PT PLN telah melakukan beberapa pengujian untuk mengetahui kualitas isolasi trafo, yaitu :

a. Tegangan Tembus Minyak (Breakdown Voltage)

Merupakan pengujian untuk mengetahui pada tegangan berapa isolasi minyak trafo mengalami breakdown. Metode pengujian yang dapat dilakukan antara lain ASTM D-1816 dan ASTM D-877. Standar nilai hasil pengujian untuk kedua metode tersebut adalah [1]:

Tabel 2.5 Standar hasil pengujian kekuatan dielektrik

Metode	<68 kV	69 s/d 288 kV	>288 kV
ASTM D-1816 (1 mm)	23	26	26
ASTM D - 877 (1 mm)	26	30	30

Semakin tinggi nilai hasil pengujian tegangan tembus minyak, maka kekuatan isolasi minyak juga akan semakin tinggi. Tegangan tembus minyak mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya partikel-partikel hasil oksidasi dan kandungan air dalam minyak. Dalam membuat analisa kondisi isolasi, selain hasil pengujian kekuatan dielektrik harus diperhatikan juga kandungan air dan oksigen. Kombinasi antara dua zat ini dengan energi panas akan mengakibatkan kerusakan pada isolasi kertas sebelum nilai kekuatan dielektrik di bawah standar.



b. Tegangan Antar Permukaan (Interfacial Tension / IFT)

Adalah pengukuran tegangan antar permukaan minyak dengan air. Nilai IFT adalah besarnya daya yang dibutuhkan untuk menarik sebuah cincin kecil ke atas sejauh 1 cm melalui permukaan antara air dan minyak (ASTM D-971). Minyak yang bagus (baru) mempunyai nilai IFT antara 40 – 50 dyne/cm. Nilai IFT dipengaruhi oleh banyaknya partikel-partikel kecil hasil oksidasi minyak dan kertas. Oksidasi akan menghasilkan air dalam minyak, meningkatkan nilai keasaman minyak dan pada kondisi tertentu akan menyebabkan pengendapan(sludge). Standar hasil pengujian IFT menggunakan metode ASTM D-971 [7] adalah sebagai berikut

Tabel 2.6 Standar ASTMD-971

IFT	<69 kV	69 – 288 kV	288 kV
ASTM D-971	24	26	30

Minyak harus di reklamasi ketika nilai IFT mencapai 25 dyne/cm. Pada kondisi ini, minyak sudah banyak mengandung kontaminasi hasil oksidasi dan akan terjadi pengendapan.

c. Kandungan air dalam minyak (Water content)

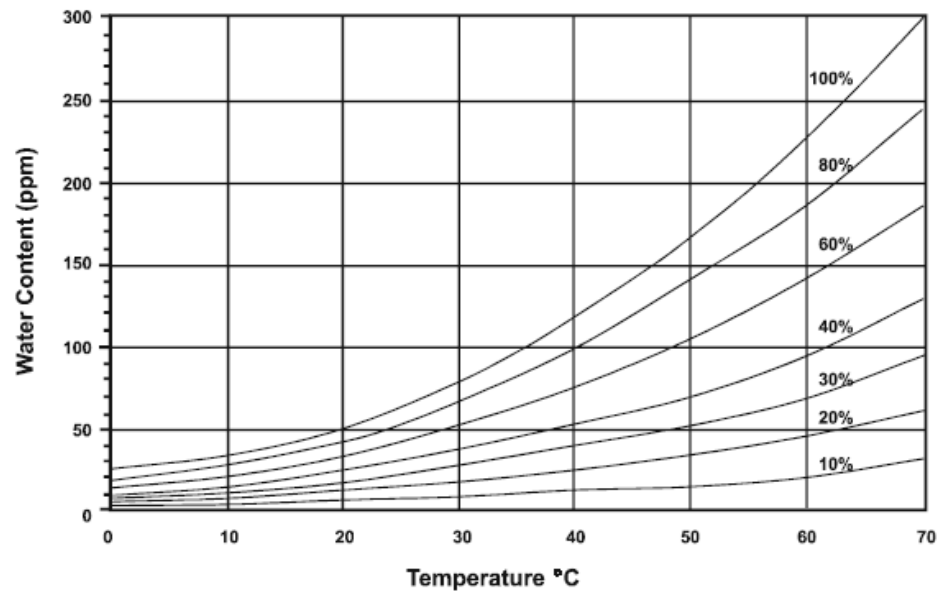
Salah satu hal yang membahayakan trafo adalah kandungan air. Kandungan air dan oksigen yang tinggi akan mengakibatkan korosi, menghasilkan asam, endapan dan cepat menurunkan usia trafo. Dari hasil penelitian EPRI diperoleh bahwa setiap peningkatan kandungan air 2 kali lipat pada temperatur yang sama akan menurunkan usia isolasi menjadi 0.5 kali. Kandungan air dalam trafo dapat berasal dari udara saat trafo dibuka untuk keperluan inspeksi, dan apabila terjadi kebocoran maka uap air akan masuk ke dalam trafo karena perbedaan tekanan parsial uap air.

Standar hasil pengujian kandungan air dalam minyak menggunakan metode ASTM D-1533 [2] adalah sebagai berikut :

Tabel 2.7 Standar hasil pengujian kandungan air dalam minyak

Kandungan Air	<69 kV	69 – 288 kV	288 kV
ASTM D-1533	35	25	20

Nilai diatas tidak sepenuhnya menjamin kondisi isolasi trafo. Karena kandungan air dalam minyak akan sangat berbahaya apabila mencapai 30% saturasi air dan minyak harus direklamasi. Untuk itu pada waktu pengambilan sampel minyak untuk pengujian kandungan air harus dicatat temperatur minyak trafo. Temperatur ini sangat diperlukan pada waktu melakukan analisa. Prosentase saturasi air dalam minyak dapat dilihat pada gambar berikut [3]:



Prosentase saturasi air dalam minyak

Selain itu, kandungan air dalam minyak dapat digunakan untuk memperkirakan jumlah kandungan air dalam kertas [1].



Tabel 2.8 Perbandingan distribusi air dalam minyak dan kertas

Temperatur (°C)	Air dalam minyak	Air dalam kertas
20	1	3000
40	1	1000
60	1	300

Kandungan air pada kertas terutama terkumpul pada sepertiga belitan bagian bawah dimana suhu minyak rendah. Hal ini akan memungkinkan terjadinya flashover antar belitan.

d. Angka kenetralan (Neutralization Number / NN)

Merupakan jumlah kalium hidroksida (KOH) yang dibutuhkan (dalam mg) untuk menetralkan 1 gram minyak sample. Semakin banyak KOH yang dibutuhkan, maka semakin asam minyak dan semakin besar pula angka kenetralannya. Proses oksidasi pada kertas dan minyak akan menghasilkan asam. Kandungan asam dalam minyak mempercepat penurunan kondisi minyak dan kertas, yaitu :

- asam akan membentuk lebih banyak asam dari minyak dan kertas
- bereaksi dengan kertas menghasilkan air
- asam bersifat korosif terhadap logam dan akan membentuk lebih banyak partikel-partikel logam pada belitan dan bagian bawah tangki minyak.

Standar hasil pengujian angka kenetralan minyak dengan metode pengujian ASTM D-974 [7] adalah sebagai berikut :

Tabel 2.9 Standar hasil pengujian angka keasaman

Metode	<68 kV	69 s/d 288 kV	>288 kV
ASTM D 974	0.2	0.2	0.1



Berdasarkan hasil pengujian IFT dengan NN, dapat dibuat analisa lebih lanjut dengan membandingkan nilai keduanya [7]:

Tabel 2.10 Nilai perbandingan IFT dengan NN

Kondisi Minyak	IFT	NN	IFT / NN
Bagus	30,0 – 45,0	0,00 – 0,10	300 – 1500
Proporsional A	27,1 – 29,9	0,05 – 0,10	271 – 600
Marginal	24,0 – 27,0	0,11 – 0,15	160 – 318
Jelek	18,0 – 23,9	0,16 – 0,40	45 – 159
Sangat jelek	14,0 – 17,9	0,41 – 0,65	22 – 44
Sangat sangat jelek	9,00 – 13,9	0,66 – 1,50	6 – 21
Rusak		> 1,51	

Dari hasil perbandingan di atas, apabila hasil pengujian IFT : 29,2 dyne/cm, NN : 0,3 dan IFT / NN : 96 maka minyak diklasifikasikan ke dalam kondisi jelek.

e. Flash point

Temperatur minimum dimana minyak menghasilkan uap yang cukup untuk dibakar bersama udara. Flash point merupakan indikator ketidakstabilan minyak. Minyak yang bagus mempunyai nilai flash point tinggi, nilai standar berdasarkan metode pengujian ASTM D-92 adalah 150°C dan akan terus berkurang apabila kandungan air, oksigen, gas-gas terlarut meningkat dan ikatan rantai karbon minyak berkurang.



f. Warna

Untuk mendeteksi kecepatan penurunan atau kontaminasi yang serius. Nilai standar berdasarkan metode pengujian ASTM D-1500 adalah <3,5. Hasil pengujian yang tinggi menggambarkan adanya karbon, partikel isolasi dan material terlarut lainnya. Karbon terbentuk pada waktu timbul partial discharge maupun arcing. partikel-partikel dapat berupa furan maupun hasil oksidasi.

g. Sludge.

Sludge dihasilkan oleh adanya oksigen dan kandungan air dalam minyak trafo. Sludge terutama terjadi pada belitan trafo bagian bawah dan terus meningkat. Sludge akan mengakibatkan suhu trafo naik pada beban yang dan hasil pengujian IFT akan mengalami penurunan.

Selain 7 macam pengujian di atas, ada beberapa pengujian on-line yang dapat dilakukan untuk memperkirakan kondisi kertas, yaitu:

a. Rasio CO/CO₂

Jumlah gas CO₂ dan CO dalam trafo meningkat seiring dengan peningkatan suhu operasi trafo. Berdasarkan hasil pengujian DGA menurut standar IEEE C57.104 [4], akumulasi gas CO₂ dan CO menggambarkan kondisi kertas yang dibedakan ke dalam 4 status seperti pada tabel berikut :

Tabel 2.11 Akumulasi gas CO₂ dan CO

	CO ₂ (ppm)	CO (ppm)
Kondisi 1	0 - 2500	0 - 350
Kondisi 2	2501 – 4.000	351 - 570
Kondisi 3	4001 – 10.000	571 – 1.400
Kondisi 4	> 10.000	> 1.400

Kondisi 1 adalah kondisi normal operasi sedangkan kondisi 4 kertas sudah mendekati kerusakan.



Apabila salah satu atau kedua gas telah mencapai kondisi 2 atau 3, maka rasio peningkatan jumlah CO_2/CO sangat membantu dalam menentukan kondisi isolasi padat. Pada trafo yang beroperasi pada beban dan suhu normal, hasil pengujian rasio pertambahan gas CO_2 akan 7 sampai 20 kali lebih besar dibanding CO . Kondisi normal ini dapat dipertimbangkan untuk ratio pertambahan mencapai 5. Apabila rasio kurang dari 5 disertai dengan pertambahan gas H_2 , CH_4 , C_2H_6 maka ada kemungkinan terjadi masalah di dalam trafo dan kertas mengalami penurunan kondisi yang cepat apabila rasio CO_2/CO kurang dari 3. Pada kondisi ini trafo mendekati kerusakan sehingga perlu dilakukan inspeksi internal pada isolasi kertas.

b. Furan

Pengujian furan dapat dilakukan apabila hasil pengujian rasio pertambahan CO_2/CO bernilai 3 atau kurang. Furan adalah molekul organik yang dihasilkan dari penurunan isolasi kertas akibat pemanasan berlebih, oksidasi dan asam. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian untuk 5 macam furan yang disebabkan oleh hal, yaitu :

- 5H2F (5 hidroksimetil 2 furaldehid) yang disebabkan oleh oksidasi
- 2FOL (2 fulfuro) disebabkan kandungan air yang tinggi pada kertas
- 2FAL (2 furaldehid) disebabkan oleh pemanasan berlebih
- 2ACF (2 Asetilfuran) disebabkan oleh petir
- 5M2F (5 Metil 2 Furaldehid) disebabkan oleh hotspot pada belitan.

Pada isolasi yang bagus, seharusnya jumlah keseluruhan furan yang terdeteksi kurang dari 100 ppb. Jika terjadi kerusakan pada kertas, maka hasil uji furan akan lebih dari 100 ppb sampai 70.000 ppb. Minyak harus direklamasi jika jumlah furan melebihi 250 ppb, karena kertas telah mengalami penurunan kondisi dan usia trafo berkurang. Hasil pengujian furan ini dikorelasikan dengan hasil pengujian IFT dan keasaman. Asam menyerang isolasi kertas menghasilkan furan dan akan menyebabkan IFT turun. Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik, analisa hasil pengujian dilakukan berdasarkan pada tren hasil pengujian bukan pada 1 hasil pengujian saja.



Hal yang perlu diperhatikan dalam menjaga kondisi isolasi trafo adalah kandungan gas oksigen. Gas ini sangat berbahaya karena menimbulkan oksidasi di dalam trafo. Oksigen di dalam minyak berasal dari adanya kebocoran dan penurunan kondisi isolasi. Beberapa ahli dan organisasi termasuk EPRI meyakini bahwa kandungan oksigen dalam lebih dari 2000 ppm akan mempercepat pemburukan kondisi kertas. Minyak harus di-treatment apabila kandungan oksigen mencapai 10.000 ppm.

Sifat-sifat minyak trafo sebelum dan sesudah diolah

Minyak trafo yang berkadar asam tinggi

Kadar asam : 1.00 mg/KOH/gr minyak

Tegangan tembus : 80 KV/cm

Kadar air : 0,05 %

Kadar kotoran : 1,10 %

Viskositas : 30 milipoises

Warna : coklat, merah, hitam

Bau : sangat merangsang

Minyak trafo setelah diolah dengan reaktor

Kadar asam : 0,03 mg/KOH/gr minyak

Tegangan tembus : 180 KV/cm

Kadar air : 0,00 %

Kadar kotoran : 0,00 %

Viskositas : 19,24 milipoises

Warna : kuning, merah



Bau : tak berbau

Minyak trafo yang baru

Kadar asam : 0,03 mg/KOH/gr minyak

Tegangan tembus : 200 KV/cm

Kadar air : 0,00 %

Kadar kotoran : 0,00 %

Viskositas : 18,45 milipoises

Warna : tak berwarna, kuning muda

Bau : tak berbau

Dielektrik berdasarkan standar ≥ 40 kV / 2.5 mm (IEC 156)