

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

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

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

Beberapa penelitian yang sudah ada dan berhubungan dengan pengujian DGA (*Dissolved Gas Analysis*) minyak transformator :

Roberto, (2014) melakukan penelitian tentang **Analisis Kegagalan Transformator Daya Berdasarkan Hasil Uji Dengan Metode TDGC, Key Gas, Roger's Ratio, Pada Gardu Induk**

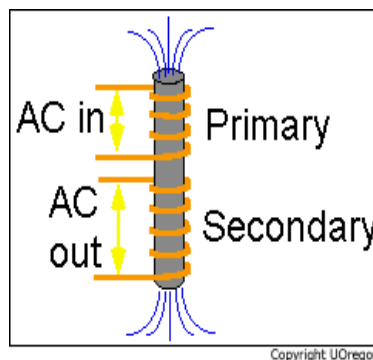
Faishal, (2011) melakukan penelitian tentang **Analisis Indikasi Kegagalan Transformator Dengan Metode *Dissolved Gas Analysis***

Eranto, Aditya 2009, melakukan **Analisis DGA (*Dissolved Gas Analysis*) Untuk Menganalisis Gas-Gas Terlarut Dalam Minyak Transformator Dan Akan Mendiagnosa Kemungkinan Gangguan Yang Terjadi Di Internal Transformator Tenaga , Transformator 1 GI Banyuwangi**. Dengan menggunakan metode DGA maka dapat diketahui bahwa sampel minyak transformator 1 GI Banyuwangi mengalami peningkatan konsentrasi gas dalam ppm yang signifikan, sehingga mengindikasikan gangguan yang cukup besar. Analisis gangguan yang dilakukan pada akhirnya akan digunakan untuk melakukan pemeliharaan

2.2 Landasan Teori

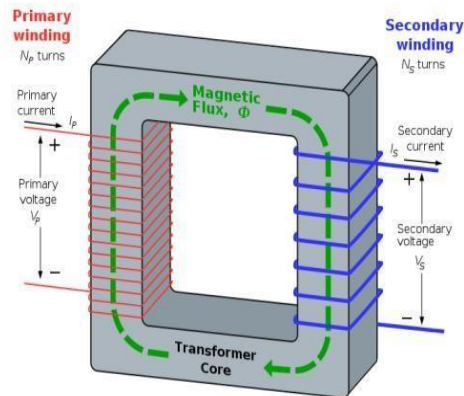
2.2.1 Transformator

Transformator merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya/tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Transformator menggunakan prinsip hukum induksi *faraday* dan hukum *Lorentz* dalam menyalurkan daya. Dimana arus bolak balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet. Dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial.



Gambar 2.1. Arus bolak balik mengelilingi inti besi

Arus yang mengalir pada belitan primer akan menginduksi inti besi transformator sehingga didalam inti besi akan mengalir fluks magnet dan fluks magnet ini akan menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial.

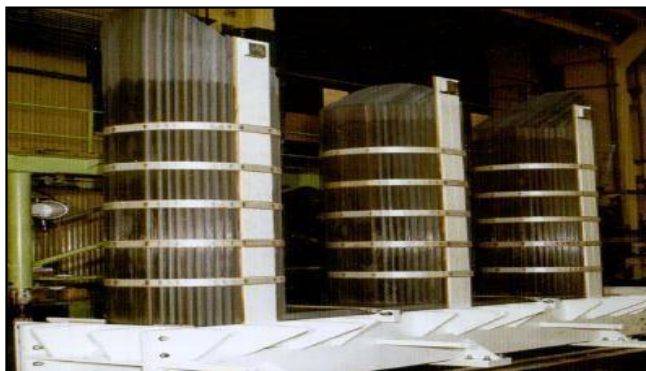


Gambar 2.2. Prinsip kerja transformator

1. Bagian-bagian transformator dan fungsinya antara lain:

a. Inti besi (*electromagnetic circuit*)

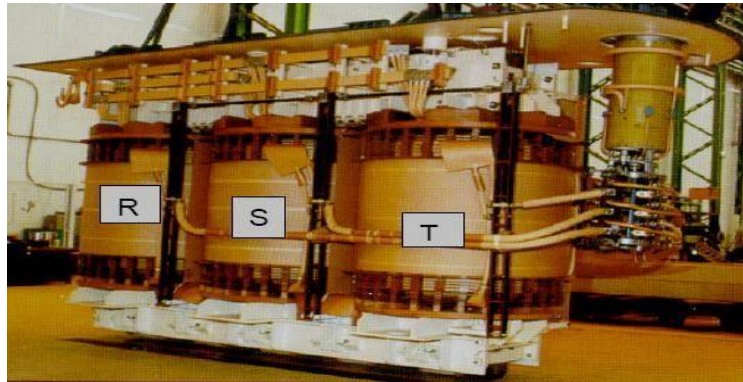
Inti besi digunakan sebagai media jalannya fluks yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan – lempengan besi tipis berisolasi yang disusun sedemikian rupa.



Gambar 2.3. Inti besi

b. Winding

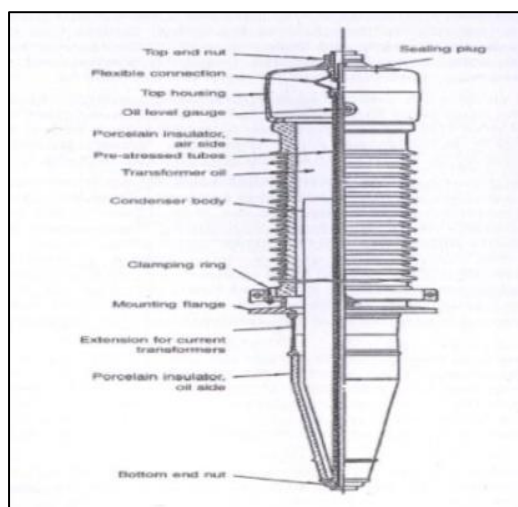
Belitan terdiri dari batang tembaga berisolasi yang mengelilingi inti besi, dimana saat arus bolak balik mengalir pada belitan tembaga tersebut. Inti besi akan terinduksi dan menimbulkan fluks magnetik.



Gambar 2.4. Belitan trafo

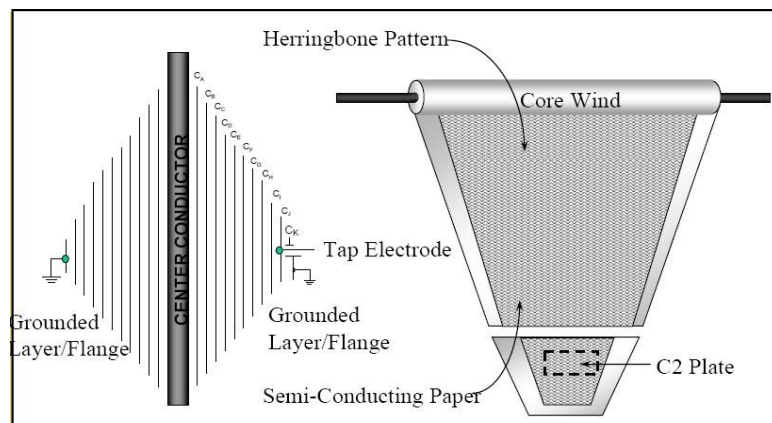
c. Bushing

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 2.5. Bagian – bagian dari bushing

Secara garis besar bushing dapat dibagi menjadi empat bagian utama yaitu isolasi, konduktor, klem koneksi, dan aksesoris. Isolasi pada bushing terdiri dari dua jenis yaitu *oil impregnated paper* dan *resin impregnated paper*. Pada tipe *oil impregnated paper* isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi dan minyak isolasi sedangkan pada tipe *resin impregnated paper* isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi dan resin.



Gambar 2.6. Kertas Isolasi Pada Bushing
(*Oil Impregnated Paper Bushing*)



Gambar 2.7. Contoh kertas isolasi pada bushing
(*oil impregnated paper bushing*)

d. Pendingin

Suhu pada transformator yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan. Losses pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada transformator. Oleh karena itu pendinginan yang efektif sangat diperlukan.

Minyak isolasi transformator 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 pendingin 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			



Gambar 2.8. Radiator

2.3 Minyak Trafo

Sebuah transformator terdapat dua komponen yang secara aktif membangkitkan energi panas yaitu besi (inti) dan tembaga (kumparan), bila energi panas itu tidak disalurkan melalui sistem pendingin akan mengakibatkan baik besi maupun tembaga akan mencapai suhu yang tinggi, yang akan merusak nilai isolasinya. Kegunaan minyak trafo adalah selalin untuk bahan isolasi juga sebagai media pendingin antara kumparan kawat atau inti besi dengan sirip pendingin. Agar minyak trafo berfungsi dengan baik, kualitas minyak harus sesuai dengan standar kebutuhan. Minyak trafo yang digunakan bukan sembarang minyak biasa, dan mempunyai sifat-sifat sebagai berikut, yaitu:

1. Bebas dari asam alkali dan campuran belerang untuk mencegah karat dari tembaga dan kerusakan pada isolasi
2. Viskositas yang rendah, sehingga dapat bersirkulasi dengan baik dan akhirnya pendingin inti dan belitan transformator dapat berlangsung dengan baik pula.
3. Titik beku yang rendah sehingga tetap berbentuk cair pada cuaca yang dingin
4. Bebas dari terbentuknya endapan (*sediment*) pada kondisi operasi normal

2.3.1 Jenis Isolasi Minyak Trafo

Minyak isolasi terdiri dari beberapa jenis, baik dari segi pembuatannya maupun dari jenis bahannya. Pembagian dari jenis minyak isolasi ditentukan berdasarkan bahan dan cara pembuatannya. Pada saat ini minyak isolasi yang sering digunakan adalah:

1. Minyak Isolasi mineral adalah minyak isolasi yang bahan dasarnya adalah dari minyak bumi (minyak mentah) yang diproses dengan cara destilasi. Minyak isolasi hasil destilasi ini masih harus dimodifikasi agar tahanan isolasinya tinggi, stabilitas panasnya baik, dan mempunyai karakteristik panas yang stabil serta memenuhi syarat – syarat teknis yang lain. Minyak isolasi mineral banyak digunakan pada transformator daya, kabel, pemutus tenaga (CB), dan kapasitor. Dalam hal ini minyak isolasi dapat berfungsi sebagai bahan dielektrik, sebagai bahan pendingin (penyerap panas) dan sebagai pemadam busur api. Minyak isolasi mineral transformator terdiri dari beberapa jenis yaitu:

- a. *Diala C, B (USA)*
- b. *Univolt (Esso)*
- c. *Nynas (Swedia)*
- d. *Mictrans (Jepang)*
- e. *Sun Ohm-MU (Korea)*
- f. *Petromin (Dubai)*
- g. *BP-Energol (UK)*

Dari beberapa jenis minyak yang di atas umumnya yang digunakan adalah jenis minyak jenis Diala B, C.

2. Minyak isolasi sintesis adalah jenis minyak isolasi yang diolah dengan proses kimia yang tepat untuk mendapatkan karakteristik yang lebih baik dan digunakan pada pemakaian yang lebih khusus, Minyak isolasi sintesis terdiri dari beberapa jenis yaitu :

- a. *Aroclor (USA)*

- b. Clopen (Jerman)
- c. Phenoclor (Perancis)
- d. Pyroclor (UK)
- e. Fenclor (Itali)
- f. Pyralene (Perancis)
- g. Pyranol (USA)

2.3.2 Syarat-syarat Minyak Transformator

Adapun persyaratan yang harus dipenuhi oleh minyak transformator menurut SPLN 49 – 91 : 1982 adalah sebagai berikut :

1. Kejernihan

Minyak isolasi tidak boleh mengandung *suspense* atau endapan, dimana warna dapat dilihat dari kejernihan minyak tersebut. Semakin buram warna minyak maka semakin banyak kadar endapan didalam minyak tersebut

2. Massa jenis

Nilai massa jenis minyak tidak boleh melebihi 0,859 g/cm³ pada suhu 20⁰C

3. Viskositas kinematik

Viskositas atau biasa disebut kekentalan sangat penting pada isolasi cair. Hal ini dikarenakan viskositas berpengaruh pada kemurnian isolasi cair (banyaknya kontaminan partikel padat) dan pendinginan suatu peralatan listrik. Isolasi cair yang baik haruslah mempunyai viskositas yang rendah sehingga kemungkinan isolasi cair terkontaminasi akan kecil. Selain itu jika *viskositas* isolasi cair rendah, proses sirkulasi isolasi cair pada peralatan listrik akan berlangsung dengan baik sehingga akhirnya pendinginan inti dan belitan transformator dapat berlangsung dengan sempurna.

Viskositas juga memegang peranan dalam menentukan kelas minyak *viskositas kinematic* tidak boleh melebihi batas.

Tabel 2.2 Nilai *Viskositas Kinematik* Berdasarkan Kelas Minyak

Suhu	Kelas 1	Kelas 2
20 °C	40 cSt	25 cSt
-15 °C	800 cSt	-
-30 °C	-	1800 cSt

4. Titik Nyala

Titik nyala juga tergantung dari kelas minyaknya, berikut nilai titik nyala dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

Tabel 2.3 Nilai *Flash Point Minimum* Berdasarkan Kelas Minyak

Kelas	Flash Point Minimum
Kelas I	140
Kelas II	130

5. Titik Tuang

Minyak dengan titik tuang yang rendah akan berhenti mengalir pada suhu yang rendah. Titik tuang digunakan untuk mengidentifikasi dan menentukan jenis peralatan yang akan menggunakan minyak isolasi. Titik tuang juga bergantung pada kelas minyaknya, hal ini dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

Tabel 2.4 Nilai *Pour Point Minimum* Berdasarkan Kelas Minyak

Kelas Minyak	Pour Point Maksimum
Kelas I	-30 °C
Kelas II	-45 °C

6. Tegangan tembus

Tegangan tembus yang terlalu rendah menunjukkan adanya kontaminasi berupa air, kotoran atau partikel konduktif dalam minyak. Nilai tegangan tembus pada minyak baru minimal 30 kV

sebelum mengalami perawatan dan 50 kV setelah perawatan dengan jarak sela 2,5 mm.

7. Kandungan air

Adanya air dalam minyak isolasi akan menurunkan tegangan tembus dan tahanan jenis minyak isolasi dan juga adanya air akan mempercepat kerusakan kertas pengisolasi (*insulating paper*)

8. Angka kenetralan

Angka kenetralan merupakan harga yang menunjukkan penyusun asam minyak isolasi dan dapat mendeteksi kontaminasi minyak, menunjukkan kecenderungan perubahan kimia atau cacat atau indikasi perubahan kimia dalam bahan tambahan (*additive*). Angka kenetralan dapat dipakai sebagai petunjuk untuk menentukan apakah minyak sudah harus diganti atau diolah. Angka kenetralan tidak boleh melebihi dari 0,03 mg KOH/gr.

9. Faktor kebocoran dielektrik

Harga yang tinggi dari faktor ini menunjukkan adanya kontaminasi atau hasil kerusakan (*deterioration product*), misalnya air, hasil oksidasi, logam alkali, koloid bermuatan dan sebagainya. Nilai maksimal untuk faktor kebocoran dielektrik adalah 0,05%.

10. Korosi belerang

Pengujian ini menunjukkan adanya kemungkinan korosi yang dihasilkan dari adanya belerang yang tidak stabil dalam minyak isolasi

11. Tahanan Jenis

Tahanan jenis yang rendah menunjukkan terjadinya kontaminasi yang bersifat konduktif

12. Kandungan gas

Adanya gas terlarut dan gas bebas dalam minyak isolasi dapat digunakan untuk mengetahui kondisi transformator dalam keadaan operasi. Adanya gas seperti *hydrogen* (H₂), *metana*

(CH₄), *etana* (C₂H₆), *etilen* (C₂H₄) dan *asetilin* (C₂H₂) menunjukkan terjadinya dekomposisi minyak isolasi pada kondisi operasi, sedangkan adanya *karbon dioksida* (CO₂) dan *karbon monoksida* menunjukkan kerusakan pada beban isolasi.

2.3.3 Gas Terlarut Pada Minyak Transformator

Minyak transformator merupakan campuran kompleks dari mekul-mekul hidrokarbon yang mengandung kelompok mekul CH₃, CH₂ dan CH yang terikat. Pemecahan beberapa ikatan antara unsur C-H dan C-C sebagai akibat kegagalan termal ataupun elektris akan menghasilkan fragmen-fragmen ion seperti H, CH₃, CH₂, CH, dan C yang nantinya akan berkombinasi menghasilkan mekul-mekul gas seperti *hydrogen* (H-H), *metana* (CH₃-H), *etana* (CH₃-CH₃), *etilen* (CH₂=CH₂) ataupun *asitilen* (CH=CH). Gas-gas ini dikenal dengan istilah *fault gas*.

Tabel 2.5 Molekul Gas Hidrokarbon

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

Sebagian gas yang berasal dari minyak isolasi pada dasarnya mempunyai sifat yang mudah terbakar. Selama gas tersebut berada pada transformator yang sedang beroperasi maka jumlah gas akan terlarut dalam minyak sebagai gas terlarut (*dissolved gases*), sehingga akan menurunkan kualitas transformator. Padahal kualitas minyak adalah sangat penting dalam menjamin kelangsungan operasi suatu transformator dan umur dari transformator, tergantung dari umur isolasinya. Selain itu minyak transformator harus mempunyai sifat melarutkan gas-gas terutama gas-gas yang mudah terbakar. Hal ini dimaksudkan untuk mencegah terjadinya kebakaran.

Penyebab utama terbentuknya gas-gas dalam kondisi operasi transformator adalah adanya gangguan seperti :

1. *Thermal Degradation*

Indikasi gas yang terjadi pada gangguan ini adalah terbentuknya gas *Etilen* (C_2H_4), *Metana* (CH_4), *Hidrogen* (H_2), *Etana* (C_2H_6). Kegagalan pada temperatur rendah memerlukan area yang luas sehingga menimbulkan gas-gas tersebut. Dan pada temperatur rendah ini proses pilorisis pada minyak transformator akan membebaskan gas terutama metana dan etana dan sejumlah kecil gas etilen dan hidrogen. Sedangkan kegagalan gas karena temperatur tinggi ditunjukkan dengan adanya gas *etilen* (C_2H_4) sebagai gas yang paling dominan.

2. *Arching*

Indikasi gas yang terbentuk pada gangguan ini adalah terbentuknya gas *Hidrogen* (H_2) dan *Asitilen* (C_2H_2). Tembusnya isolasi minyak akibat *arching* ditunjukkan adanya gas hidrogen dan asitilen sebagai gas domain pada penguraian

3. *Partial Discharge*

Petunjuk yang paling nyata dalam proses *partial discharge* dalam sistem tertutup adalah timbulnya gas *Hidrogen* (H_2).

2.3.4 Standar Spesifikasi Minyak Trafo

Minyak isolator transformator perlu memenuhi beberapa spesifikasi tertentu agar proses isolator dari minyak trafo dapat berjalan optimal. Berikut adalah beberapa spesifikasi minyak trafo menurut IS (*International Standard*) 335-1983 dan BS (*British Standard*) 148-1972:

Tabel 2.6 spesifikasi minyak trafo menurut IS 335-1983 dan BS 148-1972

NO	Karakteristik	IS 335 – 1983	BS 148 – 1972
1	<i>Density at</i>	27°C (max) 0.89 g/cm ²	20°C (max) 0.89 g/cm ²
2	<i>Kinematic viscosity</i>	27°C (max) 27 Cδt	20°C (max) 40 Cδt
3	<i>Interfacial tension</i>	27°C min 0.07 N/m	
4	<i>Flash point</i>	140°C	140°C
5	<i>Pour Point</i>	max – 9°C	Max – 30°C
6	<i>Neutralization value</i>	max 0.03 mg KOH/gm	max 0.03 mg KOH/gm
7	<i>Corrosive Sulphur</i>	Non Corrosive	
8	<i>Electric Strength (breakdown voltage)</i> (a) <i>As received in Drums</i> (b) <i>After filteration</i>	Min 30 kV Min 50 kV	Min 30 Kv
9	<i>Dielectric dissipation factor (tan-delta)</i>	90°C max 0.005	90°C max 0.005

10	<i>Specific resistance (resistivity) min</i> <i>(a) at 90°C</i> <i>(b) at 27°C</i>	min 30 ×10 ¹² Ω cm min 500 ×10 ¹² Ω cm	No set limit
11	<i>Oxidation stability</i> <i>(a) Neutralization value after oxidation</i> <i>(b) Total studge after oxidation, max</i>	max 0.40 mg KOH/gm max 0.10 % by weight	max 0.03 mg KOH/gm 0.10 %
12	<i>Presence of oxidation inhibitor</i>	<i>The Oil shall not contain antioxidant additives</i>	-
13	<i>Sulphur</i>		Nil
14	<i>Water content as received in drums</i> <i>as received in bulk</i>	max 50 ppm by weight	max 50 ppm max 35 ppm

2.3.5 Klasifikasi Minyak Isolasi

Berikut ini adalah tabel klasifikasi minyak isolasi

Tabel 2.7 Klasifikasi Minyak Isolasi

kondisi Gas (ppm)	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
C ₂ H ₄	<50	51-100	101-200	>200
C ₂ H ₆	<65	66-100	101-150	>150
C ₂ H 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.