

BAB II

ISOLASI CAIR TRANSFORMATOR

2.1. Tinjauan Pustaka

Berikut ini merupakan beberapa penelitian yang berkaitan dengan penulisan tugas akhir ini:

- Muhammad Ardi Anggara (2015). Yang meneliti mengenai pengaruh kenaikan temperatur dan umur minyak transformator terhadap degradasi tegangan tembus minyak transformer 500 kV 800 MVA di PLTU Paiton Unit 9. Dalam penelitian ini dilakukan pengujian tegangan tembus minyak yang umurnya berbeda yakni minyak baru, minyak berusia 5 bulan, minyak 1 tahun, minyak 1.5 tahun, dan minyak 2 tahun dengan variasi kenaikan temperatur, dimana besar temperaturnya 80°C, 100°C, 120°C. Data yang di peroleh dari tegangan tembus tiap minyak transformator yang umurnya dari yang paling rendah secara berurutan dari minyak yang baru sampai minyak berumur 2 tahun, yaitu sebesar 54.6kV, 53kV, 52kV, 51.2kV, 50.2kV dan yang paling tinggi saat temperatur minyak berada pada angka 80°C, yaitu sebesar 67.8kV, 66kV, 63.8kV, 61.8kV, 60.2kV. Dari data ini dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi temperatur dan semakin tua umur minyak transformator maka akan semakin memperburuk kekuatan dan kemampuan isolasi cairnya.

- Alfian Junaidi, (2008). Yang meneliti mengenai pengaruh perubahan suhu terhadap tegangan tembus pada bahan isolasi cair. Dalam penelitiannya disimpulkan bahwa perubahan suhu akan mempengaruhi nilai tegangan tembus (semakin meningkat suhu maka akan semakin meningkat pula nilai tegangan tembus).

2.2. Transformator Daya

2.2.1 Pengertian Umum

Transformator daya adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga/daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya.

Dalam operasi penyaluran tenaga listrik transformator dapat dikatakan sebagai jantung dari transmisi dan distribusi. Dalam kondisi ini suatu transformator diharapkan dapat beroperasi secara maksimal. Mengingat kerja keras dari suatu transformator seperti itu maka cara pemeliharaannya juga dituntut sebaik mungkin. Oleh karena itu transformator harus dipelihara dengan menggunakan sistem dan peralatan yang benar, baik dan tepat.

Untuk itu regu pemeliharaan harus mengetahui bagian-bagian transformator dan bagian-bagian mana yang perlu diawasi melebihi bagian yang lainnya.

Berdasarkan tegangan operasinya dapat dibedakan menjadi transformator 500/150kV dan 150/70kV biasa disebut *Interbus Transformator* (IBT). Transformator 150/20kV dan 70/20kV disebut

juga transformator distribusi. Titik netral transformator ditanahkan sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamanan/proteksi. Sebagai contoh transformator 150/20kV ditanahkan secara langsung disisi netral 150kV dan transformator 70/20kV ditanahkan dengan tahanan rendah atau tahanan tinggi atau langsung disisi netral 20kVnya.

Transformator dapat dibagi menurut fungsi/pemakaian seperti:

1. Transformator Mesin (Pembangkit)
2. Transformator Gardu Induk.
3. Transformator Distribusi.

Transformator dapat juga dibagi menurut Kapasitas dan Tegangan seperti:

1. Transformator besar
2. Transformator sedang
3. Transformator kecil



Gambar 2.1 Transformator Daya

2.2.2 Rating dan Klasifikasi Transformator Daya

Di Amerika rating transformator dibuat berdasar pada kemampuan transformator menghantarkan daya pada level tegangan tertentu, dan frekuensi dibawah kondisi operasi biasanya tanpa melebihi temperature internal yang sudah dibatasi. Temperatur dimana isolasi masih di izinkan untuk mencapai kondisi dibawah standar operasi maksimum digunakan untuk menentukan rating output transformator yang disebut dengan rating kVA. Transformator didesain sedemikian rupa dengan batasan nilai temperatur sesuai dengan permintaan beban, rata-rata kenaikan temperatur lilitan, *hotspot* kenaikan temperature lilitan, dan temperatur cairan/minyak atas (*top*). Untuk memperoleh nilai *absolute* temperatur dari nilai-nilai diatas, maka kita harus menambahkan nilai temperatur lingkungan (*ambient temperatur*).

Tabel 2.1 Temperatur yang terdapat pada transformator

Kenaikan temperatur lilitan rata-rata	65°C
Kenaikan temperatur <i>hotspot</i>	80°C
Kenaikan temperatur <i>top oil</i>	65°C

*pengujian biasanya dilakukan disaat kenaikan temperatur

55°C dan rating basnya sudah ditentukan.

Umur transformator daya secara normal diharapkan berkisar sekitar 30 tahun ketika beroperasi dengan rating yang sudah ditentukan. Namun dalam beberapa kondisi tertentu, kemungkinan terjadi

overload dan operasi melebihi rating yang ada, sehingga menyebabkan terjadinya penurunan umur transformator.

Berdasarkan kemampuan dayanya, transformator daya pada umumnya dapat dibagi menjadi tiga bagian besar yaitu:

- Transformator daya kecil : 150-7500 kVA
- Transformator daya sedang : 7500 kVA-100 MVA
- Transformator daya besar : di atas 100 MVA

2.2.3 Konstruksi Bagian-bagian Transformator Daya

a. Bagian Utama

1) Inti Besi

Berfungsi untuk mempermudah jalannya fluksmagnetik yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Terbuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang memiliki isolasi. Untuk mengurangi panas yang ditimbulkan oleh *Eddy Current* sebagai efek dari rugi-rugi besi.

2) Kumparan Transformator

Kumparan transformator merupakan beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut terdiri atas kumparan primer dan kumparan sekunder yang di isolasi. Baik isolasi terhadap inti besi maupun isolasi antar kumparan dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain.

Kumparan tersebut berfungsi sebagai alat transformasi tegangan dan arus.

3) Minyak Transformator

Sebagian besar kumparan-kumparan dan inti transformator tenaga direndam dalam minyak transformator, terutama transformator-transformator daya yang memiliki kapasitas besar.

4) Bushing

Bushing merupakan sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator yang berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator. Bushing biasanya kita lihat dalam bentuk penghubung antara kumparan transformator ke jaringan yang ada diluarnya.

5) Tangki Konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari transformator yang terendam minyak transformator berada atau ditempatkan didalam tangki. Untuk menampung pemuaiian minyak transformator, tangki dilengkapi dengan konservator.

b. Peralatan Bantu

1) Pendingin Transformator

Transformator umumnya diisi minyak sebagai bahan isolasi antara kumparan dengan kumparan dan kumparan dengan kaki.

Transformator tenaga umumnya dilengkapi dengan sistem

pendingin, yang dimaksudkan agar transformator dapat bekerja sesuai rating yang tertera pada spesifikasinya. Transformator yang dilengkapi pendingin adalah yang berkapasitas di atas 10 MVA. Tipe pendingin transformator adalah secara alami dan paksaan, yaitu menggunakan riben (sirip), radiator dan bantuan motor untuk mengembus udara.

Banyaknya riben atau motor-motor yang terpasang sesuai dengan kapasitas transformator dan permukaan yang diinginkan.

Sistem pengalirannya (sirkulasi) dapat dengan cara:

- Alamiah (natural)
- Tekanan/Paksaan (*forced*)

Tabel 2.2. Tipe Pendinginan Transformator

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/OFAF	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			

Sumber: IEC tahun 1976

Keterangan: A = *Air* (udara)

O = *Oil* (minyak)

N = *Natural* (alamiah)

F = *Forced* (paksaan/tekanan)

Transformator dalam keadaan bertegangan dan belum dibebani akan timbul rugi-rugi yang dapat menimbulkan kondisi transformator tersebut panas, namun panas yang timbul kecil. Apabila transformator tersebut dibebani maka kumparan dan minyak di dalam transformator akan bertambah panas sesuai dengan kenaikan bebannya. Panas yang timbul pada kumparan akan diteruskan secara konduksi pada minyak transformator yang berfungsi sebagai pendingin. Baik kumparan maupun minyak transformator mempunyai batas-batas operasi panas yang diijinkan. Isolasi kumparan yang terdiri dari kertas kraft mempunyai batas panas yang diijinkan sesuai dengan kelas isolasi spesifikasi transformator.

Demikian juga minyak isolasi transformator mempunyai batas panas yang diijinkan. Apabila panas-panas tersebut dilampaui maka isolasi akan rusak dan secara keseluruhan transformator tersebut akan rusak. Panas tersebut harus direduksi dengan memasang sistem pendingin yaitu: riben, radiator kipas-kipas, dan pompa minyak.

a) Pendingin Dengan Riben

Transformator dengan kapasitas 10 sampai dengan 30 MVA menggunakan riben atau sirip-sirip sebagai pendingin. Minyak panas yang ditimbulkan oleh panas kumparan akan terjadi pada bagian atas transformator sementara minyak yang dingin berada dibawah bagian transformator. Kondisi ini secara alami akan mengalir dari bawah transformator dan diteruskan melalui riben atau sirip pendingin, yang dirancang sedemikian sehingga minyak panas yang melalui riben akan didinginkan oleh aliran udara luar.

b) Pendingin Menggunakan Kipas

Transformator dengan kapasitas lebih dari 30 MVA biasanya dilengkapi dengan riben kipas pendingin, radiator dan pompa minyak.

c) Menggunakan Riben dan Kipas

Minyak transformator panas yang dialirkan melalui riben seperti yang dijelaskan di atas akan dihembus dengan udara dari kipas pendingin, baik secara vertikal ataupun horizontal sehingga minyak panas sebelum masuk kedalam transformator telah didinginkan dengan udara luar dengan bantuan kipas pendingin.

d) Menggunakan Radiator dan Kipas Pendingin

Minyak panas dari dalam transformator dipompa dengan motor pompa minyak dialirkan melalui radiator-radiator dan pada bagian depan radiator terpasang kipas-kipas pendingin yang akan menarik udara panas yang ditimbulkan oleh minyak panas ke udara luar dan dari sela-sela radiator akan mengalir udara segar yang akan mendinginkan minyak transformator.

2) Pengaruh Panas Pada Transformator

Panas berlebih pada transformator memiliki pengaruh yang merusak pada transformator, baik pada sistem isolasi maupun minyak transformator. Besi maupun tembaga umumnya tidak berpengaruh.

a) Kertas Selulose

Material isolasi dapat menciut dan sangat rapuh. Pengaruh sekunder dari panas lebih juga sangat penting misalnya produksi gas dan uap air pada waktu terjadi dekomposisi dari material *pressboard* dan kertas. Jika ada uap air yang tersisa selanjutnya akan mempercepat proses degradasi isolasi. Jika terdapat gas tak dapat keluar dari *winding* selama proses dekomposisi maka gelembung-gelembung dapat terkumpul pada daerah tekanan listrik yang tinggi, akan memindahkan minyak (*displace oil*) dan akan

memberikan kerusakan sebelum waktunya (*premature failure*)
Oleh karena itu sejak transformator tidak tahan terhadap
hubung singkat, tegangan impuls, serta hubung beban lebih
dari transformator harus dibatasi dari temperature *hotspot* tidak
lebih dari 140°C.

b) Minyak Mineral

Mengingat turan suhu untuk kertas selulose yaitu
“80°C” sementara minyak transformator beroperasi pada
“10°C”. Pemilik atau operator harus mengasumsikan dua
temperatur kritis yaitu 150°C dan 110°C untuk isolasi padat
dan 60°C untuk isolasi minyak transformator. Umur minyak
transformator yang berguna dapat diharapkan jika temperatur
minyak bagian atas tidak lebih dari 60°C. Diharapkan umur
berguna minyak transformator pada kondisi optimal dapat
mencapai 20 tahun sebelum mencapai titik kritis jumlah
kandungan asam 0,25 mgKOH/g. Jika jumlah kandungan
asam ini taktercapai, tingkat perubahan umur minyak
transformator dari linier menjadi fungsi eksponensial.
kemampuan umur minyak transformator dipotong untuk
kenaikan setiap 10°C sampai 60°C dimana faktor yang lain
konstan.

c) *Polymeric Wire Coating*

Untuk beberapa jenis *coating polymeric* konduktor temperatur yang diperbolehkan adalah yang mencapai 120°C. Untuk temperatur yang lebih tinggi lagi dapat menghasilkan rugi-rugi dielektrik yang signifikan.

3) *Tap Changer*

Tap Changer adalah alat perubah perbandingan transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang lebih baik (diinginkan) dari tegangan jaringan/primer yang berubah-ubah. Tap changer yang hanya bias beroperasi untuk memindahkan tap transformator dalam keadaan transformator tidak berbeban disebut "*Off Load Tap Changer*" dan hanya dapat di operasikan manual.

Tap Changer yang dapat beroperasi untuk memindahkan tap transformator, dalam keadaan transformator berbeban disebut "*On Load Tap Changer*" dan dapat dioperasikan secara manual atau otomatis.

Ada dua cara kerja *tap changer*:

- a) Mengubah tap dalam keadaan transformator tanpa beban
- b) Mengubah tap dalam keadaan transformator berbeban (*On Load Tap Changer/OLTC*).

Transformator yang terpasang di gardu induk pada umumnya menggunakan tap changer yang dapat dioperasikan dalam keadaan transformator berbeban dipasang di sisi primer. Sedangkan transformator penaik tegangan dipembangkit atau pada transformator kapasitas kecil, umumnya menggunakan *tap changer* yang dioperasikan hanya pada saat tenaga beban OLTC terdiri dari:

1. *Selector Switch*.
2. *Divener Switch*, dan
3. Transisi Resistor.

Untuk mengisolasi dari bodi transformator (tanah) dan merendam panas pada saat proses perpindahan tap, maka OLTC direndam di dalam minyak isolasi yang biasanya terpisah dengan minyak isolasi utama transformator (ada beberapa transformator yang kompartemennya menjadi satu dengan *main tank*).

Karena pada proses perpindahan hubungan tap di dalam minyak terjadi fenomena listrik, mekanis, kimia dan panas maka minyak isolasi OLTC kualitasnya akan cepat menurun, tergantung dari jumlah kerjanya dan adanya kelainan didalam OLTC.

4) Alat Pernapasan (*Silica Gel*)

Karena pengaruh naik turunnya beban transformator maupun udara luar, maka suhu minyakpun akan berubah-ubah mengikuti keadaan tersebut.

Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara diatas permukaan minyak keluar dari tangki, sebaliknya apabila suhu minyak turun, minyak menyusut maka udara luar akan masuk kedalam tangki. Kedua proses diatas disebut pernapasan transformator.

Akibat pernapasan transformator tersebut maka permukaan minyak akan selalu bersinggungan dengan udara luar. Udara luar yang lembab akan menurunkan nilai tegangan tembus minyak transformator, maka untuk mencegah hal tersebut, pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi dengan alat pernapasan, berupa tabung berisi kristal zat *hygroskopis*.

5) Indikator

Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator pada transformator sebagai berikut:

- a) Indikator suhu minyak
- b) Indikator permukaan minyak
- c) Indikator system pendingin
- d) Indikator kedudukan tap
- e) Dan sebagainya.

c. Peralatan Proteksi

1) Rele Bucholz

Rele Bucholz adalah alat/rele untuk mendeteksi dan mengamankan terhadap gangguan didalam transformator yang menimbulkan gas. Gas yang timbul diakibatkan oleh karena:

- a) Hubung singkat antar lilitan/dalam phasa.
- b) Hubung singkat antar phasa.
- c) Hubung singkat antar phasa ke tanah.
- d) Busur api listrik antar laminasi.
- e) Busur api listrik karena kontak yang kurang baik.

2) Pengaman Tekanan Lebih (*Explosive Membrane/Pressure-relief Ven*)

Alat ini berupa *membrane* yang dibuat dari kaca, plastik, tembaga atau katup berpegas, berfungsi sebagai pengaman tangki transformator terhadap kenaikan tekanan gas yang timbul di dalam Tangki (yang akan pecah pada tekanan tertentu) dan kekuatannya lebih rendah dari kekuatan tangki transformator.

3) Rele Tekanan Lebih (*Sudden Pressure Relay*)

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

c. Peralatan Tambahan untuk Pengaman Transformator

1) Rele Differensial

Berfungsi mengamankan transformator dari gangguan didalam transformator antara lain, *Flash Over* antara kumparan atau kumparan dengan tangki atau belitan dengan belitan didalam kumparan ataupun beda kumparan.

2) Rele Arus Lebih

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

3) Rele Tangki Tanah

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

4) Rele Hubung Tanah

Berfungsi untuk mengamankan transformator bila terjadi gangguan satu phasa ke tanah.

5) Rele Termis

Berfungsi untuk mencegah/mengamankan transformator dari kerusakan isolasi kumparan, akibat adanya panas lebih yang ditimbulkan arus lebih. Besarnya yang diukur di dalam rele ini

adalah kenaikan temperatur.

6) Minyak Transformator (*Transformator Oil*)

Fungsi dari Minyak transformator adalah: Insulator yaitu menginsulasikan kumparan didalam transformator supaya tidak terjadi loncatan bunga api listrik (hubungan pendek) akibat tegangan tinggi. Dengan demikian fungsi minyak transformator sebagai pendingin yaitu dengan mengambil panas yang ditimbulkan saat transformator berbeban lalu melepaskannya. Melindungi komponen-komponen didalam transformator terhadap korosi dan oksidasi.

2.3 Bahan Isolasi Cair

Isolasi cair berfungsi untuk memisahkan bagian-bagian yang memiliki beda tegangan agar tidak terjadi percikan ataupun lompatan bunga api di antara bagian-bagian tersebut. Selain itu, isolasi cair juga dapat berfungsi sebagai pendingin (*cooling*). Isolasi cair banyak digunakan pada peralatan listrik seperti pemutus tenaga, transformator dan lainnya.

Pada transformator, akan timbul panas, baik yang dibangkitkan oleh kumparan tembaga maupun inti besi. Jika panas tersebut tidak disalurkan atau tidak dilakukan pendinginan, maka akan ada bagian dari peralatan yang akan rusak apabila panas yang timbul melampaui suhu maksimum yang diperbolehkan. Untuk mengatasi hal ini maka inti dan kumparan dari transformator di celupkan kedalam suatu isolasi cair (minyak diala), yang berfungsi sebagai media pendingin dan media isolasi.

2.3.1 Sifat Isolasi Cair

Beberapa sifat yang harus ada pada minyak transformator antara lain sebagai berikut:

1) Tegangan tembus yang tinggi

Tegangan tembus minyak transformator perlu diukur di karenakan menyangkut kesanggupan minyak untuk menahan *electric stress*, tanpa kerusakan. Tegangan tembus dapat diukur dengan cara memasukkan dua buah elektroda bola (setengah bola) kedalam minyak yang hendak diukur. Jika diperoleh tegangan tembus yang rendah, maka dapat dikatakan kalau minyak transformator telah terkontaminasi.

2) Faktor kebocoran dielektrik yang rendah

Daya yang hilang dalam operasi suatu transformator disebabkan kehilangan energi menjadi panas, akibat pemecahan molekul-molekul. Harga faktor kehilangan dielektrik yang tinggi menunjukkan adanya kontaminasi atau terjadinya oksidasi yang mengakibatkan minyak menjadi kotor atau menghasilkan kotoran berupa logam alkali, koloid bermuatan, dan sebagainya.

3) Viskositas yang rendah

Viskositas merupakan tahanan dari cairan untuk mengalir *continue* dan merata, tanpa adanya turbulensi dan gaya-gaya lain. Viskositas minyak biasanya diukur dari waktu alir minyak dengan

volume tertentu dan pada kondisi yang di atur. Sebagai media pendingin maka viskositas minyak transformator merupakan factor penting dalam aliran konveksi untuk memindahkan panas. Viskositas juga dipakai sebagai dasar pembagian kelas minyak.

4) Titik nyala yang tinggi

Ini menunjukkan bahwa minyak dapat dipanaskan sampai suhu tertentu sebelum uap yang timbul menjadi api yang berbahaya. Titik nyala yang rendah juga menunjukkan bahwa minyak mengandung zat yang berbahaya seperti zat yang mudah menguap dan terbakar.

5) Massa jenis yang rendah

Massa jenis adalah perbandingan massa suatu volume cairan pada 15,56° C dengan massa air pada volume dan suhu yang sama. Massa minyak transformator lebih kecil dibanding air, oleh karena itu, adanya air dalam minyak transformator akan mudah dipisahkan, karena air akan turun kebawah sehingga akan lebih mudah dikeluarkan dari tangki minyak transformator dan tangki pemutus tenaga.

6) Kestabilan kimia dan penyerapan gas yang baik

Kestabilan ini penting terutama terhadap oksidasi, sehingga dapat di evaluasi kecenderungan minyak membentuk asam dan kotoran zat padat asam dan kotoran zat padat yang terbentuk akibat oksidasi akan menurunkan tegangan tembus. Selain itu air dan asam

menyebabkan korosi terhadap logam yang ada dalam transformator, sedangkan kotoran zat padat akan menyebabkan perpindahan panas (*heat transfer*) dalam proses pendinginan transformator menjadi terganggu.

7) Angka kenetralan

Angka kenetralan dinyatakan dalam mgKOH yang dibutuhkan pada titrasi satu gram minyak. Angka kenetralan merupakan angka yang menunjukkan penyusun asam dan dapat mendeteksi adanya kontaminasi di dalam minyak, Kecenderungan perubahan kimia atau indikasi perubahan kimia bahan tambahan. Selain itu angka kenetralan merupakan petunjuk umum untuk menentukan apakah minyak yang sedang dipakai harus diganti atau diolah kembali dengan melakukan penyaringan (filterasi).

8) Korosi belerang

Dalam pemakaian minyak transformator, baik secara kontinu ataupun terus menerus, akan mengalami kontak/terhubung langsung dengan bahan-bahan logam seperti tembaga, besi yang dapat mengalami korosi. Uji korosi belerang perlu untuk melihat kemungkinan adanya korosif minyak sebagai akibat adanya belerang bebas atau senyawa belerang lainnya dalam minyak.

9) Resistivitas

Resistivitas erat hubungannya dengan partikel zat yang bersifat penghantar. Resistivitas yang rendah menunjukkan bahwa minyak tersebut sudah mengalami kontaminasi oleh bahan/zat yang bersifat konduktif, seperti air, asam, partikel bermuatan lainnya.

2.3.2 Minyak Transformator

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 di lapangan adalah minyak transformator jenis Diala A, diala B dan Mectrans.

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 akan mampu melindungi transformator dari gangguan.

Minyak transformator mempunyai unsur atau senyawa hidrokarbon yang terkandung dalam minyak transformator ini adalah :

1. Senyawa hidrokarbon parafinik.
2. Senyawa hidrokarbon naftenik.
3. Senyawa hidrokarbon aromatik.

Selain ketiga senyawa diatas minyak transformator masih mengandung senyawa yang disebut zat aditif meskipun kandungannya sangat kecil. 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.

Berikut ini merupakan syarat ketahanan tegangan tembus minyak diala:

Tabel 2.3 Syarat Ketahanan Tegangan Tembus Minyak Diala

No	Sela (mm)	Tegangan Tembus (kV)
1	25.5	23,868
2	5	40,906
3	7.5	58,782
4	10	69,466

Minyak transformator mempunyai sifat yang sama seperti sebuah isolasi dan media pemindah, sehingga minyak transformator tersebut dapat berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi.

Minyak transformator harus memenuhi persyaratan, yaitu:

- Kekuatan isolasi harus tinggi, sesuai IEC 296 minyak transformator harus kelas 1 dan 2 untuk minyak baru dan belum difilter > 30 kV/2.5mm dan setelah difilter yaitu > 50 kV/2.5mm

- Penyalur panas yang baik, berat jenis kecil, sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat
- Viskositas yang rendah, agar lebih mudah bersirkulasi dan memiliki kemampuan pendinginan menjadi lebih baik. Pada IEC 296 Viskositas minyak kelas 1 saat suhu 40°C adalah <16,5 cSt
- Titik nyala yang tinggi dan tidak mudah menguap yang dapat menimbulkan bahaya
- Tidak merusak bahan isolasi padat
- Sifat kimia yang stabil.

Jika minyak isolasi transformer di datangkan dengan tangki tersendiri, besar embun (*moisture*) yang terdapat dalam minyak tidak boleh lebih besar dari 10 ppm dan dalam masa pengangkutan minyak tidak boleh terkontaminasi oleh udara. Maka sebelum minyak dipompakan ke dalam tangki transformer perlu dilakukan penyaringan dan pemurnian (*treatment*).

Minyak transformator baru harus memiliki spesifikasi seperti tampak pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Spesifikasi Minyak Isolasi Baru

No	Sifat Minyak Isolasi	Satuan	Klas I / Klas II	Metode Uji	Tempat Uji
1	Kejernihan	-	Jernih	IEC 296	Di tempat
2	Massa Jenis (20°C)	g/cm ³	<0.895	IEC 296	Lab
3	Viskositas (20°C)	cSt	<40<25	IEC 296	Lab
	Kinematik – (15°C)	cSt	<800		
	Kinematik – (30°C)	cSt	<1800		
4	Titik Nyala	°C	>140>100	IEC 296A	Lab
5	Titik Tuang	°C	<30<40	IEC 296A	Lab
6	Angka Kenetralan	mgKOH/g	<0.003	IEC 296	Lab
7	Korosi Belerang	-	Tidak Korosi	IEC 296	Di tempat / Lab
8	Tegangan Tembus	kV/2.5mm	>30 >50	IEC 156 IEC 296	Di tempat / Lab
9	Faktor Kebocoran Dielektrik	-	<0.05	IEC 250 IEC 474 IEC 74	Lab
10	Ketahanan Oksidasi a. Angka Kenetralan b. Kotoran	mgKOH/g %	<0.40 <0.10	IEC 74	Lab

Untuk minyak isolasi pakai berlaku untuk transformator berkapasitas > 1 MVA atau bertegangan > 30kV sifatnya seperti ditunjukkan pada tabel 2.5 berikut.

Tabel 2.5. Spesifikasi Minyak Isolasi Pakai

No	Sifat Minyak Isolasi	Tegangan Peralatan	Batas yang diperbolehkan	Metode Uji	Tempat Uji
1	Tegangan Tembus	>170kV (70-170 kV)	>50 kV/2.5 mm	IEC 156 & ISO 760	Di Tempat/Lab
2	Kandungan Air	<70kV <170 kV	>30 kV /2.5 mm <20 mg/L <30 mg/L	IEC 93 & IEC 250 (90°C)	Lab
3	Faktor Dielektrik	Semua Tegangan	<0.2 - 2.0	IEC 93 & IEC 247	Lab
4	Tahanan Jenis	Semua Tegangan	G/mm	IEC 93 & IEC 247	Di Tempat/Lab
5	Angka Kenetralan	Semua Tegangan	<0.5 mg/KOH	IEC 296	Lab
6	Sedimen		Tidak terukur penurunan	IEC 296	Lab
7	Titik Nyala		Maksimum 15°C	IEC 296	Lab
8	Tegangan Permukaan	>170 kV	>15 x 10 ³ N/m	Sedang dikerjakan IEC	Sedang dikerjakan IEC
9	Kandungan Gas			Sedang dikerjakan IEC	Sedang dikerjakan IEC

Sementara untuk kekuatan dielektrik minyak didasarkan pada tabel berikut.

Tabel 2.6 Kekuatan Dielektrik dari Minyak untuk Tegangan Operasi

Tegangan Tembus Minyak Transformator		
Tegangan Operasi	Untuk minyak baru	Untuk minyak yang sudah dipakai
	IEC 156 (kV/2.5 mm)	IEC 156 (kV/2.5 mm)
>170	≥ 50	≥ 50
70- 170	≥ 50	≥ 40
< 70	≥ 50	≥ 30

2.3.3 Kegagalan Pada Minyak Transformator

Karakteristik pada isolasi minyak transformator akan berubah jika terjadi ketidak murnian didalamnya. Hal ini akan mempercepat terjadinya proses kegagalan. Faktor-faktor yang mempengaruhi

kegagalan isolasi antara lain adanya partikel padat, uap air dan gelembung gas.

Teori mengenai kegagalan dalam zat cair kurang banyak diketahui apabila dibandingkan dengan teori kegagalan 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 zatisolasi dapat dibagi menjadi empat jenis sebagai berikut.

a. Teori Kegagalan 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.

Jika elektroda memiliki bagian permukaan tidak rata (ada yang runcing) maka kuat medan yang terbesar terdapat pada bagian yang runcing tersebut. Kuat maksimum ini akan mengeluarkan elektron e_1 yang akan memulai terbentuknya banjir elektron. Elektron yang dihasilkan e_1 , e_2 , e_3 dan e_a yang kemudian akan menyebabkan timbulnya arus konduksi dalam zat cair pada kuat medan yang tinggi. Arus yang timbul mempunyai kerapatan (*Schottky*):

$$J = J_1 e^{\frac{4.44\sqrt{E}}{r}} \quad (\text{A / cm}^2) \dots\dots\dots(2.1)$$

$$J_1 = AT^Q e^{-\phi/kr} \text{ dan } E = mE_a \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana:

J : kerapatan arus konduksi;

J₁ : kerapatan arus termionik;

E_a : kuat medan yang diterapkan;

m : faktor ketidakrataan permukaan (=10 untuk permukaan halus)

b. Teori Kegagalan Gelembung

Kegagalan gelembung atau kavitasi merupakan bentuk kegagalan zat cair yang disebabkan oleh adanya gelembung-gelembung gas di dalamnya.

Menurut *kao* dan *krasucki* dalam jurnalnya “*Deformation of Gas Bubbles and Liquid Drop in an Electrically Stressed Liquid*”, sebab-sebab timbulnya gelembung gas adalah:

- Permukaan elektroda tidak rata, sehingga terjadi kantong udara dipermukaannya
- Adanya tabrakan elektron sehingga terjadi produk-produk baru berupa gas
- Penguapan cairan karena adanya lucutan pada bagian-bagian elektroda yang tajam dan tidak teratur
- Zat cair mengalami perubahan suhu dan tekanan

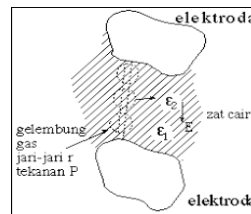
Medan listrik dalam gelembung gas yang ada dalam isolasi zat cair

$$E_b = \frac{3\varepsilon_1 E_0}{2\varepsilon_1 + 1} \dots\dots\dots(2.3)$$

dimana: ε_1 adalah permitifitas zat cair dan

E_0 adalah medan listrik dalam zat cair tanpa gelombang

Bila E_b sama dengan batas medan ionisasi gas, maka akan terjadi lucutan pada gelombang. Hal ini mempercepat pembentukan gas karena zat cair dan dapat mengakibatkan kegagalan isolasi.



Gambar 2.2 Pengaruh Medan terhadap gelembung udara

Kekuatan gagal medan gelembung adalah:

$$E_0 = \frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \sqrt{\frac{2\pi\phi(2\varepsilon_1\varepsilon_2)}{r} \left[\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{V_b}{2rE_0} - 1} \right]} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana ε_1 dan ε_2 adalah permitivitas zat cair dan permitivitas gelembung, r jari-jari awal gelembung (dianggap bola) V_b jatuh tegangan dalam gelembung dan ϕ adalah gaya tegang (*tension*) permukaan zat cair.

c. Teori Kegagalan Bola Cair

Jika suatu zat isolasi mengandung sebuah bola cair dari jenis airan lain, maka dapat terjadi kegagalan akibat ketidak stabilan bola cair tersebut dalam medan listrik. Medan listrik akan menyebabkan tetesan bola cair yang tertahan didalam minyak yang memanjang searah medan dan pada medan yang kritis tetesan ini menjadi tidak stabil. Kanal kegagalan akan menjalar dari ujung tetesan yang memanjang sehingga menghasilkan kegagalan total.

Bola cair yang dikenai medan E akan berubah bentuk menjadi sferoida seperti ditunjukkan dalam gambar berikut dengan medan di dalamnya sebesar E_2 , maka hubungan antara kedua medan adalah:

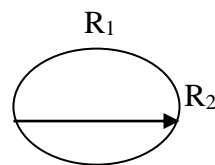
$$E_2 = \frac{\epsilon_1 \cdot E}{\epsilon_1 - (\epsilon_1 - \epsilon_2)} \text{ dimana } G = \frac{1}{\gamma^2 - 1} \left\{ \frac{\gamma \cdot \cosh^{-1} \gamma}{(\gamma^2 - 1)^{1/2}} \right\} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dengan

$$\gamma = R_2 / R_1 \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana: ϵ_1 : permitivitas zat cair isolasi

ϵ_2 : adalah permitivitas zat cair



Gambar 2.3 Medan listrik bentuk sferoida

d. Teori Kegagalan Tak Murnian Padat

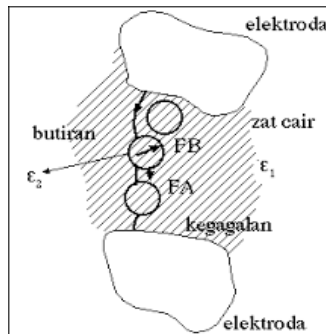
Kegagalan tak murnian padat adalah jenis kegagalan yang disebabkan oleh adanya butiran zat padat (partikel) didalam isolasi cair yang akan memulai terjadi kegagalan.

Besarnya gaya bekerja pada butiran dalam medan tak homogen (Kok):

$$F = R^3 \epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} E \cdot \text{grad} \cdot E \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana: R : jari-jari butiran

E : gradien tegangan



Gambar 2.4 Kegagalan butiran padat

Jika $\epsilon_1 > \epsilon_2$, maka arah gaya yang bekerja pada butiran searah dengan tekanan listrik maksimum (F_A) sehingga gaya akan mendorong butiran dari bagian yang kuat dari medan. Jika $\epsilon_2 < \epsilon_1$, maka arah gaya berlawanan dengan tekanan listrik maksimum (F_B). Gaya F ini akan besar bila ϵ_2 besar. Untuk butiran penghantar $\epsilon_2 = 0$ sehingga $F = 1/2 R^3 \text{ grad} \cdot E^2$.

Untuk medan yang seragam, medan paling kuat ditempatkan yang seragam, disini gradient $E^2=0$. Oleh sebab itu butiran akan tertarik ke tempat dimana medannya seragam. Akibatnya butiran akan sejajar diantara kedua elektroda dan seolah-olah membentuk jembatan yang mengawali terjadinya kegagalan isolasi. Adanya butiran penghantar diantara elektroda akan mengakibatkan pembesaran medan dalam zat cair didekat permukaan butiran. Pembesaran medan ini ditentukan oleh bentuk butiran.

2.3.4 Mekanisme Ketembusan Minyak Transformator

Ada beberapa alasan mengapa isolasi cair digunakan, antara lain:

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

Beberapa macam faktor yang diperkirakan mempengaruhi ketembusan minyak transformator seperti luas daerah elektroda, jarak celah (*gap spacing*), pendinginan, perawatan sebelum pemakaian

(elektroda dan minyak), pengaruh kekuatan dielektrik dari minyak transformator yang di ukur serta kondisi pengujian atau minyak transformator itu sendiri juga mempengaruhi kekuatan dielektrik minyak transformator.

Ketembusan isolasi (*insulation breakdown / insulation failure*) disebabkan karena beberapa hal antara lain isolasi tersebut sudah lama dipakai, berkurangnya kekuatan dielektrik karena isolasi tersebut dikarenakan tegangan lebih. Pada prinsipnya tegangan pada isolator merupakan suatu tarikan atau tekanan (*stress*) yang harus dilawan oleh gaya dalam isolator itu sendiri agar supaya isolator tidak tembus. Dalam struktur molekul material isolasi, elektron terikat erat pada molekulnya, dan ikatan ini mengadakan perlawanan terhadap tekanan yang disebabkan oleh adanya tegangan. Bila ikatan ini terputus pada suatu tempat maka sifat isolasi pada tempat itu hilang. Bila pada bahan isolasi tersebut diberikan tegangan akan terjadi perpindahan elektron dari suatu molekul ke molekul lainnya sehingga timbul arus konduksi atau arus bocor. Karakteristik isolator akan berubah bila material tersebut termasuk suatu ketidakmurnian (*impurity*) seperti adanya arang atau kelembaban dalam isolasi yang dapat menurunkan tegangan tembus.