

BAB II

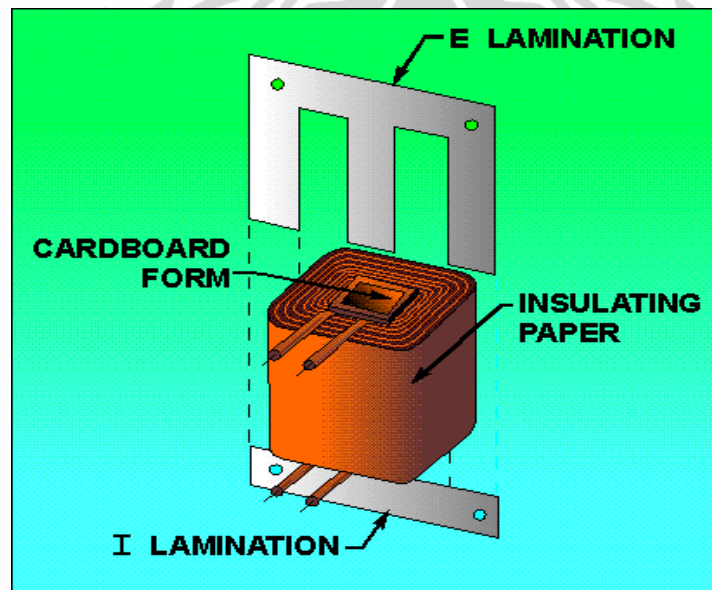
LANDASAN TEORI

2.1. Komponen Utama Transformator Tenaga

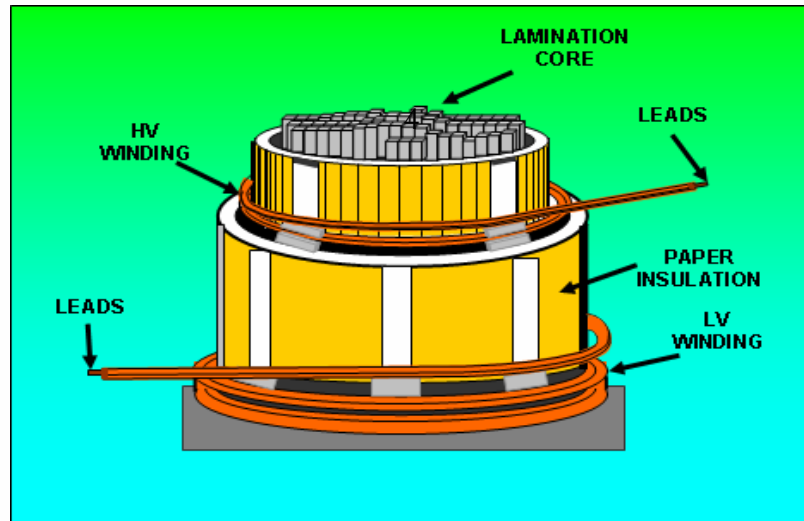
Komponen utama transformator tenaga terdiri dari bagian-bagian diantaranya: inti besi, kumparan transformator, minyak transformator, bushing, tangki konservator, peralatan Bantu pendinginan transformator, tap changer dan alat pernapasan (*dehydrating breather*).

Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, magnetik yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh Eddy Current.

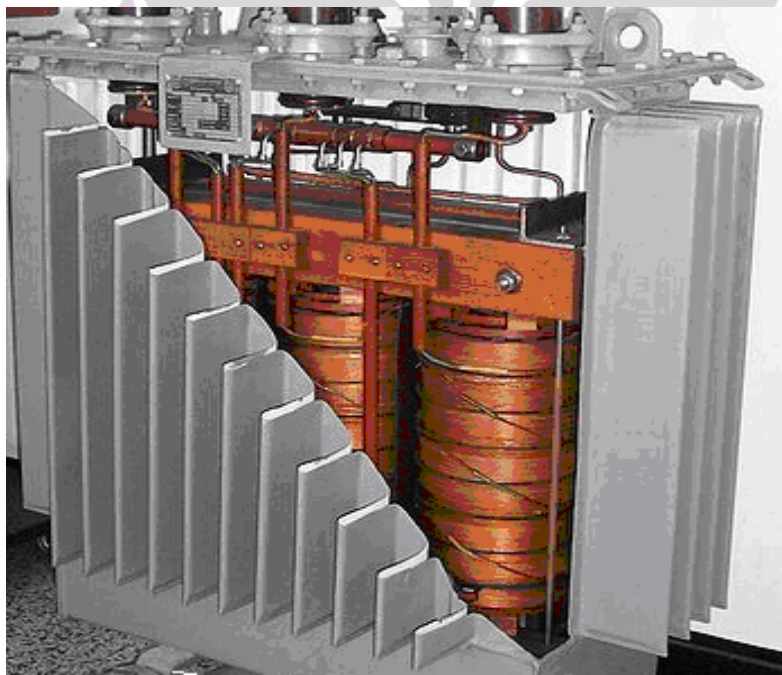
Kumparan transformator adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan atau gulungan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain. Kumparan tersebut sebagai alat transformasi tegangan dan arus.



Gambar 2.1 – Konstruksi belitan transformator



Gambar 2.2 – Gambaran fisik belitan transformator tenaga



Gambar 2.3. : Komponen-komponen internal transformator

Minyak transformator merupakan salah satu bahan isolasi cair yang dipergunakan sebagai isolasi dan pendingin pada transformator. Sebagai bagian dari 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.

Bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator merupakan alat penghubung antara kumparan transformator dengan jaringan luar. Bushing sekaligus Studi gangguan..., M. Solikhudin, FT UI, 2010. **Universitas Indonesia**

berfungsi sebagai penyekat/isolator antara konduktor tersebut dengan tangki transformator.

Tangki Konservator berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan trafo karena arus beban. Diantara tangki dan trafo dipasangkan relai bucholz yang akan meyerap gas produksi akibat kerusakan minyak . Untuk menjaga agar minyak tidak terkontaminasi dengan air, ujung masuk saluran udara melalui saluran pelepasan/venting dilengkapi media penyerap uap air pada udara, sering disebut dengan silica gel dan dia tidak keluar mencemari udara disekitarnya.

Peralatan Bantu Pendinginan Transformator berfungsi untuk menjaga agar transformator bekerja pada suhu rendah. Pada inti besi dan kumparan – kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi tembaga. Maka panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, ini akan merusak isolasi, maka untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut transformator perlu dilengkapi dengan alat atau sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator.

Secara alamiah media pendingin (minyak isolasi) mengalir karena perbedaan suhu tangki minyak dan sirip-sirip transformator (Radiator). Untuk mempercepat pendinginan transformator dilengkapi dengan kipas yang dipasang di radiator transformator dan pompa minyak agar sirkulasi minyak lebih cepat dan pendinginan lebih optimal.

Tap Changer berfungsi untuk menjaga tegangan keluaran yang diinginkan dengan input tegangan yang berubah-ubah. Kualitas operasi tenaga listrik jika tegangan nominalnya sesuai ketentuan, tapi pada saat operasi dapat saja terjadi penurunan tegangan sehingga kualitasnya menurun, untuk itu perlu alat pengatur tegangan agar tegangan selalu pada kondisi terbaik, konstan dan berkelanjutan.

Ditinjau dari cara pengoperasiannya, tap changer terdiri dari dua tipe yaitu on-load yang bekerja secara otomatis jika merasakan tegangan kurang/lebih dan off-load yang dapat dipindah tap hanya jika trafo tidak berbeban/bertegangan.

Alat pernapasan (Dehydrating Breather). Sebagai tempat penampungan pemuain minyak isolasi akibat panas yang timbul, maka minyak ditampung pada tangki yang sering disebut sebagai konservator. Pada konservator ini permukaan minyak diusahakan tidak boleh bersinggungan dengan udara, karena kelembaban udara yang mengandung uap air akan mengkontaminasi minyak walaupun proses pengkontaminasinya berlangsung cukup lama. Untuk mengatasi hal tersebut, udara yang masuk kedalam tangki konservator pada saat minyak menjadi dingin memerlukan

suatu media penghisap kelembaban, yang digunakan biasanya adalah silica gel. Kebalikan jika trafo panas maka pada saat menyusut maka akan menghisap udara dari luar masuk kedalam tangki dan untuk menghindari terkontaminasi oleh kelembaban udara maka diperlukan suatu media penghisap kelembaban yang digunakan biasanya adalah silica gell, yang secara khusus dirancang untuk maksud tersebut diatas

2.2. Peralatan Proteksi Internal

Proteksi internal adalah peralatan yang telah terpasang melekat pada transformator tenaga yang berfungsi sebagai pengaman jika transformator mengalami tekanan mendadak dan temperature tinggi.

2.2.1. Relai Bucholz,

Relay Bucholz adalah relai yang berfungsi mendeteksi dan mengamankan terhadap gangguan transformator yang menimbulkan gas.

Timbulnya gas dapat diakibatkan oleh beberapa hal, diantaranya adalah:

- a. Hubung singkat antar lilitan pada atau 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.

Relai deteksi gas juga terdiri dari suatu peralatan yang tanggap terhadap ketidaknormalan aliran minyak yang tinggi yang timbul pada waktu transformator terjadi gangguan serius. Peralatan ini akan menggerakkan kontak trip yang pada umumnya terhubung dengan rangkaian trip Pemutus Arus dari instalasi transformator tersebut.

2.2.2. Jansen Membran

Alat ini berfungsi untuk pengaman tekanan lebih (Explosive Membrane) / Bursting Plate. Relai ini bekerja karena tekanan lebih akibat gangguan didalam transformator, karena tekanan melebihi kemampuan membran/selaput yang terpasang, maka membran akan pecah dan minyak akan keluar dari dalam transformator yang disebabkan oleh tekanan minyak

2.2.3. Relai Tekanan Lebih (Sudden Pressure Relay),

Flash over atau hubung singkat yang timbul pada suatu transformator terendam minyak, umumnya akan berkaitan dengan suatu tekanan lebih didalam tangki, karena gas yang dibentuk oleh dekomposisi dan evaporasi minyak. Dengan melengkapi

sebuah relai pelepasan tekanan lebih pada trafo, maka tekanan lebih yang membahayakan tangki trafo dapat dibatasi besarnya. Apabila tekanan lebih ini tidak dapat dieliminasi dalam waktu beberapa millidetik, maka terjadi panas lebih pada cairan tangki dan trafo akan meledak. Peralatan pengaman harus cepat bekerja mengevakuasi tekanan tersebut.

2.2.4. Relai Thermis (Temperature Relay)

Alat ini berfungsi untuk mencegah/mengamankan transformator dari kerusakan isolasi pada kumparan, akibat adanya panas lebih yang ditimbulkan oleh arus lebih. Besaran yang diukur di dalam relai ini adalah kenaikan suhu.

Setelan dari relai ini dibagi menjadi dua tingkat (stage) yaitu 1st stage sebagai alarm dan 2nd stage sebagai trip.

2.3. Peralatan Tambahan Pengaman Transformator

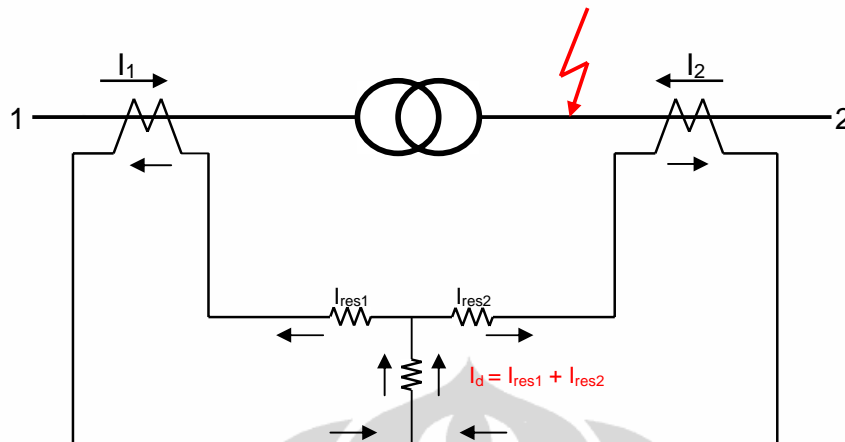
Sistem pegaman transformator tenaga ditinjau dari daerah pemangamanannya dikelompokkan menjadi dua yaitu proteksi terhadap gangguan di dalam transformator, dan proteksi terhadap gangguan di luar transformator^[1].

2.3.1. Relai Diferensial

Relai diferensial merupakan proteksi utama transformator tenaga. Relai ini hanya bekerja apabila terjadi gangguan yang berada di daerah pengamanannya yaitu di antara transformator arus di sisi kumparan primer dan transformator arus di sisi kumparan sekunder.

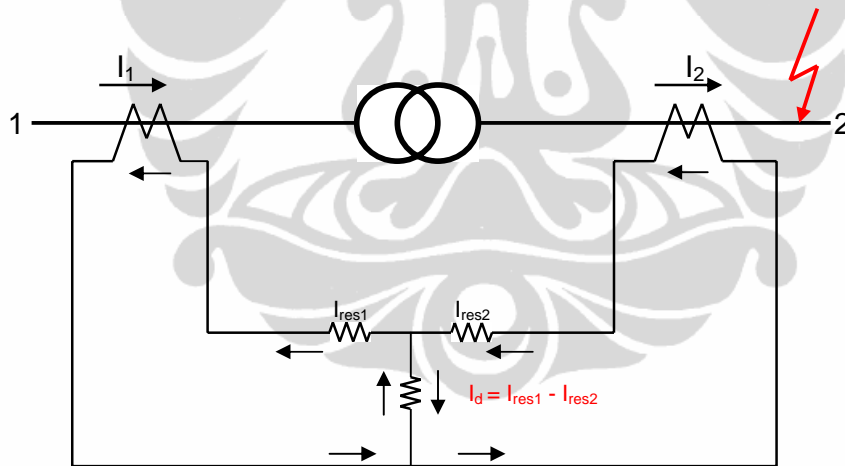
Prinsip kerja relai diferensial adalah dengan membandingkan atau menjumlahkan nilai arus pada CT (current transformer) di sisi kumparan primer dan CT (current transformer) sisi kumparan sekunder. Jika hasil penjumlahan arus dari kedua CT tersebut melebihi nilai setelan yang telah ditentukan, maka relai akan trip dan mengirim perintah kepada CB (circuit breaker) sisi kumparan primer dan CB sisi kumparan sekunder untuk membebaskan transformator tenaga dari tegangan.

Sebagai proteksi utama relai ini bekerja dengan waktu seketika (*instantaneous*) atau bekerja dengan kecepatan dibawah 100 ms. Selektifitas relai harus terbukti, relai harus trip apabila terjadi gangguan di daerah pengamanannya. Relai tidak boleh trip ketika terjadi gangguan di luar daerah pengamanannya.



Gambar 2.4: Ilustrasi aliran arus ketika terjadi gangguan internal

Ketika terjadi gangguan internal (berada diantara 2 CT) maka arah arus pada sekunder CT seperti ditunjukkan pada gambar 2.3. Arus pada sekunder CT akan saling menjumlahkan sehingga pada operating coil akan mengalir arus sebesar $I_d = I_{res1} + I_{res2}$. Sedangkan pada restraint coil akan mengalir arus sebesar $I_{bias} = (I_{res1} + I_{res2})/2$.



Gambar 2.5 : Ilustrasi aliran arus ketika terjadi gangguan eksternal

Ketika terjadi gangguan eksternal (berada di luar daerah pengamanan) maka arah arus pada sekunder CT seperti ditunjukkan pada gambar 2.4. Arus pada sekunder CT akan saling meniadakan sehingga pada Operating coil akan mengalir arus sebesar $I_d = I_{res1} - I_{res2}$ sehingga $I_d \sim 0$. Sedangkan pada restraint coil akan mengalir arus sebesar $I_{bias} = (I_{res1} + I_{res2})/2$

Dasar pertimbangan dalam menentukan setelan slope differential relai adalah sebagai berikut :

- kesalahan sadapan (misal 10%)
- kesalahan CT (misal 10%)

- Mismatch (misal 4%)
- arus eksitasi (misal 1%)
- faktor keamanan (misal 5%)

Setelan slope ditentukan sebesar total prosentase dari hal-hal tersebut, dari contoh di atas maka setelan slope ditentukan 30%.

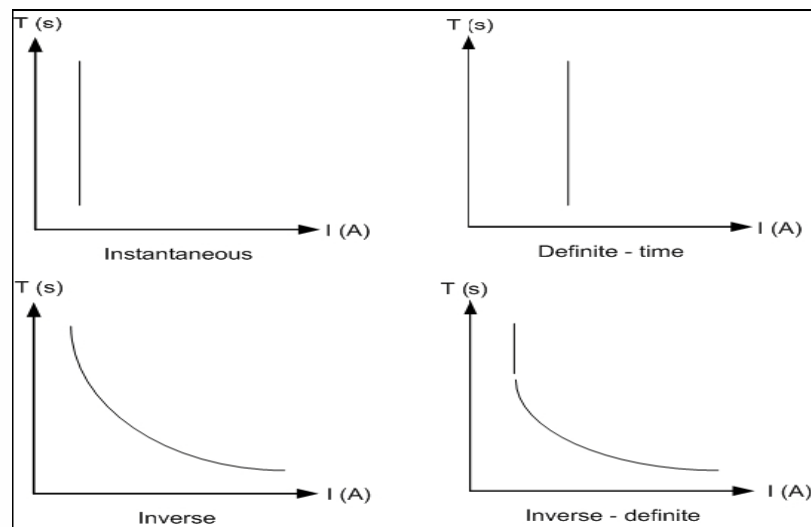
2.3.2. Relai Arus Lebih

Relai arus lebih adalah relai yang bekerja terhadap arus lebih, ia akan bekerja bila arus yang mengalir melebihi nilai settingnya (I_{set}). Relai arus lebih berfungsi untuk mengamankan gangguan singkat antar fasa didalam maupun diluar daerah pengaman transformator. Relai ini juga diharapkan mempunyai sifat komplementer dengan relai beban lebih.

Sistem proteksi transformator tenaga menggunakan relai arus lebih dan relai gangguan tanah sebagai proteksi cadangan (*back up protection*). Relai arus lebih atau OCR (*Overcurrent Relay*) merupakan relai yang bekerja ketika arusnya melebihi ambang-batas setelan yang telah ditentukan sebelumnya.

Berdasarkan karakteristik kerjanya relai arus lebih ^[2]:

1. Relai sesaat (*Instantaneous relay*), relai yang bekerja secara langsung atau tanpa waktu tunda berdasarkan perbedaan tingkat arus gangguan pada lokasi yang berbeda.
2. Relai arus lebih waktu pasti (*definite independent time*)
Relai yang bekerja berdasarkan waktu tunda yang telah ditentukan sebelumnya dan tidak tergantung pada perbedaan besarnya arus.
3. Relai waktu terbalik (*inverse time*)
Relai yang bekerja dengan waktu operasi berbanding terbalik terhadap besarnya arus yang terukur oleh relai. Relai ini mempunyai karakteristik kerja yang dipengaruhi baik oleh waktu maupun arus.
4. Inverse Definite Time Relay
Relai ini mempunyai karakteristik kerja berdasarkan kombinasi antara relai *invers* dan relai *definite*. Relai ini akan bekerja secara *definite* bila arus gangguannya besar dan bekerja secara *inverse* jika arus gangguannya kecil.



Gambar 2.6. Kurva karakteristik relai arus lebih

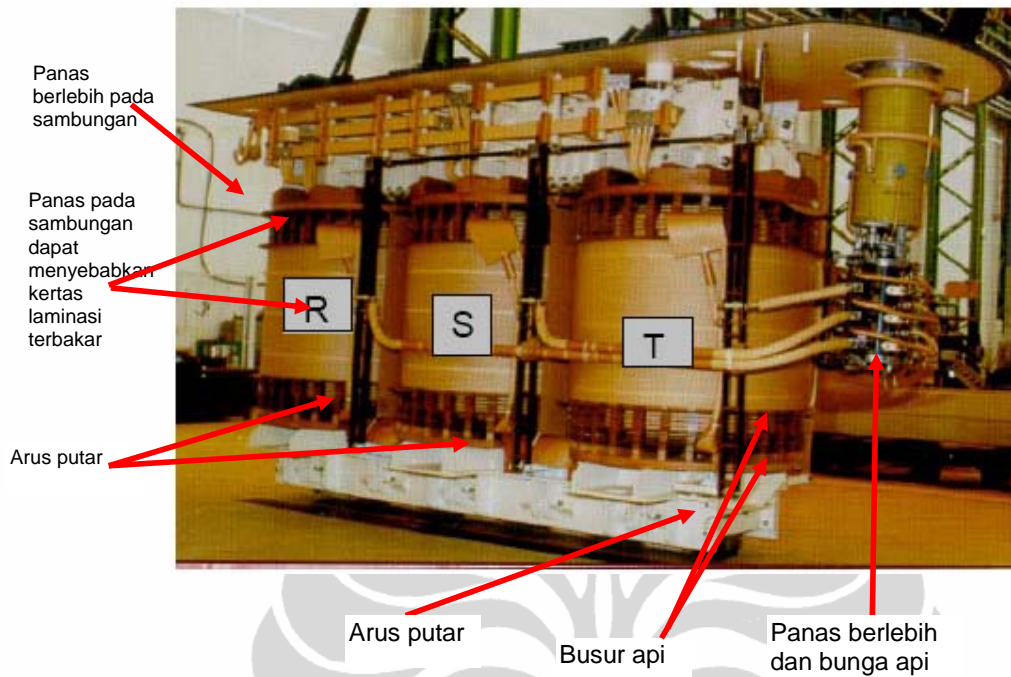
2.3.3. Relai Gangguan Tanah Terbatas (Restricted Earth Fault/REF)

Relai ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap tanah didaerah pengaman transformator khususnya untuk gangguan didekat titik netral yang tidak dapat dirasakan oleh relai differensial. Relai ini hanya diperlukan jika transformator tenaga menggunakan vector group Yn.

Prinsip kerja relai gangguan tanah terbatas (REF) sama dengan relai diferensial yaitu dengan membandingkan atau menjumlahkan arus dari sisi CT fasa dan CT yang terpasang pada titik netral transformator tenaga. Jika selisi arus melebihi seting yang telah ditentukan maka relai akan trip dengan waktu seketika untuk kemudian menginisiate CB baik sisi primer maupun sekunder membuka membebaskan transformator tenaga dari tegangan, sehingga kerusakan yang lebih besar dapat dihindari.

2.4. Bagian Internal Transformator Yang Berpotensi Terjadinya Gangguan

Peta Potensi Terjadinya gangguan di dalam Transformator ditunjukkan dalam gambar di bawah ini :



Gambar 2.7.: Peta potensi gangguan internal transformator

2.5. Kegagalan Isolasi Dan Mekanismenya

Isolasi berfungsi untuk memisahkan bagian-bagian yang mempunyai beda tegangan agar supaya diantara bagian-bagian tersebut tidak terjadi lompatan listrik (flash-over) atau percikan (spark-over). Kegagalan isolasi pada peralatan tegangan tinggi yang terjadi pada saat peralatan sedang beroperasi bisa menyebabkan kerusakan alat sehingga kontinuitas sistem menjadi terganggu.

Salah satu bahan isolasi yang banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik adalah minyak. Misalnya digunakan sebagai isolasi inti pada transformator daya sekaligus sebagai media pendingin.

2.5.1. Kegagalan Isolasi

Pada saat beroperasi, minyak sebagai isolator mengalami penurunan kualitas disebabkan karena banyak faktor misalnya pengaruh kontaminan padat, kontaminan cair dan gas-gas hasil reaksi didalam minyak. Selain itu, juga dipengaruhi oleh kondisi minyak yang mengalami stress thermal pada saat beban puncak. Semakin banyak kontaminan yang terkandung dalam minyak, maka kualitas minyak akan semakin menurun dan bisa terjadi breakdown.

Karakteristik isolasi minyak transformator 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.

Dari beberapa kasus yang terjadi menunjukkan bahwa kegagalan isolasi ini berkaitan dengan adanya partial discharge. Partial discharge ini dapat terjadi pada material isolasi padat, material isolasi cair dan juga material isolasi gas. Mekanisme kegagalan pada material isolasi padat meliputi kegagalan asasi (intrinsik), elektro mekanik, streamer, termal dan kegagalan erosi. Pada material isolasi gas kegagalan terutama disebabkan oleh mekanisme Townsend dan mekanisme streamer. Sedangkan kegagalan pada material isolasi cair disebabkan oleh adanya kavitas, adanya butiran pada zat cair dan tercampurnya material isolasi cair.

2.5.2. Mekanisme Kegagalan Isolasi

Kegagalan isolasi disebabkan karena beberapa hal antara lain isolasi tersebut sudah lama dipakai, berkurangnya kekuatan dielektrik dan karena isolasi tersebut dikenakan 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 gagal.

Dalam struktur molekul material isolasi, elektron-elektron terikat erat pada molekulnya, dan ikatan ini mengadakan perlawanan terhadap tekanan yang disebabkan oleh adanya tegangan. Bila ikatan ini putus pada suatu tempat maka sifat isolasi pada tempat itu hilang. Bila pada bahan isolasi tersebut diberikan tegangan akan terjadi perpindahan elektron-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 gagal.

Kegagalan isolasi juga dapat diakibatkan oleh arus tinggi yang terus-menerus yang mengalir pada konduktor yang akan menimbulkan temperature konduktor tersebut naik. Jika pemanasan ini terjadi kontinyu dan minyak isolasi tidak bersirkulasi maka tekanan panas terus meningkat menuju titik nyala minyak isolasi tersebut.

Akibat lain dari kegagalan isolasi cair adalah adanya parsial discharge yang terjadi pada minyak isolasi pada bushing yang terus menerus, dan penurunan daya isolasi akibat oleh umur minyak isolasi tersebut akibatnya akan mengakibatkan dekomposisi. Dalam kondisi tekanan thermal dan elektrik, molekul hidrokarbon minyak mineral dapat terpecah dan membentuk hidrogen aktif dan potongan-potongan

hidrokarbon. Potongan hidrokarbon ini dapat berkombinasi satu sama lain membentuk gas, seperti hidrogen (H_2), metana (CH_4), etana (C_2H_6), etilen (C_2H_4), asetilen (C_2H_2) yang kesemuanya merupakan gas yang mudah terbakar.

Pada bagian bawah bushing transformator tenaga terdapat mantel berisolasi, yang merupakan bahan isolasi padat. Jika campuran dielektrik zat cair-padat memiliki kekuatan gagal yang berbeda beda maka jika tegangan listrik dinaikkan, akan terjadi kegagalan pada zat yang paling lemah. Hal ini dapat mengakibatkan kegagalan parsial (partial discharge). Pelepasan ini mengakibatkan pemburukan perlahan lahan karena :

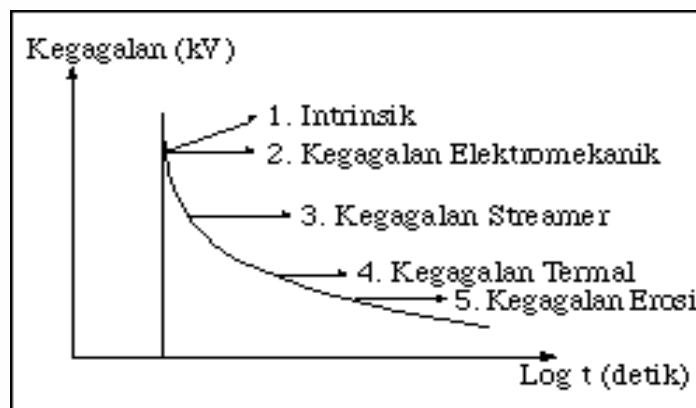
- 1). Disintegrasi dielektrik padat yang diakibatkan pemboman oleh elektron dan ion yang dihasilkan.
- 2). Aksi kimiawi pada dielektrik karena ionisasi gas
- 3). Suhu tinggi di daerah pelepasan.

Pemburukan elektro-kimiawi terjadi karena ion-ion yang dibebaskan oleh arus pada elektroda bisa menyebabkan kerusakan. Derajat kerusakan yang terjadi tergantung pada sifat ion yang terbawa dan reaksi kimia dengan ionisasi.

2.5.3. Mekanisme Kegagalan Bahan Isolasi Padat ^[3]

Mekanisme kegagalan pada bahan isolasi padat meliputi kegagalan asasi (intrinsik), elektro mekanik, streamer, thermal dan kegagalan erosi. Kegagalan pada bahan isolasi cair disebabkan oleh adanya kavitas, adanya butiran pada zat cair dan tercampurnya bahan isolasi cair. Pada bahan isolasi gas mekanisme townsend dan mekanisme streamer merupakan penyebab kegagalan. Dari uraian di atas menunjukkan bahwa kegagalan isolasi ini berkaitan dengan adanya partial discharge.

Mekanisme kegagalan bahan isolasi padat terdiri dari beberapa jenis sesuai fungsi waktu penerapan tegangannya. Hal ini dapat dilihat sebagai berikut :



Gambar 2.8.: Grafik Kegagalan Isolasi

2.5.3.1. Kegagalan Asasi (Intrinsik)

Adalah kegagalan yang disebabkan oleh jenis dan suhu bahan dengan menghilangkan pengaruh luar seperti tekanan, bahan elektroda, ketidakmurnian, kantong-kantong udara. Kegagalan ini terjadi jika tegangan yang dikenakan pada bahan dinaikkan sehingga tekanan listriknya mencapai nilai tertentu yaitu 10^6 volt/cm atau 1000 kV/cm dalam waktu yang sangat singkat yaitu 10^{-8} detik

2.5.3.2 Kegagalan Elektromekanik

Adalah kegagalan yang disebabkan oleh adanya perbedaan polaritas antara elektroda yang mengapit zat isolasi padat sehingga timbul tekanan listrik pada bahan tersebut. Tekanan listrik yang terjadi menimbulkan tekanan mekanik yang menyebabkan timbulnya tarik menarik antara kedua elektroda tersebut. Pada tegangan 1000 kV/cm menimbulkan tekanan mekanik 2 s.d 6 kg/cm². Tekanan atau tarikan mekanis ini berupa gaya yang bekerja pada zat padat berhubungan dengan Modulus

$$\text{Young} \rightarrow Y = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

$$\text{Dengan rumus Stark dan Garton} \rightarrow E_0 E_r = \frac{V^2}{2d^2} = yLn \frac{d_0}{d}$$

Jika kekuatan asasi (intrinsik) tidak tercapai pada $\frac{d_0}{d} = 0,6$, maka zat isolasi akan gagal bila tegangan V dinaikkan lagi. Jari kekuatan listrik maksimum adalah $E_d = \frac{V}{d_0} = 0,6 \sqrt{\frac{Y}{\epsilon_0 \epsilon_r}}$

Dimana :

- F : gaya yang bekerja pada zat padat,
- ΔL : pertambahan panjang zat padat
- L : panjang zat padat,
- A : pertambahan zat yang dikenai gaya,
- d_0 : tebal zat padat sebelum dikenai tegangan V,
- d : tebal setelah dikenai tegangan V dan
- $\epsilon_0 \epsilon_r$: permitivitas

2.5.3.3 Kegagalan Streamer

Adalah kegagalan yang terjadi sesudah suatu banjir (avalanche) sebuah elektron yang memasuki *band conduction* di katoda akan bergerak menuju anoda dibawah pengaruh medan memperoleh energi antara benturan dan kehilangan energi

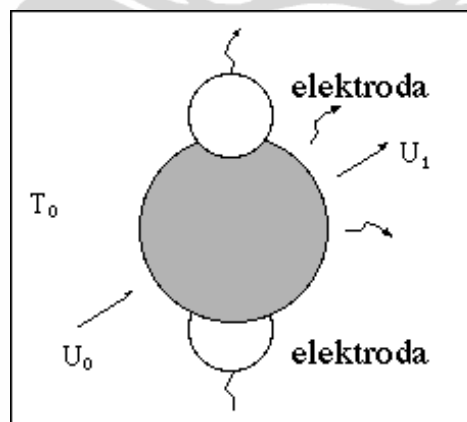
pada waktu membentur. Jika lintasan bebas cukup panjang maka tambahan energi yang diperoleh melebihi pengionisasi latis (lattice). Akibatnya dihasilkan tambahan elektron pada saat terjadi benturan. Jika suatu tegangan V dikenakan terhadap elektroda bola, maka pada media yang berdekatan (gas atau udara) timbul tegangan.

Karena gas mempunyai permitivitas lebih rendah dari zat padat sehingga gas akan mengalami tekanan listrik yang besar. Akibatnya gas tersebut akan mengalami kegagalan sebelum zat padat mencapai kekuatannya. Karena kegagalan tersebut maka akan jatuh sebuah muatan pada permukaan zat padat sehingga medan yang tadinya seragam akan terganggu.

Bentuk muatan pada ujung pelepasan ini dalam keadaan tertentu dapat menimbulkan medan lokal yang cukup tinggi (sekitar 10 MV/cm). Karena medan ini melebihi kekuatan intrinsik maka akan terjadi kegagalan pada zat padat. Proses kegagalan ini terjadi sedikit demi sedikit yang dapat menyebabkan kegagalan total.

2.5.3.4 Kegagalan termal

Adalah kegagalan yang terjadi jika kecepatan pembangkitan panas di suatu titik dalam bahan melebihi laju kecepatan pembuangan panas keluar. Akibatnya terjadi keadaan tidak stabil sehingga pada suatu saat bahan mengalami kegagalan. Gambar kegagalan ini ditunjukkan seperti :



Gambar 2.9 : Kegagalan Termal

Dalam hukum konversi energi : $U_0 = U_1 + U_2$,

Dimana : U_0 : panas yang dibangkitkan

U_1 : panas yang disalurkan keluar

U_2 : panas yang menaikkan suhu bahan

$$\text{atau } E^2 = \text{div}(\text{grad}T) + C_v \frac{dT}{dt}$$

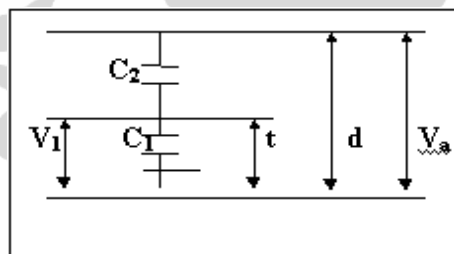
dimana : C_v : panas spesifik ;
 k : konduktivitas termal;
 δ : konduktivitas listrik
 E : tekanan listrik.

Pada arus bolak balik terdapat hubungan langsung antara konduktivitas dengan dengan frekuensi dan permitivitas yaitu : $\sigma = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ dan $\epsilon_r = E_r' + jE_r''$.
 dimana : ϵ_0 : konstanta dielektrik dan ϵ_r permitivitas relatif.

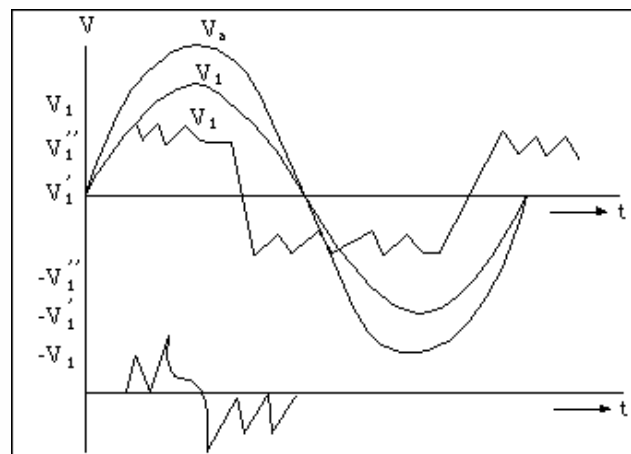
Karena adanya faktor ini, maka rugi rugi pada medan arus bolak balik lebih besar dari arus searah. Akibatnya kuat gagal thermal pada tegangan AC lebih kecil dari pada kuat gagal thermal medan arus DC. Kuat gagal thermal untuk medan bolak balik juga menurun dengan naiknya frekuensi tegangan.

2.5.3.5. Kegagalan Erosi

Adalah kegagalan yang disebabkan zat isolasi padat tidak sempurna, karena adanya lubang lubang atau rongga dalam bahan isolasi padat tersebut. Lubang/rongga akan terisi oleh gas atau cairan yang kekuatn gagalnya lebih kecil dari kekuatn zat padat. Gambar kegagalan isolasi dan rangkaian ekivalennya ditunjukkan oleh gambar dibawah ini:



Gambar 2.10. : Kegagalan erosi dan rangkaian

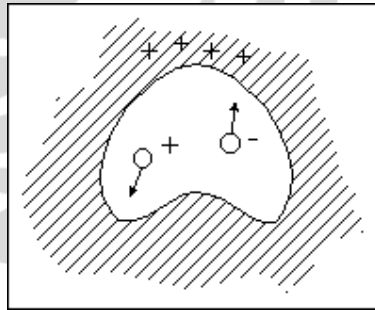


Gambar 2.11: Bentuk Gelombang rongga isolasi ekivalen padat

Untuk $t \ll d$ yang mencerminkan keadaan sebenarnya, bila rongga terisi gas, maka tegangan pada C_1 adalah $V_1 = \epsilon_r \cdot t/dt V_a$

Dimana : C_1 : Kapasitansi rongga yang tebalnya t
 C_2 : Kapasitansi rongga yang tebalnya d
 V_1 : Tegangan pada rongga
 V_a : Tegangan terminal
 ϵ_r : Permittivitas relatif zat isolasi padat

Jika tegangan AC yang dikenakan tidak menghasilkan kegagalan, maka bentuk gelombang yang terjadi pada rongga adalah V_1 , tetapi jika V_1 cukup besar, maka bisa terjadi kegagalan pada tegangan V_1' . Pada saat terjadi lucutan dengan tegangan V_1' maka pada rongga tersebut terjadi busur api. Busur api yang terjadi diiringi oleh jatuhnya tegangan sampai V_1'' dan mengalirnya arus. Busur api kemudian padam. Tegangan pada rongga naik lagi sampai terjadi kegagalan berikutnya pada tegangan V_1' . Hal ini juga terjadi pada setengah gelombang (negatif) berikutnya. Rongga akan melucut pada waktu tegangan rongga mencapai $-V_1'$. Pada waktu gas dalam rongga gagal, permukaan zat isolasi padat merupakan katoda – anoda dengan bentuk yang ditunjukkan seperti berikut:



Gambar 2.12.: Bentuk Gas dalam rongga saat mengalami kegagalan

Benturan elektron pada anoda mengakibatkan terlepasnya ikatan kimiawi pada isolasi padat tersebut. Demikian pula pemboman katoda oleh ion-ion positif akan mengakibatkan kenaikan suhu yang menyebabkan ketidakstabilan thermal, sehingga dinding zat padat lama kelamaan menjadi rusak, rongga menjadi semakin besar dan isolasi menjadi tipis. Hubungan antara tegangan lucutan dan umur dinyatakan dengan

$$L = A \left(\frac{V_i}{V_a} \right)^n$$

Dimana : V_i : tegangan dimana mulai terjadi lucutan,
 V_a : tegangan yang diterapkan
 n : nilai antara 3 dan 10 dan
 A : konstanta.

2.5.4. Mekanisme Kegagalan Isolasi Zat Cair ^[3]

Jika suatu tegangan dikenakan terhadap dua elektroda yang dicelupkan kedalam cairan (isolasi) maka terlihat adanya konduksi arus yang kecil. Jika tegangan dinaikkan secara kontinyu maka pada titik kritis tertentu akan terjadi lucutan diantara kedua elektroda. Lucutan dalam zat cair ini akan terdiri dari unsur-unsur sebagai berikut :

1. Aliran listrik yang besarnya ditentukan oleh karakteristik rangkaian
2. Lintasan cahaya yang cerah dari elektroda yang satu ke elektroda yang lain.
3. Terjadi gelembung gas dan butir butir zat padat hasil dekomposisi zat cair
4. Terjadi lubang pada elektroda

2.5.4.1. Kegagalan Elektronik Pada Zat Cair

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_n yang kemudian akan menyebabkan timbulnya arus konduksi dalam zat cair pada kuat medan yang tinggi. Arus yang timbul mempunyai kerapatan (*Schottky*) :

$$J = J_1 e^{\frac{4.44\sqrt{E}}{T}} \quad (A/cm^2), \text{ dengan } J_1 = AT^2 e^{-\phi/KT} \text{ dan } E = mE_a$$

dimana : J : kerapatan arus konduksi;
 J_1 : kerapatan arus termionik;
 E_a : kuat medan yang diterapkan;
 m : faktor ketidakrataan permukaan (=10 untuk permukaan halus)

Kondisi mulai terjadinya banjir elektron, diperoleh dengan menyamakan perolehan energi oleh elektron yang menempuh lintasan rata-rata yaitu $U_1 = F \lambda = e E \lambda$, dengan energi untuk mengionisasi molekul $U_2 = C.h$

dimana : E : kuat medan yang diterapkan.
 λ : lintasan bebas rata rata,
 h : catu (*kuantum*) energi untuk mengionisasikan molekul
 C : konstanta.

2.5.4.2. Kegagalan Gelembung Atau Kavitasasi Pada Zat Cair

Kegagalan gelembung atau kavitasasi merupakan bentuk kegagalan isolasi zat cair yang disebabkan oleh gelembung-gelembung gas didalamnya. Sebab sebab timbulnya gelembung gas (*Kao dan Krasucki*) adalah :

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

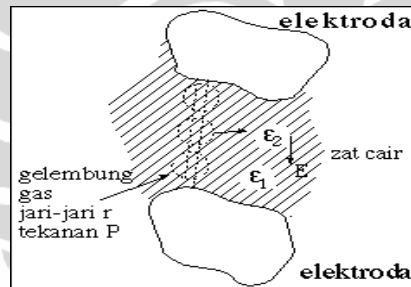
Medan listrik dalam gelembung gas yang ada dalam isolasi zat cair

$$E_b = \frac{3\varepsilon_1 E_0}{2\varepsilon_1 + 1}$$

dimana ε_1 adalah permitivitas zat cair dan E_0 adalah medan listrik

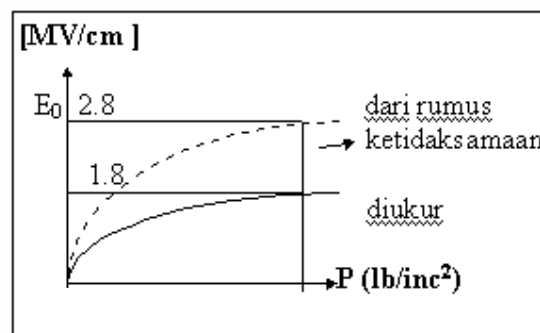
dalam zat cair tanpa gelembung.

Bila E_b sama dengan batas medan ionisasi gas, maka akan terjadi lucutan pada gelembung. Hal ini akan mempercepat pembentukan gas karena dekomposisi zat cair dan dapat mengakibatkan kegagalan isolasi. Bentuk pengaruh medan terhadap gelembung udara ditunjukkan pada gambar-2.10.



Gambar 2.13: Pengaruh Medan terhadap gelembung udara

Karena pengaruh medan yang kuat diantara elektroda maka gelembung gelembung udara dalam cairan tersebut akan berubah menjadi memanjang searah dengan medan. Gelembung-gelembung tersebut akan saling sambung menyambung dan membentuk jembatan yang akhirnya akan mengawali terjadinya kegagalan seperti dalam gambar:



Gambar 2.14: Kekuatan gagal medan gelembung

Kekuatan gagal medan gelembung adalah :

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

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
 φ : adalah gaya tegang (tension) permukaan zat cair.

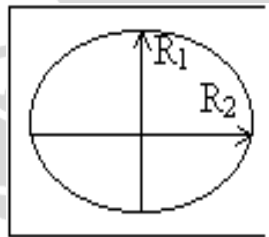
2.5.4.3. Kegagalan Bola Cair Dalam Zat Cair

Jika suatu zat isolasi cair mengandung sebuah bola cair atau jenis cairan lain, maka dapat terjadi kegagalan akibat ketidakstabilan bola cair tersebut dalam medan listrik. 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 :

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1 E}{\varepsilon_1 - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)G} \text{ dimana } G = \frac{1}{\gamma^2 - 1} \left(\frac{\gamma \cdot \text{Cosh} - 1 \cdot \gamma}{(\gamma^2 - 1)^{1/2}} - 1 \right) \text{ dan } \gamma = \frac{R_2}{R_1}$$

ε_1 : permitivitas zat cair isolasi

ε_2 : adalah permitivitas zat cair



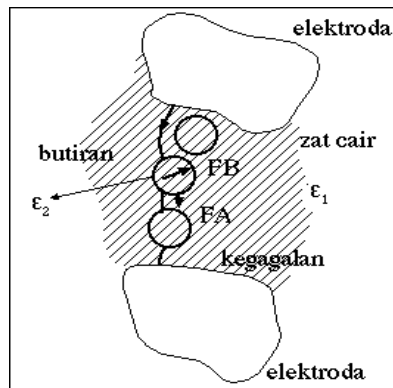
Gambar 2.15.: Medan listrik bentuk sferoida

2.5.4.4. Kegagalan Butiran Padat Dalam Zat Cair

Kegagalan ini disebabkan oleh adanya butiran (particle) didalam bahan isolasi yang akan menyebabkan terjadinya kegagalan seperti yang ditunjukkan dalam gambar di bawah. Besar gaya yang bekerja pada butiran dalam medan tak homogen (Kok):

$$F = R^3 \varepsilon_1 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} E \cdot \text{grad} \cdot E$$

dimana : R : jari jari butiran dan E : gradien tegangan



Gambar 2.16.: Kegagalan butiran Padat

Jika $\epsilon_2 > \epsilon_1$, maka arah gaya yang bekerja pada butiran searah dengan tekanan listrik maksimum (F_A) sehingga gaya akan mendorong butiran ke arah 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 $\epsilon_2 \rightarrow \infty$ sehingga $F = 1/2 R^3 \text{ grad}.E^2$.

Untuk medan yang seragam, medan paling kuat ditempat yang seragam, disini $\text{grad}.E^2 = 0$. 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.

2.5.4.5. Kegagalan Campuran Zat Cair-Padat

Kegagalan isolasi cair-padat (isolasi kertas dicelup dalam minyak) biasanya disebabkan oleh pemburukan. Pemburukan yang dapat menyebabkan kegagalan isolasi cair-padat adalah pemburukan karena pelepasan dalam (internal discharge) dan pemburukan elektro-kimiawi.

Jika campuran dielektrik zat cair-padat memiliki kekuatan gagal yang berbeda-beda maka jika tegangan listrik dinaikkan, akan terjadi kegagalan pada zat yang paling lemah. Hal ini dapat mengakibatkan kegagalan parsial (partial discharge). Pelepasan ini mengakibatkan pemburukan perlahan-lahan karena :

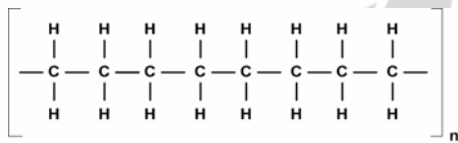
1. Disintegrasi dielektrik padat yang diakibatkan pemboman oleh elektron dan ion yang dihasilkan.
2. Aksi kimiawi pada dielektrik karena ionisasi gas.
3. Suhu tinggi di daerah pelepasan.

Pemburukan elektro-kimiawi terjadi karena ion-ion yang dibebaskan oleh arus pada elektroda bisa menyebabkan kerusakan. Derajat kerusakan yang terjadi tergantung pada sifat ion yang terbawa dan reaksi kimia dengan ionisasi. Kerusakan bisa terjadi pada tegangan DC maupun AC.

2.6. Karakteristik Minyak Isolasi

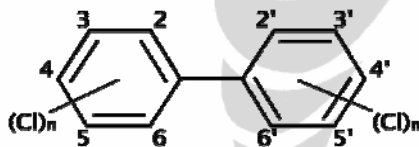
Minyak yang digunakan untuk isolasi pada transformator tenaga biasanya adalah minyak mineral (*liquid petrolatum*) hasil destilasi dari minyak bumi.

Rumus Kimia Minyak Mineral



Rumus kimia

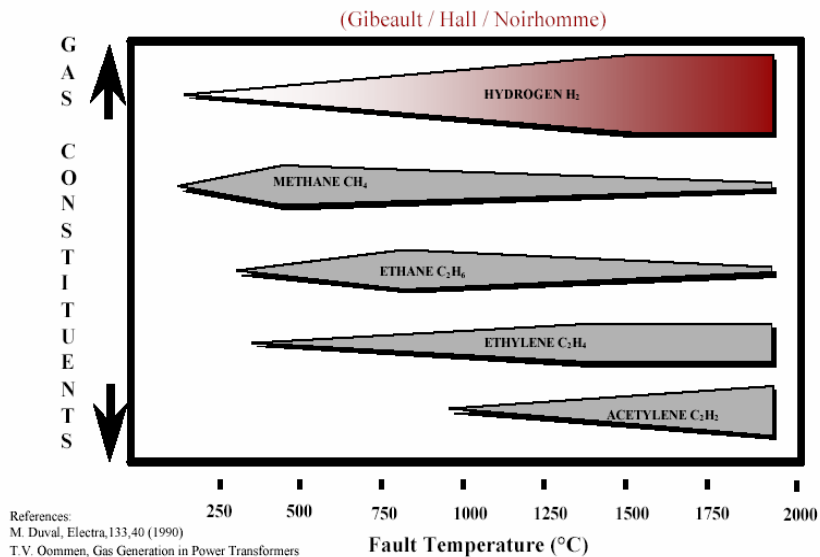
PCB (*poly chlorinated biphenyl*)



Pada Kondisi Normal ($t = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $p = 1\text{ atm}$)

- $\text{CH}_4 - \text{C}_4\text{H}_{10}$ → gas
- $\text{C}_5\text{H}_{12} - \text{C}_{17}\text{H}_{36}$ → cair
- $\text{C}_{18}\text{H}_{38} - \dots\dots\dots$ → padat

Thermal stress characteristic Minyak Mineral



Gambar 2.17.: Karakteristik tekanan thermal minyak mineral
 Studi gangguan..., M. Solikhudin, FT UI, 2010. Universitas Indonesia

Model Termodinamika Halstead

- Pada model tersebut, kecepatan perubahan gas dapat dihitung pada setiap temperatur, sehingga hubungan antara gas yang muncul dan temperatur dapat diperoleh untuk masing-masing gas.
- Gas yang dihasilkan sejalan dengan meningkatnya temperatur : $H_2 - CH_4 - C_2H_6 - C_2H_4 - C_2H_2$
- Hidrogen (H_2) dihasilkan pada temperatur rendah dan jumlahnya terus meningkat
- Asetilen (C_2H_2) muncul pada temperatur yang sangat tinggi (sekira $1000^\circ C$) dan terus meningkat

2.6.1. Mekanisme Pembentukan Gas

2.6.1.1. Pembentukan Gas Akibat Dekomposisi Minyak

Dalam kondisi tekanan thermal dan elektrik, molekul hidrokarbon minyak mineral dapat terpecah dan membentuk hidrogen aktif dan potongan-potongan hidrokarbon. Potongan hidrokarbon ini dapat berkombinasi satu sama lain membentuk gas, seperti hidrogen (H_2), metana (CH_4), etana (C_2H_6), etilen (C_2H_4), asetilen (C_2H_2). Gas-gas tersebut terbentuk larut dalam minyak dan terakumulasi sebagai gas bebas jika pembentukannya dalam jumlah besar dan waktu yang cepat.

Banyaknya setiap gas tergantung dari temperatur pada stressed point di sekitarnya. Hubungan antara temperatur fault dan karakteristik gassing dimodelkan secara termodinamik oleh Halstead, dengan asumsi seluruh hidrokarbon pada minyak terpecah menjadi produk dan setiap produk setimbang satu sama lain.

2.6.1.2. Pembentukan Gas Akibat Dekomposisi Isolasi Kertas

Saat terjadi dekomposisi minyak akibat panas, isolasi selulosa menghasilkan CO & CO_2 dan beberapa H_2 dan CH_4 dalam minyak. Tingkat seberapa besar senyawa yang dibentuk tergantung suhu dan volume material pada suhu tersebut.

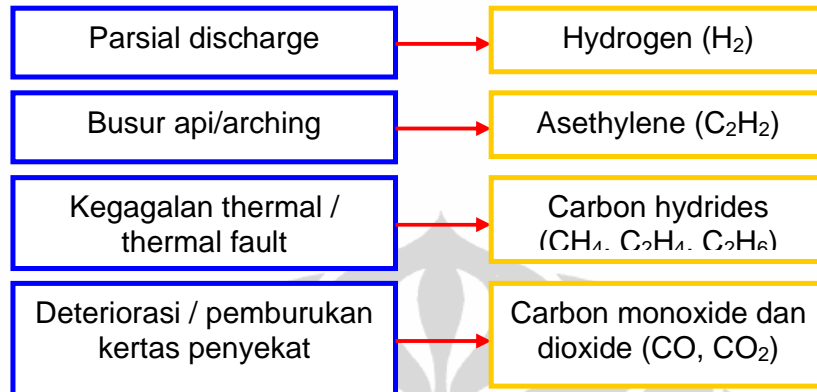
2.6.1.3. Pembentukan Gas Akibat Proses Over Heating

Bila selulosa/kertas dipanaskan dengan over heating (paling rendah $140^\circ C$) dalam sistem tertutup sesuai dengan kondisi transformator, maka terjadi penguraian selulosa menjadi gas karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO_2) dan H_2O .

2.6.1.4. Pembentukan Gas Akibat Proses Pirolisis

Bila selulosa dipanaskan sampai terurai dengan proses pirolisis dan temperatur diatas $250^\circ C$ dalam sistem tertutup, maka akan terbentuk lebih banyak karbon

monoksida (CO) dari pada karbon dioksida (CO₂) dengan jumlah kira-kira CO lebih besar empat kali dari CO₂.

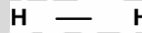


Gambar 2.18 : Penyebab dan gas yang timbul dalam minyak isolasi

2.6.2. Sifat Fisika Dan Kimia Gas

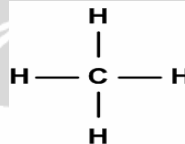
1. H₂

- Berbentuk gas
- BM : 1,00794
- Mudah terbakar dan meledak
- MP : - 259,2 °C (13,96 °K)
- BP : - 252,77 °C (20,39 °K)



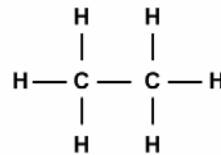
2. CH₄

- Berbentuk gas
- BM : 16,04
- Mudah terbakar
- MP : -182,6 °C
- BP : -161,4 °C
- BJ : 0,717 kg/m²



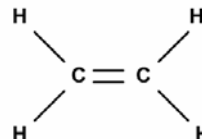
3. C₂H₆

- Berbentuk gas
- BM : 30,07
- Mudah terbakar
- MP : -172 °C
- BP : -88 °C
- BJ : 1,212 kg/m²



4. C₂H₄

- Berbentuk gas
- BM : 28,05
- Mudah terbakar
- MP : -169,4 °C
- BP : -102,4 °C
- BJ : 1,178g/L



5. C₂H₂

- Berbentuk gas
- BM : 26,04
- Mudah terbakar
- MP : -84 °C
- BP : -80,8 °C
- BJ : 1,09670 kg/m²



6. Sumber Oksigen (O₂)

- Secara teoritis, tidak mungkin menghilangkan O₂ dalam minyak transformator meskipun telah dilakukan proses vakum. Sisa yang mungkin ada sekitar 0,25%^[11].
- Kebocoran pada seal.

2.7. Partial Discharge^[5]

IEC Standard, IEC 60270 [12] menyatakan partial discharge adalah “*a localised electric discharge that only partially bridges the insulation between conductors and which may or may not occur adjacent to a conductor*” merupakan peluahan listrik secara local yang menghubungkan secara parsial atau sebagian dari isolasi diantara konduktor dan yang terjadi baik dipermukaan maupun didalam.

Parsial discharge (peluahan parsial) adalah peristiwa/loncatan bunga api listrik yang terjadi pada suatu bagian isolasi (pada rongga dalam atau pada permukaan) sebagai akibat adanya beda potensial yang tinggi dalam isolasi tersebut. Partial discharge dapat terjadi pada bahan isolasi padat, bahan isolasi cair dan bahan isolasi gas. Partial discharge berupa bunga api listrik kecil yang terjadi dalam isolasi listrik. Partial discharge dapat terjadi pada isolasi pada switchgear, kabel, transformator dan belitan dalam motor dan generator besar.

Partial discharges merupakan akibat dari konsentrasi *electrical stress* pada satu lokasi didalam atau pada permukaan isolasi. Secara umum discharges terlihat sebagai pulsa/sinyal dengan durasi jauh lebih kecil dari 1μs. Bentuk yang lebih kontinyu mungkin terjadi, seperti contoh yang biasa dikenal sebagai *pulse-less discharges* pada dielektrik gas. Partial discharge biasanya dibarengi oleh adanya emisi suara, cahaya, panas dan reaksi kimia.

Seperti halnya setiap material memiliki karakteristik kekuatan tarik, masing-masing material juga memiliki kekuatan dielektrik yang mewakili intensitas listrik yang diperlukan untuk arus mengalir dan pelepasan listrik. Bahan-bahan isolasi seperti epoxy, polyester, dan polietilen mempunyai kekuatan dielektrik yang sangat tinggi. Sebaliknya, memiliki kekuatan dielektrik relatif rendah. Kegagalan listrik di udara

menyebabkan arus listrik mengalir sangat cepat (hanya bertahan sepersekian nanodetik) melalui kantong udara. Pengukuran PD adalah, pada kenyataannya, adalah pengukuran arus bocor.

Peralatan listrik dapat mengalami cacat manufaktur cacat atau masalah-masalah yang mengganggu operasi dan keandalan peralatan. Isolasi rentan terhadap thermal stress, abrasi karena gerakan kumparan yang berlebihan. Dalam semua kasus, ini akan melemahkan menekankan sifat ikatan atau polyester epoxy resin yang mantel dan melindungi belitan transformator tenaga, akibatnya kantong udara berkembang pada belitan.

Tingkat Parsial discharge yang lebih besar menyebabkan proses kerusakan lebih cepat. Busur api yang berlebihan antara tanah dan konduktor dalam isolasi akan membahayakan kekuatan dielektrik dan integritas mekanis isolasi belitan. Jika maka gangguan tanah atau gangguan antar fase tidak dapat dihindari.

2.7.1. Analisa Parsial Discharge

Analisa parsial discharge adalah suatu pendekatan diagnostik proaktif yang menggunakan pengukuran parsial discharge, untuk mengevaluasi keutuhan/integritas peralatan. Setiap diskrit parsial discharge hasil dari kegagalan listrik pada kantong udara didalam isolasi. Pengukuran parsial discharge dapat dilakukan secara terus-menerus atau sesekali dan dapat dideteksi pada saat on-line atau of-line. Hasil pengukuran parsial discharge digunakan untuk memprediksi dengan tepat peralatan listrik yang mana yang perlu dipelihara.

Analisa parsial discharge adalah suatu pendekatan diagnostic proaktif yang menggunakan pengukuran parsial discharge untuk mengevaluasi kemampuan dari suatu peralatan.

Partial discharge yang merupakan peristiwa pelepasan/loncatan bunga api listrik pada suatu bagian dari bahan isolasi padat kemungkinan terjadinya meliputi pada :

- Rongga terhubung langsung pada elektroda
- Rongga dalam isolasi
- Rongga yang dipisahkan oleh elektroda
- Permukaan elektroda
- Titik elektroda yang berbentuk kanal
- Rongga isolasi yang berbentuk kanal

2.7.2. Pengukuran Parsial Discharge ^[6]

Pengukuran partial discharge pada peralatan tegangan tinggi merupakan hal yang sangat penting karena dari data-data yang diperoleh dan interpretasinya dapat ditentukan reability suatu peralatan yang disebabkan oleh faktor penuaan (agging) dan resiko kegagalannya dapat dianalisa.

Mendeteksi partial discharge dalam isolasi dan belitan transformator tenaga atau instrumen transformer (CT & PT) adalah suatu pembuktian dengan baik dengan monitoring emisi akustik (emission acoustic). Pelepasan disebabkan oleh loncatan listrik, yang mana bahan dielektrik cair menguap dalam jalur pelepasan, menciptakan efek gelembung kavitasi. Semburan tiba-tiba dari energi akustik dikirim oleh cairan menuju dinding luar, di mana sebuah sensor emisi akustik sensitif dapat menangkap mereka. AED-2000 adalah alat ideal untuk aplikasi ini, menggabungkan ambang batas kejadian dan menghitung hasil pengukuran, bersama dengan dimodulasi audio output. Rentang frekuensi yang ideal telah ditentukan dari studi sebelumnya untuk menjadi 100-200 kHz. Sebuah Model i150 sensor (150 kHz) akan tunjukkan ditempelkan pada dinding transformator dengan Model AEC MAG-1 magnet ^[13]



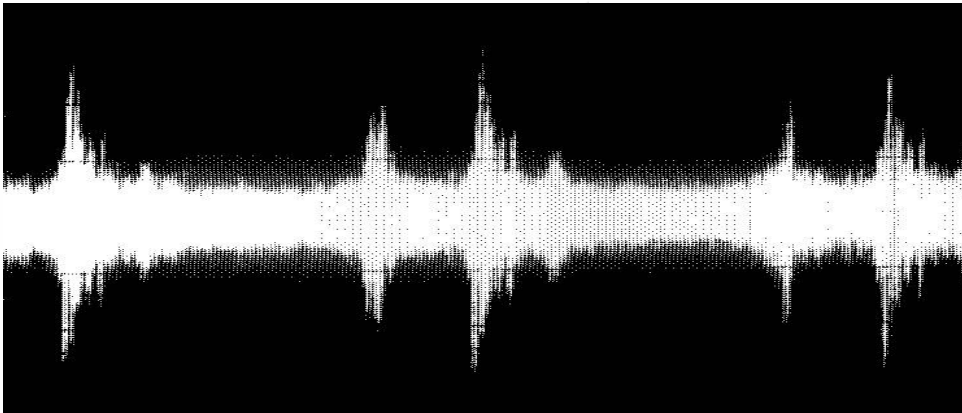
Gambar 2.19: Pengukuran parsial discharge pada saat on-line, dengan AED-2000

Karena sinyal induksi akustik akan mengirimkan sejumlah kaki di dinding sebelum menjadi benar-benar dilemahkan, lokasi sumber harus ditentukan dengan menyelidik di beberapa lokasi di pola pencarian sampai sinyal terkuat diperoleh (count rate tertinggi). Sebuah program pemeliharaan rutin mungkin termasuk rekaman

pembacaan pada lokasi standar pada bodi bagian luar transformator. AED-2000 dapat menyimpan bacaan-bacaan ini untuk kemudian meng-upload ke database komputer.

Kadang-kadang parsial discharge terjadi pada kondisi tertentu atau hanya di bawah kondisi beban tinggi. AED-2000 dapat digunakan secara terus-menerus Log pembacaan ke komputer melalui interface serial port.

Pelepasan biasanya terjadi dalam pola teratur yang terkait dengan 60-cycle gelombang AC ditunjukkan seperti pada gambar osiloskop di bawah ini :



Gambar 2.20.: Hasil pengukuran monitor yang mendeteksi adanya parsial discharge



Gambar 2.21.: Pengukuran parsial discharge pada saat on-line, dengan ultrasound instrumen

Pengukuran parsial discharge perlu dilakukan secara periodik. Data hanya satu tidak bermakna, karena setiap alat uji masing-masing mempunyai karakteristik dan ketelitian yang berbeda-beda. Pengukuran yang periodik akan mengetahui

perkembangan penurunan kondisi isolasi dari waktu ke waktu, sehingga langkah-langkah untuk mengatasinya dapat dilakukan untuk mencegah terjadinya gangguan.

2.8. Tangen Delta

Salah satu metode untuk mengetahui proses pemburukan isolasi adalah dengan pengujian tangen delta.”

Isolasi transformator tenaga merupakan bahan dielektrik yang berfungsi untuk memisahkan dua bagian yang bertegangan, misalnya antara kumparan dengan tangki transformator tenaga. Transformator tenaga dengan isolasinya dapat dimodelkan sebagai rangkaian kapasitor yang paralel dengan resistor. Kapasitor yang sempurna apabila dicatu tegangan bolak balik maka arusnya akan tertinggal sebesar 90 derajat terhadap tegangannya, tetapi karena adanya disipasi daya (dimodelkan sebagai resistor R) maka beda sudut antara arus dan tegangannya lebih kecil dari 90 derajat.

Daya yang terdisipasi pada resistor dapat dinyatakan dengan :

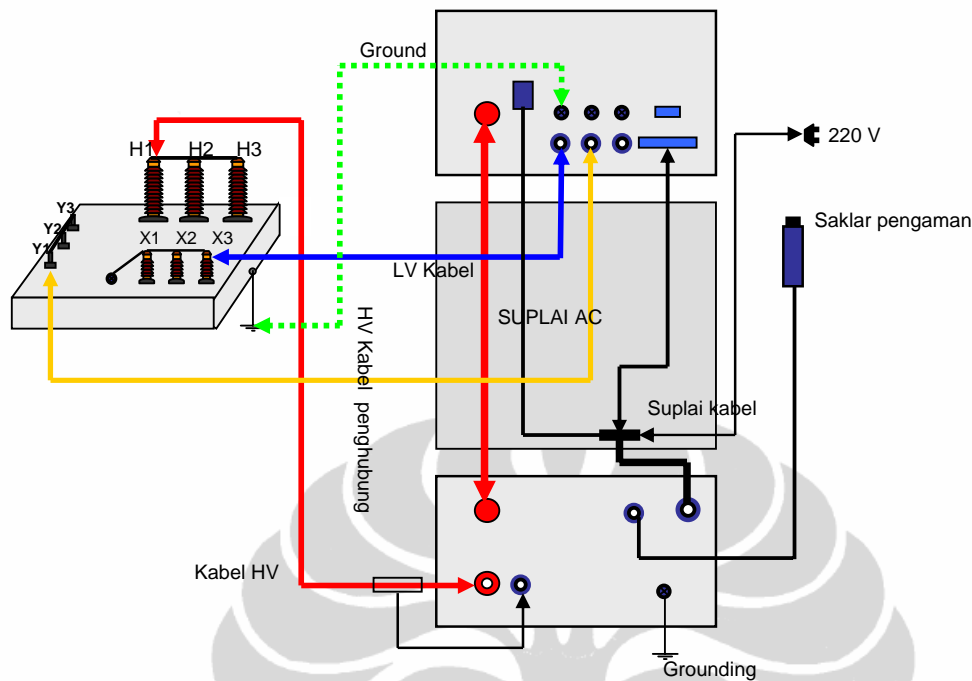
$$PD = I^2 \cdot R = V \cdot I \cos \phi = V \cdot I \sin \delta = V \cdot \omega \cdot C \cdot V \cdot \sin \delta / \cos \delta$$

$$PD = V^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \tan \delta$$

Tan δ menyatakan faktor rugi – rugi daya, besaran inilah yang menjadi indikasi besarnya daya yang terdisipasi, semakin besar nilai tangen delta maka semakin besar daya yang terdisipasi yang berarti kualitas isolasi semakin buruk.

2.8.1. Pengukuran/Pengujian Tangen Delta

Pengujian tangen delta transformator dapat menggunakan beberapa alat antara lain tettec dan alat uji tangen delta megger 2000. Langkah awal sebelum melakukan pengujian adalah bebaskan transformator dari tegangan dengan melepas sambungan ke busbar, kemudian pasang pentanahan temporer pada transformator agar proses pengujian berjalan aman. Bersihkan bushing dan hubung singkat antar terminal primer, sekunder dan tersier dengan menggunakan bare konduktor atau kabel lurus. Berikut ini rangkaian untuk pengujian transformator tiga fasa dengan salah satu alat uji itu.



Gambar 2.22 : Rangkaian pengujian tangen delta

Untuk menginterpretasikan hasil ujinya maka berdasarkan standar ANSI C 57.12.90 adalah sebagai berikut

- Kurang dari 0,5% → Baik
- 0,5% s/d 0,7% → kualitas isolasi memburuk/menurun
- 0,5% s/d 1,0% → Investigasi
- Di atas 1,0% → Tidak baik

2.9. Pemeliharaan Peralatan Listrik Tegangan Tinggi

Pemeliharaan bukanlah suatu pekerjaan yang luar biasa, akan tetapi harus dilakukan secara baik dan tepat serta mengikuti petunjuk yang sesuai, sehingga peralatan akan menampilkan keandalan yang tinggi dengan biaya yang wajar. Oleh karena itu masalah pemeliharaan ini perlu mendapat perhatian yang sesuai.

Pemeliharaan peralatan listrik tegangan tinggi adalah serangkaian tindakan atau proses kegiatan untuk mempertahankan kondisi dan meyakinkan bahwa peralatan dapat berfungsi sebagaimana mestinya sehingga dapat dicegah terjadinya gangguan yang menyebabkan kerusakan.

Tujuan pemeliharaan peralatan listrik tegangan tinggi adalah untuk menjamin kontinuitas penyaluran tenaga listrik dan keandalannya, antara lain :

- a. Untuk meningkatkan reliability, availability dan efficiency.
- b. Untuk memperpanjang umur atau masa guna peralatan.

- c. Mengurangi resiko terjadinya kegagalan atau kerusakan peralatan.
- d. Meningkatkan Safety peralatan.
- e. Mengurangi lama waktu padam akibat sering gangguan.
- f. Aman terhadap petugas dan lingkungan

Peralatan dalam sistem perlu dipelihara secara periodik sesuai dengan buku petunjuk pemeliharaan yang dikeluarkan oleh pabrik peralatan yang bersangkutan. Namun di lain pihak pemeliharaan peralatan yang menyebabkan peralatan tersebut menjadi tidak siap operasi dalam sistem perlu dikoordinir agar penyediaan daya dalam sistem selalu memenuhi kebutuhan beban + rugi-rugi. Sementara itu cadangan daya harus cukup tinggi hal ini untuk menjamin tersedianya daya pembangkit yang cukup tinggi dalam sistem. Cadangan daya ini merupakan ukuran keandalan.

Faktor yang paling dominan dalam pemeliharaan peralatan listrik tegangan tinggi adalah pada sistem isolasi. Isolasi disini meliputi isolasi padat dan isolasi cair (minyak). Suatu peralatan akan sangat mahal bila isolasinya sangat bagus, dari demikian isolasi merupakan bagian yang terpenting dan sangat menentukan umur dari peralatan. Untuk itu kita harus memperhatikan/memelihara sistem isolasi sebaik mungkin, baik terhadap isolasinya maupun penyebab kerusakan isolasi.

Dalam pemeliharaan peralatan listrik tegangan tinggi kita membedakan antara pemeriksaan/monitoring (melihat, mencatat, meraba serta mendengar) dalam keadaan operasi dan memelihara (kalibrasi/pengujian, koreksi/*resetting* serta memperbaiki/membersihkan) dalam keadaan padam.

Pemeriksaan atau *monitoring* dapat dilaksanakan oleh operator atau petugas patroli setiap hari dengan sistem *check list* atau catatan saja. Sedangkan pemeliharaan harus dilaksanakan oleh regu pemeliharaan.

2.9.1. Jenis-Jenis Pemeliharaan.

Jenis-jenis pemeliharaan peralatan adalah sebagai berikut :

- (1) **Predictive Maintenance (*Conditional Maintenance*)** adalah pemeliharaan yang dilakukan dengan cara memprediksi kondisi suatu peralatan listrik, apakah dan kapan kemungkinannya peralatan listrik tersebut menuju kegagalan. Dengan memprediksi kondisi tersebut dapat diketahui gejala kerusakan secara dini. Cara yang biasa dipakai adalah memonitor kondisi secara online baik pada saat peralatan beroperasi atau tidak beroperasi. Untuk ini diperlukan peralatan dan personil khusus untuk analisa. Pemeliharaan ini disebut juga pemeliharaan berdasarkan kondisi (*Condition Base Maintenance*).

- (2) **Preventive Maintenance (Time Base Maintenance)** adalah kegiatan pemeliharaan yang dilaksanakan untuk mencegah terjadinya kerusakan peralatan secara tiba-tiba dan untuk mempertahankan unjuk kerja peralatan yang optimum sesuai umur teknisnya. Kegiatan ini dilaksanakan secara berkala dengan berpedoman kepada : Instruction Manual dari pabrik, standar-standar yang ada (IEC, CIGRE, IEEE, dll) dan pengalaman operasi di lapangan. Pemeliharaan ini disebut juga dengan pemeliharaan berdasarkan waktu (*Time Base Maintenance*).
- (3) **Corrective Maintenance** adalah pemeliharaan yang dilakukan dengan berencana pada waktu-waktu tertentu ketika peralatan listrik mengalami kelainan atau unjuk kerja rendah pada saat menjalankan fungsinya dengan tujuan untuk mengembalikan pada kondisi semula disertai perbaikan dan penyempurnaan instalasi. Pemeliharaan ini disebut juga Curative Maintenance, yang bisa berupa Trouble Shooting atau penggantian part/bagian yang rusak atau kurang berfungsi yang dilaksanakan dengan terencana.
- (4) **Breakdown Maintenance** adalah pemeliharaan yang dilakukan setelah terjadi kerusakan mendadak yang waktunya tidak tertentu dan sifatnya darurat. Pelaksanaan pemeliharaan peralatan dapat dibagi 2 macam :
- Pemeliharaan yang berupa monitoring dan dilakukan oleh petugas operator atau petugas patroli bagi Gardu Induk yang tidak dijaga (GITO – Gardu Induk Tanpa Operator).
 - Pemeliharaan yang berupa pembersihan dan pengukuran yang dilakukan oleh petugas pemeliharaan.

2.9.2. Pemeliharaan Transformator Tenaga.

Transformator tenaga merupakan bagian yang sangat penting dalam jaringan tenaga listrik. Peralatan ini perlu untuk dijaga kondisinya agar dapat beroperasi secara optimal.

- Pemeliharaan transformator yang berupa monitoring dan dilakukan oleh petugas operator setiap hari untuk Gardu Induk yang dijaga atau petugas patroli pada Gardu Induk yang tidak dijaga dan dilaksanakan setiap minggu (Jadwal Mingguan) dalam keadaan operasi.
- Pemeliharaan transformator yang berupa monitoring dan dilakukan oleh petugas Pemeliharaan setiap bulan untuk Gardu Induk yang dijaga maupun Gardu Induk yang tidak dijaga.

- (3) Pemeliharaan transformator yang berupa pemeriksaan, pengukuran dan pengujian dan dilakukan oleh petugas Pemeliharaan setiap tahun untuk Gardu Induk yang dijaga maupun Gardu Induk yang tidak dijaga.

2.9.3. Pemeliharaan Minyak Transformator

Salah satu bagian penting yang dapat menggambarkan kondisi transformator secara keseluruhan adalah peralatan isolasi. Peralatan isolasi transformator terdiri dari isolasi cair (minyak) dan isolasi padat (kertas). Fungsi utama minyak isolasi transformator adalah sebagai media isolasi baik antar belitan maupun antara belitan ke body/ground, sebagai media pendingin belitan transformator, sebagai media pemadam saat terjadi arcing dan minyak juga melarutkan gas gas hasil dari proses pemburukan minyak dan isolasi kertas.

2.9.3.1 Pengujian Karakteristik Minyak Isolasi

Untuk mengetahui kualitas isolasi minyak transformator dilakukan pengujian karakteristik antara lain: pengujian tegangan tembus minyak (Breakdown voltage), pemeriksaan penampakan warna (Appearance colour), pengujian tegangan antar permukaan (interfacial tension/IFT), pengujian kandungan air dalam minyak (water content), pengukuran nilai kenetralan (neutralization value/NN), pengujian titik nyala (flash point), dan pengukuran endapan/sediment (sludge).

(1) Tegangan Tembus Minyak (Breakdown Voltage)

Merupakan pengujian untuk mengetahui pada tegangan berapa isolasi minyak transformator mengalami breakdown.

(2) Warna

Pengujian warna digunakan untuk mendeteksi kecepatan penurunan atau kontaminasi yang serius. Tingkat warna mengindikasikan kadar karbon, partikel isolasi dan material terlarut dalam minyak. Karbon terbentuk pada waktu timbul partial discharge maupun arcing. partikel-partikel dapat berupa furan maupun hasil oksidasi.

(3) 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).

(4) *Kandungan air dalam minyak (Water content)*

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

(5) *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 :

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

(6) *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. Minyak yang bagus mempunyai nilai flash point tinggi.

(7) *Sludge.*

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

2.9.4. Pengujian DGA Dan Analisanya

Kondisi paling kritis seputar minyak transformator adalah bila minyak transformator timbul gas. DGA adalah media deteksi terbaik untuk melihat ketidaknormalan ini. Ini dapat mengarahkan kita untuk mengetahui interpretasi dari komposisi gas-gas tersebut dan jenis gangguan apa yang muncul. Pengujian DGA sangat penting untuk mengetahui kondisi isolasi transformator, setiap hasil uji DGA harus dibandingkan dengan data sebelumnya, jadi kecenderungannya dapat dikenali dan peningkatannya dapat ditentukan.

Interpretasi analisa gas dalam pengujian DGA meliputi gangguan thermal, gangguan elektrik (low intensity discharge dan high intensity arcing).

1. *Gangguan Thermal*

Pemburukan minyak isolasi pada suhu 150°C sampai 500°C menghasilkan rata-rata molekul gas ringan dalam jumlah besar seperti H₂ (Hidrogen) dan CH₄ (methane) dan sedikit molekul gas yang lebih berat C₂H₄ (ethylene) dan C₂H₆ (ethane). Ratio CO₂/CO kadang digunakan sebagai indikator dalam pemburukan akibat panas pada kertas selulosa. Ratio ini normalnya lebih dari tujuh. Untuk rasio CO₂/CO nilai masing-masing harus melebihi 5000 ppm untuk CO₂ dan 500 ppm untuk CO. Saat jumlah CO meningkat maka rasio CO₂/CO berkurang. Ini dapat mengindikasikan sebuah ketidaknormalan berupa penurunan isolasi selulosa/kertas.

2. *Gangguan Elektrik – Low Intensity Discharges*

Low intensity discharges seperti partial discharges dan arcing level rendah pada umumnya menghasilkan hidrogen

3. *Gangguan elektrik – High intensity Arcing*

Saat elektrik discharge mencapai kondisi Arcing atau bagian discharge berkelanjutan suhu bias mencapai 700 °C– 1800 °C kehadiran acetylene sangatlah tegas

2.9.5. Pengujian Furan ^[15]

Pengujian furan adalah metode untuk mendeteksi tingkat kerusakan pada isolasi kertas. Nilai kandungan furan dalam minyak, digunakan sebagai acuan untuk menghitung estimasi sisa umur. Pengujian furan dilakukan jika:

- Akumulasi gas CO dan CO₂ melebihi batas normal, yang mengindikasikan telah terjadi kerusakan pada isolasi kertas.
- Hasil pengujian rasio pertambahan CO₂/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 :

1. 5H2F (5 hidroksimetil 2 furaldehid) yang disebabkan oleh oksidasi.
2. 2FOL (2 fulfuro) disebabkan kandungan air yang tinggi pada kertas.
3. 2FAL (2 furaldehid) disebabkan oleh pemanasan berlebih.
4. 2ACF (2 Asetilfuran) disebabkan oleh petir.
5. 5M2F (5 Metil 2 Furaldehid) disebabkan oleh hotspot pada belitan.

Pada isolasi yang bagus, seharusnya jumlah keseluruhan furan yang terdeteksi kurang dari 100 parts per billion (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 transformator 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 transformator adalah kandungan gas oksigen. Gas ini sangat berbahaya karena menimbulkan oksidasi di dalam transformator. 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 parts per million (ppm) akan mempercepat pemburukan kondisi kertas. Minyak harus di-treatment apabila kandungan oksigen mencapai 10.000 ppm.

Dari informasi besarnya kandungan gugus furan, besarnya 2Fal (2-furfural) yang terdeteksi, dapat diketahui estimasi atau perkiraan kondisi DP yang dialami isolasi kertas dan estimasi sisa umur daripada kertas isolasi tersebut (Estimated percentage of remaining life – %EPRL).

Rumus perhitungan estimasi DP & %EPRL :

$$DP = \frac{[\text{Log}_{10}(2Fal_{ppb} * 0,88) - 4,51]}{-0,0035}$$

$$\%Eprl = 100 - \left\{ \frac{[\text{Log}_{10}(DP) - 2,903]}{-0,00602} \right\}$$

Bila nilai 2 Fal yang diketahui dari hasil pengujian furan diolah berdasarkan perhitungan diatas, maka akan didapat estimasi DP & %EPRL.

2.9.6. Pengujian Corrosive Sulfur ^[16]

Salah satu komponen vital dalam menentukan keberlangsungan operasi peralatan tegangan tinggi seperti transformator tenaga adalah sistem isolasinya. Salah satu yang dapat menurunkan kualitas isolasi kertas pada transformator adalah corrosive sulfur yang terkandung di dalam minyak isolasi transformator.

Corrosive sulfur adalah senyawa sulfur yang bersifat tidak stabil terhadap suhu yang berada di minyak isolasi yang dapat menyebabkan korosi pada komponen tertentu dari transformator seperti tembaga dan perak.

Senyawa sulfur yang terkandung di dalam minyak isolasi saat bersentuhan dengan **Tembaga (Cu)** maka akan bereaksi dengan tembaga (Cu) dari belitan transformator tersebut. Tidak memerlukan panas dalam reaksi tersebut, namun dengan adanya peningkatan suhu maka reaksi akan lebih tegas. Reaksi ini akan menghasilkan **Copper Sulfide**. Copper sulfide akan terbentuk dipermukaan tembaga dan meresap ke dalam lapisan isolasi kertas yang membungkus belitan transformator. Karena sifat dari copper sulfide adalah konduktif maka semakin banyak senyawa tersebut terbentuk maka akan semakin banyak juga penurunan kekuatan isolasi dari kertas tersebut.

2. 10. Pembebanan Transformator Tenaga ^[7]

2. 10.1. Efek Pembebanan Melebihi Kapasitas Name Plate

Penerapan beban melebihi kapasitas yang tertera pada name plate mempunyai beberapa tingkat resiko. Oleh karena itu perlu identifikasi resiko, dan dibuat pedoman dan aturan pembebanan sehingga dapat meminimalkan resiko akibat pembebanan.

Sementara penuaan dan kerusakan mekanik dalam waktu yang lama dari isolasi belitan menjadi dasar pembebanan transformator daya selama bertahun-tahun, diakui bahwa ada faktor-faktor tambahan yang mungkin melibatkan risiko lebih besar jika transformator dikenakan beban (MVA) dan tegangan yang melebihi ratingnya. Resiko yang harus dipertimbangkan ketika pembebanan transformator melebihi ratingnya secara luas didefinisikan sebagai berikut :

1. Munculnya gas bebas dari isolasi belitan dan konduktor (konduktor yang diisolasi) dipanaskan oleh beban dan arus eddy (*eddy current*) dapat membahayakan kekuatan dielektrik. Karena gas bebas dihasilkan dalam isolasi dekat konduktor, dimana dielektrik stresnya tinggi, sehingga resiko kegagalan listrik meningkat. Setelah periode overheating gelembung gas akan larut dalam minyak dan integritas

dielektrik penuh akan muncul kembali. Kegagalan isolasi sebagian yang mungkin menghasilkan pelacakan karbon terjadi sedangkan gas bebas tetap ada.

2. Evolusi gas bebas dari isolasi yang berdekatan dengan bagian struktur logam yang dihubungkan oleh flux elektromagnetik yang dihasilkan oleh belitan atau arus utama juga dapat mengurangi kekuatan dielektrik
3. Penuaan dan pemburukan isolasi konduktor sebagai fungsi dari waktu dan temperature, paling dikenal sebagai efek permanent dari pembebanan transformator tenaga.
4. Struktur bahan isolasi juga mengalami degradasi permanen kumulatif, sifat mekanik sebagai fungsi terhadap waktu dan temperature. Selain itu, ada beberapa tingkat pengurangan sementara kemampuan mekanik pada temperatur tinggi. Efek ini diharapkan akan menjadi perhatian utama selama periode transient over-current (gangguan shortcircuit) ketika daya mekanik mencapai tingkat tertingginya.
5. Expansi panas konduktor, bahan isolasi atau bagian struktur pada temperature tinggi dapat mengakibatkan kerusakan permanent yang akan memberikan kontribusi pada gangguan listrik atau mekanik.
6. Tekanan akan bertambah pada busing untuk arus di atas rating bisa mengakibatkan kebocoran gasket, hilangnya minyak, dan kegagalan dielektrik utama.
7. Peningkatan resistans dalam kontak tap changer dapat dihasilkan dari bertambahnya dekomposisi minyak di area suhu yang sangat tinggi pada titik kontak ketika changer dibebani di luar rating. Dalam keadaan ekstrem, ini bisa mengakibatkan kondisi peningkatan panas yang cepat dengan tahanan busur dan evolusi gas violet.
8. Ketika suhu minyak bagian atas melebihi 105°C (65°C rise over 40°C ambient, according to IEEE C57.12.00-1987[1]). Kemungkinan pemuaiian minyak akan mengakibatkan minyak hilang menuju peralatan pressure relief.

2. 10.1.1. Pembebanan Darurat Waktu Lama

Pembebanan darurat dalam waktu lama diakibatkan oleh lama gangguan dari beberapa elemen system dan disebabkan titik terpanas konduktor atau temperature minyak bagian atas melampaui yang dianjurkan dalam pembebanan melewati rating name-plate yang direncanakan. Hal ini bukan kondisi operasi normal, tapi mungkin mendesak untuk beberapa waktu. Diharapkan kejadian tersebut jarang terjadi.

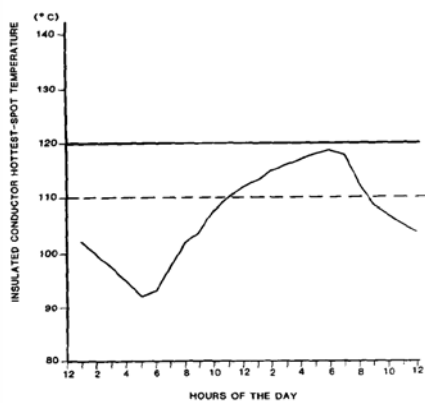
Temperature titik terpanas konduktor dianjurkan terkoordinasi dengan durasi harian. Temperatur minyak bagian atas tidak boleh melebihi 110°C kapan saja. Pembebanan ini disebabkan oleh gangguan suatu system dan lebih berat dari beban yang direncanakan di luar rating desain. Kedua kerugian umur isolasi dan resiko yang lebih besar dari beban yang direncanakan di luar rating desain. Diharapkan bahwa hanya akan ada dua atau tiga kejadian dalam umur transformator.

2. 10.1.2. Pembebanan Darurat Waktu Singkat

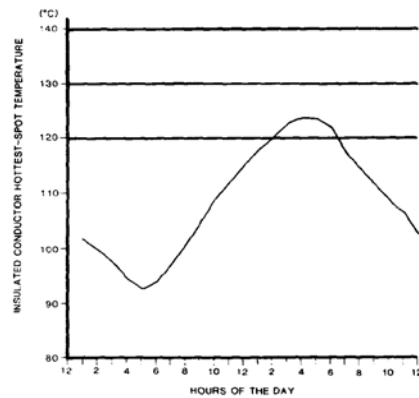
Pembebanan darurat waktu singkat merupakan beban luar biasa berat akibat terjadinya satu atau lebih peristiwa yang serius yang tidak diharapkan mengganggu pembebanan sistem normal dan menyebabkan baik titik terpanas konduktor atau mengakibatkan temperature minyak bagian atas melebihi batas pembebanan direncanakan di luar rating name-plate. Penerimaan atas kondisi tersebut pada waktu yang singkat mungkin memilih alternatif lainnya. Mengingat resikonya sebaiknya jenis pembebanan tidak lebih dari 1 jam. [7]

2. 10.1.3. Hubungan Timbal Balik Dari Jenis-Jenis Pembebanan

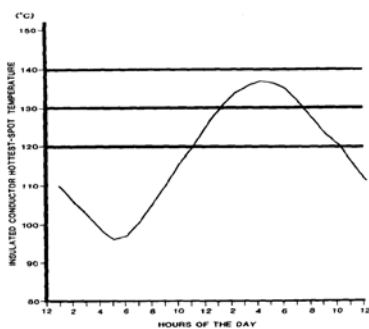
Contoh profil temperature titik terpanas untuk empat jenis pembebanan diilustrasikan dalam gambar 2.23 (a) sampai 2.23(d) [7]



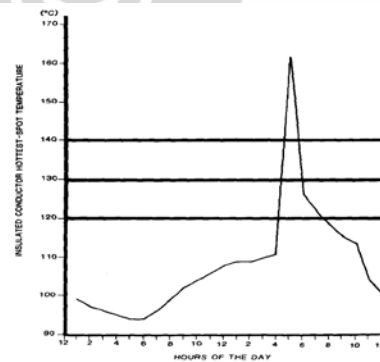
(a) Normal life expectancy loading



(b) Planned loading beyond nameplate rating



(c) Long-time emergency loading



(d) Short-time emergency loading

Gambar 2.23. Profil temperature titik terpanas pembebanan

- (a) Pembebanan waktu normal
- (b) Rencana pembebanan melebihi beban nominal
- (c) Pembebanan darurat waktu lama
- (d) Pembebanan darurat waktu singkat

Perhatikan bahwa untuk setiap temperatur yang lebih tinggi, resiko lebih besar kondisi pembebanan dapat diasumsikan sebagai bahan tambahan untuk kondisi risiko lebih kecil diterima oleh pengguna kecuali untuk pembebanan darurat waktu singkat.

Rencana pembebanan melampaui rating desain, menjelaskan suatu kondisi dimana transformator begitu dibebani temperature titik terpanas adalah pada rentang suhu 120°C - 130°C selama maksimal 4 jam sehari. Karakteristik jenis pembebanan ini adalah tidak ada gangguan, kejadian biasa dan relative sering terjadi. Gambar 2.23.(b) menggambarkan perencanaan profile beban melampaui rating desainnya.

Pembebanan darurat waktu lama menjelaskan suatu kondisi dimana transformator begitu dibebani titik terpanas suhunya pada rentang 120°C – 130°C untuk maksimum 4 jam dan pada rentang suhu 130°C - 140°C untuk maksimal 6 jam sehari. Karakteristik dari jenis pembebanan ini adalah salah satu gangguan yang lama dari bagian system transmisi, dua atau tiga kejadian selama transformator beroperasi, setiap kejadian dapat berlangsung beberapa bulan dan resikonya lebih besar daripada pembebanan yang direncanakan di luar rating desain. Gambar 2.23.(c) menggambarkan profil beban darurat waktu lama.

Perhatikan bahwa sementara titik suhu terpanas meningkat dengan waktu, itu berada pada kisaran temperatur 120°C - 130°C selama sekitar 2 jam. Titik suhu terpanas berada pada kisaran suhu 130°C - 140°C selama 6 jam^[7]

Pada bagian menurun dari kurva titik suhu terpanas kembali berada dalam kisaran suhu 120°C - 130°C selama kurang lebih 2 jam sehingga total 4 jam pada rentang suhu 120°C - 130°C untuk periode 24 jam. Titik suhu terpanas diperbolehkan melebihi 120°C selama maksimal 10 jam^[7]

Pembebanan darurat waktu singkat adalah dimana kondisi pembebanan transformator begitu dibebani titik suhu terpanas pada rentang 120°C - 130°C selama maksimal 4 jam, pada rentang suhu 130°C - 180°C dan kembali ke 140°C selama 1 jam dan pada rentang suhu 130°C - 140°C maksimal 6 jam. Karakteristik dari jenis pembebanan ini adalah serangkaian kondisi yang tidak memungkinkan pada system transmisi (kemungkinan kedua atau ketiga) satu atau dua kejadian selama transformator beroperasi normal, setiap kejadian selama 1 jam atau kurang dan resiko yang lebih besar dari pada pembebanan darurat waktu lama. Gambar 2.23.(d) menggambarkan profile pembebanan darurat waktu singkat.

Perkiraan pembebanan umur normal dianggap bebas resiko, tetapi tiga jenis beban telah diasosiasikan dengan beberapa batasan tingkat resiko. Secara khusus tingkat resiko didasarkan pada jumlah gas bebas dan tegangan. Munculnya gas bebas

dapat menyebabkan kegagalan dielektrik saat kondisi tegangan lebih dan mungkin pada tegangan frekuensi daya nominal.

2.10.2 Pembatasan Pembebanan Maksimum

Pembatasan transformator tenaga seharusnya dilakukan pembatasan temperature. Batasan yang diberikan dalam Tabel 2.2. di atas tidak boleh diabaikan selama kejadian over load . Kapasitas beban maksimum yang direncanakan pengguna transformator memanfaatkan pada perencanaan atau dasar darurat atau keduanya, harus dimasukkan dalam spesifikasi pada saat pembelian. Informasi berikut harus diberikan :

- (1) Mengutamakan beban steady-state, prosentasi dari rating maksimum
- (2) Ambient temperature ($^{\circ}\text{C}$)
- (3) Beban maksimum, prosentasi dari rating maksimum
- (4) Lama beban maksimum (jam)
- (5) Jenis pembebanan, terencana atau darurat, waktu lama atau waktu singkat, atau pembatasan temperature yang sesuai.
- (6) Pengurangan umur operasi yang sesuai, prosentasi dari umur normal, per kejadian.

2.10.3. Informasi Untuk Perhitungan User

Jika user bermaksud melakukan penghitungan untuk menentukan kemampuan pembebanan transformator, user harus meminta informasi dari type berikut spesifikasinya :

- 1) Kenaikan temperature minyak bagian atas di atas suhu lingkungan.
- 2) Kenaikan temperature minyak bagian bawah di atas suhu lingkungan
- 3) Kenaikan temperature konduktor rata-rata di atas suhu lingkungan
- 4) Kenaikan temperature konduktor titik terpanas di atas suhu lingkungan
- 5) Rugi daya pada beban nominal
- 6) Rugi beban nol
- 7) Rugi-rugi total dalam wat pada beban nominal
- 8) Konfirmasi desain aliran minyak (langsung atau tidak langsung).

Untuk semua informasi dalam (1) hingga (8) keadaan kondisi dimana pengukuran yang dilakukan adalah beban, suhu sekitar, penyadap, dll.