

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teori Kegagalan Isolasi

Kegagalan isolasi disebabkan beberapa sebab, antara lain isolasi tersebut sudah lama terpakai, berkurangnya kekuatan dielektrik dan karena isolasi tersebut dikenakan tegangan lebih. Pada dasarnya tegangan pada isolasi merupakan suatu tarikan atau tekanan (*strees*) yang harus dilawan oleh gaya dalam isolasi itu sendiri agar isolasi tidak gagal (Adib Chumaidy, 2010 : 44). Berikut ini akan diuraikan beberapa faktor yang mempengaruhi mekanisme kegagalan pada minyak transformator, yaitu :

1). Partikel padat

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

2). Uap Air

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

3). Kegagalan gelembung

Merupakan bentuk kegagalan isolasi cair yang disebabkan oleh gelembung-gelembung gas di dalamnya. Pembentukan gas karena terjadi dekomposisi pada minyak transformator dapat mengakibatkan kegagalan. Adanya pengaruh medan yang kuat antara elektroda, maka gelembung-gelembung gas dalam cairan tersebut akan saling sambung menyambung dan membentuk jembatan yang mengawali terjadinya kegagalan pada minyak transformator.

2.1.2 Kegagalan Isolasi dan Mekanisnya.

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 *continuitas* 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. [7]

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.

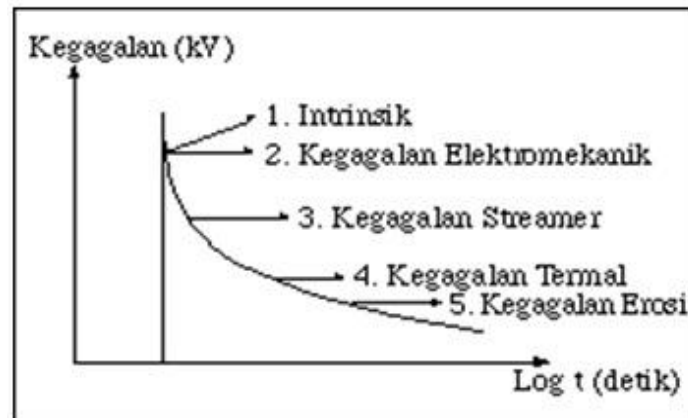
Dari beberapa kasus yang terjadi menunjukkan bahwa kegagalan isolasi ini berkaitan dengan adanya partial discharge. Partial discharge ini dapat terjadi pada material isolasi

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 kavitasi, adanya butiran pada zat cair dan tercampurnya material isolasi cair (M.Solikhudin, 2013 : 12).

Kegagalan Isolasi bisa terjadi pada:

1. Bahan Isolasi Padat

Mekanisme kegagalan pada bahan isolasi padat meliputi kegagalan asasi (intrinsik), elektro mekanik, streamer, thermal dan kegagalan erosi.. Mekanisme kegagalan bahan isolasi padat terdiri dari beberapa jenis sesuai fungsi waktu penerapan tegangannya. Seperti dijelaskan pada gambar 2.1



Gambar 2.1: Grafik Kegagalan Isolasi

2. Isolasi Zat Cair

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.

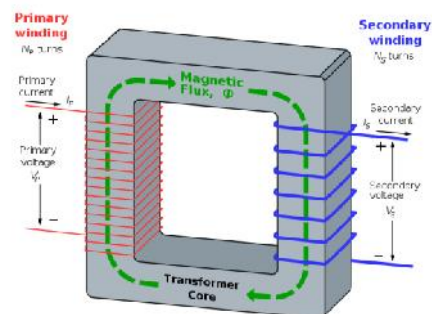
3. Campuran Zat Cair-Padat

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.

2.2 Transformator Tenaga

2.2.1 Pengertian Transformator Tenaga

Transformator Tenaga merupakan peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari 2 atau lebih belitan, secara induksi elektromagnetik, mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama (IEC 60076 -1 tahun 2011).^[8] Trafo menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum ampere dan induksi faraday, dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet / fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi (Pamudji, 2014:1). Arus AC yang mengalir pada belitan primer membangkitkan flux magnet yang mengalir melalui inti besi yang terdapat diantara dua belitan, flux magnet tersebut menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial / tegangan induksi (Gambar 2.2) .



Gambar 2.2 Prinsip kerja transformator

2.2.2 Jenis trafo

Berdasarkan fungsinya transformator tenaga dapat dibedakan menjadi:

- Trafo pembangkit
- Trafo gardu induk / penyaluran
- Trafo distribusi

Menurut James H. Harlow, (dalam buku *Electrical Power Transformer Engineering*, 2004 : 24)

Berdasarkan ukurannya transformator daya telah dikelompokkan menjadi tiga segmen: [4]

1. *Small power transformers: 500 to 7500 kVA*
2. *Medium power transformers: 7500 to 100 MVA*
3. *Large power transformers: 100 MVA and above*

2.2.3 Bagian – bagian transformator dan fungsinya

2.2.3.1 Electromagnetic Circuit (Inti besi)

Inti besi digunakan sebagai media jalannya flux yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan – lempengan besi tipis berisolasi yang di susun sedemikian rupa. [6]

2.2.3.2 Winding (Belitan)

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

2.2.3.3 Bushing

Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar. Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan body main tank transformator.

2.2.3.4 Pendingin

Salah satu Penyebab utama munculnya kegagalan pada transformator adalah adanya panas berlebih. Panas berlebih biasanya ditimbulkan oleh berbagai faktor seperti pembebanan berlebih, rugi histeris, arus *eddy*, adanya proses oksidasi yang menghasilkan karat, air, dan lain-lain. Oleh karena itu transformator memerlukan sistem pendingin untuk mengontrol panas yang timbul. Panas yang berlebih akan memacu reaksi berantai yang akan mempercepat penurunan usia dan kualitas kerja sistem isolasi baik pada minyak isolator maupun isolator kertas. [5]

Minyak isolasi transformator selain merupakan media isolasi juga berfungsi sebagai pendingin. Pada saat minyak bersirkulasi, panas yang berasal dari belitan akan dibawa oleh minyak sesuai jalur sirkulasinya dan akan didinginkan pada sirip – sirip radiator. Adapun proses pendinginan ini dapat dibantu oleh adanya kipas dan pompa sirkulasi guna meningkatkan efisiensi pendinginan.

2.2.3.5 Oil preservation & expansion (Konservator)

Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada transformator, minyak isolasi akan memuai sehingga volumenya bertambah. Sebaliknya saat terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak akan menyusut dan volume minyak akan turun. Konservator digunakan untuk menampung minyak pada saat transformator mengalami kenaikan suhu.

2.2.3.6 Dielectric (Minyak isolasi transformator & Isolasi kertas)

2.2.3.6.1 Minyak Isolasi trafo

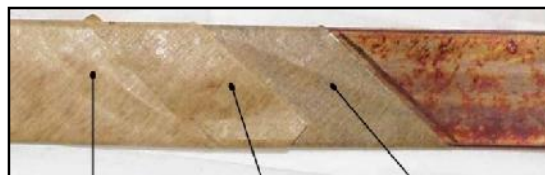
Minyak isolasi pada transformator berfungsi sebagai media isolasi, pendingin dan pelindung belitan dari oksidasi. Pada dasarnya minyak trafo tersusun atas senyawa-senyawa hidrokarbon dan non hidrokarbon . Senyawa hidrokarbon secara umum terbagi menjadi tiga jenis, yaitu parafinik, naphthanik dan aromatik. Antara ketiga jenis minyak dasar tersebut tidak boleh dilakukan pencampuran karena memiliki sifat fisik maupun kimia yang berbeda. Sedangkan senyawa non Hidrokarbon yang terdapat dalam minyak trafo adalah substansi asphalt/*ter*, senyawaorganik yang mengandung belerang dan nitrogen, asam naphthan, ester, alkohol, dan senyawa organometalik (Gambar 2.3)



Gambar 2.3: Minyak Isolasi Transformator

2.2.3.6.2 Kertas isolasi trafo

Isolasi kertas berfungsi sebagai isolasi, pemberi jarak, dan memiliki kemampuan mekanis.(Gambar 2.4)



Gambar 2.4 Tembaga yang dilapisi kertas isolasi

2.2.3.7 Tap Changer

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Transformator dituntut memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan pada sisi primer diharapkan dapat merubah ratio antara belitan primer dan sekunder dan dengan demikian tegangan output/sekunder pun dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem berapapun tegangan input/primernya.

Penyesuaian ratio belitan ini disebut Tap changer. Tap changer terdiri dari :

- Selector Switch

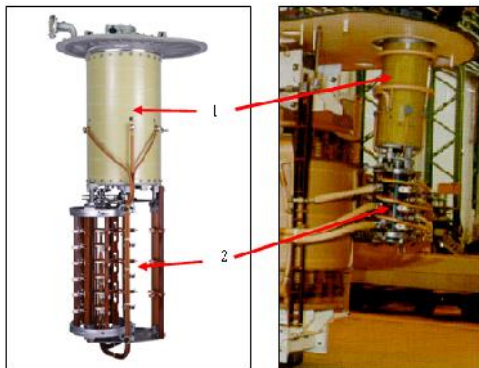
Selector switch merupakan rangkaian mekanis yang terdiri dari terminal terminal untuk menentukan posisi tap atau ratio belitan primer

- Diverter Switch

Diverter switch merupakan rangkaian mekanis yang dirancang untuk melakukan kontak atau melepaskan kontak dengan kecepatan yang tinggi. (Gambar 2.5)

- Tahanan transisi

Tahanan transisi merupakan tahanan sementara yang akan dilewati arus primer pada saat perubahan tap



Keterangan :

1. Kompartemen Diverter Switch
2. Selektor Switch

Gambar 2.5: OLTC pada transformator

2.2.3.8 NGR (Neutral Grounding Resistant)

Salah satu metoda pentanahan adalah dengan menggunakan NGR. NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang serial dengan neutral sekunder pada transformator sebelum terhubung ke ground/tanah. Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi neutral ke tanah.

2.2.3.9 Proteksi Internal transformator

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

2.2.3.9.1 Rele Bucholz

Pada saat transformator mengalami gangguan internal yang berdampak kepada suhu yang sangat tinggi dan pergerakan mekanis didalam transformator, maka akan timbul tekanan aliran minyak yang besar dan pembentukan gelembung gas yang mudah terbakar. Tekanan atau gelembung gas tersebut akan naik ke konservator melalui pipa penghubung dan rele bucholz. Tekanan minyak maupun gelembung gas ini akan dideteksi oleh rele bucholz sebagai indikasi telah terjadinya gangguan internal.

Setting dari rele ini dibagi menjadi 2 tingkat (stage) yaitu 1st stage sebagai alarm dan 2nd stage sebagai trip.



Gambar 2.6: Rele bucholz

2.2.3.9.2 Rele Jansenz

Sama halnya seperti rele Bucholz yang memanfaatkan tekanan minyak dan gas yang terbentuk sebagai indikasi adanya ketidaknormalan / gangguan, hanya saja rele ini digunakan untuk memproteksi kompartemen OLTC. Rele ini juga dipasang pada pipa saluran yang menghubungkan kompartemen OLTC dengan konservator.

Berbeda dengan Bucholz, jika terjadi gangguan setting dari rele ini langsung trip.

2.2.3.9.3 Sudden Pressure (rele tekanan lebih)

Rele sudden pressure ini didesain sebagai titik terlemah saat tekanan didalam trafo muncul akibat gangguan. Dengan menyediakan titik terlemah maka tekanan akan tersalurkan melalui sudden pressure dan tidak akan merusak bagian lainnya pada maintank.

Sama seperti rele Jansenz, jika terjadi gangguan setting dari rele ini langsung trip. (Gambar 2.7)



Gambar 2.7. Rele sudden pressure

2.2.3.9.4 Rele Thermal

Suhu pada transformator yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, losses pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada transformator. Untuk mengetahui suhu operasi dan indikasi ketidaknormalan suhu operasi pada transformator digunakan rele thermal. Rele thermal ini terdiri dari sensor suhu berupa thermocouple, pipa kapiler dan meter penunjukan.

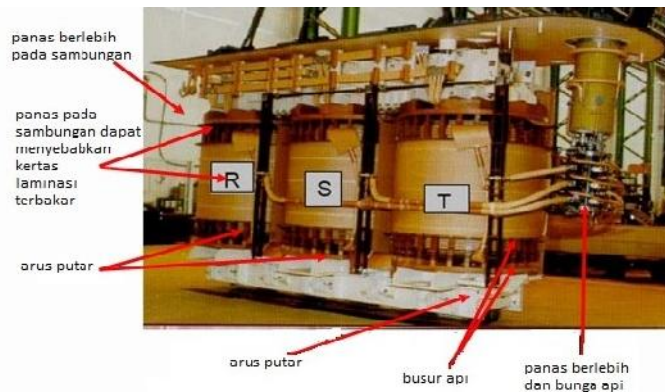
Sama seperti rele bucholz setting dari rele ini dibagi menjadi 2 tingkat (stage) yaitu 1st stage sebagai alarm dan 2nd stage sebagai trip. (Gambar 2.8)



Gambar 2.8: Bagian-bagian dari rele thermal

2.2.3.10. Bagian Internal Transformator Yang Berpotensi Terjadinya Gangguan

Peta Potensi Terjadinya gangguan di dalam Transformator ditunjukkan dalam gambar 2.9 di bawah ini:



Gambar 2.9: Peta potensi gangguan internal transformator

2.3. Pemeliharaan Transformator Tenaga.

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. Dengan kata lain Pemeliharaan itu merupakan upaya untuk mempertahankan atau

mengembalikan pada tingkat prestasi awal dan dapat beroperasi dengan keandalan yang tinggi sehingga kontinuitas pelayanan listrik dapat tercapai

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, petugas dan lingkungan
- e. Mengurangi lama waktu padam akibat sering gangguan.

2.3.1 In Service Inspection

In Service inspection adalah kegiatan inspeksi yang dilakukan pada saat transformator dalam kondisi bertegangan / operasi, dengan tujuancuntuk mendeteksi secara dini ketidaknormalan yang mungkin terjadi didalam trafo tanpa melakukan pemadaman.

2.3.2 In Service Measurement

In Service Measurement adalah kegiatan pengukuran / pengujian yang dilakukan pada saat transformator sedang dalam keadaan bertegangan / operasi, dengan untuk mengetahui kondisi trafo lebih dalam tanpa melakukan pemadaman.

Jenis-jenis *In Service Measurement* antara lain:

- ***Thermovisi / Thermal image***

Pada saat trafo dalam keadaan operasi, bagian trafo yang dialiri arus akan menghasilkan panas. Panas pada radiator trafo dan maintank yang berasal dari belitan trafo akan memiliki tipikal suhu bagian atas akan lebih panas dari bagian bawah secara gradasi. Sedangkan untuk bushing, suhu klem pada stud bushing akan lebih panas dari sekitarnya. Suhu yang tidak normal pada trafo dapat diartikan sebagai adanya ketidaknormalan pada bagian atau lokasi tersebut.

Metoda pemantauan suhu trafo secara menyeluruh untuk melihat ada tidaknya ketidaknormalan pada trafo dilakukan dengan menggunakan thermovisi / thermal image camera.

- ***Dissolved Gas Analysis (DGA)***

Pada saat terjadi ketidaknormalan pada trafo, minyak isolasi sebagai rantai hidrocarbon akan terurai akibat besarnya energi ketidaknormalan dan akan membentuk gas-gas hidrokarbon yang larut dalam minyak isolasi itu sendiri. Secara umum, dampak/akibat ini dapat berupa *overheat, corona* dan *arcing*. Untuk mengetahui dampak ketidaknormalan pada trafo digunakan metoda DGA (Dissolved gas analysis). Pada dasarnya DGA adalah proses untuk menghitung kadar/nilai dari gas-gas hidrokarbon yang terbentuk akibat ketidaknormalan. Gas gas yang dideteksi dari hasil pengujian DGA adalah H₂ (hidrogen), CH₄ (Methane), N₂ (Nitrogen), O₂ (Oksigen), CO (Carbon monoksida), CO₂ (Carbondioksida), C₂H₄ (Ethylene), C₂H₆ (Ethane), C₂H₂ (Acetylene).

- **Pengujian kualitas minyak isolasi (Karakteristik)**

Oksidasi dan kontaminan adalah hal yang dapat menurunkan kualitas minyak yang berarti dapat menurunkan kemampuannya sebagai isolasi. Oksidasi pada minyak isolasi trafo juga akan ikut andil dalam penurunan kualitas kertas isolasi trafo. Pada saat minyak isolasi mengalami oksidasi, maka minyak akan menghasilkan asam. Asam ini apabila bercampur dengan air dan suhu yang tinggi akan mengakibatkan proses hidrolisis pada isolasi kertas. Proses hidrolisis ini akan menurunkan kualitas kertas isolasi.

Pengujian oil quality test melingkupi beberapa pengujian yang metodenya mengacu pada standar PLN. Adapun jenis pengujiannya berupa:

- a. **Pengujian kadar air**

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.

b. Pengujian tegangan tembus

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

c. Pengujian kadar asam

Minyak yang rusak akibat oksidasi akan menghasilkan senyawa asam yang akan menurunkan kualitas kertas isolasi pada trafo. Asam ini juga dapat menjadi penyebab proses korosi pada tembaga dan bagian trafo yang terbuat dari bahan metal.

d. pengujian tegangan antar muka / *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).

2.3.3 Shutdown testing / measurement

Adalah pekerjaan pengujian yang dilakukan pada saat transformator dalam keadaan padam. Pekerjaan ini dilakukan pada saat pemeliharaan rutin maupun pada saat investigasi.

2.3.3.1 Pengukuran tahanan isolasi

Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui kondisi isolasi antara belitan dengan ground atau antara dua belitan. Untuk memperkuat hasil pengujian pada transformator dilakukan juga Test Indeks Polarisasi, yaitu pengujian rasio tahanan isolasi saat menit 10 dengan menit ke-1 dengan tegangan konstant.

2.3.3.2 Pengukuran tangen delta

Tan delta atau sering disebut Loss Angle atau pengujian faktor disipasi adalah metoda diagnostik secara elektikal untuk mengetahui kondisi isolasi. Jika isolasi bebas dari defect, maka isolasi tersebut akan bersifat kapasitif sempurna seperti halnya sebuah isolator yang berada diantara dua elektroda pada sebuah kapasitor.

2.3.3.3 Pengukuran SFRA (*Sweep Frequency Response Analyzer*)

SFRA adalah suatu peralatan yang dapat memberikan informasi tentang adanya pergeseran pada inti dan belitan suatu transformator. Dengan melakukan pengujian, dapat diketahui bagaimana suatu belitan memberikan sinyal bertegangan rendah dalam berbagai variasi frekuensi.

2.3.3.4 Pengukuran tahanan DC (Rdc)

Belitan pada trafo merupakan konduktor yang dibentuk mengelilingi / melingkari inti besi sehingga pada saat diberikan tegangan ac (*Alternating current*) maka belitan tersebut akan memiliki nilai induktansi (XL) dan nilai resistif (R). Pengujian tahanan dc dimaksudkan untuk mengukur nilai resistif (R) dari belitan dan pengukuran ini hanya bisa dilakukan dengan memberikan arus dc (*direct current*) pada belitan. Oleh karena itu pengujian ini disebut pengujian tahanan dc.

2.3.3.5 HV test

Pengujian HV test dilakukan dengan tujuan untuk meyakinkan bahwa ketahanan isolasi trafo sanggup menahan tegangan. Isolasi yang dimaksud adalah isolasi antara bagian aktif (belitan) terhadap ground, koneksi-koneksi terhadap ground dan antara belitan satu dengan yang lainnya.

2.3.3.6 Pengujian OLTC

a. Continuity Test

OLTC adalah bagian trafo yang berfungsi sebagai mekanisme tapping dari perubahan ratio belitan trafo. Nilai tahanan belitan primer pada saat terjadi perubahan ratio tidak boleh terbuka (open circuit). Pengujian ini memanfaatkan Ohmmeter yang dipasang serial dengan belitan primer trafo. Setiap perubahan tap/ratio, nilai tahanan belitan diukur.

b. Dynamic resistance

Untuk mengetahui ketidaknormalan kerja pada OLTC khususnya yang berkaitan dengan kontak diverter maupun selektor switch.

c. Ratio Test.

Tujuan dari pengujian ratio belitan pada dasarnya untuk mendiagnosa adanya masalah dalam antar belitan dan seksi-seksi sistem isolasi pada trafo. pengujian ini akan mendeteksi adanya hubung singkat atau ketidaknormalan pada tap changer. Tingginya nilai resistansi akibat lepasnya koneksi atau konduktor yang terhubung ground dapat dideteksi.

2.4 FMEA (*Failure mode and Effect Analysis*)

FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) adalah suatu metode untuk menganalisa penyebab kegagalan pada suatu peralatan (Pamudji 2014:17). FMEA merupakan pendekatan sistematis yang menerapkan suatu metode pentabelan untuk membantu proses pemikiran yang digunakan oleh *engineers* untuk mengidentifikasi mode kegagalan potensial dan efeknya dengan

cara membagi suatu sistem menjadi beberapa subsistem yang kemudian diikuti dengan penentuan jenis gejala yang dapat diamati [8] .

Dengan membuat FMEA, kita dapat mengetahui besaran apa yang paling sensitif untuk menangkap *symptom* (gejala) *failure* suatu sistem.

Langkah-langkah dasar dalam melakukan FMEA yaitu :

- Mendefinisikan sistem (peralatan) dan fungsinya

Sistem (peralatan) adalah kumpulan komponen yang secara bersama-sama bekerja membentuk satu fungsi atau lebih

- Menentukan subsistem peralatan:

Subsistem peralatan adalah peralatan dan/atau komponen yang bersama-sama membentuk satu fungsi. Dari fungsinya subsistem berupa unit yang berdiri sendiri dalam suatu sistem

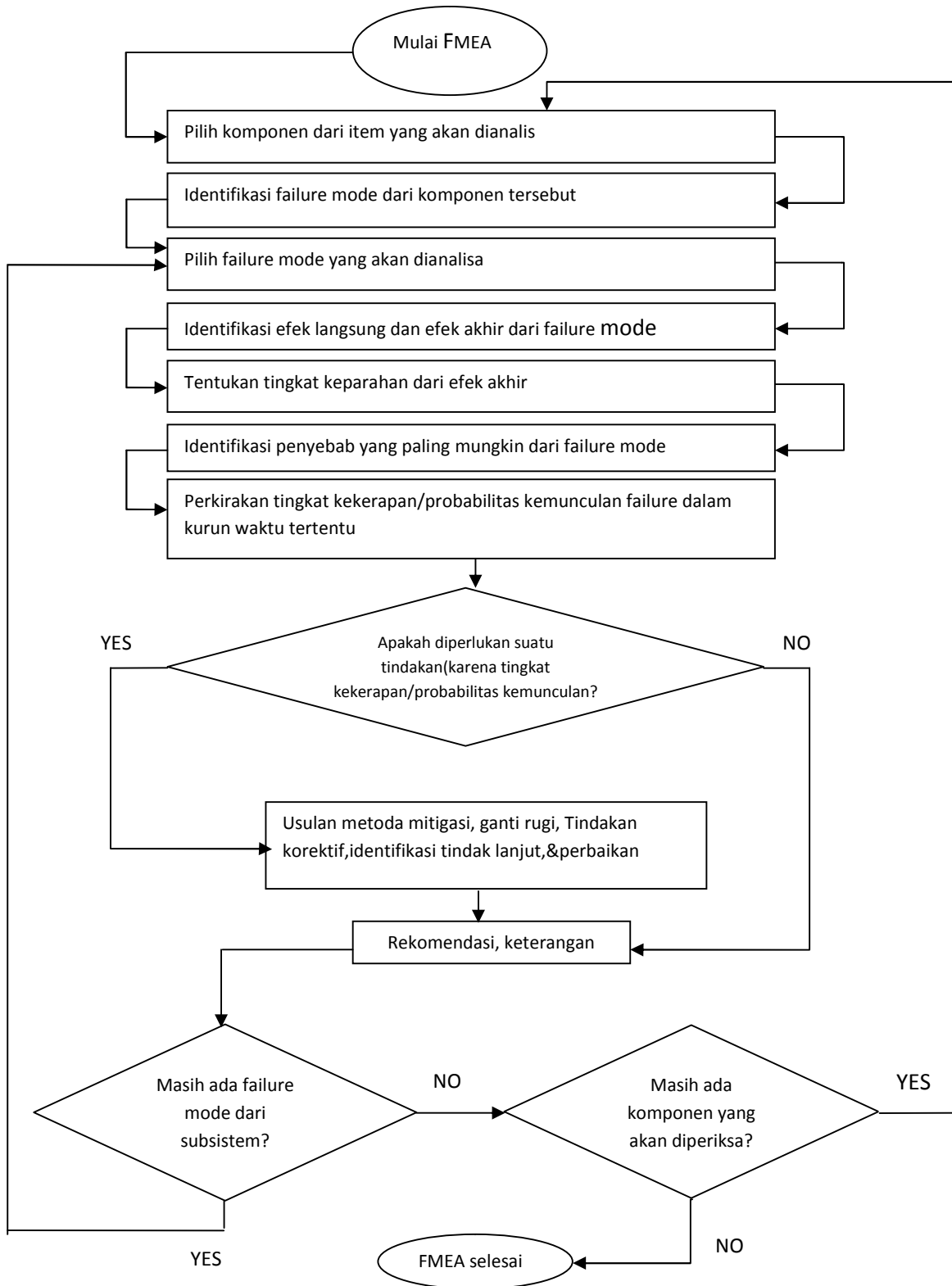
- Menentukan functional failure

Functional failure adalah Ketidakmampuan suatu asset untuk dapat bekerja sesuai fungsinya berdasarkan standar unjuk kerja yang dapat diterima pemakai

- Mencari failure mode:

Failure Mode adalah setiap kejadian yang mengakibatkan functional failure.

Alur dalam pembuatan FMEA diperlihatkan pada Gambar 2.11



Gambar.2.11 Alur analisa

2.5. Norm atau Batasan

Norm adalah referensi nilai yang dipakai untuk memilah-milah apakah item dalam kondisi baik, moderat atau buruk. Norm dibuat dengan mempertimbangkan berbagai sumber, yaitu:

- Standar internasional, misalnya: IEEE, IEC, ANSI, CIGRÉ
- Standar nasional, misalnya: SPLN
- Analisa statistik data (pengalaman) lapangan
- Informasi *aging* dari percobaan di laboratorium (milik PLN atau milik pihak lain), biasanya diterbitkan dalam bentuk makalah
- Panduan pengoperasian dan pemeliharaan yang diterbitkan oleh pabrikan

Norm yang ditentukan oleh standard, *guide* dan panduan pabrikan umumnya hanya membedakan 2 (dua) kondisi item, yaitu: baik atau buruk, serta dibuat berdasarkan kondisi lingkungan (iklim dan jaringan kelistrikan) yang berbeda dengan Indonesia. Sementara kita menganut sistem 3 (tiga) kategori kondisi yaitu Baik, Sedang, Buruk. Oleh karena itu, norm yang layak dipakai seharusnya yang juga diturunkan dari pengalaman lapangan dan informasi *aging* pada kondisi lingkungan di PLN.

2.5.1 Norm dari analisa statistik data lapangan

Pembuatan norm dari analisa statistik data lapangan didahului oleh serangkaian proses. Proses tersebut adalah:

- Pengumpulan data
- Pengecekan validitas data
- Menstandarisasi data

Standarisasi data bertujuan agar kita dapat membandingkan data yang kita peroleh dengan acuan yang berlaku.

- Pemilahan data berdasarkan peruntukannya.

2.6 FMEA Transformator Tenaga

Hal utama yang dilakukan pada tahapan penyusunan FMEA adalah penentuan sub sistem, fungsi dan kegagalan fungsi sub sistem dan failure mode yang kemudian diikuti dengan penentuan jenis gejala yang dapat diamati. Tahapan tersebut dijabarkan seperti berikut :

2.6.1 Sub sistem Bushing

Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar. Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan body main tank transformator.

2.6.2 Sub sistem Dielektrik (isolasi minyak & kertas)

2.6.2.1 Minyak Isolasi trafo

Minyak isolasi pada transformator berfungsi sebagai media isolasi, pendingin dan pelindung belitan dari oksidasi. Minyak isolasi trafo merupakan minyak mineral yang secara umum terbagi menjadi tiga jenis, yaitu parafinik, napthanik dan aromatik. Antara ketiga jenis minyak dasar tersebut tidak boleh dilakukan pencampuran karena memiliki sifat fisik maupun kimia yang berbeda.

2.6.2.2 Kertas isolasi trafo

Isolasi kertas berfungsi sebagai isolasi, pemberi jarak, dan memiliki kemampuan mekanis.

2.6.3 Sub sistem EMC & CCU

2.6.3.1 *Electromagnetic Circuit (Inti besi)*

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

2.6.3.2 Current Carrying Unit (Winding)

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

2.6.4 Sub sistem OLTC (On Load Tap Changer)

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Transformator dituntut memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan pada sisi primer diharapkan dapat merubah ratio antara belitan primer dan sekunder dan dengan demikian tegangan output/sekunder pun dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem berapapun tegangan input/primernya. Penyesuaian ratio belitan ini disebut Tap changer.

2.6.5 Sub sistem Pendingin

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

2.6.6 Sub Sistem Pernafasan

Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada transformator, minyak isolasi akan memuai sehingga volumenya bertambah. Sebaliknya saat terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak akan menyusut dan volume minyak akan turun. Konservator digunakan untuk menampung minyak pada saat transformator mengalami kenaikan suhu.

2.6.7 Subsistem Struktur mekanik

Struktur mekanik trafo berfungsi untuk menyangga bagian aktif trafo (inti dan belitan) tetap pada posisinya & menahan stres mekanis saat terjadi arus hubung singkat.

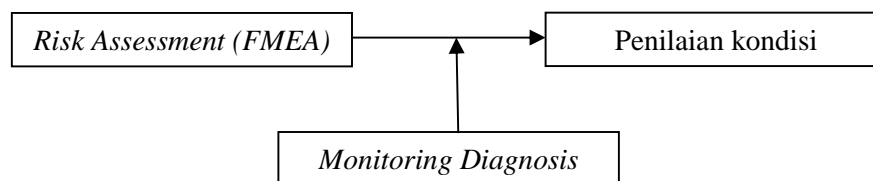
2.7 Penilaian Kondisi Transformer (*Scoring*).

2.7.1 Pengertian Penilaian Kondisi

Penilaian Kondisi merupakan suatu metode penilaian terhadap suatu obyek yang berdasarkan pada kondisi fisik dan fungsi obyek yang diamati. Penilaian kondisi berhubungan erat dengan *Condition Based Maintenance*, dimana obyek yang diamati kondisinya ini kemudian ditentukan tingkat unjuk kerjanya lalu kemudian diamati diberikan *maintenace* berdasarkan kondisinya tersebut. Secara umum penilaian kondisi memberikan sebuah penilaian kondisi atas fenomena-fenomena yang terjadi dan berpengaruh pada parameter yang terukur pada obyek.

Didalam Penilaian Kondisi terdapat 2 aspek yang terlibat yaitu *risk assessment* dan *monitoring diagnosis*. *Risk assessment* disini berarti penilaian terhadap kemungkinan-kemungkinan resiko yang bisa terjadi pada obyek tersebut. Dalam *risk assessment* ini kita menentukan kemungkinan-kemungkinan resiko yang terjadi pada obyek serta penyebabnya.

Aspek lain yang penting dalam penilaian kondisi adalah *monitoring diagnosis*. *Monitoring diagnosis* berarti melakukan suatu pemantauan terhadap parameter-parameter yang berpengaruh pada suatu obyek dan kemudian menentukan fenomena apa yang terjadi. Berikut adalah hubungan antara *condition assessment*, *risk assessment*, dan *monitoring diagnosis*



Gambar 2.12 Bagan hubungan penilaian kondisi

Fungsi penilaian kondisi adalah memberikan indikasi penurunan kondisi transformator. *Score* kondisi pada setiap item inspeksi diperoleh dengan membandingkan hasil inspeksi terhadap norm setiap item pengujian. Selanjutnya, kondisi setiap subsistem trafo diperoleh dengan menjumlahkan nilai dari setiap hasil pengujian dari masing-masing subsistem, dan membuat rata-rata dari masing-masing parameter tersebut.

Hasil dari penilaian kondisi adalah:

- Indeks kondisi peralatan
- Usulan tindak lanjut (misalnya: pelaksanaan inspeksi lanjutan, investigasi, *direct shutdown*)
- Panduan pengoperasian peralatan (misalnya: pengurangan pembebanan trafo)

Penilaian kondisi (*scoring*) transformator tenaga merupakan metode praktis untuk mengukur atau menggabungkan hasil pengamatan operasi, inspeksi lapangan, dan pengujian laboratorium menjadi indeks obyektif dan kuantitatif, serta memberikan nilai kesehatan keseluruhan dari aset.

Scoring transformer adalah alat yang ampuh untuk mengelola aset transformator dan mengidentifikasi kebutuhan investasi dan memprioritaskan investasi ke dalam program modal dan pemeliharaan, dengan cara mengukur kondisi peralatan berdasarkan kriteria kondisi yang terkait dengan faktor-faktor degradasi jangka panjang yang secara kumulatif mengakibatkan kerusakan peralatan. Hasil *scoring* transformer berbeda dari pengujian pemeliharaan, yang menekankan pada pencarian kerusakan dan kekurangan yang perlu koreksi atau perbaikan untuk menjaga operasi aset selama beberapa periode waktu.

Dalam menghitung nilai *scoring*, nilai setiap parameter dicari berdasarkan batas standar internasional yang dipakai dan rumus. Setiap nilai parameter yang telah didapat kemudian dijumlahkan semua untuk mendapat nilai akhir *scoring*. *Scoring* trafo dapat bersifat kualitatif maupun kuantitatif dengan jumlah klasifikasi yang bergantung pada kemampuan kita untuk

menentukan batasan klas. Indeks kondisi ini digunakan sejak asesmen tingkat awal hingga asesmen tingkat lanjut. Karena itu yang kita pakai adalah indeks kondisi yang bersifat kuantitatif. Dengan alasan masih belum memadainya pengetahuan kita tentang proses *ageing* peralatan dan untuk kemudahan, maka kondisi peralatan dibagi menjadi 3 (tiga) klas dengan kode indeks kondisi sebagai berikut:

- klas baik : kode indeks kondisi 9
- klas moderat : kode indeks kondisi 6
- klas buruk : kode indeks kondisi 1

Sekilas klasifikasi ini menyerupai rambu lalu lintas: hijau – kuning- merah. Sehingga tidak menutup kemungkinan pada saat aplikasi dibuat ada informasi (berupa tulisan ataupun tanda) yang diberi warna sesuai indeks kondisinya.

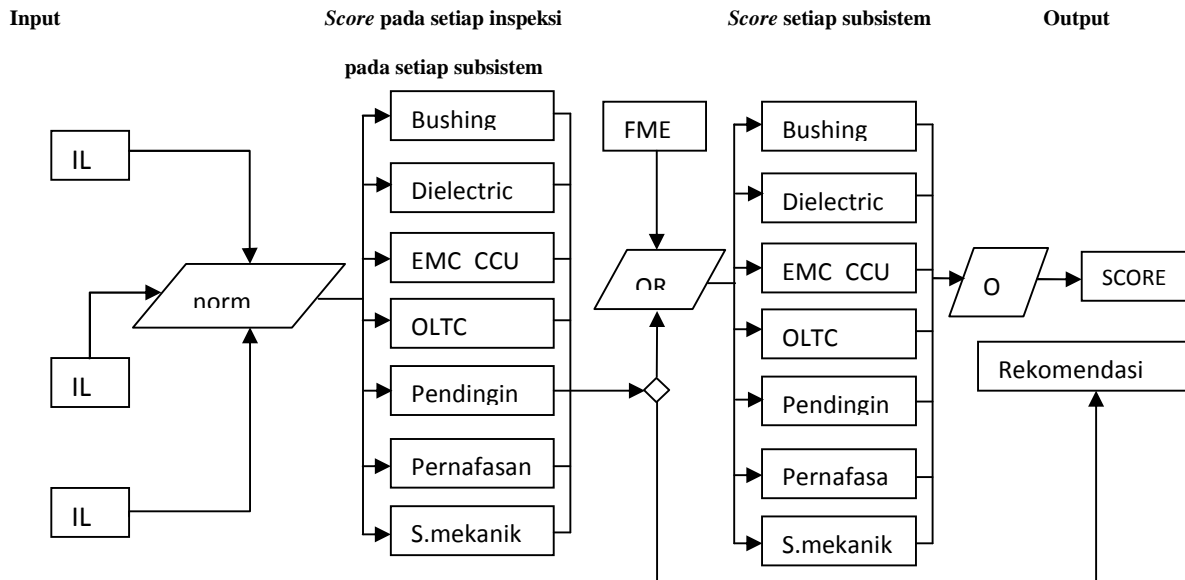
3.7.2 Alur Scoring

Proses asesmen pada dasarnya meliputi inspeksi dan diagnosa. Inspeksi dilaksanakan dalam tiga bentuk, sebagai berikut :

1. Pelaksanaan inspeksi level 1, yaitu melakukan inspeksi secara visual dan pencatatan anomali yang dilakukan secara visual.
2. Pelaksanaan inspeksi level 2, yaitu melakukan pengujian peralatan secara *on-line* (peralatan diuji saat masih beroperasi) dan pencatatan hasil uji yang telah dilakukan.
3. Pelaksanaan inspeksi level 3, yaitu melakukan pengujian peralatan secara *off-line* (peralatan diuji saat padam) dan pencatatan hasil uji yang telah dilakukan.

Dalam proses diagnosa, dilakukan penilaian atau *scoring* pada setiap inspeksi pada setiap subsistem, nilai setiap parameter dicari berdasarkan batas standar (*norm*) yang dipakai. Setiap nilai parameter yang telah didapat kemudian dijumlahkan semua untuk mendapat nilai akhir *scoring*.

Konsep general scoring transformator tenaga dijelaskan seperti diagram dibawah ini:



Gambar 2.12 konsep general scoring transformator tenaga.

2.7.3 Keuntungan Penggunaan Penilaian Kondisi

Secara umum penggunaan *scoring* dalam menentukan tingkat unjuk kerja obyek dapat memberikan keuntungan bagi pemilik obyek. Keuntungan yang didapatkan antara lain :

- Dapat mengurangi biaya operasi dan maintenance, karena perubahan metode *maintenance*, dari pola *time-based* (secara periodik) menjadi *condition-based*.
- Meningkatkan ketersediaan dan keandalan obyek. Dengan melakukan Penilaian Kondisi maka dapat dilakukan analisis kemungkinan gangguan yang terjadi serta parameter yang terlibat dalam gangguan tersebut sehingga dapat dilakukan tindakan preventif untuk mencegah hal-hal yang mengarah pada kegagalan (*failure*). Sehingga hal tersebut dapat meningkatkan keandalan obyek tersebut.
- Mengevaluasi umur penggunaan komponen pada obyek. Berdasarkan kondisi sebenarnya yang ada dilapangan maka dapat ditentukan kelayakan suatu komponen untuk tetap digunakan atau harus diganti.