

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Terdapat beberapa referensi yang digunakan dalam penulisan tugas akhir ini. Referensi-referensi ini yang nantinya digunakan untuk mengetahui batasan-batasan dalam topik skripsi yang dikerjakan. Berikut ini referensi-referensi yang diambil dan ditabulasi ditunjukkan pada Tabel 2.1.

- a. Penelitian yang dilakukan oleh Ningrum, Atik Setyo (2012) yang berjudul “*Analisis Partial Discharge Pada Belitan Stator Generator GT.11 dan ST.10 PLTGU Grati dan Peramalan Prediksi Generator dengan Metode Regresi Linear*”.
- b. Penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Hamdani Rizal, Rudy setiabudy (2013) yang berjudul “*Anallisis Kualitas Isolasi Belitan Dari Kumparan Stator Motor 6.6 kV Berdasarkan Nilai Tahanan Isolasi, Tan Delta dan Arus Bocor Pada Pengujian Tegangan Tinggi (DC)*”.
- c. Penelitian yang dilakuakan oleh Annisa R. Nurul (2014) yang berjudul “*Electrical Test Pada Perbaikan Motor Induksi rotor sangkar 3300 V 750 kW*”.
- d. Penelitian yang dilakukan oleh Sakti H, R. Maulana yang (2016) yang berjudul “*Pengukuran Hambatan Isolasi dan Pemeliharaan Pada Stator Annual Inspection Generator Unit 8 PT. Pembangkit Cirata*”.
- e. Penelitian yang dilakukan oleh Fatchur (2016) yang berjudul “*Analisis Tahanan Isolasi Generator AC 35 MW / 11kV Unit 1 PLTA Sutami*”.
- f. Penelitian yang dilakukan oleh Bimantara, Yoga (2016) yang berjudul “*Analisis Kelayakan Tahanan Isolasi Generator AC 60 MW / 13.8 kV PLTA PB Soedirman Mrica*”.

Tabel 2. 1 Tinjauan Pustaka penelitian sebelumnya

No	Penulis	Metode Penelitian	Penelitian
1	Ningrum, Atik Setyo, 2012	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pengujian <i>Tangent Delta</i>. 2. Pengujian Resistansi. 3. <i>Surge Comparison</i>. 4. Pengujian Tegangan tinggi. 	Penelitian ini membahas tentang <i>Partial Discharge</i> pada belitan dimana pengoperasian dan pengamanan pada generator merupakan hal wajib untuk menjaga kestabilan generator.
2	Muhammad Hamdani Rizal, Rudy Setyabudi, 2013	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pengujian Resistansi. 2. Pengujian <i>Tangent Delta</i>. 	Penelitian ini membahas mengenai kualitas isolasi pada kumparan stator mesin dimana kualitas isolasi belitan peralatan tegangan menengah maupun tinggi perlu diperhatikan mengingat penyebab kegagalan mesin paling tinggi karena buruknya kualitas isolasi.
3	Annisa R. Nurul, 2014	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pengujian <i>Tangent Delta</i>. 2. Pengujian Resistansi. 3. <i>Surge Comparison</i>. 4. Pengujian Tegangan tinggi. 	Penelitian ini membahas mengenai <i>Electrical test</i> pada perbaikan motor induksi rotor dimana buruknya kualitas isolasi merupakan penyebab kerusakan pada motor.
4	Sakti H, R. Maulana, 2016	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pengujian Insulation Resistance. 2. Polarization Index. 3. Pengujian <i>Tangent Delta</i>. 	Penelitian ini membahas mengenai pengukuran hambatan isolasi dan pemeliharaan pada stator.
5	Fatchur, 2016	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pengujian Insulation Resistance. 2. Polarization Index. 3. Pengujian <i>Tangent Delta</i>. 	Penelitian ini membahas mengenai tahanan isolasi generator AC dimana nilai tahanan yang bagus merupakan syarat yang wajib untuk suatu generator, khususnya belitan rotor dan stator.
6	Bimantara, Yoga, 2016	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pengujian <i>Tangent Delta</i>. 2. Pengujian Tegangan tinggi. 	Penelitian ini membahas mengenai kelayakan tahanan isolasi generator AC dimana generator

Tabel 2. 1 Tinjauan Pustaka penelitian sebelumnya (lanjutan)

			memerlukan syarat khusus untuk dapat beroperasi secara optimal yaitu nilai tahanan isolasi yang bagus. Karena akibat pengoperasian perlu dilakukan pemeliharaan berkala.
--	--	--	--

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Generator Sinkron

Generator sinkron sering di sebut juga sebagai Generator AC karena dapat menghasilkan tegangan bolak-balik (AC). Generator dikatakan sinkron apabila jumlah putaran rotor sama dengan jumlah medan magnet pada stator. Kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama akan menghasilkan kecepatan sinkron. Hubungan antara medan magnet dan frekuensi pada stator dapat ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$N_s = \frac{120xf}{p} \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan:

N_s : kecepatan medan putar (Rpm)

f : frekuensi (Hz)

p : jumlah kutub

Ketika kumparan rotor berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang berputar, maka pada kumparan rotor akan timbul fluks. Fluks inilah yang akan menginduksi dan memotong kumparan stator sehingga timbul gaya gerak listrik (GGL).

2.2.2 Konstruksi Generator Sinkron

Pada umumnya generator sinkron memiliki dua bagian utama, yaitu: rotor dan stator. Stator merupakan bagian tidak bergerak yang menghasilkan tegangan

bolak-balik. Rotor merupakan bagian bergerak yang menghasilkan medan magnet dan menginduksikannya ke stator. Kedua bagian tersebut merupakan rangkaian magnetik yang berbentuk simetris dan silindris. Selain itu generator sinkron juga mempunyai ruang celah udara antara stator dan rotor sebagai tempat timbulnya fluks listrik. Kontruksi generator sinkron ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Kontruksi Generator Sinkron

a. Stator

Pada umumnya *stator* merupakan tempat ggl dibangkitkan dan tempat arus beban mengalir ketika *generator* berbeban. *Stator generator* untuk pusat pembangkit listrik umumnya terdiri dari 3 bagian yaitu, rangka *stator* (*stator frame*), inti *stator* (*stator core*) dan kumparan *stator* (*stator winding*). Stator generator sinkron ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Satator Generator Sinkron

1) Rangka Stator (*Stator Frame*)

Rangka stator dibuat menyerupai tabung silinder yang bagian dalamnya diperkuat dengan rusuk-rusuk berupa lempengan-lempengan cincin baja yang di-las. Di sekeliling bagian dalam rangka silinder ini kemudian dipasang baja-baja bulat juga di-las sehingga menyerupai bentuk sangkar.

2) Inti Stator (*Stator Core*)

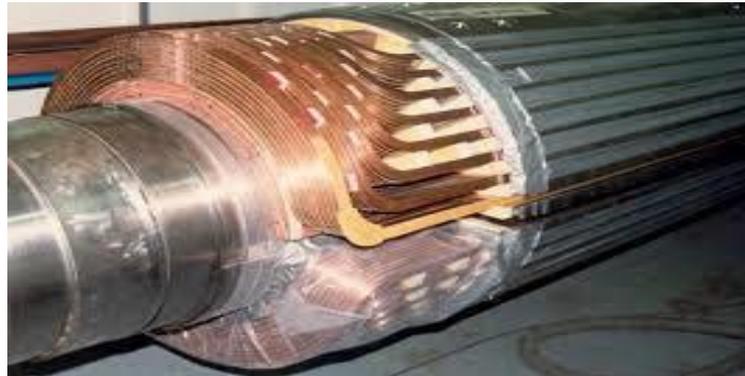
Inti stator terbuat dari segmen-segmen dimana tiap segmen tersebut terbuat dari laminasi lembaran plat baja silikon yang memiliki sifat kemagnitan sangat baik (permeabilitasnya tinggi).

3) Kumparan Stator (*Stator Winding*)

Kumparan stator terbuat dari lempengan-lempengan tembaga berpenampang segi empat (*copper strips*) dan mempunyai konduktifitas yang tinggi, yang dililit dengan pita isolasi diseluruh permukaannya sehingga membentuk batang solid yang terisolasi. Batang tembaga berisolasi ini kemudian ditempatkan pada alur (*slot*) inti stator dan dikunci dengan pasak yang terbuat dari bahan isolasi.

b. Rotor

Pada umumnya *rotor* merupakan tempat dimana medan magnet dibangkitkan. *Rotor generator* terdiri dari 2 bagian inti *rotor* dan kumparan *rotor*. *Rotor* pada umumnya ditumpu pada kedua ujungnya dengan bantalan (*bearing*). Perlu diketahui bahwa salah satu atau bahkan ke dua bantalan tersebut diisolasi terhadap pondasi (*ground*). Hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya sirkuit yang tertutup antara *rotor*, bantalan dan pondasi (*ground*) yang dapat menimbulkan aliran arus liar ini terjadi, maka permukaan bantalan minyak pelumas akan rusak akibat efek elektrokimia (*electro chemical*). Rotor generator sinkron ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Rotor Generator Sinkron

1) Inti Rotor

Inti rotor terbuat dari baja tuang yang dibubut atau bahan *feromagnetic* yang mempunyai permeabilitas tinggi di sekeliling inti rotor dibuat laur-alur dalam arah aksial untuk menempatkan konduktor kumparan dan sebagai saluran bagi media pendingin.

2) Kumparan Rotor

Kumparan rotor terbuat dari lempengan konduktor tambahan yang mempunyai konduktifitas tinggi yang dimasukkan kedalam alur-alur pada inti rotor setelah seluruh permukaan alur dilapisi bahan isolasi. Kedua ujung kumparan masing-masing dihubungkan ke *slipring* yang terbuat dari baja ke tempat yang diisolasi terhadap bodi rotor (untuk rotor *Generator* dengan sistem eksitasi statis). Untuk *generator* dengan sistem eksitasi tanpa sikat arang (*brushless*), kedua ujung kumparan rotor dihubungkan ke konduktor yang melintasi lubang di pusatt rotor agar dapat disambung ke *output rotating rectifier*. Kedua ujung rotor kemudian dipasang *fan* untuk mensirkulasikan media pendingin.

3) Bantalan Rotor

Rotor pada umumnya ditumpu kedua ujungnya dengan bantalan (*bearing*). Perlu diketahui bahwa salah satu atau kedua bantalan ini di isolasi terhadap pondasi (*ground*). Hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya sirkuit tertutup antara rotor, bantalan dan pondasi (*ground*) yang dapat menimbulkan aliran arus liar terjadi, maka permukaan

bantalan minyak pelumas akan rusak akibat efek elektrokimia (*electrochemical*).

2.2.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Prinsip dasar kerja *generator* adalah berdasarkan hukum *Faraday* yaitu “apabila lilitan penghantar dengan jumlah N lilitan atau konduktor diputar memotong garis-garis gaya medan magnet yang diam, atau lilitan penghantar diam dipotong oleh garis-garis gaya medan magnet yang berputar, maka pada penghantar tersebut timbul EMF atau GGL (gaya gerak listrik I atau tegangan induksi”. Jadi apabila bagian magnet (rotor) diputar dengan kecepatan konstan, maka akan muncul induksi tegangan *sinusoidal* pada bagian tersebut. Besarnya tegangan yang dihasilkan yaitu:

$$E = -N (\Delta\Phi/\Delta t) \dots \dots \dots (2.2)$$

(tanda negatif menunjukkan arah induksi)

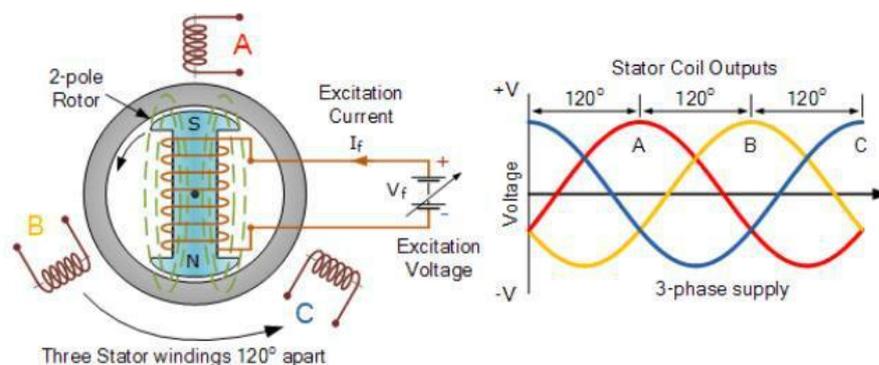
Dengan:

E = besarnya tegangan yang dihasilkan

N = jumlah lilitan

$\Delta\Phi/\Delta t$ = laju perubahan fluks magnetik

Prinsip kerja generator dapat ditunjukkan pada Gambar 2.4.



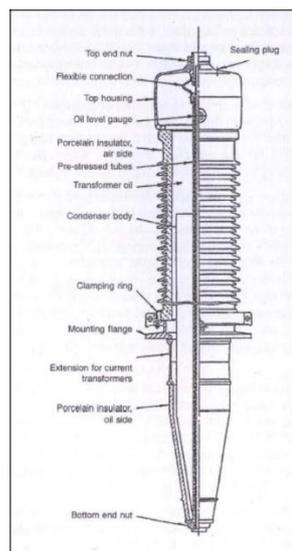
Gambar 2. 4 Prinsip Kerja Generator

Dari gambar 2.4 dapat dilihat proses terbentuknya induksi tegangan *sinusoidal*. Ketika kumparan medan magnet diputar dengan kecepatan konstan,

maka kumpulan jangkar ABC akan menghasilkan gelombang tegangan. Gelombang tegangan inilah yang nantinya menjadi tegangan keluaran dari suatu generator.

2.2.4 Bushing

Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar. Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut yang berfungsi sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan *body main tank* transformator. Bagian-bagian bushing ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Bagian-bagian Bushing

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

Terdapat jenis-jenis konduktor pada bushing yaitu *hallow conductor* dimana terdapat besi pengikat atau penegang ditengah lubang konduktor utama, konduktor pejal dan fleksibel lead.

Klem koneksi merupakan sarana pengikat antara stud bushing dengan konduktor penghantar di luar bushing.

Aksesoris bushing terdiri dari indikasi minyak, seal atau gasket dan tap pengujian. Seal atau gasket pada bushing terletak dibagian bawah mounting flange.

2.2.5 Flashover

Flashover adalah gangguan yang terjadi berupa loncatan api yang terjadi antar isolator atau komponen listrik tegangan tinggi. Hal ini dapat terjadi akibat gagalnya isolasi dari sistem tegangan tinggi tersebut.

Kegagalan listrik pada isolator dapat disebabkan oleh adanya rongga-rongga kecil pada dielektrik padat (porselen) atau disebabkan terjadinya *flashover* di sepanjang permukaan isolator. Rongga-rongga kecil pada isolator ditimbulkan karena isolator dibuat kurang sempurna pada saat pembuatan, dengan demikian karakteristik listrik dari isolator tersebut kurang baik. Rongga kecil pada isolator lama-kelamaan akan menyebabkan kerusakan mekanik pada isolator. Terjadinya *flashover* menyebabkan kerusakan pada isolator oleh karena panas yang dihasilkan busur di sepanjang permukaan isolator. Oleh sebab itu isolator harus dibuat sedemikian rupa sehingga tegangan pada rongga kecil lebih tinggi dari pada tegangan yang menyebabkan *flashover*.

Kegagalan lewat denyar (*flashover*) berawal dari terbentuknya pita kering (*dry band*). Seperti telah dijelaskan sebelumnya, bahwa terbentuknya lapisan konduktif di permukaan isolator diakibatkan oleh adanya polutan yang menempel. Lapisan yang terbentuk di permukaan isolator ini menyebabkan mengalirnya arus bocor (*leakage current*). Dengan mengalirnya arus bocor, terjadi pemanasan di lapisan tersebut. Lapisan ini dapat membentuk pita kering (*dry band*) akibat dialiri arus bocor secara terus menerus. Pada tegangan tertentu, kondisi ini dapat menyebabkan pelepasan muatan melintasi pita kering. Pelepasan muatan dapat memanjang sehingga terbentuk busur listrik (*arc*) dan terjadi lewat denyar (*flashover*) yang melalui seluruh permukaan isolator.

2.2.6 Isolator

Untuk memproteksi lilitan medan dan lilitan stator sistem isolasi generator menngabungkan beberapa material berbeda, sehingga pada bagian utama

memerlukan beberapa pengujian untuk mendapatkan batasan standar isolasi. Sistem isolasi ini meliputi kekuatan dielektrik yang telah berhasil menggunakan mika dalam berbagai bentuk. Dalam penyusunan isolasi lilitan *asphalt-mica* pada generator mempunyai sejarah dapat menyerap kelembaban, namun dalam beberapa kasus membutuhkan pengeringa lilitan untuk mendapatkan level resistansi isolasi yang baik. Isolasi *epoxy-mica* sekarang banyak digunakan karena mempunyai kekuatan mekanik dan kedap air yang baik terhadap air, oli atau kontaminasi lain yang di timbulkan oleh kondisi abnormal.

Kualitas isolasi menjadi faktor yang harus diperhatikan untuk melakukan suatu perbaikan (*rewinding*) ataupun (*reinsulation*). Pengujian dengan tetangan tinggi pada belitan merupakan salah satu cara untuk mengetahui adanya arus bocor pada isolasi belitan. Dengan memberikan tegangan tinggi pada isolasi belitan, maka dapat menunjukkan kualitas dari isolasi terhadap tegangan kerja yang di terima.

Besarnya nilai arus bocor yang terdeteksi pada saat pengujian, menjadi parameter dari ketahanan kualitas isolasi terhadap tegangan kerja yang diterima. *Dissipation factor* atau *tan delta* merupakan parameter untuk memperlihatkan efisiensi isolasi. Pengujian *tan delta* sangat efektif untuk mendeteksi adanya kontaminasi isolasi, kualitas semikonduktor, jumlah kandungan kehampaan dan *partial discharge*.

2.2.7 Bahan Isolasi

Bahan isolasi sangatlah berbeda antara aslinya dan kekayaannya, keduanya adalah manometalik dan tidak tersusun secara teratur atau organik, seragam atau heterogen dikomposisi, alami atau buatan. Banyak dari mereka berasal dari bahan alami seperti kertas, kain, mika dan lilin.

Banyak sekali kekayaan yang dapat menentukan pantas atau tidaknya suatu bahan isolasi. Daya hambat, kekuatan elektis, histeris *dielectric* dan keuletan adalah syarat suatu bahan isolasi. Suatu bahan isolasi yang ideal harus memenuhi syarat diatas.

Bahan isolasi untuk mesin-mesin listrik dalam hubungan dengan stabilitas yang berkenaan dengan panas di bagi menjadi beberapa kelas. Kelas bahan isolasi dan temperatur ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 2 Kelas Bahan Isolasi dan Temperatur

Kelas	Temperature
Y (formely 0)	90°C
A	105°C
E	120°C
B	130°C
F	155°C
H	180°C
G	Diatas 180°C

Kelas suatu bahan dibatasi oleh kekuatan terhadap temperature. Temperature kerja mulai dari yang paling rendah yaitu kelas Y. Karena kelas suatu bahan tidak digunakan secara luas untuk lilitan mesin, transformator dan switchgear. Untuk itu isolasi dikelompokkan menjadi beberapa kelas sebagai berikut:

a. Kelas A

Kelas A terdiri dari kombinasi bahan-bahan seperti kapas, sutera dan kertas dengan ditambah kombinasi bahan-bahan lain seperti minyak dan lain-lain yang tercakup pada kelas A. dimana kombinasi tersebut pada pengetesan mampu beroperasi pada temperature kelas A.

b. Kelas E

Kelas E terdiri dari kombinasi bahan-bahan seperti mika, asbes dan lain-lain yang pada pengetesan mampu beroperasi pada temperature kelas E.

c. Kelas F

Kelas F terdiri dari kombinasi bahan-bahan seperti mika, serat kaca, asbes dan lain-lain, dengan tambahan bahan lain yang tidak perlu tersusun dengan teratur. Dimana bahan-bahan tersebut pada pengetesan mampu beroperasi pada temperature kelas F yaitu 25°C lebih tinggi dibandingkan dengan kelas B.

d. Kelas G

Kelas G terdiri dari kombinasi bahan-bahan seperti mika, porselin, kwarsa dan kaca dengan susunan tidak teratur. Kombinasi bahan-bahan lain mungkin tercakup di dalam kelas ini, jika pada pengetesan mereka mampu beroperasi pada temperature kelas G.

e. Kelas H

Kelas H terdiri dari bahan silium dan kombinasi bahan seperti mika, serat kaca, asbes dan lain-lain dengan tambahan seperti damar. Kombinasi bahan-bahan lain mungkin tercakup di dalam kelas ini, jika dalam pengetesan mereka mampu beroperasi pada kelas temperature H.

f. Kelas Y

Kelas Y terdiri dari kombinasi bahan-bahan seperti kapas, sutera dan kertas dengan tambahan bahan lain yang tercakup dalam kelas Y. Dimana dalam pengetesan bahan-bahan tersebut mampu beroperasi pada temperature kelas Y.

2.2.8 Tahanan Isolasi

Ketika tegan DC diijeksikan kepada isolator yang terbuat dari bahan polimer, maka arus mengalir melewati bagian dalam dan permukaannya. Tahanan isolasi adalah perbandingan dari tegangan DC yang diijeksikan dan arus total, perbandingan antara tegangan dengan arus yang melewati bagian dalam disebut tahanan volume dan perbandingan antara tegangan dan arus yang melewati bagian

permukaannya disebut tahanan permukaan. Tahanan volume per satuan tebal dan per satuan luas disebut ketahanan volume (Ωcm), sedangkan tahanan permukaan per satuan jarak permukaan atau satuan panjang dari elektroda disebut ketahanan permukaan (Ω).

2.2.9 Klasifikasi Bahan Isolasi

Bahan isolasi dapat diklasifikasikan menjadi 3 yaitu:

1. Bahan Isolasi Gas

Bahan isolasi ini berupa udara, nitrogen dan belerang. Hal ini dikarenakan bahan tersebut sangat ekonomis, mudah didapatkan, tidak mudah meledak dan menyala.

- a. Udara sangat baik digunakan pada isolasi tegangan rendah dan menengah. Karena arus bocor pada udara lebih kecil dibandingkan dengan bahan isolasi cair dan padat pada kondisi yang sama dan *dielectric* mendekati nol. Akan tetapi udara mempunyai *dielectric strength* rendah yaitu 3-5 kV/mm. Jadi ketika dua buah elektroda dipisahkan oleh udara dan diberikan tegangan tinggi yang melebihi tegangan tembus maka akan terjadi loncatan bunga api dan apabila tegangan dinaikkan lagi maka akan timbul busur api.
- b. Dalam beberapa kasus nitrogen mempunyai dua kegunaan yaitu sebagai bahan isolasi dan bahan kimia untuk mencegah oksidasi sehingga menambah umur peralatan.
- c. Belerang merupakan bahan isolasi yang baik karena mempunyai *dielectric strength* yang tinggi yaitu 75 kV/cm, tidak mudah terbakar dan mempunyai struktur kimia yang stabil pada tekanan tinggi dan temperatur sampai 100°C.

2. Bahan Isolasi Cair

Bahan isolasi cair biasanya digunakan sebagai bahan pengisi pada beberapa peralatan listrik seperti transformator, circuit breaker dan masih banyak lagi. Bahan isolasi ini berfungsi sebagai isolator dan sekaligus media pendingin pada peralatan listrik. Bahan isolator cair yang banyak digunakan adalah minyak transformator.

Minyak transformator merupakan mineral minyak yang diperoleh dari pemurnian minyak mentah. Selain itu minyak transformator juga bias diproduksi dari bahan organik seperti piranol dan silicon.

3. Bahan Isolasi Padat

Bahan isolasi ini banyak digunakan pada kumparan seperti kumparan motor, generator, transformator. Bahan isolasi padat di kemplompokkan sebagai berikut:

a. Bahan Berserat (*fibrous*)

Contoh bahan ini yaitu kayu, kertas, textile dan asbes. Keuntungan dari bahan ini adalah mudah dibentuk dan di proses, ekonomis, *mechanical strength* kuat dan mudah didapat. Sedangkan kerugiannya yaitu bersifat hygroskopis dan *dielectric strength* rendah.

b. Bahan Mineral

Merupakan bahan isolasi yang dihasilkan dari tambang yang diolah dan dibentuk sesuai kebutuhan seperti: mica, maner, sabak dan aspal. Bahan ini sering digunakan pada mesin-mesin listrik tegangan tinggi, heating lemen dan bahan *dielectric* pada isolasi.

c. Bahan Karet

Bahan karet memiliki elastisitas yang sangat tinggi, tahan terhadap cuaca, *dielectric strength* tinggi dan dapat dicampur dengan belerang sehingga tahan terhadap temperature.

2.2.10 Isolasi Belitan Stator

Generator merupakan bagian paling penting dalam proses pembangkitan energy listrik. Salah satu bagian penting pada generator dan menjadi penyebab utama kegagalan dari kerja generator adalah system isolasi belitan stator. Sekitar 26% dari kegagalan kerja generator berasal dari kesalahan isolasi. Maka dari itu kelemahan dari suatu isolasi yang dapat mengakibatkan kegagalan kerja generator harus diketahui sejak dini.

Masalah utama isolasi adalah tentang pengaruh *disruptive discharge*, yang dapat timbul pada saat terjadi tekanan oleh tegangan pelepasan. Maka dari itu perlu dilakukan pemeliharaan dan pengujian yang rutin untuk mesin-mesin yang berputan (generator).

2.2.11 Bahan Isolasi pada Mesin-mesin Listrik Modern

Seiring dengan modernisasi, bahan isolasi juga mengalami perkembangan pada mesin-mesin modern sebagai berikut:

a. Mika

Diaplikasikan dalam bentuk lembar atau format, untuk pertama biasanya sukar untuk dikerjakan. Maka dari itu digunakan lembaran tipis dengan campuran aspal atau sintetik atau polyster.

b. Miklofiun

Merupakan salah satu pembungkus yang terdiri dari mika tipis dan dilapisi dengan kertas kering kedap udara.

c. Kaca Berserat

Terbuat dari material logam alkali oksida yang hanya diperbolehkan untuk membentuk satu permukaan mantel saja.

d. Asbes

Bahan ini baik untuk mesin lemah, bahkan ketika ditunen dengan serat katun bahan ini lebih buruk dari pada kaca berserat.

e. Serat Katun

Serat katun terbuat dari kapas yang ditunen, yang mana baru-baru ini sedang dikembangkan dan memiliki kinerja yang luar biasa sebagai bahan isolasi.

f. Polymiides

Polimiides tipe nilon mempunyai kekuatan mekanis yang tinggi dan mempunyai ruang actor yang baik. Karena nilon film mempunyai ketahanan yang baik terhadap temperature dan tegangan tembus.

g. Cat

Bahan ini mempunyai lapisan yang lembut dan sempurna. Bahan ini juga telah banyak digunakan untuk laminasi lilitan.

h. Kayu

Bahan ini cocok untuk pengaturan jarak antar konduktor. Berbicara dengan cat yang sempurna untuk laminasi kayu juga mendukung untuk pengepakan dan sekat.

i. Silikon

Silikon sudah banyak sekali digunakan untuk bahan isolasi pada mesin-mesin listrik modern karena tahan terhadap panas dan tegangan tembus.

j. Resin Epoxy

Bahan ini sangat penting karena mempunyai daya rekat yang tinggi dan dapat digunakan untuk varnish terutama untuk transformator kecil dan lilitan.

k. Minyak

Minyak banyak digunakan sebagai media pendingin dan isolasi transformator. Karakteristik penting dari minyak adalah sifat kimia yang stabil, tahan terhadap karat, kekuatan elektris yang baik, bersih dan kedap terhadap air.

l. Akarels

Akarels merupakan bahan sintetik dengan cairan isolasi yang tidak mudah terbakar ketika tercampur dengan listrik, berbeda dengan cairan insuling yang mudah terbakar. Secara umum akarels berukuran 60/40, memiliki titik cair yg rendah dan memiliki kekentalan yang baik untuk menahan panas.

2.2.12 Aplikasi Bahan Isolasi

Terdapat beberapa material penting yang digunakan dalam pembuatan isolator sesuai dengan kebutuhan dan pengaplikasiannya, sebagai berikut:

1. Bahan Isolasi untuk Kawat

Kawat berbentuk bulat sering digunakan untuk alat instrument, piranti elektronik dan mesin elektrik. Untuk kebutuhan isolasi fleksibilitas, kecepatan dan kemampuan terhadap tekanan adalah syarat utama yang harus terpenuhi. Material yang digunakan umumnya masuk dalam kelas A.

Isolasi ini terdiri dari lapisan film yang diencerkan yang kemudian di balutkan pada kawat. Hal ini berkaitan dengan proses yang ekonomis. Karena kawat berlapis email banyak digunakan dan bersifat universal untuk motor kecil dan piranti industry.

Untuk lapisan film ukurannya tipis yaitu 0,055 – 0,075 mm. bahan yang digunakan untuk membuat lapisan film adalah sebagai berikut:

a. Kapas

Terdiri dari benang kapas terbaik dengan bentuk seperti sekrup pada kawat di dalam mesin.

b. Sutra

Digunakan untuk melindungi kawat dan memberikan ruang untuk kawat. Akan tetapi karena harganya yang terbilang sangat mahal sekarang sudah tidak banyak lagi digunakan.

c. Kaca Berserat

Terbuat dari material logam alkali oksida yang hanya diperbolehkan untuk membentuk satu permukaan mantel saja.

d. Asbes

Bahan ini baik untuk mesin lemah, bahkan ketika ditenun dengan serat katun bahan ini lebih buruk dari pada kaca berserat.

2. Bahan Isolasi untuk Laminasi

Bahan untuk laminasi dituntut untuk *insulated*. Maka dari itu berikut adalah bahan yang umum digunakan untuk laminasi:

a. Insulin

Insulin adalah suatu campuran kaolin yang kedua sisinya menyangkut pada laminasi tersebut. Total ketebalan mantel laminasi adalah 0,01 – 0,025 mm.

b. Oksida

Insulin adalah suatu campuran kaolin yang kedua sisinya menyangkut pada laminasi tersebut. Total ketebalan mantel laminasi adalah 0,01 – 0,025 mm.

c. Pernis

Pernis merupakan jenis isolasi yang paling efektif dan tersedia sekarang. Pernis juga tahan terhadap karat dan temperature produksi pada mesin-mesin listrik. Pernis pada umumnya digunakan pada kedua sisi laminasi dengan ketebalan 0,006-0,05 mm.

3. Bahan Isolasi untuk Mesin

Generator AC/DC untuk tujuan industry biasanya di lapsi oleh material kelas A, akan tetapi untuk dynamo lebih ke material kelas B yang kemungkinan beroperasi pada tempertaur yang lebih tinggi.

2.2.13 Pemeliharaan Peralatan Listrik

Pemeliharaan peralatan listrik tegangan tinggi merupakan serangkaian kegiatan yang dilakukan untuk memberikan pencegahan terhadap gangguan yang terjadi pada peralatan yang mengakibatkan kerusakan pada peralatan, sehingga peralatan tidak berfungsi dengan sebagai mana mestinya.

Pemeliharaan peralatan listrik tegangan tinggi mempunyai tujuan sebagai berikut:

- a. Untuk menjamin kontinuitas penyaluran tenaga listrik dan mengurangi lama waktu *trip* ygn disebabkan oleh gangguan.
- b. Meningkatkan keandalan system dan efisiensi peralatan.
- c. Memperpanjang umur peralatan.
- d. Mengurangi terjadinya resiko kerusakan alat yang diakibatkan oleh gangguan.
- e. Meningkatkan *safety* pada peralatan.

Sistem isolasi menjadi faktor yang paling dominan pada pemeliharaan peralatan listrik tegangan tinggi. Semakin baik bahan isolasi yang digunakan pada suatu peralatan maka umur dari peralatan akan semakin panjang. Begitu juga sebaliknya jika bahan isolasi yang digunakan pada peralatan tidak terlalu baik maka umur dari peralatan akan lebih pendek. Oleh karena itu pemeliharaan pada sistem

isolasi harus diutamakan, mulai dari pemeliharaan terhadap isolasinya maupun penyebab kerusakan isolasi.

Pemeliharaan peralatan listrik tegangan tinggi dibedakan menjadi dua yaitu, dalam keadaan operasi meliputi pemeriksaan / *monitoring* (melihat, mendengar, meraba serta mencatat) dan dalam keadaan *trip* meliputi pemeliharaan (kalibrasi / pengujian, koreksi, memperbaiki serta membersihkan).

Monitoring dapat dilakukan oleh operator setiap hari dengan sistem *check list* atau catatan saja. Sedangkan pemeliharaan harus dilakukan oleh tim teknis pemeliharaan.

2.2.14 Jenis-jenis Pemeliharaan

Terdapat beberapa jenis-jenis pemeliharaan peralatan sebagai berikut:

a. Conditional Maintenance

Merupakan pemeliharaan yang dilakukan dengan cara memprediksi kondisi dari suatu peralatan dengan menentukan kapan kemungkinan terjadinya kegagalan pada peralatan tersebut. Dengan demikian kegagalan dari suatu peralatan dapat diketahui lebih dini.

b. Times Base Maintenance

Merupakan pemeliharaan yang bertujuan untuk mencegah terjadinya kerusakan secara tiba-tiba pada peralatan serta mempertahankan kinerja peralatan secara optimal sesuai dengan umur teknisnya. Pemeliharaan ini dilakukan secara berkala dengan berpedoman pada *manual book* dari pabrik serta pengalaman dilapangan. Pemeliharaan ini sering juga disebut dengan pemeliharaan berdasarkan waktu (*time base maintenance*).

c. Corrective Maintenance

Merupakan pemeliharaan yang terencana dan dilakukan pada waktu-waktu tertentu ketika peralatan listrik mengalami gangguan atau peralatan tidak bekerja secara optimal. Pemeliharaan ini bertujuan untuk mengembalikan keadaan peralatan menjadi lebih baik atau seperti semula disertai dengan perbaikan dan penyempurnaan instalasi.

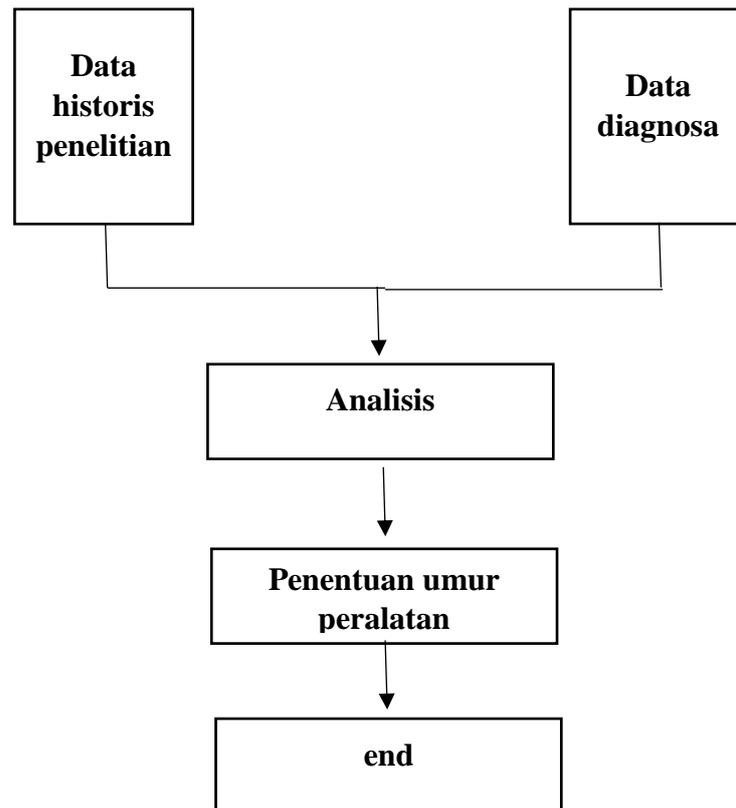
Pemeliharaan ini dapat juga disebut *Curative Maintenance*, yang bisa berupa *trouble shooting* atau penggantian bagian-bagian yang rusak atau tidak berfungsi sebagaimana mestinya dan dilaksanakan secara terencana.

d. Breakdown Maintenance

Merupakan pemeliharaan yang dilakukan setelah terjadi gangguan atau kerusakan yang bersifat mendadak dan darurat.

2.2.15 Remaining Life Assesment (RLA)

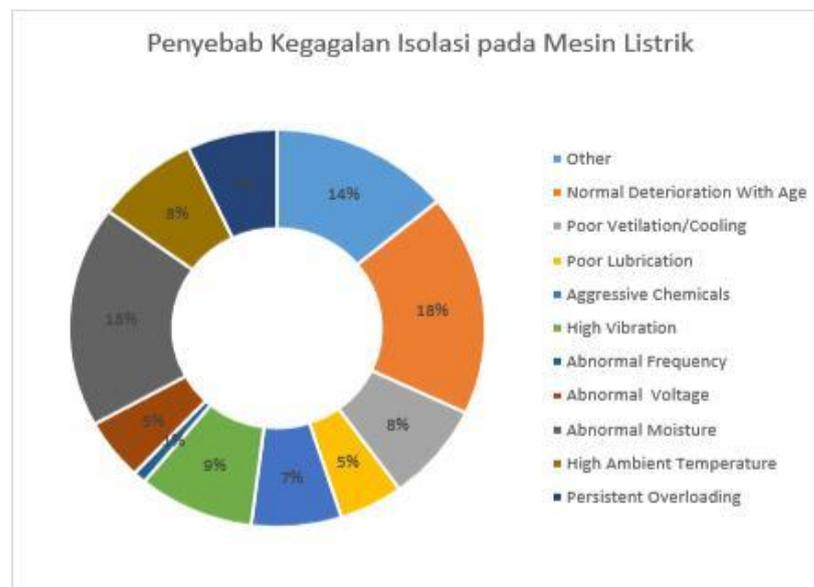
Teori pada pemeliharaan *conditional base maintenance* banyak diterapkan pada sistem kelistrikan, karena pemeliharaan ini dapat mencegah terjadinya kerusakan secara tiba-tiba atau mendadak pada peralatan. Perencanaan yang matang seperti memonitor, mendiagnosa, dan penentuan umur peralatan menjadi kunci utamanya. Tujuannya adalah untuk meningkatkan *availability*, *reliability* dan *safeti* peralatan. Untuk itu diperlukan langkah-langkah dalam menentukan umur dari peralatan atau sring disebut dengan *remaining life assesment (RLA)*. Flowchart RLA ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Flowchart RLA

Data Historis peralatan harus sangat detail antara data pabrik, data commissioning, dan data pemeliharaan. Dikarenakan data-data penelitian harus sesuai dengan data-data pada pabrikan. Data historis ini adalah data peralatan pembangkit yang telah dilakukan pemeliharaan oleh pihak perusahaan.

Data tes diagnosis digunakan untuk mengetahui kondisi terbaru peralatan yang akan digunakan untuk RLA. Data ini sebagai acuan untuk mengetahui bagaimana keadaan peralatan pembangkit yang sedang digunakan oleh perusahaan. Grafik penyebab kegagalan isolasi ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Grafik Penyebab Kegagalan isolasi

Dari gambar 2.7 grafik penyebab kegagalan isolasi, pada mesin listrik dapat dilihat penyebab kegagalan terbesar adalah batasan usia peralatan (*Normal Deterioration With Age*) dan ketidak normalan kelembaban (*Abnormal Moisture*) yang mencapai nilai 18% dari penyebab kegagalan isolasi hal itu disebabkan oleh faktor usia pada mesin. Faktor usia pada mesin menjadi penyebab paling utama dari kegagalan isolasi pada mesin. Karena semakin lama usia mesin maka akan berpengaruh juga pada kinerja dari mesin listrik. Maka dari itu dilakukan perawatan berkala untuk mengurangi terjadinya risiko kerusakan pada mesin. Sedangkan faktor kelembaban akan membuat mesin menjadi cepat rusak karena suhu panas yang dihasilkan berlawanan dengan suhu disekitar karena semakin tingginya suhu mesin, kelembaban udara yang tidak normal dapat mempengaruhi kondisi kinerja pada mesin.

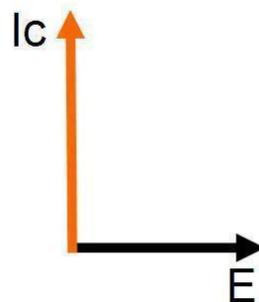
2.2.16 Tangent Delta

Tan Delta atau *dissipation factor* atau *dielectric loss* merupakan bilangan tanpa dimensi yang menunjukkan nilai tahanan isolasi. Idelanya isolasi yang baik tidak mengkonduksikan listrik sama sekali. Namun untuk mencapai hal itu sangatlah sulit sekali, maka akan tetap menjadi konduktor dan menglairkan sejumlah arus dan menjadi *loss*.

Pada isolasi dengan material yang baik, memiliki *losses* cukup rendah maka tidak memberikan efek merusak terhadap isolasi. Pengujian tan delta berfungsi untuk memeriksa *losses* yang terjadi atau juga bias sebagai *quality control*. Maka dari itu pengujian tan delta sering digunakan oleh perusahaan untuk memeriksa kondisi isolasi dari peralatannya. Karena tan delta dapat mendeteksi kondisi resin insulasi dalam keadaan *undercured* atau kontaminasi.

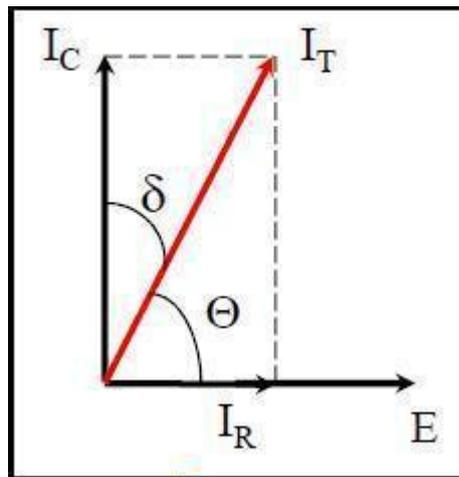
Insulasi atau isolasi sesuai dengan namanya berfungsi sebagai penyekat arus listrik. Ketika dua konduktor diletakkan secara berhimpitan, maka insulasi berada diantaranya. Teori ini sama seperti halnya kapasitor. Apabila tegangan (DC) diinjeksikan terhadap konduktor, maka arus *charging* kapasitif yang kuat mengalir pada isolator, hal ini yang dapat mengakibatkan arus bocor. Arus bocor yang mengalir melewati isolator berbanding lurus dengan tegangan dan berbanding terbalik dengan tahanan isolasi. Inilah yang menjadi prinsip dasar dari pengukuran tahanan isolasi atau megger tes.

Hampir sama dengan tegangan (DC), tegangan sinusoidal (AC) yang bervariasi, arus juga terbagi menjadi dua yaitu *charging current* atau lebih dikenal dengan arus *leading* atau kapasitif dan sejumlah kecil kebocoran arus atau resitif. Apabila digambarkan kondisi tegangan (AC) secara vector, arus berada pada arah melintang insulasi yang sempurna (seluruhnya kapasitif) dan 90% terhadap fase tegangan (*leading*). Kurva nilai kapasitif ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Kurva Nilai Kapasitif

Insulasi pada kenyataannya terdapat kebocoran arus melalui insulasi dengan kondisi satu fasa dengan tegangan, hal itu dikarenakan adanya sifat resitif pada insulasi. Dengan demikian saat tegangan (AC) diinjeksikan, arus total mengalir I_t terdiri dari arus kapasitif I_c arus resitif I_r seperti pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Kurva Tan Delta

Losses pada insulasi semuanya dipengaruhi oleh arus resistif.

Besarnya nilai *losses* dapat dihitung dengan rumus berikut:

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

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

2.2.17 Kelebihan Tangent Delta

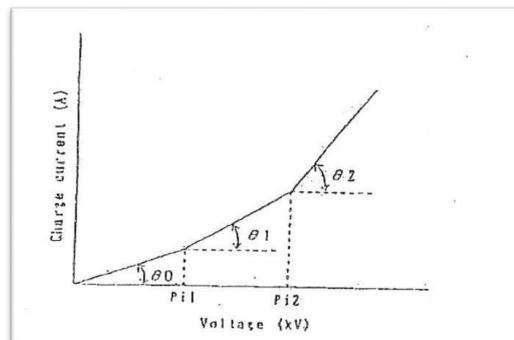
Pada dasarnya pengujian *tangent delta* merupakan tes diagnosis yang dilakukan pada isolasi kabel, coil dan belitan. Ini digunakan untuk tingkat degradasi kombinasi bahan-bahan isolasi pada peralatan mesin-mesin listrik, kabel dan belitan. Pengujian *tangent delta* beroperasi sesuai dengan prinsip bahwa setiap isolasi murni adalah bertindak sebagai kapasitor.

Pengujian *tangent delta* dapat memberikan hasil tangent dari sudut I_r / I_c yang memberikan suatu kondisi dari isolasi suatu peralatan. Semakin tinggi nilai sudut *loss* maka hasil akan menunjukkan tingginya tingkat kontaminasi pada isolasi. Dengan aplikasi dan interpretasi yang tepat pada pengujian tan delta, kondisi isolasi belitan dapat dimonitor dan dijaga untuk tetap dalam kondisi sesuai standart.

Pengujian tan delta juga dapat dilakukan pada mesin-mesin listrik yang telah selesai dilakukan *maintenance* untuk mengetahui kondisi belitan dan usia pakai dari peralatan.

2.2.18 Interpretasi Pengujian Tangent Delta

Pengukuran *tangent delta* mengukur total *loss* sistem insulasi, dibutuhkan pemisahan *loss* yang diakibatkan perubahan *partial discharge* agar dapat diperoleh *loss* yang diperlukan. Grafik Tan Delta ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Grafik Tan Delta

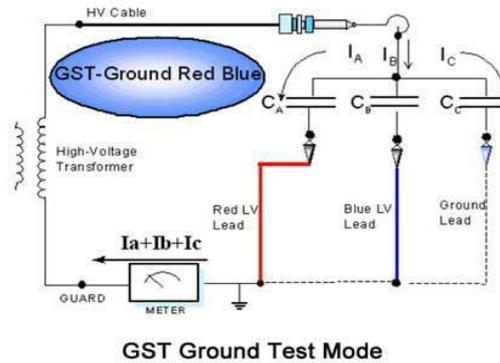
Pada tegangan rendah tidak terjadi *partial discharge* (karena rongga-rongga dalam insulasi mampu menahan tegangan yang diaplikasikan padanya) dan pengukuran *tangent delta* mempengaruhi karakteristik *dielectric losses* insulasi. Karakteristik *dielectric losses* akan tetap konstan atau mengalami perubahan sedikit terhadap variasi tegangan.

2.2.19 Metode Pengujian Tangent Delta

Pada pengujian *tangent delta* terdapat beberapa metode yang sering digunakan yaitu:

- a. Mode GST (*Grounded Speciment Test*)

Pemasangan koneksi pada mode GST ditunjukkan pada Gambar 2.11.

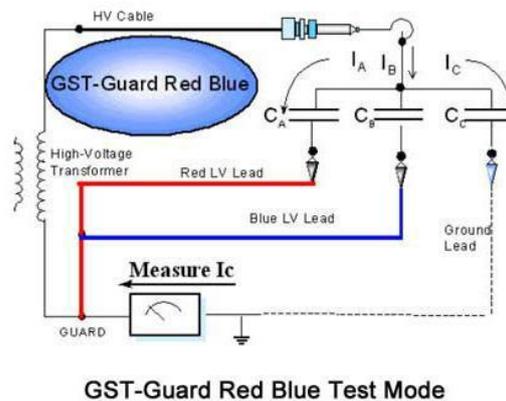


Gambar 2. 11 Pemasangan Mode GST

Merupakan mode pengujian tan delta, yang mana nilai kapasitansi yang digunakan sebagai referensi pengujian adalah kapasitansi obyek yang diuji terhadap *ground*.

b. Mode GSTG (*Grounded Speciment Test Guard*)

Pemasangan koneksi pada mode GST-Guard ditunjukkan pada Gambar 2.12.

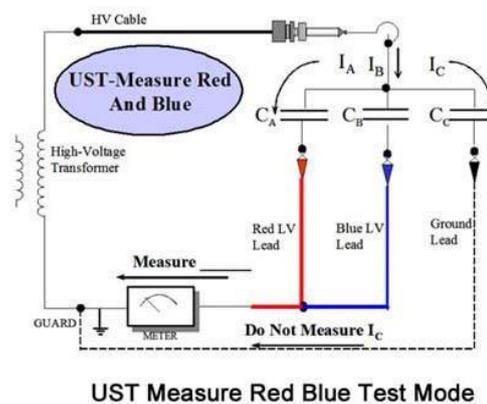


Gambar 2. 12 Pemasangan Mode GST-guard

Merupakan mode pengujian tan delta, yang mana nilai kapasitansi yang digunakan sebagai referensi pengujian adalah kapasitansi obek yang diuji terhadap *ground* dan membatasi kapasitansi obyek lain yang mempengaruhi nilai kapasitansi.

c. Mode UST (*Ungrounded Speciment Test*)

Pemasangan koneksi pada mode UST ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2. 13 Pemasangan Mode UST

Merupakan mode pengujian tan delta yang mana nilai kapasitansi digunakan sebagai referensi pengujian adalah kapasitansi antara dua objek yang sama sekali tidak terhubung dengan *ground*.

d. Hot Collar

Mode pengujian ini sangat efektif untuk mengetahui lokasi keretakan pada porcelain, pemburukan atau kontaminasi pada permukaan bushing seperti lapisan tipis compound, cairan atau sisa compound yang menempel pada bushing.