

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Dalam penelitian, melakukan analisis efektivitas pemeliharaan dan pengujian rutin guna mencegah terjadinya gangguan dalam proses penyaluran tenaga listrik. Metode pengujian yang digunakan meliputi pengujian tahanan isolasi. Hasil dari pengujian tahanan isolasi menggunakan megger dengan standar minimal $1 \text{ M}\Omega/1 \text{ kV}$. Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa nilai tahanan isolasi memenuhi standar operasional sehingga CT dinyatakan dalam kondisi layak operasi. [1]

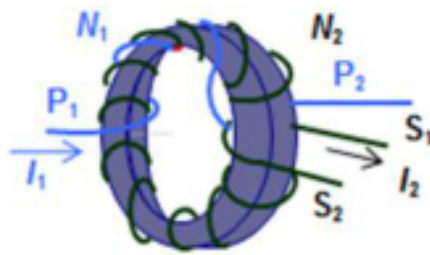
Pengujian tahanan isolasi Transformator Arus (CT) Bay Trafo 2 Gardu Induk Pati. Hasil pengukuran tahanan isolasi pada CT bay trafo 2 mengalami penurunan dari tahun 2014 sampai dengan tahun 2018. Penelitian yang digunakan adalah perbandingan nilai tahanan isolasi sebelum dan sesudah pemeliharaan. Pengukuran menggunakan alat ukur Megger Kyoritsu tipe 4102 A, untuk injeksi tegangan adalah 5000 Volt dengan nilai maksimal alat uji sebesar $> 1000 \Omega$. Hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa mengalami penurunan nilai tahanan isolasi setelah pemeliharaan. Semakin besar nilai tahanan isolasi semakin baik dan semakin kecil nilai tahanan isolasi semakin buruk.[2]

CT merupakan elemen proteksi yang sangat penting pada sebuah GI. Kesalahan konversi nilai arus pada CT dapat menyebabkan kesalahan pengukuran dan kegagalan sistem proteksi. Penggunaan CT yang tidak tepat akan mempersingkat masa pakainya dan menyebabkan kegagalan system lebih dini. Salah satu tes yang dilakukan pada CT adalah tan delta yang dilakukan untuk mengetahui nilai koefisien rugi – rugi dari bahan isolasi. Peningkatan nilai kapasitansi menunjukkan kerusakan pada isolasi kertas. Setelah dilakukan pengujian disimpulkan CT masih layak beroperasi karena nilai tan delta dibawah 1% yang merupakan standar operasional CT. [3]

Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya adalah lokasi pengujian di GI Sekarputih. Selain itu pada ketiga penelitian di atas menggunakan satu metode pengujian untuk menentukan kondisi kelayakan CT. Sedangkan pada penelitian ini menggunakan empat metode pemeliharaan yaitu tan delta, tahanan isolasi, rasio dan eksitasi atau V_{knee} .

2.2 Trafo Arus / *Current Transformer* (CT)

Trafo Arus (*Current Transformer* - CT) yaitu peralatan listrik yang digunakan untuk melakukan pengukuran besaran arus pada instalasi tenaga listrik disisi primer (TET, TT dan TM) yang berskala besar dengan melakukan transformasi dari besaran arus yang besar menjadi besaran arus yang kecil secara akurat dan teliti untuk keperluan pengukuran dan proteksi. [4]



Gambar 2.1 Rangkaian pada CT

2.3 Fungsi Trafo Arus / *Current Transformer* (CT)

Fungsi dari *current transformer* (CT) adalah :

- Mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi. [4]
- Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran. [4]
- Standarisasi besaran sekunder, untuk arus nominal 1 Ampere dan 5 Ampere. [4]

Secara fungsi trafo arus dibedakan menjadi dua yaitu :

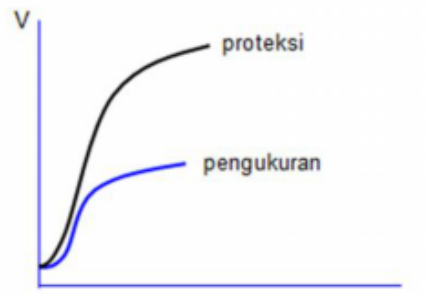
a. *Current transformer* (CT) pengukuran

CT pengukuran untuk *metering* memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja (daerah pengenalnya) 5% - 120% arus nominalnya tergantung dari kelasnya dan tingkat kejenuhan yang relatif rendah dibandingkan CT untuk proteksi. Penggunaan CT pengukuran untuk Amperemeter, Watt-meter, VARh-meter, dan $\cos \phi$ meter. [4]

b. *Current transformer* (CT) proteksi

CT untuk proteksi, memiliki ketelitian tinggi pada saat terjadi gangguan dimana arus yang mengalir beberapa kali dari arus pengenalnya dan tingkat kejenuhan cukup tinggi. Penggunaan CT proteksi untuk relai arus lebih (OCR dan GFR), relai

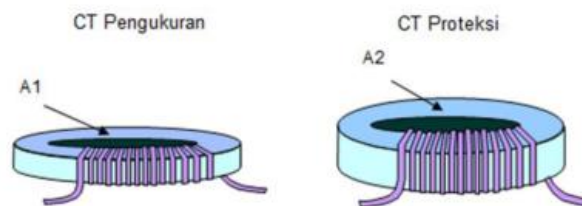
diferensial, dan relai distance. Perbedaan mendasar CT pengukuran dan proteksi adalah pada titik saturasinya seperti pada kurva saturasi dibawah. [4]



Gambar 2.2 Kurva Kejenuhan CT untuk Pengukuran dan Proteksi

Kurva gambar diatas menunjukkan perbedaan karakteristik kejenuhan CT antara CT proteksi dan CT pengukuran. CT proteksi memiliki nilai V_{knee} yang lebih besar. Hal ini menandakan CT proteksi dirancang agar tidak cepat jenuh sehingga tetap akurat saat terjadi arus ganggana yang besar. Karakteristik tersebut diperlukan agar CT tetap menghasilkan arus sekunder yang proporsional sehingga relay proteksi dapat bekerja secara andal.

CT pengukuran memiliki nilai V_{knee} yang lebih rendah dan cepat jenuh dari CT proteksi. CT pengukuran dirancang untuk akurasi tinggi pada arus nominal tetapi akan jenuh lebih cepat saat arus melebihi nilai pengukuran yang berguna untuk melindungi peralatan pengukuran. Selain itu, CT pengukuran dirancang supaya lebih cepat jenuh dibandingkan CT proteksi sehingga konstruksinya mempunyai luas penampang inti yang lebih kecil. [4]



Gambar 2.3 Luas Penampang Inti CT

2.4 Jenis *Current Transformer* (CT)

2.4.1 Jenis *current transformer* (CT) berdasarkan jenis isolasi

- *Current transformer* kering

Current transformer kering biasanya digunakan pada tegangan rendah, umumnya digunakan pada pasangan dalam ruangan (*indoor*). [4]

- *Current transformer* cast resin

Current transformer ini biasanya digunakan pada tegangan menengah, umumnya digunakan pada pasangan dalam ruangan (*indoor*), misalnya CT tipe cincin yang digunakan pada kubikel penyulang 20 kV. [4]

- *Current transformer* (CT) isolasi minyak

Current transformer isolasi minyak banyak digunakan pada pengukuran arus tegangan tinggi, umumnya digunakan pada pasangan di luar ruangan (*outdoor*) misalkan CT tipe bushing yang digunakan pada pengukuran arus penghantar tegangan 70 kV dan 150 kV. [4]

- *Current transformer* isolasi SF6/*compound*

Current transformer ini banyak digunakan pada pengukuran arus tegangan tinggi, umumnya digunakan pada pasangan di luar ruangan (*outdoor*) misalkan CT tipe *top-core*. [4]

2.4.2 Jenis *current transformer* berdasarkan pemasangan

- *Current transformer* pemasangan luar ruangan (*outdoor*)

Current transformer pemasangan luar ruangan memiliki konstruksi fisik yang kokoh, isolasi yang baik, biasanya menggunakan isolasi minyak untuk rangkaian elektrik internal dan bahan keramik/porcelain untuk isolator eksternal. [4]



Gambar 2.4 CT *Outdoor*

- *Current transformer* pemasangan dalam ruangan (*indoor*)

Current transformer pemasangan dalam ruangan biasanya memiliki ukuran yang lebih kecil dari pada pemasangan luar ruangan, menggunakan isolator dari bahan resin. [4]



Gambar 2.5 CT Indoor

2.4.3 Jenis *current transformer* Berdasarkan Jumlah Inti pada Sekunder

- *Current transformer* dengan inti tunggal

Contoh : 150-300 / 5 A, 200-400 / 5 A, atau 300-600 / 1 A. (SKDIR 520, 2014)

- *Current transformer* dengan inti banyak

Current transformer dengan inti banyak dirancang untuk berbagai keperluan yang mempunyai sifat penggunaan yang berbeda dan untuk menghemat tempat. (SKDIR 520, 2014)

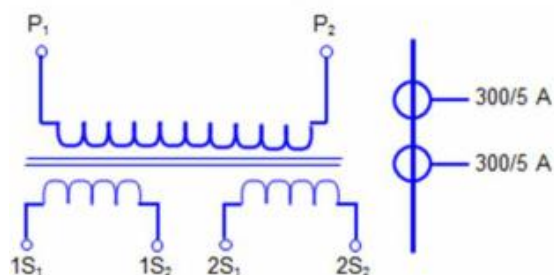
Contoh:

CT dua inti 150 – 300 / 5 – 5 A.

Penandaan primer: P1-P2

Penandaan sekunder inti ke-1: 1S1-1S2 (untuk pengukuran)

Penandaan sekunder inti ke-2: 2S1-2S2 (untuk relai OCR)



Gambar 2.6 CT dengan 2 Inti

- *Current transformer* empat inti 800 – 1600 / 5 – 5 – 5 – 5 A.

Penandaan primer: P1-P2

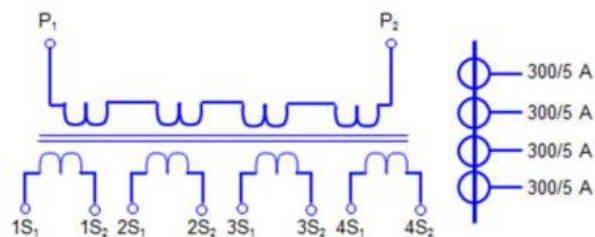
Penandaan sekunder inti ke-1: 1S1-1S2 (untuk pengukuran)

Penandaan sekunder inti ke-2: 2S1-2S2 (untuk relai OCR)

Penandaan sekunder inti ke-3: 3S1-3S2 (untuk relai Distance)

Penandaan sekunder inti ke-4: 4S1-4S2 (untuk proteksi Buspro)

Current transformer (empat) inti 800 – 1600 / 5 – 5 – 5 – 5 A



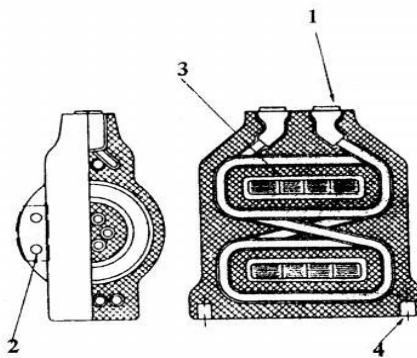
Gambar 2.7 CT dengan 4 Inti

2.5 Komponen *Current Transformer*

- Tipe cincin (*ring/window type*) dan Tipe cor-coran cast resin (*mounded cast resin type*). CT tipe cincin dan cor – coran resin biasanya digunakan pada kubikel penyulang (tegangan 20 kV dan pemasangan *indoor*). Jenis isolasi pada CT cincin adalah *Cast Resin*. [4]



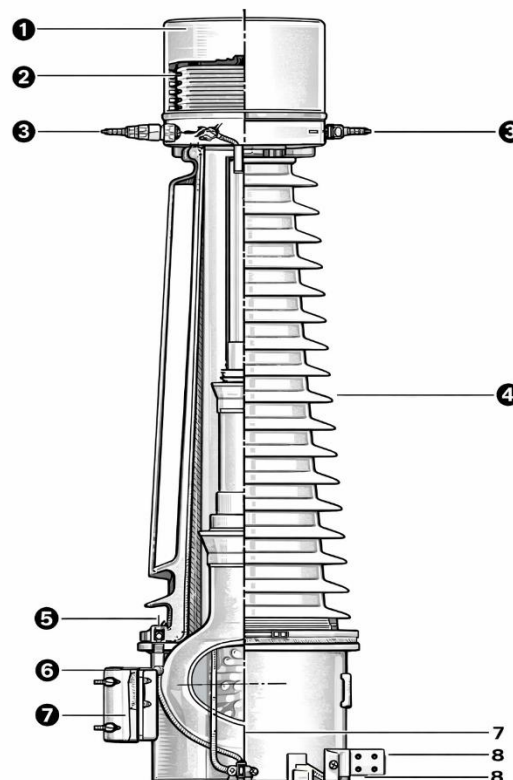
Gambar 2.8 CT Tipe Cincin



Gambar 2.9 Komponen CT Tipe Cincin

Keterangan :

1. Terminal utama (*primary terminal*)
 2. Terminal sekunder (*secondary terminal*)
 3. Kumputan sekunder (*secondary winding*)
 4. Terminal *grounding*
- Tipe Tangki



Gambar 2.10 Komponen CT Tipe Tangki

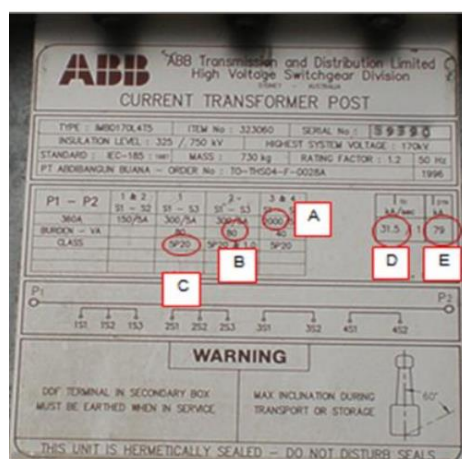
Keterangan :

1. Bagian atas CT (*transformer head*)
2. Peredam perlawanan pemuaian minyak (*oil resistant expansion bellows*)
3. Terminal utama (*primary terminal*)
4. Penjepit (*clamps*)
5. Inti kumparan dengan belitan berisolasi utama (*core and coil assembly with primary winding and main insulation*)
6. Inti dengan kumparan sekunder (*core with secondary windings*)
7. Tangki (*tank*)
8. Tempat terminal (*terminal box*)
9. Plat untuk pentanahan (*earthing plate*)

Jenis isolasi pada *current transformer* tipe tangki adalah minyak. *Current transformer* isolasi minyak banyak digunakan pada tegangan tinggi, umumnya digunakan pada pasangan *outdoor* misalnya CT tipe bushing yang digunakan pada penghantar tegangan 70 kV, 150 kV dan 500 kV. [4]

2.6 Rating Current Transformer

Umumnya data teknis *current transformer* dituliskan pada *nameplate*, seperti data *rated burden*, *rated current*, *instantaneous rated current* dan yang lainnya. [4]



Gambar 2.11 Nameplate CT Tipe Tangki

Keterangan :

A : Pengenal Arus Kontinyu (*Continuous Rated Current*)

B : Pengenal Beban (*Rated Burden*)

C : Ketelitian/Akurasi Trafo Arus

D : Pengenal Arus Sesaat (*Instantaneous Rated Current*)

E : Pengenal Arus Dinamik (*Dynamic Rated Current*)

2.7 Kelas Ketelitian *Current Transformer* Metering

Current transformer metering memiliki ketelitian tinggi untuk daerah pengukuran sampai 1,2 kali nominalnya. Daerah kerja CT metering antara: $0.1 - 1.2 \times I_N$ CT. Kelas ketelitian CT metering dinyatakan dalam presentase kesalahan rasio pengukuran baik untuk arus maupun pergeseran sudut fasa, seperti pada tabel 2.1 dan 2.2 di bawah.

Tabel 2.1 Batas Kesalahan CT Metering

Kelas Ketelitian	+/- % Kesalahan Rasio Arus pada % dari Arus Pengenal				+/- Pergeseran Fase pada % dari Arus Pengenal (1/60 derajat)			
	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30
1	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60

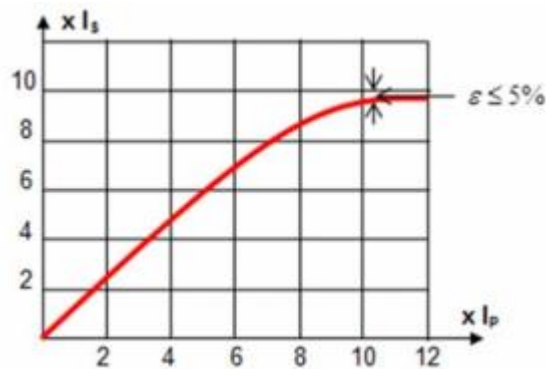
Tabel 2.2 Batas Kesalahan CT Metering

Kelas Ketelitian	+/- % Kesalahan Rasio Arus pada % dari Arus Pengenal					+/- Pergeseran Fase pada % dari Arus Pengenal (1/60 derajat)				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10
0,5S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30

Contoh pembacaan kedua tabel di atas adalah sebagai berikut:

Current transformer dengan spesifikasi sebagai berikut; *ratio* 300/5 A, kelas 0,2 dan dibebani sebesar 60 Amp (20% I_N), maka kesalahan maksimum *ratio* arus yang diijinkan adalah $\pm 0,35\%$ dan pergeseran maksimum fasa sebesar $\pm 15/60$ derajat atau 0,25 derajat.

[4]



Gambar 2.12 Kurva Faktor Batas Ketelitian

2.8 Kelas Ketelitian *Current Transformer* Proteksi

2.8.1 Kelas P

CT yang mempunyai batas ketelitian berdasarkan kesalahan komposit yang ditentukan dalam keadaan *steady state* arus primer simetris. Kelas ketelitian CT proteksi dinyatakan dalam pengenal sebagai berikut: 15 VA, 10P20. [4]

15 VA = Pengenal beban (*burden*) CT, sebesar 15 VA

10 P = Kelas proteksi, kesalahan komposit 10% pada pengenal batas akurasi

20 = *Accuracy Limit Factor*, batas ketelitian trafo arus s.d. 20 kali arus pengenal

Tabel 2.3 Kesalahan Rasio dan Pergeseran Fasa CT Proteksi

Kelas Ketelitian	Pada Arus Pengenal		Kesalahan Komposit pada batas Ketelitian Arus Primer Pengenal (%)
	Kesalahan Rasio (%)	Kesalahan Sudut (menit)	
5P	± 1	± 60	5
10P	± 3	-	10

2.8.2 Kelas PX

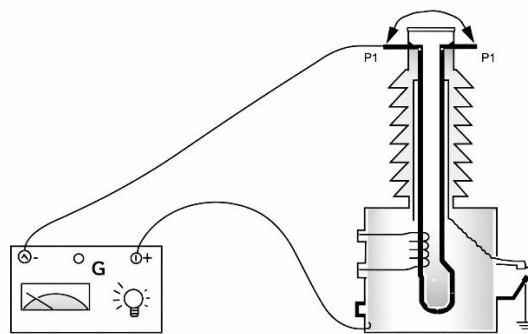
CT yang harus memiliki kebocoran reaktansi rendah dan informasi khusus seperti *ratio*, tegangan *knee point*, arus eksitasi maksimum dan *secondary circuit resistance* (Rct). [4]

2.9 Shutdown Measurement

Shutdown measurement adalah pengujian yang dilakukan pada saat peralatan dalam keadaan padam. Pekerjaan ini dilakukan pada saat pemeliharaan rutin maupun pada saat investigasi ketidaknormalan.

2.9.1 Tahanan Isolasi

Pengujian tahanan isolasi berfungsi untuk mengetahui kualitas tahanan isolasi pada trafo arus baik antar belitan maupun antara belitan dan *ground*. Pengujian ini dilakukan dengan cara memberikan tegangan DC kepada media isolasi yang akan diukur tahanannya yaitu sebesar 5 kV untuk sisi primer dan 500 V untuk sisi sekunder. Dengan mengukur arus bocor yang melewati media isolasi, maka akan didapatkan nilai tahanan isolasi dalam satuan mega ohm. Alat yang digunakan untuk pengujian tahanan isolasi adalah Mega Ohm meter. Untuk mendapatkan hasil pengujian yang akurat, pencatatan hasil pengukuran dilakukan setelah 60 detik. [4]



Gambar 2.13 Pengukuran Tahanan Isolasi CT

Berikut ini adalah tabel standar yang digunakan untuk pengujian tahanan isolasi

Tabel 2.4 Standar Nilai dan Rekomendasi Pengujian Tahanan Isolasi

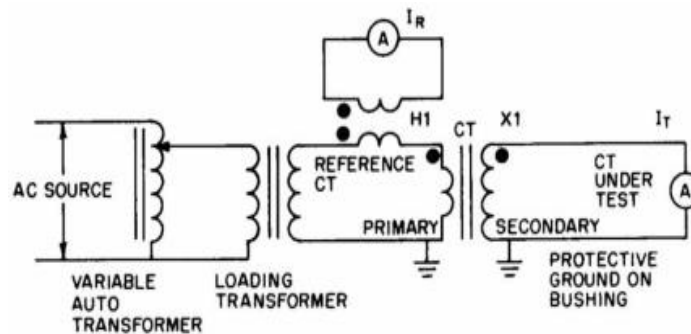
No	Hasil Uji	Keterangan	Rekomendasi
1	>1MOhm/1kV	Baik	
2	<1MOhm/1kV	Buruk	Lakukan pengujian lebih lanjut

Berdasarkan tabel diatas, tahanan isolasi minimal sebesar 1MOhm/1kV artinya 1 kV harus memiliki kemampuan mengisolasi tegangan sebesar 1MOhm. Berikut merupakan persamaan untuk hasil pengujian tahanan isolasi.

$$\text{Kemampuan Isolasi} = \frac{\text{Hasil Pengujian}}{\text{Tegangan Uji}}$$

2.9.2 Ratio

Pengukuran ratio bertujuan untuk membandingkan nilai ratio hasil pengukuran dengan nilai pada nameplate.



Gambar 2.14 Pengujian Ratio CT

Pengujian ratio menggunakan alat uji injeksi arus (*high current test injection*), dilakukan dengan mengatur catu daya pada alat uji sesuai dengan nilai yang diinginkan serta mencatat arus pada sisi sekunder kedua CT. Ratio dari CT adalah sama dengan rasio dari CT referensi yang dikalikan rasio antara arus sisi sekunder CT referensi dengan arus sisi sekunder CT yang diuji. Berikut persamaan dari ratio CT. [4]

$$e = \frac{K_n \cdot I_s - I_p}{I_p} \times 100$$

Keterangan :

e = Error Rasio Arus (%)

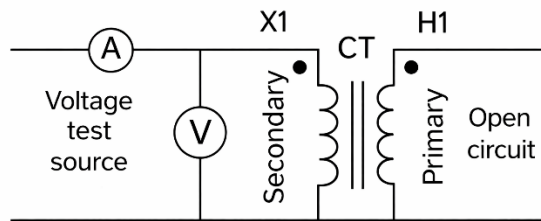
K_n = Pengenal Rasio

I_p = Arus Primer (A)

I_s = Arus Sekunder (A)

2.9.3 Pengujian Eksitasi atau V_{knee}

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui karakteristik eksitasi dari trafo arus. Karakteristik eksitasi adalah suatu grafik yang menggambarkan hubungan antara arus eksitasi dan tegangan rms yang diterapkan pada sisi sekunder CT dalam kondisi sisi primer open circuit. Dalam kurva karakteristik eksitasi dapat diketahui tegangan knee dari suatu CT maka dapat dipastikan bahwa CT tidak mengalami kejenuhan saat arus primer sama dengan arus hubung singkat tertinggi. [4]

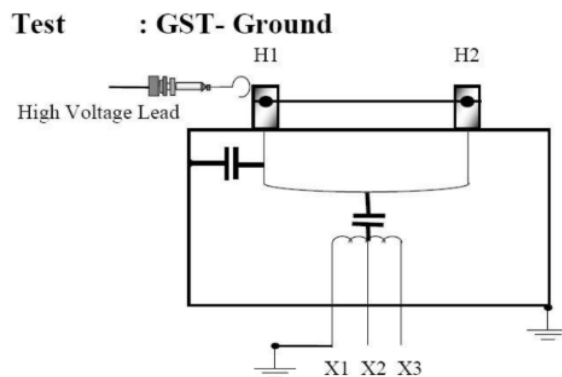


Gambar 2.15 Pengujian Eksitasi CT

2.9.4 Tan Delta

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai faktor dissipasi material isolasi. Penurunan kualitas isolasi akan menyebabkan nilai tangen delta semakin tinggi. Selain nilai tangen delta, nilai kapasitansi juga terukur. Peningkatan nilai dari kapasitansi mengindikasikan kerusakan pada isolasi kertas. Kasus yang umum terjadi adalah hubung singkat antar lapisan kapasitor yang ditandai dengan meningkatnya nilai kapasitansi.

Pengujian tangen delta dapat dilakukan dengan beberapa variasi yaitu pengukuran tangen delta pada level tegangan yang berbeda atau dilakukan pada frekuensi yang berbeda. Pengukuran tangen delta dengan variasi tegangan lebih mudah dilakukan, terlebih tidak diperlukan peralatan lain. Untuk keseragaman, sebaiknya variasi tegangan yang dipilih adalah 2kV, 4kV, 6kV, 8kV dan 10kV. Kedua variasi ini dilakukan sebagai tindak lanjut awal jika ditemukan nilai tangen delta yang mendekati 1%. Pengujian tan delta pada CT dilakukan dengan menginjeksikan tegangan 10 kV pada sisi primer. Pengujian dengan mode GST-Ground pada CT tanpa test tap bertujuan untuk mengetahui nilai tan delta *overall* (secara umum). Pengujian ini dapat dilakukan tanpa melepas rangkaian sekunder. Tegangan uji yang digunakan adalah 10 kV. [4]



Gambar 2.16 Pengujian Tan Delta CT

Tabel 2.5 Standar Nilai dan Rekomendasi Pengujian Tan Delta

No	Hasil	Keterangan	Rekomendasi
1	< 1%	Baik	Lakukan pengujian sesuai periode yang dijadwalkan.
	> 1%	Buruk	a. Lakukan pengujian sekali lagi untuk memastikan akurasi hasil uji atau mengacu ke <i>manual book</i> b. Lihat <i>trend</i> hasil pengujian/hasil uji periode sebelumnya atau mengacu pada hasil uji pabrikan. c. Bandingkan dengan hasil pengujian yang lain (tahanan isolasi), Jika mengindikasikan hal yang sama (poor) maka: - Lakukan pengujian kualitas minyak isolasi dan DGA (khusus untuk CT jenis <i>non hermetically sealed</i>) jika CT berusia > 10 th dan belum pernah dilakukan pengambilan sample minyak (atau hubungi <i>manufacturer</i> jika sebelumnya sudah pernah dilakukan pengambilan sample minyak) - Cek Kondisi Diaphragma bellows, jika terindikasi kemasukan air/udara maka laksanakan penggantian minyak sesuai <i>manual instruction</i> atau hubungi <i>manufacturer</i>. - Lakukan penggantian bila hasil perbaikan tetap menunjukkan > 1%

2.10 Rugi – Rugi Dielektrik

Rugi-rugi dielektrik adalah rugi daya listrik yang timbul pada bahan isolasi yang bekerja dalam tegangan arus bolak-balik (AC). Semakin banyak daya yang hilang,

menunjukkan bahwa kualitas isolasi memburuk. Tangen delta menentukan faktor kehilangan daya. Rugi-rugi daya dapat dinyatakan sesuai dengan persamaan berikut : [5]

$$P_d = V^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \tan \theta$$

Keterangan :

P_d = rugi – rugi daya (W)

V^2 = tegangan system (V)

C = kapasitansi (F)

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot F$

$\tan \theta$ = nilai tan delta (%)