

PENGUJIAN TAN δ PADA KABEL TEGANGAN MENENGAH

Abdul Syukur¹, Galuh Susilowati², Satyagraha A.K.³, A. Parlindungan Siregar³

^{1,2}Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, S.H., Tembalang, Semarang, Jawa Tengah

E-mail: ¹gakusei2003@yahoo.com, ²ghaloh4ever@yahoo.com

³Laboratorium Tegangan Tinggi
P.T. PLN (Persero) Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan
Jl. Duren Tiga, Jakarta

Abstract. High voltage testing have purpose to investigate the electrical properties of dielectric related with isolation quality of power equipment during pre-installed or in operation time to prevent equipment losses. Isolation quality is important rule to determine electrical equipment quality, especially for power transmission and distribution. Cable, one of this electrical equipment will be investigated in this research using the high voltage testing with the tan δ method. We use the high voltage laboratory of PT. PLN (Persero) Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan, Jakarta, for that kind of testing. There are 6 different middle voltage cable types under the test, as the result the measured tan δ values not extend the maximum value, as IEC 60502-2 (2005-2) standard, $40 (x10^{-4})$, for each cable. According to that measurement, all of six cable types passed the tan δ test.

Keywords: tan δ testing, cable, isolation quality

P.T. PLN (Persero) merupakan suatu perusahaan besar yang mengelola listrik negara, baik dari segi pembangkitan, transmisi, maupun pendistribusian tenaga listrik di Indonesia. Adapun kegiatan penelitian dan pengembangan di PT. PLN (Persero) diarahkan pada usaha untuk meningkatkan keandalan serta efisiensi sistem dan pembangkit tenaga listrik, kualitas suplai energi listrik, jaminan mutu, konservasi dan manajemen lingkungan, serta teknologi baru dalam bidang teknik energi listrik. Kegiatan penelitian serta pengembangan inilah yang menjadi tugas khusus bagi salah satu unit PT. PLN (Persero) yang dikenal sebagai PT. PLN (Persero) Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan.

Dalam peranannya menjamin mutu peralatan-peralatan listrik, PT. PLN (Persero) Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan telah melakukan pengujian-pengujian pada setiap item peralatan uji berdasarkan standar-standar terkini yang diakui tidak hanya di dalam negeri, namun juga di dunia internasional. Di antara serangkaian pengujian yang harus dilakukan untuk menguji mutu alat yang diuji adalah pengujian faktor rugi-rugi dielektrik (tan delta atau δ). Pengujian tan δ

ditujukan untuk mendeteksi besarnya rugi-rugi dielektrik pada isolasi peralatan listrik yang berpengaruh pada umur pakai suatu peralatan listrik.

Pengujian-pengujian tersebut dikenai pada item uji peralatan-peralatan listrik yang berkenaan langsung dalam pendistribusian tegangan listrik dari gardu induk ke pelanggan maupun ke gardu induk lain dalam satu sistem penyaluran tenaga listrik, di antaranya adalah kabel tegangan menengah.

Dalam makalah ini dibahas mengenai pengujian tan δ yang dilakukan pada kabel tegangan menengah yang dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi 2 P.T. PLN (Persero) Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan.

PENGUJIAN TAN δ KABEL Rugi-Rugi Dielektrik

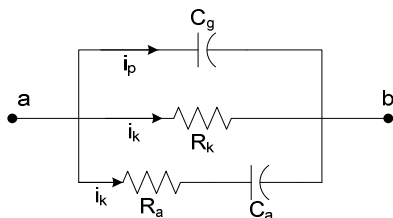
Jika dielektrik dikenai medan elektrik, maka elektron-elektron akan mengalami gaya yang arahnya berlawanan dengan arah medan elektrik sedang inti atom yang bermuatan positif akan mengalami gaya searah dengan arah medan

elektrik. Gaya ini akan memindahkan elektron dari posisinya semula, sehingga molekul-molekul berubah menjadi dipol-dipol yang letaknya sejajar dengan medan elektrik. Jika medan elektrik berubah arah, maka gaya pada muatan-muatan dipol akan berubah arah membuat dipol berputar 180°.

Ketika molekul-molekul yang terpolarisasi ini berubah posisi, maka terjadilah gesekan antar molekul. Jika medan elektrik berulang-ulang berubah arah, maka gesekan antar molekul juga akan berulang-ulang. Gesekan yang berulang-ulang ini akan menimbulkan panas pada dielektrik, dan panas inilah yang disebut dengan rugi-rugi dielektrik.

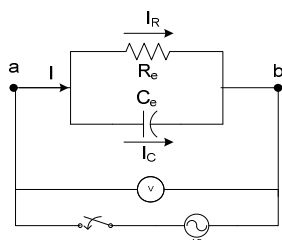
Rugi-rugi dielektrik terjadi jika terdapat perubahan arah medan elektrik yang berulang-ulang. Oleh karena itu, rugi-rugi dielektrik hanya terjadi pada medan elektrik bolak-balik, yaitu medan yang ditimbulkan oleh tegangan bolak-balik, sehingga frekuensi gesekan antar molekul meningkat. Akibatnya rugi-rugi dielektrik yang dihasilkan semakin besar. Namun jika frekuensi yang diperoleh sangat tinggi, maka perubahan posisi dipol hanya sedikit, karena molekul harus segera kembali ke posisi semula.

Ketika suatu tegangan diterapkan pada suatu dielektrik, akan ditimbulkan tiga komponen arus, yaitu arus pengisian, arus absorpsi, dan arus konduksi. Rangkaian pendekatan pendeteksian rugi-rugi dielektrik ini harus dapat menampilkan ketiga komponen tersebut.



Gambar 1. Rangkaian ekivalen suatu dielektrik

Adapun komponen-komponen pada rangkaian di atas adalah C_g : Kapasitansi geometris, R_k : Tahanan dielektrik, R_a : Tahanan arus absorpsi, dan C_a : Kapasitansi arus absorpsi



Gambar 2. Rangkaian ekivalen dielektrik

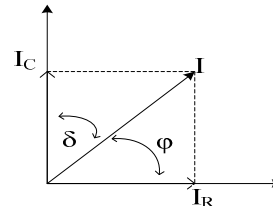
Jika terminal a-b dihubungkan ke sumber tegangan AC, maka arus pada tiap komponennya.

$$I_R = \frac{V}{R_e} \quad (1)$$

$$I_C = \omega \cdot C_e \cdot V \quad (2)$$

Arus total diperoleh

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \quad (3)$$



Gambar 3. Komponen arus dielektrik

Arus I_R menimbulkan rugi-rugi daya pada tahanan R_e . Rugi-rugi ini disebut sebagai rugi-rugi dielektrik. Rugi-rugi dielektrik ini merupakan perkalian V dengan I_R , atau :

$$P_d = V \cdot I_R = V \cdot I \cdot \cos \varphi = V \cdot I \cdot \sin \delta \quad (4)$$

Dengan substitusi komponennya, dapat diperoleh persamaan :

$$P_d = \frac{\omega \cdot C_e \cdot V}{\cos \delta} \cdot V \cdot \sin \delta = \omega \cdot C_e \cdot V^2 \cdot \tan \delta \quad (5)$$

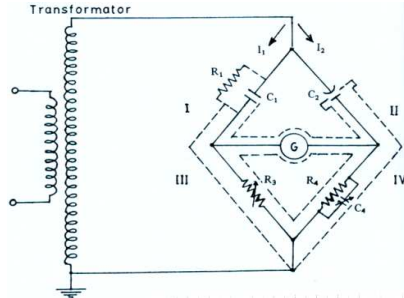
Berdasarkan dampak pengujian terhadap benda uji, pengujian tegangan tinggi dapat dikelompokkan seperti berikut ini.

- Pengujian tidak merusak
- Pengukuran tahanan isolasi
- Pengukuran faktor rugi-rugi dielektrik
- Pengukuran korona
- Pengukuran konduktivitas
- Pemetaan medan elektrik
- Pengujian bersifat merusak
- Pengujian ketahanan (*Withstand Test*)
- Pengujian kegagalan (*Breakdown Test*)
- Pengujian peluahan (*Discharge Test*)

Pengujian $\tan \delta$ dilakukan untuk mengukur besarnya parameter $\tan \delta$ dalam suatu peralatan listrik, dimana $\tan \delta$ merupakan faktor rugi-rugi dielektrik, yaitu rasio dari komponen imajiner dan komponen real dari permetivitas kompleks dielektrik. Pengujian $\tan \delta$ ini termasuk ke dalam jenis pengujian tidak merusak.

Besarnya rugi-rugi dielektrik pada suatu peralatan sebanding dengan faktor rugi-rugi dielektrik ($\tan \delta$). Jika $\tan \delta$ bernilai besar, maka rugi-rugi dielektrik makin besar. Rugi-rugi

dielektrik menimbulkan panas yang dapat menaikkan temperatur dielektrik adan pada akhirnya dapat mempercepat penuaan dielektrik. Adapun alat untuk mengukur $\tan \delta$ adalah jembatan *schering*.

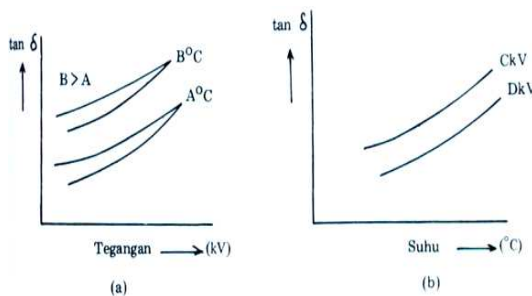


Gambar 4. Jembatan Schering

Terdapat dua macam pengukuran $\tan \delta$ yang biasa dilakukan, yaitu :

- $\tan \delta$ sebagai fungsi dari tegangan dengan suhu sebagai parameter
- $\tan \delta$ sebagai fungsi dari suhu dengan tegangan sebagai parameter.

Faktor daya $\tan \delta$ umumnya bernilai konstan pada tegangan nominal (*rated*) apabila bahan isolasinya tidak mengandung air (*moisture*) atau kantong udara (*void*). Naiknya $\tan \delta$ dengan naiknya tegangan biasanya disebabkan oleh *void* yang memungkinkan pelepasan korona. Karakteristik dari kapasitansi versus tegangan dapat pula diambil.



Gambar 5. Kurva fungsi pengukuran $\tan \delta$ terhadap: (a) tegangan dan (b) suhu

Kabel Tegangan Menengah

Kabel merupakan komponen penyaluran energi listrik yang sangat penting. Sebuah kabel listrik terdiri dari isolator dan konduktor. Isolator di sini adalah bahan pembungkus kabel yang biasanya terbuat dari karet atau plastik. Sedangkan konduktornya terbuat dari serabut tembaga ataupun tembaga pejal.

Sebuah kabel tenaga disusun oleh dua atau lebih konduktor listrik, biasanya dipasang dalam sebuah bungkus keseluruhan konduktornya. Pemasangan konstruksi dalam kabel daya ini digunakan untuk transmisi daya listrik.

Prosedur Pengujian $\tan \delta$ pada Kabel Benda Uji

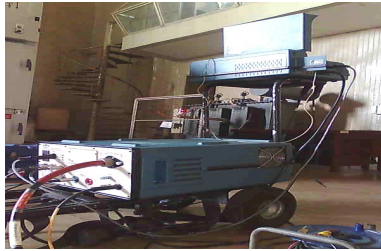
Pengujian $\tan \delta$ ini dilakukan pada enam sampel kabel tegangan menengah, yaitu dengan spesifikasi sebagai berikut :

- 1) Kabel A
 - Jenis isolasi kabel : XLPE/AWA/PVC
 - Jumlah inti dan ukuran : 1 x 185 mm²
 - Tegangan rating : 3,6/6 kV
- 2) Kabel B
 - Jenis isolasi kabel : XLPE/SWA/PVC
 - Jumlah inti dan ukuran : 3 x 120 mm²
 - Tegangan rating : 12/20 kV
- 3) Kabel C
 - Jenis isolasi kabel : XLPE/LSFH/SWA/LSFA
 - Jumlah inti dan ukuran : 3 x 150 mm²
 - Tegangan rating : 12/20 kV
- 4) Kabel D
 - Jenis isolasi kabel : XLPE/LSFH
 - Jumlah inti dan ukuran : 3x70 mm²
 - Tegangan rating : 6,35/11 kV
- 5) Kabel E
 - Jenis isolasi kabel : XLPE
 - Jumlah inti dan ukuran : 3x240 mm²
 - Tegangan rating : 3,6/6 kV
- 6) Kabel F
 - Jenis isolasi kabel : XLPE/SWA/PVC
 - Jumlah inti dan ukuran : 3 x 185 mm²
 - Tegangan rating : 3,6/6 kV

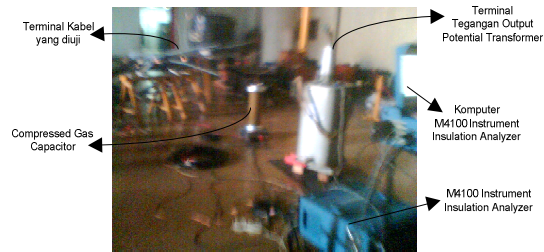
Peralatan Pengujian $\tan \delta$ pada Kabel TM

Pengujian $\tan \delta$ di Lab Tegangan Tinggi PT. PLN Puslitbang Ketenagalistrikan menggunakan M4100 *Insulation Analyzer Instrument* sebagai elemen utama pengukuran $\tan \delta$. Adapun perangkat dalam rangkaian pengujian $\tan \delta$.

- Slide regulator tegangan
- Trafo tegangan (*Potential Transformer/PT*)
- Trafo Arus (*Current Transformer*)
- *Compressed Gas Capacitor Divider*
- M4100 *Insulation Analyzer Instrument*
- Pencatat Temperatur Bagian Benda Uji
- Klem penghubung antar inti kabel
- Termometer
- Benda uji kabel
- Sumber tegangan AC 1 Fase
- *Jumper* penghubung
- Kontaktor



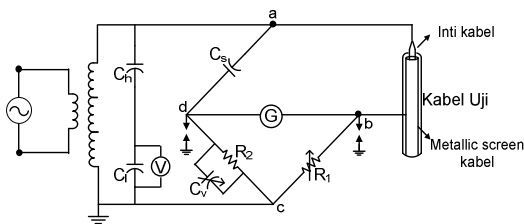
Gambar 6. M4100 Insulation Analyzer Instrument pada saat penggunaan



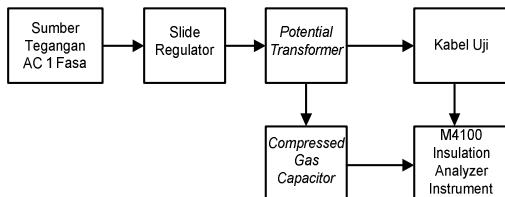
Gambar 10. Rangkaian pengujian tan δ fungsi tegangan dengan trafo luar.

Prosedur Pengujian Tan δ Kabel TM

Pengujian tan delta fungsi tegangan dilakukan dengan merangkai perangkat pengujian yang terdiri atas sumber tegangan AC, *Compressed Gas Capacitor*, trafo tegangan PT, *slide regulator*, dan *M4100 Insulation Analyzer Instrument*. Berikut gambaran rangkaian saat pengujian tan δ .



Gambar 7. Rangkaian listrik pengujian tan δ pada kabel TM

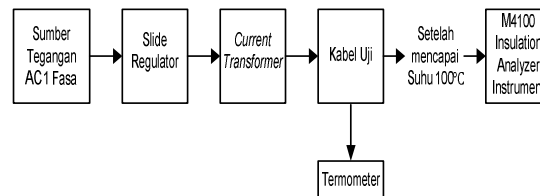


Gambar 8. Diagram blok pengujian tan δ fungsi tegangan pada kabel TM



Gambar 9. Rangkaian pengujian tan δ fungsi tegangan tanpa trafo luar

Sedangkan pengujian tan delta fungsi suhu dilakukan dengan merangkai perangkat pengujian yang sedikit berbeda dibandingkan dengan pengujian fungsi tegangannya, di mana pada pengujian ini terdiri atas perangkat sumber tegangan AC, *slide regulator*, trafo arus CT, termometer, dan *M4100 Insulation Analyzer Instrument*. Pada pengujian fungsi suhu ini, pengukuran tan delta dilakukan setelah kabel uji dipanaskan dengan mengalirkan arus *heating* dari CT hingga kabel mencapai temperatur maksimum pada operasi kabel tersebut di lapangan. Berikut gambaran proses pengujian tan delta fungsi suhu.



Gambar 11. Diagram blok pengujian tan δ fungsi suhu pada kabel TM



Gambar 12. Rangkaian Pemanasan Kabel TM dengan menggunakan *Current Transformer* dengan posisi kabel ditekuk dan diposisikan dalam 1 loop



Gambar 13. Rangkaian sistem pengujian tan δ fungsi suhu.

Adapun pada pengujian tan δ ini digunakan standar IEC 60502-2 tentang "Kabel Tenaga dengan Isolasi Tambahan dan Aksesoris-Aksesoris Kabel Untuk Tegangan Rating dari 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) hingga 30 kV ($U_m=36$ kV)", yaitu dimana disebutkan sebagai berikut.

Tabel 1. Persyaratan Pengujian Tan δ pada Kabel untuk Campuran Isolasi

Pengujian Tipe Kelistrikan		PVC/B	EPR/HEPR	XLPE
Temperatur Maksimum Konduktor Dalam Operasi Normal	°C	70	90	90
Resistivitas Volume ρ *				
- Pada 20 °C	$\Omega \cdot \text{cm}$	10^{14}	-	-
- Pada temperatur maksimum konduktor dalam operasi normal	$\Omega \cdot \text{cm}$	10^{11}	10^{12}	-
Konstanta Resistansi Isolasi K_i *				
- Pada 20 °C	$M\Omega \cdot \text{km}$	367	-	-
- Pada temperatur maksimum konduktor dalam operasi normal	$M\Omega \cdot \text{km}$	0,37	3,67	-
Tan δ				
- Tan δ pada temperatur maksimum konduktor dalam operasi normal ditambah 5°C hingga maksimum 10°C	$\times 10^{-4}$	-	400	40

*) Untuk kabel *unscreened* sesuai tegangan rating 3,6/6 (7,2) kV untuk isolasi PVC, EPR dan HEPR.

HASIL PENGUJIAN

Pengujian Tan δ Fungsi Tegangan

Hasil pengujian tan δ fungsi tegangan Kabel A ($1 \times 185 \text{ mm}^2$, 3,6/6 kV, XLPE/AWA/PVC) ditunjukkan pada tabel 2 sebagai berikut.

Tabel 2. Hasil Uji Tan δ Fungsi Tegangan pada Kabel A

Jumlah Inti	Tegangan Uji	Kapasitansi Kabel [$\mu\text{F}/\text{km}$]	Tan δ ($\times 10^{-4}$)	
			Hasil Uji	Syarat Lulus Uji Standar
1	1,8 kV ($0,5 U_0$)	0,6413	3,8	-
	3,6 kV (U_0)	0,6412	3,5	-
	7,2 kV ($2 U_0$)	0,6412	3,7	-
	Tan δ ($2 U_0 - 0,5 U_0$)		-0,1	-

Sedangkan hasil pengujian tan δ fungsi tegangan Kabel E ($3 \times 240 \text{ mm}^2$, 3,6/6 kV, XLPE/SWA/ PVC) ditunjukkan pada tabel 3.

Pada dasarnya pengujian tan δ fungsi tegangan pada kabel hanyalah melakukan pengukuran nilai tan δ yang terkandung dalam isolasi kabel, sehingga pada tabel-tabel hasil pengujian tan δ fungsi tegangan di atas dapat dicantumkan besarnya nilai faktor rugi-rugi dielektrik untuk tiap kabelnya.

Tabel 3. Hasil Uji Tan δ Fungsi Tegangan pada Kabel E

Jumlah Inti	Tegangan Uji		Tan δ ($\times 10^{-4}$)	
			Hasil Uji	Syarat Lulus Uji Standar
3	Inti ke-I, RED	1,8 kV ($0,5 U_0$)	3,9	-
		3,6 kV (U_0)	3,3	-
		7,2 kV ($2 U_0$)	3,4	-
		Tan δ ($2 U_0 - 0,5 U_0$)	-0,5	-
	Inti ke-II, YELLOW	1,8 kV ($0,5 U_0$)	3,1	-
		3,6 kV (U_0)	3,0	-
		7,2 kV ($2 U_0$)	3,0	-
		Tan δ ($2 U_0 - 0,5 U_0$)	-0,1	-
	Inti ke-III, BLUE	1,8 kV ($0,5 U_0$)	3,5	-
		3,6 kV (U_0)	3,2	-
		7,2 kV ($2 U_0$)	3,1	-
		Tan δ ($2 U_0 - 0,5 U_0$)	-0,4	-

Pengujian Tan δ Fungsi Suhu

Dengan standar tan δ yang digunakan, berikut hasil pengujian tan δ fungsi tegangan Kabel B ($3 \times 120 \text{ mm}^2$, 12/20kV, XLPE/SWA/PVC).

Tabel 4. Hasil Uji Tan δ Fungsi Suhu pada Kabel B

Jumlah Inti	Tegangan Uji [kV-AC]	Temperatur [°C]	Kapasitansi Kabel [$\mu\text{F}/\text{km}$]	Tan δ ($\times 10^{-4}$)		Dinyatakan
				Hasil Uji	Syarat Lulus Standar	
3	Inti ke-I, RED 2 kV	100	0,2533	34,3	40	LULUS UJI
	Inti ke-II, YELLOW 2 kV	100	0,2539	30,4	40	LULUS UJI
	Inti ke-III, BLUE 2 kV	100	0,2490	35,8	40	LULUS UJI

Berikut ini hasil pengujian tan δ fungsi tegangan Kabel C ($3 \times 150 \text{ mm}^2$, 12/20 kV, XLPE/LSFH/ SWA/LSFA).

Tabel 5. Hasil Uji Tan δ Fungsi Suhu pada Kabel C

Jumlah Inti	Tegangan Uji [kV-AC]	Temperatur [°C]	Kapasitansi Kabel [$\mu\text{F}/\text{km}$]	Tan δ ($\times 10^{-4}$)		Dinyatakan
				Hasil Uji	Syarat Lulus Standar	
3	Inti ke-I, RED 2 kV	100	0,2806	38,1	40	LULUS UJI
	Inti ke-II, YELLOW 2 kV	100	0,2839	36,8	40	LULUS UJI
	Inti ke-III, BLUE 2 kV	100	0,2901	33,1	40	LULUS UJI

Hasil pengujian tan δ fungsi tegangan Kabel F (3 x 185 mm², 3,6/6 kV, XLPE/SWA/PVC) ditunjukkan pada tabel 6 sebagai berikut.

Tabel 6. Hasil Uji Tan δ Fungsi Suhu pada Kabel F

Jumlah Inti	Tegangan Uji [kV-AC]	Temperatur [°C]	Kapasitansi Kabel [$\mu\text{F}/\text{km}$]	Tan δ ($\times 10^{-4}$)		Dinyatakan
				Hasil Uji	Syarat Lulus Standar	
3	Inti ke-I, RED 2 kV	100	0,4570	27,5	40	LULUS UJI
	Inti ke-II, YELLOW 2 kV	100	0,4590	27,5	40	LULUS UJI
	Inti ke-III, BLUE 2 kV	100	0,4585	27,5	40	LULUS UJI

Dari keseluruhan hasil pengujian di atas dapat dilihat bahwa seluruh sampel kabel yang diuji dinyatakan lulus uji, dimana nilai tan δ yang terukur tidak melebihi batas maksimum 40 ($\times 10^{-4}$) sesuai yang disyaratkan pada standar IEC 60502-2. (2005-02).

SIMPULAN

Pengujian tan δ dilakukan pada kabel tegangan menengah untuk mengukur besarnya rugi-rugi dielektrik yang terdapat dalam kabel tenaga tersebut yang besarnya sebanding dengan faktor rugi-rugi dielektrik (tan δ), dimana nilai tan δ yang besar menandakan rugi-rugi dielektrik yang semakin besar yang akhirnya dapat mempercepat penuaan dielektrik.

Pengujian tan δ pada kabel tegangan menengah di lab tegangan tinggi P.T. PLN (Persero) Litbang Ketenagalistrikan menggunakan perangkat uji M4100 *Instrument Insulation Analyzer*.

yang dapat mendeteksi langsung besarnya faktor rugi-rugi dielektrik pada kabel serta besaran-besaran kabel lainnya dengan teknologi komputer, sehingga lebih memudahkan pengambilan data dan analisis tan δ kabel tenaga dibandingkan menggunakan jembatan *schering* secara teoritis.

Pada pengujian tan δ kabel tegangan menengah di lab tegangan tinggi pln litbang dalam kerja praktek ini digunakan standar IEC 60502-2 (2005-02) untuk kabel bertegangan dengan rating dari 1 kv ($U_m = 1,2$ kv) hingga 30 kv ($U_m=36$ kv).

Adapun sebagian besar sampel pengujian tan δ fungsi suhu kabel tm merupakan jenis penghantar tembaga berisolasi xlpe dengan tegangan rating 6/10(12) kv ke atas yang distandarkan memiliki nilai tan δ maksimum 40($\times 10^{-4}$) pada temperatur maksimum konduktor pada operasi normal.

Dari keseluruhan data hasil pengujian tan δ fungsi tegangan maupun fungsi suhu yang dilakukan pada beberapa sampel kabel tegangan menengah, diperoleh hasil keseluruhan telah lulus uji tan δ , dimana nilai tan δ memenuhi standar yang diberlakukan.

DAFTAR RUJUKAN

- Arismunandar, A., *Teknik Tegangan Tinggi*, PT Pradnya Paramita, Jakarta, 1994.
- Gonen, Turan., *Electric Power Transmission System Engineering—Analysis and Design*, Wiley-Interscience Publication, New York.
- Hutahuruk, T.S., *Transmisi Daya Listrik*, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1985.
- International Electrotechnical Commission, *International Standard IEC 60502-2 – Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)*, Switzerland, 2005.
- Privezentsev, V., Grodnev, I., Kholodny, S., Ryazanov, I. *Fundamentals of Cable Engineering*, Mir Publishers, Moscow, 1973.
- Tobing, Bonggas L, *Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003.
- Tobing, Bonggas L, *Peralatan Tegangan Tinggi*, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003.
- Anonim, *Power Cable*, <http://www.en.wikipedia.org>, Juli 2008.