

ANALISIS KARAKTERISTIK DIELEKTRIK MINYAK HIDROLIK SEBAGAI ALTERNATIF ISOLASI CAIR UNTUK TRANSFORMATOR DAYA

Andy Martono^{*)}, Juningtyastuti, and Abdul Syakur

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)} E-mail : andy_mart@ymail.com

Abstrak

Transformator daya merupakan salah satu peralatan tegangan tinggi yang mempunyai peranan cukup penting dalam Sistem Tenaga Listrik. Permasalahan terpenting pada transformator daya adalah isolasi atau dielektrik. Bahan dielektrik yang digunakan berbahan cair yaitu minyak isolasi, berfungsi sebagai media isolasi dan pendingin. Tiga sifat yang paling penting dari dielektrik cair adalah: viskositas kinematik (kinematic viscosity), kekuatan tegangan tembus (breakdown voltage), dan faktor rugi-rugi ($\tan \delta$). Kualitas dielektrik cair yang buruk akan menyebabkan kegagalan isolasi, dan berakibat tembus listrik (electrical breakdown). Untuk itu, penulis melakukan penelitian terhadap minyak hidrolik dengan tingkat kekentalan rendah, sebagai alternatif minyak isolasi transformator daya. Pengujian dimaksudkan untuk menganalisis karakteristik minyak hidrolik, dengan pembandingan standar minyak isolasi transformator daya. Hasilnya menunjukkan bahwa: viskositas kinematik pada 20⁰C adalah 27,38cSt, kekuatan tegangan tembus sebesar 16,80kV/2,5mm, dan faktor rugi-rugi ($\tan \delta$) bernilai 0,002-0,0032.

Kata kunci : minyak hidrolik, sifat-sifat terpenting isolasi cair, transformator daya

Abstract

Power transformer is one of the high voltage equipment that has an important function on Power System. The most important problems in power transformers is the dielectrics or insulation. dielectrics material used is a liquid dielectrics namely oil insulation, has a function as an insulating and cooling. The three most important properties of liquid dielectrics are: kinematic viscosity, breakdown voltage, dissipation factor. Poor liquid dielectrics will cause insulation failure, and the resulting electrical breakdown. Therefore, authors research on hydraulic oil with low viscosity level, as an alternative to the power transformer insulating oil. testing is intended to analyze the characteristics of hydraulic oil, then comparison with standard power transformer insulating oil. The results showed that : kinematic viscosity at 20⁰C is 27,38cSt, dielectric strength 16,80kV/2,5mm, and dissipation factor 0,0021-0,0032.

Keyword: hydraulic oil, most important properties of liquid dielectrics, power transformer

1. Pendahuluan

Pada transformator daya, menggunakan dielektrik cair yaitu minyak isolasi, yang berfungsi untuk memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan, sehingga antara penghantar-penghantar bertegangan tersebut tidak terjadi lompatan api (*flashover*)^[1]. Minyak isolasi memiliki kekentalan atau viskositas kinematik (*kinematic viscosity*) tertentu. Minyak isolasi dengan kekentalan rendah akan lebih mudah bersirkulasi^[11].

Selain viskositas kinematik, perlu juga diperhatikan kekuatan tegangan tembus dan nilai faktor rugi-rugi ($\tan \delta$)^[8]. Menurut SPLN 49-1-1982, standar minyak isolasi transformator daya yang harus dipenuhi: viskositas

kinematik pada suhu 20⁰C adalah ≤ 40 cSt, tegangan tembus ≥ 30 kV/2,5mm, faktor rugi-rugi ($\tan \delta$) $\leq 0,05$ ^[11].

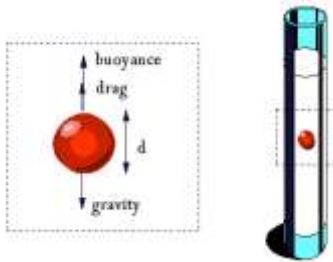
Berdasarkan uraian tersebut, penulis melakukan penelitian terhadap minyak hidrolik (DTE 10 Excel Series) yang memiliki kekentalan rendah sebagai alternatif isolasi cair untuk transformator daya. Penelitian yang dilakukan, ditekankan pada karakteristik viskositas kinematik, karakteristik tegangan tembus, dan karakteristik nilai faktor rugi-rugi ($\tan \delta$) yang terdapat pada minyak hidrolik. Penelitian bertujuan untuk mengetahui kelayakan minyak hidrolik apabila digunakan sebagai alternatif isolasi cair untuk transformator daya yang berdasarkan standar SPLN 49-1-1982.

2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan didalam penelitian ini meliputi: pengujian viskositas kinematik (*kinematic viscosity*) menggunakan metode viskometer bola jatuh, pengujian tegangan tembus (*breakdown voltage*) menggunakan metode elektroda medan seragam sesuai IEC 156, dan faktor rugi-rugi tan δ (*dissipation factor*) menggunakan metode kapasitor pelat sejajar.

2.1 Viskometer Bola Jatuh^[15]

Viskometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur nilai viskositas kinematik dari zat cair (minyak hidrolik). Pengukuran viskositas kinematik minyak hidrolik dilakukan dengan menggunakan metode viskometer bola jatuh. Metode pengukuran ini berdasarkan hukum Stokes^[15]. Viskometer bola jatuh ditunjukkan pada gambar 1:



Gambar 1. Viskometer bola jatuh

Viskometer bola jatuh terdiri dari tabung gelas sebagai tempat minyak hidrolik, dan bola ukur (kelereng) sebagai pengukur viskositas kinematik minyak hidrolik. Ketika benda berbentuk bola dijatuhkan (bergerak) didalam minyak isolasi, maka terhadap benda yang bergerak didalam minyak isolasi tersebut bekerja tiga macam gaya, yaitu :

1. Gaya gravitasi atau gaya berat, gaya inilah yang menyebabkan benda bergerak ke bawah dengan suatu percepatan.
2. Gaya apung (buoyance force), arah gaya ini keatas dan besarnya sama dengan berat cairan yang dipindahkan oleh benda itu.
3. Gaya gesek (Frictional force / drag), arah gaya ini keatas. Gaya gesek ini terjadi antara bola ukur dengan minyak isolasi.

Gaya berat yang mengakibatkan bola turun kebawah dinyatakan dengan persamaan :

$$F_w = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_1) g \quad (1)$$

Gaya gesek yang timbul antara bola dengan minyak isolasi ditentukan dengan persamaan :

$$F_d = 6\pi \eta r v \quad (2)$$

Dalam keadaan setimbang $F_w = F_d$ dari persamaan 1 dan persamaan 2, maka nilai viskositas dinamis adalah sebagai berikut :

$$\eta = \frac{2r^2 g (\rho - \rho_1)}{9v} \quad (3)$$

Viskositas kinematik adalah ukuran kekentalan atau tahanan dalam untuk mengalir oleh masa jenisnya sendiri dengan satuan cSt (*centistoke*), dinyatakan dalam persamaan :

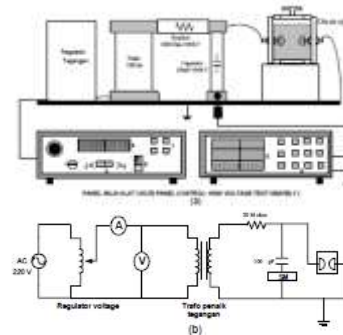
$$V = \frac{\eta}{\rho_1} \quad (4)$$

Keterangan :

- η : viskositas dinamis (poise)
- r : jari-jari bola ukur (cm)
- g : gaya grafitasi
- v : kecepatan bola ukur (cm/s)
- ρ : massa jenis bola ukur (g/cm^3)
- ρ_1 : massa jenis minyak isolasi (g/cm^3)
- V : viskositas kinematik (St)
- 1St : 100 cSt

2.2 Metode Uji IEC 156^[4,14]

Metode uji IEC 156 adalah metode pengujian tegangan tembus menggunakan elektroda medan seragam setengah bola-setengah bola, dengan standar diameter elektroda 50mm dan jarak elektroda 2,5mm. Rangkaian pengujian tegangan tembus ditunjukkan pada gambar 2:



Gambar 2. Rangkaian pengujian tegangan tembus
(a). Bagan peralatan uji
(b). Rangkaian elektronik

Pengujian tegangan tembus dilakukan dengan menggunakan tegangan bolak-balik, yang dinaikan secara bertahap (2kV/detik) dari V_0 atau V_a hingga terjadi tembus listrik^[10]. Besar tegangan dalam mencapai tembus listrik (V_b), dinyatakan dengan persamaan:

$$F = q.E \quad (5)$$

$$(V_b - V_a) = W \quad (6)$$

$$W = F.d = q.E.d \quad (7)$$

Karena V_a merupakan tegangan awal = 0, dan V_b merupakan tegangan untuk mencapai tembus listrik, sedangkan q merupakan konstanta, maka :

$$V_b = W \tag{8}$$

Substitusikan persamaan 7 ke persamaan 8, maka didapat persamaan tegangan untuk mencapai tembus listrik :

$$V_b = E.d \tag{9}$$

Keterangan:

E = Tekanan elektrik (kV/mm)

V_b = Tegangan mencapai tembus (kV)

d = Jarak elektroda (mm)

Tegangan tembus minyak hidrolik diuji sesuai langkah pengujian sebagai berikut^[4,14]:

- Sebelum minyak dituang, kotak uji harus dalam keadaan bersih dan kering.
- Pada saat menuang minyak kedalam kotak uji dilakukan dengan hati-hati. Bila timbul gelembung gas, maka gelembung tersebut dihilangkan terlebih dahulu.
- Banyaknya minyak harus sedemikian rupa sehingga tingginya diatas puncak elektroda lebih dari 20mm.
- Kemudian minyak dibiarkan sekitar 10 menit untuk menghilangkan gelembung gas yang mungkin masih terjadi saat pengisian minyak kedalam kotak uji.
- Kemudian tegangan dinaikan secara bertahap kira-kira 2 kV/detik hingga terjadi tembus listrik.
- Setelah terjadi tembus listrik minyak diaduk dengan suatu tangkai tipis dan bersih untuk menghilangkan gelembung gas yang timbul saat terjadi tembus listrik.
- Setelah terjadi tembus listrik elektroda juga harus diperiksa untuk memastikan bahwa elektroda tidak mengalami kerusakan pada permukaannya akibat tembus listrik.
- Selang waktu 2 menit pengujian diulang kembali sampai dengan enam kali pengujian.
- Tegangan tembus dari enam kali percobaan dijumlahkan dan diambil nilai tegangan tembus rata-rata.

2.2 Metode Kapasitor Pelat Sejajar^[12]

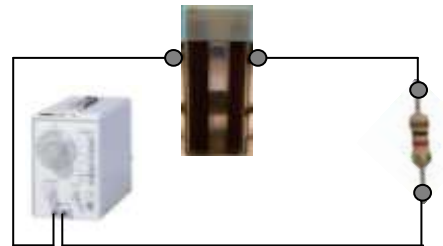
Metode kapasitor pelat sejajar digunakan untuk pengujian faktor rugi-rugi ($\tan \delta$) dari minyak hidrolik, dengan rangkaian pengujian RC seri. Tegangan *input* melalui AFG, tegangan *output* diukur melalui resistor.

Pada sistem pengujian faktor rugi-rugi minyak hidrolik, terdiri dari komponen peralatan dan bahan sebagai berikut :

- AFG (Audio Function Generator) model GAG-809
- Kapasitor sejajar dengan desain
 - P = 75mm
 - L = 32mm
 - A = 2400mm²
 - d = 8mm
- Resistor 1K Ω

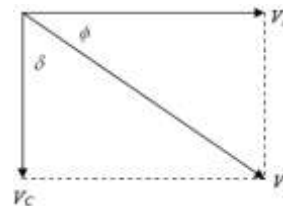
- Multimeter digital (Sanwa CD800a)
- Kabel konektor
- Minyak hidrolik DTE Excel 10 Series

Rangkaian pengujian faktor rugi-rugi minyak hidrolik menggunakan kapasitor pelat sejajar dengan rangkaian RC seri, ditunjukkan pada gambar 3:



Gambar 3. Rangkaian pengujian faktor rugi-rugi

Pada gambar 3, bagian riil merupakan tegangan pada resistor V_R , sedangkan bagian imajiner nya merupakan tegangan kapasitor, V_C . Dalam penggambaran diagram phasornya adalah sebagai berikut :



Gambar 4. Diagram phasor

Dari penggambaran diagram phasor yang ditunjukkan oleh gambar 4, faktor rugi-rugi ($\tan \delta$) didefinisikan sebagai :

$$\tan \delta = \frac{V_R}{(V_i - V_R)^{1/2}} = \frac{K''}{K'} \tag{10}$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \tag{11}$$

3. Hasil Pengujian dan Analisis

3.1 Viskositas Kinematik Minyak Hidrolik

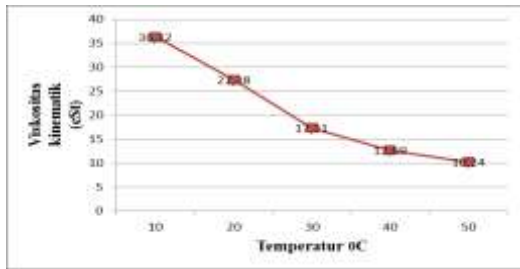
Pengukuran viskositas kinematik minyak hidrolik menggunakan metode viskometer bola jatuh, data yang diambil adalah kecepatan jatuh bola ukur (kelereng) didalam minyak hidrolik. Pengukuran viskositas kinematik minyak hidrolik dilakukan pada temperatur 10⁰-50⁰C. Hasil pengukuran viskositas kinematik minyak hidrolik ditunjukkan pada tabel 1:

Tabel 1. Hasil pengukuran viskositas kinematik

No	Suhu 0C	Waktu jatuh kelereng (s)	Viskositas Kinematik (cSt)
1.	10 0C	2,56s	36,32 cSt

2.	20 0C	1,93s	27,38 cSt
3.	30 0C	1,22s	17,31 cSt
4.	40 0C	0,894s	12,69 cSt
5.	50 0C	0,726s	10,24 cSt

Untuk mengetahui karakteristik perubahan viskositas kinematik terhadap pengaruh kenaikan temperatur, maka data dari tabel 1 dapat dibuat grafik dengan menggunakan microsoft excel, dan didapat grafik seperti ditunjukkan pada gambar 5:



Gambar 5. Grafik viskositas kinematik minyak hidrolis

Berdasarkan table 1 dan gambar 5, menunjukkan bahwa viskositas kinematik minyak hidrolis menurun dari 36,32cSt menjadi 10,24cSt terhadap kenaikan temperatur. 10⁰C hingga 50⁰C. Kenaikan temperatur menjadikan minyak hidrolis berkurang tingkat kekentalannya dan memiliki viskositas kinematik yang lebih rendah, sehingga dengan kenaikan temperatur minyak hidrolis akan bergerak atau mengalir lebih cepat. Minyak hidrolis lebih cepat mengalir pada temperatur yang lebih tinggi dapat dijelaskan dengan teori kinetik yang menyatakan, “dalam benda yang panas, molekul-molekul bergerak lebih cepat dibanding dengan molekul-molekul dalam benda yang lebih dingin”^[15].

Hubungan antara penurunan viskositas kinematik minyak hidrolis dengan kenaikan temperatur memberi arti bahwa, minyak hidrolis mengalir atau bersirkulasi lebih cepat terhadap kenaikan temperatur. Proses sirkulasi minyak hidrolis bertujuan untuk mendisipasikan panas atau pendinginan. Jika panas tidak terdisipasi, maka kenaikan temperatur dapat merusak minyak hidrolis.

3.2 Tegangan Tembus Minyak Hidrolis

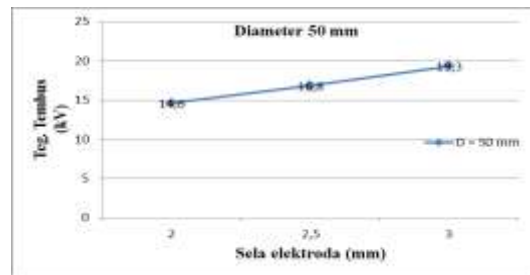
Pengujian tegangan tembus dimaksudkan untuk mengetahui kekuatan isolasi minyak hidrolis pada standar jarak elektroda 2,5mm, dan kekuatan tegangan tembus terhadap pengaruh jarak (sela) elektroda. Hasil pengujian tegangan tembus minyak hidrolis ditunjukkan pada tabel 2:

Tabel 2. Hasil pengujian tegangan tembus

No	Pengujian	Kekuatan Tegangan Tembus (kV)		
		Sela 2mm	Sela 2,5mm	Sela 3mm
1	1	15,1	1	1
2	2	15,0	2	2
3	3	14,8	3	3

4	4	14,5	4	4
5	5	14,2	5	5
6	6	14,0	6	6
	Rata-rata	14,60kV/ 2mm	16,80kV/ 2,5mm	19,30kV/ 3mm
	Medan elektrik (kV/mm)	7,30 kV/mm	6,72 kV/mm	6,43 kV/mm

Untuk mengetahui karakteristik kekuatan tegangan tembus terhadap jarak elektroda, maka data dari tabel 2 dapat dibuat grafik dengan menggunakan microsoft excel. Grafik hubungan antara kekuatan tegangan tembus dengan jarak elektroda seperti ditunjukkan pada gambar 6:



Gambar 6. Grafik tegangan tembus terhadap sela

Berdasarkan tabel 2 dan gambar 6, menunjukkan bahwa kekuatan tegangan tembus berbanding lurus terhadap peningkatan jarak elektroda. Kekuatan tegangan tembus meningkat dari 14,6kV, 16,8kV, 19,3kV pada jarak elektroda 2mm hingga 3mm. Pada kondisi jarak elektroda yang semakin jauh, tekanan elektrik terhadap minyak hidrolis menurun, sehingga pada jarak elektroda yang jauh dibutuhkan tegangan yang lebih besar untuk terjadi tembus listrik.

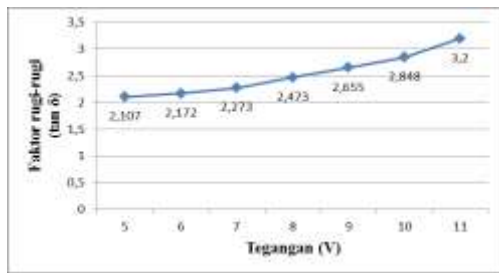
3.3 Faktor Rugi-rugi Minyak Hidrolis

Hasil pengujian faktor rugi-rugi (tan δ) minyak hidrolis pada tegangan 5V sampai 11V dengan menggunakan rangkaian RC seri, ditunjukkan pada tabel 3:

Tabel 3. Hasil pengukuran faktor rugi-rugi

No	Vin	Vout (Volt)			Vout rata-rata	Tan δ
		1	2	3		
1	5V	0,005	0,004	0,005	0,0047	0,002107
2	6V	0,005	0,006	0,005	0,0053	0,002172
3	7V	0,006	0,006	0,006	0,006	0,002273
4	8V	0,006	0,007	0,008	0,007	0,002473
5	9V	0,007	0,008	0,008	0,0077	0,002655
6	10V	0,008	0,009	0,010	0,009	0,002848
7	11V	0,010	0,010	0,010	0,010	0,0032

Untuk mengetahui karakteristik tan δ terhadap peningkatan tegangan, maka data dari tabel 3 dibuat grafik dengan menggunakan microsoft excel. Grafik hubungan antara tan δ dengan kenaikan tegangan ditunjukkan pada gambar 7 :



Gambar 7. Grafik tan δ terhadap tegangan

Berdasarkan tabel 3 dan gambar 7, menunjukkan peningkatan nilai faktor rugi-rugi (tan δ) minyak hidrolik dari 0,0021 hingga 0,0032, terhadap pengaruh kenaikan tegangan 5V sampai 11V. Nilai faktor rugi-rugi (tan δ) yang semakin meningkat memberi arti bahwa kehilangan daya atau rugi-rugi bahan isolasi (minyak hidrolik) dalam bentuk panas (*dissipation losses*) menjadi besar.

Rugi-rugi bahan isolasi (minyak hidrolik) dalam bentuk panas akan menaikkan temperatur, dan pada akhirnya dapat mempercepat penuaan (memperburuk kualitas isolasi) minyak hidrolik sebagai isolasi cair^[10]. Dengan demikian, peningkatan tegangan akan mengakibatkan rugi-rugi minyak hidrolik dalam bentuk panas menjadi semakin besar.

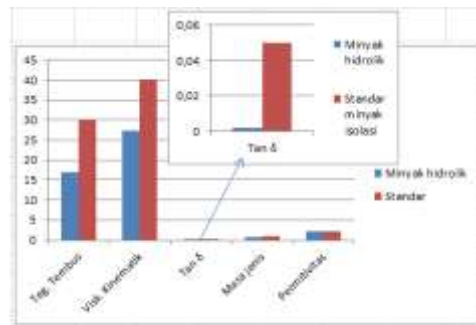
3.4 Analisis Kelayakan Minyak Hidrolik Sebagai Alternatif Isolasi Cair

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan pada minyak hidrolik dengan memperhatikan parameter sifat-sifat terpenting dari isolasi cair yang meliputi: nilai viskositas kinematik, nilai tegangan tembus dan nilai faktor rugi-rugi (tan δ), selanjutnya dibuat tabel perbandingan. Perbandingan hasil pengujian minyak hidrolik, dengan standar minyak isolasi transformator daya menurut SPLN 49-1-1982, ditunjukkan pada tabel 4:

Tabel 4. Perbandingan hasil uji dengan standar

Sifat dielektrik	Minyak hidrolik	Standar SPLN 49-1-1982
Tegangan tembus	16,80 kV/2,5mm	≥ 30 kV/2,5mm
Viskositas kinematik 20°C	27,38 cSt	≤ 40 cSt
Faktor rugi-rugi (Tan δ)	0,0021– 0,0032	≤ 0,05
Permittivitas relatif	2,23 - 3,31	-
Massa jenis	0,83gr/cm ³	≤ 0,895gr/cm ³

Data pada tabel 4 dapat dibuat grafik perbandingan antara hasil pengujian minyak hidrolik dengan standar SPLN 49-1-1982. Grafik perbandingan ditunjukkan pada gambar 7:



Gambar 7. Grafik perbandingan minyak hidrolik dengan standar

Berdasarkan tabel 4 dan gambar 7 menunjukkan bahwa, nilai tegangan tembus minyak hidrolik lebih rendah daripada standar SPLN 49-1-1982 (yaitu 16,8kV/2,5mm, sedangkan standar diijinkan ≥30kV/2,5mm), viskositas kinematik minyak hidrolik memenuhi standar yang diijinkan (yaitu 27,38cSt, standar diijinkan ≤ 40cSt), dan faktor rugi-rugi (tan δ) minyak hidrolik masih berada dalam standar diijinkan (yaitu 0,0021, standar diijinkan ≤0,05).

Bila ditinjau dari viskositas kinematiknya, minyak hidrolik tersebut memiliki tingkat kekentalan lebih rendah. Dengan viskositas kinematik yang rendah, minyak hidrolik lebih mudah mengalir dan bersirkulasi dengan baik, sehingga proses pendinginan inti dan besi didalam transformator daya dapat berlangsung dengan baik.

Faktor rugi-rugi (tan δ) minyak hidrolik dalam pengukuran, masih memenuhi standar minyak isolasi. Pengukuran faktor rugi-rugi yang juga bertujuan untuk mengetahui nilai permitivitas relatif minyak hidrolik, maka minyak hidrolik dengan permitivitas relatif 2,23-3,31 memungkinkan untuk digunakan sebagai isolasi cair, karena permitivitas relatif minyak hidrolik sama dengan minyak transformator (minyak trafo) yang umum dipakai.

Apabila minyak hidrolik ditinjau dari kekuatan tegangan tembus, maka belum memenuhi standar minyak isolasi untuk transformator daya. Kekuatan tegangan tembus minyak hidrolik lebih rendah dari standar yang diijinkan akan mengakibatkan kegagalan isolasi dalam bentuk tembus listrik (*electrical breakdown*) lebih cepat, atau terjadi tembus listrik pada tegangan yang lebih rendah.

Berdasarkan pengujian tiga parameter sifat-sifat terpenting dari suatu bahan isolasi cair (*liquid dielektrik*) yang meliputi: viskositas kinematik, kekuatan tegangan tembus, dan faktor rugi-rugi (tan δ), kekuatan tegangan tembus minyak hidrolik DTE 10 Excel Series belum memenuhi persyaratan SPLN 49-1-1982. Dengan demikian minyak hidrolik ini belum layak digunakan sebagai alternatif bahan isolasi cair untuk transformator daya.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data yang telah dilakukan pada minyak hidrolik DTE 10 Excel Series, maka dapat diambil suatu kesimpulan bahwa berdasarkan standar SPLN 49-1-1982, tegangan tembus yang harus dipenuhi oleh minyak isolasi untuk transformator daya pada jarak elektroda 2,5mm sebesar $\geq 30\text{kV}$, sedangkan pada pengujian tegangan tembus minyak hidrolik pada jarak 2,5mm hanya sebesar 16,80kV. Maka minyak hidrolik belum layak digunakan sebagai alternatif isolasi cair untuk transformator daya.

Karena tegangan tembus minyak hidrolik belum memenuhi persyaratan SPLN 49-1-1982, maka perlu dilakukan pengolahan minyak hidrolik dengan menghilangkan kontaminan yang mungkin masih terdapat didalam minyak hidrolik.

Daftar Pustaka

- [1]. Arismunandar, A., *Teknik Tegangan Tinggi*, Cetakan ketujuh, Pradnya Paramita, Jakarta, 1994.
- [2]. Arismunandar, A., *Teknik Tegangan Tinggi Suplemen*, Ghalia Indonesia, Jakarta, 1983.
- [3]. Abdul syakur., M, Facta., *Perbandingan Tegangan Tembus Media Isolasi Udara Dan Media Isolasi Minyak Trafo Menggunakan Elektroda Bidang-Bidang*, Transmisi, Vol. 10, No. 2, Desember 2005.
- [4]. David Supriyanto., *Analisis Karakteristik Tegangan Tembus Minyak Trafo Sebelum Dan Sesudah Dipurifikasi Dengan Fenol*, penelitian 2008, Undip, Semarang.
- [5]. IEEE, *A Survey Of Aging Characteristics Of Cellulose Insulation in Natural Ester And Mineral Oil*, *Electrical Insulation Magazine*, Volume 27 Number 5, September/Oktober, 2011.
- [6]. IEEE, *Preparation of a Vegetable Oil-Based Nanofluid and Investigation of Its Breakdown and Dielectric Properties*, *Electrical Insulation Magazine*, Volume 28 Number 5, September/Oktober, 2012.
- [7]. Manjang, S., Utina, A., *Analisa Ketidakmurnian Minyak Trafo Terhadap Kekuatan Isolasinya Pada Berbagai Kondisi Penuaan*, Makalah seminar Nasional Ketenagalistrikan 2005 – Semarang.
- [8]. Naidu, M.S., and Karamaju, V., *High Voltage Engineering*, McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1982.
- [9]. Salam, Abdul M., A. Hussein., El-Morshedy. Ahdab, and R. radwan., *High-voltage Engineering: Theory and Practice*, Marcel Dekker, Inc., 2000.
- [10]. Tobing, Bonggas L., *Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003.
- [11]. Tobing, Bonggas L., *Peralatan Tegangan Tinggi*, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003.
- [12]. Toifur, M., Setiawan., *Profil Rugi Dielektrik Minyak Minyak Pelumas Mesran Dan Minyak Pelumas TOP-1 Pada Rentang Frekuensi 1-1000Khz*, Prosiding Seminar Nasional Fisika 2010.
- [13]. Wahyu Kunto, W., *Analisis Karakteristik Breakdown Voltage Pada Dielektrik Minyak Shell Diala B Pada Suhu 30°C - 130°C* , penelitian 2008 – Undip, Semarang.
- [14]. ---, IEC-156, *Insulating Liquid Determinan of Breakdown Voltage at Power Frequency Tes Method*, 1995.
- [15]. ---, *Viskositas, kimia fisika*, AAK Nasional, Surakarta, 2012.
- [16]. ---, Bab II Tinjauan Pustaka., *Transformator.*, 2012.
- [17]. http://en.wikipedia.org/wiki/Stokes_Law, diakses Mei 2012.
- [18]. <http://id.wikipedia.org/wiki/Kapasitansi>, diakses Mei 2012.