

PURIFIKASI FAKTOR RUGI DIELEKTRIK (TAN δ) DAN RESISTIVITAS SERTA WARNA DARI MINYAK ISOLASI TRANSFORMATOR SETELAH MENGALAMI PEMBEBANAN, DENGAN BENTONIT AKTIF

Swastika Mahardika^{*)}, Juningtyastuti, and Abdul Syakur

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

^{*)} Email : swasmahar@gmail.com

Abstrak

Minyak isolasi transformator mengalami penuaan setelah mengalami pembebanan, terkontaminasi uap air, karbon dan debu. Tan δ , resistivitas, dan warna digunakan menjadi indikator kualitas minyak. Untuk memperbaiki kualitas minyak, dilakukan purifikasi dengan bentonit aktif. Pengujian menggunakan lima sampel minyak transformator setelah mengalami pembebanan dari transformator distribusi 3 fasa (transformator 400 KVA, 630 KVA dan 1 MVA). Pengujian tan δ dan resistivitas menggunakan Baur DTL metode standar IEC 60247, sedangkan pengujian warna menggunakan *color comparator* metode standar ASTM D1500, di Laboratorium Kimia, PT. PLN (Persero) Puslitbang, Jakarta Selatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa, nilai tan δ dari sampel 1 menurun dari 0,00518 menjadi 0,00145, sampel 2 menurun dari 0,0448 menjadi 0,00455, sampel 3 menurun dari 0,01266 menjadi 0,00126, sampel 4 menurun dari 0,01544 menjadi 0,00128 dan sampel 5 menurun dari 0,02862 menjadi 0,00973. Perbaikan terjadi pada resistivitas, sampel 1 suhu 80°C mengalami peningkatan yaitu dari 171 G Ω m menjadi 414 G Ω m, sampel 2 dari 10,3 G Ω m menjadi 266,5 G Ω m, sampel 3 dari 71,4 G Ω m menjadi 509,5 G Ω m, sampel 4 dari 104,5 G Ω m menjadi 483,2 G Ω m. Sedangkan nilai resistivitas sampel 5 dari 8,8 G Ω m menjadi 23,8 G Ω m dan warna pada minyak yang sebelumnya gelap menjadi lebih cerah. Berdasarkan data-data uji tersebut sampel 1, sampel 2, sampel 3, sampel 4 masih layak digunakan, sedangkan sampel 5 tidak layak digunakan.

Kata kunci : minyak transformator, tan δ , resistivitas, warna minyak, bentonit aktif

Abstract

Used transformer oil aging caused by loading operation, water content, carbon, and ash. Tan δ , resistivity and color is an indicator the quality of the transformer oil. For improvement oil using purification with bentonite activated. Test used five samples transformer oil from distribution 3 phases transformer (transformers 400 KVA, 630 KVA, and 1000 KVA). Tan δ and resistivity used Baur DTL standard method IEC 60247 and color test used color comparator standard method ASTM D1500 in Chemistry Laboratory of PT. PLN (Persero) Puslitbang, South Jakarta. The result showed that purification can improve tan δ of sample 1 (from 0,00518 to 0,00145), sample 2 (from 0,0448 to 0,00455), sample 3 (0,01266 to 0,00126), sample 4 (0,01544 to 0,00128) and sample 5 (from 0,02862 to 0,00973). Some improvements have been achieved resistivity improved of sample 1 with 80°C from 171 G Ω m to 414 G Ω m, sample 2 from 10,3 G Ω m to 266,5 G Ω m, sample 3 from 71,4 G Ω m to 509,5 G Ω m, sample 4 from 104,5 G Ω m to 483,2 G Ω m. Whereas resistivity sample 5 from 8,8 G Ω m to 23,8 G Ω m and the color of used transformer oil is dark after purification become clear. Based on results that sample 1, sample 2, sample 3, sample 4 still deserve for use, whereas sample 5 is not worth using.

Keywords: used transformer oil, tan δ , resistivity, transformer oil color, activated bentonite

1. Pendahuluan

Kenaikan suhu menimbulkan gas-gas dalam minyak, yang akan mempengaruhi keandalan minyak sebagai media isolasi serta penurunan kualitas minyak isolasi yang akan mempengaruhi resistivitas, tan δ dan warna. Minyak yang telah terpakai mengandung bahan kimia beracun seperti logam berat, bahan organik (*fenol*). Untuk

mencegahnya maka perlu adanya purifikasi dengan bentonit aktif yang merupakan solusi yang baik untuk menghindari bahaya lingkungan. Bentonit merupakan sumber daya alam yang melimpah di Indonesia namun belum dikelola secara maksimal sehingga kebutuhan bentonit nasional hingga saat ini masih defisit $\pm 20\%$ ^[1]. Bentonit aktif telah dievaluasi pada komposisi *mineralogy* dan kimia sebagai bahan penjernih (*bleaching agent*) pada

refining minyak isolasi transformator yang telah dibebani. Hasil menunjukkan bahwa bentonit aktif dapat memperbaiki minyak, seperti menaikkan tegangan tembusnya mencapai 68 kV dan mengubah warna minyak isolasi trafo yang sebelumnya coklat menjadi kuning^[2]. Semakin tua umur dari trafo, resistivitasnya akan semakin rendah dan viskositas dari minyak akan semakin tinggi dan perubahan nilai ini juga akan menyebabkan tegangan tembus semakin kecil karena minyak sudah mengandung banyak endapan bahan kimia dan mengandung kontaminan^[3]. *Water Content* juga mempengaruhi *dielectric dissipation factor* ($\tan \delta$), dimana semakin banyak kandungan airnya maka semakin besar $\tan \delta$ ^[4]. Penelitian ini bertujuan untuk memperbaiki dan menganalisis karakteristik minyak isolasi transformator dengan bentonit aktif terhadap variasi suhu serta dan membandingkan hasil pengukuran faktor rugi-rugi dielektrik ($\tan \delta$), resistivitas dan warna dari 5 sampel minyak isolasi yang telah dibebani sebelum dan setelah purifikasi dengan bentonit aktif.

2. Metode

2.1 Pengambilan Sampel Minyak Isolasi Transformator

Berikut Tabel 1 merupakan data sampel minyak isolasi transformator yang telah dibebani.

Tabel 1 Data sampel minyak isolasi trafo

Sam pel	Merk	No. Seri	Gardu	Daya (KVA)	Tahun Pembuatan	Umur Minyak
1	UNINDO	81471	PK.273	400	2006	6 tahun
2	B&D	20093380	SD.128	630	2010	4 tahun
3	SINTRA	4018046	PK.37B	1000	2005	9 tahun
4	TRAFINDO	230833	KG.344	400	2002	10 tahun
5	STARLITE	41040	KG.299	1000	2004	10 tahun

2.2 Pengujian Minyak Isolasi Transformator

Pengujian yang dilakukan ada tiga yaitu, pengujian faktor rugi-rugi dielektrik ($\tan \delta$), resistivitas, dan warna. Alat yang digunakan menggunakan Baur DTL dengan standar metode IEC 60247^[5].

2.2.1 Pengujian Faktor Rugi-rugi Dielektrik (Pengujian $\tan \delta$)

Peralatan dan bahan yang digunakan terdiri-dari :

1. Baur DTL *Measuring System*



Gambar 1 Alat uji faktor rugi-rugi dielektrik ($\tan \delta$)

2. Gelas ukur
3. Termometer
4. Oven atau pemanas

5. Sampel minyak isolasi trafo yang telah dibebani
6. Sarung tangan karet
7. Masker

Langkah pengujian faktor rugi-rugi dielektrik ($\tan \delta$) sebagai berikut :

1. Mempersiapkan alat dan bahan
2. Memilih *test standard* IEC 247 dengan memilih *code* 01 pada DTL.
3. Memanaskan minyak sebanyak 45 ml ke dalam oven mencapai suhu 40°C.
4. Menuangkan 15 ml minyak yang telah dipanaskan, ke sel uji MC2A secara pelan dan terus-menerus kurang lebih setinggi 1 cm.
5. Menekan tombol *drainage valve* sampai sel uji MC2A kosong.
6. Memenuhi kembali sel uji MC2A dan menekan *drainage valve* secara berulang sampai 3 kali.
7. Setelah keempat kalinya, sel uji MC2A terisi sampel minyak setinggi 1 cm.
8. Menutup dan mengunci *protective cover* sampai berbunyi klik.
9. Menekan tombol *enter* dan menunggu kira-kira 15 sampai 20 menit.
10. Hasil pengujian akan muncul pada *display* dan otomatis tercetak oleh printer.
11. Mengulangi langkah 3 sampai 10 dengan variasi suhu 80°C dan suhu mula-mula minyak yaitu 26°C.

2.2.2 Pengujian Resistivitas

Pengujian resistivitas sama dengan pengujian $\tan \delta$ menggunakan Baur DTL dengan standar metode IEC 60247, karena keluaran *printout* dari *matrix printer* menampilkan data resistivitas dan permitivitas. Pengujian resistivitas dilakukan sebanyak 3x (tiga kali) setiap satu sampel minyak transformator yaitu pada suhu 26°C, 40°C dan 80°C. Waktu pengujian ini dilakukan bersamaan dengan pengujian faktor rugi-rugi dielektrik ($\tan \delta$). Langkah pengujian resistivitas sebagai berikut :

1. Mempersiapkan alat dan bahan yang meliputi DTL, gelas ukur, termometer, oven atau pemanas, sampel minyak isolasi trafo, sarung tangan karet dan masker
2. Memilih *test standard* IEC 247 dengan memilih *code* 01 pada DTL.
3. Memanaskan minyak sebanyak 45 ml ke dalam oven mencapai suhu 40°C.
4. Menuangkan 15 ml minyak yang telah dipanaskan, ke sel uji MC2A secara pelan dan terus-menerus kurang lebih setinggi 1 cm.
5. Menekan tombol *drainage valve* sampai sel uji MC2A kosong.
6. Memenuhi kembali sel uji MC2A dan menekan *drainage valve* secara berulang sampai 3 kali.
7. Setelah keempat kalinya, sel uji MC2A terisi sampel minyak setinggi 1 cm.
8. Menutup dan mengunci *protective cover* sampai berbunyi klik.
9. Menekan tombol *enter* dan menunggu kira-kira 15 sampai 20 menit.

10. Hasil pengujian akan muncul pada *display* dan otomatis tercetak oleh printer.
11. Mengulangi langkah 3 sampai 10 dengan variasi suhu 80°C dan suhu mula-mula minyak yaitu 26°C.

2.2.3 Pengujian Warna

Pengujian warna menggunakan alat *Color Comparator* (lihat gambar 3.10). Standar warna berada di *color disc* No. 620C-53 (Skala 0,5 – 5,0). Peralatan dan bahan yang digunakan untuk pengujian warna ini terdiri-dari *color comparator*, *color disc*, gelas ukur, sarung tangan, masker, dan kamera.



Gambar 2 *Color disc* pada Alat Uji

Disc yang digunakan adalah yang berskala 0,5 sampai 5,0 karena sampel minyak dipakai tidak ada yang terlalu gelap. Paling lama umur 10 tahun. Langkah pengujian warna menurut metode standar ASTM D 1500 adalah sebagai berikut^[6]:

1. Memasukkan *color disc* No.620C-53 (nilai 0.5 – 5.0) pada alat *Color Comparator*.
2. Menuangkan minyak secara pelan kedalam 33 mm *rectangular glass cells*. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3 Sampel minyak dituangkan ke gelas

3. Membandingkan secara visual seperti pada gambar 2.6, melihat warna dari sampel minyak dengan *color disc* yang telah diberi standar nomor seri tertentu.



Gambar 4 Membandingkan secara visual dengan cara memutar *color disc*

4. Mencatat skala pemeriksaan warna minyak (nilai skala 0,5 - 5,0), jika belum sesuai maka *color disc* diputar sampai warna telah sesuai dengan nomor seri salah satu *color disc*.



Gambar 5 Warna minyak telah sama dengan salah satu warna pada *color disc*

2.3 Purifikasi dengan Bentonit Aktif

Purifikasi menggunakan tiga metode yaitu *boiling*, *regeneration*, dan *filtering*. Dalam setiap proses purifikasi, setiap sampel minyak dipanaskan, ditambahkan bentonit aktif dan disaring. Selanjutnya kembali melakukan pengujian dan pengambilan data dengan mengukur faktor rugi-rugi dielektrik ($\tan \delta$), resistivitas, dan warna setelah proses purifikasi. Peralatan dan bahan yang digunakan untuk purifikasi terdiri-dari :

1. Bentonit Aktif
Bentonit yang dibeli sebanyak 1 kg di salah satu toko kimia di Jakarta. Pada penelitian ini, satu sampel minyak seberat 1 liter mendapat 30 gram bentonit atau 3% dari berat minyak.
2. Termometer
3. Magic com 1 liter
4. Gelas 10 buah
5. Corong minyak
6. Kertas saring
7. Plastik
8. Sarung tangan
9. Masker

Langkah purifikasi dengan bentonit aktif adalah sebagai berikut :

1. Memanaskan minyak sebanyak 1 liter pada magic com sampai suhu mencapai 100°C.
2. Memasukkan bentonit aktif sebanyak 30 gram ke dalam minyak.
3. Campuran dipanaskan kembali mencapai 100°C sambil di aduk selama 30 menit seperti gambar 6.



Gambar 6 Pengadukan campuran minyak dan bentonit aktif

4. Setelah mencapai 30 menit, minyak disaring dengan kertas saring sampai tidak ada lagi endapan bentonit aktif dalam minyak.



Gambar 7 Minyak disaring dengan kertas saring

5. Mendingkankan minyak sampai mencapai suhu normal yaitu 26°C.
6. Melakukan pengujian tan δ, resistivitas, dan warna setelah purifikasi dengan bentonit aktif di Laboratorium Kimia PT. PLN (Persero) Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan dengan cara yang sama seperti pengujian awal.
7. Apabila tan δ berkurang, resistivitas meningkat serta warna semakin pucat dibandingkan dengan pengujian awal maka pengujian selesai. Setelah proses purifikasi dan pengujian setelah purifikasi selesai maka selanjutnya dilakukan analisis hasil pengujian awal sebelum purifikasi dan setelah purifikasi dengan bentonit aktif.

3. Hasil dan Analisa

3.1 Pengujian Faktor Rugi-rugi Dielektrik (Pengujian Tan δ)

3.1.1 Pengujian Tan δ Sebelum Purifikasi

Sub Bab 3.1.1 akan menjelaskan rekapitulasi antara hasil pengujian dengan alat Baur DTL dan perhitungan manual.

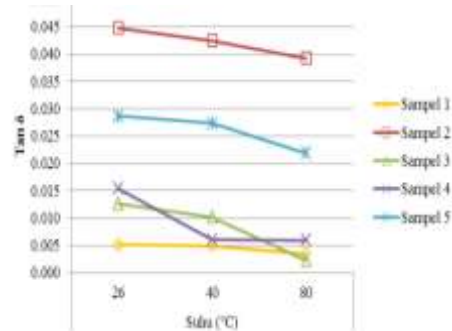
A. Pengujian Tan δ dengan Baur DTL

Berikut Tabel 2 yang merupakan data hasil pengujian tan δ dengan Baur DTL pada setiap sampel terhadap variasi suhu.

Tabel 2 Hasil pengujian tan δ sebelum purifikasi

Sampel	Tan δ Sebelum Purifikasi		
	26°C	40°C	80°C
Sampel 1	0.00518	0.00495	0.00347
Sampel 2	0.04480	0.04241	0.03924
Sampel 3	0.01266	0.01016	0.00228
Sampel 4	0.01544	0.00601	0.00597
Sampel 5	0.02862	0.02735	0.02189

Dari Tabel 2 dapat dibuat grafik sebagai berikut



Gambar 8 Grafik hasil pengujian tan δ sebelum purifikasi terhadap variasi suhu

Berdasarkan Gambar 8, menunjukkan bahwa sampel 2 dan sampel 5 tidak memenuhi standar IEC 60422. Sedangkan sampel 1, sampel 3 dan sampel 4 sudah sesuai dengan standar. Pada suhu 26°C, nilai tan δ pada sampel 2 memiliki nilai yang paling tinggi sebesar 0.04480 disusul dengan sampel 5 yaitu sebesar 0,02862. Nilai tan δ sampel 1, sampel 3 dan sampel 4 mempunyai nilai tan δ yang rendah dibanding dengan sampel 2 dan sampel 5. Pada sampel 4 nilai tan δ turun secara drastis pada suhu 40°C sebesar 0,00601 sedangkan suhu 80°C sebesar 0,00597, karena air sudah banyak menguap pada suhu 40°C sehingga bila dipanaskan pada suhu 80°C tidak mengalami banyak perubahan. Sampel 3 dan sampel 1 mempunyai nilai tan δ yang terendah.

B. Perhitungan Manual Nilai Tan δ Sebelum Purifikasi

Untuk menentukan nilai tan δ dapat digunakan rumus sebagai berikut :

$$\text{Tan } \delta = \frac{\sigma}{\epsilon \cdot \omega} = \frac{1}{\rho \epsilon \omega}$$

Contoh perhitungan seperti berikut :

Pada sampel 1 suhu 26°C

Resistivitas = 149,4 GΩm

Permittivitas relatif = 2,25

Frekuensi = 50 Hz

Sehingga,

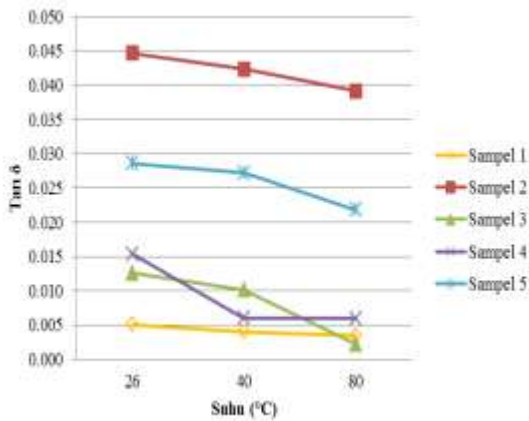
$$\text{Tan } \delta = \frac{\sigma}{\epsilon \cdot \omega} = \frac{1}{\rho \epsilon \omega} = \frac{1}{149,4 \times 10^9 \times 8,85 \times 10^{-12} \times 2,25 \times 2\pi \times 50}$$

$$\text{Tan } \delta = 0.00507$$

Dengan cara yang sama, hasil perhitungan nilai tan δ dapat dilihat pada Tabel 3 sebagai berikut :

Tabel 3 Hasil perhitungan tan δ sebelum purifikasi

Sampel	Hasil Perhitungan		
	26°C	40°C	80°C
Sampel 1	0.00507	0.00400	0.00344
Sampel 2	0.04471	0.04240	0.03920
Sampel 3	0.01262	0.01014	0.00220
Sampel 4	0.01540	0.00600	0.00595
Sampel 5	0.02860	0.02724	0.02187



Gambar 9 Grafik hasil perhitungan tan δ sebelum purifikasi terhadap variasi suhu

Dari Gambar 9, menunjukkan bahwa grafik hasil perhitungan hampir sama dengan hasil pengujian. Nilai tan δ suhu 26°C pada sampel 2 sebesar 0,04471 dan sampel 5 suhu 26°C sebesar 0,02860 tidak memenuhi standar IEC 60422 sedangkan sampel 1, sampel 3, dan sampel 4 sudah sesuai dengan standar. Perbedaan nilai tan δ antara sampel 2, sampel 5 dengan sampel 1, sampel 3 dan sampel 4 dikarenakan sampel 2 dan sampel 5 memiliki kualitas minyak isolasi yang buruk.

C. Rekapitulasi Hasil Pengujian dan Perhitungan Nilai Tan δ Sebelum Purifikasi

Tabel 4 Hasil pengujian dan perhitungan tan δ sebelum purifikasi

Sampel	Hasil Pengujian			Hasil Perhitungan		
	26°C	40°C	80°C	26°C	40°C	80°C
Sampel 1	0.00518	0.00495	0.00347	0.00507	0.00490	0.00344
Sampel 2	0.04480	0.04241	0.03924	0.04471	0.04240	0.03920
Sampel 3	0.01266	0.01016	0.00228	0.01262	0.01014	0.00220
Sampel 4	0.01544	0.00601	0.00597	0.01540	0.00600	0.00595
Sampel 5	0.02862	0.02735	0.02189	0.02860	0.02724	0.02187

Berdasarkan Tabel 4 yang merupakan perbandingan nilai tan δ pengujian dan perhitungan pada suhu 26°C, 40°C dan 80°C terlihat bahwa terdapat perbedaan kecil yaitu sebesar 0,00002 - 0,0001.

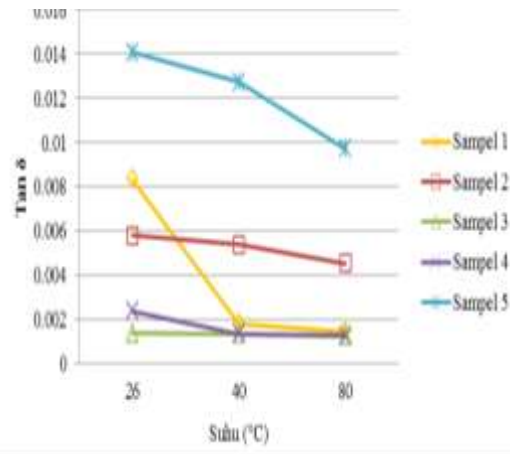
3.1.2 Pengujian Tan δ Setelah Purifikasi

Purifikasi bertujuan untuk menghilangkan zat-zat kontaminan yang terkandung dalam minyak seperti air dan partikel-partikel koloid [9].

A. Pengujian Tan δ dengan Baur DTL

Tabel 5 Hasil pengujian tan δ setelah purifikasi dengan bentonit aktif

Sampel	Tan δ Setelah Purifikasi		
	26°C	40°C	80°C
Sampel 1	0.00834	0.00182	0.00145
Sampel 2	0.00581	0.00539	0.00455
Sampel 3	0.00137	0.00134	0.00126
Sampel 4	0.00238	0.00134	0.00128
Sampel 5	0.01409	0.01273	0.00973



Gambar 10 Grafik hasil pengujian tan δ setelah purifikasi terhadap variasi suhu

Berdasarkan Gambar 10, dapat dilihat bahwa hasil pengujian tan δ setelah dipurifikasi terhadap variasi suhu pada sampel 1, sampel 2, sampel 3, sampel 4, dan sampel 5 mengalami penurunan yaitu sebesar 0,007 – 0,0005. Pada suhu 26°C, nilai tan δ sampel 5 sebesar 0,01409 merupakan nilai yang paling tinggi dibanding sampel yang lain dan turun secara signifikan sebesar 0,002. Penurunan nilai tan δ sampel 2, sampel 3 dan sampel 4 cenderung stabil terhadap peningkatan suhu karena kandungan air sudah banyak menguap pada saat proses *boiling*. Pada sampel 1 nilai tan δ suhu 26°C sebesar 0,00834 sedangkan suhu 40°C sebesar 0,00182, turun secara drastis karena banyak air yang menguap pada suhu 40°C. Sampel 5 mengalami perbedaan nilai tan δ yang tinggi dibanding sampel yang lain karena kualitas minyak isolasi sampel 5 paling buruk. Pengaruh bentonit aktif atau $(Mg, Ca)_xAl_2O_3 \cdot ySiO_2 \cdot nH_2O$ mengandung bahan kimia seperti SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , FeO , CuO dan C yang baik untuk perbaikan nilai tan δ karena dapat menyerap produk-produk penuaan dan kelembaban pada minyak seperti kandungan air, debu, keasaman, dan kandungan karbon. Dapat disimpulkan bahwa hasil purifikasi minyak, menjadikan semua sampel minyak sesuai dengan standar IEC 60422, dimana batas nilai tan δ harus dibawah nilai 0,015.

B. Perhitungan Manual Nilai Tan δ Setelah Purifikasi
 Untuk menentukan nilai tan δ dapat digunakan rumus sebagai berikut :

$$\tan \delta = \frac{\sigma}{\epsilon \cdot \omega} = \frac{1}{\rho \epsilon \omega}$$

Pada sampel 1 suhu 26°C,
 Resistivitas = 37,4 GΩm
 Permittivitas relatif = 2,25
 Frekuensi = 50 Hz
 Sehingga,

$$\tan \delta = \frac{\sigma}{\epsilon \cdot \omega} = \frac{1}{37,4 \times 10^9 \times 2,25 \times 10^{-12} \times 2,25 \times 2\pi \times 50}$$

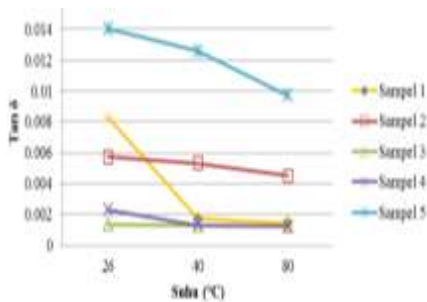
$\tan \delta = 0,00830$

Dengan menggunakan persamaan perhitungan yang sama maka didapatkan data perhitungan sebagai berikut :

Tabel 6 Hasil perhitungan tan δ setelah purifikasi

Sampel	Hasil Perhitungan		
	26°C	40°C	80°C
Sampel 1	0.00830	0.00172	0.00141
Sampel 2	0.00574	0.00530	0.00451
Sampel 3	0.00135	0.00131	0.00123
Sampel 4	0.00231	0.00131	0.00122
Sampel 5	0.01402	0.01258	0.00971

Berdasarkan Tabel 6, dapat dibuat grafik seperti pada Gambar 11



Gambar 11 Grafik hasil perhitungan tan δ setelah purifikasi terhadap variasi suhu

Dari Gambar 11, menunjukkan hasil perhitungan nilai tan δ sampel 5 mempunyai nilai hitung tan δ suhu 26°C sebesar 0,01402 yang paling tinggi dibanding sampel yang lain. Sedangkan sampel 2, sampel 3, dan sampel 4 cenderung stabil terhadap peningkatan suhu karena air sudah banyak menguap pada proses *boiling*. Penurunan secara drastis pada sampel 1 suhu 40°C sebesar 0,00172 dikarenakan banyak air yang menguap pada suhu 40°C, sedangkan pada suhu 80°C cenderung stabil.

A. Rekapitulasi Hasil Pengujian dan Perhitungan Nilai Tan δ Setelah Purifikasi

Tabel 7 Hasil pengujian dan perhitungan tan δ setelah purifikasi

Sampel	Hasil Pengujian			Hasil Perhitungan		
	26°C	40°C	80°C	26°C	40°C	80°C
Sampel 1	0.00834	0.00182	0.00145	0.00830	0.00172	0.00141
Sampel 2	0.00581	0.00539	0.00455	0.00574	0.00530	0.00451
Sampel 3	0.00137	0.00134	0.00126	0.00135	0.00131	0.00123
Sampel 4	0.00238	0.00134	0.00128	0.00231	0.00131	0.00122
Sampel 5	0.01409	0.01273	0.00973	0.01402	0.01258	0.00971

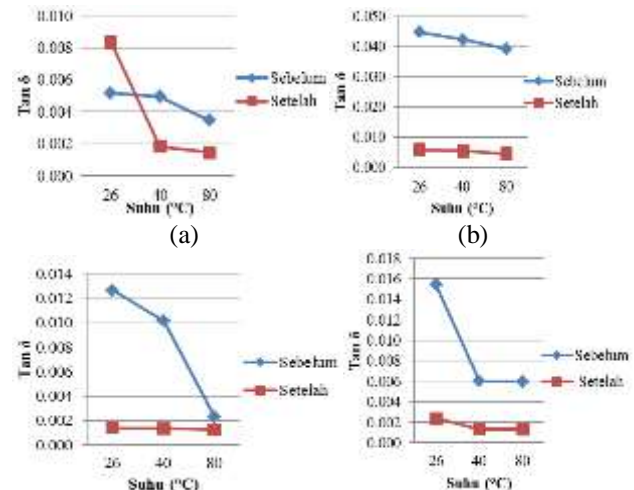
Berdasarkan Tabel 7 yang merupakan perbandingan nilai tan δ pengujian dan perhitungan pada suhu 26°C, 40°C dan 80°C terlihat bahwa terdapat perbedaan kecil yaitu sebesar 0,00002 - 0,0002. Sampel 1 sampai sampel 5 memiliki karakteristik yang sama yaitu nilai perhitungan lebih kecil daripada hasil pengujian.

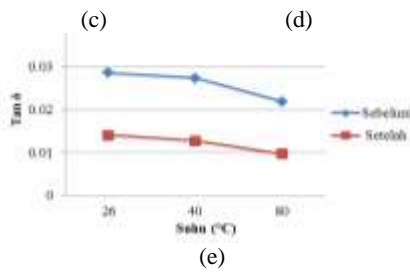
3.1.2 Rekapitulasi Pengujian Faktor Rugi-rugi Dielektrik (Tan δ) Sebelum dan Setelah Dipurifikasi Bentonit Aktif

Tabel 8 Data perbandingan hasil pengujian tan δ sebelum dan setelah purifikasi

Sampel	Sebelum Purifikasi			Setelah Purifikasi		
	26°C	40°C	80°C	26°C	40°C	80°C
Sampel 1	0.00518	0.00495	0.00347	0.00834	0.00182	0.00145
Sampel 2	0.0448	0.04241	0.03924	0.00581	0.00539	0.00455
Sampel 3	0.01266	0.01016	0.00228	0.00137	0.00134	0.00126
Sampel 4	0.01544	0.00601	0.00597	0.00238	0.00134	0.00128
Sampel 5	0.02862	0.02735	0.02189	0.01409	0.01273	0.00973

Berdasarkan pada Tabel 8 dapat dibuat grafik sebagai berikut.





Gambar 12 Perbandingan nilai $\tan \delta$ sebelum dan setelah purifikasi terhadap variasi suhu pada (a) Sampel 1, (b) Sampel 2, (c) Sampel 3, (d) Sampel 4 dan (e) Sampel 5

Berdasarkan Gambar 12a, 12b, 12c, 12d dan 12e terlihat bahwa hasil perbandingan nilai $\tan \delta$ minyak isolasi bekas mengalami penurunan setelah dilakukan purifikasi. Namun pada sampel 1 dengan kondisi suhu 26°C mengalami kenaikan sebelum purifikasi sebesar 0,00518 tetapi setelah dipurifikasi sebesar 0,00834, hal tersebut karena faktor adanya kandungan air yang terdapat pada gelas sampel 1.

Penurunan tertinggi terdapat pada sampel 4 pada suhu 26°C dengan nilai $\tan \delta$ sebelum purifikasi sebesar 0,01544 dan setelah purifikasi mengalami penurunan sebesar 0,00238. Hal tersebut karena faktor kontaminan yang terdapat dalam minyak isolasi bekas berkurang setelah dilakukan purifikasi. Bentonit aktif mampu menurunkan nilai $\tan \delta$ dan menyerap kandungan air, debu, asam dan karbon, karena semakin kecil nilai $\tan \delta$, maka nilai kontaminan dan kandungan airnya semakin rendah. Dengan demikian kelima sampel dari segi karakteristik faktor rugi-rugi dielektriknya layak digunakan kembali karena telah memenuhi standar IEC 60422.

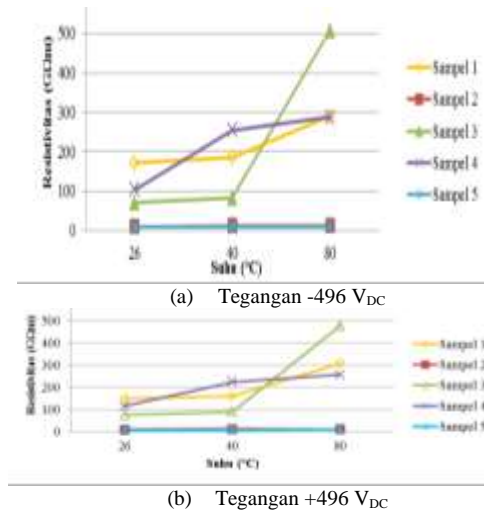
3.2 Pengujian Resistivitas

3.2.1 Pengujian Resistivitas Sebelum Purifikasi

Tabel 9 Hasil pengujian resistivitas sebelum purifikasi

Sampel	Tegangan (V_{DC})	Resistivitas ($G\Omega m$)		
		26°C	40°C	80°C
Sampel 1	-496	171	186	290.7
	+496	149.4	159.2	308.6
Sampel 2	-496	10.4	12.3	12.7
	+496	10.3	11.9	11.2
Sampel 3	-496	71.4	82.2	506.7
	+496	75.3	90.7	478.1
Sampel 4	-496	104.5	254.8	287.9
	+496	114.8	224	257.8
Sampel 5	-496	8.8	8.9	9.8
	+496	8.8	8.8	10.2

Berdasarkan Tabel 9 dilakukan analisis resistivitas terhadap kenaikan suhu seperti grafik pada Gambar 13(a) dan 13(b) sebagai berikut.



Gambar 13 Grafik hasil pengujian resistivitas sebelum purifikasi terhadap variasi suhu dengan tegangan (a) -496 V_{DC} dan (b) +496 V_{DC}

Dari Gambar 13(a) dan 13(b), dapat dilihat bahwa sampel 1, sampel 3, dan sampel 4 pada suhu 26°C, 40°C dan 80°C sudah sesuai dengan standar IEC 60422 sedangkan sampel 2 dan sampel 5 tidak memenuhi standar. Pada tegangan -496V, sampel 2 pada suhu 80°C sebesar 12,7 $G\Omega m$ dan sampel 5 sebesar 9,8 $G\Omega m$ merupakan resistivitas terendah dan stabil terhadap peningkatan suhu karena kualitas minyak isolasinya sudah buruk. Kenaikan resistivitas tertinggi terdapat pada sampel 3 suhu 80°C sebesar 506,7 $G\Omega m$ dan sampel 4 suhu 40°C sebesar 254,8 $G\Omega m$ karena kualitas minyak isolasi masih bagus. Kenaikan resistivitas tidak terlalu tinggi terhadap kenaikan suhu pada sampel 1 suhu 26°C sebesar 171 $G\Omega m$ dan sampel 3 sebesar 71,4 $G\Omega m$ karena kandungan air tidak banyak menguap. Menurut IEC 60422, setiap kenaikan suhu akan menyebabkan penurunan pada nilai resistivitas dan menaikkan nilai konduktivitas dikarenakan dalam minyak yang panas, molekul-molekul bergerak lebih cepat [7]. Pergerakan molekul akan menyebabkan kerusakan dielektrik sehingga dielektrik akan bersifat konduktif. Hasil penelitian tidak sesuai dengan standar, dikarenakan peningkatan suhu hanya bertujuan untuk menghilangkan kandungan air dalam minyak. Baur DTL mempunyai sensor suhu yang bekerja, jika suhu ketika dimasukkan sudah mencapai 80°C, maka waktu yang dibutuhkan untuk menaikkan sampai 90°C akan lebih singkat [8]. Semua sampel yang dinaikkan suhunya akan dipanaskan menjadi 90°C, hal ini sesuai dengan metode IEC 60247.

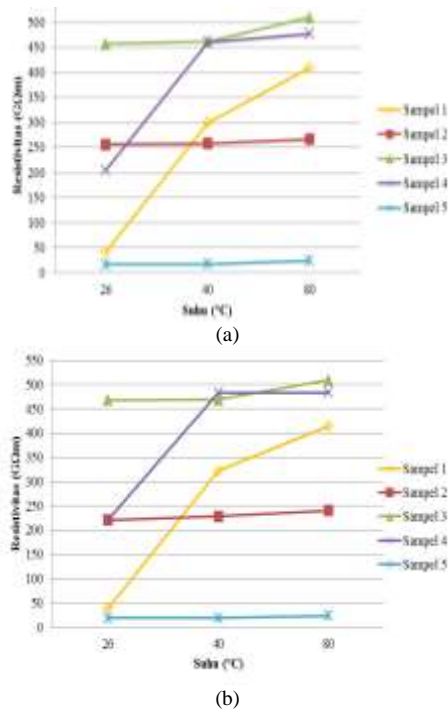
3.2.2 Pengujian Resistivitas Setelah Purifikasi dengan Bentonit Aktif

Berikut merupakan data hasil pengujian resistivitas setelah purifikasi dengan bentonit aktif.

Tabel 10 Hasil pengujian resistivitas setelah purifikasi

Sampel	Tegangan (V _{DC})	Resistivitas (GΩm)		
		26°C	40°C	80°C
Sampel 1	-496	41.4	299.2	408.8
	+496	37.4	321.9	414
Sampel 2	-496	255.7	258	266.5
	+496	220.4	228.1	240
Sampel 3	-496	456.4	460.9	509.4
	+496	467.8	468.5	509.5
Sampel 4	-496	204.6	460.3	476.5
	+496	220.7	462.5	483.2
Sampel 5	-496	16.5	16.9	23.6
	+496	18.4	18.8	23.8

Berdasarkan Tabel 10, perbedaan nilai -RHO dan +RHO kelima sampel masih di bawah batas 35%, karena jika diatas 35% maka mengindikasikan bahwa sel uji tidak bersih. Setelah mengetahui selisih perbedaan antara tegangan DC -RHO dan +RHO, kemudian dilakukan analisis resistivitas terhadap kenaikan suhu seperti grafik yang dibuat pada Gambar 14(a) dan 14(b).



Gambar 14 Grafik hasil pengujian resistivitas terhadap variasi suhu dengan tegangan (a) -496 V_{DC} dan (b) +496 V_{DC}

Berdasarkan Gambar 14(a) dan 14(b), terlihat bahwa hasil pengujian resistivitas pada sampel 1, sampel 2, sampel 3, dan sampel 4 minyak isolasi yang telah dibebani cenderung mengalami kenaikan setelah dilakukan purifikasi. Jika dilihat dari tegangan -496 V, kenaikan

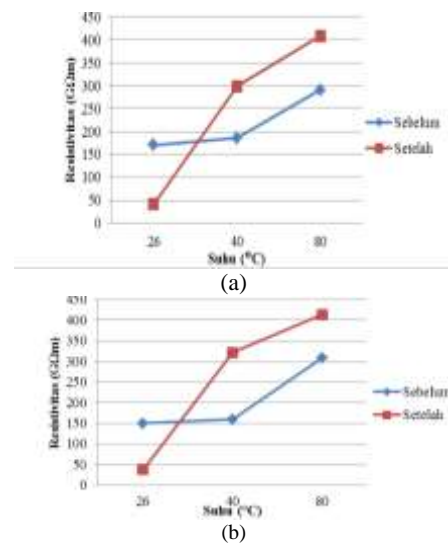
resistivitas tertinggi terdapat pada sampel 1 suhu 40°C sebesar 299,2 GΩm dan sampel 4 sebesar 460,3 GΩm. Namun pada sampel 1 suhu 26°C sebesar 41,4 GΩm tidak sesuai dengan standar karena pada saat pengujian gelas untuk menampung sampel 1 mengandung air.

3.2.3 Rekapitulasi Pengujian Resistivitas Sebelum dan Setelah di Purifikasi Bentonit Aktif

Tabel 11 Rekapitulasi hasil pengujian tan δ sebelum dan setelah purifikasi

Sampel	V _{DC}	Sebelum Purifikasi			Setelah Purifikasi		
		26°C	40°C	80°C	26°C	40°C	80°C
Sampel 1	-496	171	186	290.7	41.4	299.2	408.8
	+496	149.4	159.2	308.6	37.4	321.9	414
Sampel 2	-496	10.4	12.3	12.7	255.7	258	266.5
	+496	10.3	11.1	11.2	220.4	228.1	240
Sampel 3	-496	71.4	82.2	506.7	456.4	457.9	509.4
	+496	75.3	90.7	478.1	467.8	468.5	509.5
Sampel 4	-496	104.5	254.8	287.9	204.6	460.3	476.5
	+496	114.8	224	257.8	220.7	462.5	483.2
Sampel 5	-496	8.8	8.9	9.8	16.5	16.9	23.6
	+496	8.8	8.8	10.2	18.4	18.8	23.8

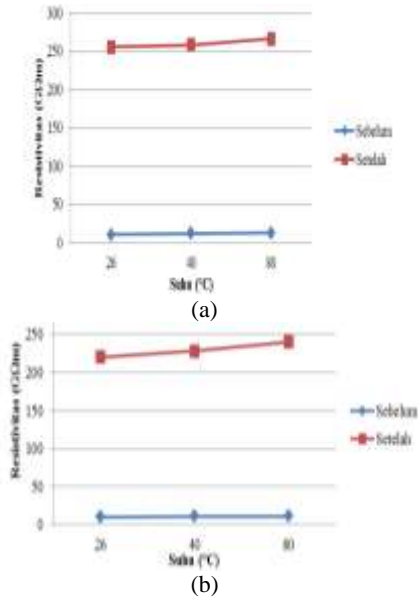
Berdasarkan pada Tabel 11 dapat dibuat grafik sebagai berikut.



Gambar 15 Perbandingan nilai resistivitas sebelum dan setelah purifikasi terhadap variasi suhu pada sampel 1 (a) Tegangan -496 V_{DC}, dan (b) Tegangan +496 V_{DC}

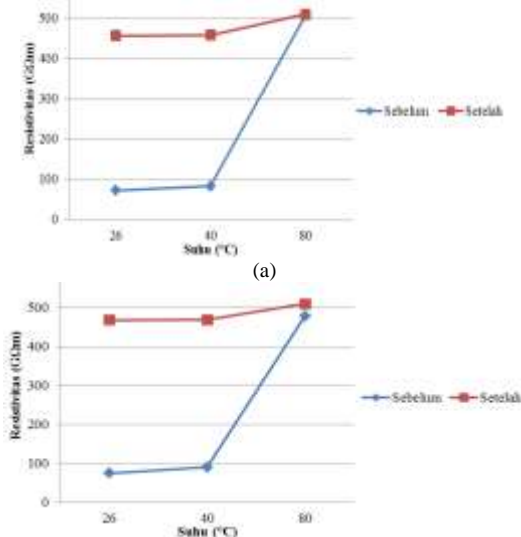
Pada Gambar 15(a) dan 15(b), terlihat bahwa hasil perbandingan resistivitas cenderung mengalami kenaikan setelah dilakukan purifikasi. Namun pada sampel 1 suhu 26°C mengalami penurunan dengan resistivitas sebelum purifikasi 171 GΩm tetapi setelah purifikasi sebesar 41,4 GΩm, hal tersebut disebabkan karena wadah untuk

menampung sampel 1 mengandung air. Nilai resistivitas setelah dipurifikasi menjadi lebih tinggi dibanding sebelum dipurifikasi. Hal tersebut karena faktor kontaminan yang terdapat dalam minyak isolasi bekas berkurang setelah dilakukan purifikasi. Bentonit aktif mampu meningkatkan nilai resistivitas dan menyerap kandungan air, debu, asam dan karbon.



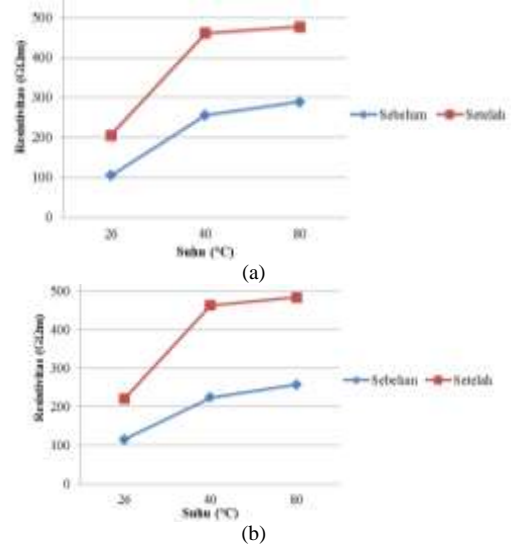
Gambar 16 Perbandingan nilai resistivitas sebelum dan setelah purifikasi terhadap variasi suhu pada sampel 2 (a) Tegangan -496 V_{DC}, dan (b) Tegangan +496 V_{DC}

Pada Gambar 16(a) dan 16(b), terlihat bahwa resistivitas sampel 2 setelah purifikasi cenderung lebih besar dibandingkan dengan yang sebelum dipurifikasi. Hal ini membuktikan bahwa bentonit aktif mampu menaikkan nilai resistivitas pada minyak isolasi, sehingga yang sebelumnya sampel 2 tidak layak digunakan, maka dengan ditambahkan bentonit aktif, sampel 2 menjadi layak digunakan berdasarkan nilai resistivitasnya karena telah memenuhi standar.



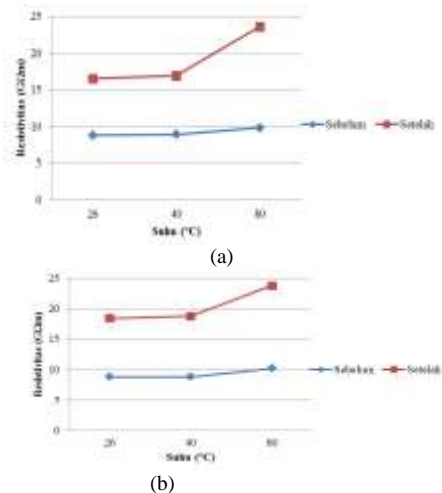
Gambar 17 Perbandingan nilai resistivitas sebelum dan setelah purifikasi terhadap variasi suhu pada sampel 3 (a) Tegangan -496 V_{DC}, dan (b) Tegangan +496 V_{DC}

Gambar 17(a) dan 17(b), menunjukkan bahwa nilai resistivitas sampel 3 meningkat setelah di purifikasi. Sampel 3 suhu 80°C sebelum purifikasi sebesar 506,7 GΩm dan setelah purifikasi sebesar 509,4 GΩm mengalami kenaikan yang kecil, hal ini dikarenakan bentonit aktif sudah hampir menyerap seluruh kandungan air dan partikel debu dari minyak isolasi.



Gambar 18 Perbandingan nilai resistivitas sebelum dan setelah purifikasi terhadap variasi suhu pada sampel 4 (a) Tegangan -496 V_{DC}, dan (b) Tegangan +496 V_{DC}

Gambar 18(a) dan 18(b), menunjukkan bahwa nilai resistivitas minyak isolasi sampel 4 meningkat setelah di purifikasi, hal ini dikarenakan bentonit aktif mampu menyerap kandungan air serta partikel debu atau padatan dari minyak isolasi. Kenaikan tertinggi terdapat pada suhu 40°C dan 80°C karena air banyak yang menguap. Dengan demikian sampel 4 masih layak digunakan karena memenuhi standar IEC 60422.



Gambar 19 Perbandingan nilai resistivitas sebelum dan setelah purifikasi terhadap variasi suhu pada sampel 5 (a) Tegangan $-496 V_{DC}$, dan (b) Tegangan $+496 V_{DC}$

Gambar 19(a) dan 19(b), menunjukkan bahwa nilai resistivitas sampel 5 meningkat setelah di purifikasi. Namun nilai resistivitasnya masih dibawah nilai standar $60G\Omega m$, sehingga sampel 5 belum layak digunakan dan tidak bisa diperbaiki karena minyak mengandung banyak kontaminan dan sudah mengalami penuaan.

3.3 Pengujian dan Analisis Warna

Tabel 12 Hasil pengujian warna minyak isolasi transformator sebelum dan setelah purifikasi

Sampel	Skala Warna	
	Sebelum Purifikasi	Setelah Purifikasi
Sampel 1	L0.5	L0.5
Sampel 2	L1.5	L0.5
Sampel 3	0.5	L0.5
Sampel 4	L0.5	L0.5
Sampel 5	D1.5	L1.5

Berikut merupakan gambar pada saat pengujian warna menggunakan *color comparator*.



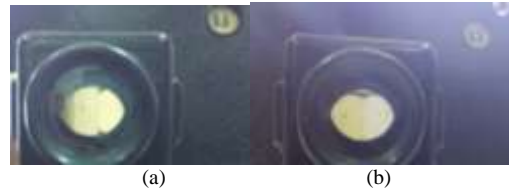
Gambar 20 Skala warna minyak isolasi transformator pada sampel 1 (a) sebelum purifikasi, dan (b) setelah purifikasi

Dari Gambar 20(a) dan 20(b), sampel 1 sebelum dan setelah dipurifikasi mempunyai skala di bawah 0.5. Ini mengindikasikan bahwa minyak isolasi transformator bekas sedikit mengandung kontaminan dan sudah sesuai dengan IEC 60422.



Gambar 21 Skala warna minyak isolasi transformator pada sampel 2 (a) sebelum purifikasi, dan (b) setelah purifikasi

Dari Gambar 21(a) dan 21(b), dapat dilihat bahwa setelah dipurifikasi, setengah lingkaran yang terdapat pada sebelah kanan lebih muda dibandingkan dengan *color disk* sebelah kiri sehingga dapat ditulis L1.5 ASTM *color*. Sehingga membuktikan bahwa bentonit aktif mampu memucatkan (*bleaching*) warna dan menyerap kontaminan.



Gambar 22 Skala warna minyak isolasi transformator pada sampel 3 (a) sebelum purifikasi, dan (b) setelah purifikasi

Dari Gambar 22(a) dan 22(b), dilihat bahwa sampel 3 setelah dipurifikasi sudah sesuai dengan standar IEC 60422. Karena skala dibawah 0.5.



Gambar 23 Skala warna minyak isolasi transformator pada sampel 4 (a) sebelum purifikasi, dan (b) setelah purifikasi

Dari Gambar 23(a) dan 23(b), dilihat bahwa sampel 4 setelah dipurifikasi sudah sesuai dengan standar IEC 60422 karena skala warna masih dibawah 0.5.



Gambar 24 Skala warna minyak isolasi transformator pada sampel 4 (a) sebelum purifikasi, dan (b) setelah purifikasi

Berdasarkan Gambar 24(a) dan 24(b), dilihat bahwa sebelum dipurifikasi sampel 5 mempunyai warna kuning tua sedangkan setelah purifikasi, warna minyak sampel 5 menjadi kuning sehingga sudah sesuai dengan standar IEC 60422.



Gambar 25 Warna sampel minyak isolasi transformator sebelum purifikasi



Gambar 26 Warna sampel minyak isolasi transformator setelah purifikasi

Pada Gambar 25 dan Gambar 26, terlihat bahwa warna sampel 1, sampel 2, sampel 3 dan sampel 4 berubah menjadi lebih cerah setelah proses purifikasi. Sedangkan sampel 5 mengalami sedikit perubahan warna,

dikarenakan sampel 5 merupakan sampel minyak yang dengan daya yang besar dan umur trafo mencapai 10 tahun, semakin besar pembebanan dan tua umurnya maka semakin buruk kualitas isolasinya^[10].

4.Kesimpulan

Nilai $\tan \delta$ sebelum dan setelah dilakukan purifikasi pada sampel 1 menurun dari 0,00518 menjadi 0,00145, sampel 2 menurun dari 0,0448 menjadi 0,00455, sampel 3 menurun dari 0,01266 menjadi 0,00126, sampel 4 menurun dari 0,01544 menjadi 0,00128 dan sampel 5 menurun dari 0,02862 menjadi 0,00973. Nilai resistivitas pada sampel 1 suhu 80°C mengalami peningkatan yaitu dari 171 GΩm menjadi 414 GΩm. Sampel 2 dari 10,3 GΩm menjadi 266,5 GΩm. Sampel 3 dari 71,4 GΩm menjadi 509,5 GΩm. Sampel 4 dari 104,5 GΩm menjadi 483,2 GΩm. Sedangkan nilai resistivitas sampel 5 dari 8,8 GΩm menjadi 23,8 GΩm. Warna pada sampel 1, sampel 2, sampel 3, dan sampel 4 berubah menjadi kuning cerah setelah dilakukan purifikasi. Sedangkan warna sampel 5 sedikit mengalami perubahan warna dari coklat menjadi kuning tua. Berdasarkan standar IEC 60422, dengan melihat nilai $\tan \delta$ maksimal sebesar 0.015, nilai resistivitas minimal sebesar 60 GΩm, dan skala warna maksimal 2.0. maka minyak isolasi transformator yang telah mengalami pembebanan berdasarkan prioritas terbaiknya yaitu pada sampel 3, sampel 4, sampel 1 dan sampel 2 masih layak digunakan. Sedangkan sampel 5 sudah tidak layak digunakan karena nilai resistivitasnya hanya sebesar 19,6 GΩm.

Referensi

- [1]. Panjaitan, Rumintang. 2010. *Kajian Penggunaan Bentonit dalam industri*. Majalah Berita Litbang Industri Volume XLV, No.3 November 2010
- [2]. Loai Nasrat, Mohamed Abdelwahab, Gamal Ismail. 2011. "Improvement of Used Transformer Oils with Activated Bentonite" published by *Engineering*, Vol.3 No.6
- [3]. Mohammad R. Meshkatoddini. *Aging Studi and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil*. American J. Of Engineering and Applied Sciences 1 (4): 384-388, 2008
- [4]. T. Toudja, A.Nacer. 2012. *Physico-chemical properties of Transformer Mineral Oils Submitted to Moisture and Electrical Discharge*. University of Sciences and Technology Houari Boumediene
- [5]. *Measurement of Relative Permittivity, Dielectric Dissipation Factor (Tan δ) and DC Resistivity, IEC 60247*, Third Edition 2004-02
- [6]. *Standard Test Method for ASTM Color of Petroleum Products (ASTM Color Scale)*, ASTM D1500-03
- [7]. *Final Draft International Standard Mineral Insulating Oils in Electrical Equipment – Supervision and Maintenance guidance*, IEC 60422, Edition 4.0 2012-10
- [8]. *Fully Automatic Dissipation Factor and Resistivity Measuring System DTL*, BAUR Pruef- und Messtechnik GmbH, Raiffeisenstrasse, Austria, 2000
- [9]. Tadjuddin. *Minyak Transformator*. Majalah ELEKTRO. Edisi ke Dua Belas, Maret 1998. [Online].Tersedia: <http://www.elektroindonesia.com/elektro/energi12.html>. Diakses: April, 2, 2015
- [10]. Iryanto, Irwan. 2011."Studi Pengaruh Penuaan (Aging) terhadap laju degradasi kualitas minyak isolasi transformator tenaga". UNDIP : Semarang
- [11]. Tobing, Bonggas L, *Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003
- [12]. A. Arismunandar "Teknik Tegangan Tinggi Suplemen" Ghalia Indonesia