



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS PENGARUH KENAIKAN TEMPERATUR DAN
UMUR MINYAK TRANSFORMATOR TERHADAP DEGRADASI
TEGANGAN TEMBUS MINYAK TRANSFORMATOR**

SKRIPSI

JONATHAN FRITZ SIMAMORA

07 06 26 7811

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

DEPOK

JUNI 2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS PENGARUH KENAIKAN TEMPERATUR DAN
UMUR MINYAK TRANSFORMATOR TERHADAP DEGRADASI
TEGANGAN TEMBUS MINYAK TRANSFORMATOR**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

JONATHAN FRITZ SIMAMORA

07 06 26 7811

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

DEPOK

JUNI 2011

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Jonathan Fritz Simamora

NPM : 0706267811

Tanda Tangan :

Tanggal : 13 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Jonathan Fritz Simamora
NPM : 0706267811
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Kenaikan Temperatur dan Umur Minyak Transformator Terhadap Degradasi Tegangan Tembus Minyak Transformator

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa M K, MT. ()
Penguji : Dr.-Ing. Eko Adhi Setiawan, ST, MT. ()
Penguji : Aji Nur Widyanto ST.MT. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 22 Juni 2011

UCAPAN TERIMA KASIH

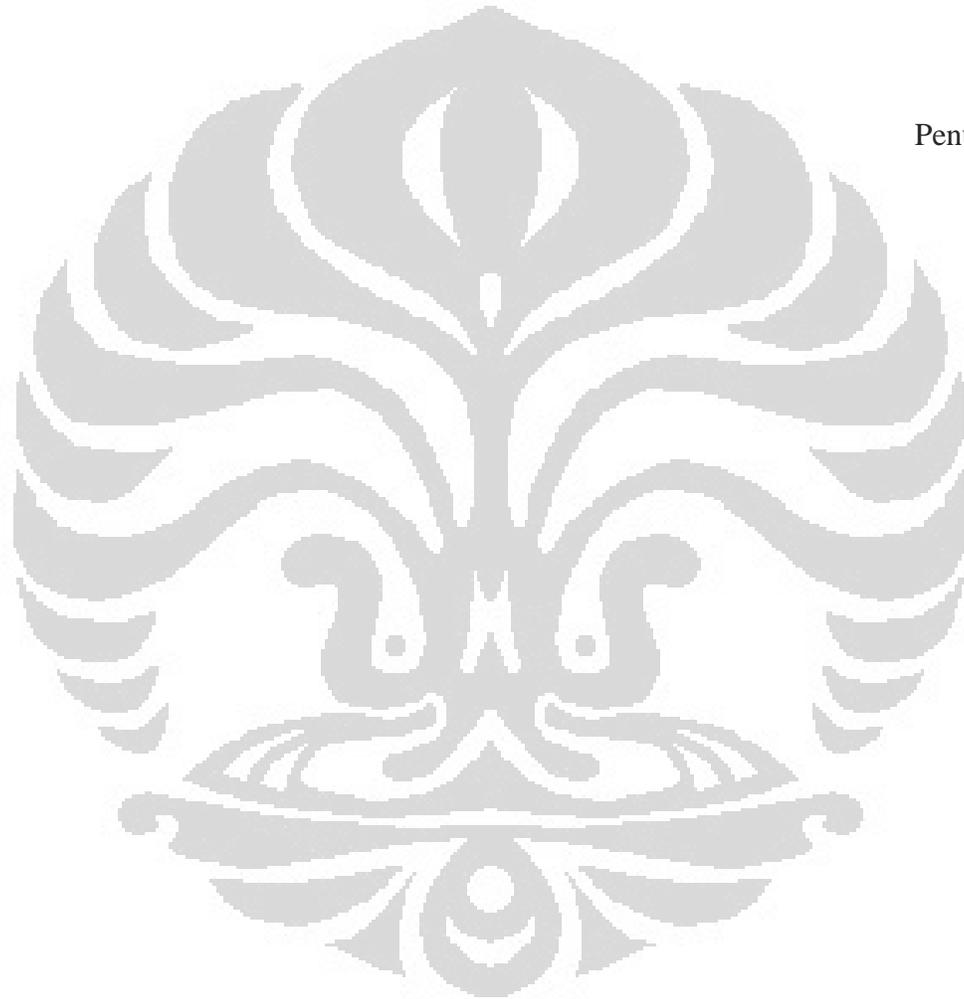
Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkah dan rahmatNya, penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul “ANALISIS PENGARUH KENAIKAN TEMPERATUR DAN UMUR MINYAK TRANSFORMATOR TERHADAP DEGRADASI TEGANGAN TEMBUS MINYAK TRANSFORMATOR” ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak dari masa perkuliahan hingga saat penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa M K, MT, selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan masukan bagi terselesaikannya skripsi ini.
2. Bapak Aji Nur Widyanto dan Faiz Husnayain yang telah memberikan banyak masukan dan informasi yang bermanfaat bagi penyelesaian Skripsi ini
3. Orang tua dan keluarga penulis yang selalu memberi dukungan moril dan materiil dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Teman-teman sesama bimbingan (Andigan, Aulia, Daniel Wijaya, Gagah, dan Saut Daniel) yang telah banyak bertukar pikiran dan memberi masukan bagi kemajuan skripsi ini.
5. Bapak Sudarman dan Mas Doni serta pihak lain yang telah membantu penulis mempersiapkan peralatan dan pengambilan data di laboratorium.
6. Semua pihak yang telah banyak membantu dan memberi dukungan terhadap penulisan skripsi ini, khususnya teman-teman Elektro 2007.

Penulis juga meminta maaf atas segala kekurangan yang ada pada skripsi ini dan menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu penulis berharap adanya kritik dan saran dari pembaca demi kesempurnaan laporan ini dan semoga dapat bermanfaat bagi semuanya.

Depok, Juni 2011

Penulis



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Jonathan Fritz Simamora

NPM : 0706267811

Program Studi : Teknik Elektro

Departemen : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif (Non-Exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

ANALISIS PENGARUH KENAIKAN TEMPERATUR DAN UMUR MINYAK TRANSFORMATOR TERHADAP DEGRADASI TEGANGAN TEMBUS MINYAK TRANSFORMATOR

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan seminar saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 13 Juni 2011

Yang menyatakan,

(Jonathan Fritz Simamora)

ABSTRAK

Nama : Jonathan Fritz Simamora

Program Studi : Teknik Elektro

Judul : ANALISIS PENGARUH KENAIKAN TEMPERATUR DAN UMUR MINYAK TRANSFORMATOR TERHADAP DEGRADASI TEGANGAN TEMBUS MINYAK TRANSFORMATOR

Tegangan tembus merupakan suatu indikator penting dalam menentukan baik buruknya kualitas isolasi dari suatu isolator, termasuk dalam isolasi cair. Tegangan tembus dari isolasi cair berbeda-beda untuk setiap jenis minyak yang berbeda pula. Ada beberapa hal yang berpengaruh terhadap penurunan nilai tegangan tembus dan kualitas isolasi dari isolator cair ini, dan beberapa diantaranya merupakan kenaikan temperatur dan umur minyak transformator tersebut. Kenaikan temperatur minyak terjadi akibat transformator tersebut dipakai dalam kondisi beban yang tinggi secara terus menerus. Umur minyak transformator sendiri dihitung berdasarkan lamanya minyak tersebut dipakai di dalam transformator tersebut. Pengujian pengaruh kenaikan temperatur dan umur minyak terhadap tegangan tembus perlu dilakukan untuk mengetahui degradasi dari tegangan tembus minyak transformator tersebut sebagai salah satu indikator baik buruknya isolasi cair suatu transformator daya.

Kata Kunci : isolasi cair, kenaikan temperatur, umur minyak, tegangan tembus

ABSTRACT

Name : Jonathan Fritz Simamora

Major : Electrical Engineering

Title : ANALYSIS OF THE EFFECT OF TEMPERATURE RISE
AND AGE OF TRANSFORMER OIL TO DEGRADATION OF
TRANSFORMER OIL BREAKDOWN VOLTAGE

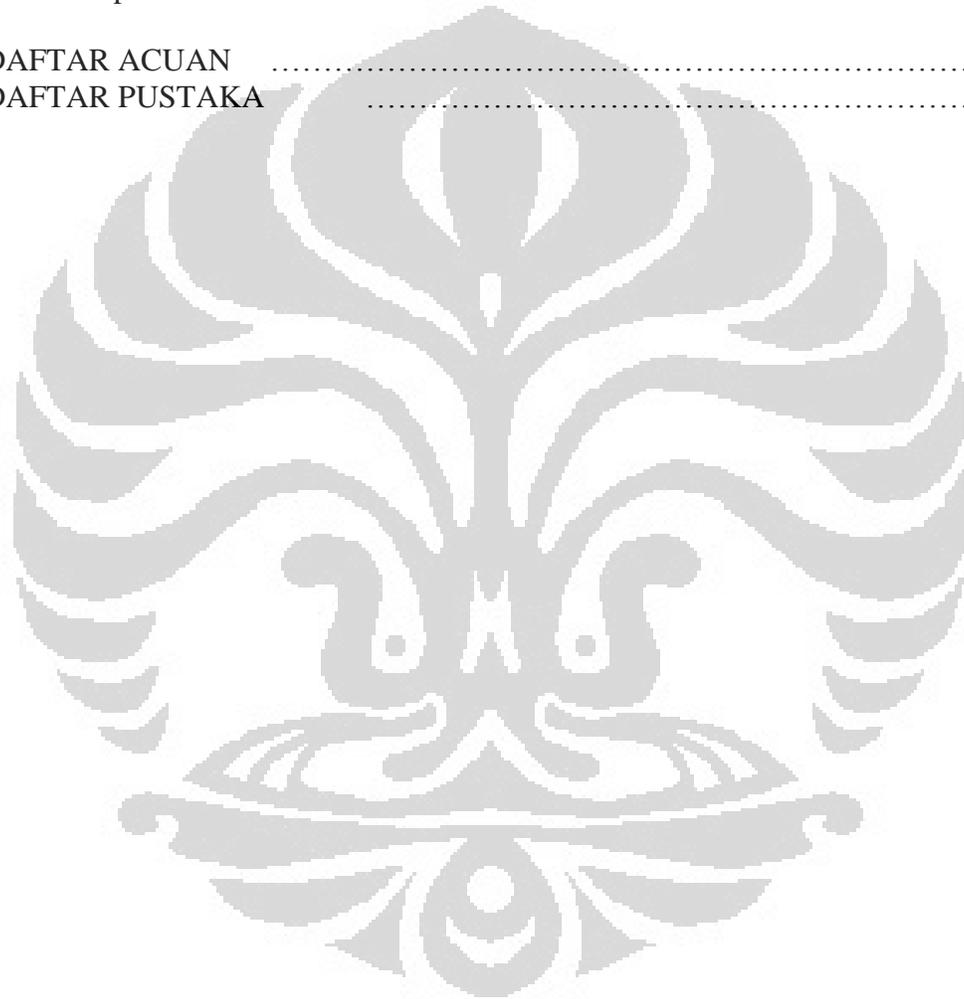
Breakdown voltage is an important indicator in determining whether the quality of the isolation of an insulator is good or bad, including liquid insulation. Breakdown voltage of liquid insulation is different for each different type of oil. There are several things that influences the decline in value of breakdown voltage and insulation qualities of this liquid insulator and some of which are the temperature rise and age of the transformer oil. The rising temperatures of the transformer oil is happened because the transformer was used in high load conditions continuously.. The age of transformer oil is calculated based on the length of the oil itself is used in the transformer. Testing the effect of temperature rise and the transformer oil's age to breakdown voltage is necessary to know the degradation of transformer oil breakdown voltage as one indicator of the merits of a power transformer liquid insulation.

Keywords: liquid insulation, temperature rise, age of transformer oil, breakdown voltage.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Maksud dan Tujuan	2
1.3 Pembatasan Masalah	3
1.4 Metode Penulisan	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 Isolasi Cair Transformator	
2.1 Transformator Daya	5
2.1.1 Pengertian umum	5
2.1.2 Rating dan Klasifikasi Transformator Daya	6
2.1.3 Konstruksi Bagian-bagian Transformator Daya	7
2.2 Bahan Isolasi Cair	16
2.2.1 Sifat Isolator Cair	16
2.2.2 Minyak Transformator	19
2.2.3 Kegagalan Pada Minyak Transformator	22
2.2.4 Mekanisme Ketembusan Minyak Transformator	26
BAB 3 Metodologi Pengujian	
3.1 Identifikasi Masalah dan Hipotesa Awal	28
3.2 Metode Pengujian yang dilakukan	29
3.3 Peralatan dan Prosedur Pengujian	30
3.3.1 Peralatan Pengujian	31
3.3.2 Prosedur Pengujian	32
BAB 4 Hasil Pengujian dan Analisis	
4.1 Hasil Pengujian	33
4.1.1 Hasil Pengujian pada Minyak Diala baru	35
4.1.2 Hasil Pengujian pada Minyak Diala berumur 1 tahun	38
4.1.3 Hasil Pengujian pada Minyak Diala berumur 2 tahun	41

4.1.4 Hasil Pengujian pada Minyak Diala berumur 5 tahun	44
4.2 Analisis Hasil Pengujian	47
4.2.1 Analisis Pengaruh Temperatur Hotspot	47
4.2.2 Analisis Pengaruh Umur Minyak Transformator	48
4.2.3 Analisis Pengaruh Temperatur Hotspot dan Umur Minyak Transformator terhadap Degradasi Tegangan Tembus Minyak Transformator.....	51
BAB 5 Kesimpulan	
5.1 Kesimpulan	56
DAFTAR ACUAN	58
DAFTAR PUSTAKA	59



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Transformator Daya	6
Gambar 2.2. Pengaruh Medan terhadap gelembung udara	24
Gambar 2.3. Medan listrik bentuk sferoida.....	25
Gambar 2.4. Kegagalan butiran padat.....	26
Gambar 3.1. Diagram alir tahapan penelitian	29
Gambar 3.2. Rangkaian pengujian minyak transformator	32
Gambar 4.1 Rangkaian pengujian di laboratorium tegangan tinggi.....	34
Gambar 4.2. Rangkaian pengujian dihubungkan ke bejana uji	34
Gambar 4.3. OT 275 untuk mengecek rangkaian	35
Gambar 4.4. DMI 551 untuk mengatur tegangan	35
Gambar 4.5. Bejana Pengujian berisi Minyak Diala Baru	37
Gambar 4.6. Grafik V_{bd} minyak baru vs Temperatur.....	38
Gambar 4.7. Bejana Pengujian berisi Minyak Diala Berumur 1 tahun.....	40
Gambar 4.8. Grafik V_{bd} minyak berumur 1 tahun vs Temperatur.	41
Gambar 4.9. Bejana Pengujian berisi Minyak Diala Berumur 2 tahun	43
Gambar 4.10. Grafik V_{bd} minyak berumur 2 tahun vs Temperatur	44
Gambar 4.11. Bejana Pengujian berisi Minyak Diala Berumur 5 tahun.....	46
Gambar 4.12. Grafik V_{bd} minyak berumur 5 tahun vs Temperatur	47
Gambar 4.13 Grafik Temperatur vs Viskositas minyak transformator	48
Gambar 4.14. Tegangan tembus minyak vs umur minyak pada temperatur 80°C.....	49
Gambar 4.15. Tegangan tembus minyak vs umur minyak pada temperatur 100°C.....	49
Gambar 4.16. Tegangan tembus minyak vs umur minyak pada temperatur 120°C.....	50
Gambar 4.17. Tegangan tembus minyak vs umur minyak pada temperatur 80°C, 100°C, dan 120°C	51
Gambar 4.18 Grafik hubungan umur minyak transformator vs resistansi.....	53
Gambar 4.19 Grafik hubungan umur minyak transformator vs viskositas.....	53
Gambar 4.20 Foto a) minyak baru, b) minyak 1 tahun, c) minyak 2 tahun, d) minyak 5 tahun.....	54

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Temperatur yang terdapat pada transformator ..	7
Tabel 2.2. Tipe Pendinginan Transformator	9
Tabel 2.3. Spesifikasi Minyak Isolasi Baru	20
Tabel 2.4. Spesifikasi Minyak Isolasi Pakai	21
Tabel 2.5. Kekuatan Dielektrik dari Minyak untuk Tegangan Operasi	21
Tabel 4.1. Tegangan tembus untuk minyak baru dengan temperatur 80°C, 100°C, dan 120°C	38
Tabel 4.2. Tegangan tembus minyak berumur 1 tahun untuk temperatur 80°C, 100°C, dan 120°C	41
Tabel 4.3. Tegangan tembus minyak berumur 2 tahun untuk temperatur 80°C, 100°C, dan 120°C	44
Tabel 4.4. Tegangan tembus minyak berumur 5 tahun untuk temperatur 80°C, 100°C, dan 120°C	46
Tabel 4.5. Tegangan tembus minyak yang umurnya berbeda terhadap variasi temperatur hotspot.....	50
Tabel 4.6 Oil Quality Index (OQIN) / Myers Index Number (MIN)	54

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di dalam suatu Sistem Tenaga Listrik, aliran daya dari suatu Pembangkit Tenaga Listrik menuju suatu saluran transmisi tegangan tinggi dan pada akhirnya didistribusikan menuju para konsumen, suatu divais atau peralatan yang memegang peranan yang sangat penting dalam kelancaran sistem tersebut adalah Transformator. Transformator berfungsi untuk meningkatkan tegangan yang dihasilkan oleh pembangkit dan mengalirkannya melalui saluran transmisi dan nantinya tegangan ini akan diturunkan untuk selanjutnya didistribusikan ke pelanggan yang ada. Sebagai penghubung antara pembangkit dan saluran transmisi digunakan Transformator Pembangkit, dan penghubung antara saluran transmisi dengan konsumen, digunakan Transformator Distribusi. Sistem transmisi dan distribusi seperti ini sangat bergantung pada kemampuan dan efektifitas dari transformator itu sendiri. Kemampuan yang tidak optimal dari suatu transformator, akan menyebabkan aliran daya yang dikirimkan menuju beban juga akan semakin berkurang dan pada akhirnya tidak sesuai dengan permintaan beban.

Beberapa waktu yang lalu, terjadi kasus yang menyebabkan beberapa *Interbus Transformer* (IBT) atau Transformator Daya yang ada di Gardu Induk di daerah Jawa Barat meledak. Setelah diselidiki oleh para ahli, penyebab utama yang mengakibatkan transformator ini meledak adalah akibat dari pembebanan yang sangat besar pada transformator yang mengakibatkan *Interbus Transformer* (IBT) atau Transformator Daya bekerja pada titik tertingginya selama beberapa waktu secara terus menerus. Hal ini tentu saja berakibat buruk pada kondisi dan karakteristik dari transformator dan isolasinya sendiri. Akibat pemakaian pada kondisi 100% secara terus menerus, maka pada transformator tersebut akan timbul panas pada daerah-daerah/bagian internal dari transformator atau bisa disebut sebagai temperatur hot-

spot yang bila dibiarkan akan menyebabkan degradasi pada isolasi transformator tersebut, terutama isolasi cair yang berupa minyak dan biasa disebut sebagai minyak transformator. Temperatur yang besar dapat menyebabkan transformator menjadi panas dan bisa mengurangi keandalan kerja dari transformator tersebut.

Keberadaan isolasi sangat penting karena selain berfungsi sebagai pemisah antara inti transformator tersebut, isolasi ini berfungsi juga sebagai pendingin transformator sehingga mampu meminimalisir panas yang timbul pada transformator tersebut. Karena minyak transformator tersebut berada dalam keadaan panas selama beberapa waktu, maka minyak tersebut akan mendidih dan menghasilkan uap-uap air pada bagian langit-langit dari transformator ini. Nantinya, uap-uap air yang timbul tadi akan jatuh kedalam minyak transformator dan akan mengendap pada isolasi antar inti dan juga pada bagian inti itu sendiri. Hal ini tentu saja akan menyebabkan tegangan tembus dari minyak transformator akan semakin berkurang karena minyak tersebut sudah tidak murni lagi. Inilah yang menyebabkan beberapa *Interbus Transformer (IBT)* atau Transformator Daya yang dipakai dalam sistem distribusi di daerah Jawa Barat ini meledak. Isolator sudah tidak berfungsi sebagaimana mestinya dan menyebabkan kegagalan pada isolasi yang ada di dalam Transformator itu sendiri.

1.2 Maksud dan Tujuan

Adapun tujuan utama dari Skripsi ini adalah pemenuhan mata kuliah yang menjadi prasyarat di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia untuk mendapat gelar kesarjanaan. Harapan penulis dalam Skripsi kali ini adalah

1. Mempelajari karakteristik Tegangan Tembus minyak transformator yang ada di Transformator Daya.
2. Mengetahui hubungan antara kenaikan temperatur dan umur minyak transformator dan pengaruhnya terhadap Transformator Daya tersebut.

3. Memperluas wawasan penulis tentang Degradasi Tegangan Tembus Minyak Transformator dan hal lainnya yang ikut dibahas dalam Skripsi ini.

1.3 Pembatasan Masalah

Pembahasan dari Skripsi ini hanya sebatas pada Minyak Transformator secara umum dan pengaruh kenaikan temperatur dan umur minyak transformator terhadap degradasi tegangan tembus isolasi cair (minyak transformator) Transformator Daya secara khusus.

1.4 Metode Penulisan

Metode penulisan yang dilakukan dalam skripsi ini adalah

1. Studi literatur, yaitu dengan membaca buku-buku berkaitan dengan isolasi cair (minyak transformator).
2. Membaca jurnal-jurnal dan laporan penelitian tentang pengaruh kenaikan temperatur dan umur minyak transformator terhadap tegangan tembus minyak transformator.
3. Pengumpulan Data dan bahan uji dari PLN
4. Pengujian pada Laboratorium Tegangan Tinggi

1.5 Sistematika Penulisan

Laporan ini dibagi menjadi lima bab, dimana masing-masing bab akan menjelaskan hal-hal berikut ini.

Pada Bab I yang berjudul Pendahuluan akan dijelaskan mengenai latar belakang, tujuan, pembatasan masalah, metodologi penulisan, serta sistematika penulisan.

Pada Bab II yang berjudul Isolasi Cair Transformator ini akan dijelaskan mengenai dasar-dasar teori yang berkaitan tentang isi dari Skripsi ini, yaitu Transformator daya Bahan Isolasi Cair.

Pada Bab III yang berjudul Metodologi Pengujian ini akan dibahas tentang pengaruh temperatur ambien terhadap degradasi isolasi. Disini akan dijelaskan segala hal yang perlu diperhatikan dalam mempersiapkan segala proses pengujian, seperti membuat suatu hipotesa awal terhadap suatu kasus yang hendak diujikan, menyiapkan segala metode-metode yang perlu dipersiapkan dalam melakukan pengujian, membuat prosedur pengujian, menyiapkan alat dan bahan, dan setelah itu semua terlaksana, barulah dapat dilakukan pengujian

Pada Bab IV yang berjudul Hasil Pengujian dan Analisis akan dibahas tentang hasil pengujian dan bagaimana memperoleh data pada saat pengujian. Pada bagian ini data akan ditunjukkan dalam bentuk tabel dan grafik sehingga dapat dilihat perbandingannya. Selain itu, pada bagian ini juga terdapat analisis terhadap data hasil pengujian.

Pada Bab V yang berjudul Kesimpulan ini berisi mengenai kesimpulan yang dapat diambil dari Skripsi ini. Kesimpulan yang diambil biasanya berupa kesimpulan awal terhadap hipotesa yang telah dibuat sebelumnya dengan mempelajari literatur dan data pembanding yang telah ada.

BAB 2

ISOLASI CAIR TRANSFORMATOR

2.1 Transformator Daya

2.1.1 Pengertian umum

Transformator daya adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga/daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya.

Dalam operasi penyaluran tenaga listrik transformator dapat dikatakan sebagai jantung dari transmisi dan distribusi. Dalam kondisi ini suatu transformator diharapkan dapat beroperasi secara maksimal (kalau bisa terus menerus tanpa berhenti). Mengingat kerja keras dari suatu transformator seperti itu maka cara pemeliharaan juga dituntut sebaik mungkin. Oleh karena itu transformator harus dipelihara dengan menggunakan sistem dan peralatan yang benar, baik dan tepat. Untuk itu regu pemeliharaan harus mengetahui bagian-bagian transformator dan bagian-bagian mana yang perlu diawasi melebihi bagian yang lainnya.

Berdasarkan tegangan operasinya dapat dibedakan menjadi transformator 500/150 kV dan 150/70 kV biasa disebut *Interbus Transformator* (IBT). Transformator 150/20 kV dan 70/20 kV disebut juga transformator distribusi. Titik netral transformator ditanahkan sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamanan/proteksi. Sebagai contoh transformator 150/70 kV ditanahkan secara langsung di sisi netral 150 kV dan transformator 70/20 kV ditanahkan dengan tahanan rendah atau tahanan tinggi atau langsung di sisi netral 20 kV nya.

Transformator dapat dibagi menurut fungsi/pemakaian seperti:

1. Transformator Mesin (Pembangkit).
2. Transformator Gardu Induk.
3. Transformator Distribusi

Transformator dapat juga dibagi menurut Kapasitas dan Tegangan seperti:

1. Transformator besar
2. Transformator sedang
3. Transformator kecil^[1]



Gambar 2.1 Transformator Daya

2.1.2 Rating dan Klasifikasi Transformator Daya

Di Amerika, rating transformator dibuat berdasar pada kemampuan transformator menghantarkan daya pada level tegangan tertentu, dan frekuensi di bawah kondisi operasi biasanya tanpa melebihi temperatur internal yang sudah dibatasi. Temperatur di mana isolasi masih diizinkan untuk mencapai kondisi di bawah standar operasi maksimum digunakan untuk menentukan rating output transformator yang disebut dengan rating kVA. Transformator didesain sedemikian rupa dengan batasan nilai temperatur sesuai dengan permintaan beban, rata-rata kenaikan temperatur lilitan, *hotspot* kenaikan temperatur lilitan, dan temperatur cairan / minyak atas (*top*). Untuk memperoleh nilai absolut temperatur dari nilai-nilai di atas, maka kita harus menambahkan nilai temperatur lingkungan (*ambient temperatur*).

Tabel 2.1. Temperatur yang terdapat pada transformator

kenaikan temperatur lilitan rata-rata	65°C*
kenaikan temperatur hotspot	80°C
kenaikan temperatur <i>top oil</i>	65°C

* pengujian biasanya dilakukan di saat kenaikan temperatur 55°C dan rating basnya sudah ditentukan

Umur transformator daya secara normal diharapkan berkisar sekitar 30 tahun ketika beroperasi dengan rating yang sudah ditentukan. Namun dalam beberapa kondisi tertentu, kemungkinan terjadi *overload* dan operasi melebihi rating yang ada, sehingga menyebabkan terjadinya penurunan umur transformator. [2]

Berdasarkan kemampuan dayanya, transformator daya pada umumnya dapat dibagi menjadi tiga bagian besar yaitu:

- Transformator daya kecil : 500 – 7500 kVA
- Transformator daya sedang : 7500 kVA – 100 MVA
- Transformator daya besar : di atas 100 MVA

2.1.3 Konstruksi Bagian-bagian Transformator Daya

a. Bagian Utama

1) Inti Besi

Berfungsi untuk mempermudah jalannya fluks magnetik, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Terbuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang memiliki isolasi, untuk mengurangi panas yang ditimbulkan oleh *Eddy Current* sebagai efek dari rugi-rugi besi

2) Kumparan Transformator

Kumparan transformator merupakan beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut terdiri atas kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi, baik isolasi terhadap inti besi maupun isolasi antar kumparan dengan isolasi padat

seperti karton, pertinak dan lain-lain. Kumparan tersebut berfungsi sebagai alat transformasi tegangan dan arus.

3) Minyak Transformator

Sebagian besar kumparan-kumparan dan inti transformator tenaga direndam dalam minyak transformator, terutama transformator-transformator daya yang memiliki kapasitas besar.

4) Bushing

Bushing merupakan sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator. Bushing biasanya kita lihat dalam bentuk penghubung antara kumparan transformator ke jaringan yang ada di luarnya.

5) Tangki Konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari transformator yang terendam minyak transformator berada (di tempatkan) dalam tangki. Untuk menampung pemuaiian minyak transformator, tangki dilengkapi dengan konservator.

b. Peralatan Bantu

1) Pendingin Transformator

Transformator umumnya diisi minyak sebagai bahan isolasi antara kumparan dengan kumparan dan kumparan dengan kaki.

Transformator tenaga umumnya dilengkapi dengan sistem pendingin, yang dimaksudkan agar transformator dapat bekerja sesuai rating yang tertera pada spesifikasinya. Transformator yang dilengkapi pendingin adalah yang berkapasitas di atas 10 MVA. Tipe pendingin

transformator adalah secara alami dan paksaan, yaitu menggunakan riben (sirip), radiator dan bantuan motor untuk mengembus udara. Banyaknya riben atau motor-motor yang terpasang sesuai dengan kapasitas transformator dan permukaan yang didinginkan.

Sistem pengalirannya (sirkulasi) dapat dengan cara:

- 1) Alamiah (natural)
- 2) Tekanan / paksaan (forced).

Tabel 2.2. Tipe Pendinginan Transformator^[4]

No.	Macam Sistem Pendingin	Media			
		Di dalam Transformator		Di luar Transformator	
		Sirkulasi alami	Sirkulasi paksa	Sirkulasi alami	Sirkulasi paksa
1	AN	-	-	Udara	-
2	AF	-	-	-	Udara
3	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7	OFWF	-	Minyak	-	Air
8	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

Sumber: IEC tahun 1976

keterangan: A = *Air* (udara),

O = *Oil* (minyak),

N = *Natural* (alamiah),

F = *Forced* (paksaan / tekanan)

Transformator dalam keadaan bertegangan dan belum dibebani akan timbul rugi-rugi yang dapat menimbulkan kondisi transformator tersebut panas, namun panas yang timbul kecil. Apabila transformator tersebut dibebani maka kumparan dan minyak di dalam transformator akan

bertambah panas sesuai dengan kenaikan bebannya. Panas yang timbul pada kumparan akan diteruskan secara konduksi pada minyak transformator yang berfungsi sebagai pendingin. Baik kumparan maupun minyak transformator mempunyai batas-batas operasi panas yang diijinkan. Isolasi kumparan yang terdiri dari kertas kraft mempunyai batas panas yang diijinkan sesuai dengan klas isolasi spesifikasi transformator. Demikian juga minyak isolasi transformator mempunyai batas panas yang diijinkan. Apabila panas-panas tersebut dilampaui maka isolasi akan rusak dan secara keseluruhan transformator tersebut akan rusak. Panas tersebut harus direduksi dengan memasang sistem pendingin yaitu: riben, radiator kipas-kipas dan pompa minyak.

a) Pendingin Dengan Riben

Transformator dengan kapasitas 10 sampai dengan 30 MVA menggunakan riben atau sirip-sirip sebagai pendingin. Minyak panas yang ditimbulkan oleh panas kumparan akan terjadi pada bagian atas transformator sementara minyak yang dingin berada di bawah bagian transformator. Kondisi ini secara alami akan mengalir dari bawah transformator dan diteruskan melalui riben atau sirip pendingin, yang dirancang sedemikian sehingga minyak panas yang melalui riben akan didinginkan oleh aliran udara luar.

b) Pendingin Menggunakan Kipas

Transformator dengan kapasitas lebih dari 30 MVA biasanya dilengkapi dengan riben kipas pendingin, radiator dan pompa minyak.

c) Menggunakan Riben dan Kipas

Minyak transformator panas yang dialirkan melalui riben seperti yang dijelaskan di atas akan dihembus dengan udara dari kipas

pendingin, baik secara vertikal ataupun horizontal sehingga minyak panas sebelum masuk kedalam transformator telah didinginkan dengan udara luar dengan bantuan kipas angin.

d) Menggunakan Radiator dan Kipas Pendingin

Minyak panas dari dalam transformator dipompa dengan motor pompa minyak dialirkan melalui radiator-radiator dan pada bagian depan radiator terpasang kipas-kipas pendingin yang akan menarik udara panas yang ditimbulkan oleh minyak panas ke udara luar dan dari sela-sela radiator akan mengalir udara segar yang akan mendinginkan minyak transformator.

2) Pengaruh Panas pada Transformator

Panas berlebih pada transformator memiliki pengaruh yang merusak pada transformator, baik pada sistem isolasi maupun minyak transformator. Besi maupun tembaga umumnya tidak berpengaruh.

(a) Kertas Selulose

Material isolasi dapat menciut dan sangat rapuh. Pengaruh sekunder dari panas lebih juga sangat penting misalnya produksi gas dan uap air pada waktu terjadi dekomposisi dari material pressboard dan kertas. Jika ada uap air yang tersisa selanjutnya akan mempercepat proses degradasi isolasi. Jika terdapat gas tak dapat keluar dari winding selama proses dekomposisi maka gelembung-gelembung dapat terkumpul pada daerah tekanan listrik yang tinggi, akan memindahkan minyak (*displace oil*) dan akan memberikan kerusakan sebelum waktunya (*premature failure*). Oleh karena itu sejak transformator tidak tahan terhadap hubung singkat, tegangan impuls, surja hubung, beban lebih dari transformator harus dibatasi dari temperatur hot spot tidak lebih dari 140°C.

(b) Minyak Mineral

Mengingat aturan suhu untuk kertas selulose yaitu “8°C” sementara minyak transformator beroperasi pada “10°C”. Pemilik atau operator harus mengasumsikan dua temperatur kritis yaitu 150°C dan 110°C untuk isolasi padat dan 60°C untuk isolasi minyak transformator. Umur minyak transformator yang berguna dapat diharapkan jika temperatur minyak bagian atas tidak lebih dari 60°C. Diharapkan umur berguna minyak transformator pada kondisi optimal dapat mencapai 20 tahun sebelum mencapai titik kritis jumlah kandungan asam 0,25 mg KOH/g. Jika jumlah kandungan asam ini tak tercapai, tingkat perubahan umur minyak transformator dari linier menjadi fungsi eksponensial. Kemampuan umur minyak transformator dipotong $\frac{1}{2}$ untuk kenaikan setiap 10°C sampai 60°C dimana faktor yang lain konstan.

(c) *Polymeric Wire Coating*

Untuk beberapa jenis coating polimeric konduktor temperatur yang diperbolehkan adalah yang mencapai 120°C. Untuk temperatur yang lebih tinggi lagi dapat menghasilkan rugi-rugi dielektrik yang signifikan.

3) Tap Changer

Tap changer adalah alat perubah perbandingan transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang lebih baik (diinginkan) dari tegangan jaringan/primer yang berubah-ubah. Tap changer yang hanya bisa beroperasi untuk memindahkan tap transformator dalam keadaan transformator tidak berbeban disebut “*Off Load Tap Changer*” dan hanya dapat dioperasikan manual.

Tap changer yang dapat beroperasi untuk memindahkan tap transformator, dalam keadaan transformator berbeban disebut “*On Load Tap Changer*” dan dapat dioperasikan secara manual atau otomatis.

Ada dua cara kerja tap changer:

- (a) Mengubah tap dalam keadaan transformator tanpa beban.

(b) Mengubah tapan dalam keadaan transformator berbeban (*On Load Tap Changer/OLTC*)

Transformator yang terpasang di gardu induk pada umumnya menggunakan tap changer yang dapat dioperasikan dalam keadaan transformator berbeban dipasang di sisi primer. Sedangkan transformator penaik tegangan di pembangkit atau pada transformator kapasitas kecil, umumnya menggunakan tap changer yang dioperasikan hanya pada saat tenaga beban OLTC terdiri dari:

1. *Selector Switch*.
2. *Diverter Switch*, dan
3. Transisi Resistor

Untuk mengisolasi dari bodi transformator (tanah) dan meredam panas pada saat proses perpindahan tap, maka OLTC direndam di dalam minyak isolasi yang biasanya terpisah dengan minyak isolasi utama transformator (ada beberapa transformator yang compartemennya menjadi satu dengan main tank).

Karena pada proses perpindahan hubungan tap di dalam minyak terjadi fenomena elektris, mekanis, kimia dan panas, maka minyak isolasi OLTC kualitasnya akan cepat menurun, tergantung dari jumlah kerjanya dan adanya kelainan di dalam OLTC.

4) Alat Pernapasan (*Silica gel*)

Karena pengaruh naik turunnya beban transformator maupun udara luar, maka suhu minyak pun akan berubah-ubah mengikuti keadaan tersebut.

Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara di atas permukaan minyak keluar dari tangki, sebaliknya apabila suhu minyak turun, minyak menyusut maka udara luar akan masuk ke dalam tangki. Kedua proses di atas disebut pernapasan transformator.

Akibat pernapasan transformator tersebut maka permukaan minyak akan selalu bersinggungan dengan udara luar. Udara luar yang lembab akan menurunkan nilai tegangan tembus minyak transformator, maka untuk mencegah hal tersebut, pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi dengan alat pernapasan, berupa tabung berisi kristal zat *hygroskopis*.

5) Indikator

Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator pada transformator sebagai berikut:

- (a) Indikator suhu minyak
- (b) Indikator permukaan minyak
- (c) Indikator sistem pendingin
- (d) Indikator kedudukan tap
- (e) Dan sebagainya

c. Peralatan Proteksi

1) Rele Bucholz

Rele Bucholz adalah alat/rele untuk mendeteksi dan mengamankan terhadap gangguan di dalam transformator yang menimbulkan gas. Gas yang timbul diakibatkan oleh karena:

- a. Hubung singkat antar lilitan/dalam phasa.
- b. Hubung singkat antar phasa.
- c. Hubung singkat antar phasa ke tanah.
- d. Busur api listrik antar laminasi.
- e. Busur api listrik karena kontak yang kurang baik.

2) Pengaman Tekanan Lebih (*Explosive Membrane/ Pressure-relief Vent*)

Alat ini berupa *membrane* yang dibuat dari kaca, plastik, tembaga atau katup berpegas, berfungsi sebagai pengaman tangki transformator terhadap kenaikan tekanan gas yang timbul di dalam

tangki (yang akan pecah pada tekanan tertentu) dan kekuatannya lebih rendah dari kekuatan tangki transformator.

3) Rele Tekanan Lebih (*Sudden Pressure Relay*)

Rele ini berfungsi hampir sama seperti rele Bucholz, yakni pengaman terhadap gangguan di dalam transformator. Bedanya rele ini hanya bekerja oleh kenaikan tekanan gas yang tiba-tiba dan langsung menjatuhkan PMT.

d. Peralatan Tambahan untuk Pengaman Transformator

1) Rele Diffrensial

Berfungsi mengamankan transformator dari gangguan di dalam transformator antara lain, *Flash Over* antara kumparan atau kumparan dengan tangki atau belitan dengan belitan di dalam kumparan ataupun beda kumparan.

2) Rele Arus Lebih

Berfungsi mengamankan transformator dari arus yang melebihi dan dari arus yang telah diperkenankan lewat dari transformator tersebut dan arus lebih ini dapat terjadi oleh karena beban lebih atau gangguan hubung singkat.

3) Rele Tangki Tanah

Berfungsi untuk mengamankan transformator bila ada hubung singkat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada transformator.

4) Rele Hubung Tanah

Berfungsi untuk mengamankan transformator bila terjadi gangguan satu phasa ke tanah.

5) Rele Termis

Berfungsi untuk mencegah/mengamankan transformator dari kerusakan isolasi kumparan, akibat adanya panas lebih yang ditimbulkan

arus lebih. Besarnya yang diukur di dalam rele ini adalah kenaikan temperatur.

6) Minyak Transformator (*Transformator Oil*)

Fungsi dari Minyak Transformator adalah: Insulator yaitu menginsulasikan kumparan di dalam transformator supaya tidak terjadi loncatan bunga api listrik (hubungan pendek) akibat tegangan tinggi. Pendingin yaitu mengambil panas yang ditimbulkan sewaktu transformator berbeban lalu melepaskannya. Melindungi komponen-komponen di dalam transformator terhadap korosi dan oksidasi. ^[5]

2.2 Bahan Isolasi Cair

Isolasi cair berfungsi untuk memisahkan bagian-bagian yang memiliki beda tegangan agar tidak terjadi percikan ataupun lompatan bunga api di antara bagian-bagian tersebut. Selain itu, isolasi cair juga dapat berfungsi sebagai pendingin (*cooling*). Isolasi cair banyak digunakan pada peralatan listrik seperti pemutus tenaga, transformator dan lain sebagainya.

Pada transformator, akan timbul panas, baik yang dibangkitkan oleh kumparan tembaga maupun inti besi. Jika panas tersebut tidak disalurkan atau tidak dilakukan pendinginan, maka akan ada bagian dari peralatan yang akan rusak apabila panas yang timbul melampaui suhu maksimum yang diperbolehkan. Untuk mengatasi hal ini maka inti dan kumparan dari transformator dicelupkan ke dalam suatu isolasi cair (minyak diala), yang berfungsi sebagai media pendingin dan media isolasi.

2.2.1 Sifat Isolator Cair

Beberapa sifat yang harus terdapat pada minyak transformator antara lain sebagai berikut:

1. Tegangan tembus yang tinggi

Tegangan tembus minyak transformator perlu diukur dikarenakan menyangkut kesanggupan minyak untuk menahan electric stress, tanpa kerusakan. Tegangan tembus dapat diukur dengan cara memasukkan dua buah elektroda bola (setengah bola) kedalam minyak yang hendak diukur. Jika diperoleh tegangan tembus yang rendah, maka dapat dikatakan kalau minyak transformator telah terkontaminasi.

2. Faktor kebocoran dielektrik yang rendah

Daya yang hilang dalam operasi suatu transformator disebabkan kehilangan energi menjadi panas, akibat pemecahan molekul-molekul. Harga faktor kehilangan dielektrik yang tinggi menunjukkan adanya kontaminasi atau terjadinya oksidasi yang mengakibatkan minyak menjadi kotor atau menghasilkan kotoran berupa logam alkali, koloid bermuatan, dan sebagainya.

3. Viskositas yang rendah

Viskositas merupakan tahanan dari cairan untuk mengalir kontinu dan merata, tanpa adanya turbulensi dan gaya-gaya lain. Viskositas minyak biasanya diukur dari waktu alir minyak dengan volume tertentu dan pada kondisi yang diatur. Sebagai media pendingin maka viskositas minyak transformator merupakan faktor penting dalam aliran konveksi untuk memindahkan panas. Viskositas juga dipakai sebagai dasar pembagian kelas minyak.

4. Titik nyala yang tinggi

Ini menunjukkan bahwa minyak dapat dipanaskan sampai suhu tertentu sebelum uap yang timbul menjadi api yang berbahaya. Titik nyala yang rendah juga menunjukkan bahwa minyak mengandung zat yang berbahaya seperti zat yang mudah menguap dan terbakar.

5. Massa jenis yang rendah

Massa jenis adalah perbandingan massa suatu volume cairan pada 15,56°C dengan massa air pada volume dan suhu yang sama. Massa jenis minyak transformator lebih kecil dibanding air, oleh karena itu, adanya air dalam minyak transformator akan mudah dipisahkan, karena air akan turun ke bawah

sehingga akan lebih mudah dikeluarkan dari tangki minyak transformator dan atau tangki pemutus tenaga.

6. Kestabilan kimia dan penyerapan gas yang baik

Kestabilan ini penting terutama terhadap oksidasi, sehingga dapat dievaluasi kecenderungan minyak membentuk asam dan kotoran zat padat. Asam dan kotoran zat padat yang terbentuk akibat oksidasi akan menurunkan tegangan tembus. Selain itu air dan asam menyebabkan korosi terhadap logam yang ada dalam transformator, sedang kotoran zat padat akan menyebabkan perpindahan panas (heat transfer) dalam proses pendinginan transformator menjadi terganggu.

7. Angka kenetralan

Angka kenetralan dinyatakan dalam mg KOH yang dibutuhkan pada titrasi satu gram minyak. Angka kenetralan merupakan angka yang menunjukkan penyusun asam dan dapat mendeteksi adanya kontaminasi di dalam minyak, kecenderungan perubahan kimia atau cacat atau indikasi perubahan kimia bahan tambahan. Selain itu angka kenetralan merupakan petunjuk umum untuk menentukan apakah minyak yang sedang dipakai harus diganti atau diolah kembali dengan melakukan penyaringan (filterasi)

8. Korosi belerang

Dalam pemakaian minyak transformator, baik secara kontinu ataupun terus menerus, akan mengalami kontak/terhubung langsung dengan bahan-bahan logam seperti tembaga, besi yang dapat mengalami korosi. Uji korosi belerang perlu untuk melihat kemungkinan adanya korosif minyak sebagai akibat adanya belerang bebas atau senyawa belerang lainnya dalam minyak

9. Resistivitas

Resistivitas erat hubungannya dengan partikel zat yang bersifat penghantar. Resistivitas yang rendah menunjukkan bahwa minyak tersebut sudah mengalami kontaminasi oleh bahan/zat yang bersifat konduktif, seperti air, asam, partikel bermuatan lainnya. ^[3]

2.2.2 Minyak Transformator

Minyak transformator mempunyai sifat yang sama seperti sebuah isolasi dan media pemindah, sehingga minyak transformator tersebut dapat berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi.

Minyak transformator harus memenuhi persyaratan, yaitu:

- Kekuatan isolasi harus tinggi, sesuai IEC 296 minyak transformator harus kelas 1 dan 2 untuk minyak baru dan belum difilter $> 30 \text{ kV}/2.5 \text{ mm}$ dan setelah difilter yaitu $> 50 \text{ kV}/2.5 \text{ mm}$
- Penyalur panas yang baik, berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat
- Viskositas yang rendah, agar lebih mudah bersirkulasi dan memiliki kemampuan pendinginan menjadi lebih baik. Pada IEC 296 Viskositas minyak kelas 1 saat suhu 40°C adalah $< 16,5 \text{ cSt}$.
- Titik nyala yang tinggi dan tidak mudah menguap yang dapat menimbulkan bahaya
- Tidak merusak bahan isolasi padat
- Sifat kimia yang stabil

Jika minyak isolasi transformer didatangkan dengan tangki tersendiri, besar embun (*moisture*) yang terdapat dalam minyak tidak boleh lebih besar dari 10 ppm dan dalam masa pengangkutan minyak tidak boleh terkontaminasi oleh udara. Maka sebelum minyak dipompakan ke dalam tangki transformer perlu dilakukan penyaringan dan pemurnian (*Treatment*).^[4]

Minyak transformator baru harus memiliki spesifikasi seperti tampak pada Tabel 2.3 di bawah ini.

Tabel 2.3. Spesifikasi Minyak Isolasi Baru.^[1]

No.	Sifat Minyak Isolasi	Satuan	Klas I / Klas II	Metode Uji	Tempat Uji
1	Kejernihan	-	Jernih	IEC 296	Di Tempat
	Massa Jenis (20°C)	g/cm ³	< 0.895	IEC 296	Lab
3	Viskositas (20°C)	cSt	< 40 < 25	IEC 296	Lab
	Kinematik - (15°C)	cSt	< 800		
	Kinematik - (30°C)	cSt	< 1800		
4	Titik Nyala	°C	> 140 > 100	IEC 296A	Lab
5	Titik Tuang	°C	< 30 <40	IEC 296A	Lab
6	Angka Kenetralan	mgKOH/g	< 0.003	IEC 296	Lab
7	Korosi Belerang	-	Tidak Korosif	IEC 296	Di Tempat / Lab
8	Tegangan Tembus	kV/2.5mm	> 30 > 50	IEC 156 IEC 296	Di Tempat / Lab
9	Faktor Kebocoran Dielektrik	-	< 0.05	IEC 250 IEC 474 IEC 74	Lab
10	Ketahanan Oksidasi a. Angka Kenetralan b. Kotoran	mgKOH/g %	< 0.40 < 0.10	IEC 74	Lab

Untuk minyak isolasi pakai berlaku untuk transformator berkapasitas > 1 MVA atau bertegangan > 30 kV sifatnya seperti ditunjukkan pada Tabel 2.4 berikut

Tabel 2.4. Spesifikasi Minyak Isolasi Pakai^[1]

No.	Sifat Minyak Isolasi	Tegangan Peralatan	Batas yang diperbolehkan	Metode Uji	Tempat Uji
1	Tegangan Tembus	> 170 kV (70-170 kV)	> 50 kV / 2.5 mm	IEC 156 & ISO 760	Di Tempat / Lab
2	Kandungan Air	< 70 kV > 170 kV < 170 kV	> 30 kV / 2.5 mm < 20 mg/L < 30 mg/L	IEC 93 & IEC 250 (90°)	Lab
3	Faktor Dielektrik	Semua Tegangan	< 0.2 - 2.0	IEC 93 & IEC 247	Lab
4	Tahanan Jenis	Semua Tegangan	G/mm	IEC 93 & IEC 247	Di Tempat / Lab
5	Angka Kenetralan	Semua Tegangan	< 0.5 mg/KOH	IEC 296	Lab
6	Sedimen		Tidak terukur penurunan	IEC 296	Lab
7	Titik Nyala		maksimum 15 °C	IEC 296	Lab
8	Tegangan Permukaan	> 170 kV	> 15 x 10 ³ N/m	Sedang dikerjakan IEC	Sedang dikerjakan IEC
9	Kandungan Gas			Sedang dikerjakan IEC	Sedang dikerjakan IEC

Sementara untuk kekuatan dielektrik minyak didasarkan pada tabel berikut

Tabel 2.5 Kekuatan Dielektrik dari Minyak untuk Tegangan Operasi^[4]

Tegangan tembus Minyak Transformator		
Tegangan Operasi (kV)	untuk Minyak Baru	untuk Minyak yang sudah dipakai
	IEC 156 (kV/2.5 mm)	IEC 156 (kV/2.5 mm)
> 170	≥ 50	≥ 50
70 - 170	≥ 50	≥ 40
< 70	≥ 50	≥ 30

2.2.3 Kegagalan Pada Minyak Transformator

Karakteristik pada isolasi minyak transformator akan berubah jika terjadi ketidakmurnian di dalamnya. Hal ini akan mempercepat terjadinya proses kegagalan. Faktor-faktor yang mempengaruhi kegagalan isolasi antara lain adanya partikel padat, uap air dan gelembung gas.

Teori mengenai kegagalan dalam zat cair kurang banyak diketahui apabila dibandingkan dengan teori kegagalan gas atau zat padat. Hal tersebut disebabkan karena sampai saat ini belum didapatkan teori yang dapat menjelaskan proses kegagalan dalam zat cair yang benar-benar sesuai antara keadaan secara teoritis dengan keadaan sebenarnya. Teori kegagalan zat isolasi cair dapat dibagi menjadi empat jenis sebagai berikut:

a. Teori Kegagalan Elektronik

Teori ini merupakan perluasan teori kegagalan dalam gas, artinya proses kegagalan yang terjadi dalam zat cair dianggap serupa dengan yang terjadi dalam gas. Oleh karena itu supaya terjadi kegagalan diperlukan elektron awal yang dimasukkan kedalam zat cair. Elektron awal inilah yang akan memulai proses kegagalan.

Jika elektroda memiliki bagian permukaan tidak rata (ada yang runcing) maka kuat medan yang terbesar terdapat pada bagian yang runcing tersebut. Kuat maksimum ini akan mengeluarkan elektron e_1 yang akan memulai terbentuknya banjir elektron. Elektron yang dihasilkan e_1 , e_2 , e_3 dan e_n yang kemudian akan menyebabkan timbulnya arus konduksi dalam zat cair pada kuat medan yang tinggi. Arus yang timbul mempunyai kerapatan (*Schottky*):

$$J = J_1 e^{\frac{4.44 \sqrt{E}}{T}} \quad (A/cm^2)$$

$$J_1 = AT^2 e^{-\phi/kT} \quad \text{dan} \quad E = mE_a \quad (2.1 \ \& \ 2.2)$$

dimana :

J : kerapatan arus konduksi;

J_1 : kerapatan arus termionik;

E_a : kuat medan yang diterapkan;

m : faktor ketidakrataan permukaan (=10 untuk permukaan halus)

b. Teori Kegagalan Gelembung

Kegagalan gelembung atau kavitasi merupakan bentuk kegagalan zat cair yang disebabkan oleh adanya gelembung-gelembung gas di dalamnya.

Menurut *Kao dan Krasucki* dalam jurnalnya "*Deformation of Gas Bubbles and Liquid Drops in an Electrically Stressed Insulating Liquid*", sebab-sebab timbulnya gelembung gas adalah :

- Permukaan elektroda tidak rata, sehingga terjadi kantong kantong udara dipermukaannya
- Adanya tabrakan elektron sehingga terjadi produk-produk baru berupa gas
- Penguapan cairan karena adanya lucutan pada bagian bagian elektroda yang tajam dan tidak teratur
- Zat cair mengalami perubahan suhu dan tekanan

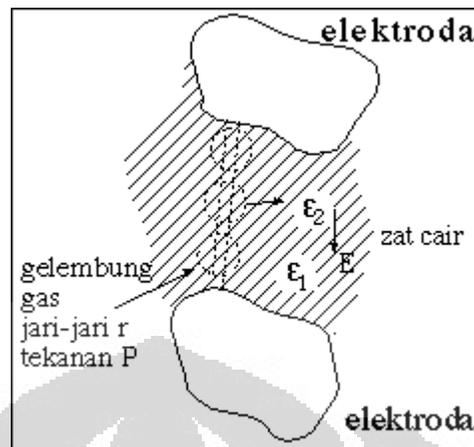
Medan listrik dalam gelembung gas yang ada dalam isolasi zat cair

$$E_b = \frac{3 \epsilon_1 E_0}{2 \epsilon_1 + 1} \quad (2.3)$$

Dimana: ϵ_1 adalah permitivitas zat cair dan

E_0 adalah medan listrik dalam zat cair tanpa gelembung.

Bila E_b sama dengan batas medan ionisasi gas, maka akan terjadi lucutan pada gelembung. Hal ini akan mempercepat pembentukan gas karena dekomposisi zat cair dan dapat mengakibatkan kegagalan isolasi.



Gambar 2.2. Pengaruh Medan terhadap gelembung udara

Kekuatan gagal medan gelembung adalah :

$$E_0 = \frac{1}{\epsilon_1 - \epsilon_2} \sqrt{\frac{2\pi\phi(2\epsilon_1 + \epsilon_2)}{r} \left[\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{V_b}{2rE_0} - 1} \right]} \quad (2.4)$$

dimana ϵ_1 dan ϵ_2 adalah permitivitas zat cair dan permitivitas gelembung, r jari jari awal gelembung (dianggap bola), V_b jatuh tegangan dalam gelembung dan ϕ adalah gaya tegang (tension) permukaan zat cair.

c. Teori Kegagalan Bola Cair

Jika suatu zat isolasi mengandung sebuah bola cair dari jenis cairan lain, maka dapat terjadi kegagalan akibat ketakstabilan bola cair tersebut dalam medan listrik. Medan listrik akan menyebabkan tetesan bola cair yang tertahan didalam minyak yang memanjang searah medan dan pada medan yang kritis tetesan inimenjadi tidak stabil. Kanal kegagalan akan menjalar dari ujung tetesan yang memanjang sehingga menghasilkan kegagalan total.

Bola cair yang dikenai medan E akan berubah bentuk menjadi sferoida seperti ditunjukkan dalam gambar berikut dengan medan di dalamnya sebesar E_2 , maka hubungan antara kedua medan adalah:

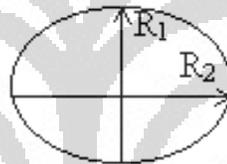
$$E_2 = \frac{\epsilon_1 \cdot E}{\epsilon_1 - (\epsilon_1 - \epsilon_2) \cdot G} \text{ dimana } G = \frac{1}{\gamma^2 - 1} \left\{ \frac{\gamma \cdot \text{Cosh}^{-1} \gamma}{(\gamma^2 - 1)^{1/2}} - 1 \right\} \quad (2.5 \text{ \& } 2.6)$$

Dengan

$$\gamma = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.7)$$

Dimana ϵ_1 : permitivitas zat cair isolasi

ϵ_2 : adalah permitivitas zat cair



Gambar 2.3. Medan listrik bentuk sferoida

d. Teori Kegagalan Tak Murnian Padat

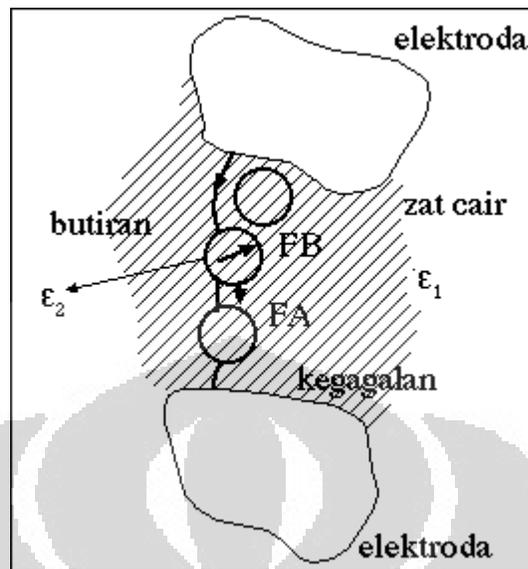
Kegagalan tak murnian padat adalah jenis kegagalan yang disebabkan oleh adanya butiran zat padat (partikel) didalam isolasi cair yang akan memulai terjadi kegagalan.

Besarnya gaya yang bekerja pada butiran dalam medan tak homogen (*Kok*) :

$$F = R^3 \epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} E \cdot \text{grad} \cdot E \quad (2.8)$$

dimana : R: jari jari butiran

E: gradien tegangan



Gambar 2.4. Kegagalan butiran padat

Jika $\epsilon_2 > \epsilon_1$, maka arah gaya yang bekerja pada butiran searah dengan tekanan listrik maksimum (F_A) sehingga gaya akan mendorong butiran dari bagian yang kuat dari medan. Jika $\epsilon_2 < \epsilon_1$, maka arah gaya berlawanan dengan tekanan listrik maksimum (F_B). Gaya F ini akan besar bila ϵ_2 besar. Untuk butiran penghantar $\epsilon_2 = 0$ sehingga $F = 1/2 R^3 \text{ grad}.E^2$.

Untuk medan yang seragam, medan paling kuat ditempat yang seragam, disini gradient $E^2=0$. Oleh sebab itu butiran akan tertarik ke tempat dimana medannya seragam. Akibatnya butiran akan sejajar diantara kedua elektroda dan seolah olah membentuk jembatan yang mengawali terjadinya kegagalan isolasi. Adanya butiran penghantar diantara elektroda akan mengakibatkan pembesaran medan dalam zat cair didekat permukaan butiran. Pembesaran medan ini ditentukan oleh bentuk butiran.

2.2.4 Mekanisme Ketembusan Minyak Transformator

Ada beberapa alasan mengapa isolasi cair digunakan, antara lain ^[6]

1. Isolasi cair memiliki kerapatan 1000 kali atau lebih dibandingkan dengan isolasi gas, sehingga memiliki kekuatan dielektrik yang lebih tinggi menurut hukum *Paschen*.
2. Isolasi cair akan mengisi celah atau ruang yang akan diisolasi dan secara serentak melalui proses konversi menghilangkan panas yang timbul akibat rugi energi.
3. Isolasi cair cenderung dapat memperbaiki diri sendiri (*self healing*) jika terjadi pelepasan muatan (*discharge*).
4. Isolasi cair mudah terkontaminasi.

Beberapa macam faktor yang diperkirakan mempengaruhi ketembusan minyak transformator seperti luas daerah elektroda, jarak celah (*gap spacing*), pendinginan, perawatan sebelum pemakaian (elektroda dan minyak), pengaruh kekuatan dielektrik dari minyak transformator yang diukur serta kondisi pengujian atau minyak transformator itu sendiri juga mempengaruhi kekuatan dielektrik minyak transformator.

Ketembusan isolasi (*insulation breakdown / insulation failure*) disebabkan karena beberapa hal antara lain isolasi tersebut sudah lama dipakai, berkurangnya kekuatan dielektrik karena isolasi tersebut dikenakan tegangan lebih. Pada prinsipnya tegangan pada isolator merupakan suatu tarikan atau tekanan (*stress*) yang harus dilawan oleh gaya dalam isolator itu sendiri agar supaya isolator tidak tembus. Dalam struktur molekul material isolasi, elektron terikat erat pada molekulnya, dan ikatan ini mengadakan perlawanan terhadap tekanan yang disebabkan oleh adanya tegangan. Bila ikatan ini putus pada suatu tempat maka sifat isolasi pada tempat itu hilang. Bila pada bahan isolasi tersebut diberikan tegangan akan terjadi perpindahan elektron dari suatu molekul ke molekul lainnya sehingga timbul arus konduksi atau arus bocor. Karakteristik isolator akan berubah bila material tersebut termasuk suatu ketidakmurnian (*impurity*) seperti adanya arang atau kelembaban dalam isolasi yang dapat menurunkan tegangan tembus.^[7]

BAB 3

METODOLOGI DAN PROSEDUR PENGUJIAN

Pada bagian ini akan dijelaskan tentang proses pengujian untuk mengetahui hubungan antara kenaikan temperatur dan tegangan tembus dari isolasi cair dari transformator daya. Tegangan tembus ini merupakan suatu indikator bagus atau tidaknya kemampuan isolasi dari suatu isolasi cair. Semakin tinggi nilai tegangan tembus isolasi cair maka akan semakin bagus kekuatan isolasi cair tersebut. Untuk mengetahui hubungan ini, maka sampel isolasi cair akan dipanaskan pada temperatur hotspot sesuai dengan range dari temperatur hotspot. Setelah itu baru dilakukan pengujian terhadap isolasi cair tersebut.

3.1 Identifikasi Masalah dan Hipotesa Awal

Adapun yang menjadi permasalahan utama dari seminar ini adalah sebagai berikut.

Temperatur yang tinggi memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap transformator daya. Memang, hal ini tidak terlihat secara langsung pada transformatornya, melainkan pada beban yang disuplai oleh transformator tersebut. Temperatur transformator yang tinggi diakibatkan oleh peningkatan beban pada konsumen / pelanggan listrik. Beban yang tinggi ini dapat dilihat pada pemakaian AC ataupun pendingin ruangan sejenis, yang semakin tinggi. Peningkatan beban yang cukup besar ini akan mengakibatkan kerja dari transformator tersebut meningkat.

Peningkatan kerja dari transformator ini akan berdampak pada komponen yang ada di dalamnya. Karena transformator bekerja dalam keadaan yang cukup berat dikarenakan harus menyuplai beban yang besar, maka arus yang dihasilkan juga akan semakin besar. Kenaikan arus ini akan berdampak pada daya yang hilang pada lilitan berupa panas. Panas dari lilitan ini akan terakumulasi pada kumparan yang ada pada inti transformator tersebut. Panas yang timbul pada winding ini secara tidak langsung

akan mengakibatkan perpindahan panas pada minyak transformator. Panas yang timbul secara terus menerus ini akan mengakibatkan minyak transformator tersebut mendidih. Pada saat mendidih, minyak akan menghasilkan gelembung gelembung gas dan partikel karbon. Gelembung gas akan menghasilkan uap air pada bagian langit langit transformator yang sesekali dapat jatuh ke dalam minyak dan mengendap. Partikel karbon juga akan mengendap dan menumpuk pada bagian dasar dari transformator. Semua hal ini dapat menimbulkan minyak transformator tadi menjadi terkontaminasi dan tidak murni sehingga kemampuan isolasinya menjadi berkurang.

Metode pendinginan (*cooling*) yang terdapat pada transformator juga turut ambil bagian dalam proses pencampuran antara minyak transformator dengan partikel karbon dan air. Proses pendinginan ini berlangsung dengan memutar/mengaduk minyak transformator tersebut sehingga semuanya akan tercampur. Karena minyak dan partikel karbon dan air tadi telah bercampur, maka pada saat menyuplai daya besar pada beban, kemungkinan terjadinya lompatan tegangan pada minyak transformator tersebut juga akan semakin besar. Jika lompatan tegangan sudah terjadi, maka minyak transformator tersebut sudah dapat dikatakan mengalami kegagalan isolasi.

3.2 Metode pengujian yang dilakukan

Adapun diagram alir ataupun tahapan-tahapan yang hendak dilakukan dalam penelitian seminar ini adalah sebagai berikut



Gambar 3.1. Diagram alir tahapan penelitian

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur, yaitu pembelajaran melalui jurnal-jurnal nasional maupun internasional yang memiliki studi kasus yang sejenis, maupun melalui internet dan buku-buku yang dapat dijadikan sebagai acuan dalam melakukan penelitian

Tahap persiapan merupakan proses mencari sumber-sumber informasi data yang sekiranya dapat bermanfaat untuk proses penelitian selanjutnya. Informasi yang didapat merupakan data minyak transformator dari transformator PLN yang dijadikan sebagai acuan dalam melakukan penelitian. Selain itu spesifikasi Transformator daya juga diperlukan dalam penelitian kali ini. Lalu, sampel minyak yang hendak dijadikan bahan uji juga diminta dari PLN sesuai dengan kebutuhan pengujian.

Pada kasus kali ini objek yang akan diuji adalah minyak transformator dari suatu Transformator Daya. Minyak yang akan diuji merupakan minyak diala baru dan minyak diala lama yang sudah terpakai selama beberapa waktu yang digunakan di dalam tangki Transformator daya tersebut. Minyak transformator tersebut akan dipanaskan sesuai dengan keadaan temperatur hotspot berdasarkan literatur.

Setelah data dari hasil percobaan telah diperoleh, selanjutnya akan dilakukan analisis terhadap hasil yang ada dan data minyak tadi dibandingkan untuk pengambilan kesimpulan terhadap

3.3 Peralatan dan Prosedur Pengujian

Untuk melakukan pengujian terhadap minyak transformator ini, akan dilakukan percobaan di Laboratorium Tegangan Tinggi dan Pengukuran Listrik Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia dengan menggunakan minyak yang memiliki spesifikasi yang sama dengan minyak yang dipakai di transformator yang ada di IBT tersebut. Pengujian tegangan tembus yang dilakukan pada percobaan kali ini digunakan untuk mengetahui hubungan antara pengaruh temperatur lingkungan terhadap tegangan tembus transformator.

3.3.1 Peralatan Pengujian

Adapun peralatan yang digunakan dalam pengujian kali ini adalah:

1. Satu buah Transformator penguji 100 kV/10 kVA (TEO 100/10)
2. Satu buah Support Insulator
3. Satu buah Measuring Capacitor 100 kV, 100 pF
4. Satu buah Grounding Switch
5. Satu set unit pengendali DMI 551 dan OT 275
6. Satu buah Bejana penguji, untuk menguji bahan terhadap kemampuannya menahan tegangan baik AC maupun impuls. Pada tabung terdapat 2 elektroda dengan diameter 2,5 mm. Bahan terbuat dari fiber glass
7. Termometer suhu, untuk mengukur suhu dari bahan uji sebelum dilakukan pengujian
8. Bahan yang akan diuji (minyak diala yang sama seperti yang digunakan pada transformator)
9. Notebook / Laptop
10. Microsoft Office Excel 2010

3.3.2 Prosedur Pengujian

Adapun yang menjadi prosedur dalam pengujian kali ini adalah sebagai berikut:

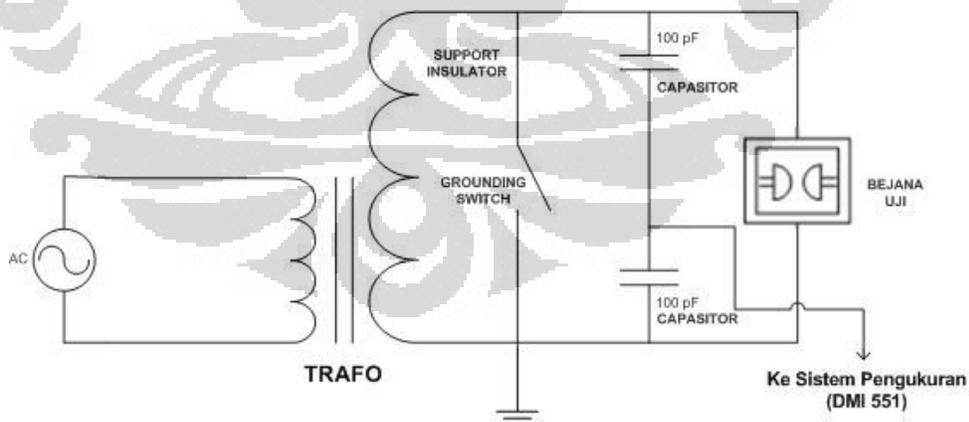
1. Tempatkan bahan uji di dalam bejana uji
2. Perubahan suhu akan diberikan pada minyak yang hendak diuji sesuai dengan data temperatur hotspot
3. Untuk melakukan pemanasan bahan uji pada bejana uji, dapat digunakan heater atau pemanas lain dan untuk mengukur suhunya digunakan thermometer.
4. Pengujian tegangan tembus dengan Peralatan Uji di Laboratorium Tegangan Tinggi

Pengujian ini dilakukan dengan memvariasikan temperatur sesuai dengan range dari temperatur hotspot yang diharapkan. Dalam hal ini dari suhu 80°C - 120°C , dengan kenaikan 20°C tiap pengujian) sampai pada temperatur maksimumnya. Temperatur ini berasal dari penelitian yang dilakukan oleh Till Sybel dan Christian Schobert dengan judul “Transformer Monitoring according to IEC 60354” yang diterbitkan pada tahun 2007.

Langkah tersebut akan dilakukan sebanyak 3 kali untuk 4 jenis minyak diala yang berbeda. Sehingga total pengujiannya adalah sebanyak 12 kali pengujian. Selanjutnya hasil ini akan dibandingkan untuk mengetahui akan hubungannya terhadap hipotesa yang ada.

Untuk menaikkan tegangan digunakan OT 275 dan DMI 551. OT 275 berguna untuk menaikkan tegangan yang hendak diberikan pada minyak, sedangkan pada DMI 551 akan terlihat *display* besar tegangan yang diberikan. Saat terjadi tembus tegangan, maka besar tegangan akan dicatat untuk selanjutnya diolah.

Gambar rangkaian penguji sederhana yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:



Gambar 3.2. Rangkaian penguji minyak transformator

BAB 4

HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS

4.1 Hasil Pengujian

Berdasarkan pengujian yang dilakukan untuk mendapatkan karakteristik pengaruh kenaikan temperatur dan umur minyak terhadap degradasi isolasi minyak transformator, akan didapatkan data berupa besar tegangan tembus untuk minyak yang akan diuji nantinya. Data ini diperoleh melalui nilai/besar tegangan tembus yang terlihat pada DMI 551. Selanjutnya, data ini akan diolah menggunakan Microsoft excel untuk melihat grafik penurunan tegangan tembus dari minyak transformator tersebut. Pengujian ini dilakukan dengan 2 buah variabel, yaitu umur minyak (minyak baru, minyak berumur 1 tahun, minyak berumur 2 tahun, dan minyak berumur 5 tahun) dan temperatur minyak (80°C, 100°C, dan 120°C).

Pengujian yang dilakukan adalah sebanyak 1 kali untuk masing masing sampel dan temperatur minyak yang diharapkan, sehingga diperoleh 12 buah data. Untuk setiap sampel, mula-mula minyak dipanaskan melebihi temperatur yang telah ditetapkan (80°C, 100°C, dan 120°C) dengan toleransi sebesar 5-7 °C karena harus memindahkan minyak ke dalam bejana uji. Selanjutnya, tegangan diatur pada nilai 25 kV, selanjutnya, tegangan dinaikkan secara bertahap sebesar 2-3 kV untuk tiap kenaikannya.

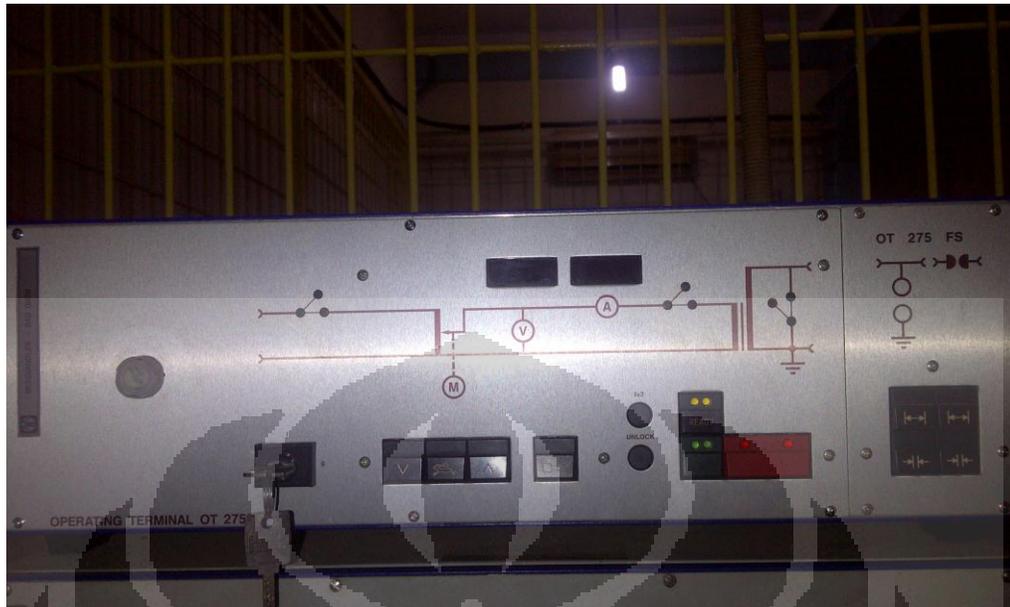
Secara umum, temperatur dan umur minyak transformator akan berbanding terbalik dengan tegangan tembus minyak. Semakin tinggi temperatur minyak transformator, maka tegangan tembusnya akan semakin kecil, dan semakin tua umur transformator, maka tegangan tembusnya akan semakin kecil juga. Analisis lebih lanjut akan dibahas pada bagian analisis data.



Gambar 4.1 Rangkaian pengujian di laboratorium tegangan tinggi



Gambar 4.2 Rangkaian pengujian dihubungkan ke bejana uji



Gambar 4.3 OT 275 untuk mengecek rangkaian



Gambar 4.4 DMI 551 untuk mengatur tegangan

4.1.1 Hasil Pengujian pada Minyak Diala baru

Pertama tama, minyak transformator yang hendak diuji dipanaskan dengan menggunakan kompor listrik sampai mencapai suhu sekitar 90°C . Selanjutnya, minyak tersebut dituang ke dalam wadah uji yang telah dirangkai sebelumnya.

Setelah dituang, temperatur minyak diukur sampai sekitar 83-84°C. lalu dilakukan persiapan ruangan dan alat untuk melakukan pengujian. Hal ini dilakukan karena dalam melakukan persiapan dibutuhkan waktu sekitar 1 menit sehingga ada kemungkinan suhu akan berkurang. Setelah semua persiapan selesai, maka pengujian dilakukan. Pada percobaan kali ini, tegangan dinaikkan secara perlahan lahan untuk mencapai titik kritisnya. Penguji menetapkan tegangan sebesar 25 kV sebagai batas minimumnya. Selanjutnya tegangan ditambahkan secara bertahap sebesar 2-3 kV. Untuk setiap penambahan tegangan, maka diberikan selang waktu sekitar 15-20 detik untuk melihat ada atau tidaknya proses loncatan tegangan. Hingga pada akhirnya, saat tegangan menunjukkan nilai 47.34 kV terjadilah loncatan tegangan dari elektroda yang satu ke elektroda yang lainnya. Besarnya tegangan ini dicatat untuk selanjutnya dimasukkan ke tabel.

Setelah percobaan dengan 80°C dilakukan, maka selanjutnya dilakukan pengujian untuk temperatur 100°C. Minyak hasil pengujian sebelumnya dikeluarkan dari wadah tempat pengujian dan wadah tersebut dibersihkan dengan menggunakan kain sampai tidak ada minyak yang tersisa. Demikian juga pada bagian ujung daripada elektroda. Kedua ujung elektroda tersebut harus dibersihkan agar elektroda tersebut dapat bekerja secara optimal.

Setelah semua bagian wadah selesai dibersihkan, selanjutnya minyak baru yang telah dipanaskan sebelumnya dengan temperatur 110°C dituang ke dalam wadah tersebut dan kemudian diukur kembali temperaturnya. Jika temperatur minyak sudah mencapai kisaran 103-104°C maka dilakukan persiapan ruangan dan peralatan kembali sebelum melakukan pengujian. Tegangan diatur sebesar 25 kV sebagai batas minimumnya. Selanjutnya tegangan ditambahkan secara bertahap sebesar 2-3 kV. Untuk setiap penambahan tegangan, maka diberikan selang waktu sekitar 15-20 detik untuk melihat ada atau tidaknya proses loncatan tegangan. Hingga pada akhirnya, saat tegangan menunjukkan nilai 43.56 kV terjadilah loncatan tegangan dari elektroda yang satu ke elektroda yang lainnya. Besarnya tegangan ini dicatat untuk selanjutnya dimasukkan ke tabel.

Selanjutnya wadah kembali dibersihkan dengan cara yang sama seperti sebelumnya. Dan setelah wadah bersih, maka minyak baru yang telah dipanaskan sampai temperatur 130°C dimasukkan ke dalam wadah tersebut. Setelah minyak berada di dalam, temperatur diukur lagi sampai mencapai temperatur $123\text{-}124^{\circ}\text{C}$. Lalu, tegangan diatur sebesar 25 kV sebagai batas minimumnya. Selanjutnya tegangan ditambahkan secara bertahap sebesar 2-3 kV. Untuk setiap penambahan tegangan, maka diberikan selang waktu sekitar 15-20 detik untuk melihat ada atau tidaknya proses loncatan tegangan. Hingga pada akhirnya, saat tegangan menunjukkan nilai 41.92 kV terjadilah loncatan tegangan dari elektroda yang satu ke elektroda yang lainnya. Besarnya tegangan (V_{bd} / Tegangan Tembus) ini dicatat untuk selanjutnya dimasukkan ke tabel.

Berikut ini merupakan gambar bejana uji setelah proses pengujian selesai dilakukan



Gambar 4.5 Bejana Pengujian berisi Minyak Diala Baru

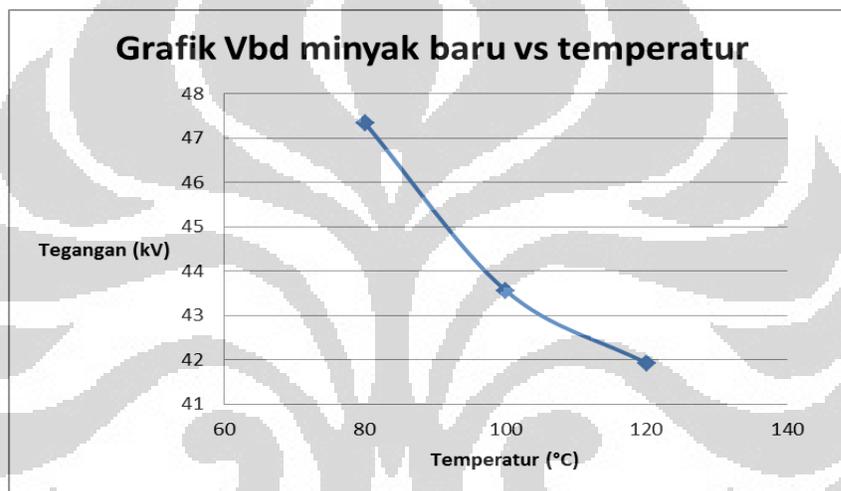
Setelah pengujian untuk minyak baru selesai, maka minyak tadi dibuang dan wadah tempat pengujian tadi dibersihkan dengan menggunakan kain/lap pembersih untuk menghilangkan sisa sisa minyak yang ada.

Berikut ini merupakan data hasil pengujian pada minyak baru.

Tabel 4.1 Tegangan tembus untuk minyak baru dengan temperatur 80°C, 100°C, dan 120°C

Temperatur (°C)	V _{bd} (kV)
80	47.34
100	43.56
120	41.92

Sumber: data pengujian



Gambar 4.6 Grafik V_{bd} minyak baru vs Temperatur

4.1.2 Hasil Pengujian pada Minyak Diala berumur 1 tahun

Setelah pengujian dengan minyak transformator baru selesai, maka dilanjutkan dengan pengujian minyak transformator berumur 1 tahun. Minyak transformator yang berumur 1 tahun dipanaskan dengan menggunakan kompor listrik sampai mencapai suhu sekitar 90°C. Selanjutnya, minyak tersebut dituang ke dalam wadah uji yang telah dirangkai sebelumnya. Setelah dituang, temperatur minyak diukur sampai sekitar 83-84°C. lalu dilakukan persiapan rauangan dan alat untuk melakukan pengujian. Hal ini dilakukan karena dalam melakukan persiapan

dibutuhkan waktu sekitar 1 menit sehingga ada kemungkinan suhu akan berkurang. Setelah semua persiapan selesai, maka pengujian dilakukan. Pada percobaan kali ini, tegangan dinaikkan secara perlahan lahan untuk mencapai titik kritisnya. Penguji menetapkan tegangan sebesar 25 kV sebagai batas minimumnya. Selanjutnya tegangan ditambahkan secara bertahap sebesar 2-3 kV. Untuk setiap penambahan tegangan, maka diberikan selang waktu sekitar 15-20 detik untuk melihat ada atau tidaknya proses loncatan tegangan. Hingga pada akhirnya, saat tegangan menunjukkan nilai 45.02 kV terjadilah loncatan tegangan dari elektroda yang satu ke elektroda yang lainnya. Besarnya tegangan ini dicatat untuk selanjutnya dimasukkan ke tabel.

Setelah percobaan dengan 80°C dilakukan, maka selanjutnya dilakukan pengujian untuk temperatur 100°C. Minyak hasil pengujian sebelumnya dikeluarkan dari wadah tempat pengujian dan wadah tersebut dibersihkan dengan menggunakan kain sampai tidak ada minyak yang tersisa. Demikian juga pada bagian ujung daripada elektroda. Kedua ujung elektroda tersebut harus dibersihkan agar elektroda tersebut dapat bekerja secara optimal.

Setelah semua bagian wadah selesai dibersihkan, selanjutnya minyak yang berumur 1 tahun yang telah dipanaskan sebelumnya dengan temperatur 110°C dituang ke dalam wadah tersebut dan kemudian diukur kembali temperaturnya. Jika temperatur minyak sudah mencapai kisaran 103-104°C maka dilakukan persiapan ruangan dan peralatan kembali sebelum melakukan pengujian. Tegangan diatur sebesar 25 kV sebagai batas minimumnya. Selanjutnya tegangan ditambahkan secara bertahap sebesar 2-3 kV. Untuk setiap penambahan tegangan, maka diberikan selang waktu sekitar 15-20 detik untuk melihat ada atau tidaknya proses loncatan tegangan. Hingga pada akhirnya, saat tegangan menunjukkan nilai 42.78 kV terjadilah loncatan tegangan dari elektroda yang satu ke elektroda yang lainnya. Besarnya tegangan ini dicatat untuk selanjutnya dimasukkan ke tabel.

Berikut ini merupakan gambar bejana uji setelah proses pengujian selesai dilakukan



Gambar 4.7 Bejana Pengujian berisi Minyak Diala Berumur 1 tahun

Selanjutnya wadah kembali dibersihkan dengan cara yang sama seperti sebelumnya. Dan setelah wadah bersih, maka minyak yang berumur 1 tahun yang telah dipanaskan sampai temperatur 130°C dimasukkan ke dalam wadah tersebut. Setelah minyak berada di dalam, temperatur diukur lagi sampai mencapai temperatur $123\text{-}124^{\circ}\text{C}$. Lalu, tegangan diatur sebesar 25 kV sebagai batas minimumnya. Selanjutnya tegangan ditambahkan secara bertahap sebesar $2\text{-}3\text{ kV}$. Untuk setiap penambahan tegangan, maka diberikan selang waktu sekitar $15\text{-}20$ detik untuk melihat ada atau tidaknya proses loncatan tegangan. Hingga pada akhirnya, saat tegangan menunjukkan nilai 40.87 kV terjadilah loncatan tegangan dari elektroda yang satu ke elektroda yang lainnya. Besarnya tegangan (V_{bd} / Tegangan Tembus) ini dicatat untuk selanjutnya dimasukkan ke tabel.

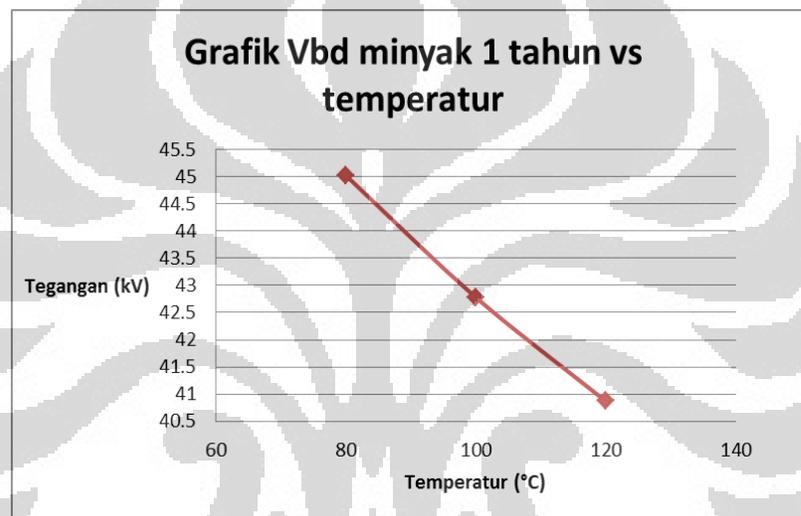
Setelah pengujian untuk minyak berumur 1 tahun selesai, maka minyak tadi dibuang dan wadah tempat pengujian tadi dibersihkan dengan menggunakan kain/lap pembersih untuk menghilangkan sisa sisa minyak yang ada.

Berikut ini merupakan data hasil pengujian pada minyak baru.

Tabel 4.2 Tegangan tembus minyak berumur 1 tahun untuk temperatur 80°C, 100°C, dan 120°C

Temperatur (°C)	V _{bd} (kV)
80	45.02
100	42.78
120	40.87

Sumber: data pengujian



Gambar 4.8 Grafik V_{bd} minyak berumur 1 tahun vs Temperatur

4.1.3 Hasil Pengujian pada Minyak Diala berumur 2 tahun

Setelah pengujian dengan minyak transformator berumur 1 tahun selesai, maka dilanjutkan dengan pengujian minyak transformator berumur 2 tahun. Minyak transformator yang berumur 2 tahun dipanaskan dengan menggunakan kompor listrik sampai mencapai suhu sekitar 90°C. Selanjutnya, minyak tersebut dituang ke dalam wadah uji yang telah dirangkai sebelumnya. Setelah dituang, temperatur minyak diukur sampai sekitar 83-84°C. lalu dilakukan persiapan rauangan dan alat untuk melakukan pengujian. Hal ini dilakukan karena dalam melakukan persiapan

dibutuhkan waktu sekitar 1 menit sehingga ada kemungkinan suhu akan berkurang. Setelah semua persiapan selesai, maka pengujian dilakukan. Pada percobaan kali ini, tegangan dinaikkan secara perlahan lahan untuk mencapai titik kritisnya. Penguji menetapkan tegangan sebesar 25 kV sebagai batas minimumnya. Selanjutnya tegangan ditambahkan secara bertahap sebesar 2-3 kV. Untuk setiap penambahan tegangan, maka diberikan selang waktu sekitar 15-20 detik untuk melihat ada atau tidaknya proses loncatan tegangan. Hingga pada akhirnya, saat tegangan menunjukkan nilai 44.07 kV terjadilah loncatan tegangan dari elektroda yang satu ke elektroda yang lainnya. Besarnya tegangan ini dicatat untuk selanjutnya dimasukkan ke tabel.

Setelah percobaan dengan 80°C dilakukan, maka selanjutnya dilakukan pengujian untuk temperatur 100°C. Minyak hasil pengujian sebelumnya dikeluarkan dari wadah tempat pengujian dan wadah tersebut dibersihkan dengan menggunakan kain sampai tidak ada minyak yang tersisa. Demikian juga pada bagian ujung daripada elektroda. Kedua ujung elektroda tersebut harus dibersihkan agar elektroda tersebut dapat bekerja secara optimal.

Setelah semua bagian wadah selesai dibersihkan, selanjutnya minyak yang berumur 2 tahun yang telah dipanaskan sebelumnya dengan temperatur 110°C dituang ke dalam wadah tersebut dan kemudian diukur kembali temperaturnya. Jika temperatur minyak sudah mencapai kisaran 103-104°C maka dilakukan persiapan ruangan dan peralatan kembali sebelum melakukan pengujian. Tegangan diatur sebesar 25 kV sebagai batas minimumnya. Selanjutnya tegangan ditambahkan secara bertahap sebesar 2-3 kV. Untuk setiap penambahan tegangan, maka diberikan selang waktu sekitar 15-20 detik untuk melihat ada atau tidaknya proses loncatan tegangan. Hingga pada akhirnya, saat tegangan menunjukkan nilai 41.8 kV terjadilah loncatan tegangan dari elektroda yang satu ke elektroda yang lainnya. Besarnya tegangan ini dicatat untuk selanjutnya dimasukkan ke tabel.

Selanjutnya wadah kembali dibersihkan dengan cara yang sama seperti sebelumnya. Dan setelah wadah bersih, maka minyak yang berumur 2 tahun yang telah dipanaskan sampai temperatur 130°C dimasukkan ke dalam wadah tersebut. Setelah minyak berada di dalam, temperatur diukur lagi sampai mencapai temperatur $123\text{-}124^{\circ}\text{C}$. Lalu, tegangan diatur sebesar 25 kV sebagai batas minimumnya. Selanjutnya tegangan ditambahkan secara bertahap sebesar 2-3 kV. Untuk setiap penambahan tegangan, maka diberikan selang waktu sekitar 15-20 detik untuk melihat ada atau tidaknya proses loncatan tegangan. Hingga pada akhirnya, saat tegangan menunjukkan nilai 39.5 kV terjadilah loncatan tegangan dari elektroda yang satu ke elektroda yang lainnya. Besarnya tegangan (V_{bd} / Tegangan Tembus) ini dicatat untuk selanjutnya dimasukkan ke tabel.

Berikut ini merupakan gambar bejana uji setelah proses pengujian selesai dilakukan



Gambar 4.9 Bejana Pengujian berisi Minyak Diala Berumur 2 tahun

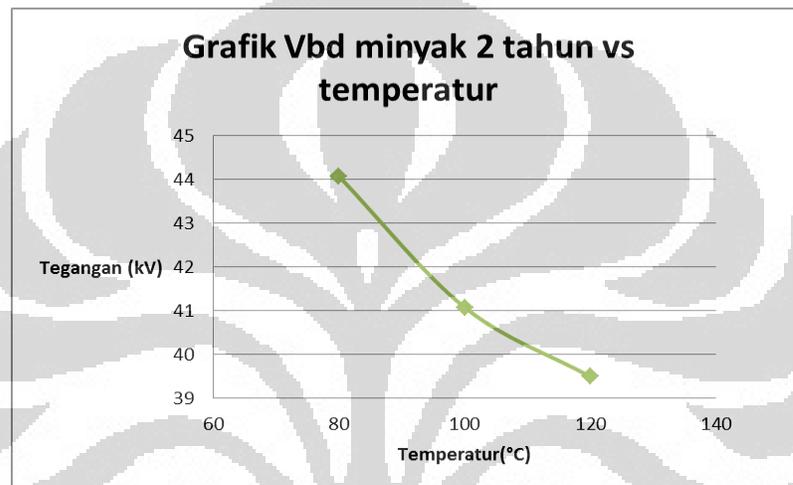
Setelah pengujian untuk minyak berumur 2 tahun selesai, maka minyak tadi dibuang dan wadah tempat pengujian tadi dibersihkan dengan menggunakan kain/lap pembersih untuk menghilangkan sisa-sisa minyak yang ada.

Berikut ini merupakan data hasil pengujian pada minyak baru.

Tabel 4.3 Tegangan tembus minyak berumur 2 tahun untuk temperatur 80°C, 100°C, dan 120°C

Temperatur (°C)	V _{bd} (kV)
80	44.07
100	41.08
120	39.5

Sumber: data pengujian



Gambar 4.10 Grafik V_{bd} minyak berumur 2 tahun vs Temperatur

4.1.4 Hasil Pengujian pada Minyak Diala berumur 5 tahun

Setelah pengujian dengan minyak transformator berumur 2 tahun selesai, maka dilanjutkan dengan pengujian minyak transformator berumur 5 tahun. Minyak transformator yang berumur 5 tahun dipanaskan dengan menggunakan kompor listrik sampai mencapai suhu sekitar 90°C. Selanjutnya, minyak tersebut dituang ke dalam wadah uji yang telah dirangkai sebelumnya. Setelah dituang, temperatur minyak diukur sampai sekitar 83-84°C. lalu dilakukan persiapan rauangan dan alat untuk melakukan pengujian. Hal ini dilakukan karena dalam melakukan persiapan dibutuhkan waktu sekitar 1 menit sehingga ada kemungkinan suhu akan berkurang. Setelah semua persiapan selesai, maka pengujian dilakukan. Pada percobaan kali ini,

tegangan dinaikkan secara perlahan lahan untuk mencapai titik kritisnya. Penguji menetapkan tegangan sebesar 25 kV sebagai batas minimumnya. Selanjutnya tegangan ditambahkan secara bertahap sebesar 2-3 kV. Untuk setiap penambahan tegangan, maka diberikan selang waktu sekitar 15-20 detik untuk melihat ada atau tidaknya proses loncatan tegangan. Hingga pada akhirnya, saat tegangan menunjukkan nilai 42.86 kV terjadilah loncatan tegangan dari elektroda yang satu ke elektroda yang lainnya. Besarnya tegangan ini dicatat untuk selanjutnya dimasukkan ke tabel.

Setelah percobaan dengan 80°C dilakukan, maka selanjutnya dilakukan pengujian untuk temperatur 100°C. Minyak hasil pengujian sebelumnya dikeluarkan dari wadah tempat pengujian dan wadah tersebut dibersihkan dengan menggunakan kain sampai tidak ada minyak yang tersisa. Demikian juga pada bagian ujung daripada elektroda. Kedua ujung elektroda tersebut harus dibersihkan agar elektroda tersebut dapat bekerja secara optimal.

Setelah semua bagian wadah selesai dibersihkan, selanjutnya minyak yang berumur 2 tahun yang telah dipanaskan sebelumnya dengan temperatur 110°C dituang ke dalam wadah tersebut dan kemudian diukur kembali temperaturnya. Jika temperatur minyak sudah mencapai kisaran 103-104°C maka dilakukan persiapan ruangan dan peralatan kembali sebelum melakukan pengujian. Tegangan diatur sebesar 25 kV sebagai batas minimumnya. Selanjutnya tegangan ditambahkan secara bertahap sebesar 2-3 kV. Untuk setiap penambahan tegangan, maka diberikan selang waktu sekitar 15-20 detik untuk melihat ada atau tidaknya proses loncatan tegangan. Hingga pada akhirnya, saat tegangan menunjukkan nilai 41.53 kV terjadilah loncatan tegangan dari elektroda yang satu ke elektroda yang lainnya. Besarnya tegangan (V_{bd} / Tegangan Tembus) ini dicatat untuk selanjutnya dimasukkan ke tabel.

Selanjutnya wadah kembali dibersihkan dengan cara yang sama seperti sebelumnya. Dan setelah wadah bersih, maka minyak yang berumur 2 tahun yang telah dipanaskan sampai temperatur 130°C dimasukkan ke dalam wadah tersebut.

Setelah minyak berada di dalam, temperatur diukur lagi sampai mencapai temperatur 123-124°C. Lalu, tegangan diatur sebesar 25 kV sebagai batas minimumnya. Selanjutnya tegangan ditambahkan secara bertahap sebesar 2-3 kV. Untuk setiap penambahan tegangan, maka diberikan selang waktu sekitar 15-20 detik untuk melihat ada atau tidaknya proses loncatan tegangan. Hingga pada akhirnya, saat tegangan menunjukkan nilai 38.9 kV terjadilah loncatan tegangan dari elektroda yang satu ke elektroda yang lainnya. Besarnya tegangan ini dicatat untuk selanjutnya dimasukkan ke tabel.

Berikut ini merupakan gambar bejana uji setelah proses pengujian selesai dilakukan



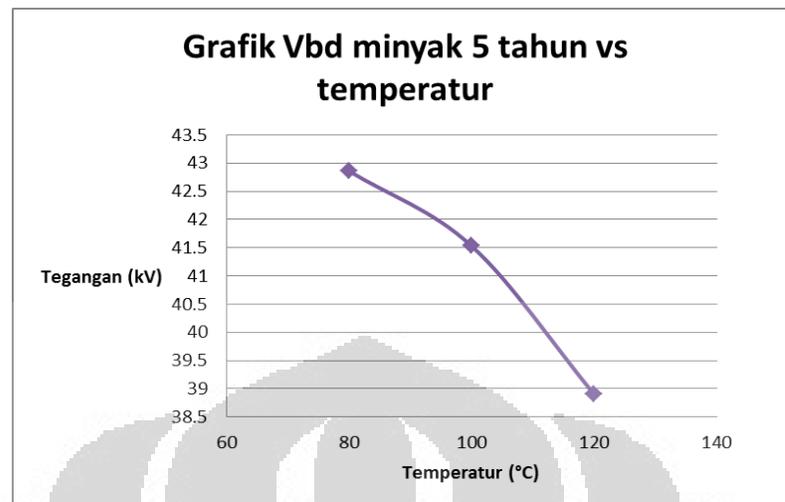
Gambar 4.11 Bejana Pengujian berisi Minyak Diallyl Berumur 5 tahun

Berikut ini merupakan data hasil pengujian pada minyak baru.

Tabel 4.4 Tegangan tembus minyak berumur 5 tahun untuk temperatur 80°C, 100°C, dan 120°C

Temperatur (°C)	V_{bd} (kV)
80	42.86
100	41.53
120	38.9

Sumber: data pengujian



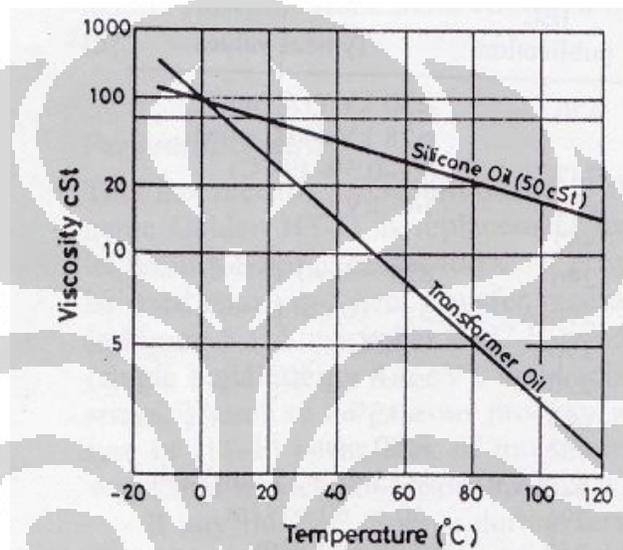
Gambar 4.12 Grafik V_{bd} minyak berumur 5 tahun vs Temperatur

4.2 Analisis Hasil Pengujian

4.2.1 Analisis Pengaruh Kenaikan Temperatur

Dari grafik yang telah ada pada bagian hasil pengujian dapat dilihat bahwa semakin tinggi temperatur minyak suatu transformator, maka tegangan tembus dari minyak tersebut akan semakin kecil/menurun. Kenaikan temperatur minyak pada transformator daya akan meningkatkan peningkatan temperatur minyak transformator. Semakin tinggi temperatur, maka panas dari body transformator akan mengalir ke minyak secara konduksi. Hal ini mengakibatkan terjadinya pemanasan dari minyak transformator tersebut. Pemanasan minyak transformator tersebut menyebabkan minyak tersebut memuai sehingga timbul kehilangan dielektrik dari minyak transformator akibat pemecahan molekul-molekulnya. Semakin tinggi temperatur, maka nilai faktor kehilangan dielektriknya juga akan semakin tinggi, sehingga besar tegangan tembus akan semakin kecil.

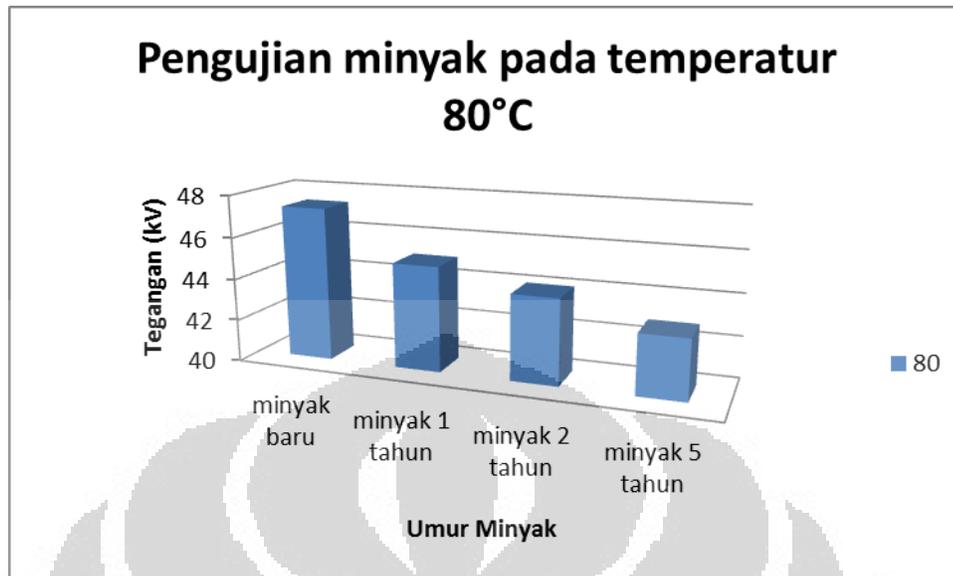
Selain itu, temperatur yang semakin tinggi akan memberi pengaruh pada penurunan viskositas dari minyak. Saat transformator dipakai pada keadaan optimum secara terus menerus, maka minyak yang sudah berumur tua / lama dipakai akan ikut panas sehingga menyebabkan viskositas menjadi turun. Kenaikan temperatur ini akan menyebabkan molekul-molekul pada minyak akan merenggang sehingga minyak akan menjadi lebih cair karena nilai viskositasnya kecil.



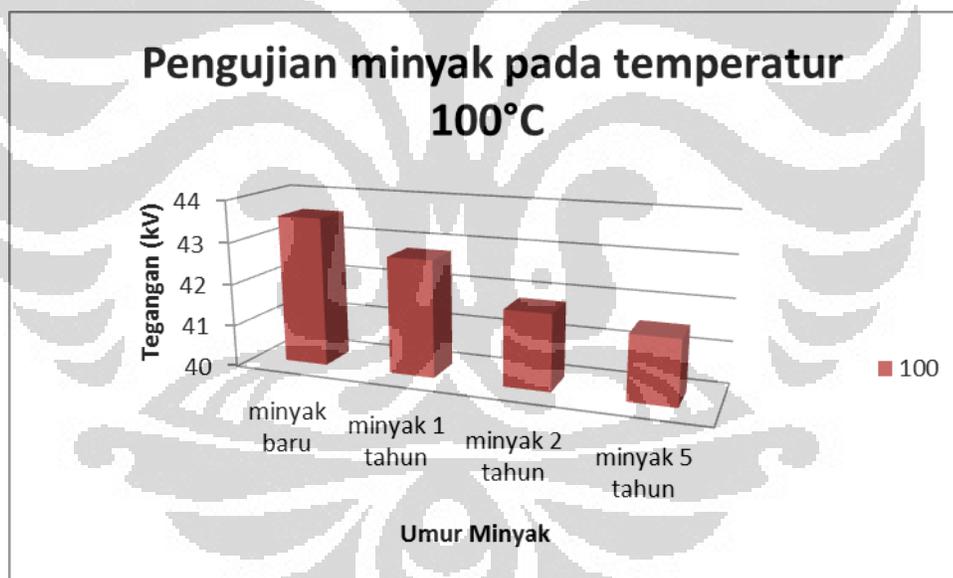
Gambar 4.13 Grafik Temperatur vs Viskositas minyak transformator ^[9]

4.2.2 Analisis Pengaruh Umur Minyak Transformator

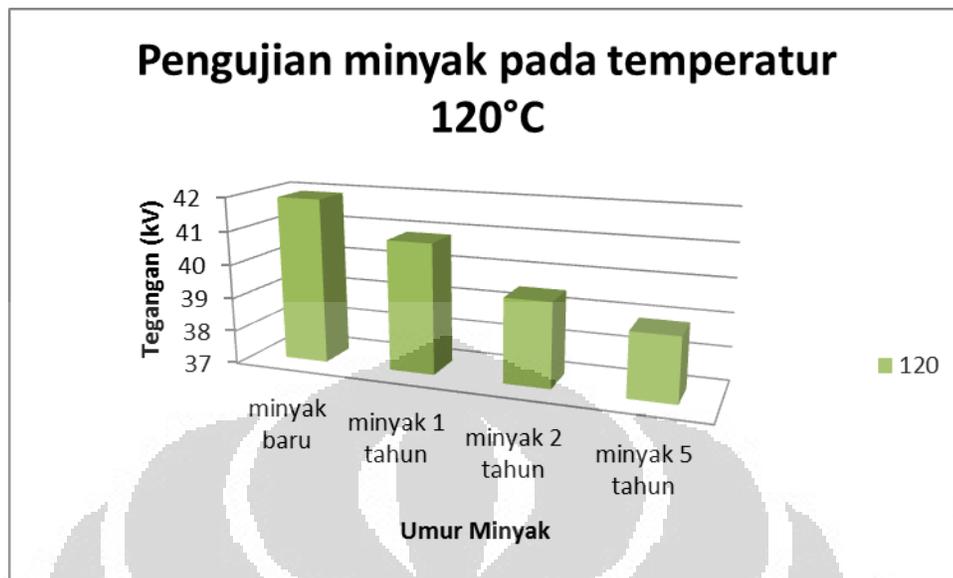
Berikut ini merupakan grafik karakteristik tegangan tembus yang terbentuk berdasarkan hasil pengujian pada variasi umur minyak transformator



Gambar 4.14 Tegangan tembus minyak vs umur minyak pada temperatur 80°C



Gambar 4.15 Tegangan tembus minyak vs umur minyak pada temperatur 100°C



Gambar 4.16 Tegangan tembus minyak vs umur minyak pada temperatur 120°C

Dari grafik yang ada terlihat bahwa semakin tua umur minyak transformator yang berada di dalam transformator daya, maka kualitas tegangan tembusnya juga akan menurun. Seperti yang sudah diketahui, semakin lama minyak transformator terpasang di dalam transformator, maka hal ini menunjukkan kalau minyak itu sudah terpakai untuk menjadi isolasi dari transformator tersebut. Hal ini berarti ketika transformator bekerja secara terus menerus, maka minyak tersebut juga akan bekerja secara terus menerus. Karena minyak bekerja secara terus menerus pada suhu yang tinggi akibat transformator bekerja pada keadaan optimum, maka pada minyak transformator ini akan timbul uap air dan zat kimia lain seperti asam dan karbon yang bereaksi akibat pemanasan dari minyak transformator tersebut. Selain itu, viskositas dari transformator juga akan semakin buruk sehingga kualitas minyaknya menjadi semakin buruk. Hal inilah yang menyebabkan tegangan tembus dari minyak tersebut akan semakin kecil.

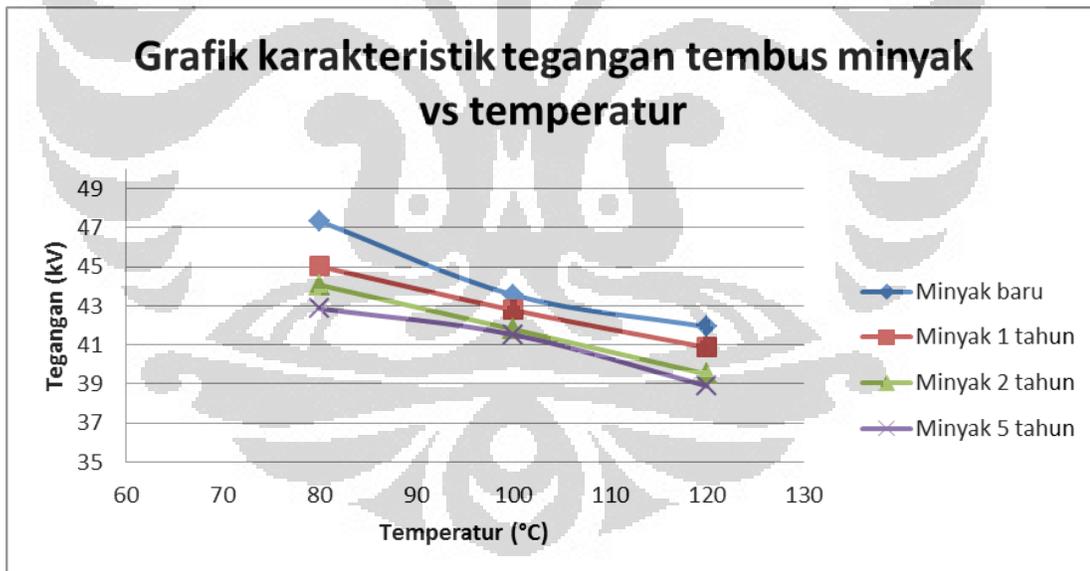
4.2.3 Analisis Pengaruh Kenaikan Temperatur dan Umur Minyak Transformator terhadap Degradasi Tegangan Tembus Minyak Transformator

Jika kita gabungkan kedua variabel sebelumnya untuk dianalisis secara sekaligus, maka akan diperoleh tabel dan grafik sebagai berikut

Tabel 4.5 Tegangan tembus minyak yang umurnya berbeda terhadap variasi kenaikan temperaturnya

Temperatur (°C)	Tegangan Tembus (kV)			
	Minyak baru	Minyak 1 tahun	Minyak 2 tahun	Minyak 5 tahun
80	47.34	45.02	44.07	42.86
100	43.56	42.78	41.8	41.53
120	41.92	40.87	39.5	38.9

Sumber: data pengujian



Gambar 4.17 Tegangan tembus minyak vs umur minyak pada temperatur 80°C, 100°C, dan 120°C

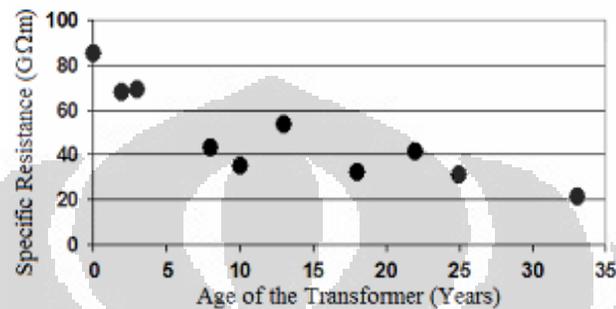
Dari grafik tersebut, dapat dilihat kalau semakin tinggi temperatur dan semakin tua umur dari minyak transformator, maka tegangan tembus dari minyak

transformator akan semakin rendah. Selain itu dari grafik diatas juga dapat dibandingkan perbandingan tegangan tembus antara minyak-minyak yang diuji.

Sesuai dengan yang telah disebutkan pada bagian dasar teori yang menyebutkan tentang sifat yang harus terdapat pada minyak transformator yang baik, dimana faktor kebocoran dielektrik yang rendah, maka hal ini sesuai dengan hasil pengujian yang telah dilakukan sebelumnya. Minyak transformator yang baru dipasang pada transformator akan bekerja sebagai isolasi dari transformator. Transformator tersebut bekerja pada keadaan optimum secara terus menerus sehingga menyebabkan temperatur minyak dari transformator akan naik. Temperatur minyak yang tinggi ini akan menyebabkan pemanasan pada transformator yang selanjutnya akan menyebabkan pemanasan pada minyak transformator tersebut. Pemanasan minyak transformator ini akan menyebabkan molekul-molekul pada minyak tersebut akan pecah sehingga faktor kebocoran dielektriknya akan semakin tinggi. Warna dari minyak transformator yang pada kondisi baru masih berwarna kuning tadi akan berubah menjadi semakin coklat bahkan gelap. Seiring dengan pertambahan waktu, oksigen dari udara, kelembaban dari transformator, dan kandungan zat kimia lain seperti asam dan karbon dapat menyebabkan kualitas minyak transformator tadi semakin buruk karena sebagian besar minyak akan mengalami reaksi kimia yang dapat menyebabkan susunan kimia daripada minyak transformator tersebut menjadi terurai. Selain itu semakin tua umur dari minyak transformator tersebut, maka kotoran tadi akan semakin banyak sehingga minyak akan semakin terkontaminasi dan menyebabkan tegangan tembus dari transformator akan semakin rendah.

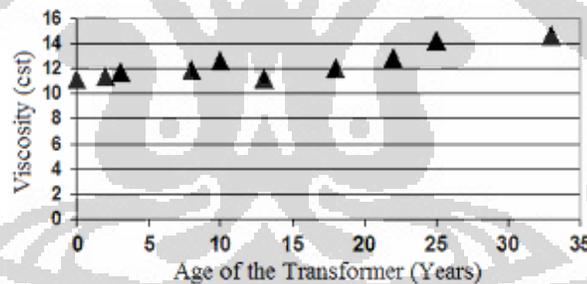
Umur dari transformator yang semakin tua juga dapat mempengaruhi viskositas dan resistivitas dari minyak transformator itu sendiri. Hal ini sesuai dengan salah satu jurnal yang menyebutkan kalau semakin tua umur dari tafo, maka resistivitasnya akan semakin rendah dan viskositas dari minyak akan semakin tinggi. Perubahan nilai resistivitas dan viskositas dari minyak transformator ini akan menyebabkan tegangan tembus akan semakin mengecil, karena pada minyak transformator sudah mengandung banyak endapan bahan kimia dan mengandung

kontaminan yang menyebabkan minyak transformator tadi sudah tidak murni lagi. Ini dapat dilihat dari tabel hasil penelitian dalam jurnal yang berjudul “*Aging Study and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil*” oleh Mohammad R. Meshkatoddini^[8] berikut.



Gambar 4.18 Grafik hubungan umur minyak transformator vs resistansi ^[8]

Pada tabel diatas dapat dilihat kalau semakin tua umur dari minyak transformator, maka resistansi dari minyak transformator tadi juga akan menurun. Hal ini tentunya dapat menyebabkan tegangan tembus daripada minyak trafo akan semakin mengecil.



Gambar 4.19 Grafik hubungan umur minyak transformator vs viskositas ^[8]

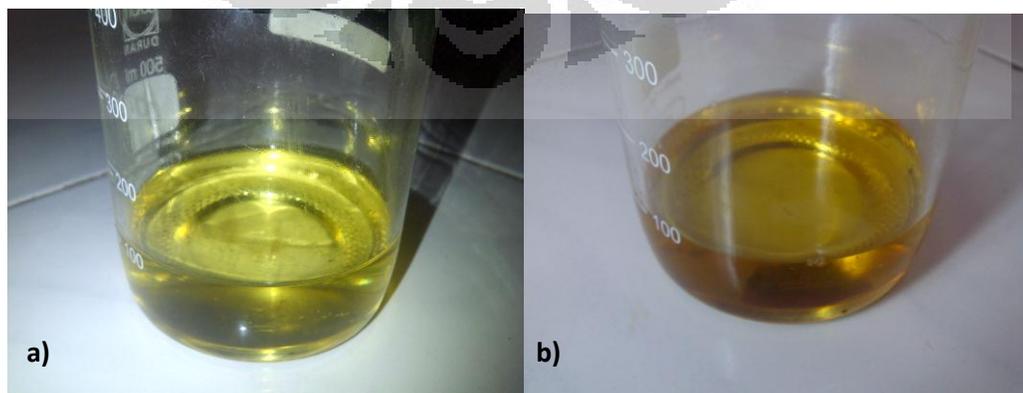
Sedangkan pada grafik diatas, dapat dilihat kalau semakin tua umur minyak transformator, maka viskositas dari minyak tersebut juga akan semakin tinggi. Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya kotoran yang mengendap ataupun lumpur yang terkandung di dalam minyak dan juga menempel pada isolasi kertas daripada transformator itu sendiri. Adanya kotoran ini perlu diantisipasi untuk menghindari dampak kerusakan berlanjut pada transformator tersebut karena minyak transformator tadi sudah tidak berfungsi lagi sebagai isolator yang seharusnya.

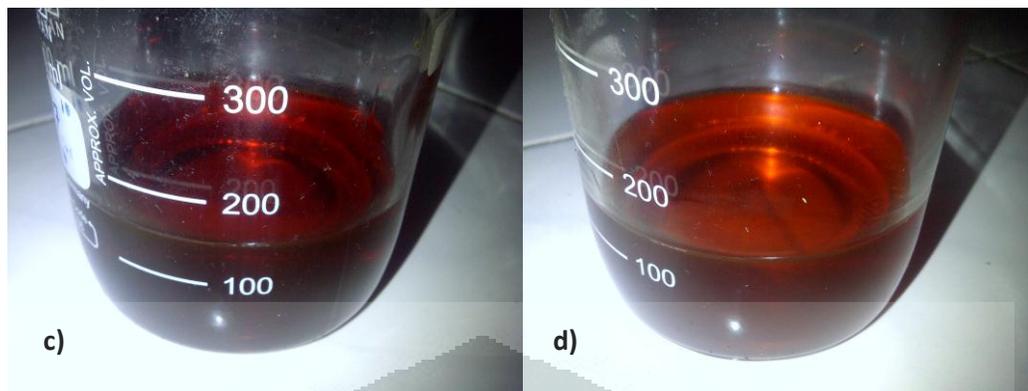
Untuk klasifikasi minyak sendiri, dapat dikelompokkan berdasarkan warna daripada minyak tersebut. Klasifikasi minyak ini sering disebut dengan Oil Quality Index (OQIN) atau Myers Index Number (MIN). Pengelompokannya adalah sebagai berikut, sesuai dari angka kenetralan, daya tahan terhadap tekanan, serta warna minyak.

Tabel 4.6 Oil Quality Index (OQIN) / Myers Index Number (MIN)

TRANSFORMER OIL CLASSIFICATIONS*	
1. Good Oils	NN 0.00 - 0.10 IFT 30.0 - 45.0 Colour Pale Yellow OQIN 300-1500
2. Proposition A Oils	NN 0.05 - 0.10 IFT 27.1 - 29.9 Colour Yellow OQIN 271 - 600
3. Marginal Oils	NN 0.11 - 0.15 IFT 24.0 - 27.0 Colour Bright Yellow OQIN 160 - 318
4. Bad Oils	NN 0.16 - 0.40 IFT 18.0 - 23.9 Colour Amber OQIN 45 - 159
5. Very Bad Oils	NN 0.41 - 0.65 IFT 14.0 - 17.9 Colour Brown OQIN 22 - 44
6. Extremely Bad Oils	NN 0.66 - 1.50 IFT 9.0 - 13.9 Colour Dark Brown OQIN 6 - 21
7. Oils in Disastrous Condition	NN 1.51 or more Colour Black

Bila melihat pada tabel diatas dan dibandingkan dengan minyak yang diuji seperti gambar di bawah ini, maka diperoleh hasil sebagai berikut





Gambar 4.20 Foto a) minyak baru, b) minyak 1 tahun, c) minyak 2 tahun, d) minyak 5 tahun

Untuk minyak yang baru, memiliki warna kuning pucat. Hal ini berarti minyak masih berada dalam kondisi yang baik dan siap untuk dipakai di transformator tersebut. Sedangkan untuk minyak yang berumur 1 tahun, memiliki warna kuning. Berdasarkan tabel di atas dapat dikatakan kalau minyak tersebut berada dalam kondisi masih layak pakai dan cukup aman dipakai di transformator daya tersebut. Sementara untuk minyak yang berumur 2 tahun dan 5 tahun, keduanya memiliki warna kuning kecoklatan. Warna ini menunjukkan kalau minyak tersebut sudah dalam keadaan yang tidak baik dan menunjukkan kalau dalam minyak tersebut sudah terpakai dalam suhu yang cukup tinggi selama beberapa saat dan di dalam minyak itu sendiri terkandung berbagai macam endapan dan kotoran yang juga mengendap pada isolasi kertas di dalam transformator tersebut yang dapat merusak fungsi isolasi dari minyak transformator tersebut. Setelah perubahan warna minyak dari kuning ke kuning kecoklatan, minyak telah terdegradasi ke titik di mana sistem isolasi telah dipengaruhi. Perubahan warna minyak ini dapat disebabkan oleh: masalah listrik, kepala pot atau senyawa bushing, pernis atau polimer yang diawetkan, minyak baru di unit kotor yang telah terpakai.

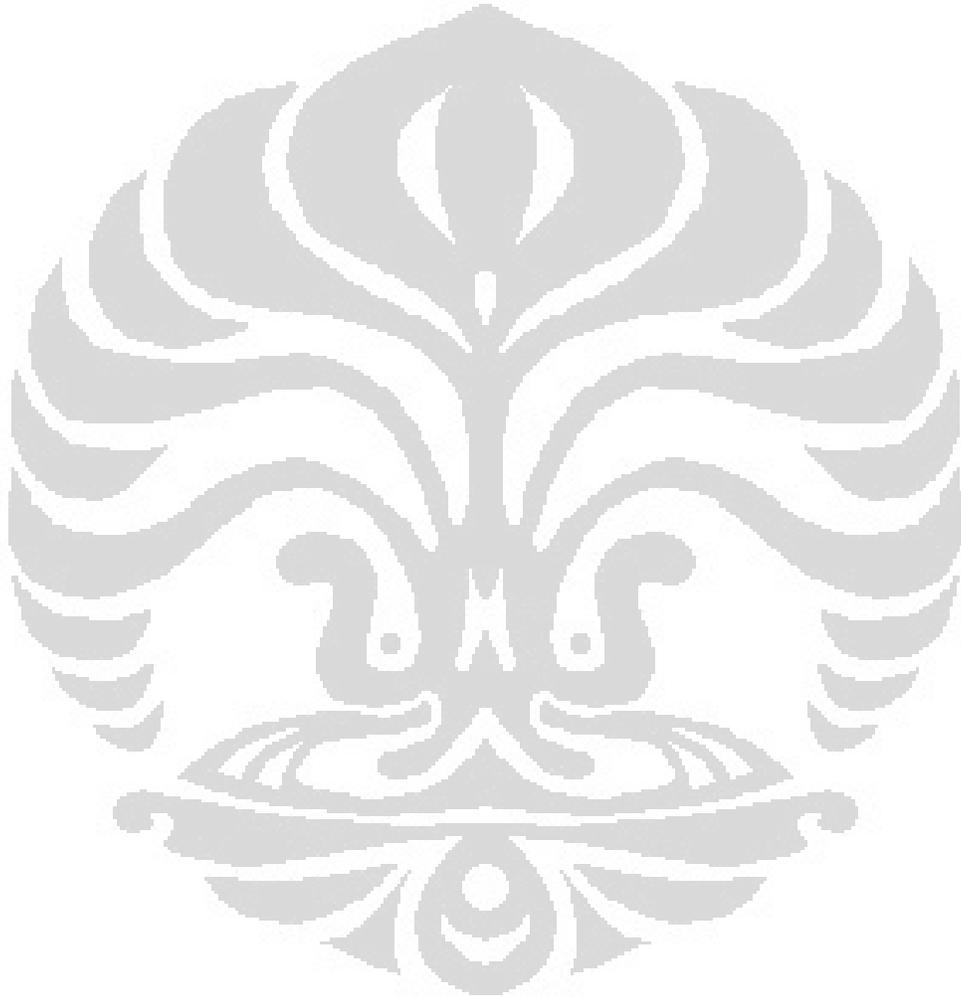
BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

1. Semakin tinggi temperatur minyak transformator maka tegangan tembus dari minyak transformator tersebut akan semakin mengecil.
2. Kenaikan temperatur memberikan penurunan kualitas isolasi daripada minyak transformator yang terpasang pada transformator daya.
3. Tegangan tembus tiap minyak transformator yang paling rendah secara berurutan dari minyak yang baru sampai minyak berumur 5 tahun terdapat pada saat temperatur minyak berada pada angka 120°C, yaitu sebesar 41.92kV, 40.87kV, 39.5kV, 38.9kV dan yang paling tinggi saat temperatur minyak berada pada angka 80°C, yaitu sebesar 47.34kV, 45.02kV, 44.07kV, 42.86kV
4. Semakin tua umur minyak transformator yang terpasang, maka akan buruk kualitas isolasinya. Hal ini dapat dilihat dari nilai tegangan tembusnya yang semakin menurun seiring dengan penambahan usia minyak.
5. Tegangan tembus minyak transformator yang berumur 5 tahun merupakan yang paling buruk bila dibandingkan dengan minyak transformator yang berumur 2 tahun, 1 tahun, dan minyak yang baru, yaitu untuk 80°C sebesar 42.86 kV, untuk 100°C sebesar 41.53 kV, dan untuk 120°C sebesar 38.9 kV
6. Semakin tinggi temperatur dan semakin tua umur minyak transformator maka akan semakin memperburuk kekuatan dan kemampuan isolasi cairnya.

7. Minyak transformator yang berumur 5 tahun dan dipanaskan pada temperatur 120°C memiliki tegangan tembus yang paling buruk dibanding yang lain yaitu sebesar 38.9 kV



DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, A. *Teknik Tegangan Tinggi*, Pradnya Paramita, Jakarta, 1994
- Chapman, Stephen J. *Electric Machinery and Power System Fundamentals*. Mc Graw Hill. New York, 2002.
- Garniwa, Iwa dan Rudy Setiabudy. *Pengujian Minyak Trafo*. Laporan Penelitian.
- Junaidi, Alfian. Jurnal. *Pengaruh perubahan suhu terhadap tegangan tembus isolasi*. Teknoin, Volume 13, Nomor 2, Desember 2008, 1-5.
- Latif, Melda. Jurnal. *Pengaruh temperatur terhadap kekuatan dielektrik minyak nabati sebagai bahan isolasi transformator daya*. Universitas Andalas. November 2008.
- Rusdi Ariawan, Putu. *Kegagalan Bahan Isolasi*. Makalah. Universitas Udayana Bali, 2009.
- Sayogi, Hanung. Jurnal. *Analisis Mekanisme Kegagalan Isolasi Pada Minyak Trafo menggunakan Elektroda berpolaritas berbeda pada jarum bidang*. Universitas Diponegoro, Semarang.
- Tajudin. *Analisis Kegagalan Minyak Transformator*. Elektro Indonesia, Edisi 12 Maret 1998.
- http://www.electricenergyonline.com/?page=show_article&mag=41&article=311

DAFTAR ACUAN

- [1] <http://dunia-listrik.blogspot.com/2009/01/transformator.html>
- [2] Heathcote, Martin J. CEng, FIEE. *The J&P Transformer Book*. Johnson & Phillips Ltd. Massachussets, 1998.
- [3] Setiabudy, Rudy. *Material Teknik Listrik*. UI Press. Depok, 2007.
- [4] Panduan Pemeliharaan Trafo Tenaga oleh PLN P3B, 2003
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Paschen's_law
- [6] http://sakirah.blogspot.com/2009/06/kegagalan-isolasi_20.html
- [7] <http://www.elektroindonesia.com/elektro/energi12.html>
- [8] Mohammad R. Meshkatoddini. *Aging Study and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil*. American J. of Engineering and Applied Sciences 1 (4): 384-388, 2008
- [9] Malik, N.H., Al-Arainy, A.A, and Qureshi, M.I., *Electrical Insulation in Power Systems*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1998