

# Evaluasi Kinerja Sistem Isolasi Transformator Kertas Kraft Terendam Minyak Mineral Pada Sel Uji Penuaan Termal Dipercepat

Rahman Azis Prasojo<sup>a)</sup>, Kresna Bayu Priambodo<sup>a)</sup>, Anton Setya Aji Herdiansyah<sup>a)</sup>,  
Rohmanita Duanaputri<sup>a)</sup>, Slamet Nurhadi<sup>a)</sup>, Epiwardi<sup>a)</sup>

(Artikel diterima: Agustus 2022, direvisi: Oktober 2022)

**Abstrak:** The transformer insulation system in the form of oil-immersed paper, is the most important part of a transformer. This isolation system needs to be ensured that it has the appropriate characteristics, and is resistant to stress due to transformer operation. The most commonly used method for evaluating insulation life is the accelerated thermal aging test. Insulating oil-immersed paper is sealed in a vessel with a ratio in the Accelerated Thermal Aging Chamber with a volume capacity of 3600 ml. It takes about 3000 ml of oil to be poured into a tube with a ratio of insulating oil to insulating paper rolled on copper which is 10:1 and then heated in a thermal oven to accelerate aging. This study aims to develop an Accelerated Aging Chamber for evaluating the performance of transformer isolation systems. The developed test cell is able to reach a set-point of 150°C in 16 minutes with on/off control while PID control in 37 minutes with a Human Machine Interface for monitoring and collecting temperature data in real time, and maintaining that temperature until the end of the experimental period. The results of the sample will later be tested for the characteristics of the transformer insulation, namely tensile strength, color scale, and breakdown voltage due to thermal stress.

**Kata Kunci:** Transformer, Accelerated Ageing Chamber, Insulation System, Thermal Stress

## 1. Pendahuluan

Secara umum diketahui bahwa keandalan transformator daya dan distribusi bergantung pada sistem isolasinya. Dalam keadaan transformator bekerja, terjadi kenaikan suhu pada transformator yang mempengaruhi degradasi terhadap isolasi kertas dan minyak transformator. Selama operasi, minyak dan kertas isolasi mengalami stress listrik, mekanik, dan termal sehingga kondisinya memburuk dari waktu ke waktu. Umur transformator terutama ditentukan oleh sistem isolasi kertas terendam minyak. Stress termal adalah faktor terpenting yang menyebabkan degradasi sistem isolasi selama umur penggunaan transformator. Berbagai jenis kombinasi material isolasi padat dan cair telah diusulkan, terutama dari bahan yang lebih ramah lingkungan. Pengusulan material isolasi baru ini memerlukan uji evaluasi kinerja pada skala laboratorium. Metode yang paling umum digunakan untuk evaluasi masa pakai isolasi adalah uji penuaan termal dipercepat. Biasanya, kertas terendam minyak isolasi disegel dalam bejana dengan rasio massa antara 10:1 dan 20:1 dan dipanaskan dalam oven termal untuk mempercepat penuaan termal.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan *Accelerated Ageing Chamber* dengan pemanas celup (*immersion heater*) untuk evaluasi kinerja sistem isolasi transformator dengan merujuk pada standar IEC dan IEEE yang berlaku. Diharapkan sel uji yang dikembangkan dapat mensimulasikan daur hidup transformator dalam waktu dipercepat, sehingga evaluasi kinerja sistem isolasi dapat disimulasikan di laboratorium.

## 2. Kajian Pustaka

Transformator mengalami penurunan kondisi seiring dengan bertambahnya waktu operasi karena berbagai proses penuaan dan hal yang mempercepat penuaan seperti kandungan air yang meningkat, suhu, dan proses oksidasi [1], [2]. Beberapa penelitian terdahulu telah melakukan penuaan termal dipercepat terhadap sistem isolasi transformator untuk mengevaluasi penurunan kerjanya. Penelitian [3] membahas penuaan kertas terendam

minyak dengan pengujian NIRS. Sampel minyak dan kertas dipanaskan menggunakan *chamber* eksperimen kaca yang dimasukkan kedalam oven. Penelitian [4] membahas efek penuaan termal minyak vegetal melalui karakterisasi termal menggunakan *chamber* eksperimen *stainless* yang dimasukkan kedalam oven. Penelitian [5] membahas penuaan termal sistem isolasi transformator menggunakan *chamber* eksperimen *stainless* dilengkapi dengan *thermocouple*, dengan pemanas oven listrik. Penelitian [6] menggunakan *chamber* eksperimen *stainless* dengan pemanas oven listrik untuk melakukan penuaan sistem isolasi transformator. Penelitian [7] mengembangkan *chamber* eksperimen pemanasan dipercepat berbahan *stainless* dengan pemanas celup.

### 2.1. Eksperimen *Thermal Ageing*

Kondisi kertas merupakan faktor yang sangat penting bagi kondisi suatu transformator [8], [9]. Sel uji penuaan termal harus dirancang untuk memungkinkan penuaan terpisah dari isolasi padat dan cair. Referensi dan kandidat sistem isolasi harus diekspos ke periode pengujian pada suhu tinggi yang dipilih. Periode pengujian ini terdiri dari paparan waktu tertentu pada suhu yang dipilih diikuti oleh tes diagnostik.

Rasio bobot komponen yang digunakan untuk membangun sel uji harus mewakili yang digunakan dalam elektroteknik perangkat yang dimodelkan. Untuk memastikan kesetaraan volume/berat masing-masing komponen dihitung sebagai persentase dari total volume/berat produk, ukuran konduktor, volume minyak dan volume isolasi yang digunakan dalam sel uji ini adalah 0,05% dari parameter yang sesuai dalam transformator daya. Persentase ini dipertahankan sambil menentukan bobot dari komponen individu yang akan digunakan dalam konstruksi pengujian obyek. Parameter desain dan rasio volume untuk ukuran konduktor, volume oli dan volume isolasi transformator.

### 2.2. Komponen Sel Uji Thermal

Sel uji thermal yang dikembangkan terdiri dari beberapa komponen sebagai berikut.

a. *Ageing Cells*. Setiap sel penuaan adalah wadah yang terbuat dari baja tahan karat, ukurannya ditentukan oleh

\* Korespondensi: [rahmanazisp@polinema.ac.id](mailto:rahmanazisp@polinema.ac.id)

a) Prodi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Polinema.  
Jalan Soekarno-Hatta No. 9 Malang 65141

ukuran benda uji. Volume sel harus mempertimbangkan ruang yang dibutuhkan untuk ekspansi termal cairan pada suhu penuaan. Kedua ujung sel harus dilengkapi dengan penutup baut yang dapat dilepas dan disegel. Benda uji dipasang di dalam sel yang menua. Desain wadah penuaan harus dikonfigurasi untuk mempertahankan pengontrol termokopel cairan dan komponen padat dari benda uji yang direndam dalam cairan di bawah semua penuaan suhu.

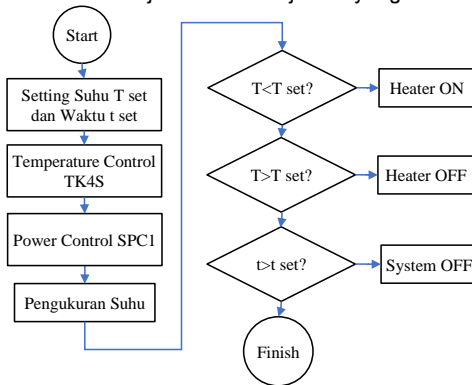
- b. *Immersion Heaters*. Pemanas harus memiliki kemampuan termal untuk mempertahankan suhu cairan uji dalam kisaran suhu yang ditentukan oleh prosedur pengujian.
- c. *Power Supply*. Catu daya terpisah harus disediakan untuk secara mandiri menetapkan suhu dalam cairan dan benda uji.
- d. *Control Circuit System*. Pemantauan otomatis dengan sensor termal mengontrol suhu benda uji dan cairan. Sirkuit umpan balik kontrol harus digunakan untuk menjaga setiap suhu dalam  $\pm 2$  C.

### 2.3. Penuaan Termal Dipercepat

*Accelerated Thermal Ageing* merupakan salah satu cara atau eksperimen dengan mempercepat waktu dengan menaikkan nilai *temperature*-nya. Pada keadaan normal suhu 105°C diperlukan waktu selama 20.000 jam, pada alat eksperimen ini penulis ingin memodifikasi suhu atau *temperature* dengan nilai sebesar 150°C dengan tujuan untuk mempersingkat waktu penuaan isolasi transformator dengan mengacu pada [IEC 60216-3 2006].

### 3. Metodologi

Gambar 1 menunjukkan alur kerja alat yang dikembangkan.



Gambar 1. Flowchart kerja alat

Kontrol mode operasi otomatis untuk *Accelerated Thermal Ageing Chamber* dilakukan dengan memanfaatkan *device autronics*, dimana *Temperature Control* untuk menjaga dua *device autronics* dapat menjalankan kontrol secara otomatis dengan melakukan beberapa *setting* parameter.

- a. Komponen *Accelerated Thermal Ageing Chamber* sudah terpasang semua.
- b. *Control Device Autronics* sudah di-wiring.
- c. Perakitan *Control Device Autronics* dan komponen *Accelerated Thermal Ageing Chamber*.
- d. Pastikan semua sudah terhubung dan *Device Control Autronics* mendapatkan suplai daya listrik.
- e. Melakukan *setting* parameter suhu maksimal, suhu minimal, dan arus output *heater*.

- f. Setelah proses *setting* parameter selesai, proses pertama yaitu pemanasan. Dengan memberikan output arus, *heater* akan bekerja.
- g. Pada saat proses pemanasan, *thermocouple* mengirimkan *signal* ke *Temperature Control*.
- h. *Temperature Control Autronics* membaca *signal* yang diberikan sensor *thermocouple*. Pada saat mencapai suhu minimal maka *heater* akan terus bekerja sampai mencapai suhu maksimal. Ketika sudah mencapai suhu maksimalnya, *Temperature Control* akan mematikan *heater*.
- i. *Heater* akan bekerja hingga suhu mencapai batas minimalnya, maka *Temperature Control* akan menghidupkan *heater*.

### 3.1. Komponen Sel Uji Penuaan Termal

Dalam perancangan dan pembuatan system pada sel uji penuaan termal perlu dilakukan penentuan spesifikasi alat terlebih dahulu. Penentuan ini mengacu pada standart kelistrikan (IEC 6233 dan IEEE C57.100). Spesifikasi sel uji *Accelerated Thermal Aging Chamber*, serta sampel sistem isolasi yang digunakan dijabarkan pada tabel sebagai berikut.

TABEL 1. SPESIFIKASI MEKANIK

Komponen	Bahan	Keterangan
Tangki	Stainless Steel	Diameter 150 mm, Tinggi 210 mm, ketebalan bahan 1,2mm
Seal	Cork	Diameter Dalam 150mm, Diameter Luar 175mm,
Pressure Relief Valve	Stainless Steel	Relief pressure valve dengan kinerja tekanan 25kpa
Sampling Valve	Stainless Steel	Menggunakan Swivel Sampler untuk cairan

TABEL 2. SPESIFIKASI SAMPEL

Sample	Bahan	Keterangan
Volume Minyak Transformator	-	3 liter
Isolasi Minyak Transformator	Mineral	As per IS 335-1993 (2010),
Isolasi Kertas Transformator	Selulosa	Kraft paper -5 mil, Kraft Paper -2 mil, Crepe Paper -5 mil

TABEL 3. SPESIFIKASI ELEKTRONIK

Komponen	Type	Keterangan
Temperature Control Autronics	TK4S Series	Input 220 VAC Arus Output 4-20 mA
Power Control Autronics	SPC1 Series	Input 220 VAC Input Arus SSR 4-20 mA Arus Output 35 A
Sensor Suhu	Thermocouple tipe K	Range Arus 4-20 mA Bekerja pada suhu 0 -200 oC
Elemen Heater	Spiral	Input 220 VAC Daya 150 Watt
Core Carrier Conductor	Cu atau Tembaga	Copper, 304.2 mm x 9.22 mm x 2.17 mm
MCB 2 A	Schenider	Input 220 VAC Arus Nominal 2 A

### 3.2. Desain

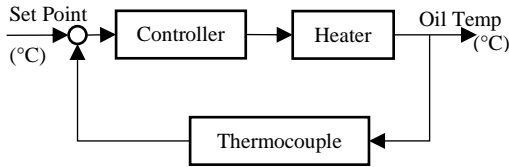
Gambar 3 menunjukkan desain sel uji yang dikembangkan.

- a. *Temperature Control Autronics*  
*Temperature Control Autonis* adalah suatu *device* untuk mengontrol suhu suatu ruang tetap konstan berdasarkan *setting* parameter. *Temperature Control Autronics* TK4S series, dimana

device ini menggunakan supply daya 220 V dengan output arus 4-20 mA. Produk TK4S series memiliki dua input SSR (*Solid State Relay*), satu input sensor suhu, dan support komunikasi data.

b. *Power Control Autonics*

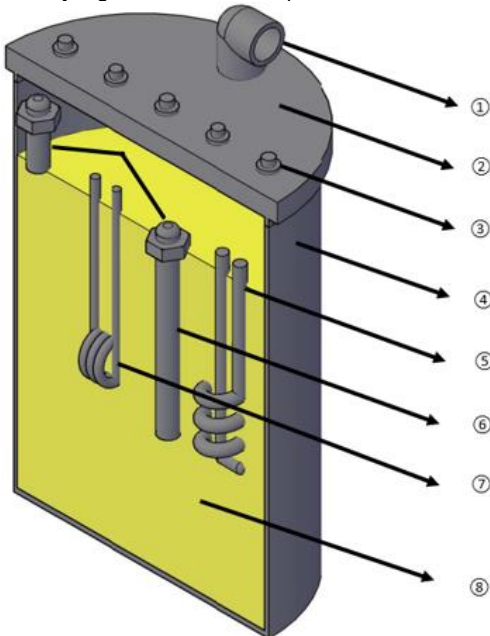
*Power Control Autonics* adalah device untuk mengontrol output arus dengan melakukan setting parameter. Produk SPC1 sebagai *Power Control Autonics*, dimana device ini menggunakan supply daya 220 V dengan input arus 4-20 mA. Produk SPC1 memiliki 1 output beban dengan output arus 35 A.



Gambar 2. Desain Sel Uji Penuaan Termal Dipercepat

c. Sensor Suhu

Sensor suhu yang akan digunakan dalam sel uji *Accelerated Thermal Ageing Chamber* ini adalah *thermocouple* tipe K yang diletakkan di dalam *chamber* sehingga suhu yang akan diukur adalah bagian dalam *chamber*. *Thermocouple* akan mendeteksi suhu pada lingkungannya dan kemudian mengirimkan nilai dari suhu tersebut dalam range tegangan atau arus selanjutnya akan menuju ke input TK4S dan nilai tersebut digunakan untuk memerintahkan output. Sensor *thermocouple* memiliki spesifikasi rentang suhu dari 0 sampai 200 derajat Celcius dengan tingkat akurasi 2.5°C atau 0.75%. Pada dasarnya *thermocouple* hanya terdiri dari dua kawat logam konduktor yang berbeda jenis dan digabungkan ujungnya. Satu jenis logam konduktor yang terdapat pada *thermocouple* akan berfungsi sebagai referensi dengan suhu konstan (tetap) sedangkan yang satunya lagi sebagai logam konduktor yang mendeteksi suhu panas.



- 1. Pressure Valve
- 2. Tutup tabung/chamber
- 3. Terminal komponen
- 4. Tabung
- 5. Elemen heater
- 6. Thermocouple
- 7. Core carrier conductor
- 8. Minyak isolasi transformator

Gambar 3. Desain Sel Uji Penuaan Termal Dipercepat

d. Elemen Heater

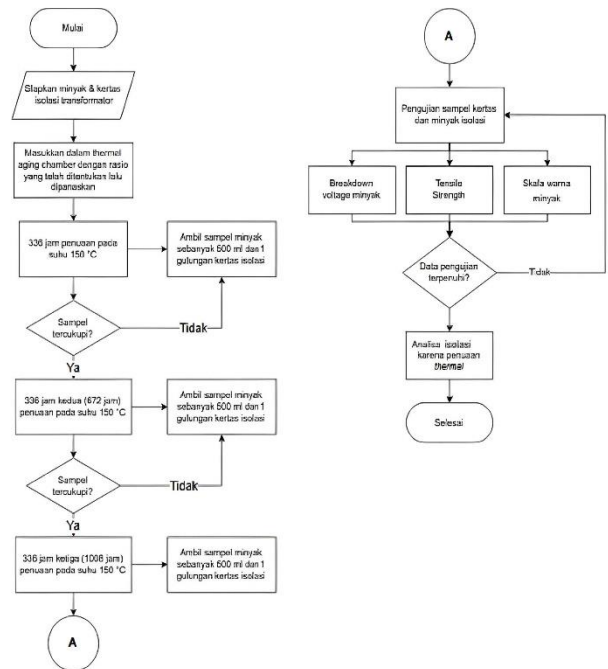
Elemen *heater* pada prinsipnya pemanasan dihasilkan dari arus listrik yang melalui elemen menemui hambatan sehingga menghasilkan pemanasan elemen. Pembuatan alat eksperimen ini dibutuhkan daya untuk mencapai suhu yang sudah direncanakan dalam satuan waktu jam. Besar daya hasil pemanasan tergantung dari kontanta jenis cairan, volume cairan, suhu yang diinginkan, dan waktu.

e. Volume Chamber

Volume adalah kapasitas daya suatu bangunan tiga dimensi, dimana persamaan perhitungannya menyesuaikan terhadap bangunan tersebut. Pada design alat eksperimen *Accelerated Thermal Ageing Chamber* berbentuk tabung. Perlu mengantisipasi penguapan minyak yang disebabkan pengaruh kenaikan suhu, maka diberikan ruang sebesar 20% dari total volume awal.

3.3. Diagram Alir Pengambilan sampel dan Pengujian

Pada Gambar 5 ditunjukkan diagram alir pengambilan sample dan pengujian isolasi kertas dan minyak transformator.



Gambar 5. Diagram alir sample dan pengujian

Pertama tama siapkan bahan isolasi kertas dan minyak isolasi transformator, pada *Accelerated Thermal Ageing Chamber* yang berkapasitas volume 3600 ml dibutuhkan minyak sekitar 3000 ml yang dituang pada tabung dengan rasio minyak isolasi dengan kertas isolasi yang digulung pada tembaga yaitu 10 : 1 dimana jika minyak isolasi sebanyak 3000 ml berarti untuk kertas isolasi yang digulung pada tembaga seberat 300 gram, dimana pada pengambilan sampel tersebut diambil setengah dari berat yang tadi ditentukan yaitu 1500 ml untuk minyak dan 150 gram untuk kertasisolasi gulungan, sehingga pada saat pengujian dan pengambilan sampel rasio selalu terjaga, untuk kertas Isolasi yang berupa gulungan, dilakukan pemotongan dengan ukuran berat sekitar 50 gram yang digulung pada tembaga di jenis kertas kraft. Jumlah total kertas yang di potong yaitu 3 gulungan. Setelah itu, kertas yang sudah dipotong dimasukkan ke dalam *Accelerated Thermal Ageing Chamber* bercampur dengan minyak isolasi dengan suhu 150°C dan proses penuaan dilakukan selama 1008 jam, yang mana proses pengambilan sampel terdapat 3

tahap, dimana di tahap satu yaitu 336 jam pertama, dilakukan pengambilan sampel minyak isolasi sekitar 500 ml dan kertas isolasi 1 gulungan, kemudian di tahap dua yaitu 336 jam kedua (672 jam), dilakukan pengambilan sample minyak isolasi sebanyak 500 ml dan kertas isolasi 1 gulungan, kemudian di tahap tiga yaitu 336 jam ketiga (1008 jam) dilakukan pengambilan sample minyak isolasi sebanyak 500 ml serta pengambilan dua jenis kertas isolasi yang berupa gulungan dengan ukuran gulungan sekitar 50 gram, setelah pengambilan sampel yang berjumlah tiga tahap tersebut, dilakukan pengujian susut umur trafo yang meliputi tegangan tembus, pengukuran skala warna Untuk minyak isolasi, sedangkan untuk kertas isolasi yang diuji hanyalah Tensile Strength setelah data pengujian terkumpul, lalu akan dilakukanya analisa terkait hasil pengujian tersebut.

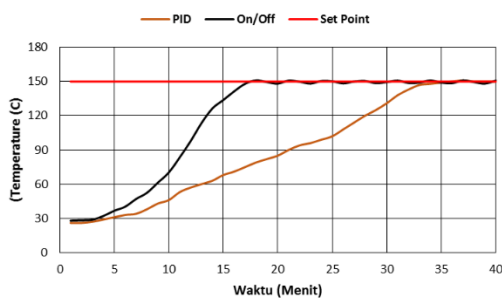
#### 4. Hasil dan Analisis

Telah dikembangkan sel uji penuaan termal sistem isolasi transformator, ditunjukkan oleh Gambar 6.

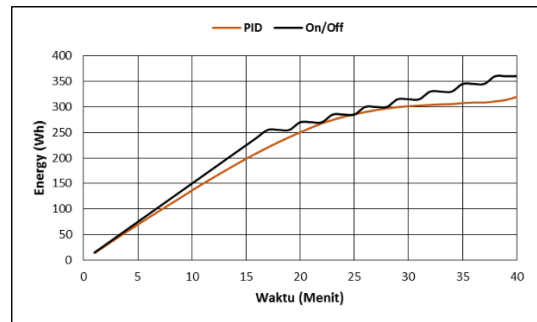


Gambar 6. Sel Uji Penuaan Termal Dipercepat Sistem Isolasi Transformator

Gambar 7 menunjukkan respon suhu minyak sampel didalam sel uji. Berdasarkan pengukuran, dibutuhkan waktu 16 menit dari suhu ruang 28°C menuju set point 150°C. Gambar 6 menunjukkan daur kerja pemanas saat *starting* hingga *steady*.



Gambar 7. Respon suhu minyak saat *starting* hingga *steady*



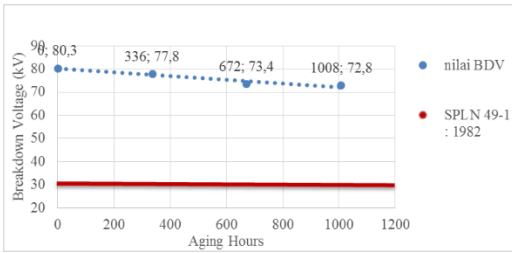
Gambar 8. Konsumsi energi listrik saat *starting* hingga *steady*

Berdasarkan hasil pengukuran didapatkan untuk mencapai suhu 150°C dibutuhkan waktu 16 menit menggunakan *heater* pada daya maksimal yaitu 900 Watt. Setelah mencapai suhu *set-point*, kontroler TK4S akan mengatur pemanas dengan kontrol on-off dengan siklus kerja dua menit off dan satu menit on. Didapatkan energi yang dibutuhkan untuk satu jam di awal proses penuaan adalah 465 Wh, sementara setelah mencapai *set point*, untuk menjaga suhu minyak sampel pada 150°C, dibutuhkan 300 Wh untuk satu jam. Berdasarkan nilai dari Kp: 100; Ki: 5; Kd: 80 didapatkan hasil proses kenaikan temperature dan membutuhkan selama 37 menit dan membutuhkan energy sebesar 396,22 Wh selama satu jam. Pada eksperimen sebelumnya dengan menggunakan sistem kontrol temperature mode on/off kenaikan temperature membutuhkan waktu selama 17 menit dengan konsumsi energy yang dibutuhkan selama satu jam sebesar 465 Wh. Jika ditinjau dari konsumsi energy selama satu jam maka control temperature mode PID lebih baik, akan tetapi jika ditinjau dari lama waktu *starting* dari suhu ruang sampai set point, control temperature mode on/off lebih baik dari dari control temperature mode PID.



Gambar 9. pengujian sampel minyak pada ZJY-80 kV Oil Breakdown voltage Tester

Telah dilakukan pengujian tegangan tembus minyak trafo shell diala B pada Gambar 9, dilakukan dengan menerapkan suhu pada minyak trafo yaitu 150°C, Dari hasil pengujian yang telah didapatkan, diperoleh gambar grafik karakteristik yang menunjukkan tegangan tembus minyak transformator shell diala B dengan pengaruh perbedaan lama pemanasan pada *Accelerated Thermal Ageing Chamber* pengujian menggunakan standart IEC 60156, elektroda uji setengah bola 2,5 mm pada ZJY-80 kV Oil Breakdown Tester, Pengujian tegangan tembus pada minyak trafo dilakukan pada minyak baru, sampel pertama (336 jam), kedua (672 jam), dan sampel ke tiga (1008 jam).



Gambar 10 Hasil pengujian Tegangan Tembus Minyak Trafo Shell Diallyl B Pengaruh lama pemanasan dengan suhu 150°C

Dari Gambar 10 dapat dilihat bahwa karakteristik minyak trafo shell diallyl B pada pengujian tegangan tembus dengan menggunakan elektroda uji setengah bola ZJY-80 kV Oil Breakdown Tester, tegangan tembus minyak trafo shell diallyl B sedikit mengalami penurunan dari kondisi baru hingga waktu pemanasan di 1008 jam, dan hasil dari keempat sampel minyak tersebut masih sangat bagus dan memenuhi standar SPLN 49-1:1982 yaitu tidak boleh kurang dari 30 kV untuk minyak isolasi transformator pada transformator distribusi.



Gambar 11. Pengujian sampel kertas pada Imada Digital Force Gauge

Ditunjukkan pada Gambar 11, pengujian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik kertas isolasi transformator selama mengalami penuaan termal yaitu pengujian tensile strength. Pengujian, tensile strength (TS) dilakukan di Laboratorium Teknologi Hasil Pertanian Universitas Brawijaya dengan menggunakan alat Imada Digital Force Gauge. Berikut ini hasil pengujian karakteristik kertas isolasi kraft pada temperatur penuaan 150°C. Hasil kertas isolasi setelah pengujian ditunjukkan pada gambar 12.

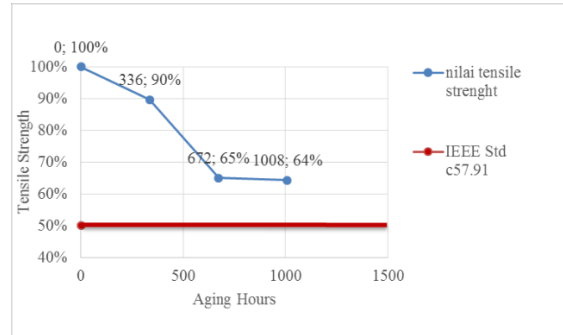


Gambar 12 Gambar kertas setelah di uji Tensile Strength

Dilihat dari tabel 4 kertas kraft mengalami perubahan warna yang semakin gelap seiring meningkatnya lama waktu pemanasan pada Accelerated Thermal Ageing Chamber.

Tabel 4. Karakteristik kertas isolasi jenis kraft terhadap temperature

Parameter	Temperatur penuaan 150°C			
	Baru	336 Jam	672 Jam	1008 Jam
Penampakan fisik				
Tensile strength (Mpa)	12,6	11,3	8,3	8,1



Gambar 13. Uji tensile strength kertas isolasi jenis kraft

Dari tabel 4 selain perubahan fisik kertas yang dapat dilihat secara visual perubahan lain yang dapat diamati, pada Gambar 13 dari hasil uji tensile strength bahwa seiring lamanya waktu pemanasan hasil uji tensile strength kertas tersebut mengalami penurunan, penurunan yang drastis dilihat pada saat 672 jam waktu pemanasan pada kertas isolasi tersebut, namun semua hasil masih di atas 50% dari nilai semula tensile strength, kriteria yang biasa digunakan untuk menandai berakhirnya usia pakai isolasi kertas adalah berkurangnya tensile strength menjadi 50% dari kondisi awal (IEEE Std C57.91).

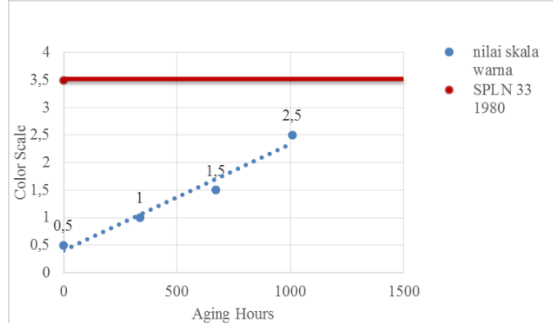


Gambar 14. ASTM D-1500 COLOR SCALE

Pengujian yang dilakukan untuk skala warna pada minyak yaitu dengan ASTM D-1500 COLOR SCALE pada ke 4 sampel minyak yang ditunjukkan pada Gambar 14, termasuk minyak baru dengan 3 waktu pengambilan sampel yang berbeda yaitu 336 jam, 672 jam dan 1008 jam.

Tabel 5. Karakteristik skala warna minyak isolasi terhadap waktu pemanasan

Parameter	Temperatur penuaan 150°C			
	Baru	336 Jam	672 Jam	1008 Jam
Penampakan Fisik				
Skala warna	0.5	1.0	1.5	2.5



Gambar 15. Uji skala warna minyak isolasi

Pada Gambar 15 dapat dilihat bahwa skala warna minyak shell diallyl B mengalami kenaikan seiring lamanya durasi penuaan.

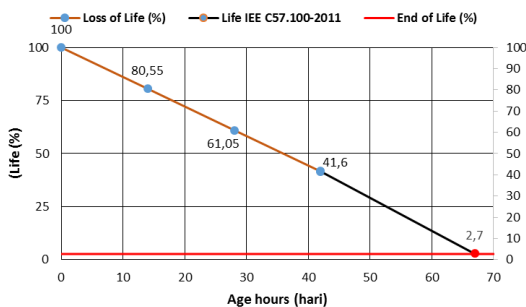
dari gambar grafik diatas berdasarkan persyaratan dalam IEC 60422 warna maksimum minyak untuk pendinginan di peralatan listrik baru yaitu 2,0 dan warna maksimum minyak transformator yang baik tidak lebih dari 4,5 hal ini berarti bahwa semua sampel minyak yang telah diuji mempunyai skala warna yang masih dalam standart.

Telah dilakukan pengujian sample isolasi kertas dan minyak transformator dengan eksperimen pada temperature 150°C selama 42 hari, disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil pengujian sample isolasi kertas dan minyak transformator

Day	Age Hours	BDV (kV)	Tensile Strength (%)	Color Scale
0	0	80,3	100	0,5
14	336	77,8	90	1
28	672	73,4	65	1,5
42	1008	72,8	64	2,5

Hasil dari keseluruhan pengujian sample menunjukan bahwa nilai dari pengujian selama 42 hari masih dalam standart.



Gambar 16. Loss of life selama eksperimen 42 hari

Nilai dari %loss of life dapat diketahui susut umur transformator selama uji penuaan thermal selama 14 hari sebesar 19,45% dan 42 hari sebesar 41,6% dari normal insulation life nya (65000h). Hasil eksperimen dengan periode waktu 42 hari dengan temperature 150°C belum mencapai end of life, pada Gambar 16 dapat kita lihat untuk temperature 150°C membutuhkan periode waktu 67 hari dalam mencapai end of life dengan mengacu pada IEEE C57.100-2011 [10].

$$LIFE = EXP\left[\frac{15000}{T+273}-28.082\right] \quad (1)$$

Berdasarkan IEEE C57.100-2011 [10] pada Annex A untuk penuaan satu titik, persamaan yang digunakan untuk menghitung lama penuaan termal pada suhu yang digunakan menggunakan persamaan diatas. Dimana LIFE adalah usia isolasi transformator dalam jam, dan T adalah suhu penuaan dalam Celcius. Apabila penuaan dilakukan pada suhu 150°C, maka berdasarkan perhitungan didapatkan durasi yang diperlukan untuk mengevaluasi daur hidup sistem isolasi transformator pada sel uji adalah 1602 jam atau 67 hari.

## 5. Kesimpulan

Telah dikembangkan sel uji untuk mengevaluasi sistem isolasi transformator kertas terendam minyak. Kinerja sistem isolasi dapat disimulasikan menggunakan eksperimen dipercepat dengan menaikkan suhu untuk memperpendek usia sistem isolasi. Sel uji yang dikembangkan mode control on/off mencapai set-point

150°C dalam 16 menit dan mode control PID dalam 37 menit dengan konsumsi energy lebih rendah sebesar 396 Wh untuk menjaga pada suhu tersebut hingga akhir masa eksperimen. Selanjutnya, sampel yang telah dituakan perlu diuji lebih lanjut untuk mendapatkan kekuatan dielektrik minyak dan kekuatan mekanis kertas isolasi serta skala warna masih dalam standart dikarenakan periode waktu selama eksperimen adalah 67 hari dalam mencapai end of life nya. Maka untuk eksperimen selanjutnya periode waktu yang digunakan yaitu 67 hari pada temperature 150°C atau periode waktu 30 hari dengan menaikkan temperature 160°C saat eksperimen.

## 6. Daftar Pustaka

- [1] CIGRE 227, "Life management Techniques for Power Transformer," 2003.
- [2] R. A. Prasojo, K. Diwyacitta, Suwarno, dan H. Gumilang, "Transformer paper expected life estimation using ANFIS based on oil characteristics and dissolved gases (Case study: Indonesian transformers)," *Energies*, vol. 10, no. 8, 2017.
- [3] F. Tang, Y. Zhang, B. Yuan, Y. Li, W.-B. Zhang, dan G.-J. Zhang, "Ageing condition assessment of oil-paper insulation using near infrared spectroscopy detection and analytical technique," *J. Eng.*, vol. 2019, no. 16, hal. 3026–3029, 2019.
- [4] C. Fernandez-Diego, A. Ortiz, I. Fernandez, I. Carrascal, C. J. Renedo, dan F. Delgado, "Assessment of the effect of commercial vegetal oils on Kraft paper ageing through mechanical characterization," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 25, no. 5, hal. 1880–1887, 2018.
- [5] M. Kohtoh, G. Ueta, S. Okabe, dan T. Amimoto, "Transformer insulating oil characteristic changes observed using accelerated degradation in consideration of field transformer conditions," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 3, hal. 808–818, 2010.
- [6] Z. Poniran dan Z. A. Malek, "Life assessment of power transformers via paper ageing analysis," *POWERENG 2007 - Int. Conf. Power Eng. - Energy Electr. Drives Proc.*, hal. 460–465, 2007.
- [7] A. K. Mehta, R. N. Sharma, S. Chauhan, dan S. Saho, "Transformer diagnostics under dissolved gas analysis using Support Vector Machine," *Proc. 2013 Int. Conf. Power, Energy Control. ICPEC 2013*, hal. 181–186, 2013.
- [8] R. A. Prasojo, A. Setiawan, Suwarno, N. U. Maulidevi, dan B. A. Soedjarno, "Development of Analytic Hierarchy Process Technique in Determining Weighting Factor for Power Transformer Health Index," in *The 2nd International Conference on High Voltage and Power Systems ICHVEPS*, 2019.
- [9] R. A. Prasojo, Suwarno, N. U. Maulidevi, dan B. A. Soedjarno, "A Multiple Expert Consensus Model for Transformer Assessment Index Weighting Factor Determination," in *8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 2020, hal. 234–237.
- [10] C57.100-2011, *IEEE Standard Test Procedure for Thermal Evaluation of Liquid-Immersed Distribution and Power Transformers*, no. January. 2011.