

RANCANG BANGUN SEL UJI PENUAAN TERMAL DIPERCEPAT SISTEM ISOLASI TRANSFORMATOR

Rahman Azis Prasajo¹⁾, Kresna Bayu Priambodho²⁾, Rohmanita Duanaputri³⁾, Galuh Prawestri Citra Handani⁴⁾, Sukamdi⁵⁾

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang
Jalan Sukarno Hatta No. 9 Malang

¹⁾rahmanazisp@polinema.ac.id

²⁾kresnabayu5800@gmail.com

³⁾rohmanitar@polinema.ac.id

⁴⁾galuh.prawestri@polinema.ac.id

⁵⁾sukamdi@polinema.ac.id

Abstrak

Sistem isolasi transformator berupa kertas terendam minyak, adalah bagian yang paling penting dari suatu transformator. Sistem isolasi ini perlu dipastikan memiliki karakteristik yang sesuai, dan tahan terhadap stress karena operasi transformator. Metode yang paling umum digunakan untuk evaluasi masa pakai isolasi adalah uji penuaan termal dipercepat. Kertas terendam minyak isolasi disegel dalam bejana dengan rasio tertentu lalu dipanaskan dalam oven termal untuk mempercepat penuaan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan *Accelerated Ageing Chamber* untuk evaluasi kinerja sistem isolasi transformator. Sel uji yang dikembangkan mampu mencapai *set-point* 150°C dalam 16 menit, dan menjaga pada suhu tersebut hingga akhir masa eksperimen.

Kata Kunci: transformator, *Accelerated Ageing Chamber*, *thermocouple*

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 thermal 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 kinerjanya. 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 thermal 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*

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.

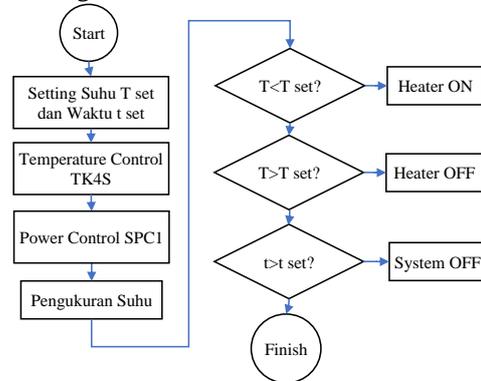
- Ageing Cells.* Setiap sel penuaan adalah wadah yang terbuat dari baja tahan karat, ukurannya ditentukan oleh ukuran benda uji. Volume sel harus mempertimbangkan ruang yang dibutuhkan untuk ekspansi termal cairan pada suhu penuaan. Kedua ujung sel harus dilengkapi dengan penutup baut yang dapat dilepas 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.
- Immersion Heaters.* Pemanas harus memiliki kemampuan termal untuk mempertahankan suhu cairan uji dalam kisaran suhu yang ditentukan oleh prosedur pengujian.
- Power Supply.* Catu daya terpisah harus disediakan untuk secara mandiri menetapkan suhu dalam cairan dan benda uji.
- 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 ± 2 K.

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.

- Komponen *Accelerated Thermal Ageing Chamber* sudah terpasang semua.
- Control Device Autronics* sudah di-wiring.
- Perakitan *Control Device Autronics* dan komponen *Accelerated Thermal Ageing Chamber*.
- Pastikan semua sudah terhubung dan *Device Control Autronics* mendapatkan suplai daya listrik.
- Melakukan *setting* parameter suhu maksimal, suhu minimal, dan arus output *heater*.
- Setelah proses *setting* parameter selesai, proses pertama yaitu pemanasan. Dengan memberikan output arus, *heater* akan bekerja.
- Pada saat proses pemanasan, *thermocouple* mengirimkan *signal* ke *Temperature Control*.
- 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*.
- 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 | <i>Stainless Steel</i> | Diameter 150 mm, Tinggi 210 mm, ketebalan bahan 1,2mm |
| Seal | <i>Cork</i> | Diameter Dalam 150mm, Diameter Luar 175mm, |
| Pressure Relief Valve | <i>Stainless Steel</i> | Relief pressure valve dengan kinerja tekanan 25kpa |
| Sampling Valve | <i>Stainless Steel</i> | 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 | Tipe | Keterangan |
|------------------------------|---------------------|---|
| Temperature Control Autonics | TK4S Series | Input 220 VAC Arus Output 4-20 mA |
| Power Control Autonics | 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 × 9.22 mm × 2.17 mm |
| MCB 2 A | Schenider | Input 220 VAC Arus Nominal 2 A |

3.2. Desain

Gambar 2 menunjukkan desain sel uji yang dikembangkan.

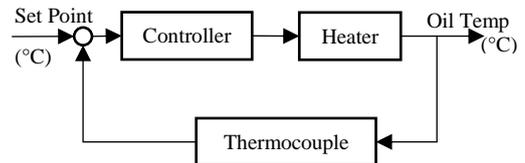
a. Temperature Control Autonics

Temperature Control Autonis adalah suatu *device* untuk mengontrol suhu suatu ruang tetap konstan berdasarkan *setting* parameter. *Temperature Control Autonics* 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

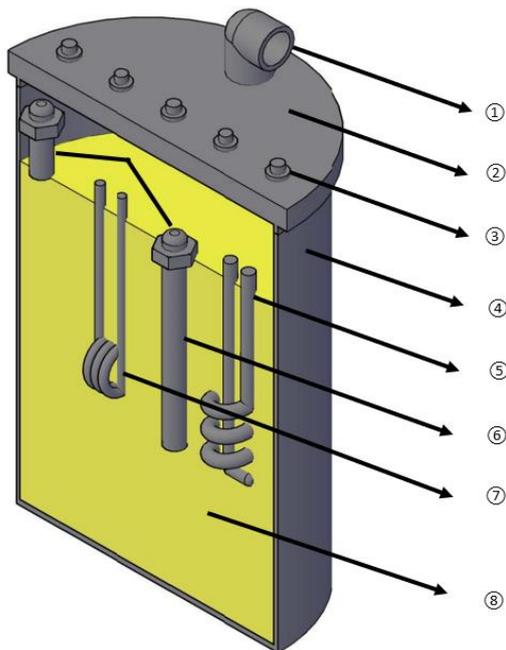
Power Control Autonics adalah *device* untuk mengontrol output arus dengan melakukan *setting* parameter. Produk SPC1 sebagai *Power Control Autonics*, dimana *device* ini menggunakan *supply* daya 220 V dengan input arus 4-20 mA. Produk SPC1 memiliki 1 output beban dengan output arus 35 A.



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 | 5. Elemen heater |
| 2. Tutup tabung/chamber | 6. Thermocouple |
| 3. Terminal komponen | 7. Core carrier conductor |
| 4. Tabung | 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.

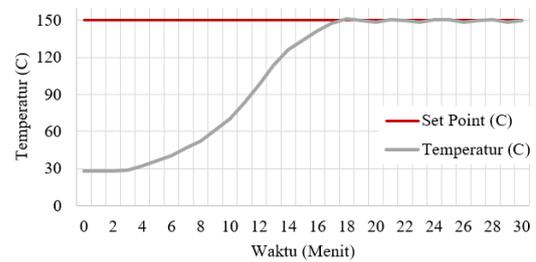
4. HASIL DAN ANALISIS

Telah dikembangkan sel uji penuaan termal sistem isolasi transformator, ditunjukkan oleh Gambar 4.

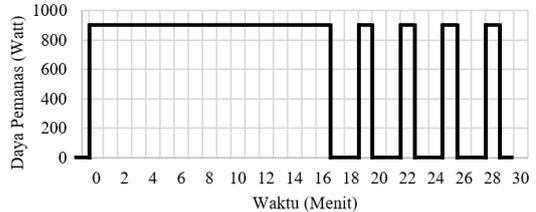


Gambar 4. Sel Uji Penuaan Termal Dipercepat Sistem Isolasi Transformator

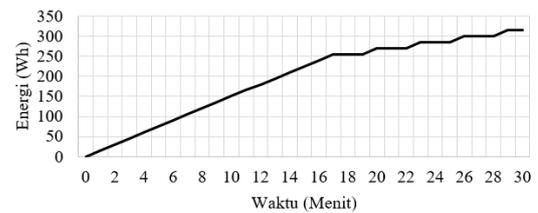
Gambar 5 menunjukkan respon suhu minyak sampel didalam sel uji. Berdasarkan pengukuran, dibutuhkan waktu 16 menit dari suhu ruang 28°C menuju set point 150°C. Gambar 6 menunjukkan daur kerja pemanas saat starting hingga steady.



Gambar 5. Respon suhu minyak saat starting hingga steady



Gambar 6. Daur kerja pemanas saat starting hingga steady



Gambar 7. 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.

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

Berdasarkan IEEE C57.100-2011 [8] 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 mencapai *set-point* 150°C dalam 16 menit, dan 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.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] CIGRE 227, "Life management Techniques for Power Transformer," 2003.
- [2] R. A. Prasajo, 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] C57.100-2011, *IEEE Standard Test Procedure for Thermal Evaluation of Liquid-Immersed Distribution and Power Transformers*, no. January. 2011.