Analisis Pengujian Kualitas Isolasi Transformator Daya di PT. Indah Kiat Pulp and Paper Perawang

Rifky Ondrialdi¹, Usaha Situmeang², Zulfahri³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning

Jl. Yos Sudarso km. 8 Rumbai, Pekanbaru, Telp. (0761) 52324

Email: rifkyondrialdi17@gmail.com, usahasitumeang@unilak.ac.id, zulfahri@unilak.ac.id

Abstrak

Degradasi isolasi/penuaan merupakan salah satu penyebab utama kerusakan transformator. Bagian terlemah dari sistem isolasi adalah kerentanan terhadap kadar air, oksigen, terhadap panas berlebih dan tekanan mekanis. Pemburukan atau kegagalan isolasi dapat menyebabkan kegagalan operasi atau bahkan kerusakan transformator. Salah satu metode untuk mengetahui kondisi isolasi adalah dengan melakukan pengujian *power factor* (PF) atau *Dissipation factor* (DF) isolasi dan pengujian rasio belitan. Pengujian ini dilakukan berdasarkan standart IEEE C57.152-2013 dimana nilai standar pengujian 0,5 % dalam keadaan baik, apabila melebihi dari 0,5 % dianggap mengalami pemburukan. Nilai pengujian PF/DF untuk transformator IP954-T01 adalah 0,243 % masih kecil dari standart 0,5 % yang mengidentifikasi kondisi isolasi masih bagus. Sedangkan untuk pengujian PF/DF transformator IP254-T02 adalah 0,655 % lebih besar dari 0,5 % yang mengidentifikasi terjadinya penurunan kualitas isolasi. Pengujian PF/DF isolasi minyak untuk transformator IP954-T01 hasil uji dari tegangan 10 kV adalah 0,054 % dan IP254-T02 hasil uji dari tegangan 10 kV adalah 0,144 % masih kecil dari 0,5 % yang mengidentifikasi kualitas isolasi minyak masih bagus. Untuk hasil pengujian ratio belitan/tegangan untuk transformator IP954-T01 nilai persen deviasi belitan pada posisi *Tap changer* 3 bernilai 0,288 %, persen deviasi masih kecil dari 0,5%. Sedangkan transformator IP254-T02 nilai pada posisi *Tap changer* 3 bernilai 1,440 % besar dari 0,5 % mengindikasikan adanya masalah pada belitan.

Kata kunci : Isolasi, Power factor/Dissipation factor, Ratio tegangan.

Abstract

Insulation degradation/aging is one of the main causes of transformer breakage. The weakest part of insulation system is its vulnerability to water content, oxygen, over-heat, and mechanical pressure. Degradation or even failure on insulation can lead to operation failures or even transformer failures. Several methods to determine the condition of insulation are by conducting insulation power factor (PF) and dissipation factor (DF) test as well as turns ratio test. The test was conducted based on IEEE C57.152-2013 standard where the test standard value was 0,5% to be classified as 'good', while if the value reached more than 0,5%, it was considered as 'experiencing degradation'. The PF/DF test result value on IP954-T01 was 0,243%, lower than 0,5% of standard value, indicating that the insulation was still in good condition. In contrast, the test result value on IP254-T02 transformer was 0,655%, higher than 0,5%, indicating that it was experiencing insulation degradation. The PF/DF oil insulation test result value on IP954-T01 transformer with 10 kV voltage was 0,054%, while on IP254-T02 transformer was 0,144%, indicating that both had lower values than the standard one, and the oil insulation on both transformers were in good condition. For the test result value of turns/voltage ratio on IP954-T01 transformer, the turns deviation percentage on Tap changer 3 position was 0,288%, which was lower than 0,5%, while on IP254-T02 transformer the value was 1,440%, which was higher than 0,5% indicating that there was a problem with the winding.

Keywords : Insulation, Power factor/Dissipation factor, Voltage Ratio.

1. PENDAHULUAN

Transformator merupakan peralatan statis dengan rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari dua atau lebih belitan, yang bekerja dengan metode secara induksi elektromagnetik, mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama. Transformator merupakan salah satu bagian penting pada sistem kelistrikan yang memiliki fungsi untuk melakukan pengkonversian daya listrik. Transformator sering menjadi peralatan listrik yang kurang diberikan perawatan dan penanganan yang memadai.

Dengan bertambahnya usia transformator daya, isolasi *internal* pada transformator tersebut mengalami penurunan, sehingga meningkatkan terjadinya resiko kegagalan isolasi. Degradasi isolasi/penuaan merupakan salah satu penyebab utama kerusakan transformator [1], [2]. Bagian terlemah dari sistem isolasi adalah kerentanan terhadap kadar air, oksigen, terhadap panas berlebih dan tekanan mekanis. Ketika unsur-unsur ini digabungkan, proses terjadinya penuaan isolasi akan semakin cepat.

Pemburukan atau kegagalan isolasi dapat menyebabkan kegagalan operasi atau bahkan kerusakan transformator. Salah satu metode untuk mengetahui kondisi isolasi adalah dengan melakukan pengujian *power factor* dan *dissipation factor* isolasi serta pengujian rasio tegangan. Sehingga hasil dari analisis hasil pengujian-pengujian tersebut dapat mengetahui kondisi isolasi pada transformator dalam keadaan baik atau tidak.

2. METODE PENELITIAN

Tahapan atau langkah-langkah penelitian dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) yang dilakukan seperti pada Gambar 1.

Sistem Kelistrikan PT. IKPP Perawang

Sistem kelistrikan di PT. IKPP menggunakan frekuensi 50 Hertz. Tegangan pembangkitan di PT. IKPP sebagian besar adalah 11 kV, yang nantinya akan di naikan dengan step up transformer menjadi 33 kV, 66 kV atau 150 kV sebelum di distribusikan ke beban-beban. Unit pembangkitan di PT. IKPP di bagi dalam 3 kelompok, yaitu *Power Generating 1* (PG-1), *Power Generating 2* (PG-2), dan

Power Generating 3 (PG-3). Spesifikasi transformator dengan nomor *function location* IP954-T01 di PT. IKPP Perawang seperti pada Tabel 1. Sementara IP254-T02 pada Tabel 2

Gambar 1. Flowchart penelitian

Tabel 1 Spesifikasi Transformator IP954-T01

No. Function location	IP954-T01
Deskripsi	Main Transformer Turbine 14
Daya	45 MVA
Tegangan	33/11 kV
Vektor Grup	D – Y
Volume Minyak	14.450 kg
Berat Total	62.900 kg
Jenis Pendingin	ONAN/ONAF
Tahun Pembuatan	1996
Merk	Shihlin
Frekuensi	50 HZ

Tabel 2 Spesifikasi Transformator IP254T02

No. Function location	IP254-T02
Deskripsi	Transformer Feeder Bus –B
Daya	14/17 MVA
Tegangan	3,3/11 kV
Vektor Grup	D – D
Volume Minyak	70000 (kg)
Berat Total	- (kg)
Jenis Pendingin	ONAN/ONAF
Tahun Pembuatan	1989
Merk	New Korea Elektrik
Frekuensi	50 Hz

Transformer

Transformator merupakan peralatan statis untuk memindahkan energi listrik dari satu rangkaian listrik ke rangkaian lainnya dengan mengubah tegangan tanpa merubah frekuensi. Transformator disebut peralatan statis karena tidak ada bagian yang bergerak/berputar, tidak seperti motor atau generator. Pengubahan tegangan dilakukan dengan memanfaatkan prinsip induktansi elektromagnetik pada lilitan. Fenomena induksi elektromagnetik yang terjadi dalam satu waktu pada transformator adalah induktansi sendiri pada masing-masing lilitan diikuti oleh induktansi bersama yang terjadi antar lilitan. Secara sederhana transformator dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu lilitan primer, lilitan sekunder dan inti besi. Lilitan primer merupakan bagian transformator yang terhubung dengan rangkaian sumber energi (catu daya) [3].

Pengujian Isolasi Transformator

Isolasi transformator merupakan bahan dielektrik yang berfungsi untuk memisahkan dua bagian yang bertegangan, misalnya antara kumparan dengan tangki trafo. Transformator disebut peralatan statis karena tidak ada bagian yang bergerak/berputar, tidak seperti motor atau generator. Pengubahan tegangan dilakukan dengan memanfaatkan prinsip induktansi elektromagnetik pada lilitan seperti Gambar 2 [4].

Gambar 2. Isolasi pada kumparan dan inti transformator

Kegagalan Isolasi

Isolasi merupakan bahan atau kombinasi bahan non-konduktif yang sesuai yang menyediakan isolasi listrik dua bagian pada tegangan yang berbeda. Isolasi berfungsi untuk memisahkan bagian-bagian yang mempunyai tegangan yang berbeda supaya diantara bagian-bagian tersebut tidak terjadi lompatan listrik

(*flash-over*) atau percikan (*spark-over*). Kegagalan isolasi pada peralatan tegangan tinggi yang terjadi pada saat peralatan sedang beroperasi bisa menyebabkan kerusakan alat sehingga kontinuitas sistem menjadi terganggu. Salah satu bahan isolasi yang banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik adalah minyak. Misalnya digunakan sebagai isolasi inti pada transformator daya sekaligus sebagai media pendingin [4]

Kapasitansi, *Power Factor*, *Dissipation Factor*

Kapasitansi suatu sistem ditentukan oleh besarnya muatan yang dapat disimpannya pada tegangan tertentu. Muatan berbanding lurus dengan bidang pelat konduktif, konstanta dielektrik dari bahan isolasi berbanding terbalik antara pelat dengan jarak di antara plat tersebut [5], [6]. Vakum dan udara memiliki konstanta dielektrik 1 dan semua bahan isolasi lainnya memiliki konstanta dielektrik lebih besar dari 1 seperti Gambar 3 [4]

Gambar 3. Pemodelan kapasitansi pada isolasi

Kapasitor yang sempurna apabila dicatu tegangan bolak balik maka arusnya akan tertinggal sebesar 90° terhadap tegangannya, tetapi karena adanya disipasi daya (dimodelkan sebagai resistor R) maka beda sudut antara arus dan tegangannya lebih kecil dari 90° seperti pada Gambar 4 [4].

Gambar 4. Hubungan vektor tegangan, resistif, dan arus kapasitif

Power Factor (faktor daya) dalam rangkaian didefinisikan sebagai rasio daya nyata

(W) terhadap volt-ampere (W/VA). *Power Factor* juga didefinisikan sebagai *cosinus* sudut antara tegangan dan arus dalam suatu rangkaian, dengan sudut yang biasanya disebut sebagai *theta* (θ). Nilai sudut ini biasanya akan mendekati nilai 90° untuk rangkaian kapasitif (isolasi) [4]

Dissipation Factor (rugi-rugi daya) didefinisikan sebagai rasio daya nyata (W) terhadap volt-ampere reaktif (W/VAr) dalam suatu rangkaian. *Dissipation Factor* sama dengan *Tangent Delta* ($\tan \delta$), di mana *Delta* (δ) adalah sudut 90° dikurangi *theta* (θ) [4].

Prinsip Power Factor atau Dissipation Factor

Power factor/ Dissipation factor mengukur kapasitansi isolasi, rugi-rugi dielektrik AC, dan rasio jumlah terukur. Saat isolasi diberi energi dengan tegangan AC, isolasi menarik arus pengisian. Arus pengisian ini terdiri dari dua komponen yang disebut arus kapasitif (I_C) dan arus resistif (I_R). Arus kapasitif menghasilkan tegangan uji terapan sebesar 90° , sedangkan arus resistif berada satu fasa dengan tegangan seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Arus kapasitif berbanding lurus dengan konstanta dielektrik, luas, serta voltase dan berbanding terbalik dengan ketebalan isolasi yang diuji [4].

Perubahan arus kapasitif menunjukkan degradasi atau pemburukan pada isolasi, seperti lapisan basah atau korsleting, atau perubahan geometri isolasi. Arus resistif memasok energi yang hilang akibat rugi-rugi dielektrik seperti pembentukan karbon, konduksi permukaan, dan korona. Rugi-rugi dielektrik akibat pencemaran air atau pelepasan karbon atau bentuk kemerosotan lainnya meningkat dengan kuadrat voltase, dimana rugi-rugi diakibatkan karena peningkatan korona secara eksponensial saat tegangan meningkat. Pengujian PF/DF cukup sensitif untuk mendeteksi masalah kelembaban yang terjadi pada isolasi dibandingkan dengan uji ketahanan isolasi [4].

Deskripsi Peralatan Uji PF/DF Doble

Peralatan uji *Doble Engineering Company* didasarkan pada peralatan uji MEU, namun teori dan operasi rangkaian tes lainnya sama untuk semua peralatan uji yang diproduksi oleh *Doble Engineering*. Jenis uji MEU memiliki rangkaian pengukuran khusus dimana arus total (I_T) peralatan isolasi diukur. Kemudian jaringan

penyeimbang dialihkan ke rangkaian pengukuran dan komponen kapasitif (I_C) dari arus beban seimbang, kemudian mengukur komponen fasa arus resistif (I_R) dari arus peralatan. Seperti Tabel 3 merupakan spesifikasi dari peralatan *Doble* [4], [7].

Tabel 3 Spesifikasi Alat uji *Doble*

<i>Doble Engineering Watertown, MA</i>	<i>Voltage (kV)</i>
MEU	2,5
M2H-MCM-fully Automated	12
Type M4000/4100	12

Hasil pengujian PF/DF isolasi bisa mengacu pada standar IEEE std.C57.152-2013 ataupun standar *Doble* [8]. Berikut merupakan persamaan yang digunakan untuk menghitung PF/DF. Nilai PF/DF diberikan oleh $\cos \theta$, atau persamaannya dapat ditulis seperti persamaan berikut [4] :

$$\% PF = \frac{\text{Rugi dielektrik dalam mA}}{\text{mA}} \times \text{Corection Factor}$$

$$\% PF = \frac{W \times 10}{\text{mA}} \times C_f \quad (1)$$

Selanjutnya dapat diilustrasikan dengan menggunakan Gambar 5 dengan PF isolasi sebesar 1,0 %

Gambar 5 Vektor diagram pengujian isolasi dengan PF = 1 %

$$PF = \cos \theta = 0,01 \text{ (1\%)} \quad (2)$$

$$\text{Arc cos (0,01)} = 89,43^\circ$$

Nilai *Power Factor* (PF) hampir sama dengan *Dissipation Factor* (DF) ketika PF dan DF <10%, yaitu :

$$\cos \theta = \tan \delta = \cotan \theta \quad (3)$$

$$\cos (89,43^\circ) = \tan (0,57^\circ) = 0,01 \text{ (1 \%)}$$

Oleh karena itu, hasil uji *Power Factor* sebanding dengan hasil uji *Dissipation Factor* atau $\tan \delta$ pada nilai $\leq 10 \%$ [4].

Metoda Pengujian Rasio Tegangan/Belitan Pada Transformator

Pengujian ratio belitan pada dasarnya untuk mendiagnosa adanya masalah dalam antar belitan dan bagian-bagian sistem isolasi pada transformator. Pengujian ini akan mendeteksi adanya hubung singkat antar lilitan, putusnya lilitan, maupun ketidak normalan pada *tap changer*. Metoda pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan variabel pada sisi *High Voltage* (HV) dan melihat tegangan yang muncul pada sisi *Low Voltage* (LV) [4].

Konsep dasar untuk melakukan pengujian ratio transformator ini secara sederhana kita dapat menggunakan sebuah *supply* tegangan AC tiga pisa 380 V. Dengan mengacu pada rumus dasar rasio transformator [9]:

$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} \quad (4)$$

Keterangan :

N_P = Banyak lilitan pada kumparan primer (Volt)

N_S = Banyak lilitan pada kumparan sekunder (Volt)

V_P = Tegangan pada kumparan primer (Volt)

V_S = Tegangan pada kumparan sekunder (Volt)

I_P = Arus primer (Amper)

I_S = Arus sekunder (Amper)

Metoda pengujiannya adalah dengan memberikan tegangan variabel pada sisi HV dan melihat tegangan yang muncul pada sisi LV. Dengan membandingkan tegangan sumber dengan tegangan yang muncul maka dapat diketahui rasio perbandingannya. Pengujian dapat dilakukan dengan menggunakan alat *Transformer Turn Ratio Test* [10].

Pengujian Transformer Turn Ratio (TTR)

Pengujian TTR adalah dengan cara memberi tegangan pada satu gulungan transformator dan mendeteksi tegangan yang dihasilkan pada gulungan lain pada inti yang sama. Pengujian TTR memberikan informasi berikut [10], [11]:

- Menentukan rasio belitan dan polaritas transformator satu dan tiga fasa,
- Menegaskan rasio, polaritas, dan vektor pada *nameplate* transformator
- Menentukan rasio dan polaritas (tapi bukan rating tegangan) transformator tanpa *nameplate*. Pengujian mencakup semua posisi tap tanpa beban pada transformator. Jika diuji pada tap beban, pembacaan dapat diambil untuk referensi perbandingan di masa depan, namun akan menyimpang dari peringkat *nameplate* transformator.
- Mengidentifikasi masalah pada gulungan transformator, seperti rangkaian terbuka dan hubung singkat dari sensitivitas *turn-to-turn*.

Pengukuran ratio berguna untuk membuktikan perbandingan tegangan HV dan tegangan LV sesuai dengan *design/ requirement* dan perbandingan tegangan HV/LV sebanding dengan perbandingan jumlah lilitan HV dan LV dengan cara mengukur tegangan sekunder transformator daya di mana, akan diberi tegangan primer yang bervariasi dengan batas toleransi tegangan maksimum dan minimum 5 % dari tegangan nominalnya dengan ketentuan sebagai berikut :

$$\text{Turn Ratio} = \frac{\text{HV Winding Voltage}}{\text{LV Winding Voltage}}$$

% Deviation

$$= \frac{\text{Turn rasio pengujian} - \text{Turn rasio name plate}}{\text{Turn rasio name plate}} \times 100\% \quad (5)$$

Kriteria kelayakan operasional transformator untuk deviasi tanpa beban dari rasio belitan $\leq 0,5 \%$ dari *nameplate* [10].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Komponen Uji dan Persentase PF/DF Isolasi Padat Untuk Transformator IP954-T01

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 3. maka penentuan nilai resistansi dan kapasitansi isolasi uji menggunakan salah satu rangkaian pengujian yaitu rangkaian *Capacitance High Low* (CHL), yaitu kapasitansi isolasi antara

tegangan tinggi dengan tegangan rendah [12], [13]. Berdasarkan referensi uji sisi HV diketahui nilai-nilai parameter pengujian dan rangkaian pengujian.

Arus total (I_T) = 26,408 mA = 0,026408 A

Kapasitansi (C) = 8490,845

pF = 0,000000008490845 F

Tegangan Uji (V) = 2,5 kV = 2500 Volt

Berdasarkan rangkaian uji dan nilai-nilai parameter pengujian tersebut, maka arus yang mengalir pada kapasitor (I_C) dapat ditentukan dengan perhitungan sebagai berikut :

$$I_C = \frac{V}{X_C}$$

dimana nilai $X_C = \frac{1}{\omega \times C} = \frac{1}{(2 \times \pi \times f \times C)}$

$$= \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 50 \times 0,000000008490845)}$$

$$= 37507,141 \text{ Ohm}$$

Maka nilai I_C adalah :

$$I_C = \frac{V}{X_C} = \frac{2500}{37507,141}$$

$$= 0,0066653133 \text{ Amper}$$

Maka penentuan nilai resistansi rangkaian uji (R) berdasarkan pada nilai arus total dari hasil pengujian dengan perhitungan sebagai berikut :

$$I_T = I_C + I_R$$

Maka :

$$I_R = I_T - I_C$$

$$= 0,026408 - 0,0066653133$$

$$= 0,0197426867 \text{ Amper}$$

Maka nilai resistansi rangkaian isolasi adalah :

$$R = \frac{V}{I_R} = \frac{2500}{0,0197426867}$$

$$= 126629,17 \text{ Ohm}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, maka nilai-nilai parameter untuk pengujian CHL

seperti Tabel 4 Nilai parameter untuk pengujian CHL Transformator IP954-T01

Tabel 4 Nilai parameter untuk pengujian CHL Transformator IP954-T01

Sisi Pengujian	Primer
Koneksi	CHL
Kapasitor / C	$8,4908 \times 10^{-9}$ (F)
Arus Kapasitor/ I_C	0,006665313 (A)
Arus Resistor / I_R	0,019742687 (A)
Resistor	126629,1686 (Ω)

Berdasarkan data hasil pengujian persentase PF/DF pada Tabel 4. dilakukan validasi data pengujian dengan melakukan perhitungan manual, maka persentase PF/DF untuk pengujian isolasi padat transformator IP954-T01 dengan referensi uji pada sisi HV untuk semua koneksi uji lengkap menggunakan persamaan 2.4 dengan perhitungan sebagai berikut :

A. Pengujian Kapasitansi Isolasi CH + CHL

$$\%Pf = \frac{W \times 10}{mA} \times Cf$$

$$= \frac{1,1030 \times 10}{37,326} \times 0,95$$

$$= 0,281 \%$$

B. Pengujian Kapasitansi Isolasi CH

$$\%Pf = \frac{W \times 10}{mA} \times Cf$$

$$= \frac{0,430 \times 10}{10,918} \times 0,95$$

$$= 0,374 \%$$

C. Pengujian Kapasitansi Isolasi CHL (UST)

$$\%Pf = \frac{W \times 10}{mA} \times Cf$$

$$= \frac{0,677 \times 10}{26,418} \times 0,95$$

$$= 0,243 \%$$

D. Pengujian Kapasitansi Isolasi CHL

$$\%Pf = \frac{W \times 10}{mA} \times Cf$$

$$= \frac{0,677 \times 10}{26,408} \times 0,95$$

$$= 0,243 \%$$

Nilai perbandingan untuk persentase PF/DF dari hasil pengujian dan perhitungan adalah seperti pada Tabel 5 Perbandingan % PF/DF Referensi Uji Sisi HV IP954-T01

Tabel 5 Perbandingan % PF/DF Referensi Uji Sisi HV IP954-T01

Tegangan Uji (kV)	Rangkaian Uji	% PF/DF	
		Pengujian	Perhitungan
2,5	CH + CHL	0,281 %	0,281 %
2,5	CH	0,374 %	0,374 %
2,5	CHL (UST)	0,244 %	0,243 %
2,5	CHL	0,242 %	0,243 %

Pengujian PF/DF Isolasi Padat Transformator IP954-T01

Analisis dilakukan dengan menggunakan Standart IEEE C57.152-2013 [8], untuk nilai pengujian PF/DF <0,5 % (20°C), PF antara 0,5 % dan 1,0 % (20°C) dapat diterima namun, PF > 1,0 % (20 °C) harus diselidiki.

Tabel 6. Pengujian PF/DF Isolasi Padat Transformator IP954-T01

Koneksi	Hasil hitung	Hasil Uji	Standar IEEE	Keterangan
CH + CHL	0,281 %	0,281 %	≤0,5 %	Baik
CH	0,374 %	0,374 %	≤0,5 %	Baik
CHL (UST)	0,243 %	0,244 %	≤0,5 %	Baik
CHL	0,243 %	0,242 %	≤0,5 %	Baik
CL + CHL	0,359 %	0,360 %	≤0,5 %	Baik
CL	0,504 %	0,505 %	≤0,5 %	Baik
CHL (UST)	0,239 %	0,239 %	≤0,5 %	Baik
CHL	0,246 %	0,247 %	≤0,5 %	Baik

Dari hasil penilaian Tabel 6 diatas berdasarkan standart IEEE C57.152-2013 maka kondisi kualitas isolasi padat masih dianggap bagus karna nilai hasil pengujian tidak ada yang melebihi nilai ≤0,5 % dan dianggap baik.

Pengujian PF/DF Isolasi Minyak Transformator IP954-T01

Analisis dilakukan berdasarkan Standart C57.152-2013, minyak yang memiliki nilai PF/DF kurang dari 0,5 % pada temperatur 20 °C biasanya dianggap masih bagus. Minyak yang memiliki nilai PF/DF antara 0,5 % dan 2 % pada temperatur 20 °C dianggap dalam kondisi meragukan dan setidaknya diperlukan beberapa jenis pengujian lainnya. Minyak yang memiliki

PF/DF lebih dari 2 % pada temperatur 20 °C harus diselidiki dan harus direkondisi atau diganti. Minyak baru yang baik memiliki PF sekitar 0,05 % atau kurang pada temperatur 20°C. Perlunya pengujian lebih jauh akan bergantung pada besarnya PF/DF yang terukur.

Dari hasil pengujian Tabel 6, berdasarkan standar IEEE C57.152-2013 maka kondisi kualitas isolasi minyak masih dianggap bagus karna nilai hasil pengujian tidak ada yang melebihi nilai ≤ 0,5 % dan dianggap baik.

Tabel 7. Pengujian PF/DF Isolasi minyak Transformator IP954-T01

Tegangan Uji	10 kV
Hasil Perhitungan	0,054 %
Hasil Pengujian	0,48 %
Standart IEEE std C57.152-2013	≤ 0,5 %
Keterangan	Baik

a. Posisi Tap Changer-1 Berdasarkan Name Plate Transformator IP954-T01

$$\text{Turn Ratio} = \frac{\text{HV Winding Voltage}}{\sqrt{3} \times \text{LV Winding Voltage}}$$

$$= \frac{34650}{\sqrt{3} \times 11000} = 1,818$$

$$\% \text{Deviation} = \frac{\text{Turn Ratio Pengujian} - \text{Turn Ratio Name Plate}}{\text{Turn Ratio Name Plate}} \times 100\%$$

$$= \frac{1,825 - 1,818}{1,818} \times 100\%$$

$$= 0,385 \%$$

b. Posisi Tap Changer-2 Berdasarkan Name Plate Transformator IP954-T01

$$\text{Turn Ratio} = \frac{\text{HV Winding Voltage}}{\sqrt{3} \times \text{LV Winding Voltage}}$$

$$= \frac{33825}{\sqrt{3} \times 11000} = 1,775$$

$$\% \text{Deviation} = \frac{\text{Turn Ratio Pengujian} - \text{Turn Ratio Name Plate}}{\text{Turn Ratio Name Plate}} \times 100\%$$

$$= \frac{1,780 - 1,775}{1,775} \times 100\%$$

$$= 0,281 \%$$

- c. Posisi *Tap Changer*-3 Berdasarkan *Name Plate* Transformator IP954–T01

$$\begin{aligned}\text{Turn Ratio} &= \frac{\text{HV Winding Voltage}}{\frac{\sqrt{3}}{\text{LV Winding Voltage}}} \\ &= \frac{33000}{\frac{\sqrt{3}}{11000}} \\ &= 1,732\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\% \text{Deviation} &= \frac{\text{Turn Ratio Pengujian} - \text{Turn Ratio Name Plate}}{\text{Turn Ratio Name Plate}} \times 100\% \\ &= \frac{1,737 - 1,732}{1,732} \times 100\% \\ &= 0,288 \%\end{aligned}$$

- d. Posisi *Tap Changer*-4 Berdasarkan *Name Plate* Transformator IP954–T01

$$\begin{aligned}\text{Turn Ratio} &= \frac{\text{HV Winding Voltage}}{\frac{\sqrt{3}}{\text{LV Winding Voltage}}} \\ &= \frac{32175}{\frac{\sqrt{3}}{11000}} \\ &= 1,688\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\% \text{Deviation} &= \frac{\text{Turn Ratio Pengujian} - \text{Turn Ratio Name Plate}}{\text{Turn Ratio Name Plate}} \times 100\% \\ &= \frac{1,692 - 1,688}{1,688} \times 100\% \\ &= 0,236 \%\end{aligned}$$

- e. Posisi *Tap Changer*-4 Berdasarkan *Name Plate* Transformator IP954–T01

$$\begin{aligned}\text{Turn Ratio} &= \frac{\text{HV Winding Voltage}}{\frac{\sqrt{3}}{\text{LV Winding Voltage}}} \\ &= \frac{31350}{\frac{\sqrt{3}}{11000}} \\ &= 1,645\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\% \text{Deviation} &= \frac{\text{Turn Ratio Pengujian} - \text{Turn Ratio Name Plate}}{\text{Turn Ratio Name Plate}} \times 100\% \\ &= \frac{1,647 - 1,645}{1,645} \times 100\% \\ &= 0,121 \%\end{aligned}$$

Pengujian TTR Transformator IP954–T01

Berdasarkan Standar IEEE C57.152-2013, rasio tegangan yang diukur dari fasa transformator tiga fasa kadang-kadang diamati

sedikit berbeda tetapi tidak menyebabkan transformator dikategorikan tidak normal kecuali perbedaannya $> 0,5 \%$.

Tabel 8 Pengujian TTR Transformator IP954–T01

Tap Changer	Hasil Perhitungan	Standart IEEE	Keterangan
1	0,385 %	$\leq 0,5 \%$	Baik
2	0,281 %	$\leq 0,5 \%$	Baik
3	0,288 %	$\leq 0,5 \%$	Baik
4	0,236 %	$\leq 0,5 \%$	Baik
5	0,121 %	$\leq 0,5 \%$	Baik

Dari hasil pengujian Tabel 8 berdasarkan standar IEEE C57.152-2013 untuk pengujian *Doble Ratio* atau *Transformer Turn Ratio* (TTR) deviasi masih dibawah batasan normal ($< 0,5 \%$) pada semua posisi *tap changer* (Tap 1-5) yang mengindikasikan kondisi rasio, polaritas, dan vektor pada *nameplate* transformator masih bagus dan tidak ada masalah.

Nilai yang terukur merupakan nilai delta (δ) sebesar $0,185^\circ$, sehingga nilai untuk persen $\text{Tan} \delta$ adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\% \text{Tangent Delta} &= \text{Tan } (0,1085) \times 100\% \\ &= 0,189 \%\end{aligned}$$

Seperti pada pembahasan pada bagian 2 hubungan antara *Power Factor* (PF) dengan *Dissipation factor* (DF) akan bernilai sama pada saat nilai pengukuran $< 10\%$. Sehingga :

$$\text{Delta } (\delta) = 0,1085^\circ$$

Maka :

$$\begin{aligned}\text{Theta } (\theta) &= 90^\circ - 0,1085^\circ \\ &= 89,8915^\circ\end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned}\% \text{PF} &= \text{Cos } (\theta) \times 100\% \\ &= \text{Cos } (89,8915^\circ) \times 100\% \\ &= \mathbf{0,1803 \%}\end{aligned}$$

Jadi nilai $\% \text{DF}$ bernilai hampir sama dengan $\% \text{PF}$

Bentuk gelombang pada arus masukan atau arus total (I_T). Maka diperoleh nilai arus total sebesar 0,0223 Amper dan bentuk gelombang arus total seperti pada Gambar 6 berikut :

Gambar 6 Gelombang Arus Total (I_r) IP954 T01

Nilai arus kapasitansi (I_c) pengujian adalah sebesar 0,0067 Amper dan bentuk gelombang arus seperti pada Gambar 7 dan 8 berikut :

Gambar 7 Gelombang Arus Kapasitansi (I_C) IP954- T01

Gambar 8 Deviasi Sudut Fase Arus IR Terhadap Arus IC IP954-T01

Deviasi sudut fase atau perpindahan fase antara arus resistif (I_R) dengan kapasitif (I_C) merupakan nilai $\tan \delta$ yang akan menjadi standar penilaian kualitas isolasi dalam pengujian. Bentuk gelombang deviasi sudut dari hasil simulasi untuk pengujian CHL dengan referensi uji pada sisi HV transformator IP954-T01 seperti pada Gambar 4.9, terlihat bahwa perpindahan sudut fase yang terukur dari hasil simulasi adalah sebesar $0,1089^\circ$ (dalam derajat

sudut) atau sebesar 0,189 % dalam nilai desimal. Perpindahan sudut fase yang sangat kecil ini dapat dideteksi dengan menggunakan peralatan pengujian Doble M4100. Berdasarkan standar IEEE C57.152-2013 nilai hasil pengujian masih $\leq 0,5$ % yang mengindikasikan *Dielectric Dissipation Factor* (rugi-rugi daya elektrik) isolasi masih kecil yang mengindikasikan bahwa kualitas isolasi masih bagus atau belum mengalami pemburukan.

Perbandingan nilai perhitungan %PF/DF terhadap hasil simulasi menggunakan *software* Matlab seperti pada Tabel 9 berikut :

Tabel 9 Perbandingan Pengujian % PF/DF Transformator IP954-T01

Nilai	Hasil Perhitungan	Hasil Simulasi
Arus Total	0,026408 A	0,02233 A
Arus Kapasitansi	0,0066653133 A	0,0067 A
Arus Reaktansi	0,0197426867 A	0,0198 A
%PF/DF	0,243 %	0,189 %

4. KESIMPULAN

Hasil perhitungan pengujian kualitas isolasi transformator daya pada pengujian *Power factor/Dissipation factor isolation winding*, isolasi minyak dan ratio tegangan dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Perhitungan pengujian PF/DF *winding* efektif untuk mengetahui kondisi kualitas isolasi transformator berdasarkan standart IEEE C57.152-2013 dengan nilai pengujian PF/DF *winding* untuk transformator IP954 – T01 nilai *Power factor* CHL 0,243 % masih kecil dari standart 0,5 % yang mengidentifikasi kondisi isolasi masih bagus. Sedangkan untuk pengujian transformator IP254 – T02 *Power factor* CHL 0,655 % lebih besar dari 0,5 % yang mengidentifikasi terjadinya penurunan kualitas isolasi
2. Perhitungan pengujian PF/DF isolasi minyak untuk transformator IP954 – T01 hasil uji dari tegangan 10 kV 0,054 % dan IP254 –T02 hasil uji dari tegangan 10 kV 0,144 % masih kecil dari 0,5 % yang mengidentifikasi kualitas isolasi minyak masih bagus

3. Pengujian *Transformer Turn Ratio (TTR)* bertujuan untuk mengetahui kondisi lilitan winding apakah masih keadaan/mengalami kerusakan baik secara winding maupun mekanis atau *tap changer* transformator Dimana hasil pengujian ratio belitan/tegangan untuk transformator IP954 – T01 nilai pada posisi *Tap changer* 3 mendapatkan nilai 0,288 %, persen deviasi masih kecil dari 0,5 %. Sedangkan transformator IP254 – T02 nilai pada posisi tap 3 mendapatkan nilai 1,440 % besar dari 0,5 % terjadi keburukan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Tanjung and Atmam, “Analisis Kinerja Transformator Distribusi Rusunawa Universitas Lancang Kuning Pekanbaru,” *SainETIn*, vol. 1, no. 1, pp. 35–40, 2016.
- [2] R. Hutagaol, U. Situmeang, and Zulfahri, “Studi Overload Shedding Pada Transformator Daya Gardu Induk Garuda Sakti,” *SainETIn*, vol. 4, no. 1, pp. 1–8, 2019.
- [3] R. Hardityo, “Deteksi dan Analisis Indikasi Kegagalan Transformator Dengan Metode Analisis Gas Terlarut,” Universitas Indonesia, 2008.
- [4] P. Gill, *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [5] H. Asman, H. Eteruddin, and A. Arlenny, “Analisis Proteksi Rele Jarak Pada Saluran Transmisi 150 kV Garuda Sakti – Pasir Putih Menggunakan PSCAD,” *SainETIn*, vol. 2, no. 1, pp. 27–36, 2018.
- [6] J. J. Grainer and W. D. Stevenson Jr, *Power System Analysis*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [7] Doble, *Electrical Insulation Modeling*. Watertown: Doble Engineering Company, 2000.
- [8] “IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors,” *IEEE Std C57.152-2013*. pp. 1–121, 2013.
- [9] Zuhal, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta: Gramedia, 1995.
- [10] R. Harahap and J. A. Pakpahan, “Analisa Pengukuran Ratio Trafo Daya yang Menggunakan On Load Tap Changer (Aplikasi pada Trafo Daya Paya Geli PLN Medan),” *Bul. Utama Tek.*, vol. 13, no. 3, pp. 184–188, 2018.
- [11] O. D. E. Satriawan, “Analisa Pengujian Perbandingan Belitan Menggunakan Alat Transformer Turn Ratio Tester Pada Transformator Dengan Daya 1250 kVA,” Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, 2015.
- [12] Rick Mannello, *Thermal Conductivity 26: Thermal Expansion 14 : Joint Conferences*. Massachusetts: DESTech Publications, 2005.
- [13] J. A. Martinez-Velasco, *Transient Analysis of Power Systems Solution Techniques, Tools and Applications*. London: Wiley, 2014.