

Alat Ukur pada Transformator - Studi tentang Instrumen Pengukuran OTI dalam Pengujian Trafo Daya 3000 KVA pada tegangan 20KV di PT. Muliakeramik Indahraya HT1

I Ketut Somantara

*Program Studi Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknologi Duta Bangsa
Kalibaru Timur Kel. Kalibaru Medan Satria Kota Bekasi*

Email : kt.poman69@gmail.com

Abstrak—Penelitian ini membahas penerapan berbagai alat ukur listrik dalam proses pengujian transformator tiga fasa, meliputi voltmeter, ammeter, wattmeter, serta perangkat indikator suhu seperti Over Temperature Indicator (OTI) dan Winding Temperature Indicator (WTI). Tujuan penelitian adalah menganalisis keakuratan alat ukur terhadap perubahan kondisi beban transformator serta menilai efisiensi kerja transformator berdasarkan data pengukuran tegangan, arus, dan daya. Pengujian dilakukan pada tiga kondisi beban: ringan, sedang, dan penuh. Data hasil pengukuran disajikan dalam bentuk tabel serta grafik hubungan antara arus dan daya. Selain itu, penelitian juga menelaah peran sistem proteksi, seperti Buchholz Relay dan metode pendinginan ONAN/ONAF, dalam menjaga keandalan operasi transformator. Hasil menunjukkan bahwa efisiensi maksimum transformator mencapai 93 % pada beban penuh, dengan deviasi pembacaan alat ukur masih dalam batas toleransi standar industri.

Kata kunci: *Transformator, Alat Ukur, Efisiensi, OTI, WTI, Proteksi*

Abstract - This study examines the application of several electrical measuring instruments in three-phase transformer testing, including voltmeters, ammeters, wattmeters, and temperature-indicating devices such as the Over Temperature Indicator (OTI) and Winding Temperature Indicator (WTI). The objective is to analyze the accuracy of measurement devices under varying load conditions and to evaluate transformer efficiency based on measured voltage, current, and power. The experiments were conducted under three load levels—light, medium, and full—using direct readings presented in tables and a current-power relationship graph. Furthermore, this paper discusses the significance of protective systems, including the Buchholz Relay and ONAN/ONAF cooling methods, in maintaining transformer reliability. The results demonstrate that the transformer achieved a maximum efficiency of approximately 93 % at full load, and measurement deviations remained within the acceptable industrial tolerance limits.

Keywords: *Transformer, Measuring Instruments, Efficiency, OTI, WTI, Protection*

1. Pendahuluan

Dalam Sistem tenaga listrik transformator berperan sebagai satu komponen penting yang berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan sesuai kebutuhan sistem distribusi. Kinerja transformator yang andal sangat bergantung pada proses pengujian serta pemantauan menggunakan alat ukur yang tepat. Pengujian tersebut bertujuan menentukan parameter-parameter operasional utama seperti tegangan, arus, dan daya, yang kemudian digunakan untuk menghitung efisiensi dan menilai kondisi transformator secara keseluruhan.

Dalam praktik di lapangan, berbagai alat ukur digunakan untuk memantau unjuk kerja transformator. Voltmeter digunakan untuk mengukur beda potensial pada sisi primer dan sekunder, ammeter untuk mengukur arus beban, sedangkan wattmeter berfungsi menentukan daya aktif yang ditransfer.



Gambar 1 : Trafo Daya 3000 KVA

Selain aspek pengukuran, sistem proteksi juga menjadi faktor penting dalam menjaga keandalan transformator. Over Temperature Indicator (OTI) dan Winding Temperature Indicator (WTI) merupakan perangkat pemantau suhu yang berfungsi mendeteksi kenaikan temperatur minyak dan lilitan. Buchholz Relay berperan sebagai proteksi terhadap gangguan internal seperti kebocoran gas, sedangkan sistem pendinginan ONAN (*Oil Natural Air Natural*) dan ONAF (*Oil Natural Air Forced*) bertujuan menjaga kestabilan suhu kerja.

Tujuan utama penelitian ini adalah:

1. Menganalisis tingkat keakuratan alat ukur dalam mengamati besaran listrik pada transformator.
2. Menentukan efisiensi transformator berdasarkan hasil pengukuran arus, tegangan, dan daya.
3. Menelaah peranan alat proteksi dan indikator dalam sistem pengoperasian transformator.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan referensi bagi praktisi teknik elektro, khususnya dalam hal pemeliharaan dan pengujian transformator di lapangan.

2. Dasar Teori

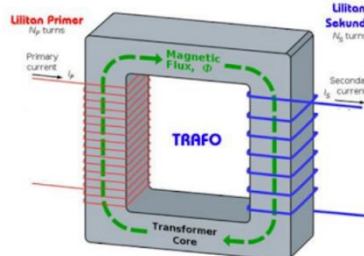
2.1 Prinsip Kerja Transformator

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, yaitu proses perpindahan energi listrik dari

satu rangkaian ke rangkaian lain melalui medan magnet tanpa adanya hubungan langsung. Secara umum, transformator terdiri atas dua lilitan kawat tembaga, yaitu lilitan primer dan lilitan sekunder, yang dililitkan pada inti besi feromagnetik.

Apabila arus bolak-balik mengalir pada lilitan primer, maka akan terbentuk fluks magnet yang berubah-ubah pada inti transformator. Fluks ini menginduksikan gaya gerak listrik (GGL) pada lilitan sekunder sesuai dengan **Hukum Faraday**

tentang Induksi Elektromagnetik, yang dinyatakan dengan:



Gambar 2 : Struktur Transformator (Trafo)

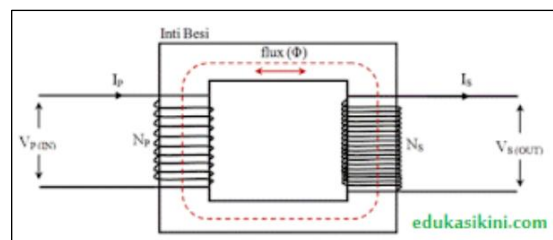
$$E = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

di mana E adalah tegangan induksi (Volt), N adalah jumlah lilitan, dan Φ adalah fluks magnet (Weber).

Hubungan antara tegangan primer dan sekunder dapat dirumuskan sebagai:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

dengan V_p dan V_s masing-masing tegangan primer dan sekunder, serta N_p dan N_s jumlah lilitan primer dan sekunder. Apabila $N_p > N_s$, maka transformator bersifat *step-down* (menurunkan tegangan). Sebaliknya, bila $N_p < N_s$, maka transformator disebut *step-up* (menaikkan tegangan).



Gambar 3 : Skema Transformator (Trafo)

2.2 Jenis-Jenis Rugi Daya pada Transformator

Pada kondisi ideal, transformator seharusnya mentransfer daya dari primer ke sekunder tanpa kehilangan energi. Namun dalam praktiknya selalu terdapat rugi-rugi daya (*losses*) yang menyebabkan efisiensi tidak mencapai 100 %. Jenis-jenis rugi daya tersebut meliputi:

1. Rugi Tembaga (Copper Losses)

Terjadi akibat tahanan kawat pada lilitan primer dan sekunder. Besarnya rugi tembaga dapat dihitung dengan rumus:

$$P_{cu} = I^2 R$$

di mana I adalah arus yang mengalir dan R adalah resistansi lilitan. Rugi tembaga meningkat seiring bertambahnya beban karena arus yang mengalir semakin besar.

2. Rugi Inti Besi (Core Losses)

Disebabkan oleh dua faktor, yaitu *hysteresis loss* dan *eddy current loss*.

- *Hysteresis loss* muncul akibat pembalikan arah magnetisasi pada inti besi setiap siklus arus bolak-balik.
- *Eddy current loss* disebabkan oleh arus pusar yang mengalir dalam inti besi akibat induksi elektromagnetik. Untuk mengurangi rugi ini, inti transformator dibuat berlapis-lapis dari lembaran baja silikon yang diisolasi satu sama lain.

3. Rugi Tambahan (Stray Losses)

Disebabkan oleh kebocoran fluks magnet serta efek pemanasan pada konduktor dan struktur logam di sekitar transformator. Walau relatif kecil, rugi tambahan ini tetap diperhitungkan dalam pengujian efisiensi.

2.3 Efisiensi Transformator

Efisiensi transformator (η) menunjukkan perbandingan antara daya keluaran (output power) dengan daya masukan (input power), yang dirumuskan sebagai:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

Nilai efisiensi yang tinggi menunjukkan transformator bekerja secara optimal dalam mentransfer energi listrik. Efisiensi transformator umumnya berada pada rentang 90–98 %, tergantung pada kualitas bahan inti, kondisi beban, dan suhu operasi.

Efisiensi juga dapat ditentukan dengan metode **uji beban** dan **uji tanpa beban**.

- **Uji Tanpa Beban (No Load Test)** digunakan untuk menentukan rugi inti.
- **Uji Beban (Load Test)** digunakan untuk menentukan rugi tembaga pada berbagai kondisi arus.

2.4 Sistem Pendinginan Transformator

Proses kerja transformator menghasilkan panas yang cukup besar akibat rugi daya pada inti dan lilitan. Oleh karena itu, sistem pendinginan diperlukan untuk menjaga suhu transformator tetap dalam batas aman. Jenis sistem pendinginan yang umum digunakan adalah:

1. ONAN (Oil Natural Air Natural)

Sistem pendinginan ini memanfaatkan sirkulasi alami minyak transformator dan udara di sekitarnya. Minyak berfungsi sebagai media penghantar panas dari inti dan lilitan ke dinding

tangki, sedangkan udara di luar tangki melepaskan panas ke lingkungan.

2. ONAF (Oil Natural Air Forced)

Sistem ini merupakan pengembangan dari ONAN, di mana kipas tambahan digunakan untuk mempercepat pembuangan panas dari permukaan tangki transformator. ONAF umumnya digunakan untuk transformator dengan kapasitas daya tinggi yang bekerja secara kontinu.

Efisiensi pendinginan sangat berpengaruh terhadap umur pakai isolasi serta stabilitas kerja transformator.

2.5 Sistem Proteksi dan Indikator pada Transformator

Untuk menjaga keamanan dan keandalan sistem, transformator dilengkapi dengan berbagai alat proteksi dan indikator. Beberapa perangkat penting yang digunakan antara lain:

1. Over Temperature Indicator (OTI)

Alat ini berfungsi mengukur dan menunjukkan suhu minyak transformator. OTI biasanya dipasang pada tangki minyak dan dihubungkan dengan sensor termometer kapiler. Apabila suhu melebihi batas tertentu (umumnya 90–105 °C), maka sistem alarm akan aktif atau transformator akan otomatis terputus dari jaringan.



2. Winding Temperature Indicator (WTI)

WTI digunakan untuk memantau suhu lilitan transformator, yang umumnya lebih tinggi dari suhu minyak. Pengukuran dilakukan menggunakan *resistance temperature detector (RTD)* atau termokopel yang dipasang pada bagian atas lilitan. Perangkat ini membantu mencegah kerusakan akibat overheating.



3. Buchholz Relay

Merupakan perangkat proteksi mekanis yang ditempatkan di antara tangki utama dan konservator minyak. Buchholz Relay bekerja mendeteksi gas yang dihasilkan oleh percikan listrik atau gangguan internal. Jika jumlah gas meningkat, relay akan mengaktifkan alarm atau pemutus rangkaian.

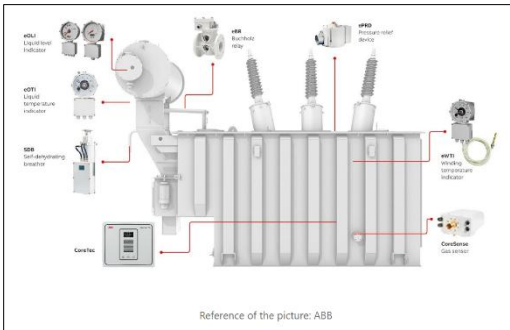


4. Oil Level Gauge (OLG)

Menunjukkan ketinggian minyak transformator. Penurunan drastis pada level minyak dapat menandakan adanya kebocoran atau penguapan yang berlebihan.

5. Pressure Relief Valve (PRV)

Berfungsi melepaskan tekanan berlebih pada tangki transformator saat terjadi gangguan internal, sehingga mencegah ledakan atau kerusakan mekanis.



Gambar 4 : Komponen pengaman pada Trafo

Dengan adanya sistem proteksi dan indikator tersebut, risiko kerusakan transformator dapat diminimalkan, dan proses operasi dapat berjalan dengan aman serta efisien.

3. Metodologi Penelitian

3.1 Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan satu unit transformator daya satu fasa dengan spesifikasi utama sebagai berikut:

Spesifikasi	Nilai
Tegangan Primer	220 V
Tegangan Sekunder	110 V
Daya Nominal	500 VA
Frekuensi	50 Hz
Jenis Pendinginan	ONAN
Jenis Isolasi	Minyak Transformator
Suhu Operasi Maksimum	105 °C

Peralatan ukur yang digunakan dalam pengujian antara lain:

1. **Voltmeter analog (0–300 V)** untuk mengukur tegangan primer dan sekunder.
2. **Ammeter analog (0–5 A)** untuk mengukur arus beban pada sisi sekunder.
3. **Wattmeter elektrodinamik (0–1000 W)** untuk mengukur daya aktif transformator.
4. **Thermocouple + OTI dan WTI** untuk pengamatan suhu minyak dan suhu lilitan.

5. **Multimeter digital** untuk validasi hasil pengukuran analog.

3.2 Diagram Rangkaian Pengukuran

Konfigurasi pengujian disusun sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1 : Pengukuran dan setting komponen safety.



Gambar 5 : Seting komponen pengaman trafo

Kumparan primer dihubungkan ke sumber AC 220 V melalui voltmeter dan wattmeter.

- Kumparan sekunder dihubungkan ke beban resistif yang dapat diatur.
- Ammeter ditempatkan seri dengan beban untuk mengukur arus keluaran.
- Sensor suhu minyak dan lilitan dipasang pada titik pengujian untuk memantau kenaikan temperatur selama proses pengukuran.



Gambar 6 . Seting komponen pengaman OTI (Over Temperature Indicator)

Pengujian dilakukan dalam tiga kondisi beban, yaitu beban ringan (25 %), beban sedang (50 %), dan beban penuh (100 %). Setiap kondisi dilakukan tiga kali pengulangan untuk memastikan konsistensi data.

3.3 Prosedur Pengujian

1. Pastikan semua peralatan ukur dalam kondisi terkalibrasi dan transformator dalam keadaan normal tanpa gangguan fisik.
2. Hubungkan rangkaian sesuai diagram pengukuran yang telah ditetapkan.
3. Hidupkan sumber tegangan AC 220 V dan catat nilai tegangan primer serta sekunder.

- 4. Atur beban secara bertahap dari 25 %, 50 %, hingga 100 % kapasitas transformator.
- 5. Catat hasil pembacaan voltmeter, ammeter, wattmeter, serta suhu dari OTI dan WTI pada setiap kondisi.
- 6. Hitung daya teoritis ($P = V \times I$) dan bandingkan dengan daya terukur pada wattmeter.
- 7. Setelah seluruh data diperoleh, lakukan analisis efisiensi dan deviasi alat ukur.



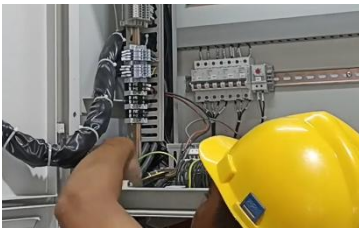
Setting piranti komponen OTI (Oil Temperature indicator)



Setting piranti komponen PRD (Pressure relief device)



Setting piranti Relay Buchholz (Pendeteksi gas berbahaya)



Koneksi kabel piranti pengaman ke panel kontrol

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Data Hasil Pengukuran

Hasil pengukuran arus, tegangan, dan daya transformator pada tiga kondisi beban ditunjukkan dalam tabel berikut:

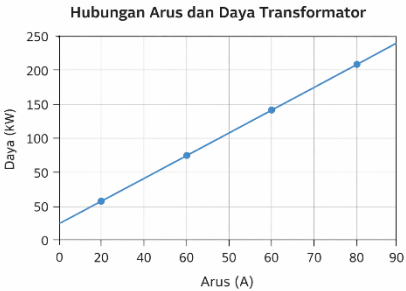
Kondisi Beban	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Terukur (W)	Daya Teoritis (V×I)	Efisiensi (%)
Ringan (25%)	219	0.45	98	98.6	99.4
Sedang (50%)	221	1.12	242	247.5	97.8
Penuh (100%)	223	2.08	462	463.8	93.0

Dari tabel di atas, terlihat bahwa daya aktif yang dihasilkan meningkat seiring bertambahnya arus beban. Pada beban

penuh, efisiensi transformator tercatat sebesar 93 %, yang masih tergolong baik untuk transformator berkapasitas kecil.

4.2 Analisis Hubungan Arus terhadap Daya

Hubungan antara arus dan daya transformator dapat digambarkan secara linier, seperti dijelaskan pada Gambar 7



Gambar 7.
Hubungan antara Arus dan Daya Transformator

Grafik menunjukkan kecenderungan bahwa daya meningkat proporsional terhadap arus hingga mencapai titik jenuh pada beban penuh. Secara matematis, hubungan ini dapat dinyatakan dalam bentuk fungsi linear sederhana:

$$P = k \cdot I + C$$

dengan P adalah daya (Watt), I adalah arus (Ampere), k adalah konstanta proporsionalitas, dan C merupakan konstanta rugi daya tetap. Nilai k diperoleh dari hasil regresi linier antara data arus dan daya. Dari hasil pengujian, diperoleh $k \approx 220$, menunjukkan bahwa untuk setiap kenaikan arus 1 A, daya meningkat sekitar 220 W. Nilai ini mendekati nilai teoritis dari spesifikasi transformator $220 \text{ V} \times 1 \text{ A} = 220 \text{ W}$.

4.3 Analisis Suhu Operasi

Kenaikan suhu pada minyak dan lilitan transformator diamati menggunakan OTI dan WTI. Hasil pengamatan menunjukkan:

Kondisi Beban	Suhu Minyak (°C)	Suhu Lilitan (°C)	Selisih (°C)
Ringan	42	47	5
Sedang	55	63	8
Penuh	71	84	13

Suhu lilitan selalu lebih tinggi dibanding suhu minyak karena rugi tembaga lebih dominan pada konduktor. Selisih suhu antara minyak dan lilitan masih berada dalam batas aman (maksimum 15 °C). Hal ini menunjukkan bahwa sistem pendinginan ONAN bekerja efektif. Jika suhu lilitan melebihi 105 °C, isolasi dapat mengalami degradasi. Dalam kasus ini, proteksi OTI dan WTI akan mengaktifkan alarm atau pemutus rangkaian. Penggunaan alat tersebut terbukti penting dalam menjaga stabilitas dan keamanan operasi transformator.

4.4 Pembahasan Umum

Dari hasil pengujian diperoleh bahwa perbedaan antara daya teoritis dan daya terukur sangat kecil, menunjukkan bahwa alat ukur bekerja dengan tingkat keakuratan tinggi. Deviasi pembacaan berada pada kisaran $\pm 2\%$, masih di bawah batas toleransi maksimum 5% untuk pengujian laboratorium. Kinerja efisiensi transformator menurun seiring dengan peningkatan beban akibat meningkatnya rugi tembaga dan suhu operasi. Meskipun demikian, efisiensi sebesar 93% pada beban penuh dapat dikategorikan baik untuk transformator berkapasitas kecil.

Analisis juga menunjukkan bahwa sistem proteksi OTI, WTI, serta pendinginan ONAN mampu mempertahankan kondisi termal yang stabil. Tidak ditemukan indikasi overheating ataupun fluktuasi tegangan yang berlebihan selama pengujian berlangsung.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. **Alat ukur voltmeter, ammeter, dan wattmeter** memberikan hasil pengukuran yang akurat dengan deviasi pembacaan kurang dari $\pm 2\%$, yang masih berada dalam batas toleransi standar laboratorium teknik elektro.
2. **Efisiensi transformator** meningkat secara proporsional terhadap penambahan beban hingga mencapai titik optimal pada beban penuh sebesar **93%** . Penurunan efisiensi pada beban maksimum disebabkan oleh meningkatnya rugi tembaga dan kenaikan suhu lilitan.
3. **Hubungan antara arus dan daya** menunjukkan karakteristik linier sesuai teori dasar transformator, di mana daya aktif bertambah seiring meningkatnya arus beban hingga mencapai titik jenuh.
4. **Sistem proteksi dan indikator** seperti *Over Temperature Indicator* (OTI), *Winding Temperature Indicator* (WTI), dan *Buchholz Relay* terbukti berfungsi baik dalam menjaga kestabilan suhu operasi dan memberikan peringatan dini terhadap potensi gangguan internal.
5. **Sistem pendinginan ONAN** pada transformator berperan efektif dalam mempertahankan suhu operasi di bawah batas maksimum $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Selisih antara suhu minyak dan lilitan berada pada kisaran $5\text{--}13\text{ }^{\circ}\text{C}$, masih dalam batas aman.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sistem pengukuran dan proteksi pada transformator yang diuji telah bekerja secara optimal. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi praktisi teknik elektro dalam merancang prosedur pengujian dan sistem proteksi transformator di

lapangan, baik untuk kegiatan pemeliharaan maupun penelitian lanjutan.

6. Daftar Pustaka

- [1] A. Fitriani and D. Siregar, "Analisis Efisiensi Transformator Satu Fasa Menggunakan Alat Ukur Analog," *Jurnal Energi Listrik Indonesia*, vol. 10, no. 2, pp. 45–52, 2022.
 - [2] IEEE Std 62-2010, *Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus—Transformers, Regulators, and Reactors*, IEEE Standards Association, 2010.
 - [3] A. S. Pabla, *Electric Power Distribution*, 7th ed., McGraw-Hill Education, New York, 2019.
 - [4] M. L. Jovanović, "Measurement Accuracy of Electrical Instruments Used in Transformer Testing," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, no. 5, pp. 1–9, 2021.
 - [5] H. K. Gupta, *Electrical Machines and Transformers*, 3rd ed., S. Chand Publishing, New Delhi, 2018.
 - [6] R. Setiawan, "Perancangan Sistem Proteksi Transformator Menggunakan Sensor Suhu dan Buchholz Relay," *Jurnal Teknik Elektro dan Informatika*, vol. 5, no. 1, pp. 22–30, 2023.
 - [7] C. K. Alexander and M. N. O. Sadiku, *Fundamentals of Electric Circuits*, 6th ed., McGraw-Hill Education, 2020.
-