

# Analisis Hasil Pengujian Isolasi Transformator Daya 20 kV (Step-Up) di PT PLN (Persero) PLTD Tegineneng

Jeckson<sup>1</sup>, Abdurrachman<sup>2</sup>, Sri Suryani<sup>3</sup>

Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Lampung, Bandar Lampung  
Jl. Zainal Abidin Pagar Alam No.14 Bandar Lampung 35142

<sup>1</sup> jeckson@uml.ac.id

<sup>2</sup> abdurrachman@gmail.com

<sup>3</sup> srisuryani57@gmail.com

**Intisari** — Transformator step-up pada PT PLN (Persero) PLTD Tegineneng merupakan salah satu peralatan utama yang digunakan secara kontinu. Dalam sebuah jaringan sistem tenaga listrik yang kompleks, penurunan atau penuaan kekuatan isolasi peralatan listrik merupakan masalah serius yang dapat menimbulkan kerugian besar, seperti kerusakan transformator, meledaknya pemutus sirkuit (circuit breaker), dan lain-lain. Untuk menghindari kerusakan peralatan yang tidak terduga serta ketidakstabilan distribusi energi listrik, sangat penting untuk mengetahui kondisi isolasi peralatan tersebut dan memantau secara berkala. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hasil pengujian isolasi transformator tersebut berdasarkan empat parameter utama: Indeks Polarisasi (PI), tan delta, analisis gas terlarut (DGA), dan breakdown voltage. Hasil pengujian Indeks Polarisasi menunjukkan indikasi kontaminasi belitan trafo oleh kotoran, air, dan debu. Disarankan untuk melakukan uji kadar air dan tan delta guna mendalami temuan ini. Pengujian tan delta pada kumparan primer menunjukkan hasil yang tidak baik, dengan nilai sebesar 1,2%, yang menurut standar ANSI C57.12.90 tergolong buruk. Oleh karena itu, pengujian kadar air minyak isolasi dan furan direkomendasikan. Hasil DGA menunjukkan total gas terlarut (TDCG) sebesar 1169 ppm, masuk dalam kondisi 2 yang menandakan gejala awal kegagalan. Laju pertumbuhan gas yang signifikan (>30 ppm) pada pengujian-pengujian berikutnya mengindikasikan perlunya pengambilan sampel gas secara bulanan. Analisis key gas mengidentifikasi jenis kegagalan sebagai pemanasan minyak (overheating of oil) dengan dominasi kandungan gas etilen (63%) dan etana (20%). Pengujian breakdown voltage menunjukkan hasil awal yang baik, namun cenderung menurun dari 55 kV ke 46 kV, kemungkinan akibat penambahan oli saat proses purifikasi. Berdasarkan analisis menyeluruh, transformator unit 3 PLTD Tegineneng masih layak dioperasikan dengan catatan beban tidak melebihi kapasitas. Namun, tanda-tanda kegagalan isolasi, khususnya pada minyak, mulai muncul. Oleh karena itu, diperlukan pengujian rutin, seperti pengujian kadar air dan furan, untuk memastikan kondisi transformator tetap stabil dan andal.

**Kata kunci** — Transformator daya, indeks polarisasi, tan delta, DGA, breakdown voltage.

**Abstract** — The step-up transformer at PT PLN (Persero) PLTD Tegineneng is one of the key pieces of equipment that operates continuously. In a complex electrical power system, the degradation or ageing of insulation strength in electrical equipment poses a serious issue that can result in significant losses, such as transformer damage, circuit breaker explosions, and other failures. To avoid unexpected equipment breakdowns and instability in power distribution, it is crucial to monitor the condition of the equipment's insulation regularly. This study aims to analyse the insulation testing results of the transformer based on four key parameters: Polarisation Index (PI), tan delta, dissolved gas analysis (DGA), and breakdown voltage. The Polarisation Index test results indicate contamination of the transformer windings by dirt, water, and dust. It is recommended to conduct water content and tan delta tests to further investigate these findings. The tan delta test on the primary winding shows poor results, with a value of 1.2%, which, according to the ANSI C57.12.90 standard, is categorised as poor. Therefore, water content testing of the insulating oil and furan analysis is recommended. The DGA results show a total dissolved gas (TDCG) value of 1169 ppm, categorised as condition 2, indicating early signs of failure. The significant gas growth rate (>30 ppm) in subsequent tests suggests the need for monthly gas sampling. Key gas analysis identifies the type of fault as oil overheating, dominated by ethylene (63%) and ethane (20%) gases. The breakdown voltage test initially shows good results, but the values tend to decrease from 55 kV to 46 kV, potentially due to oil addition during the purification process. Based on a comprehensive analysis, the unit 3 transformer at PLTD Tegineneng is still fit for operation, provided the load does not exceed its capacity. However, signs of insulation failure, particularly in the oil, have begun to appear. Therefore, routine testing, such as water content and furan analysis, is necessary to ensure the transformer's condition remains stable and reliable.

**Keywords** — Power transformer, polarisation index, tan delta, DGA, breakdown voltage.

## I. PENDAHULUAN

Saat ini, keandalan jaringan listrik sangat penting karena tingginya kebutuhan energi listrik. Kemajuan teknologi telah mempermudah dan meningkatkan efisiensi berbagai hal, yang juga berdampak pada meningkatnya penggunaan perangkat listrik. Oleh karena itu, PT PLN (Persero), khususnya di wilayah Lampung, sebagai penyedia listrik bagi pelanggan, perlu berupaya maksimal untuk memenuhi kepuasan konsumen. Dalam proses penyaluran listrik, energi dihasilkan oleh generator di pembangkit listrik milik PLN, lalu disalurkan melalui jaringan transmisi, dan akhirnya didistribusikan kepada konsumen melalui jaringan distribusi.

Salah satu pembangkit penting adalah Pusat Listrik Tenaga Diesel (PLTD) Tegineneng di Kabupaten Pesawaran, Lampung, yang berperan sebagai pemasok energi listrik. Keandalan pembangkit ini didukung oleh peralatan utama seperti transformator, yang berfungsi menaikkan tegangan listrik dari generator sebelum disalurkan ke gardu induk. Mengingat tingginya biaya bahan bakar diesel dan penggunaannya yang boros, PLTD Tegineneng hanya beroperasi pada saat beban puncak, yaitu sekitar pukul 17.00-22.00, dan tidak beroperasi terus-menerus selama 24 jam seperti pembangkit lainnya.

Setiap peralatan listrik, termasuk transformator, menghadapi tekanan dari tegangan operasi, getaran, suhu, dan kotoran, yang berpotensi menyebabkan penurunan kekuatan isolasi. Dalam sistem tenaga listrik yang kompleks, penurunan isolasi ini menjadi masalah serius karena dapat menyebabkan kerusakan seperti kegagalan transformator atau ledakan pemutus sirkuit. Untuk mencegah kegagalan mendadak dan memastikan stabilitas distribusi listrik, kondisi isolasi peralatan perlu dimonitor dan diperiksa secara berkala. Transformator juga memerlukan pemeliharaan agar tetap layak dioperasikan. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan dengan judul “Analisis Hasil Pengujian Isolasi Transformator Daya 20 kV (Step Up) di PT PLN (Persero) PLTD Tegineneng.”

## A. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis kelayakan kondisi transformator berdasarkan teori.
2. Mengimplementasikan pengukuran kondisi transformator dari teori ke praktik lapangan.
3. Menganalisis hasil pengujian isolasi pada transformator daya di PLTD Tegineneng.

## II. KAJIAN PUSTAKA

### A. PLTD (*Pembangkit Listrik Tenaga Diesel*).

PLTD adalah jenis pembangkit listrik yang memanfaatkan mesin diesel sebagai penggerak utama (*prime mover*) [1]. *Prime mover* ini berfungsi untuk menghasilkan energi mekanis yang diperlukan guna memutar rotor generator. Berikut adalah prinsip kerja PLTD:

#### 1) *Proses Pengolahan Bahan Bakar.*

Bahan bakar dari tangki penyimpanan utama disaring terlebih dahulu sebelum dipompa ke tangki penyimpanan sementara [2]. Jika menggunakan bahan bakar minyak (BBM), bahan bakar dipompa menuju nozzle, di mana temperaturnya dinaikkan sehingga berubah menjadi kabut. Sementara itu, untuk bahan bakar gas (BBG), tekanan bahan bakar diatur melalui *conversion kit* sebelum digunakan.

#### 2) *Proses Pengolahan Udara.*

Udara bersih dimasukkan ke dalam tangki udara menggunakan kompresor. Selanjutnya, udara tersebut dialirkan ke turbocharger [3], di mana tekanannya dinaikkan hingga 500 psi dan suhunya mencapai 600°C. Udara bertekanan dan bertemperatur tinggi ini kemudian dialirkan ke ruang bakar (*combustion chamber*).

#### 3) *Proses Pembakaran.*

Bahan bakar dari nozzle (untuk BBM) atau *conversion kit* (untuk BBG) disuntikkan ke ruang bakar. Udara yang telah dipanaskan dan diberi tekanan tinggi menyebabkan temperatur dalam ruang bakar meningkat, sehingga mesin

diesel menyala secara otomatis [4]. Proses ini menghasilkan ledakan bahan bakar yang menggerakkan poros rotor generator.

Energi mekanis yang dihasilkan dari pergerakan rotor kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator [5]. Agar energi listrik tersebut dapat disalurkan ke beban dengan efisien, tegangan yang dihasilkan generator ditingkatkan menggunakan transformator *step-up*

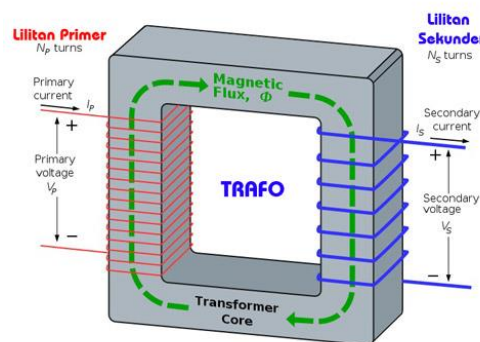
## B. Transformator

### 1) Prinsip Dasar Transformator

Transformator merupakan suatu alat listrik yang termasuk ke dalam klasifikasi mesin listrik statik yang berfungsi menyalurkan tenaga/daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah dan sebaliknya [7]. Dapat juga diartikan mengubah tegangan arus bolak-balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain melalui suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip-prinsip induksi-elektromagnet. Transformator terdiri atas sebuah inti yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga listrik memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan [8], misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.

Dasar teori dari transformator adalah apabila ada arus listrik bolak-balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda tegangan mengelilingi magnet, sehingga akan timbul Gaya Gerak Listrik (GGL). Fluks yang dihasilkan akan mengalir melalui inti besi, bila belitan sekunder terhubung dengan beban atau pada belitan sekunder terbentuk suatu sirkuit tertutup,

arus akan mengalir pada konduktor kedua belitan dan sirkuit keluaran [8].



Gbr 1. Prinsip kerja transformator

### 2) Jenis-jenis Transformator dan Penggunaannya

Ada beberapa jenis transformator yang dikenal dan digunakan secara luas di masyarakat, di antaranya adalah:

#### a. Transformator Daya

Transformator daya adalah transformator yang biasa digunakan di gardu induk, baik itu gardu induk pembangkit dan gardu induk distribusi dimana transformator tersebut memiliki kapasitas daya yang besar [9]. Di gardu induk pembangkit, transformator digunakan untuk menaikkan tegangan ke tegangan gardu induk atau transmisi/ tegangan tinggi (6/20 kV atau 10/150 kV). Sedangkan di gardu induk distribusi, transformator digunakan untuk menurunkan tegangan transmisi ke tegangan distribusi/menengah (150/20kV).

#### b. Transformator Arus (Current Transformer)

Transformator arus adalah transformator yang digunakan untuk mengambil input data masukan berupa besaran arus dengan cara perbandingan belitan pada belitan primer atau sekunder [10]. Transformator ini biasa digunakan untuk pengukuran tak langsung beban arus yang mengalir ke pelanggan kemudian membatasinya. Selain itu bisa juga besaran arusnya diambil sebagai input data masukan peralatan pengamanan jaringan.

c. Transformator Tegangan (*Potensial Transformer*)

Transformator tegangan adalah transformator yang digunakan untuk mengambil input data masukan berupa besaran tegangan dengan cara perbandingan belitan pada belitan primer atau sekunder [11]. Transformator ini biasa digunakan untuk pengukuran tak langsung beban yang mengalir ke pelanggan kemudian membatasinya. Selain itu bisa juga besaran tegangannya diambil sebagai input data masukan peralatan pengamanan jaringan.

3) *Pengujian pada Transformator*

a. Indeks Polarisasi

Tujuan dari pengujian Indeks Polarisasi adalah untuk memastikan peralatan tersebut mengalami penyerapan kelembaban, kontaminasi dan moisture yang dapat meningkatkan Leakage Current [12]. Pengujian berkelanjutan dilakukan dalam selama 10 menit, tahanan isolasi akan mempunyai kemampuan untuk mengisi kapasitansi tinggi ke dalam isolasi trafo, dan pembacaan resistansi akan meningkat lebih cepat jika isolasi bersih dan kering. Salah satu efek yang mempengaruhi nilai tahanan isolasi belitan trafo adalah temperatur. Hal ini terjadi karena panas belitan, inti besi dan minyak trafo pada derajat tertentu akan menurunkan nilai dielektrik bahan isolasi belitan, sehingga pengukuran dengan interval 10 menit kemudian (suhu trafo agak turun) akan menghasilkan nilai yang berbeda.

b. Tan Delta

Maksud dari pengujian isolasi Tan Delta adalah untuk mengetahui proses kelemahan yang terjadi, supaya kegagalan dalam operasi dapat dihindarkan [13]. Kegagalan (*failure*) yang terjadi pada peralatan tegangan tinggi yang sedang dipakai dalam operasi sehari-hari disebabkan karena

isolasinya memburuk (*deterioration*) atau karena terjadi kegagalan (*breakdown*) pada bagian-bagiannya. Melemahnya isolasi ini disebabkan karena panas, kelembaban, kerusakan mekanis, korosi kimiawi, korona, tegangan lebih dan lain-lain.

c. Dissolved Gas Analysis (DGA)

DGA adalah metode analisis kondisi transformator berdasarkan jumlah gas terlarut dalam minyak isolasi [14]. Dalam dunia industri, DGA sering diibaratkan seperti tes darah pada manusia. Seperti halnya darah manusia yang dapat melarutkan berbagai zat di sekitarnya, minyak transformator berfungsi serupa, sehingga analisis gas-gas terlarut dalam minyak dapat memberikan informasi mengenai kesehatan dan kinerja transformator.

Proses DGA dilakukan dengan mengambil sampel minyak dari transformator, mengekstraksi gas-gas terlarut di dalamnya, memisahkan komponen gas, mengidentifikasi jenisnya, dan mengukur jumlahnya dalam satuan part per million (ppm) [15]. Keunggulan utama dari DGA adalah kemampuannya mendeteksi dini potensi kerusakan pada transformator. Namun, metode ini membutuhkan sampel minyak yang sangat murni karena sensitivitas alat uji terhadap keberadaan gas. Jika sampel minyak tidak murni, hasil analisis bisa menjadi kurang akurat.

DGA bertujuan mengukur konsentrasi berbagai gas spesifik dalam minyak isolasi. Secara normal, gas-gas terlarut memang ada dalam minyak, tetapi kegagalan pada transformator dapat menyebabkan peningkatan konsentrasi gas tertentu. Pola kenaikan konsentrasi gas bergantung pada jenis kegagalan yang terjadi, seperti kerusakan elektrik atau termal. Dengan mengidentifikasi gas seperti hidrogen, metana, etana, etilena, asetilena, karbon monoksida, dan karbon dioksida, serta parameter

lain seperti kandungan air, nilai TDCG (Total Dissolved Combustible Gas), dan suhu minyak, kondisi transformator dapat dievaluasi.

Ketika terjadi anomali pada transformator, energi yang dihasilkan dapat memecah rantai hidrokarbon dalam minyak isolasi, menghasilkan gas-gas terlarut. DGA menghitung konsentrasi gas-gas ini untuk mengidentifikasi jenis kegagalan, seperti overheating, arcing, atau corona. Gas-gas utama yang dianalisis dalam DGA meliputi  $H_2$  (hidrogen),  $CH_4$  (metana), CO (karbon monoksida),  $CO_2$  (karbon dioksida),  $C_2H_4$  (etilena),  $C_2H_6$  (etana),  $C_2H_2$  (asetilena), dan TDCG.

#### d. Breakdown Voltage (BDV)

Pengujian tegangan tembus dilakukan untuk mengetahui kemampuan minyak isolasi dalam menahan stress tegangan kerja dari trafo itu sendiri [16]. Pengujian tegangan tembus dilakukan untuk mengetahui kemampuan minyak isolasi dalam menahan stress tegangan. Minyak yang jernih dan kering akan menunjukkan nilai tegangan tembus yang tinggi. Air bebas dan partikel solid, apalagi gabungan antara keduanya dapat menurunkan tegangan tembus secara dramatis.

Dengan kata lain pengujian ini dapat menjadi indikasi keberadaan kontaminan seperti kadar air dan partikel. Rendahnya nilai tegangan tembus dapat mengindikasikan keberadaan salah satu kontaminan tersebut, dan tingginya tegangan tembus belum tentu juga mengindikasikan bebasnya minyak dari semua jenis kontaminan. Pengujian BDV dapat dilakukan mandiri ataupun bersamaan saat purifikasi oli trafo. Pada pengujian mandiri, umumnya dilakukan sampai 6 kali pengujian dengan sampel yang sama. Sedangkan saat bersamaan dengan purifikasi, pengujian dilakukan setiap pengambilan sampel yang juga bersamaan dengan pengambilan sampel

DGA. Apabila hasil BDV dan DGA sudah membaik, maka proses purifikasi oli trafo dapat dihentikan. Pengujian ini mengacu standar IEC 156 (1995).

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Hasil Ukur Indeks Polarisasi (IP)

Indeks Polarisasi (IP) adalah perbandingan antara nilai tahanan isolasi yang diukur setelah pemberian tegangan DC steady-state selama 10 menit dan nilai tahanan isolasi yang diukur setelah 1 menit.

Tabel 1. Hasil Ukur Tahanan Isolasi dan IP

| Sambungan | Hasil ukur 1 menit (MOhm) |        | Hasil ukur 10 menit (MOhm) |        | IP = (Hasil ukur 10 menit / hasil ukur 1 menit) |        |
|-----------|---------------------------|--------|----------------------------|--------|-------------------------------------------------|--------|
|           | Feb 19                    | Apr 19 | Feb 19                     | Apr 19 | Feb 18                                          | Apr 19 |
| HV - G    | 2400                      | 2200   | 2800                       | 2500   | 1.16                                            | 1.13   |
| LV - G    | 2700                      | 2500   | 3000                       | 2800   | 1.11                                            | 1.12   |
| HV - LV   | 3500                      | 3500   | 5500                       | 5100   | 1.57                                            | 1.45   |

Persamaan nilai Indeks Polarisasi adalah sebagai berikut:

$$IP = \frac{R_{IS} (10 \text{ menit})}{R_{IS} (1 \text{ menit})}$$

Tabel 2. Parameter Hasil Indeks Polarisasi

| No | Hasil Uji  | Keterangan    | Rekomendasi                         |
|----|------------|---------------|-------------------------------------|
| 1  | < 1,0      | Berbahaya     | Investigasi                         |
| 2  | 1,0 – 1,1  | Jelek         | Investigasi                         |
| 3  | 1,1 – 1,25 | Dipertanyakan | Uji kadar air minyak, uji tan delta |
| 4  | 1,25 – 2,0 | Baik          | -                                   |
| 5  | > 2,0      | Sangat Baik   | -                                   |

Berdasarkan referensi table 2 di atas, disarankan untuk melakukan pengujian kadar air dan uji tan delta pada transformator unit 3 PLTD Tegineneng.

### B. Hasil Uji Tan Delta

Data hasil pengukuran tan delta telah diperoleh melalui pengujian yang dilakukan pada belitan. Berdasarkan laporan, terdapat tiga jenis pengujian yang dilakukan oleh petugas, yaitu pengujian CH, CHL, dan CL, sebagaimana tercantum pada tabel 3 di bawah ini.

Tabel 3. Hasil Uji Tan Delta Trafo Unit 3.

| Pengukuran | kV    | Watt  | Cap (nF)   | mA   | Tan Delta (%) |
|------------|-------|-------|------------|------|---------------|
| CH         | 10000 | 0,598 | 1,551<br>3 | 1,9  | 1,22          |
|            | 10000 | 2,160 | 2,191<br>3 | 4,1  | 3,13          |
|            | 10000 | 2,460 | 1,739      | 4,4  | 4,5           |
| CHL (UST)  | 10000 | 0,295 | 4,143<br>5 | 5,2  | 0,22          |
|            | 10000 | 0,081 | 5,719<br>6 | 10,8 | 0,04<br>5     |
|            | 10000 | 0,041 | 4,472<br>1 | 11,2 | 0,02<br>9     |
| CL         | 10000 | 0,124 | 3,449<br>5 | 2,2  | 0,11          |
|            | 10000 | 0,334 | 3,784<br>7 | 4,8  | 0,28          |

Keterangan :

GSTg = Grounded Specimen Test (Uji diketanahkan)

UST = Ungrounded Specimen Test (Uji tidak diketanahkan) CH = Pengukuran antara kumparan primer dengan ground

CL = Pengukuran antara kumparan sekunder dengan ground

CT = Pengukuran antara kumparan tertier dengan ground

CH + CHL = Pengukuran antara kumparan primer dengan sekunder

CL + CLT = Pengukuran antara kumparan sekunder dengan tertier

CT + CHT = Pengukuran antara kumparan primer dengan tertier

Tabel 4. Standar Tan Delta (belitan trafo) Berdasarkan Dobel (ANSI C 57.12.90):

| Nilai tan delta        | Keterangan |
|------------------------|------------|
| <0.5%                  | Bagus      |
| 0.5% - 0.7%            | Memburuk   |
| 0.5% - 1.0% (dan naik) | Periksa    |
| >1.0%                  | Jelek      |

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, nilai tan delta trafo unit 3 PLTD Tegineneng menunjukkan bahwa CHL dan CL berada dalam kondisi baik, sedangkan CH memiliki nilai yang buruk. Disarankan untuk melakukan pengujian kadar air pada minyak isolasi serta pengujian furan

### C. Hasil pengukuran Dissolved Gas Analysis (DGA)

Gas yang terdapat dalam minyak trafo perlu diperiksa dan dievaluasi secara berkala. Di PLN UPDK Bandar Lampung PLTD Tegineneng, pengujian DGA dijadwalkan setiap tiga bulan oleh Tim Predictive Maintenance (PdM). Kandungan gas dalam minyak trafo dievaluasi menggunakan satuan part per million (ppm). Pengujian dilakukan menggunakan peralatan merek GE (General Electric) dengan tipe Kelman Transport X. Berdasarkan standar IEEE C57 104-2008, hasil pengujian DGA pada trafo unit 3 menunjukkan konsentrasi masing-masing gas sebagai berikut:

Tabel 5. Kandungan Hasil Pengujian DGA.

| No. | Parameter                                 | Hasil Pengujian |           |           |           |            |
|-----|-------------------------------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|------------|
|     |                                           | 17-Jan-24       | 06-Mar-24 | 27-Mar-24 | 23-May-24 | Keterangan |
| 1   | Hydrogen (H <sub>2</sub> )                | 19              | <5        | <5        | <5        |            |
| 2   | Carbon Dioxide (CO <sub>2</sub> )         | 3743            | 216       | 575       | 798       | Cond t 2   |
| 3   | Carbon Monoxide (CO)                      | 334             | 9         | 38        | 52        |            |
| 4   | Ethylene (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) | 485             | 10        | 33        | 83        | Cond t 4   |

| No. | Parameter                                  | Hasil Pengujian |           |           |           |            |
|-----|--------------------------------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|------------|
|     |                                            | 17-Jan-24       | 06-Mar-24 | 27-Mar-24 | 23-May-24 | Keterangan |
| 5   | Ethana (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )    | 115             | 9         | 15        | 29        | Cond t 3   |
| 6   | Methane (CH <sub>4</sub> )                 | 215             | 4         | 15        | 46        | Cond t 2   |
| 7   | Acetylene (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ) | 0.5             | 0.0       | 0.0       | 0.0       |            |
| 8   | TDCG                                       | 1169            | 33        | 102       | 213       | Cond t 2   |

Tabel 6. Standar Nilai DGA Berdasarkan IEEE C57.104.2008 (dalam ppm).

| Parameter                                  | Cond. 1 | Cond. 2     | Cond. 3     | Cond. 4 |
|--------------------------------------------|---------|-------------|-------------|---------|
| Hidrogen (H <sub>2</sub> )                 | <100    | 101-700     | 701-1800    | >1800   |
| Carbon Dioxide (CO <sub>2</sub> )          | < 2500  | 2501 - 4000 | 4001-10000  | >10000  |
| Carbon Monoxide (CO)                       | < 350   | 351-570     | 571 - 1400  | > 1400  |
| Ethylene (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )  | < 50    | 51 - 100    | 101 - 200   | > 200   |
| Ethana (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )    | < 65    | 66 - 100    | 101 - 150   | > 150   |
| Methane (CH <sub>4</sub> )                 | < 120   | 121 - 400   | 401 - 1000  | > 1000  |
| Acetylene (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ) | < 1     | 2 - 9       | 10 - 35     | > 35    |
| TDCG                                       | < 720   | 721 - 1920  | 1921 - 4630 | > 4630  |

Keterangan :

- Pada kondisi 1 (biru), transformator beroperasi normal. Namun, tetap perlu dilakukan pemantauan.
- Pada kondisi 2 (hijau), tingkat TDCG mulai tinggi. Ada kemungkinan timbul gejala-gejala kegagalan yang harus mulai diwaspadai. Perlu dilakukan pengambilan sampel minyak yang lebih rutin dan sering.
- Pada kondisi 3 (Kuning), TDCG pada tingkat ini menunjukkan adanya

dekomposisi dari isolasi kertas dan/atau minyak transformator. Sebuah atau berbagai kegagalan mungkin saja sudah terjadi. Pada kondisi ini transformator sudah harus diwaspadai dan perlu perawatan lebih lanjut.

- Pada kondisi 4 (merah), TDCG pada tingkat ini menunjukkan adanya dekomposisi/ kerusakan pada isolasi kertas dan/atau minyak trafo sudah meluas.

#### D. Hasil pengujian Breakdown Voltage (BDV)

Pengujian BDV bertujuan untuk menentukan kemampuan minyak isolasi trafo dalam menahan tegangan kerja selama trafo beroperasi atau berbeban. Pengujian ini juga dilakukan selama proses purifikasi minyak transformator untuk menentukan waktu yang tepat dalam menghentikan proses purifikasi. Pada transformator unit 3 PLTD Tegineneng, data awal hasil pengujian BDV adalah sebagai berikut, dengan standar pengukuran yang mengacu pada IEC 156:1995.

Tabel 7 Pegujian BDV Sebelum Dilakukan Purifikasi.

| Pengukuran ke- | Hasil Ukur (kV) |              |
|----------------|-----------------|--------------|
|                | Top Trafo       | Bottom Trafo |
| 1              | 60              | 60           |
| 2              | 60              | 52           |
| 3              | 60              | 60           |
| 4              | 54              | 41           |
| 5              | 47              | 51           |
| 6              | 57              | 44           |
| Average (kV)   | 56              | 51           |

Melihat hasil DGA yang menunjukkan perbaikan, pengambilan data terakhir dilakukan pada pukul 22:30, dengan rata-rata hasil pengukuran BDV yang cukup baik, yaitu sebesar 46 kV.

Tabel 8 Average BDV Setelah Dilakukan Purifikasi.

| Pukul (WIB) | Average Hasil Ukur (kV) |
|-------------|-------------------------|
| 12:30       | 55                      |
| 15:00       | 52                      |
| 17:30       | 56                      |
| 20:00       | 51                      |
| 22:30       | 46                      |

Transformator unit 3 PLTD Tegineneng saat ini beroperasi rata-rata hanya 5 jam per hari, berbeda dengan transformator pembangkit lain yang biasanya beroperasi nonstop selama 24 jam. Berdasarkan hasil Indeks Polarisasi, terdapat indikasi bahwa belitan trafo mungkin telah terkontaminasi oleh kotoran, air, debu, atau material lainnya. Oleh karena itu, disarankan untuk melakukan pengujian kadar air dan tan delta.

Pada pengujian tan delta, hasil pengukuran pada CH (kumpulan primer terhadap ground) menunjukkan nilai yang kurang baik, yaitu 1,2%. Menurut standar ANSI C57.12.90, nilai ini termasuk kategori buruk. Karena itu, pengujian kadar air pada minyak isolasi dan uji furan perlu dilakukan untuk memastikan kondisi lebih lanjut.

Hasil pengujian DGA menunjukkan nilai act-based TDCG sebesar 1169 ppm pada 17 Januari 2024, yang termasuk dalam kondisi 2. Hal ini mengindikasikan gejala awal kegagalan yang perlu diwaspadai. Disarankan untuk melakukan pengambilan sampel setiap bulan, mengingat laju pertumbuhan gas/total TDCG >30 ppm terlihat dari hasil pengujian terakhir pada 6 Maret 2024, 27 Maret 2024, dan 23 Mei 2024. Dengan metode *key gas*, jenis kegagalan yang teridentifikasi adalah pemanasan minyak (*overheating of oil*), ditandai dengan dominasi gas etilen (63%) dan etana (20%).

Hasil pengujian breakdown voltage (BDV) menunjukkan hasil yang baik, tetapi tetap perlu perhatian karena saat diuji bersamaan dengan DGA, nilai BDV mengalami penurunan dari 55 kV menjadi 46 kV. Penurunan ini kemungkinan besar

disebabkan oleh efek penambahan oli selama proses purifikasi.

Berdasarkan keempat parameter tersebut, transformator unit 3 PLTD Tegineneng masih layak dioperasikan, asalkan pembebanannya tidak melebihi kapasitas trafo. Namun, tanda-tanda awal kegagalan isolasi, terutama pada minyak, mulai terlihat. Oleh karena itu, diperlukan perhatian ekstra dan pengujian rutin, termasuk pengujian kadar air dan furan, untuk memastikan kinerja trafo tetap optimal.

#### IV. KESIMPULAN

Transformator unit 3 PLTD Tegineneng, yang beroperasi rata-rata 5 jam per hari, menunjukkan indikasi kontaminasi pada belitan trafo berdasarkan hasil Indeks Polarisasi. Oleh karena itu, diperlukan pengujian tambahan, seperti uji kadar air dan tan delta, untuk memastikan kondisi isolasi. Hasil DGA menunjukkan nilai TDCG sebesar 1169 ppm (kondisi 2), mengindikasikan awal gejala kegagalan, dengan jenis kegagalan berupa pemanasan minyak (*overheating of oil*). Disarankan pengambilan sampel bulanan untuk memantau pertumbuhan gas, terutama karena peningkatan signifikan terlihat pada hasil pengujian sebelumnya. Meskipun trafo unit 3 masih layak dioperasikan dengan beban yang tidak melebihi kapasitas, tanda-tanda awal kegagalan isolasi mulai terlihat, terutama pada minyak. Pengujian lanjutan, seperti pengujian kadar air dan furan, serta pemantauan rutin, diperlukan untuk menjaga performa dan mencegah kerusakan lebih lanjut.

#### REFERENSI

- [1] El-Sharkawi, M. A. *Electric Energy: An Introduction*. CRC Press, 2018.
- [2] Nag, P. K. *Power Plant Engineering*. McGraw-Hill Education, 2021.
- [3] Woodward, S. R. *Diesel Engine Fundamentals*. Diesel Publications, 2020.
- [4] Bosch. *Automotive Handbook*, 10th Edition. Bentley Publishers, 2018.

- [5] Chapman, S. J. Electric Machinery Fundamentals. McGraw-Hill Education, 2022.
- [6] Wildi, T. Electrical Machines, Drives, and Power Systems. 6th Edition, Pearson Education, 2006.
- [7] Gonen, T. Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design. 3rd Edition, CRC Press, 2014.
- [8] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., Umans, S. D. Electric Machinery. 7th Edition, McGraw-Hill, 2013.
- [9] Gupta, J. B. Electrical Power Systems. Katson Books, 2016.
- [10] IEC 60044-1: Instrument Transformers - Current Transformers. International Electrotechnical Commission, 2003.
- [11] IEC 60044-2: Instrument Transformers - Voltage Transformers. International Electrotechnical Commission, 2003.
- [12] IEEE Std 43-2013: Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery. IEEE, 2013.
- [13] Haddad, A., & Warne, D. Advances in High Voltage Engineering. Institution of Engineering and Technology, 2004.
- [14] IEEE Std C57.104-2019: Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers. IEEE, 2019.
- [15] Kirtley, J. L. Electric Power Principles: Sources, Conversion, Distribution and Use. Wiley-IEE Press, 2020.
- [16] IEC 60156: Insulating Liquids - Determination of the Breakdown Voltage at Power Frequency. International Electrotechnical Commission, 1995.