

3. (Siregar., & Rahmadewi., 2021) Penelitian yang telah dilakukan dalam jurnal Trknik Unisla (2021) dengan judul “Pengujian Tahanan Isolasi Trafo Tegangan Di Gardu Induk Telukjambe Karawang”. Penelitian ini berfokus pada pelaksanaan pengujian tahanan isolasi pada transformator tegangan yang berlokasi di Gardu Induk Telukjambe, Karawang. Pengujian dilakukan secara kuantitatif langsung dari *box* panel transformator tegangan. Prosedur pengukuran meliputi pencatatan nilai tahanan pada detik ke-60 di *busbar* 1 dan *busbar* 2. Perlu dicatat bahwa pengujian tidak dapat dilaksanakan pada Fasa R dan Fasa T karena peralatan terkait sedang dalam proses pemindahan ke gardu induk lain. Meskipun hasil pengujian menunjukkan adanya penurunan nilai tahanan isolasi dibandingkan tahun sebelumnya, nilainya tetap berada di atas batas minimal yang disyaratkan. Oleh karena itu, disimpulkan bahwa tahanan isolasi berada dalam kondisi normal dan baik, dan transformator tegangan tersebut layak untuk dioperasikan.
4. (Suganda dkk., 2021) Penelitian yang telah dilakukan dalam jurnal Sinusoida (2021) dengan judul “Analisa Kualitas Tahanan Isolasi Transformator Daya”. Penelitian ini membahas mengenai pengujian kualitas tahanan isolasi pada transformator daya yang beroperasi di PT. APP PLN (Persero) Gardu Induk Bogor. Pengujian dilakukan untuk memastikan keandalan sistem isolasi dalam melindungi transformator dari potensi kerusakan akibat panas berlebih yang dapat muncul selama proses operasional. Beberapa faktor yang berpengaruh terhadap nilai tahanan isolasi antara lain suhu lingkungan, tingkat kelembapan, serta keberadaan kotoran atau kontaminan pada bushing dan permukaan isolator. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai indeks polarisasi sebesar 1,23, yang menunjukkan bahwa transformator masih dapat dioperasikan dengan catatan perlu dilakukan pengawasan dan pemantauan kondisi isolasi secara berkala. Selain itu, hasil pengujian tangen delta menghasilkan nilai rata-rata sebesar 0,39%, lebih rendah dari batas maksimum 0,5% yang ditetapkan oleh standar pengujian. Hal ini menandakan bahwa kualitas isolasi transformator masih dalam kondisi sangat baik dan mampu mempertahankan kinerja sistem kelistrikan secara andal. Temuan ini juga menegaskan pentingnya kegiatan pemeliharaan rutin untuk memastikan kestabilan nilai tahanan isolasi dari waktu ke waktu.

5. (Nur et al., 2022) Penelitian yang telah dilakukan dalam jurnal *Jurnal Power Elektronik* (2022) dengan judul “Analisis Pengujian Tahanan Isolasi Transformator Arus 70 kV Bay Kuningan II Di Gardu Induk Sunyaragi Cirebon”. Penelitian ini menganalisis kualitas tahanan isolasi pada transformator arus (Current Transformer/CT) yang beroperasi pada tegangan 70 kV di Bay Kuningan II, Gardu Induk Sunyaragi, Cirebon. Pengujian dilakukan dengan mengacu pada standar VDE Catalogue 228/4 sebagai acuan untuk menilai kelayakan isolasi peralatan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai tahanan isolasi pada setiap fase, yaitu R, S, dan T, berada di atas 1 GΩ dengan nilai rata-rata mencapai 14,28 MΩ. Nilai tersebut jauh di atas batas minimal yang ditetapkan standar, sehingga dapat disimpulkan bahwa kondisi isolasi transformator arus berada dalam keadaan sangat baik dan masih layak untuk dioperasikan. Temuan ini juga mengindikasikan bahwa sistem isolasi CT masih mampu memberikan perlindungan yang optimal terhadap gangguan listrik, serta mendukung kinerja sistem tenaga listrik secara andal dan efisien.
6. (Devianto., 2019) Penelitian yang telah dilakukan dalam Skripsi (2019) dengan judul “Analisis tahananisolasi transformator daya berdasarkan hasil uji indeks polarisasi, tangen delta, dan *breakdown voltage* di gardu induk 150 kV Knetungan”. Penelitian ini membahas mengenai metode pengujian isolasi pada transformator daya yang dilakukan melalui tiga tahapan utama, yaitu pengujian indeks polarisasi, pengujian tangen delta, serta pengujian tegangan tembus (*breakdown voltage*). Ketiga metode tersebut digunakan untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai kondisi sistem isolasi transformator. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan di Gardu Induk 150 kV Kentungan, diperoleh bahwa seluruh parameter pengujian menunjukkan hasil yang baik dan memenuhi standar kelayakan. Nilai klasifikasi kondisi yang dihasilkan dari setiap pengujian mengindikasikan bahwa tahanan isolasi transformator berada dalam kategori aman dan masih layak dioperasikan. Hasil ini juga menegaskan bahwa transformator memiliki keandalan yang tinggi dalam menahan tegangan listrik serta mampu menjaga kestabilan sistem kelistrikan secara keseluruhan

7. (Christiono dkk., 2022) Penelitian ini berjudul “Pengaruh Kontaminan Air terhadap Tegangan Tembus Isolasi Cair Minyak Mineral dan Nabati sebagai Alternatif Isolasi Minyak Transformator”. Penelitian ini membahas pengaruh kontaminasi air terhadap penurunan nilai tegangan tembus pada minyak isolasi transformator, baik yang berbasis nabati (minyak dedak padi) maupun mineral (hyrax). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar air secara signifikan mempercepat terjadinya kegagalan isolasi, karena air berperan sebagai jalur konduktif yang menurunkan kemampuan minyak dalam menahan tegangan listrik tinggi. Dibandingkan minyak nabati, minyak mineral menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh kontaminan air, meskipun keduanya tetap tidak memenuhi standar tegangan tembus apabila kadar air terlalu tinggi. Oleh karena itu, perawatan dan pengujian berkala terhadap kualitas minyak isolasi sangat diperlukan untuk memastikan keandalan sistem isolasi transformator. Tindakan seperti proses penyaringan (*filtering*), pengeringan (*dehydration*), serta penggantian minyak secara periodik menjadi langkah penting dalam mencegah penurunan performa isolasi dan memperpanjang umur operasi transformator.
8. (Reza Hidayat dkk., t.t.) Penelitian ini berjudul “Analisis Kemampuan Minyak Isolasi Transformator Daya Merek Unindo Dengan Pengujian Dissolved Gas Analysis dan Breakdown Voltage di Gardu Induk Serpong”. Penelitian ini membahas hasil pengujian Dissolved Gas Analysis (DGA) dan tegangan tembus pada transformator 1 dan 3 di Gardu Induk Serpong. Hasil pengujian menunjukkan adanya indikasi kegagalan isolasi berupa *thermal fault* yang disebabkan oleh pemanasan berlebih, ditandai dengan meningkatnya kadar gas metana dan etana dalam minyak isolasi. Meskipun pada pengujian pertama nilai tegangan tembus minyak masih berada dalam kondisi baik, pada pengujian kedua terjadi penurunan yang signifikan. Penurunan ini diduga disebabkan oleh kontaminasi minyak yang muncul akibat jeda waktu yang terlalu lama antara pengambilan sampel dan pelaksanaan pengujian. Temuan ini menekankan pentingnya pengambilan sampel secara tepat waktu serta pemantauan berkala terhadap kondisi minyak isolasi untuk mencegah kerusakan lebih lanjut dan menjaga keandalan transformator.

9. (Husnayain dkk., 2016) Penelitian ini berjudul “Transformer Oil Lifetime Prediction Using the Arrhenius Law based on Physical and Electrical Characteristics”. Penelitian ini membahas pengaruh suhu operasi terhadap umur pakai minyak isolasi transformator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu secara signifikan mempercepat degradasi minyak, sehingga menurunkan nilai tegangan tembus dan kemampuan isolasi secara keseluruhan. Dengan menggunakan pendekatan hukum Arrhenius, diperkirakan bahwa pada suhu operasi normal sebesar 60°C, minyak isolasi memiliki umur pakai sekitar 697 jam. Namun, dalam kondisi beban darurat, baik jangka panjang maupun jangka pendek, laju penurunan umur isolasi meningkat secara drastis, sehingga memperpendek masa pakai minyak dan berpotensi menurunkan keandalan sistem isolasi transformator. Temuan ini menekankan pentingnya pemantauan suhu operasi dan pengendalian beban untuk menjaga stabilitas dan umur pakai minyak isolasi.
10. (Samsurizal dkk., 2024) Penelitian ini berjudul “Perbandingan Ketebalan Insulasi Jenis Kertas Laminasi Ditinjau dari Tegangan Tembus Transformator pada Dua Kondisi”. Penelitian ini membahas pengaruh perendaman kertas isolasi jenis laminasi dalam minyak isolasi terhadap kemampuan tegangan tembus (*breakdown voltage*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kertas laminasi yang direndam minyak memiliki tegangan tembus jauh lebih tinggi dibandingkan kertas dalam kondisi kering. Dengan ketebalan yang sama, yaitu 1,04 mm, kertas yang direndam menghasilkan tegangan tembus rata-rata 23,82 kV, sedangkan kertas kering hanya mencapai 6,7 kV. Temuan ini menunjukkan bahwa perendaman kertas dalam minyak secara signifikan meningkatkan kualitas isolasi, karena minyak mampu menutup pori-pori kertas dan mengurangi kadar kelembaban. Dengan demikian, perendaman minyak tidak hanya memperbaiki sifat listrik kertas isolasi, tetapi juga meningkatkan keandalan dan umur operasi sistem isolasi transformator secara keseluruhan.
11. (Samsurizal dkk., 2023) Penelitian ini berjudul “Uji Kemampuan Minyak Isolasi Menggunakan Dissolved Gas Analysis Pada Transformator”. Penelitian ini membahas pengujian Dissolved Gas Analysis (DGA) pada transformator unit 6 di

Gardu Induk 150 kV Bogor Baru. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai Total Dissolved Combustible Gas (TDCG) dari tiga kali pengujian berturut-turut tetap berada pada kategori Kondisi 1, menandakan bahwa transformator masih beroperasi dalam kondisi normal dan aman. Meskipun demikian, terdeteksi adanya peningkatan kandungan gas tertentu, seperti etana dan karbon dioksida, yang menjadi indikasi awal terjadinya degradasi minyak isolasi. Hal ini menekankan pentingnya pemantauan berkala terhadap suhu dan beban transformator, serta pelaksanaan pengujian rutin, guna menjaga keandalan sistem isolasi dan mencegah potensi kegagalan di masa depan. Penurunan kualitas isolasi dapat terjadi hingga hampir 1% per hari jika faktor-faktor tersebut tidak dikontrol dengan baik.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Gardu Induk

Gardu induk memegang peranan yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik karena menjadi penghubung utama antara jaringan transmisi dan distribusi. Keberadaannya merupakan bagian yang tak terpisahkan dari infrastruktur kelistrikan, sebab gardu induk berfungsi sebagai pusat pengatur aliran daya agar energi listrik dari pembangkit dapat disalurkan secara efisien ke konsumen. Di dalamnya terdapat berbagai peralatan penting seperti transformator daya dan rel-rel listrik yang berfungsi untuk mengatur, menyalurkan, serta menyesuaikan tingkat tegangan sesuai kebutuhan sistem. Rel daya berperan menghubungkan berbagai bagian jaringan sehingga energi dari saluran transmisi dapat disalurkan ke jaringan distribusi dengan aman dan stabil.



Gambar 2. 1 Gardu Induk

Berikut merupakan fungsi dari gardu induk, yaitu diantaranya adalah:

- a) Transformator daya berperan penting dalam sistem tenaga listrik karena berfungsi menyesuaikan tingkat tegangan sesuai dengan kebutuhan sistem. Komponen ini tidak hanya berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan dari tinggi ke rendah maupun sebaliknya, tetapi juga dapat mengubah tegangan tinggi ke tegangan tinggi lainnya, atau ke tegangan menengah, tergantung pada konfigurasi dan kebutuhan sistem transmisi serta distribusi listrik yang digunakan.
- b) Gardu induk juga berfungsi sebagai tempat dilaksanakannya berbagai aktivitas penting yang berkaitan dengan sistem tenaga listrik. Di antaranya meliputi pengukuran parameter kelistrikan, pemantauan kondisi sistem, pengoperasian jaringan, serta pengaturan aspek keamanan untuk menjaga agar sistem tetap beroperasi dengan andal dan efisien.
- c) Pengaturan pelayanan beban dilakukan dengan mengalihkan suplai listrik ke gardu lain melalui jaringan tegangan tinggi. Selanjutnya, aliran listrik tersebut disalurkan ke sejumlah gardu distribusi yang telah menurunkan tegangannya menggunakan transformator daya, sehingga tegangan yang diterima dapat disesuaikan dengan kebutuhan para pengguna di tingkat yang lebih rendah.
- d) Penghubung, atau yang biasa disebut sistem interkoneksi antar gardu induk, adalah mekanisme yang mengaitkan satu gardu induk dengan gardu lainnya yang berada di lokasi berdekatan. Melalui hubungan ini, setiap gardu dapat saling memasok dan menerima tegangan, sehingga kontinuitas serta keandalan pasokan listrik dalam sistem transmisi tetap terjamin.

Terdapat beberapa komponen-komponen pada gardu induk yaitu sebagai berikut:

- a) Transformator tenaga merupakan komponen vital dalam sistem kelistrikan yang berfungsi utama untuk mengubah tingkat tegangan listrik. Alat ini digunakan untuk menaikkan maupun menurunkan tegangan sesuai kebutuhan tanpa memengaruhi frekuensinya. Dengan demikian, transformator membantu menyesuaikan besarnya tegangan agar sesuai dengan standar atau kebutuhan operasional sistem, baik dalam proses penyaluran daya dari pembangkit ke konsumen maupun antar jaringan listrik.

- b) Peralatan tegangan tinggi (sisi primer dan sisi sekunder) yaitu:
1. Lightning Arrester
 2. Pemutus Tenaga (PMT)
 3. Saklar Pemisah (PMS)
 4. Trafo Arus (CT)
 5. Trafo Tegangan (PT)
 6. Rel atau Busbar
- c) Peralatan kontrol memiliki peranan penting dalam pengoperasian gardu induk yang dikendalikan dari ruang kontrol. Di dalamnya terdapat berbagai komponen, seperti panel kontrol dan panel relay yang berfungsi untuk mengatur sekaligus melindungi sistem. Selain itu, tersedia juga alat ukur (meter) yang digunakan untuk memantau kondisi sistem secara langsung, serta perangkat komunikasi seperti telepon, PLC, dan radio pemancar yang mendukung komunikasi internal maupun eksternal. Sistem ini dilengkapi pula dengan baterai dan rectifier sebagai sumber daya cadangan, serta sistem pembumian (grounding) pada titik netral untuk menjaga keselamatan instalasi. Tak hanya itu, terdapat juga sistem SCADA yang digunakan untuk pemantauan dan pengendalian jarak jauh, serta kubikel yang berfungsi melindungi peralatan listrik dari gangguan luar.
- d) Peralatan ini memiliki peran penting dalam menjaga dan meningkatkan kinerja sistem penyaluran tenaga listrik. Komponen yang termasuk di dalamnya meliputi peterson coil, reaktor, kapasitor statis, resistor, serta berbagai perangkat lain yang berfungsi untuk menjaga stabilitas dan efisiensi aliran listrik pada jaringan transmisi.

2.2.2 Transformator Daya

Transformator adalah perangkat listrik yang berfungsi untuk mengubah tingkat tegangan arus bolak-balik, baik menaikkan atau menurunkan tegangan, dengan cara memanfaatkan pengaruh induksi elektromagnetik melalui dua kumparan yang terhubung secara magnetis (Suganda dkk., 2021). Prinsip kerja transformator didasarkan pada konsep induksi elektromagnetik, yaitu proses perpindahan energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lain tanpa adanya kontak langsung. Perangkat ini memegang peranan penting dalam sistem distribusi listrik karena memungkinkan penyesuaian tingkat tegangan sesuai kebutuhan berbagai sistem kelistrikan. Transformator

merupakan peralatan listrik statis yang berfungsi menyalurkan daya pada frekuensi tetap dengan cara menaikkan atau menurunkan tegangan. Tegangan yang dihasilkan dari pembangkit umumnya masih rendah, sehingga pada jaringan transmisi digunakan transformator penaik tegangan (*step-up*) untuk meningkatkan tegangan, dan transformator penurun tegangan (*step-down*) untuk menurunkannya sebelum disalurkan ke pelanggan. Berdasarkan jenisnya, transformator dibedakan menjadi dua, yaitu trafo satu fasa dan tiga fasa. Trafo satu fasa memiliki satu lilitan primer dan satu lilitan sekunder, dengan satu penghantar fasa serta satu penghantar netral. Jenis ini biasanya digunakan pada sistem listrik bertegangan 220V, seperti pada rumah tinggal atau gedung dengan kapasitas kecil.



Gambar 2. 2 Transformator

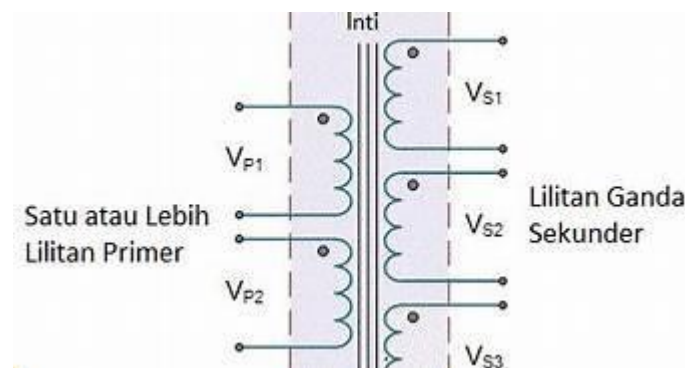
Transformator tiga fasa berfungsi menyalurkan energi listrik melalui kopling magnetik dan memiliki tiga lilitan primer serta tiga lilitan sekunder. Pada jenis transformator ini terdapat tiga penghantar, yaitu R, S, dan T, serta satu penghantar netral. Dengan tegangan kerja sebesar 380 Volt, trafo tiga fasa banyak digunakan di sektor industri. Transformator hanya dapat beroperasi ketika menerima suplai listrik dengan arus bolak-balik (AC). Apabila diberikan arus searah (DC), seperti dari baterai, alat ini tidak akan berfungsi dengan baik. Hal ini karena sistem kerja transformator bergantung pada perubahan arah arus untuk menghasilkan perubahan tegangan; tanpa adanya perubahan arah arus, proses induksi elektromagnetik tidak terjadi sehingga transformator tidak dapat bekerja sebagaimana mestinya. Dengan kata lain, untuk memastikan transformator dapat berfungsi, sumber daya yang digunakan haruslah

berbentuk arus bolak-balik (Linsley, 2004). Transformator tenaga adalah komponen vital dalam sistem kelistrikan yang berfungsi untuk mengubah tingkat tegangan listrik, baik dari tegangan tinggi ke rendah maupun dari tegangan rendah ke tinggi, sesuai dengan kebutuhan sistem. Transformator ini berperan utama dalam menyalurkan daya listrik secara efisien antara dua tingkat tegangan yang berbeda. Dalam penerapannya, transformator tenaga umumnya dipasang dengan mempertimbangkan posisi titik netral sesuai kebutuhan sistem proteksi. Sebagai contoh, transformator dengan rasio tegangan 150/70 kV ditempatkan titik netralnya pada sisi 150 kV, sedangkan transformator dengan rasio 70/20 kV diberi tahanan pada sisi netral 20 kV. Penempatan titik netral tersebut sangat penting untuk menjaga keamanan dan keandalan sistem kelistrikan secara keseluruhan.

3.2.2.1 Konstruksi Transformator

1. Kumparan Trafo

Transformator terdiri dari dua jenis kumparan berbentuk lilitan, yaitu kumparan primer yang dihubungkan ke sumber arus bolak-balik (AC) dan kumparan sekunder yang terhubung ke beban. Secara umum, terdapat dua tipe konstruksi belitan pada transformator, yaitu *Core Type* dan *Shell Type*. Pada tipe *Core Type*, inti besi berfungsi sebagai tempat untuk melilitkan kumparan, sedangkan pada tipe *Shell Type*, kumparan justru dikelilingi oleh inti besi sehingga tampak seperti berada di dalam cangkang.



Gambar 2. 3 Tipe Belitan Trafo (Utami, 2022)

2. Inti Besi

Inti besi dibuat dari material feromagnetik yang disusun secara berlapis-lapis untuk meningkatkan pembentukan fluks magnetik sehingga energi dapat terinduksi ke

kumparan sekunder dengan lebih baik, sekaligus mengurangi rugi-rugi daya pada transformator.



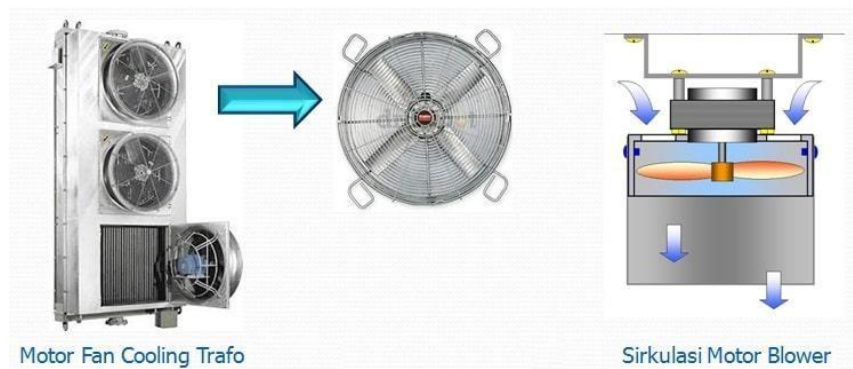
Gambar 2.4 Inti Besi Trafo

3. Sistem Pendingin

Sistem pendingin pada transformator berperan penting untuk menjaga suhu kerja trafo tetap stabil dan aman selama beroperasi. Panas pada trafo muncul akibat adanya rugi daya dari resistansi kumparan serta hambatan fluks magnetik pada inti besi. Oleh karena itu, sistem pendingin digunakan untuk mengendalikan suhu agar transformator terhindar dari kerusakan maupun potensi kebakaran. Beberapa jenis sistem pendingin yang umum digunakan pada transformator antara lain sebagai berikut:

a) Pendingin Udara

Sistem pendingin udara umumnya digunakan pada transformator dengan kapasitas daya kecil hingga menengah. Pendinginan dilakukan dengan memanfaatkan kipas yang mengalirkan udara di sekitar trafo, sehingga panas dari inti maupun kumparan dapat dilepaskan secara efektif.



Gambar 2. 5 Pendingin Udara Transformator (Utami, 2022)

b) Pendingin Minyak

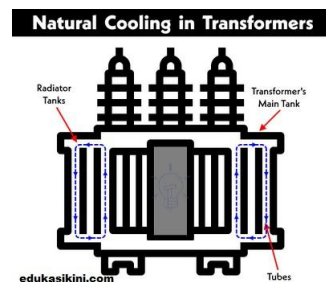
Transformator dengan kapasitas daya besar umumnya menggunakan sistem pendingin berbasis minyak. Minyak berperan sebagai media untuk menyerap sekaligus memindahkan panas dari inti serta kumparan menuju area permukaan yang lebih luas, sehingga panas dapat terbuang dengan lebih efisien. Secara umum, terdapat dua jenis sistem pendinginan minyak, yaitu pendingin minyak aliran paksa, di mana minyak dipompa melalui pipa dan radiator untuk melepaskan panas ke lingkungan sekitar, serta pendingin minyak perendaman, di mana transformator ditempatkan dalam tangki berisi minyak dan panas dilepaskan melalui permukaan tangki yang luas.



Gambar 2.6 Minyak Trafo (Utamu, 2022)

c) Pendingin Air

Pada transformator berkapasitas besar di sektor industri, sistem pendingin berbasis air sering digunakan sebagai alternatif untuk menurunkan suhu. Air dialirkan melalui saluran di sekitar transformator guna menyerap panas, kemudian dialirkan keluar melalui sistem perpipaan untuk membuang panas tersebut.



Gambar 2.7 Sistem Pendingin Air (Utami, 2022)

Dalam kondisi tertentu, transformator dapat menggunakan kombinasi beberapa sistem pendingin seperti ONAF, ONAN, OFAF, atau OFAN. Jenis sistem pendingin yang dipilih disesuaikan dengan kapasitas daya, ukuran, serta kondisi lingkungan tempat transformator beroperasi. Menjaga suhu transformator agar tetap dalam batas aman sangat penting untuk menjaga kinerja tetap optimal sekaligus memperpanjang umur peralatan. Untuk pemantauan suhu, biasanya digunakan sensor suhu dan sistem otomatis yang akan mematikan transformator secara otomatis apabila suhu melebihi batas yang telah ditentukan.

4. *Bushing*

Bushing merupakan komponen konduktor yang umumnya terbuat dari bahan porselin dan berfungsi sebagai penghubung antara kumparan transformator dengan jaringan listrik eksternal. Setiap ujung kumparan, baik pada sisi primer maupun sekunder, memiliki terminal yang keluar melalui isolator. Isolator ini berperan tidak hanya sebagai penghubung, tetapi juga sebagai pemisah antara kumparan dan badan transformator, sehingga mencegah terjadinya kontak langsung yang dapat menimbulkan risiko pada sistem.



Gambar 2.8 *Bushing* Trafo

5. Tangki dan Konservator (Khusus Untuk Transformator Basah)

Secara umum, komponen-komponen transformator yang terendam minyak ditempatkan di dalam tangki baja. Pada transformator distribusi, tangki ini biasanya

dilengkapi dengan sirip pendingin (*cooling fin*) yang berfungsi memperluas permukaan dinding tangki agar proses pelepasan panas dari minyak berlangsung lebih efektif. Dengan adanya sirip pendingin, suhu di dalam transformator dapat terjaga pada kondisi optimal sehingga efisiensi dan kinerjanya tetap stabil. Sirip tersebut juga membantu meningkatkan efisiensi perpindahan panas minyak melalui proses konveksi. Selain itu, tangki transformator dirancang agar mampu menampung pemuatan minyak saat terjadi kenaikan suhu. Untuk menjaga volume minyak tetap stabil dan melindungi sistem, tangki dilengkapi dengan konservator, yaitu wadah tambahan yang berfungsi menampung cadangan minyak serta mengimbangi perubahan volumenya selama transformator beroperasi.

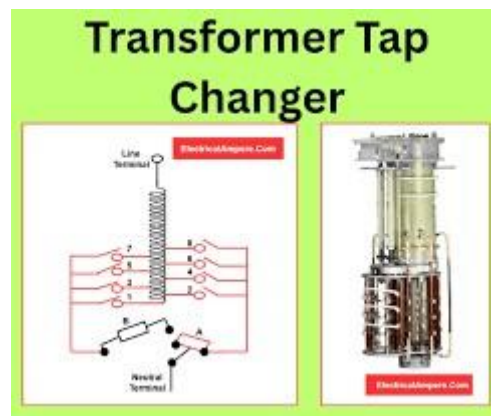


Gambar 2.9 Tangki dan Konservator

6. Tap Changer

Tap changer merupakan perangkat pada transformator yang berfungsi untuk mengubah rasio lilitan secara bertahap guna menyesuaikan tegangan keluaran. Mekanisme ini bekerja dengan menghubungkan lilitan transformator ke titik-titik tertentu yang disebut tap, baik pada sisi primer maupun sekunder. Secara umum, terdapat dua jenis tap changer, yaitu *No-Load Tap Changer (NLTC)* dan *On-Load Tap Changer (OLTC)*. NLTC, atau sering disebut off-circuit tap changer, digunakan ketika penyesuaian rasio lilitan jarang dilakukan dan transformator dapat dimatikan saat proses pengaturan berlangsung. Sementara itu, OLTC memungkinkan perubahan rasio lilitan

tanpa perlu mematikan transformator, sehingga sangat cocok untuk sistem yang menuntut kontinuitas pasokan listrik (Firdaus., 2018). OLTC umumnya dipasang pada transformator daya besar dan memiliki mekanisme yang lebih kompleks, seperti *tap selector* dan *diverter switch*, yang memungkinkan pengaturan tegangan dilakukan secara kontinu selama transformator beroperasi, seperti *tap selector* dan *diverter switch*, yang memungkinkan pengaturan tegangan secara kontinu selama operasi OLTC biasanya digunakan pada transformator daya besar dengan mekanisme yang lebih kompleks, seperti *tap selector* dan *diverter switch*, yang memungkinkan pengaturan tegangan secara kontinu selama operasi (Asidik., 2019).



Gambar 2.10 *Tap Changer*

3.2.2.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri atas dua lilitan kawat, yaitu lilitan primer dan sekunder, yang memiliki sifat induktif. Kedua lilitan ini tidak terhubung secara langsung secara listrik, namun tetap saling berhubungan melalui medan magnet pada inti dengan reluktansi rendah. Ketika lilitan primer dialiri tegangan bolak-balik, akan timbul fluks magnet yang berubah-ubah di dalam inti transformator yang telah dilaminasi. Karena lilitan primer membentuk rangkaian tertutup, arus listrik akan mengalir di dalamnya dan menghasilkan fluks magnet yang menimbulkan induksi diri (*self induction*). Fluks magnet yang terbentuk pada lilitan primer ini juga menimbulkan gaya gerak listrik pada lilitan sekunder, yang dikenal sebagai induksi bersama (*mutual induction*). Akibatnya, apabila lilitan sekunder dihubungkan dengan beban, arus listrik akan mengalir di dalamnya. Dengan cara ini, energi listrik dapat ditransfer dari lilitan primer ke lilitan sekunder melalui proses induksi magnetik.

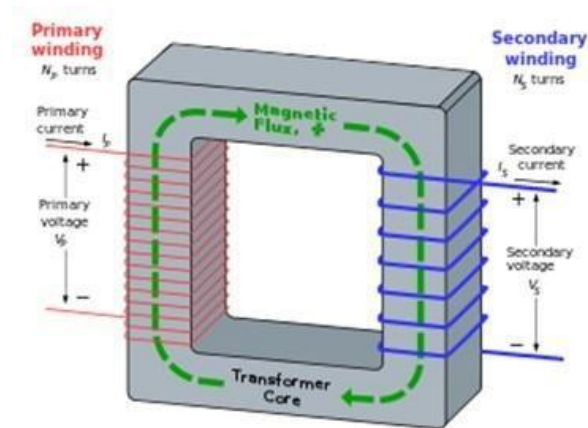
$$e = (-) N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

Dimana:

e = Gaya Gerak Listrik

N = Jumlah Lilitan

$\frac{d\Phi}{dt}$ = Perubahan Flux Magnet (Weber/Sec)



Gambar 2.11 Prinsip Kerja Transformator

Dari persamaan yang ada dapat diketahui bahwa tegangan induksi yang dihasilkan pada kumparan transformator berbanding lurus dengan jumlah lilitan pada inti transformator. Dengan kata lain, semakin banyak jumlah lilitan, maka semakin besar pula tegangan induksi yang dihasilkan. Tegangan induksi hanya akan muncul apabila terjadi perubahan fluks magnetik terhadap waktu; jika fluks bersifat tetap atau konstan, maka tidak akan timbul tegangan pada kumparan. Tegangan induksi pada transformator terjadi karena adanya perubahan medan magnet yang menimbulkan gaya gerak listrik di dalam lilitan. Setiap transformator memiliki nilai tertentu yang disebut perbandingan transformasi (a), yang menggambarkan hubungan antara jumlah lilitan pada sisi primer dan sekunder. Nilai ini menunjukkan bagaimana tegangan dan arus berubah selama proses transformasi, serta menentukan seberapa besar perbedaan antara sisi sekunder dan sisi primer dalam menghasilkan tegangan maupun arus keluaran transformator.

Berikut perumusannya:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.2)$$

Dimana:

V_p = Tegangan Primer (Volt)

V_s = Tegangan Sekunder (Volt)

N_p = Jumlah Lilitan Primer

N_s = Jumlah Lilitan Sekunder

3.2.2.3 Jenis Transformator

Transformator memiliki jenis berdasarkan fungsinya antara lain:

1. Transformator Daya (*Power Transformer*)

Transformator daya merupakan jenis trafo yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dengan cara menaikkan tegangan (*step-up*) maupun menurunkannya (*step-down*). Transformator ini dirancang untuk mentransfer daya dalam jumlah besar dan tidak digunakan secara langsung untuk menyuplai beban. Tegangan tinggi yang dihasilkan pada sisi keluaran transformator daya digunakan untuk keperluan transmisi listrik jarak jauh, sedangkan tegangan rendahnya masih tergolong tinggi sehingga belum dapat langsung disalurkan ke beban pengguna.

2. Transformator Pengukuran (*Measurement Transformer*)

Transformator Pengukuran berfungsi untuk mengukur kapasitas arus, tegangan, dan daya. Contohnya *Current Transformer* (CT) dan *Potensial Transformer* (PT).

3. Transformator Distribusi (*Distribution Transformer*)

Transformator distribusi memiliki fungsi serupa dengan transformator daya, namun keduanya berbeda pada tingkat tegangannya. Pada transformator distribusi, sisi tegangan tinggi berada pada level tegangan menengah, sedangkan sisi tegangannya yang rendah berada pada level tegangan rendah (TR). Tegangan menengah (TM) umumnya digunakan untuk melayani kebutuhan pelanggan industri, sementara tegangan rendah (TR) digunakan untuk memasok listrik ke pelanggan rumah tangga.

Rumus untuk mengetahui daya yang ada pada transformator diamati dari sisi tegangan tinggi (Primer) dapat dinyatakan sebagai berikut (Dasa Novfowan dkk., 2023):

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \dots\dots\dots 2.3)$$

Dimana:

- S = Daya Pada Trafo (kVA)
- V = Tegangan Pada Sisi Primer Trafo (Volt)
- I = Arus Jala-jala (Ampere)

Sehingga dapat ditentukan nilai arus saat beban penuh yang terjadi pada sisi tegangan rendah (Sekunder) dengan rumus:

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana:

- I_{FL} = Arus Beban Penuh (Ampere)
- S = Daya Transformator (kVA)
- V = Tegangan Sisi Sekunder Transformator L – L (kV)

3.2.2.4 Pemeliharaan Transformator

Pemeliharaan transformator merupakan kegiatan yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik, parameter, kondisi, dan performa dari sebuah transformator. Proses ini biasanya melibatkan berbagai jenis pengujian. Secara umum, pengujian transformator dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu pengujian rutin, pengujian khusus, dan pengujian tipe. Masing-masing jenis pengujian ini memiliki tujuan dan prosedur tersendiri dalam memastikan transformator tetap beroperasi dengan baik dan aman (Tondok., 2019).

1. Pengujian Rutin (*Preventive Maintance*)

Pengujian rutin, atau yang sering disebut pemeliharaan preventif, merupakan kegiatan pemeriksaan berkala yang dilakukan pada transformator daya. Pengujian ini dilakukan sesuai jadwal yang telah ditetapkan berdasarkan standar dan ketentuan yang berlaku. Tujuannya adalah untuk memastikan kondisi transformator tetap dalam keadaan baik dan mencegah terjadinya kerusakan yang tidak diinginkan. Melalui pemeriksaan rutin ini, potensi gangguan atau penurunan kinerja dapat terdeteksi lebih

awal, sehingga tindakan perbaikan dapat segera dilakukan sebelum menimbulkan masalah yang lebih besar. Selain itu, kegiatan ini juga menjadi bagian penting dari upaya menjaga keandalan sistem kelistrikan secara keseluruhan, karena transformator merupakan salah satu komponen vital dalam proses penyaluran energi listrik. (Tondok., 2019). Berikut merupakan bagian dari pengujian rutin:

- 1) Pengujian tahanan isolasi
- 2) Pengujian tangen delta
- 3) Pengujian tahanan kumparan
- 4) Pengujian perbandingan belitan
- 5) Pengujian rugi beban

2. Pengujian Jenis

Pengujian jenis merupakan tahap penting dalam memastikan kualitas transformator. Pengujian ini dilakukan pada satu unit transformator yang dianggap mewakili tipe atau seri tertentu. Tujuan utamanya adalah untuk memverifikasi bahwa rancangan, bahan, serta proses pembuatannya sudah sesuai dengan standar dan spesifikasi teknis yang berlaku. Dengan demikian, jika satu unit transformator berhasil lolos pengujian jenis, maka unit lain dengan desain dan metode produksi yang sama dapat dianggap memenuhi standar mutu tanpa perlu diuji kembali satu per satu. Hal ini membantu efisiensi dalam proses produksi dan pengujian, serta memberikan jaminan mutu terhadap produk secara keseluruhan (Tondok., 2019). Berikut merupakan bagian dari pengujian Jenis:

- 1) Pengujian Kenaikan Suhu
- 2) Pengujian tegangan impulse
- 3) Pengujian tegangan minyak tembus oli

3. Pengujian Khusus

Pengujian khusus pada transformator merupakan jenis pengujian yang dilakukan di luar pengujian rutin maupun tipe, dan biasanya tidak bersifat wajib kecuali telah disepakati antara pihak produsen dan pembeli dalam kontrak. Jenis pengujian ini umumnya dilakukan atas permintaan khusus dari pihak pembeli untuk memastikan bahwa transformator yang dipesan dapat memenuhi standar kinerja tertentu sesuai kebutuhan sistem kelistrikan. Dalam praktiknya, pengujian khusus

mencakup beberapa aspek penting, seperti uji dielektrik untuk menilai ketahanan isolasi terhadap tegangan lebih, serta uji hubung singkat yang bertujuan mengetahui kemampuan transformator menahan arus berlebih dalam waktu singkat saat terjadi gangguan. Kedua pengujian tersebut berperan penting dalam menjamin keandalan dan keselamatan transformator saat digunakan di lapangan, terlebih pada sistem transmisi bertegangan tinggi yang memerlukan tingkat keamanan dan kestabilan yang tinggi (Tondok., 2019).

3.2.2.5 Pedoman Pemeliharaan Transformator

1. *In service Inspection*

In service Inspection adalah kegiatan pemeriksaan yang dilakukan saat transformator masih beroperasi atau dalam kondisi bertegangan. Tujuan dari proses ini adalah untuk memantau serta mendeteksi sejak awal adanya tanda-tanda ketidaknormalan yang mungkin terjadi tanpa perlu mematikan sistem. Dengan demikian, potensi gangguan atau kerusakan pada transformator dapat diketahui lebih dini, sehingga tindakan pencegahan dapat segera dilakukan sebelum menimbulkan masalah yang lebih besar. Metode ini sangat penting untuk menjaga keandalan pasokan listrik dan mengurangi waktu gangguan operasional, karena transformator tetap bisa berfungsi selama proses pemeriksaan berlangsung. Selain itu, pendekatan ini juga menjadi salah satu strategi preventif dalam kegiatan pemeliharaan peralatan sistem tenaga listrik, mengingat transformator merupakan komponen vital dalam sistem transmisi maupun distribusi listrik. (PT.PLN (Persero)., 2014).

2. *In Service Meansurement*

In Service Meansurement adalah kegiatan pengujian atau pemantauan yang dilakukan saat transformator beroperasi dalam kondisi normal, tanpa harus memutus aliran listrik atau memadamkan sistem. Tujuan utamanya adalah untuk mendapatkan gambaran yang lebih detail mengenai kondisi internal dan eksternal transformator. Melalui metode ini, petugas dapat menilai kinerja transformator serta mendeteksi potensi gangguan atau kerusakan lebih awal tanpa mengganggu kontinuitas suplai listrik. Pendekatan ini sangat bermanfaat terutama pada sistem kelistrikan yang tidak dapat dimatikan sembarangan karena berpotensi mengganggu pasokan energi kepada pengguna. Selain efisien dari segi waktu, metode ini juga memberikan gambaran kondisi

peralatan secara real-time sehingga keputusan perawatan atau tindak lanjut dapat diambil dengan lebih akurat dan tepat waktu. (PT.PLN (Persero)., 2014).

3. *Shutdown Testing Measurement*

Shutdown Testing Measurement adalah Merupakan serangkaian kegiatan pengujian yang dilakukan saat transformator berada dalam kondisi tidak beroperasi atau sedang dipadamkan. Pengujian ini biasanya dilakukan sebagai bagian dari pemeliharaan rutin untuk memastikan bahwa kondisi transformator tetap baik dan siap digunakan kembali dengan aman serta andal. Selain itu, pengujian ini juga penting dilakukan apabila muncul indikasi adanya gangguan atau ketidaknormalan pada transformator, sehingga penyebab masalah dapat diketahui lebih awal sebelum menimbulkan kerusakan yang lebih serius. Karena dilakukan saat trafo dalam keadaan tanpa tegangan dan beban, pemeriksaan dapat dilakukan secara menyeluruh dengan hasil yang lebih akurat serta risiko keselamatan kerja yang lebih terjaga. Shutdown Testing juga menjadi momen penting untuk mengevaluasi komponen internal dan isolasi transformator guna memastikan bahwa tidak ada degradasi atau potensi gangguan yang tersembunyi sebelum transformator kembali difungsikan dalam sistem. (PT.PLN (Persero)., 2014). Berikut merupakan pengujian dalam proses pemeliharaan *Shutdown Testing Measurement* yaitu:

- 1) Pengukuran Tahanan Isolasi
- 2) Pengukuran Tangen Delta
- 3) Pengujian Minyak Trafo dengan Metode BDV (*Breakdown Voltage*)

2.2.3 Tahanan Isolasi

Tahanan isolasi merupakan suatu nilai tahanan listrik yang berada di antara dua konduktor atau kawat saluran yang dipisahkan oleh bahan isolator, baik antara dua kawat yang saling terisolasi maupun antara satu kawat dengan tanah. Tahanan ini berfungsi sebagai penghambat arus bocor agar tidak mengalir secara bebas ke bagian lain yang seharusnya tidak dialiri listrik. Dalam sistem kelistrikan seperti pada transformator, pengujian terhadap kualitas tahanan isolasi menjadi sangat penting untuk memastikan keandalan dan keamanan operasional peralatan. Salah satu metode pengujian yang umum dilakukan adalah mengukur tahanan antara belitan (kumparan) dan inti besi transformator. Tujuan dari pengukuran ini adalah untuk memastikan tidak

terjadi aliran arus yang tidak diinginkan dari belitan menuju inti besi, yang bisa menyebabkan kerusakan atau bahkan kegagalan sistem. Dengan kata lain, pengujian tahanan isolasi bertujuan untuk menilai sejauh mana sistem isolasi mampu membatasi arus bocor dan melindungi peralatan dari gangguan listrik yang dapat membahayakan peralatan maupun keselamatan personel (Suganda., 2021). Pengukuran tahanan isolasi pada transformator merupakan salah satu bentuk pengujian yang dilakukan saat transformator dalam keadaan padam atau tidak beroperasi, yang dikenal juga sebagai *shutdown testing measurement*. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa kondisi isolasi di dalam transformator masih baik dan aman sebelum kembali diaktifkan. Kegiatan ini biasanya menjadi bagian dari pemeliharaan rutin yang dilakukan secara berkala untuk menjaga keandalan serta performa transformator. Selain itu, pengukuran ini juga sering dilakukan apabila muncul tanda-tanda ketidaknormalan pada sistem, sebagai langkah awal dalam proses identifikasi penyebab gangguan atau potensi kerusakan pada bagian isolasi transformator. Berikut adalah jenis-jenis isolasi:

- a) Isolasi Padat : Keramik pada bushing
- b) Isolasi Cair : Minyak Transformator
- c) Isolasi Gas : Gas SF₆

Secara umum, besarnya nilai tahanan isolasi pada peralatan listrik seperti transformator sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, antara lain suhu udara, tingkat kelembapan, serta kebersihan permukaan peralatan. Sebagai contoh, adanya debu atau kotoran yang menempel pada bagian isolator atau bushing dapat menimbulkan jalur bocor yang berpotensi menurunkan kualitas isolasi. Untuk menilai kondisi isolasi tersebut, biasanya dilakukan pengujian dengan cara memberikan tegangan searah (DC) pada transformator. Tegangan yang digunakan dalam pengujian ini biasanya lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan operasional normal, dan hasilnya dinyatakan dalam satuan megaohm (M Ω) untuk memberikan gambaran mengenai kualitas tahanan isolasi.

Pengujian tahanan isolasi pada belitan transformator dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat arus bocor (*leakage current*) yang mengalir melalui sistem isolasinya, baik pada sisi primer, sekunder, maupun tersier. Meskipun arus bocor tidak dapat sepenuhnya dihindari, terutama pada transformator yang telah beroperasi dalam jangka

waktu lama atau berada di lingkungan dengan kondisi ekstrem, pengukuran ini tetap penting dilakukan secara berkala. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa nilai tahanan isolasi masih berada dalam batas aman dan tidak mengindikasikan adanya penurunan kualitas isolasi yang dapat berpotensi menimbulkan gangguan.

Pengukuran tahanan isolasi dilakukan menggunakan alat khusus bernama *Megaohm Meter* atau *Insulation Tester*. Alat ini bekerja dengan cara memberikan tegangan DC pada bagian sistem yang diuji, lalu mengukur nilai tahanan isolasi berdasarkan arus yang mengalir melaluinya. Tegangan uji yang digunakan umumnya bervariasi, mulai dari 500 volt hingga 5000 volt DC, tergantung pada jenis serta kapasitas peralatan yang diperiksa. Pengujian ini merupakan salah satu langkah penting dalam proses pemeliharaan transformator daya, karena berperan besar dalam memastikan keandalan serta keamanan sistem listrik bertegangan tinggi.

Tahanan isolasi memegang peranan penting dalam menjaga kinerja dan kestabilan tegangan pada transformator daya. Karena transformator beroperasi pada tegangan tinggi, kondisi isolasi internalnya harus tetap prima agar sistem bekerja dengan aman dan efisien. Jika nilai tahanan isolasi baik, arus bocor dapat ditekan sehingga tegangan tetap stabil dan tidak mudah mengalami gangguan. Untuk memastikan hal tersebut, dilakukan berbagai pengujian secara berkala guna memantau kelayakan isolasi. Beberapa metode yang umum digunakan antara lain pengujian *polarization index* untuk menilai kemampuan isolasi dalam menahan arus bocor dalam periode tertentu, pengujian *tangent delta* untuk mengetahui tingkat penurunan kualitas bahan isolasi melalui rugi daya dielektriknya, serta pengujian *breakdown voltage (BDV)* yang bertujuan menentukan batas maksimum tegangan yang dapat ditahan minyak isolasi sebelum terjadi kerusakan. Selain itu, dilakukan pula pengujian rasio tegangan untuk memastikan kemampuan isolasi dalam menjaga perbandingan tegangan sesuai standar operasional. Seluruh pengujian ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi isolasi transformator dan berfungsi sebagai langkah pencegahan agar tidak terjadi kerusakan yang dapat mengganggu kontinuitas suplai listrik.

2.2.4 Indeks Polarisasi

Indeks polarisasi merupakan salah satu metode pengujian yang digunakan untuk menilai kelayakan peralatan listrik, terutama transformator daya, sebelum dioperasikan

ataupun sebelum dilakukan uji tegangan lebih (*over voltage test*). Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengetahui kondisi sistem isolasi, khususnya dari sisi kebersihan dan tingkat kekeringannya. Nilai indeks polarisasi diperoleh dengan cara mengukur tahanan isolasi dalam kurun waktu tertentu, umumnya selama 10 menit, menggunakan sumber tegangan DC yang stabil. Selama proses tersebut, *insulation tester* akan bekerja dengan mempolarisasi material isolasi, yakni mengisi kapasitansi tinggi dari sistem tersebut dengan muatan listrik. Jika kondisi isolasi masih baik—bersih serta kering—maka nilai tahanan isolasi yang diukur akan meningkat seiring waktu. Kenaikan ini disebabkan oleh proses polarisasi yang semakin efektif di dalam bahan isolasi. Hasil dari pengujian ini dikenal sebagai *dielectric absorption* dan menjadi indikator penting untuk menentukan apakah kondisi isolasi pada transformator masih layak digunakan atau perlu dilakukan perawatan lebih lanjut.

Metode pengujian ini dilakukan dengan memberikan tegangan searah (DC) yang stabil pada sistem isolasi untuk menilai kinerjanya dalam jangka waktu tertentu, khususnya terhadap kemampuan isolasi dalam kondisi berkelanjutan. Selama proses pengujian, nilai tahanan isolasi diukur pada menit pertama dan kemudian pada menit kesepuluh. Hasil perbandingan antara kedua nilai tersebut dikenal sebagai *Indeks Polarisasi* atau *Polarization Index (PI)*. Nilai PI ini menjadi acuan utama dalam menilai kondisi isolasi transformator. Semakin besar nilai PI yang diperoleh, maka semakin baik kualitas isolasinya, karena menunjukkan bahwa material isolasi masih memiliki tahanan tinggi dan berfungsi dengan baik. Sebaliknya, jika nilai PI rendah, hal ini menandakan adanya penurunan kualitas atau degradasi pada isolasi. Penurunan tersebut biasanya disebabkan oleh faktor lingkungan seperti kelembapan, suhu tinggi, kotoran yang menempel, atau adanya arus bocor yang melewati bahan isolasi. Dengan demikian, hasil pengujian ini sangat berguna untuk menilai kelayakan dan keandalan peralatan listrik dalam jangka panjang (Ababil., 2023).

2.2.5 Tangen Delta

Tan delta, atau sering disebut juga *loss angle*, merupakan salah satu metode pengujian diagnostik yang digunakan untuk menilai kondisi sistem isolasi pada peralatan listrik, seperti transformator daya. Pengujian ini dilakukan dengan mengukur besar kecilnya arus bocor kapasitif, yaitu arus yang mengalir melalui bahan isolasi

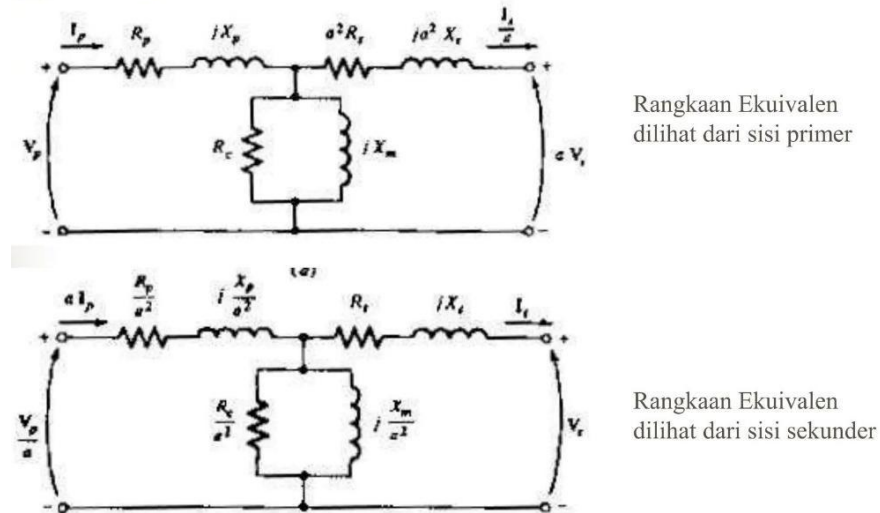
ketika diberikan tegangan listrik. Pada isolasi yang masih dalam kondisi baik, nilai arus kapasitif ini sangat kecil. Namun, jika material isolasi mengalami penurunan kualitas atau penuaan, nilai $\tan \delta$ akan meningkat. Karena itu, pengujian $\tan \delta$ sangat penting untuk mendeteksi lebih awal adanya tanda-tanda degradasi atau kerusakan pada sistem isolasi transformator. Dengan cara ini, potensi gangguan atau kegagalan peralatan dapat diantisipasi sebelum menyebabkan masalah serius pada sistem kelistrikan. Metode ini umum diterapkan dalam kegiatan pemeliharaan prediktif, terutama pada gardu induk dan instalasi bertegangan tinggi, sebagai bagian dari upaya menjaga keandalan dan keselamatan operasi sistem tenaga listrik (Fahmi., 2018).

Jika kualitas isolasi pada transformator benar-benar bersih dari cacat, debu, maupun kelembapan, maka sifat isolasinya akan menyerupai karakteristik kapasitor ideal. Dalam kondisi tersebut, transformator dapat berperilaku seperti kapasitor murni, di mana arus bolak-balik yang mengalir akan mendahului tegangannya sebesar 90 derajat. Namun, kondisi ideal ini hampir tidak pernah terjadi di lapangan. Adanya kontaminasi pada bahan isolasi, seperti partikel asing, uap air, atau proses penuaan material, dapat mengubah sifat kapasitif isolasi tersebut. Akibatnya, nilai tahanan isolasi menurun dan arus resistif yang melewati bahan isolasi akan meningkat.

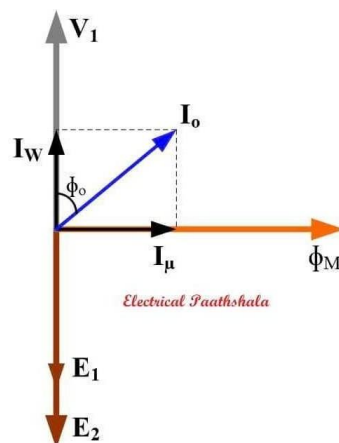
Akibat dari kondisi tersebut, sudut fase antara tegangan dan arus tidak lagi mencapai 90 derajat, melainkan menjadi lebih kecil. Penurunan sudut ini menandakan adanya kehilangan energi selama proses pembebanan, yang disebut sebagai rugi daya dielektrik. Besarnya penyimpangan sudut dari nilai ideal 90 derajat dapat dijadikan acuan untuk menilai sejauh mana material isolasi mengalami kontaminasi atau degradasi. Ketika tegangan diterapkan pada bahan dielektrik, arus yang mengalir di dalamnya terdiri atas tiga komponen utama, yaitu arus pengisian (*charging current*), arus penyerapan (*absorption current*), dan arus konduksi (*conduction current*). Ketiga komponen arus ini menggambarkan proses fisik yang terjadi dalam bahan isolasi dan menjadi dasar untuk menilai kondisi serta keandalannya pada peralatan listrik seperti transformator. Karena adanya rugi daya dielektrik tersebut, arus tidak lagi mendahului tegangan sebesar 90°. Faktor daya kapasitor ditunjukkan oleh nilai $\cos \phi$, di mana ϕ merupakan sudut fasa kapasitor, sedangkan sudut rugi (*loss angle*) didefinisikan sebagai

$\delta = 90^\circ - \phi$. Pada kapasitor ideal, sudut ϕ bernilai 90° sehingga $\delta = 0$. Hubungan tangen delta dengan IC dan IR dapat dilihat seperti pada Gambar 2.12 dan Gambar 2.13.

Rangkaian Ekuivalen



Gambar 2.12 Rangkaian Ekuivalen Isolasi Sederhana (Fahmi., 2018)



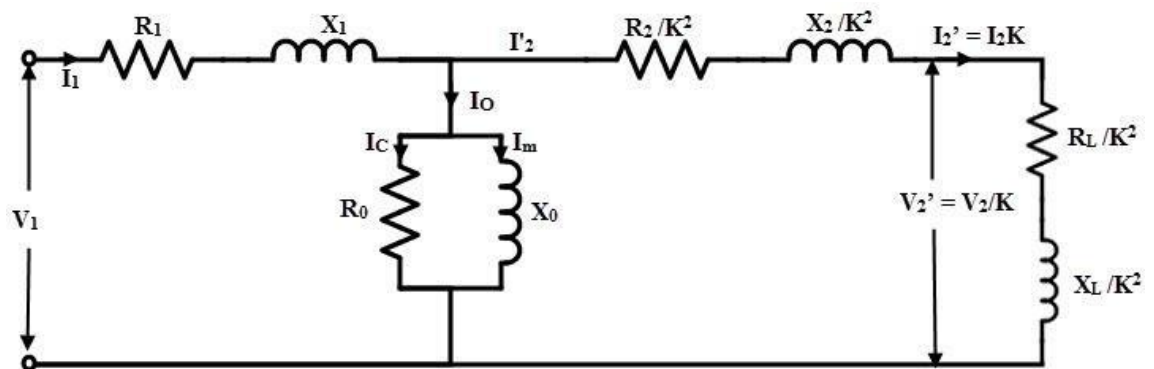
Gambar 2.13 Diagram *Phasor* Arus Pengujian Tangen Delta

Setiap material isolasi yang digunakan pada peralatan listrik pada dasarnya memiliki karakteristik kapasitif, artinya material tersebut mempunyai nilai kapasitansi tertentu. Ketika peralatan dialiri tegangan, akan timbul arus kapasitif (IC) yang secara alami mendahului tegangan sebesar 90 derajat dalam bentuk gelombang sinusoidal.

Gejala ini menggambarkan perilaku umum dari sistem isolasi saat berada dalam kondisi bertegangan. Untuk menilai kualitas isolasi tersebut, digunakan pendekatan melalui diagram fasor yang dikenal sebagai diagram $\tan \delta$. Pada diagram ini, sudut δ (delta) menunjukkan besar kecilnya rugi daya dielektrik yang terjadi akibat ketidaksempurnaan isolasi. Garis singgung terhadap sudut δ menggambarkan besarnya komponen resistif (IR) yang muncul karena adanya kebocoran arus. Perbandingan antara IR dan IC menjadi dasar untuk menentukan kondisi isolasi. Jika nilai sudut δ sangat kecil atau mendekati nol, hal ini menandakan bahwa isolasi masih dalam kondisi baik, karena sebagian besar arus bersifat kapasitif dan hampir tidak ada kebocoran. Oleh sebab itu, pengukuran $\tan \delta$ menjadi salah satu metode penting untuk menilai tingkat keandalan dan kesehatan isolasi pada transformator maupun peralatan listrik lainnya.

a) Pengujian Tangen Delta Pada Isolasi Trafo

Secara umum, sistem isolasi pada transformator terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu isolasi antara belitan dengan tanah (ground) serta isolasi antara satu belitan dengan belitan lainnya. Di lingkungan PT PLN, pengujian terhadap sistem isolasi ini umumnya dilakukan menggunakan tiga metode, yaitu metode dua belitan, tiga belitan, dan autotrafo.



Gambar 2.14 Rangkaian ekivalen isolasi Transformator

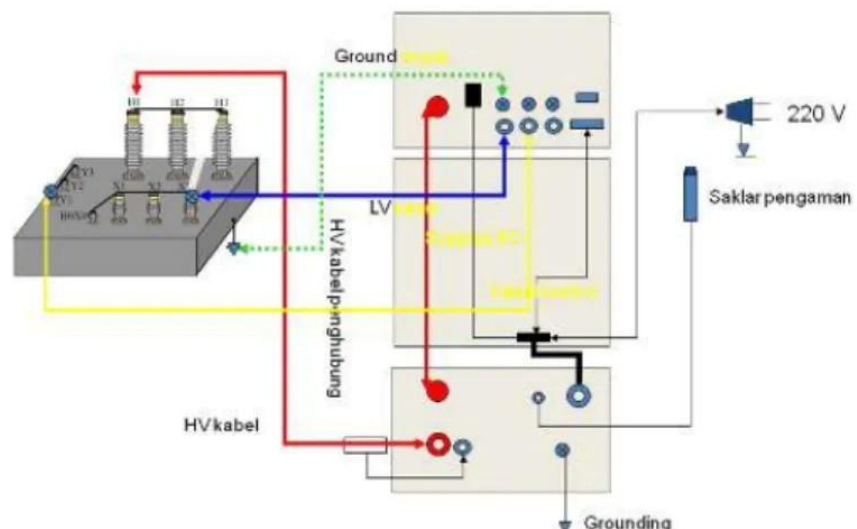
Titik pengujian trafo dua belitan yaitu:

- 1) Primer – Ground (CH)
- 2) Sekunder – Ground (CL)
- 3) Primer – Sekunder (CHL)

Titik pengujian trafo tiga belitan yaitu:

- 1) Primer – Ground
- 2) Sekunder – Ground
- 3) Tersier – Ground
- 4) Primer – Sekunder
- 5) Sekunder – Tersier
- 6) Primer – Tersier

Pada pengujian autotransformator, prosedur dasarnya hampir sama dengan metode pengujian pada transformator dua belitan. Namun, terdapat beberapa perbedaan penting yang perlu diperhatikan karena konstruksi autotrafo memiliki karakteristik yang khas. Pada autotrafo, belitan tegangan tinggi (HV) dan tegangan rendah (LV) tidak terpisah secara fisik, melainkan berada dalam satu lilitan yang sama. Oleh karena itu, ketiga terminal — yaitu bushing HV, LV, dan netral — dianggap sebagai satu kesatuan dan dijadikan titik pengujian sisi primer. Sementara itu, belitan dengan tegangan terendah (TV) berfungsi sebagai sisi sekunder dalam proses pengujian. Dengan konfigurasi seperti ini, metode pengujian harus disesuaikan agar hasilnya tetap dapat menggambarkan kondisi isolasi serta parameter kelistrikan transformator secara akurat.

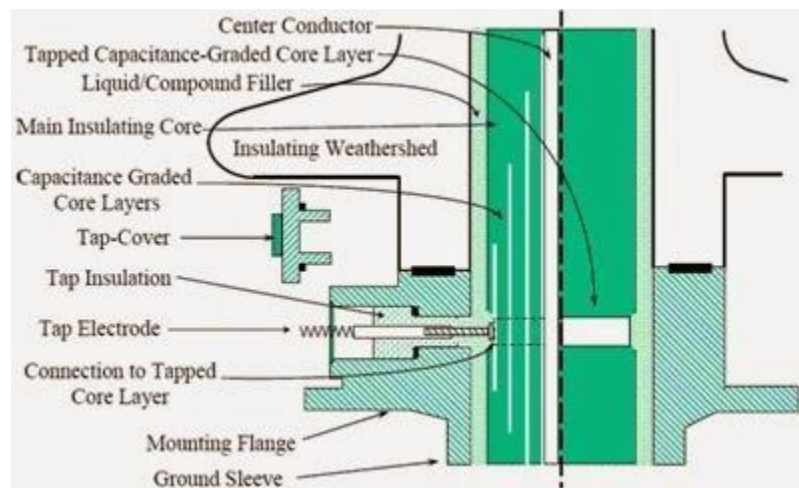


Gambar 2.15 Skema Rangkaian Pengujian Tan Delta *Autotrafo*

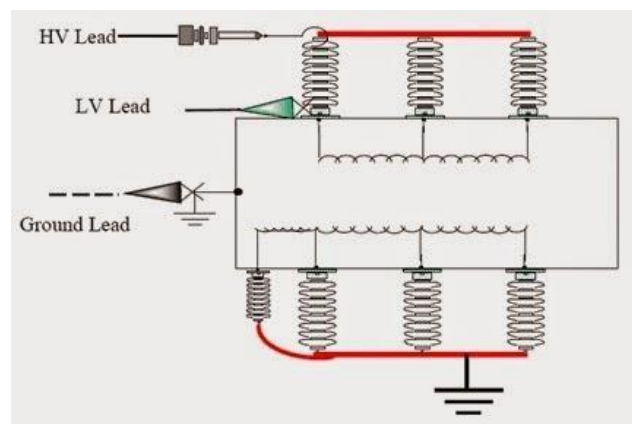
b) Pengujian Tangen Delta Pada *Bushing*

Pengujian tangen delta pada bushing dilakukan untuk mengevaluasi kondisi isolasi pada dua area utama, yaitu antara konduktor dan center tap (C1), serta antara center tap dan ground (C2). Metode yang umum digunakan adalah metode *hot collar*, yang

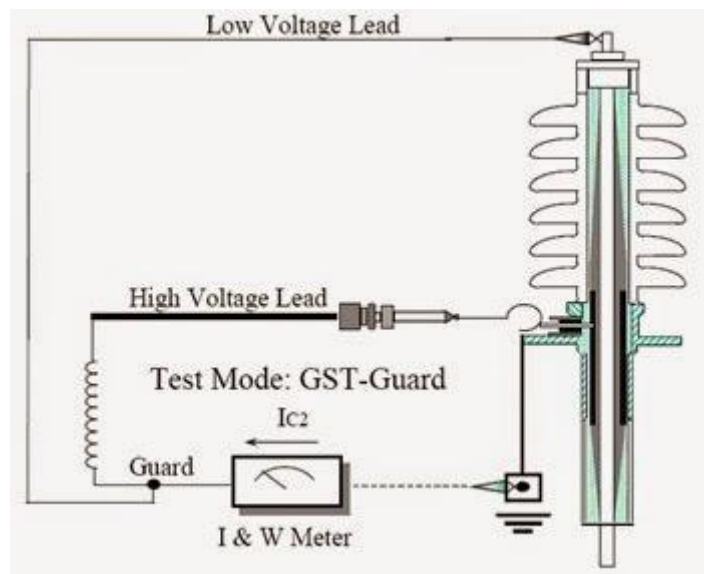
berfungsi untuk memeriksa kualitas bagian keramik pada bushing. Biasanya, metode ini digunakan sebagai alternatif atau langkah tambahan apabila bushing tidak memiliki tap pengujian. Namun, jika tap pengujian pada bushing mengalami kerusakan, maka bushing tersebut sebaiknya segera diganti agar keandalan peralatan dan keselamatan sistem kelistrikan tetap terjaga.



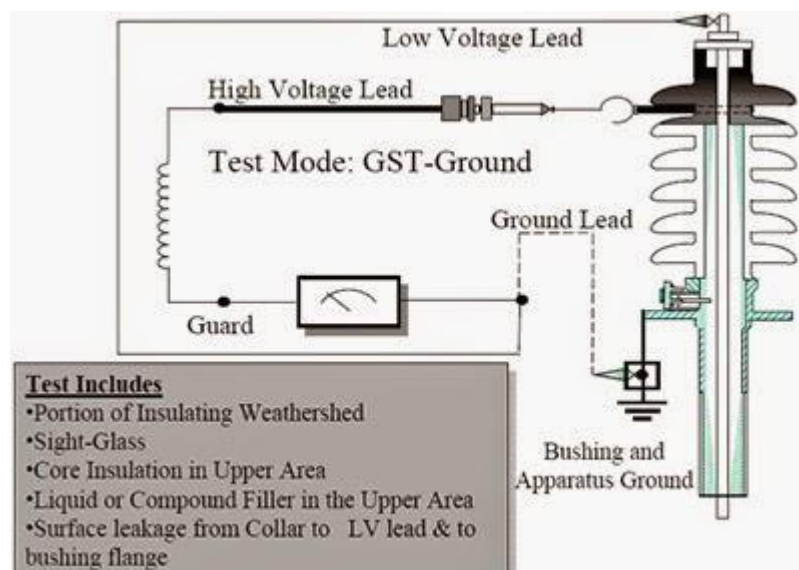
Gambar 2.16 Struktur *Bushing* (C1 adalah isolasi antara *tap electrode* dengan konduktor, C2 adalah isolasi antara *tap electrode* dengan *ground*)



Gambar 2.17 Diagram Pengujian Tangen Delta C1 Pada *Bushing*



Gambar 2.18 Diagram Pengujian Tangen Delta C2 Pada Bushing



Gambar 2. 19 Diagram Pengujian Tangen Delta Hot Collar Pada Bushing

Dalam pengujian tangen delta pada transformator juga terdapat beberapa metode dalam rangkaian pengukurannya yaitu UST, GST, dan GSTg

- 1) UST (*Ungrounded Specimen Test*) merupakan Metode ini merupakan salah satu teknik pengujian yang digunakan untuk mengukur nilai kapasitansi pada belitan primer transformator. Dalam pengujian tersebut, hanya belitan primer dan belitan

sekunder yang dilibatkan, tanpa adanya koneksi langsung ke ground. Dengan kata lain, belitan sekunder dibiarkan tidak terhubung ke tanah, sehingga pengujian dapat lebih spesifik mendeteksi adanya kelemahan atau gangguan pada isolasi antara kedua belitan tersebut.

- 2) GST (*Grounded Specimen Test*) merupakan Metode ini merupakan salah satu cara untuk mengukur total kapasitansi pada belitan transformator. Pengujian dilakukan dengan mengukur kapasitansi antara belitan primer dan ground, belitan primer dengan sekunder, serta belitan primer dengan tersier. Dengan demikian, metode ini bertujuan untuk menilai kemampuan isolasi setiap belitan dalam menahan tegangan, baik terhadap tanah maupun terhadap belitan lainnya.
- 3) USTg (*Ungrounded Specimen Test with Guard*) merupakan Metode ini merupakan salah satu teknik pengujian untuk mengukur kapasitansi pada belitan yang sedang diuji, di mana belitan tersebut dihubungkan dengan ground dan *guard*. Fungsi *guard* adalah untuk meniadakan pengaruh kapasitansi dari belitan lain yang tidak diuji. Contohnya, *guard* digunakan untuk mengisolasi kapasitansi antara belitan primer dengan ground, belitan sekunder dengan ground, atau kapasitansi murni belitan terhadap ground. Dengan pendekatan ini, hasil pengukuran menjadi lebih akurat karena hanya mencerminkan kapasitansi dari belitan yang menjadi fokus pengujian.

Ada beberapa mode pengujian pada pengujian tangen delta transformator diantaranya meliputi:

- 1) UST R merupakan kapasitansi R
- 2) UST B merupakan kapasitansi B
- 3) GST merupakan kapasitansi $R+B+Ground$
- 4) GSTgR merupakan kapasitansi $B+Ground$
- 5) GSTgB merupakan kapasitansi $R+Ground$
- 6) GSTgRB merupakan kapasitansi *Ground* murni

2.2.6 BDV (*Breakdown Voltage*)

Pengujian tahanan isolasi tidak hanya dilakukan pada bahan padat, tetapi juga pada bahan isolasi cair seperti minyak transformator. Salah satu cara untuk menilai kualitas minyak isolasi adalah melalui pengujian tegangan tembus, yang dikenal sebagai *Breakdown Voltage* (BDV). Dalam peralatan listrik bertegangan tinggi, minyak isolasi

memiliki peran yang sangat penting. Selain berfungsi sebagai media pendingin, minyak ini juga berperan sebagai bahan dielektrik yang mencegah terjadinya loncatan listrik atau percikan arus. Peralatan seperti transformator, pemutus sirkuit, dan peralatan tegangan tinggi lainnya tidak hanya mengandalkan isolasi padat seperti kertas atau resin, tetapi kualitas minyak isolasi juga menjadi faktor krusial bagi keandalan sistem. Oleh karena itu, pengujian BDV menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa minyak tersebut masih mampu menjalankan fungsinya secara optimal dalam menjaga keandalan dan keamanan sistem kelistrikan (Devianto., 2019).

Pengujian *breakdown voltage* atau tegangan tembus pada minyak isolasi transformator merupakan salah satu cara penting untuk menilai sejauh mana minyak tersebut mampu menahan tegangan listrik tinggi tanpa gagal berfungsi sebagai isolator. Minyak yang jernih, bersih, dan bebas dari kelembapan umumnya menunjukkan nilai tegangan tembus yang tinggi. Sebaliknya, jika nilai tegangan tembus rendah, hal ini bisa mengindikasikan adanya kontaminan seperti partikel halus atau kadar air yang berlebih. Namun, hasil tegangan tembus yang tinggi tidak selalu menjamin bahwa minyak benar-benar bebas dari semua jenis kontaminan, karena beberapa zat pengotor mungkin tidak terdeteksi melalui pengujian ini. Dengan demikian, pengujian tegangan tembus berperan sebagai langkah awal untuk menilai kelayakan minyak dalam hal kemampuan isolasinya. Nilai yang diperoleh menjadi indikator penting untuk menentukan apakah minyak masih layak digunakan sebagai media isolasi di transformator, sebab salah satu parameter utama dalam menilai kualitas isolasi adalah ketahanannya terhadap tegangan tinggi tanpa mengalami kerusakan atau loncatan listrik (Ababil., 2023).

Pengujian ini dilakukan ketika transformator dalam kondisi tidak beroperasi atau padam, agar prosesnya lebih efisien dan tidak mengganggu sistem kelistrikan secara keseluruhan. Selama pengujian, oli isolasi di dalam transformator diberikan tegangan bolak-balik (AC) dengan frekuensi standar menggunakan sistem pengujian khusus. Metode pengujian melibatkan penempatan dua elektroda di dalam sampel oli, dengan jarak antar elektroda ditentukan sesuai standar yang berlaku. Salah satu acuan yang digunakan adalah IEC 60156-02, standar internasional untuk pengujian tegangan tembus (*Breakdown Voltage*, BDV) pada oli isolasi. Pengujian ini penting untuk menilai

kemampuan oli dalam menahan tegangan tinggi sebelum terjadi kegagalan isolasi, yang dapat memengaruhi keandalan transformator secara keseluruhan.

2.2.7 Evaluasi Kelayakan Operasi Transformator Daya Berdasarkan Parameter Isolasi

Evaluasi kelayakan trafo daya merupakan proses teknis analisis untuk menentukan apakah trafo masih memenuhi persyaratan operasional berdasarkan parameter pengujian tertentu. Parameter yang umum digunakan dalam evaluasi sistem isolasi transformator meliputi Indeks Polarisasi (PI), Tangen Delta ($\tan \delta$), dan Breakdown Tegangan (BDV). Parameter ketiga tersebut mewakili kondisi isolasi padat dan isolasi cair yang menjadi komponen utama dalam sistem isolasi transformator. Sistem isolasi trafo memiliki peran penting dalam menjaga kinerja sistem. Kerusakan pada sistem isolasi merupakan salah satu penyebab utama kegagalan transformator daya. Oleh karena itu, hasil pengujian isolasi tidak hanya dicatat sebagai data teknis, tetapi harus dianalisis untuk menentukan tingkat kesehatan (indeks kesehatan) transformator. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan nilai hasil pengujian terhadap standar internasional seperti IEEE, IEC, maupun standar nasional yang berlaku. Jika nilai pengujian berada dalam batas yang diizinkan, maka transformator dinyatakan layak beroperasi. Sebaliknya, apabila nilainya berada di luar batas standar, maka diperlukan analisis lanjutan serta tindakan korektif.

2.2.7.1 Evaluasi Kondisi Transformator Berdasarkan Parameter Pengujian

Evaluasi kondisi transformator dilakukan secara komprehensif dengan mempertimbangkan seluruh parameter pengujian, karena masing-masing parameter memberikan informasi yang berbeda mengenai kondisi sistem isolasi

a) Evaluasi Berdasarkan Indeks Polarisasi (PI)

Indeks Polarisasi menunjukkan tingkat kekeringan dan kebersihan isolasi padat pada belitan transformator. Nilai PI diperoleh dari perbandingan ketahanan isolasi pada menit ke-10 terhadap menit ke-1.

$$IP = \frac{R_{10 \text{ Menit}}}{R_{1 \text{ Menit}}} \dots \dots \dots (2.5)$$

Nilai PI yang tinggi menunjukkan bahwa arus bocor berkurang seiring waktu, yang berarti isolasi dalam kondisi baik. Sebaliknya, nilai PI rendah menunjukkan kemungkinan adanya kelembaban, kontaminasi, atau degradasi material isolasi. Isolasi

dengan kandungan udara yang tinggi akan mengalami peningkatan konduktivitas, sehingga arus bocor meningkat dan nilai tahanan isolasi menurun.

b) Evaluasi Berdasarkan Tangen Delta ($\tan \delta$)

Tangen Delta merupakan parameter yang menunjukkan besarnya rugi-rugi dielektrik dalam sistem isolasi ketika diberikan tegangan AC. Nilai $\tan \delta$ yang kecil menunjukkan bahwa komponen arus kapasitif lebih dominan dibandingkan arus resistif. Sebaliknya, peningkatan $\tan \delta$ menunjukkan adanya peningkatan arus resistif akibat degradasi isolasi.

Kenaikan nilai $\tan \delta$ dapat disebabkan oleh:

- 1) Kontaminasi minyak
- 2) Pemandian air panas
- 3) Pembuangan sebagian
- 4) Oksidasi minyak

c) Evaluasi Berdasarkan Tegangan Kerusakan (BDV)

BDV digunakan untuk menilai kekuatan dielektrik minyak transformator. Nilai BDV yang tinggi menunjukkan bahwa minyak masih mampu menahan tegangan tinggi tanpa terjadi tembus listrik.

Penurunan BDV biasanya disebabkan oleh:

- 1) Kandungan air
- 2) Partikel padat
- 3) Produk oksidasi
- 4) Gas terlarut akibat gangguan internal

BDV yang rendah merupakan indikator bahwa minyak tidak lagi mampu berfungsi optimal sebagai media isolasi maupun pendingin. Analisis Penyebab Penurunan Kualitas Isolasi Penurunan kualitas isolasi trafo tidak terjadi secara tiba-tiba, melainkan merupakan hasil dari proses degradasi yang berlangsung secara bertahap. Beberapa faktor utama yang mempengaruhi degradasi isolasi antara lain:

1. Faktor Termal

Suhu merupakan faktor dominan dalam proses penuaan isolasi. Berdasarkan teori Arrhenius, laju reaksi kimia meningkat secara eksponensial terhadap kenaikan suhu. Dalam sistem isolasi transformator, setiap kenaikan suhu sekitar 6–8°C dapat

mengurangi umur isolasi hingga 50%. Kelebihan beban dan gangguan sistem pendingin dapat menyebabkan kenaikan suhu yang lebih cepat

2. Faktor Udara

Udara merupakan kontaminan paling berbahaya bagi sistem isolasi. Kandungan udara dalam minyak maupun kertas isolasi akan menurunkan kekuatan dielektrik secara signifikan menyebabkan:

- 1) Penurunan nilai BDV
- 2) Penurunan rumah isolasi
- 3) Peningkatan nilai $\tan \delta$

Udara dapat masuk melalui kebocoran tangki, pernafasan (pernapasan) transformator, atau degradasi kimia internal.

3. Oksidasi dan Kontaminasi Kimia

Reaksi oksidasi menghasilkan minyak asam dan lumpur yang dapat mengendap di permukaan belitan. Endapan ini menghambat perpindahan panas dan mempercepat degradasi isolasi padat. Selain itu, asam yang terbentuk dapat merusak struktur selulosa pada kertas isolasi.

4. Tegangan Lebih dan Partial Discharge

Tegangan lebih akibat petir atau switching dapat menimbulkan peluahan sebagian (PD). PD menyebabkan kerusakan mikro pada struktur isolasi yang lama-kelamaan berkembang menjadi kegagalan total. Gejala ini biasanya terdeteksi melalui peningkatan nilai $\tan \delta$ atau analisis gas terlarut (DGA).

5. Penuaan Alami (Penuaan)

Seiring waktu, isolasi mengalami degradasi alami akibat kombinasi faktor termal, listrik, dan kimia. Penutupan ini ditandai dengan penurunan kekuatan mekanis dan dielektrik bahan isolasi.