

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Peneliti menggunakan jurnal terdahulu yang selaras terhadap topik yang bertujuan untuk memperkuat maksud dan tujuan penelitian ini dilakukan. Beberapa hasil penelitian terdahulu yang dijadikan acuan yakni :

1. Alex Fernandes, Niken Pradina Saputri, Samsulrizal, tahun 2023.

Penelitian yang dilakukan di PLTU Ombilin unit 2 prediksi sisa umur Generator pada Stator Generator unit 2 PLTU Ombilin dengan menggunakan metode pengujian di elektrik. Hasil menunjukkan bahwa transformator tersebut memiliki kondisi isolasi yang masih baik dan terbukti andal, sehingga dinyatakan masih layak beroperasi selama 4 tahun kedepan.

2. Dhimas Alviero Daffa Vernanda, tahun 2024.

Dalam jurnal tersebut dilakukan analisis pengujian *tan delta* pada transformator daya 5 di Gardu Induk 150 kV Sentul dengan menggunakan parameter indeks *tan delta*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai *tan delta* masih berada dalam batas kelayakan, sehingga sistem isolasi transformator dinyatakan masih andal dan layak untuk beroperasi. Nilai sebelum penggantian adalah 1,2%. Nilai tersebut telah melebihi batas maksimal dari standar buku panduan trafo daya PLN (Persero) yaitu <1% dan setelah dilakukan penggantian *bushing* diperoleh angka 0.29%

3. Satrio, Galih Ageng, Hariyanto, tahun 2022.

Penelitian yang dilakukan di PLTGU Priok blok 3 analisis keandalan transformator generator berdasarkan gas terlarut dalam minyak transformator dengan menggunakan metode *Dissolved Gas Analysis*. Hasil menunjukkan bahwa transformator tersebut memiliki kondisi isolasi yang masih baik dan terbukti andal.

4. Nugraha, Fajar, Garniwa Mulyana, tahun 2024.

Penelitian yang dilakukan di UIT JBM Penilaian kondisi transformator daya pada sistem transmisi berdasarkan parameter kritis. Pada analisis ini didapatkan Hasil bahwa ada 190 unit transformator pemeliharaan, 60 unit dilakukan perbaikan, dan 12 unit direncanakan penggantian.

5. Yuli Utami, Nuniek, arifin, zainal, tahun 2020.

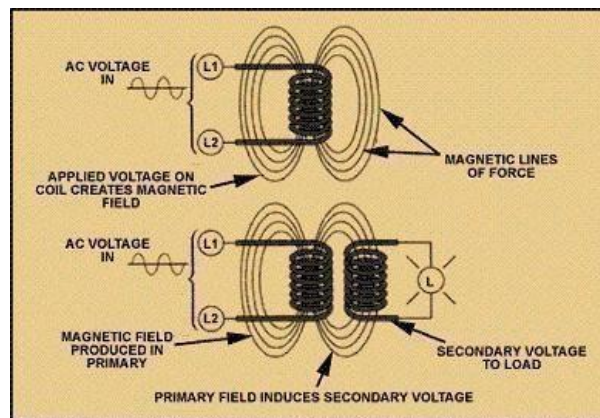
Penelitian yang dilakukan di UIT JBB analisa *assessment* kondisi transformator tenaga 150/20kV. Pada analisis ini didapatkan Hasil bahwa ada 241 unit transformator pemeliharaan, 49 unit dilakukan perbaikan, dan 13 unit direncanakan penggantian.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Transformator Tenaga

Transformator tenaga, atau yang lebih dikenal dengan trafo, merupakan peralatan listrik statis yang terdiri atas rangkaian magnetik dan dua atau lebih belitan. Melalui induksi elektromagnetik, transformator berfungsi untuk mentransfer daya listrik berupa arus dan tegangan bolak-balik (AC) dari satu sistem ke sistem lain dengan frekuensi yang sama (IEC 60076-1, 2011). Dalam sistem tenaga listrik, transformator digunakan secara luas untuk mentransmisikan energi listrik antar sirkuit pada frekuensi tetap, namun dengan tingkat tegangan dan arus yang berbeda (IEEE Power and Energy Society, 2013).

Menurut definisi ANSI/IEEE, transformator merupakan perangkat listrik statis yang tidak memiliki bagian yang bergerak secara kontinu dan digunakan untuk mentransfer daya antar sirkuit melalui prinsip induksi elektromagnetik (Harlow, 2004). Prinsip kerja transformator didasarkan pada hukum-hukum elektromagnetik, yaitu Hukum Lorentz dan Hukum Faraday, yang menjelaskan bahwa medan magnet dapat dihasilkan dari perubahan arus listrik atau medan listrik, dan sebaliknya, perubahan fluks medan magnet dapat menimbulkan tegangan induksi pada rangkaian lain.

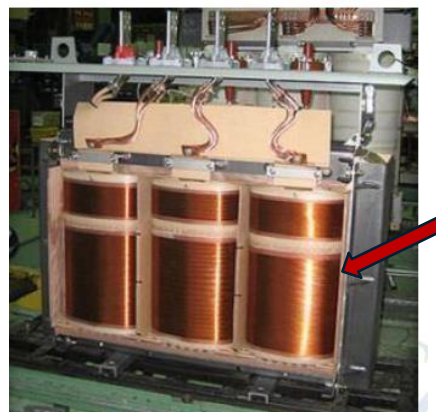


Gambar 2.1 Prinsip hukum elektromagnetik

Arus bolak-balik (AC) yang mengalir pada belitan primer akan menghasilkan fluks magnet yang mengalir melalui inti besi yang menghubungkan kedua belitan. Fluks magnet tersebut kemudian menginduksi belitan sekunder, sehingga pada ujung belitan sekunder timbul beda potensial atau tegangan induksi akibat proses induksi elektromagnetik.

2.2.2 Karakteristik Transformator

Transformator tenaga tersusun atas dua komponen utama, yaitu material magnetik dan material dielektrik. Material magnetik terdiri dari inti (*core*) dan belitan (*winding*) yang berfungsi sebagai media induksi elektromagnetik dalam proses transformasi energi listrik. Sementara itu, material dielektrik berperan sebagai sistem isolasi yang menjaga agar tidak terjadi hubungan listrik langsung antar komponen bertegangan. Sistem isolasi pada transformator dapat berupa isolasi cair, seperti minyak transformator, askarel, dan silikon, maupun isolasi padat, seperti kertas kraft, *pressboard*, kayu, serta bahan berbasis selulosa lainnya.

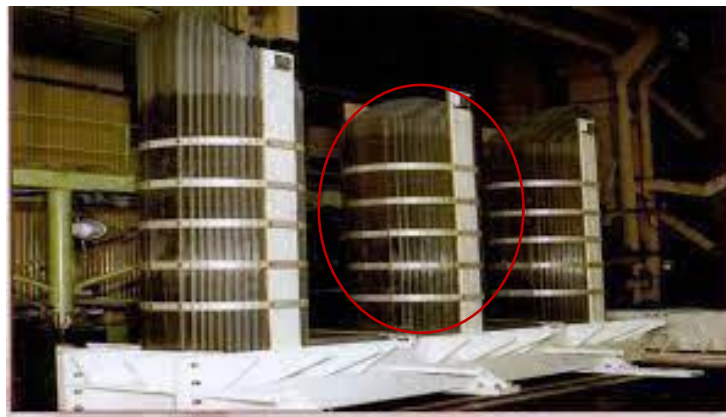


Gambar 2.2 kumparan pada inti trafo

Komponen utama dari transformator tenaga terdiri atas beberapa bagian penting yang memiliki fungsi spesifik dalam mendukung kinerja transformator. Bagian-bagian tersebut meliputi inti besi (*core*), kumparan atau belitan (*winding*), *bushing*, minyak transformator, tangki konservator, tap changer, sistem pendingin, serta peralatan bantu lainnya yang berperan dalam menjaga performa dan keandalan transformator selama beroperasi.

2.2.2.1 Inti Besi

Inti besi (*core*) berfungsi sebagai media penghantar fluks magnet yang dihasilkan akibat induksi arus bolak-balik (AC) pada kumparan yang melingkupinya. Fluks magnet yang terbentuk tersebut kemudian menginduksi kumparan lain, sehingga proses transformasi energi listrik dapat terjadi. Inti besi umumnya tersusun atas lempengan-lempengan besi tipis yang dilapisi isolasi, dengan tujuan untuk meminimalkan arus eddy (*eddy current*) — yaitu arus pusar yang timbul akibat induksi medan magnet dalam material konduktif. Arus eddy ini dapat menyebabkan rugi-rugi daya (*losses*) berupa panas, sehingga penggunaan laminasi berisolasi membantu meningkatkan efisiensi kerja transformator.

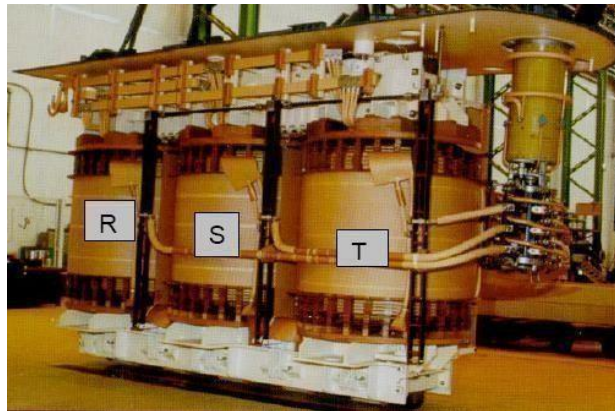


Gambar 2.3 Inti besi

2.2.2.2 Winding

Kumparan transformator (*winding*) tersusun dari lilitan kawat berisolasi yang dibentuk menjadi suatu gulungan atau kumparan. Pada transformator, terdapat dua jenis

kumparan utama, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder, yang masing-masing dilapisi bahan isolasi untuk mencegah terjadinya hubungan listrik langsung. Isolasi tersebut berfungsi baik terhadap inti besi maupun antar kumparan, dan umumnya menggunakan bahan isolasi padat seperti karton, pertinax, atau bahan sejenis lainnya. Fungsi utama dari kumparan transformator adalah mengubah tingkat tegangan dan arus listrik, baik dari level tinggi ke rendah (*step down*) maupun dari level rendah ke tinggi (*step up*), melalui proses induksi elektromagnetik.



Gambar 2.4 Tipe-tipe belitan trafo

2.2.2.3 Bushing

Bushing berfungsi sebagai penghubung antara belitan transformator dengan jaringan listrik eksternal. Komponen ini terdiri atas konduktor utama yang dilapisi oleh bahan isolator, di mana isolator tersebut berperan sebagai pemisah listrik (penyekat) antara konduktor bushing dan bodinya (main tank) pada transformator. Dengan demikian, bushing memastikan arus listrik dapat dialirkan keluar atau masuk tanpa menyebabkan hubungan singkat dengan bagian logam transformator. Selain itu, pada bushing juga terdapat fasilitas pengujian kondisi isolasi, yang dikenal sebagai *center tap*, yang digunakan untuk memantau kinerja dan keandalan *bushing* selama operasi transformator.



Gambar 2.5 *Bushing* trafo

Bushing pada transformator terdiri atas empat komponen utama, yaitu isolasi, konduktor, klem koneksi, dan asesoris. Bagian isolasi berfungsi untuk memisahkan konduktor *bushing* dari bagian logam transformator agar tidak terjadi hubungan listrik langsung. Berdasarkan jenis bahan penyusunnya, isolasi *bushing* terbagi menjadi dua tipe, yaitu *Oil Impregnated Paper* (OIP) dan *Resin Impregnated Paper* (RIP). Pada tipe OIP, bahan isolasi yang digunakan berupa kertas isolasi yang direndam dalam minyak isolasi, sedangkan pada tipe RIP, bahan isolasi terdiri atas kertas isolasi yang diresapi dengan resin sebagai pengganti minyak.

Bagian konduktor berfungsi sebagai penghantar utama arus listrik melalui *bushing*. Jenis konduktor yang umum digunakan meliputi *hollow conductor* (konduktor berongga dengan batang penegang di bagian tengahnya), konduktor pejal, serta *flexible lead* yang digunakan untuk aplikasi dengan kebutuhan fleksibilitas tinggi. Selanjutnya, klem koneksi berperan sebagai penghubung mekanis dan listrik antara stud *bushing* dengan konduktor eksternal di luar *system bushing*. Bagian terakhir, yaitu asesoris, meliputi indikator level minyak, seal atau gasket, serta tap pengujian. *Seal* atau gasket biasanya ditempatkan di bagian bawah mounting flange dan berfungsi untuk mencegah kebocoran minyak maupun udara, sehingga sistem *bushing* tetap kedap dan aman selama operasi transformator.

2.2.2.4 Konstruksi *Bushing*

Bushing memiliki komponen utama berupa inti atau konduktor, yang berfungsi sebagai jalur penghantar arus listrik dari bagian dalam peralatan menuju terminal luar,

terutama pada sistem dengan tegangan tinggi. Selain konduktor, bushing juga dilengkapi dengan bahan dielektrik dan flens logam. Flens berfungsi sebagai pengikat antara isolator dengan badan peralatan yang terhubung ke tanah (*grounded*), sehingga memastikan kestabilan mekanis dan keamanan sistem isolasi.

Untuk tegangan AC hingga 30 kV, *bushing* umumnya dibuat dari porselen atau damar tuang (*cast resin*). Pada tegangan yang lebih tinggi, digunakan bahan isolasi minyak transformator karena memiliki kemampuan dielektrik yang lebih baik serta daya pendinginan yang efektif. Selain itu, gulungan hardboard atau softpaper sering digunakan sebagai tambahan lapisan isolasi padat. Kombinasi bahan dielektrik cair dan padat ini kemudian dibungkus dengan kerangka porselen, yang berfungsi melindungi struktur internal dari pengaruh lingkungan eksternal serta mempertahankan kekuatan isolasi sistem secara keseluruhan.

2.2.2.5 Tangki Konservator

Tangki Konservator berfungsi sebagai tampungan minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan trafo karena arus beban. Di antara tangki dan trafo dipasangkan relai *bucholz* yang menyerap gas produksi akibat kerusakan minyak. Untuk menjaga minyak agar tidak terkontaminasi dengan air, ujung masuk saluran udara melalui saluran pelepasan/*venting* dilengkapi media penyerap uap air pada udara yang biasa disebut dengan *silica gel* dan udara tersebut tidak keluar mencemari udara di sekitarnya.



Gambar 2.6 Tangki konservator Trafo

Sumber : <http://eprints.umg.ac.id>

2.2.2.6 Pendingin

Transformator tenaga dengan kapasitas di atas 10 MVA umumnya dilengkapi dengan sistem pendingin untuk menjaga kestabilan suhu operasional. Terdapat dua jenis utama sistem pendinginan pada transformator, yaitu pendinginan alami dan pendinginan buatan. Fungsi utama sistem pendingin adalah untuk mengendalikan suhu kerja transformator agar tetap berada dalam batas aman selama proses operasional.

Panas pada transformator timbul akibat rugi-rugi tembaga (*copper losses*) pada kumparan dan rugi-rugi besi (*iron losses*) pada inti transformator. Jika panas ini tidak dikendalikan, maka akan terjadi kenaikan suhu berlebih yang dapat merusak sistem isolasi dan menurunkan efisiensi serta umur transformator. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem atau perangkat pendingin untuk menyalurkan panas keluar dari transformator secara efektif.



Gambar 2.7 Pendingin trafo

Berdasarkan metode pendinginannya ada beberapa metode pendinginan pada transformator tipe basah yang dapat digunakan, yaitu:

a. *ONAN (Oil Natural Air Natural)*

ONAN (Oil Natural Air Natural) berfungsi sebagai sistem pendingin pada transformator tipe basah yang pendinginannya sendiri memanfaatkan sirkulasi alami dari oli. Melalui konveksi arus yang telah diatur oleh oli yang disirkulasikan pada tangki dan sirip pendingin maka kelebihan suhu panas pada transformator akan dapat dihilangkan.

b. *ONAF (Oil Natural Air Forced)*

ONAF (Oil Natural Air Forced) berfungsi sebagai sistem pendingin

pada transformator tipe basah yang pendinginannya sendiri menggunakan oli yang akan bersirkulasi dengan alami, namun pada saat oli melalui radiator oli akan didinginkan dibantu dengan kipas/*fan*.

c. *ONAF (Oil Natural Air Forced)*

ONAF (Oil Natural Air Forced) berfungsi sebagai sistem pendingin pada transformator tipe basah yang pendinginannya sendiri menggunakan oli yang akan bersirkulasi dengan alami, namun pada saat oli melalui radiator oli akan didinginkan dibantu dengan kipas/*fan*.

d. *OFAF (Oil Forced Air Forced)*

OFAF (Oil Forced Air Forced) berfungsi sebagai sistem pendingin pada transformator tipe basah yang pendinginannya sendiri menggunakan oli yang telah didinginkan dengan pompa supaya sirkulasinya menjadi semakin cepat dengan bantuan kipas pada radiatornya.

e. Pendinginan air

Pendinginan air berfungsi sebagai sistem pendingin pada transformator tipe basah yang pendinginannya sendiri menggunakan air sebagai penghasil suhu dingin. Sistem pendinginan ini merupakan proses penukaran panas dari air yang kemudian dipompa melewati pipa yang dipasang di dalam atau di luar tangki transformator.

Suhu minyak transformator mengalami fluktuasi akibat perubahan beban transformator maupun variasi suhu udara luar. Ketika suhu minyak meningkat, minyak mengalami pemuaian yang mendorong udara di atas permukaannya keluar dari tangki. Sebaliknya, saat suhu minyak menurun, minyak menyusut sehingga udara dari luar masuk ke dalam tangki. Fenomena ini dikenal sebagai 'pernapasan trafo'. Udara yang masuk mengandung kelembapan, yang dapat memengaruhi kinerja transformator karena kadar air dapat menurunkan kekuatan dielektrik minyak. Untuk mengatasi hal ini, digunakan silica gel biru sebagai penyerap molekul air agar transformator tetap beroperasi optimal. Silica gel biru yang belum jenuh berwarna biru, sedangkan setelah menyerap air hingga jenuh, warnanya berubah menjadi merah muda. Perubahan warna

ini memberikan indikasi bagi operator mengenai waktu penggantian atau regenerasi silica gel guna mencegah kerusakan pada sistem pernapasan transformator.



Gambar 2.8 *Air Breather* pada transformator Daya

A. Jenis trafo berdasarkan penggunaannya

Trafo memiliki banyak sekali jenis termasuk dalam hal penggunaannya. Walaupun pada listrik elektronik maupun elektrik trafo hanya berguna untuk menaikkan atau menurunkan tegangan, tetapi masing-masing trafo juga memiliki fungsi spesifiknya. Penggunaan trafo saat ini antara lain:

1. Trafo Daya

Di dunia transmisi energi listrik, trafo menjadi bagian vital yang tak terpisahkan. Terdapat setidaknya 3 jenis trafo yang berperan dalam sistem transmisi energi listrik yaitu trafo daya, trafo pengukuran, dan trafo distribusi. Walaupun terlihat sangat besar, trafo ini membantu sistem transmisi dalam mentransfer daya listrik hingga ke rumah-rumah penduduk.



Gambar 2.9 Trafo daya

Trafo daya memiliki ukuran yang besar dan digunakan untuk mengirim energi listrik hingga ke gardu listrik. Trafo ini berperan sebagai penghubung antara generator dengan jaringan distribusi utama listrik. Prinsip utama dari trafo daya yaitu mengubah tegangan rendah berarus tinggi menjadi tegangan tinggi berarus rendah. Hal ini untuk meminimalisir kehilangan daya pada sistem distribusi daya listrik, sehingga lebih efisien. Kebanyakan trafo daya diisi dengan minyak di dalamnya sebagai pendingin.



Gambar 2.10 Trafo distribusi

Trafo distribusi digunakan sebagai tahap akhir pada sistem distribusi energi listrik. Trafo ini berfungsi untuk mengubah tegangan tinggi menjadi tegangan rendah yaitu 220 V sehingga dapat dialirkan ke rumah-rumah penduduk. Trafo ini ada yang satu phase atau tiga phase. Trafo distribusi dapat dikelompokkan lagi berdasarkan jenis isolasi yang digunakan yaitu jenis kering dan basah. Trafo

distribusi menggunakan plat-plat baja sebagai intinya. Secara umum, trafo distribusi bekerja pada tegangan di bawah 200 kVA.



Gambar 2.11 Trafo pengukuran

Trafo pengukuran seringkali disebut sebagai trafo instrumen. Trafo ini berfungsi untuk mengukur peralatan pada sistem daya listrik. Listrik yang melewati kumparan primer kemudian diinduksikan ke kumparan sekunder untuk diubah ke tegangan dan arus yang lebih kecil agar dapat dihitung. Perbandingan antara kumparan primer dan sekunder diatur sedemikian rupa sehingga tidak terjadi kekeliruan walaupun hasil yang ditunjukkan bukan hasil sebenarnya. Hasil yang ditunjukkan harus dihitung dengan rumus tertentu sesuai jumlah lilitan antara kumparan primer dan sekundernya.

2.2.3 Pemeliharaan Transformator Tenaga

Pemeliharaan transformator tenaga bertujuan untuk mencegah kerusakan mendadak pada peralatan serta mempertahankan kinerja optimal sesuai umur teknisnya (*Preventive Maintenance*). Kegiatan ini memastikan transformator dapat beroperasi sesuai target, aman bagi manusia dan lingkungan, andal dalam sistem penyaluran listrik, serta efisien. Pemeliharaan dilakukan secara berkala berdasarkan petunjuk manual dari pabrik, guna menjaga efektivitas dan umur pakai peralatan sistem tenaga listrik, khususnya transformator daya, agar tetap berfungsi optimal dan penyaluran listrik berjalan lancar salah satunya *In Service Measurement*.

In Service Measurement merupakan kegiatan pengukuran atau pengujian yang dilakukan saat transformator berada dalam kondisi bertegangan atau sedang beroperasi.

Tujuan dari pengukuran ini adalah untuk memperoleh informasi kondisi transformator secara lebih mendalam tanpa perlu mematikan operasinya. Subsistem transformator yang menjadi objek In Service Measurement meliputi:

1) *Thermovisi*

Dalam setiap pengukuran menggunakan kamera termovisi (*thermal image camera*), umumnya suhu diukur pada tiga titik, yaitu bagian atas, tengah, dan bawah objek. Pada layar tampilan alat, objek yang dimonitor ditampilkan dengan gradasi warna atau gradasi hitam-putih. Warna yang muncul merepresentasikan besaran suhu yang terdeteksi pada objek tersebut. Di sisi kanan layar terdapat skala referensi yang mengaitkan warna dengan nilai suhu, sehingga memudahkan interpretasi hasil pengukuran.

2) *Dissolved Gas Analysis (DGA)*

Transformator sebagai peralatan tegangan tinggi berpotensi mengalami kondisi abnormal yang bersumber dari faktor internal maupun eksternal. Ketidaknormalan ini dapat berdampak pada kinerja transformator, umumnya berupa panas berlebih (*overheat*), corona, atau arcing. Salah satu metode untuk mendeteksi adanya ketidaknormalan adalah dengan mengidentifikasi dampaknya pada transformator itu sendiri. Metode yang digunakan adalah *Dissolved Gas Analysis (DGA)*. Ketika terjadi ketidaknormalan, minyak isolasi yang merupakan rantai hidrokarbon akan terurai akibat energi tinggi dari gangguan tersebut, membentuk gas-gas hidrokarbon yang larut dalam minyak isolasi. Secara prinsip, DGA menghitung konsentrasi gas-gas hidrokarbon yang terbentuk, sehingga dari komposisi dan kadar gas tersebut dapat diprediksi jenis ketidaknormalan yang terjadi, apakah berupa *overheat*, arcing, atau corona.

3) Tegangan tembus minyak.

Pengujian tegangan tembus dilakukan untuk menilai kemampuan minyak isolasi dalam menahan tegangan listrik. Minyak yang bersih dan kering umumnya menunjukkan nilai tegangan tembus yang tinggi. Kehadiran air bebas dan partikel padat, baik secara individu maupun kombinasi, dapat menurunkan tegangan tembus secara signifikan. Dengan demikian, pengujian ini dapat digunakan sebagai indikator keberadaan kontaminan seperti kadar air dan partikel padat. Perlu dicatat bahwa nilai tegangan tembus yang rendah menunjukkan adanya kontaminan, sedangkan nilai tegangan tembus yang tinggi tidak selalu menjamin minyak bebas dari semua jenis kontaminan.

2.2.4 Pengujian Tahanan Isolasi

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi isolasi antara belitan dengan *ground* atau antara dua belitan. Nilai yang didapat tahanan isolasi adalah semakin besar nilai Indeks polarisasi semakin bagus nilai tahanannya atau sebaliknya. Pengujian indeks polarisasi merupakan pengujian arus bocor pada isolasi transformator dengan membandingkan hasil uji selama 1 menit dengan hasil uji selama 10 menit. Tegangan DC *steady-state* akan diberikan setelah waktu 10 menit (R10) dan 1 menit (R1). Jika kita mengasumsikan R1 dan R10 diukur pada temperatur akan sama untuk kedua nilai tahanan yang akan dirasiokan.

Pada dasarnya pengukuran tahanan isolasi belitan trafo adalah untuk mengetahui besar (nilai) kebocoran arus (*leakage current*) yang terjadi pada isolasi belitan atau kumparan primer, sekunder atau tertier. *Leakage current* sendiri merupakan arus konduksi nyata pada isolasi. *Leakage current* tersebut termasuk arus bocor karena kebocoran pada permukaan yang diakibatkan oleh kontaminasi. Kebocoran arus yang menembus isolasi peralatan listrik memang tidak dapat dihindari. Oleh karenanya, salah satu cara meyakinkan bahwa trafo cukup aman untuk diberi tegangan adalah dengan mengukur tahanan isolasinya

Tabel 2.1 Standar nilai tahanan isolasi SK DIR 520

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

Pengujian tahanan isolasi ini menggunakan alat ukur *high voltage insulation test* tipe *kyoritsu 3125*. Alat ukur *high voltage insulation test* akan mempunyai kemampuan untuk mempolarisasikan atau mencharger kapasitansi tinggi ke isolasi dan pembacaan nilai resistansi akan meningkat jika isolasi bersih dan kering.

2.2.5 Pengujian *Tan Delta Winding*

Pengujian *tan delta* merupakan pengukuran kerugian dielektrik untuk mengetahui

kualitas isolasi belitan dengan mengukur arus bocor kapasitif. Trafo yang akan diuji dianggap sebagai kapasitor murni. Jika kapasitor murni diberi tegangan AC sinusoidal, arusnya akan mendahului tegangan 90° . Karena kehilangan daya dielektrik, sudut arus mendahului tegangan tidak lagi 90° . Faktor daya dari kapasitor adalah $\cos \phi$. Dan ϕ adalah sudut fasa darikapasitor. Sudut kehilangan daya (*loss angle*) adalah $\delta = 90^\circ - \phi$. Jadi faktor dissipasi bisa ditulis sebagai $\tan \delta$. Dalam kapasitor sempurna, $\phi = 90^\circ$ sehingga $\delta = 0$. Karenanya kehilangan daya dalam kapasitor sempurna adalah nol (IEC 61620).

Tabel 2.2 SOP nilai *tan delta winding* sesuai SK DIR 520

Item	Batasan (<i>tan delta</i> %)	Rekomendasi
Trafo baru	Maksimal 0,5%	-
Trafo operasi	Maksimal 1%	Periksa kadar air pada minyak isolasi dan kertas isolasi

Selain dari nilai tangen delta, maka nilai suatu kapasitansi juga dapat terukur. Untuk peningkatan suatu nilai dari kapasitansi mengindikasikan kerusakan pada kualitas isolasi kertas. Masalah yang seringnya terjadi yaitu terjadinya arus hubung singkat antar lapisan pada kapasitor yang telah ditandai dengan adanya peningkatan nilai pada suatu kapasitansi. Pengujian *tan delta winding* ini menggunakan alat ukur merek *megger* tipe *delta4000*. Pengujian ini menggunakan empat jenis kabel, yaitu kabel HV, kabel merah, kabel biru, dan kabel *ground*.

Dalam pengujian *tan delta winding* ini menggunakan laptop dan memakai aplikasi *software power DB*. *Power DB software* digunakan untuk mengoleksi dan melaporkan formulir pemeliharaan dan aktivitas inspeksi pada peralatan listrik. *Software* tersebut memiliki banyak *interface* untuk pengujian otomatis dari berbagai alat pengujian merek *Megger* termasuk *Delta Megger 4000*. *Software Power DB* dapat melakukan kontrol terhadap pengujian alat-alat *megger*.

2.2.6 Pengujian *Tan Delta Bushing*

Isolasi pada bushing adalah sebuah metode pengamanan bushing agar terhindar dari panas yang disebabkan oleh arus mengalir secara terus menerus serta merupakan pemisah antara konduktor *bushing* dengan dinding peralatan tersebut. Pengujian *tan delta* pada bushing bertujuan untuk mengetahui kondisi isolasi pada C1 (isolasi antara

konduktor dengan center tap).

Tabel 2.3 SOP nilai *tan delta bushing* sesuai SK DIR 520

Item	Batasan (<i>tan delta</i> %)	Rekomendasi
Trafo baru	Maksimal 0,5%	-
Trafo operasi	Maksimal 1%	Periksa kadar air pada minyak dan kertas isolasi

Pengujian *tan delta bushing* ini juga menggunakan alat *megger* merek *delta4000*. Pengujian ini menggunakan dua jenis kabel, yaitu kabel HV dan kabel merah. Dalam pengujian *tan delta bushing* ini juga menggunakan laptop dan memakai aplikasi *software power DB*. Rumus yang digunakan juga sama seperti pengujian *tan delta winding*.

2.2.7 Pengujian Tegangan Tembus Minyak Isolasi

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi minyak transformator sebagai isolasi karena minyak transformator ini memiliki tingkat isolasi yang lebih baik jika dibandingkan dengan udara bebas. Pengujian tegangan tembus minyak ini juga salah satu parameter yang dapat menunjukkan baik buruknya kondisi isolasi suatu bahan dengan mengetahui batas tegangan tembusnya. Tegangan tembus pada minyak isolasi sendiri adalah sebuah kemampuan pada bahan isolasi untuk menahan hantaran listrik lalu jika isolasi tersebut terkena hantaran listrik yang melebihi batas dan berlangsung lama maka isolasi tersebut akan dapat menghantarkan listrik atau gagal melaksanakan fungsinya sebagai isolator. Nilai tegangan tembus dari minyak isolasi akan berbanding lurus dengan kekuatan dielektrik dari minyak isolasi tersebut. Jadi, jika terjadi kenaikan pada nilai tegangan tembus, kekuatan dielektrik pada minyak isolasi juga akan meningkat (IEC 60422).

Tabel 2.4 SOP nilai tegangan tembus minyak isolasi sesuai SK DIR

Tegangan	Tegangan tembus yang diijinkan
< 70 kV	≥ 30 kV/2,5mm
70 kV-150kV	≥ 40 kV/2,5mm
> 170kV	≥ 50 kV/2,5mm



Gambar 2.13 Megger DELTA4000

2.2.10 Alat Ukur OTS60PB

Alat ukur tegangan tembus minyak isolasi jenis OTS60PB merupakan alat ukur sistem insulasi peralatan listrik tegangan tinggi dengan menguji keakuratan tes tegangan tembus pada mineral, ester, dan silicon minyak isolasi dan dapat digunakan untuk pengujian di lab maupun di lapangan. Hasil pengujian dapat digunakan untuk mengevaluasi sifat dan kualitas material isolasi peralatan sebagai proses untuk mengetahui kontaminasi dan anomali yang sering muncul muncul dengan bertambahnya usia isolasi. (OTS60PB *manual book*)

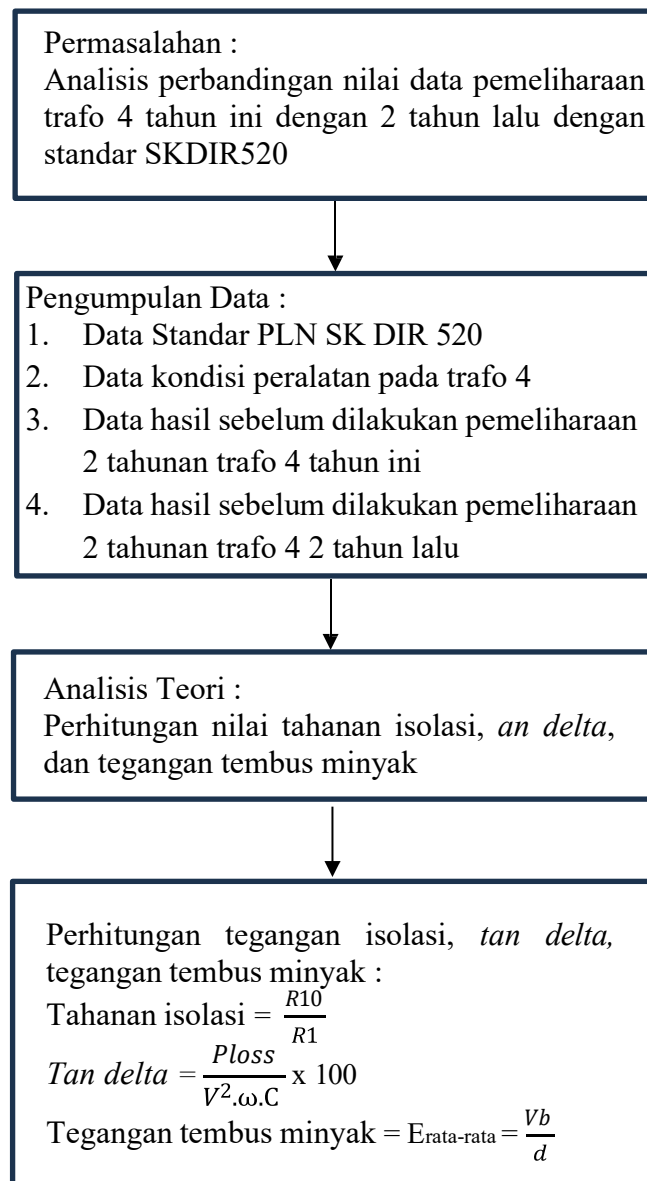
Tutup transparan dan terlindung adalah fitur utama yang memungkinkan pengguna untuk melihat apa yang terjadi di dalam ruang uji. Perangkat uji oli Megger portabel 60 kV dan 80 kV adalah yang paling ringan di pasaran mulai dari 16 kg hingga 23,5 kg tergantung model dan konfigurasi. Mereka datang lengkap dengan tas jinjing opsional dan kotak transportasi.



Gambar 2.14 OTS60PB

2.3 Kerangka Pemikiran

Transformator tenaga merupakan peralatan penting dalam sistem transmisi dan distribusi listrik, khususnya pada gardu induk 150 kV, yang keandalannya sangat bergantung pada kondisi sistem isolasi. Kegagalan isolasi menjadi salah satu penyebab utama gangguan transformator, sehingga diperlukan metode pengujian untuk mendeteksi penurunan kualitas isolasi secara dini, salah satunya melalui pengujian Tan Delta. Pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi degradasi isolasi dengan mengukur rugi daya dielektrik akibat arus bocor, sehingga dapat menjadi indikator kesehatan isolasi. Dengan pelaksanaan pengujian Tan Delta secara berkala, potensi kerusakan dapat teridentifikasi lebih awal dan tindakan pemeliharaan dapat dilakukan secara tepat guna menjaga keandalan transformator. Kerangka pemikiran penelitian ini digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.15 Kerangka Pemikiran indeks tahanan isolasi, *tan delta*, tegangan tembus minyak isolasi