



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teori Dasar Transformator

2.1.1 Definisi Transformator⁴

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain tanpa merubah frekuensi dari sistem, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Trafo digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan trafo dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap - tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi :

1. Transformator daya, trafo ini biasanya digunakan untuk menaikkan tegangan pembangkit menjadi tegangan transmisi.
2. Transformator distribusi, untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi.
3. Transformator instrument, digunakan untuk pengukuran yang terdiri atas transformator arus (*current transformer-CT*) dan transformator tegangan (*potential transformer-PT*).

Masing-masing tipe transformator memiliki kekhususan dalam perencanaan dan pembuatan yang disesuaikan dengan pemakaiannya. Walaupun demikian semua tipe transformator mempunyai prinsip dasar yang sama.

Pada umumnya transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Rasio perubahan tegangan akan tergantung dari rasio jumlah lilitan pada kedua kumparan. Biasanya kumparan terbuat dari kawat tembaga yang dibelit seputar “kaki” inti transformator.

⁴ Sumanto. *Teori Transformator Ed.1*. Yogyakarta : ANDI OFFSET, 1991, hlm.1.



2.1.2 Jenis Fasa Tegangan Transformator

Sebagaimana diketahui, bahwa fasa tegangan listrik yang umum digunakan adalah tegangan satu fasa dan tegangan tiga fasa.

Berdasarkan ini dikenal 2 jenis transformator :

1. Transformator satu fasa, bila transformator digunakan untuk memindahkan tenaga listrik satu fasa.
2. Transformator tiga fasa, bila transformator digunakan untuk memindahkan tenaga listrik tiga fasa.

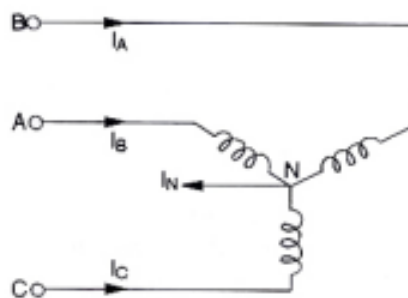
2.1.3 Hubungan Lilitan Transformator Tiga Fasa

Kumparan primer ataupun sekunder dari transformator tiga fasa bisa dihubungkan⁵ :

1. Secara bintang atau Y
2. Secara segitiga atau Δ
3. Secara zig –zag atau Z

a) Hubungan Bintang atau Y

Hubungan bintang ialah hubungan transformator tiga fasa, dimana ujung – ujung awal atau akhir lilitan disatukan. Titik dimana tempat penyatuan dari ujung – ujung lilitan merupakan titik netral.



Gambar 2.1 Hubungan Bintang

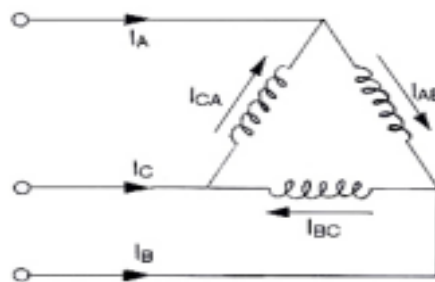
⁵ Zuhail. *Dasar Tenaga Listrik*. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 1991, hlm. 42.



b) Hubungan Segitiga atau Δ

Hubungan segitiga adalah suatu hubungan transformator tiga fasa, dimana cara penyambungannya ialah ujung akhir lilitan fasa pertama disambung dengan ujung mula lilitan fasa kedua, akhir fasa kedua dengan ujung mula fasa ketiga dan akhir fasa ketiga dengan ujung mula fasa pertama.

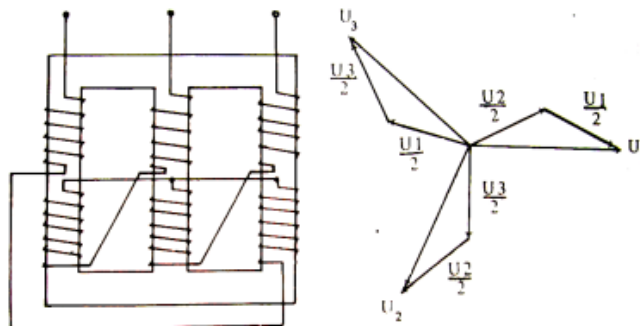
Tegangan trafo 3 (tiga) fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara delta, yaitu VAB, VBC, dan VCA, masing-masing berbeda fasa 120° .



Gambar 2.2 Hubungan Segitiga

c) Hubungan Zig – Zag atau Z

Supaya dapat bekerja dengan baik, maka salah satu syarat yang diperlukan adalah setiap fasa hendaknya bebannya sama, akan tetapi hal ini seringkali sukar dipenuhi. Untuk itu lilitan sekunder dibuat dalam hubungan *interconnected star* (*zig-zag*).



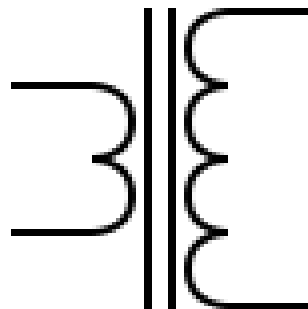
Gambar 2.3 Hubungan Zig – Zag



2.2 Jenis – Jenis Transformator⁶

a. Step-Up

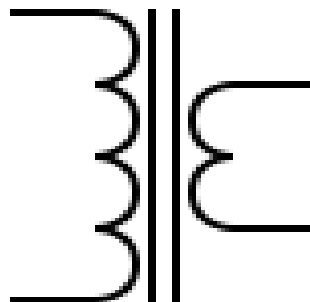
Transformator step-up adalah transformator yang memiliki lilitan sekunder lebih banyak daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penaik tegangan. Transformator ini biasa ditemui pada pembangkit tenaga listrik sebagai penaik tegangan yang dihasilkan generator menjadi tegangan tinggi yang digunakan dalam transmisi jarak jauh.



Gambar 2.4 Skema Transformator Step-Up

b. Step-Down

Transformator step-down memiliki lilitan sekunder lebih sedikit daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penurun tegangan. Transformator jenis ini sangat mudah ditemui, terutama dalam adaptor AC-DC.



Gambar 2.5 Skema Transformator Step-Down

⁶ Zuhail dan Zhanggischian, *Prinsip Dasar Elektroteknik* (Jakarta : PT. Gramedia Pusaka Utama, 2004). hlm.631.



c. Auto Transformator

Transformator jenis ini hanya terdiri dari satu lilitan yang berlanjut secara listrik, dengan sadapan tengah. Dalam transformator ini, sebagian lilitan primer juga merupakan lilitan sekunder. Fasa arus dalam lilitan sekunder selalu berlawanan dengan arus primer, sehingga untuk tarif daya yang sama lilitan sekunder bisa dibuat dengan kawat yang lebih tipis dibandingkan transformator biasa. Keuntungan dari autotransformator adalah ukuran fisiknya yang kecil dan kerugian yang lebih rendah daripada jenis dua lilitan. Tetapi transformator jenis ini tidak dapat memberikan isolasi secara listrik antara lilitan primer dengan lilitan sekunder.

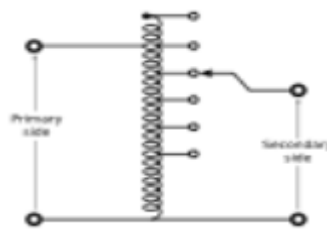
Selain itu, auto transformator tidak dapat digunakan sebagai penaik tegangan lebih dari beberapa kali lipat (biasanya tidak lebih dari 1,5 kali).



Gambar 2.6 Skema Auto Transformator

d. Auto Transformator Variabel

Auto transformator variabel sebenarnya adalah autotransformator biasa yang sadapan tengahnya bisa diubah-ubah, memberikan perbandingan lilitan primer sekunder yang berubah-ubah.



Gambar 2.7 Skema Autotransformator Variabel



e. Transformator isolasi

Transformator isolasi memiliki lilitan sekunder yang berjumlah sama dengan lilitan primer, sehingga tegangan sekunder sama dengan tegangan primer. Tetapi pada beberapa desain, gulungan sekunder dibuat sedikit lebih banyak untuk mengkompensasi kerugian. Transformator seperti ini berfungsi sebagai isolasi antara dua kalang. Untuk penerapan audio, transformator jenis ini telah banyak digantikan oleh kopling kapasitor.

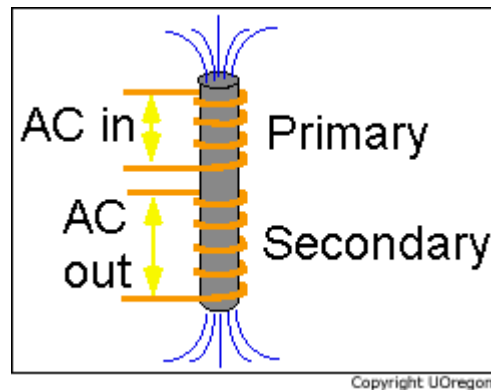
f. Transformator pulsa

Transformator pulsa adalah transformator yang didesain khusus untuk memberikan keluaran gelombang pulsa. Transformator jenis ini menggunakan material inti yang cepat jenuh sehingga setelah arus primer mencapai titik tertentu, fluks magnet berhenti berubah. Karena GGL induksi pada lilitan sekunder hanya terbentuk jika terjadi perubahan fluks magnet, transformator hanya memberikan keluaran saat inti tidak jenuh, yaitu saat arus pada lilitan primer berbalik arah.

2.3 Transformator Tenaga

Transformator merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya/tenaga dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Transformator menggunakan prinsip hukum induksi faraday dan hukum lorentz dalam menyalurkan daya, dimana arus 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 potensial.¹

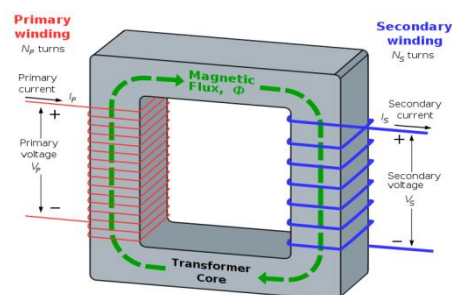
¹ Perusahaan Listrik Negara, *Buku Pedoman O&M Trafo Tenaga* (Jakarta : PT. PLN (Persero), 2014), hlm.1.



Gambar 2.8 Arus bolak balik mengelilingi inti besi

Transformator terdiri atas dua buah kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Dapat dilihat dari Gambar 2.8 bahwa kedua kumparan ini terpisah secara elektris namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk rangkaian tertutup maka mengalirlah arus primer.

Akibat adanya fluks di kumparan primer maka terjadi induksi (self induction) maka terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).



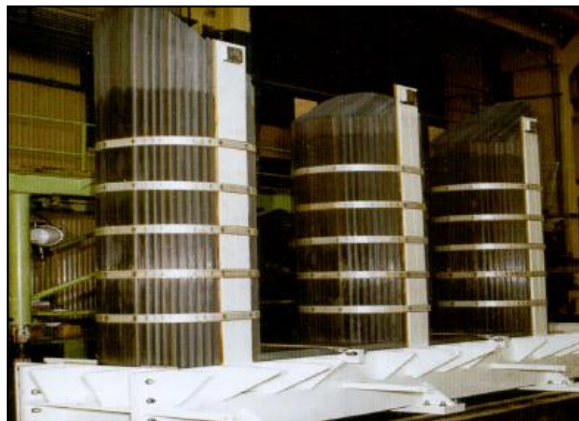
Gambar 2.9 Prinsip Kerja Transformator



2.4 Bagian – Bagian Transformator Tenaga dan Fungsinya

2.4.1 Electromagnetic Circuit (Inti besi)

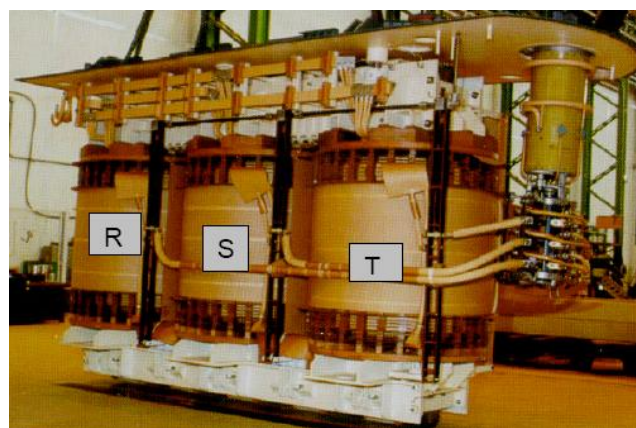
Inti besi digunakan sebagai media jalannya flux yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan lempengan besi tipis berisolasi yang di susun sedemikian rupa.



Gambar 2.10 Inti Besi

2.4.2 Current Carrying Circuit (Winding)

Belitan terdiri dari batang tembaga berisolasi yang mengelilingi inti besi, dimana saat arus bolak balik mengalir pada belitan tembaga tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan flux magnetik.

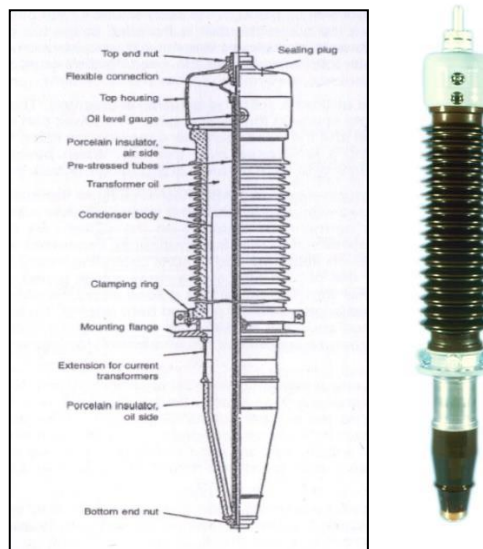


Gambar 2.11 Belitan Trafo



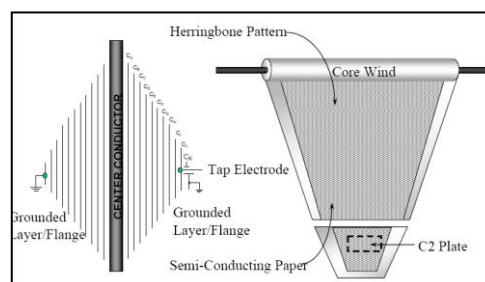
2.4.3 Bushing

Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar. Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan body main tank transformator.

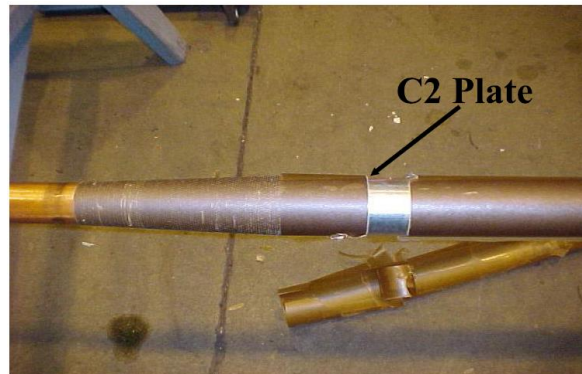


Gambar 2.12 Bushing

Secara garis besar bushing dapat dibagi menjadi empat bagian utama yaitu isolasi, konduktor, klem koneksi, dan asesoris. Isolasi pada bushing terdiri dari dua jenis yaitu oil impregnated paper dan resin impregnated paper. Pada tipe oil impregnated paper isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi dan minyak isolasi sedangkan pada tipe resin impregnated paper isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi dan resin.

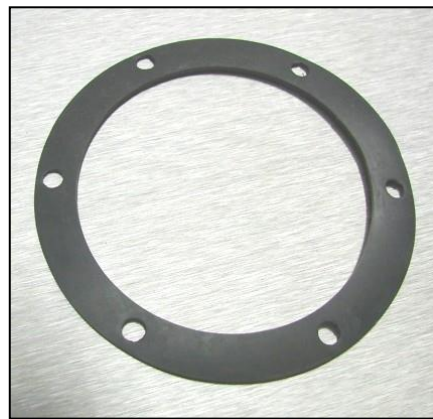


Gambar 2.13 kertas isolasi pada bushing (oil impregnated paper bushing)



Gambar 2.14 konduktor bushing dilapisi kertas isolasi

Terdapat jenis-jenis konduktor pada bushing yaitu hollow conductor dimana terdapat besi pengikat atau penegang ditengah lubang konduktor utama, konduktor pejal dan flexible lead. Klem koneksi merupakan sarana pengikat antara stud bushing dengan konduktor penghantar diluar bushing. Asesoris bushing terdiri dari indikasiminyak, seal atau gasket dan tap pengujian. Seal atau gasket pada bushing terletak dibagian bawah mounting flange.



Gambar 2.15 Gasket / seal antara flange bushing dengan body trafo



Gambar 2.16 Indikasi Level Minyak Bushing

2.4.4 Pendingin

Suhu pada transformator yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, losses pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada transformator. Oleh karena itu pendinginan yang efektif sangat diperlukan.

Minyak isolasi transformator selain merupakan media isolasi juga berfungsi sebagai pendingin. Pada saat minyak bersirkulasi, panas yang berasal dari belitan akan dibawa oleh minyak sesuai jalur sirkulasinya dan akan didinginkan pada sirip – sirip radiator. Adapun proses pendinginan ini dapat dibantu oleh adanya kipas dan pompa sirkulasi guna meningkatkan efisiensi pendinginan.

Tabel 2.1 Macam macam pendingin pada transformator

No.	Macam Sistem Pendingin *)	Media			
		Dalam Transformator		Diluar Transformator	
		Sirkulasi alamiah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa
1.	AN	-	-	Udara	-
2.	AF	-	-	-	Udara
3.	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4.	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5.	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6.	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7.	OFWF	-	Minyak	-	Air
8.	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9.	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10.	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11.	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			



Gambar 2.17 Radiator

2.4.5 Oil preservation dan expansion (konservator)

Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada transformator, minyak isolasi akan memuai sehingga volumenya bertambah. Sebaliknya saat terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak akan menyusut dan volume minyak akan turun. Konservator digunakan untuk menampung minyak pada saat transformator mengalami kenaikan suhu.



Gambar 2.18 Konservator

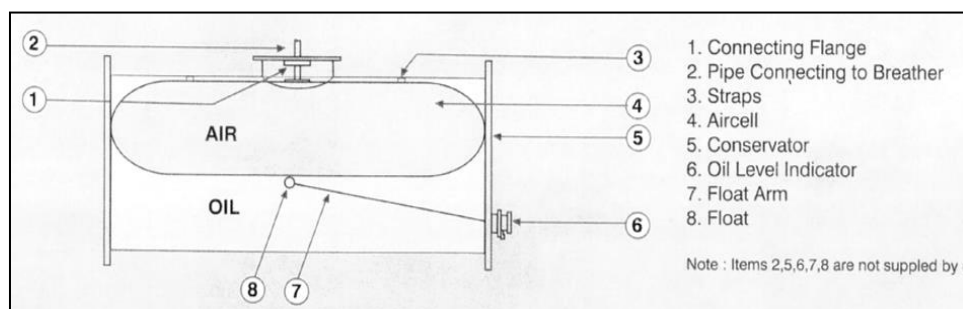


Seiring dengan naik turunnya volume minyak di konservator akibat pemuaian dan penyusutan minyak, volume udara didalam konservator pun akan bertambah dan berkurang. Penambahan atau pembuangan udara didalam konservator akan berhubungan dengan udara luar. Agar minyak isolasi transformator tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar, maka udara yang akan masuk kedalam konservator akan difilter melalui silicagel.



Gambar 2.19 Silica Gel

Untuk menghindari agar minyak trafo tidak berhubungan langsung dengan udara luar, maka saat ini konservator dirancang dengan menggunakan breather bag/rubber bag, yaitu sejenis balon karet yang dipasang didalam tangki konservator.



Gambar 2.20 Konstruksi konservator dengan rubber



2.4.6 Dielectric (Minyak isolasi transformator dan isolasi kertas)

1. Minyak Isolasi Trafo

Minyak isolasi pada transformator berfungsi sebagai media isolasi, pendingin dan pelindung belitan dari oksidasi. Minyak isolasi trafo merupakan minyak mineral yang secara umum terbagi menjadi tiga jenis, yaitu parafinik, naphthanik dan aromatik. Antara ketiga jenis minyak dasar tersebut tidak boleh dilakukan pencampuran karena memiliki sifat fisik maupun kimia yang berbeda.



Gambar 2.21 Minyak Isolasi Transformator

Didalam standar IEC 60422 telah dicantumkan parameter-parameter minyak isolasi dengan batasan-batasan minimum untuk minyak isolasi yang baru dimasukkan kedalam peralatan sebelum energize.

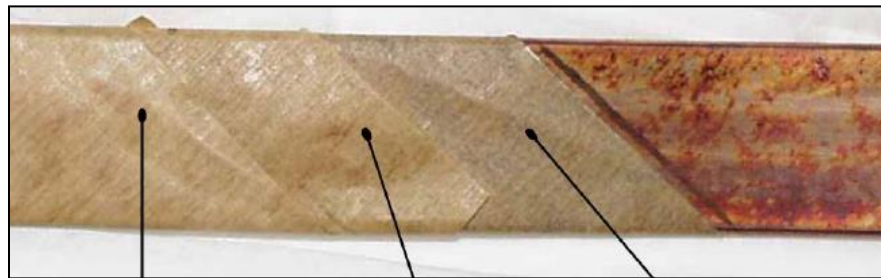
Tabel 2.2 Batasan nilai parameter minyak isolasi yang baru dimasukkan kedalam peralatan sebelum dilakukan proses energize

Property	Highest voltage for equipment kV		
	<72,5	72,5 to 170	>170
Appearance	Clear, free from sediment and suspended matter		
Colour (on scale given in ISO 2049)	Max. 2,0	Max. 2,0	Max. 2,0
Breakdown voltage (kV)	>55	>60	>60
Water content (mg/kg) ^a	20 ^b	<10	<10
Acidity (mg KOH/g)	Max. 0,03	Max. 0,03	Max. 0,03
Dielectric dissipation factor at 90°C and 40 Hz to 60 Hz ^c	Max. 0,015	Max. 0,015	Max. 0,010
Resistivity at 90 °C (GΩm)	Min. 60	Min. 60	Min. 60
Oxidation stability	As specified in IEC 60296		
Interfacial tension (mN/m)	Min. 35	Min. 35	Min. 35
Total PCB content (mg/kg)	Not detectable (< 2 total)		
Particles	-	-	See Table B.1 ^d



2. Kertas Isolasi Trafo

Isolasi kertas berfungsi sebagai isolasi, pemberi jarak, dan memiliki kemampuan mekanis.



Gambar 2.22 Tembaga yang dilapisi kertas isolasi

2.4.7 Tap Changer

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Transformator dituntut memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan pada sisi primer diharapkan dapat merubah ratio antara belitan primer dan sekunder dan dengan demikian tegangan output/sekunder pun dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem berapapun tegangan input/primernya. Penyesuaian ratio belitan ini disebut Tap changer.

Proses perubahan ratio belitan ini dapat dilakukan pada saat trafo sedang berbeban (On load tap changer) atau saat trafo tidak berbeban (Off load tap changer).

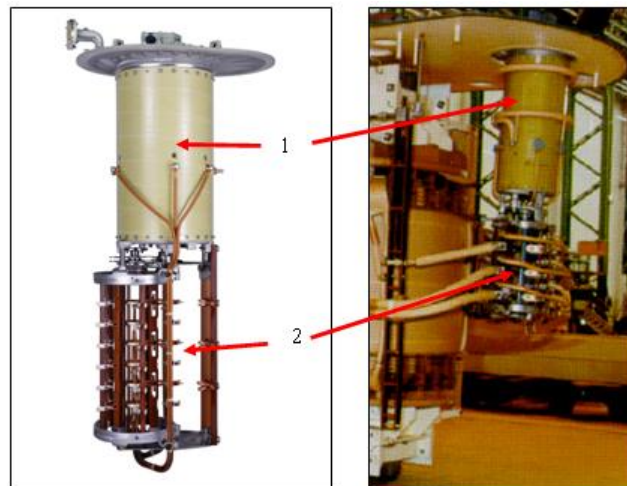
Tap changer terdiri dari :

1. Selector Switch
2. Diverter Switch
3. Tahanan transisi

Dikarenakan aktifitas tap changer lebih dinamis dibanding dengan belitan utama dan inti besi, maka kompartemen antara belitan utama dengan tap changer dipisah. Selector switch merupakan rangkaian mekanis yang terdiri dari terminal terminal untuk menentukan posisi tap atau ratio belitan primer. Diverter switch



merupakan rangkaian mekanis yang dirancang untuk melakukan kontak atau melepaskan kontak dengan kecepatan yang tinggi. Tahanan transisi merupakan tahanan sementara yang akan dilewati arus primer pada saat perubahan tap.

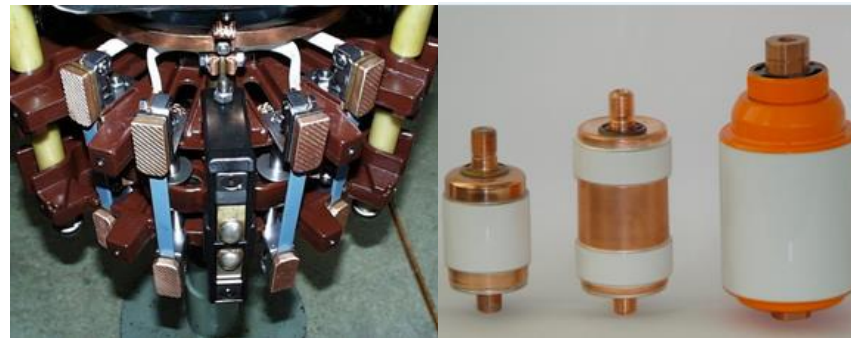


Gambar 2.23 OLTC pada Transformator

Keterangan :

1. Kompartemen Diverter Switch
2. Selektor Switch

Media pendingin atau pemadam proses switching pada diverter switch yang dikenal sampai saat ini terdiri dari dua jenis, yaitu media minyak dan media vaccum. Jenis pemadaman dengan media minyak akan menghasilkan energi arcing yang membuat minyak terurai menjadi gas C_2H_2 dan karbon sehingga perlu dilakukan penggantian minyak pada periode tertentu. Sedangkan dengan metoda pemadam vaccum proses pemadaman arcing pada waktu switching akan dilokalisir dan tidak merusak minyak.



(a)

(b)

- a. media pemadam arcin menggunakan minyak
- b. media pemadam arcin menggunakan kondisi vaccum

Gambar 2.24 Kontak Switching Pada Diverter Switch

2.4.8 NGR (neutral grounding resistant)

Salah satu metoda pentanahan adalah dengan menggunakan NGR. NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang serial dengan neutral sekunder pada transformator sebelum terhubung ke ground/tanah. Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi neutral ke tanah.

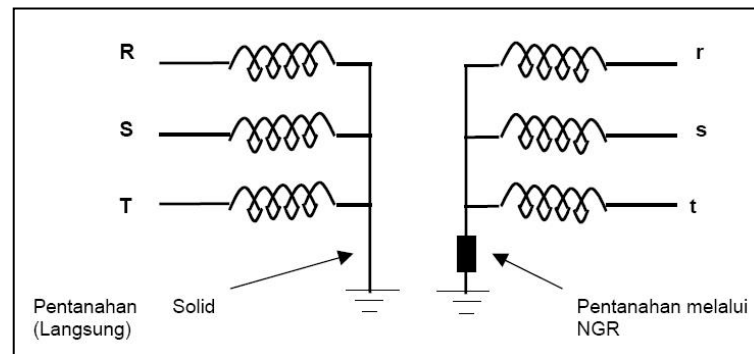
NGR memiliki dua jenis, yaitu:

1. Liquid

Resistornya menggunakan larutan air murni yang ditampung didalam bejana dan ditambahkan garam (NaCl) untuk mendapatkan nilai resistansi yang diinginkan.

2. Solid

Sedangkan NGR jenis padat terbuat dari Stainless Steel, FeCrAl, Cast Iron, Copper Nickel atau Nichrome yang diatur sesuai nilai tahanannya.




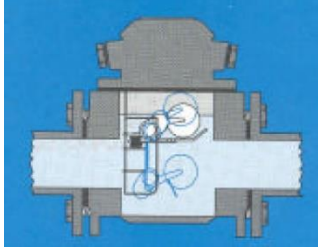
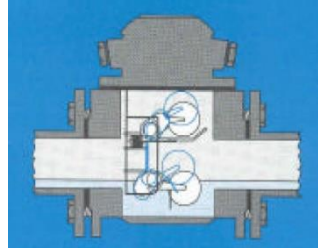
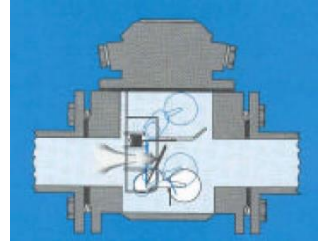
Gambar 2.25 Neutral grounding resistance (NGR)

2.4.9 Proteksi Transformator

1. Rele Buchols

Pada saat transformator mengalami gangguan internal yang berdampak kepada suhu yang sangat tinggi dan pergerakan mekanis didalam transformator, maka akan timbul tekanan aliran minyak yang besar dan pembentukan gelembung gas yang mudah terbakar. Tekanan atau gelembung gas tersebut akan naik ke konservator melalui pipa penghubung dan rele bucholz. Tekanan minyak maupun gelembung gas ini akan dideteksi oleh rele bucholz sebagai indikasi telah terjadinya gangguan internal



	<p>Rele Bucholz</p>
	<p>Rele bucholz mengindikasikan Alarm saat gas yang terbentuk terjebak di rongga rele bucholz dengan mengaktifkan satu pelampung</p>
	<p>Rele bucholz mengindikasikan Trip saat gas yang terbentuk terjebak di rongga rele bucholz dengan mengaktifkan kedua pelampung</p>
	<p>Rele bucholz mengindikasikan Trip saat muncul tekanan minyak yang tinggi ke arah konservator</p>

Gambar 2.26 Rele Buchols

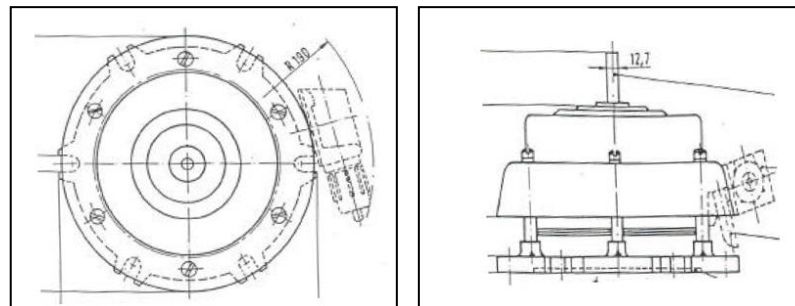
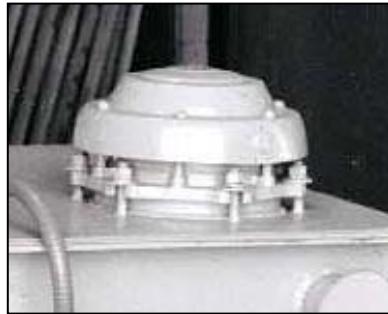
2. Rele jansen

Sama halnya seperti rele Bucholz yang memanfaatkan tekanan minyak dan gas yang terbentuk sebagai indikasi adanya ketidaknormalan / gangguan, hanya saja rele ini digunakan untuk memproteksi kompartemen OLTC. Rele ini juga dipasang pada pipa saluran yang menghubungkan kompartemen OLTC dengan konservator.



3. Sudden pressure

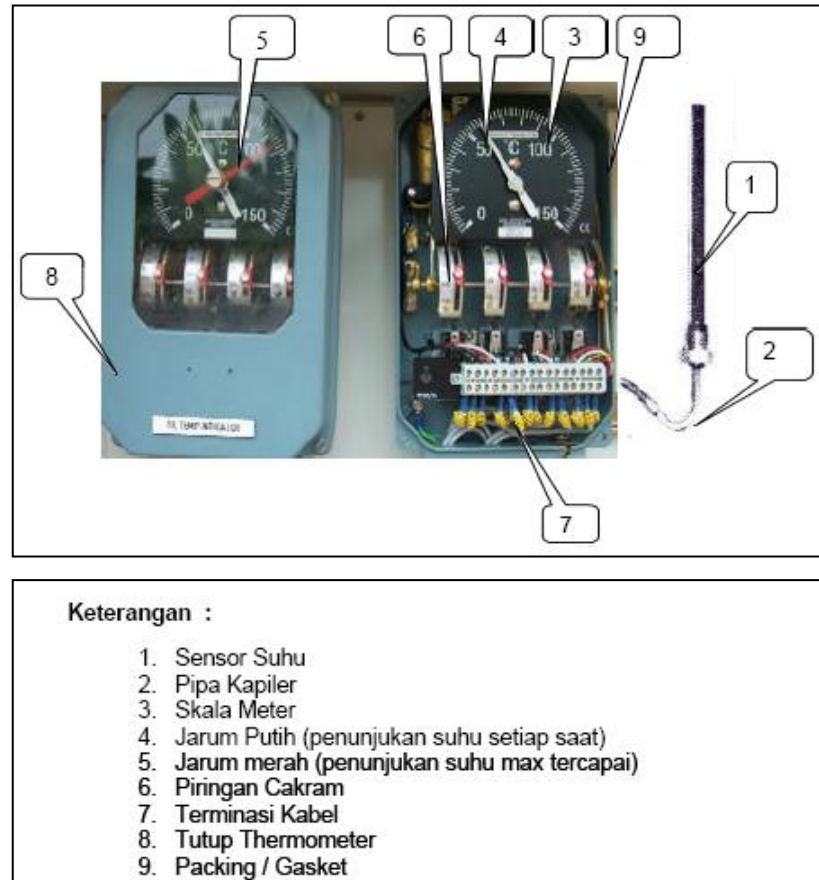
Rele sudden pressure ini didesain sebagai titik terlemah saat tekanan didalam trafo muncul akibat gangguan. Dengan menyediakan titik terlemah maka tekanan akan tersalurkan melalui sudden pressure dan tidak akan merusak bagian lainnya pada maintank.



Gambar 2.27 Rele sudden pressure

4. Rele thermal

Suhu pada transformator yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, losses pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada transformator. Untuk mengetahui suhu operasi dan indikasi ketidaknormalan suhu operasi pada transformator digunakan rele thermal. Rele thermal ini terdiri dari sensor suhu berupa thermocouple, pipa kapiler dan meter penunjukan.



Gambar 2.28 Bagian-bagian dari rele thermal

2.5 Gangguan Transformator Daya

Gangguan pada transformator daya tidak dapat dihindari, namun akibat dari gangguan tersebut diupayakan dampaknya seminimal mungkin. Berdasarkan letak penyebab gangguan, ada dua jenis penyebab gangguan pada transformator, yaitu gangguan eksternal dan gangguan internal.⁷

1. Gangguan Eksternal

Gangguan eksternal sumber gangguannya berasal dari luar pengamanan transformator, tetapi dampaknya dirasakan oleh transformator tersebut, diantaranya adalah :

⁷ Yosafat Sotarduga, "Analisis Kinerja Isolasi Pada Transformator Daya Berdasarkan Indeks Polarisasi, Kekuatan Dielektrik Dan Tangen Delta", Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, hlm.9.



- a. Gangguan hubung singkat pada jaringan
- b. Gangguan hubung singkat diluar transformator ini biasanya dapat segera dideteksi karena timbulnya arus yang sangat besar, dapat mencapai beberapa kali arus nominalnya.

c. Beban lebih

Transformator daya dapat beroperasi secara terus menerus pada arus beban nominalnya. Apabila beban yang dilayani lebih besar dari 100%, maka akan terjadi pembebanan lebih. Hal ini dapat menimbulkan pemanasan yang berlebih. Kondisi ini mungkin tidak akan menimbulkan kerusakan, tetapi apabila berlangsung secara terus menerus akan memperpendek umur isolasi.

d. Surja petir

Gelombang surja dapat terjadi karena cuaca, yaitu petir yang menyambar jaringan transmisi dan kemudian akan merambat ke gardu terdekat dimana transformator tenaga terpasang. Walaupun hanya terjadi dalam kurun waktu sangat singkat hanya beberapa puluh mikrodetik, akan tetapi karena tegangan puncak yang dimiliki cukup tinggi dan energi yang dikandungnya besar, maka ini dapat menyebabkan kerusakan pada transformator daya.

2. Gangguan Internal

Gangguan internal adalah gangguan yang bersumber dari daerah pengamanan / petak bay transformator, diantaranya adalah :

- a. Gangguan hubung singkat antar belitan dan inti transformator daya.
- b. Gangguan hubung singkat antar belitan dan tangki transformator daya.
- c. Gangguan pada isolasi (minyak) transformator daya.

2.6 Keandalan Transformator Daya

Keandalan adalah suatu kemungkinan dari sebuah barang yang bekerja pada suatu kondisi tertentu dengan memuaskan dalam suatu periode tertentu. Menurut IEEE, keandalan adalah kemampuan sistem atau komponen untuk memenuhi fungsi yang dibutuhkan dalam kondisi tertentu selama rentang waktu



yang spesifik. Dari sisi pandang kualitas, keandalan dapat didefinisikan sebagai kemampuan sebuah barang untuk dapat tetap berfungsi. Sedangkan dari sisi pandang kuantitatif, keandalan ditunjukkan sebagai kemungkinan bahwa tidak ada gangguan operasional yang akan muncul dalam suatu rentang waktu tertentu.⁷

Agar keandalan ini efektif di pendanaan dan waktu, maka keandalan ini harus terintegrasi dengan aktivitas-aktivitas proyek, dukungan jaminan kualitas, dan upaya rekayasa secara bersamaan. Keandalan Transformator daya sangat penting diperhitungkan dalam sistem tenaga listrik, faktor yang mempengaruhinya adalah gangguan-gangguan yang menyebabkan transformator daya tidak melayani beban, bisa dikarenakan gangguan eksternal, internal, bahkan pemeliharaan transformator daya tersebut juga mengakibatkan transformator daya tidak melayani.

2.7 Pengujian Transformator

Pengujian transformator dilakukan untuk mengetahui karakteristik, parameter, kondisi maupun performance sebuah transformator. Pengujian transformator ini dapat dibedakan menjadi 3 kelompok pengujian yaitu pengujian rutin, pengujian jenis dan pengujian khusus.

1. Pengujian Rutin

Pengujian rutin merupakan sebuah pengujian yang dilakukan secara rutin dan dilakukan berdasarkan internal waktu yang telah ditetapkan dalam persyaratan atau kriteria tertentu yang dimaksudkan untuk mengurangi serta mencegah suatu peralatan mengalami kondisi yang tidak diinginkan. Berikut beberapa pengujian rutin pada transformator.

- a. Pengujian indeks polarisasi.
- b. Pengujian tangen delta.
- c. Pengujian tegangan tembus minyak transformator (Break Down Voltage).

⁷ Yosafat Sotarduga, "Analisis Kinerja Isolasi Pada Transformator Daya Berdasarkan Indeks Polarisasi, Kekuatan Dielektrik Dan Tangen Delta", Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, hlm.12



2. *Pengujian Jenis*

Pengujian jenis merupakan sebuah pengujian yang dilakukan pada sebuah transformator yang mewakili trafo lainnya yang sejenis, yang berfungsi untuk menunjukkan bahwa semua trafo jenis sudah memenuhi persyaratan. Berikut beberapa pengujian jenis pada transformator.

- a. Pengujian kenaikan suhu.
- b. Pengujian impedansi.

3. *Pengujian Khusus*

Pengujian khusus merupakan pengujian selain dari pengujian rutin dan pengujian jenis, pengujian ini dilakukan atas persetujuan perusahaan produksi transformator dengan perusahaan yang membeli transformator tersebut dan hanya dilaksanakan terhadap satu atau lebih transformator dari sejumlah transformator yang dipesan dalam suatu kontrak. Berikut beberapa pengujian khusus pada transformator.

- a. Pengujian impedansi urutan nol pada trafo tiga fasa.
- b. Pengujian tingkat bunyi akustik.
- c. Pengujian harmonik pada arus beban kosong.

2.8 Pengukuran Tahanan Isolasi

Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui kondisi isolasi antara belitan dengan ground atau antara dua belitan. Metoda yang umum dilakukan adalah dengan memberikan tegangan dc dan merepresentasikan kondisi isolasi dengan satuan megohm. Tahanan isolasi yang diukur merupakan fungsi dari arus bocor yang menembus melewati isolasi atau melalui jalur bocor pada permukaan eksternal. Pengujian tahanan isolasi dapat dipengaruhi suhu, kelembaban dan jalur bocor pada permukaan eksternal seperti kotoran pada bushing atau isolator. Megaohm meter biasanya memiliki kapasitas pengujian 500, 1000 atau 2500 V dc.¹

¹ Perusahaan Listrik Negara, *Buku Pedoman O&M Trafo Tenaga* (Jakarta : PT. PLN (Persero), 2014), hlm.38.



Gambar 2.29 Alat ukur MegOhm meter

Pengkategorian kondisi isolasi berdasarkan hasil pengujian tahanan isolasi dilihat dari nilai tahanan isolasinya itu sendiri (megohm) dan index polarisasi (perbandingan hasil pengujian tahanan isolasi pada menit ke – 10 dengan menit ke – 1).

Batasan dari tahanan isolasi kumparan trafo sesuai Buku Pemeliharaan Peralatan SE. 032/PST/1984 adalah ²:

Menurut standard VDE (catalogue 228/4) minimum besarnya tahanan isolasi kumparan trafo, pada suhu operasi dihitung :

$$1 \text{ kilo Volt} = 1 \text{ M}\Omega \text{ (Mega Ohm)2.1}$$

Dengan catatan 1 kV = besarnya tegangan fasa terhadap tanah, kebocoran arus yang diijinkan setiap kV = 1 mA.

Salah satu jenis pemeliharaan yang dilakukan dalam kegiatan Combustion Inspection(CI) yaitu pemeliharaan periodik yang dilakukan setiap 8.000 jam trafo beroperasi adalah pemeriksaan stator atau belitan trafo, kegiatan yang dilakukan dapat berupa pengujian tahanan isolasi (*Insulation Resistance Test*) dan *Polarization Index Test*.

² Perusahaan Listrik Negara, *Buku Petunjuk Operasi dan Pemeliharaan Peralatan Penyaluran Tenaga Listrik* (Jakarta : PT. PLN (Persero), 1984), hlm.35.



Nilai Insulation Resistance (IR) stator diukur pada suhu ruangan $30,5^{\circ}\text{C}$, pengukuran dilakukan dengan cara melepas hubungan way (Y) trafo terhadap ground terlebih dahulu. Pengukuran dilakukan pada tiap fasa yaitu fasa R, S, dan T masing-masing di ukur langsung terhadap ground. Sehingga megger yang digunakan yaitu megger fasa terhadap ground. Jenis Megger yang digunakan adalah Megger jenis analog dengan tegangan 5000 Volt, pemilihan megger dengan tegangan 5000 Volt sesuai dengan besarnya tegangan kerja Trafo dan berdasarkan standar IEEE.

Pengujian ini dilakukan untuk mendeteksi adanya kelemahan isolasi tahanan. Pengujian isolasi secara rutin dapat dilakukan dengan menggunakan Megger yang pembacaannya langsung dalam megaohm. Tahanan isolasi adalah ukuran kebocoran arus yang melalui isolasi. Tahanan berubah-ubah karena pengaruh temperatur dan lamanya tegangan yang diterapkan pada lilitan tersebut. Oleh karena itu, faktor-faktor tersebut harus dicatat pada waktu pengujian. Nilai tegangan minimum pengujian adalah satu kilovolt sebanding dengan satu (1) megaohm nilai resistansi pada lilitan stator trafo, nilai tahanan yang rendah dapat menunjukkan belitan dalam keadaan kotor atau basah.

2.8.1 Test Indeks Polarisasi

Indeks polarisasi adalah sebuah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui besar kebocoran arus (leakage current). Tujuan dari pengujian indeks polarisasi (PI) adalah untuk memastikan peralatan tersebut layak dioperasikan atau bahkan untuk dilakukan *overvoltage test* atau biasa disebut dengan *megger test*. Arus total yang muncul saat memberikan tegangan dc steady state terdiri dari:

1. Charging current karena sifat kapasitansi dari isolasi yang diukur. Arus ini turun dari nilai maksimum ke nol sangat cepat.
2. Absorption current karena molecular charge shifting pada isolasi. Arus transien ini menghilang sampai nol lebih lambat.



3. leakage current merupakan arus konduksi nyata pada isolasi. Leakage current bervariasi tergantung tegangan uji. Juga termasuk arus bocor dikarenakan kebocoran pada permukaan akibat kontaminasi.

Leakage current meningkat lebih cepat dengan kehadiran moisture dibanding absorption current, pembacaan megaohm tidak akan meningkat seiring waktu layaknya antara kecepatan pada isolasi buruk dengan cepatnya isolasi yang bagus. Hal ini berdampak pada rendahnya index polarisasi. Keuntungan dari index ratio adalah dengan banyaknya hal yang dapat mempengaruhi pembacaan megaohm seperti suhu dan humidity baik pada 1 menit maupun 10 menit. Index polarisasi merupakan perbandingan antara nilai tahanan isolasi pada menit ke 10 dengan menit ke 1.

Jika nilai Indeks Polaritas (IP) terlalu rendah ini mengindikasikan bahwa lilitan mungkin terkontaminasi oli, kotoran,serangga, atau terbasahi oleh air (lembab). Maka sebagai nilai parameter Indeks Polarisasi (IP) menurut standar IEEE C57.125-1991³ tentang Indeks Polarisasi dan Resistansi Isolasi yaitu adalah jika nilai IP kurang dari 2.0 maka kemungkinan adanya kontaminasi pada isolasi stator, misalnya isolasi winding terlalu banyak menyerap uap air (lembab) atau terdapat penumpukan kotoran konduktive, sehingga perlu dilakukan pemeliharaan yaitu membersihkan winding stator dari kontaminasi kotoran atau dengan cara mengeringkan winding stator. Besarnya Indeks Polaritas (IP) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$PI = \frac{\text{Pengukuran R 10 menit}}{\text{Pengukuran R 1 menit}} \dots\dots\dots (2.2)^1$$

¹ Perusahaan Listrik Negara, *Buku Pedoman O&M Trafo Tenaga* (Jakarta : PT. PLN (Persero), 2014), hlm.39.

³ IEEE, *Guide for Failure Investigation, Documentation, Analysis, and Reporting for Power Transformers and Shunt Reactors*, 1991.IEEE Std C57.125-1991.



Keterangan :

PI = Indeks polarisasi

R1 menit = Nilai tahanan isolasi pengukuran menit pertama (Ω)

R10 menit = Nilai tahanan isolasi pengukuran pada menit kesepuluh (Ω)

Kondisi isolasi berdasarkan indeks polarisasi ditunjukkan pada tabel berikut (IEEE Std 62 tahun 1995):

Tabel 2.3 Nilai standart indeks polarisasi¹

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	-

Untuk isolasi belitan yang baik, nilai indeks polarisasi harus minimum 1,25 pada pengukuran di temperature 20°C.

1. Nilai Indeks Polarisasi diantara 1,25 – 2, peralatan masih dapat dioperasikan, tetapi perlu pengawasan dan pemantauan berkala.
2. Nilai Indeks Polarisasi dibawah 1,25 mengindikasikan isolasi belitan peralatan tersebut dalam keadaan basah, kotor atau sudah ada yang bocor. Sehingga perlu dilakukan pembersihan, pengeringan dan refurbish apabila ditemukan kerusakan ada isolasinya.

¹ Perusahaan Listrik Negara, *Buku Pedoman O&M Trafo Tenaga* (Jakarta : PT. PLN (Persero), 2014), hlm.88.