

KERJA PEMBEBANAN DAN TEMPERATUR TERHADAP SUSUT UMUR TRANSFORMATOR TENAGA 150/20 kV 60 MVA

Juara Mangapul Tambunan¹⁾, Agung Hariyanto²⁾, Wahyu Kurniadi Tindra³⁾

Teknik Elektro, STT-PLN

¹juaramangapult_stmsi@yahoo.com

²agung_hariyanto@gmail.com

³wahyukt@gmail.com

Abstract : *In Indonesia have been in the design of a transformer with an environmental temperature of 200°C and operate around 300°C, so a working transformer must be adapted to the load. Shrink age transformer affected by isolation transformer oil and transformer entanglement. Excessive heat can damage the transformer coil insulation and temperature rise on oil can change the viscosity of the oil transformer. In the observations of work load and temperature on the Power Transformer lead shrink age and ability of the smaller the transformer supplying the load is also on the wane. The increase will raise the temperature of the load end of the hot-spot, which is approaching the maximum allowable value. From observations obtained temperature hot-spot only reached 107.18°C, then your age will increase the transformer of 1.3891 years. So according to the calculation, the transformer on a GI Kembangan can operate for 20.55 years according the IEEE when coupled with the age 1.3891 years, then the transformer will be 21.9391 year. To date, Transformers GI Kembangan has been operating for 13 years so the rest of the transformer is expected to become age 8.9391 years.*

Keywords: *Hot-Spot Temperature, Work Load, Loss of Life*

Abstrak : *Di Indonesia telah di desain suatu transformator dengan temperatur lingkungan 20°C dan beroperasi sekitar 30°C, jadi kerja transformator harus disesuaikan dengan pembebanan. Susut umur trafo dipengaruhi oleh isolasi belitan trafo dan minyak trafo. Panas yang berlebihan pada kumparan trafo dapat merusak isolasi dan naiknya temperatur pada minyak dapat mengubah viskositas dari minyak trafo. Dalam hasil pengamatan kerja pembebanan dan temperatur pada Transformator Tenaga yang menyebabkan susut umur transformator semakin kecil dan kemampuan mensuplai beban juga semakin berkurang. Kenaikan beban akan menaikkan suhu akhir hot-spot, yang mendekati nilai maksimum yang diijinkan. Dari pengamatan didapat suhu hot-spot hanya mencapai 107,18°C, maka umur trafo akan bertambah sebesar 1,3891 tahun. Jadi menurut perhitungan, trafo pada GI Kembangan dapat beroperasi selama 20,55 tahun sesuai standar IEEE bila ditambah dengan umur trafo 1,3891 tahun, maka akan menjadi 21,9391 tahun. Sampai saat ini, Trafo GI Kembangan telah beroperasi selama 13 tahun sehingga sisa umur trafo diperkirakan menjadi 8,9391 tahun.*

Kata Kunci : *Suhu Hot-Spot, Kerja Pembebanan, Kehilangan Umur.*

1. PENDAHULUAN

Fungsi dari transformator tenaga adalah menyalurkan daya listrik sekaligus mengubah tegangannya dari tegangan tinggi menjadi tegangan menengah ataupun sebaliknya. Pengurangan masa pakai transformator terjadi akibat proses kimia yang menyebabkan penuaan bahan isolasi karena pemanasan, sehingga

ketahanan isolasi transformator menurun. Penyusutan umur transformator dan kemudian dibandingkan dengan umur pengharapan transformator dengan pembebanan normal sesuai rekomendasi pabrik pembuatnya. Dari situ dapat diperhitungkan sisa umur transformator.

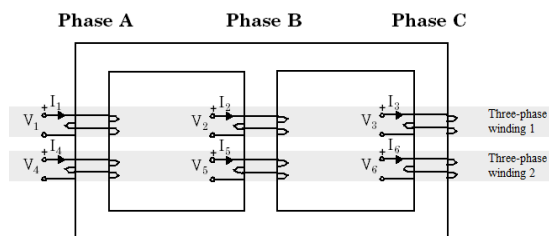
Tujuan dan manfaat penelitian ini, untuk mempelajari pengaruh suhu terhadap umur transformator daya dan untuk

mendapatkan analisis sejauh mana pengaruh kenaikan suhu transformator mengurangi masa pakai sebuah transformator, usia operasi dan kapasitas pembebanannya.

2. LANDASAN TEORI

Transformator adalah alat yang terdiri dari gandengan magnet untuk dapat memindahkan energi listrik arus bolak-balik dari suatu rangkaian ke rangkaian yang lain dengan prinsip kopel magnetik. Tegangan yang dihasilkan dapat lebih besar atau lebih kecil dengan frekuensi yang sama.

Transformator bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik diantara 2 kumparan, kumparan primer dan kumparan sekunder (gambar 2.1). Apabila ada arus listrik bolak-balik, yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet, dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan, maka pada kedua ujung belitan tersebut, akan terjadi beda tegangan mengelilingi magnet, maka akan timbul gaya gerak listrik (GGL).



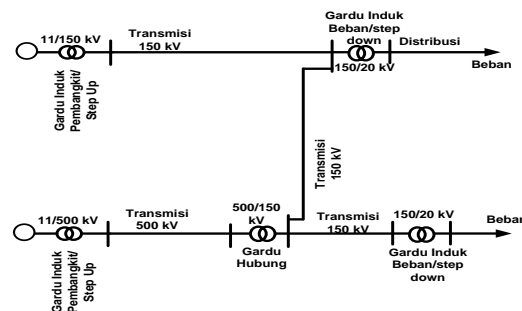
Gambar 2.1 Kumparan tranformator 3 Fasa

2.1 Macam-macam Transformator Dan Gardu Induk

Pada sisi pembangkit, tegangan yang dibangkitkan oleh generator yaitu tegangan rendah atau tegangan menengah, apabila pembangkit dengan kapasitas besar, agar rugi-rugi dan jatuh tegangan tidak besar maka tegangannya dinaikkan menjadi tegangan tinggi atau ekstra tinggi. Sedangkan saluran yang menyalurkan tenaga listrik dengan tegangan tinggi atau ekstra tinggi ke pusat beban yang jaraknya cukup jauh disebut transmisi. Sehubungan tegangan *output* generator tegangan menengah sedangkan sistem penyalurannya tegangan tinggi/ekstra tinggi maka dibutuhkan trafo

tenaga yang disebut trafo penaik tegangan (*step up*).

Sedangkan pada sisi konsumen, terutama konsumen tegangan menengah atau tegangan rendah, maka dibutuhkan trafo tenaga yang disebut trafo penurunan tegangan (*step down*). Trafo-trafo tenaga ini bersama dengan perlengkapannya disebut Gardu Induk (GI). Seperti yang ditunjukkan gambar 2.2 sistem penyaluran tenaga listrik dari pembangkit hingga distribusi.

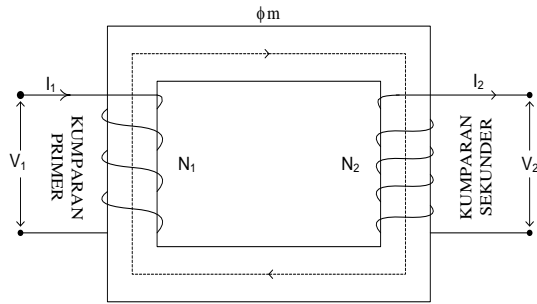


Gambar 2.2. Diagram kutub tunggal sistem tenaga listrik interkoneksi

Dilihat dari fungsinya trafo tenaga dibagi atas trafo penaik tegangan dan trafo penurunan tegangan, trafo penaik tegangan digunakan pada sisi pembangkit yang berfungsi untuk menaikkan tegangan dari tegangan menengah menjadi tegangan tinggi/ekstra tinggi, sedangkan trafo penurunan tegangan digunakan untuk menurunkan tegangan tinggi menjadi tegangan menengah. Sedangkan jika dilihat dari lokasinya jenis gardu induk dibagi atas : gardu induk pembangkit, gardu induk beban dan gardu induk hubung.

2.2 Prinsip Kerja Transformator

Tegangan yang dihasilkan dapat lebih besar atau lebih kecil dengan frekuensi yang sama. Transformator bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik diantara 2 kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kedua kumparan ini terpisah secara elektrik namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki jalur reluktansi rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks yang timbul adalah fluks bolak-balik dan akan mengalir melalui inti besi, untuk lebih jelasnya lihat gambar 2.3.



Gambar 2.3 Prinsip kerja Transformator

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

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \dots\dots\dots(2.2)$$

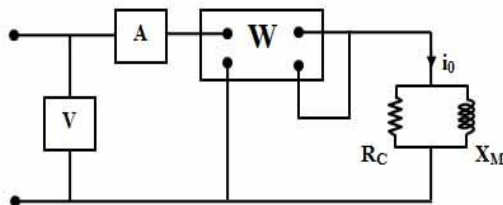
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \dots\dots\dots(2.3)$$

2.3. Menentukan Parameter

Parameter yang terdapat pada model rangkaian (rangkaiannya ekuivalen) R_c , X_m , R_{ek} , dan X_{ek} dapat ditentukan besarnya dengan dua macam pengukuran yaitu :

2.3.1. Pengukuran Beban Nol

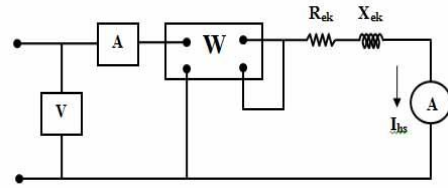
Dalam keadaan tanpa beban bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber (V_1), maka hanya (I_1) yang mengalir pada trafo, pasang watt meter, amperemeter dan volt meter seperti gambar 2.8 dari pengukuran



Gambar 2.4 Rangkaian percobaan beban nol

2.3.2. Pengukuran Hubung Singkat

Hubung singkat berarti impedansi Z_L diperkecil menjadi nol, sehingga impedansi $Z_{ek} = R_{ek} + jX_{ek}$ yang membatasi arus. Karena harga R_{ek} dan X_{ek} ini relatif kecil, harus dijaga tegangan yang masuk (V_{hs}) cukup kecil sehingga arus yang dihasilkan tidak melebihi arus normal. Harga I_1 akan relatif kecil jika dibandingkan dengan arus nominal, sehingga pada pengukuran ini dapat diabaikan.



Gambar 2.5 Rangkaian Percobaan Hubung Singkat

2.4. Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi Transformator

2.4.1. Rugi-Rugi Daya Pada Transformator

Rugi daya yaitu daya yang hilang pada trafo tenaga yang berubah menjadi panas. Pada trafo tenaga hanya ada dua macam rugi, yakni rugi besi dan rugi tembaga. Rugi inti adalah rugi inti, dan disebabkan oleh rugi histerisis (*hysteresis loss*) dan rugi arus eddy (*eddy current loss*). Sedangkan rugi tembaga adalah rugi daya yang ditimbulkan oleh I^2R baik yang terdapat pada sisi primer maupun sekunder.

2.4.2. Efisiensi Transformator

Efisiensi merupakan perbandingan antara daya yang keluar trafo (P_{out}) dan daya yang pada masuk trafo (P_{in}). Sehingga efisiensi dapat dirumuskan sebagai berikut :

I_1

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.4)$$

2.5. Sistem Pendinginan Pada Transformator

Pengaruh rugi-rugi besi dan tembaga akibat pembebanan pada transformator akan menimbulkan panas, bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebih maka dapat merusak isolasi lilitan. Untuk mengurangi panas tersebut, maka transformator perlu dilengkapi dengan alat pendingin untuk menyalurkan panas keluar dari transformator.

Media yang dipakai pada sistem pendingin dapat berupa udara, minyak dan air, sedangkan untuk sirkulasinya dapat dengan cara alamiah (*natural*) dan paksaan (*forced*). Pada cara alamiah dipakai sirip-sirip radiator tangki atau tangki bergelombang untuk memperluas bidang perpindahan panas minyak. Alat

pompa digunakan untuk mempercepat sirkulasi media pendingin sebagai perpindahan panas dari media pendingin ke udara luar lebih cepat berlangsung.

Secara umum metode pendinginan pada transformator dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- a). Transformator tipe kering
- b). Transformator terendam minyak

2.6. Isolasi Pada Transformator

Isolasi yang digunakan pada transformator secara umum dapat dibagi dua unsur, yaitu :

- a). Isolasi padat
- b). Isolasi cair

Isolasi sendiri merupakan suatu sifat bahan yang mampu untuk memisahkan dua buah penghantar atau lebih yang berdekatan baik secara elektrik dan juga untuk memperkecil arus bocor yang diakibatkan oleh korosif atau tekanan-tekanan yang terjadi baik pada saat pengoperasian, transportasi ke tempat pemasangan maupun pada saat pengujiannya.

Kegagalan transformator bekerja biasanya diakibatkan oleh kegagalan sistem isolasinya, sebagai akibat dari kegagalan sistem isolasi tersebut menyebabkan banyaknya efek panas yang terjadi dalam trafo. Ketahanan sistem isolasi pada peralatan listrik sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti suhu, kekuatan listrik dan mekanik, getaran, proses kimia dll. Suhu dalam peralatan listrik sering sekali mempengaruhi material isolasi oleh karena itu suhu kumparan maupaun suhu minyak tidak boleh melampaui nilai suhu standar yang telah dibuat, sehingga isolasi trafo tidak mudah rusak. Oleh karena itu dalam memilih trafo perlu untuk diketahui atau dipilih kelas isolasi yang sesuai dengan standar yang berlaku.

Tabel 2.1 Kelas isolasi dan suhu-suhu tertinggi

Kelas	Suhu kerja maksimum
Y	90° C
A	105° C
E	120° C
B	130° C
F	155° C
H	180° C
C	diatas 180° C

2.7. Pemeliharaan Transformator

Pada dasarnya tujuan dari pemeliharaan trafo adalah untuk menjaga operasi, meningkatkan keandalan, nilai ekonomis dan efisiensi trafo. Untuk itu, maka transformator harus memenuhi persyaratan teknis agar dapat memudahkan operator dan teknisi untuk kegiatan operasi ataupun pada saat perbaikan dan pemeliharaan dilaksanakan. Adapun pemeliharaan transformator bertujuan :

1. Menjaga agar transformator dapat selalu berfungsi dengan baik.
2. Mempertahankan kondisi dan umur trafo selama mungkin.
3. Menghindari terjadinya gangguan dan mengatasi gangguan sesingkat mungkin, karena itu perlu adanya perbaikan sebelum kerusakan menjadi lebih parah (*overhaul*) serta langkah-langkah untuk mengantisipasi.

2.8. Umur Transformator

Setiap peralatan yang beroperasi selalu mempunyai suatu batasan umur yaitu dimana peralatan itu tidak dapat beroperasi lagi. Demikian juga halnya dengan trafo tenaga. Pembebanan pada trafo tenaga menyebabkan terjadinya pemanasan yang akan mempengaruhi kemampuannya dalam melayani beban selanjutnya atau dapat menyebabkan kemungkinan terjadinya kegagalan atau kerusakan.

Proses ini biasanya disebut penuaan, hal ini akan menentukan umur dari trafo tenaga. Umur *thermal* harapan suatu trafo tenaga didefinisikan sebagai umur yang diharapkan dari suatu trafo tenaga untuk mengatasi adanya pemanasan akibat pembebanan, sampai terjadinya kegagalan dari trafo dalam menjalankan fungsinya.

Untuk memperkirakan umur trafo tenaga dapat dilakukan dengan mengevaluasi proses penuaan dari bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan trafo, seperti bahan isolasinya dan bahan lainnya, dalam mengujinya pada kondisi tertentu dan diamati sifat fisisnya seperti kekuatan tarikan, tegangan tembus dan lain-lain. Titik akhir umur didapatkan dengan menentukan batas dari besaran fisisnya yang menyatakan bahan itu

rusak. Misalnya, sisa kekuatan tarikan tinggal 20% dinyatakan sebagai batas umur.

3. METODE PENELITIAN

3.1. RANCANGAN PENELITIAN

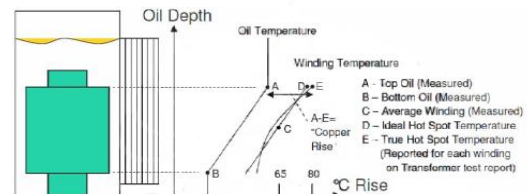
Dalam menganalisa kinerja dari kondisi suatu transformator, penulis mengukur kondisi temperature dan pembebanan dari transformator tenaga dengan merk Unindo berkapasitas 60 MVA bertegangan 150/20 kV. Data yang digunakan untuk menghitung dan menganalisa penyusutan umur transformator daya di GI Kembangan adalah data dari hasil pengukuran pembebanan yang dilakukan oleh pihak PT. PLN. Untuk pengambilan data dilakukan dengan metode :

- Observasi dilakukan dengan perhitungan dan analisa penyusutan umur akibat pemanasan karena pembebanan dan untuk mengetahui seberapa besar susut umur yang bisa dicapai, sisa umur harapan dan sisa umur operasi dari transformator GI Kembangan.
- Pengambilan data dengan studi literature, yaitu mengumpulkan data dari buku-buku referensi, dan modul praktek yang relevan dengan permasalahan.
- Dengan melakukan wawancara dengan pihak-pihak terkait.
- Data diambil dari arsip dan dokumen milik perusahaan.

Setelah data dikumpulkan, kemudian dilakukan pengolahan data serta perhitungan dan analisis.

Pertama-tama dilakukan dengan survey awal, yaitu dengan melakukan pemotretan transformator untuk mengetahui letak dan kondisi trafo di lapangan. Kemudian dengan mencatat data trafo serta mengambil data dari pembebanan dan temperature didalam suatu kubikel trafo. Selanjutnya dilakukan dengan pengambilan sampel pada minyak trafo yang akan dikaji. Setelah seluruh data sudah lengkap, maka dilakukan perhitungan dan analisa. Dan terakhir dilanjutkan dengan kesimpulan yang diambil sebagai hasil dari analisis data.

Pada gambar 3-1 diperlihatkan bahwa titik A merupakan posisi minyak bagian atas, titik B merupakan posisi minyak bagian bawah dan titik C merupakan rata-rata suhu dari lilitan. Suhu rata-rata pada lilitan adalah maksimal 65°C dan kenaikan suhu minyak bagian atas adalah 80°C. Sedangkan antara titik A-D merupakan kenaikan suhu antara minyak bagian atas dan suhu *hot-spot* dalam kondisi keadaan ideal, sedangkan antara titik A-E merupakan kenaikan suhu antara minyak bagian atas dan suhu *hot-spot* pada keadaan sebenarnya.



Gambar 3.1 Posisi titik pengukuran suhu pada transformator

3.2. Suhu *Hot-Spot*

Suhu *hot-spot* adalah suhu tertinggi pada kumparan transformator yang terletak antara kumparan dan inti besi yang tidak tercapai oleh minyak pada saat beban transformator tertinggi. Suhu *hot-spot* dipengaruhi oleh besar beban dan suhu lingkungan. Suhu lingkungan merupakan variabel dinamis yang mempengaruhi suhu *hot-spot* secara linear.

Berdasarkan model *IEEE Annex G*, nilai akhir suhu *hot-spot* dihitung berdasarkan rumus :

$$\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

dimana :

θ_H = suhu *hot-spot* (°C)

θ_A = suhu *ambient* (°C)

$\Delta\theta_{TO}$ = kenaikan suhu *top-oil* terhadap suhu *ambient*

$\Delta\theta_H$ = kenaikan suhu *hot-spot* terhadap suhu *top-oil*

3.3. Suhu Minyak Bagian Atas

Suhu minyak bagian atas (*top oil temperature*) adalah suhu yang ada pada bagian atas kumparan. Suhu minyak bagian atas pada keadaan beban penuh harus ditentukan oleh pabrik. Jika kekurangan data nilai suhu minyak bagian

atas maka nilainya harus diasumsikan, pada keadaan beban penuh, suhu *hot-pot* tertinggi untuk *gradient* suhu minyak bagian atas adalah 110°C, dimana ini adalah suhu minyak maksimum yang diizinkan untuk perkiraan masa operasional normal.

Persamaan untuk suhu minyak bagian atas (*top-oil temperature*) adalah :

$$\theta_{TO} = \theta_A + \Delta\theta_{TO} \dots\dots\dots(3.2)$$

θ_{TO} = suhu *top-oil* (°C)

θ_A = suhu *ambient* (°C)

$\Delta\theta_{TO}$ = kenaikan suhu *top-oil* terhadap Suhu *ambient* (°C)

Kenaikan suhu *top-oil* terhadap suhu *ambient* dapat dihitung dengan rumus :

$$\Delta\theta_{TO} = (\Delta\theta_{TO,U} - \Delta\theta_{TO,I}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau\theta_0}}\right) + \Delta\theta_{TO,I} \dots\dots\dots(3.3)$$

dimana :

$\Delta\theta_{TO}$ = kenaikan suhu *top-oil* terhadap suhu *ambient* (°C)

$\Delta\theta_{TO,U}$ = kenaikan suhu *top-oil* akhir terhadap suhu *ambient* untuk beban (°C)

$\Delta\theta_{TO,I}$ = kenaikan suhu *top-oil* awal terhadap suhu *ambient* (°C)

τ_{TO} = konstanta waktu minyak 210 menit (ONAN); 150 menit (ONAF)

Standar : IEC 60076-7

3.4. Kenaikan Suhu *Top-Oil* Akhir

Kenaikan suhu *top-oil* akhir dapat dihitung dengan rumus :

$$\Delta\theta_{TO,U} = \Delta\theta_{TO,R} \left[\frac{(K^2R)+1}{(R+1)} \right]^n \dots\dots\dots(3.4)$$

dimana :

$\Delta\theta_{TO,U}$ = kenaikan suhu *top-oil* Akhir terhadap suhu *ambient* untuk beban (°C)

$\Delta\theta_{TO,R}$ = Kenaikan temperatur *top oil* terhadap temperatur *ambient*

pada beban rating pada posisi tap yang akan dipelajari (°C)

K = faktor beban (daya semu beban/daya semu rating trafo)

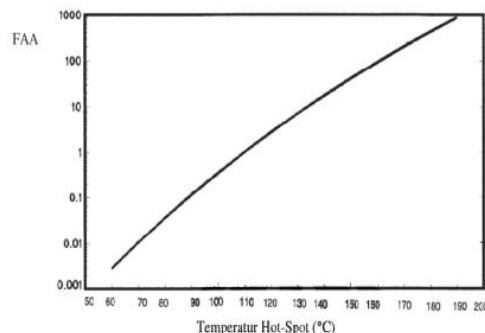
R = rasio rugi-rugi total dan rugi-rugi tanpa beban

n = konstanta eksponensial *top-oil*

3.5. Faktor Percepatan Penuaan

Kurva dari FAA (*Factor Aging Acceleration*) terhadap suhu hot-spot tertinggi untuk kenaikan suhu sistem isolasi 65°C seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2. FAA memiliki nilai yang lebih besar dari 1 untuk suhu hot-spot tertinggi lilitan yang lebih besar dari suhu referensi 110°C dan kurang dari 1 untuk suhu di bawah suhu 110 ° C. Persamaan untuk FAA adalah sebagai berikut:

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{15000}{383} \frac{15000}{\theta_H + 273} \right]} \dots\dots\dots(3.5)$$



Gambar 3.2 Kurva faktor percepatan penuaan masa guna (110°C)

3.5.1. Ekuivalen Faktor Penuaan

F_{EQA} (*equivalent aging factor*) yang merupakan efek akumulasi penuaan selama selang waktu tertentu dinyatakan dengan rumus :

$$F_{EQA} = \frac{\sum_{l=1}^L F_{AA_l} \Delta t_l}{\sum_{l=1}^L \Delta t_l} \dots\dots\dots(3.6)$$

dimana :

l = indeks dari interval waktu (t)

L = jumlah total interval waktu

Δt_l = interval waktu (jam)

3.5.2. Persentase Hilangnya Umur

Efek penuaan juga dapat dinyatakan dalam persentase kehilangan umur (*percentage loss of life*) sebagai berikut :

$$\% \text{kehilangan umur} = \frac{F_{EQA} \times t \times 100}{\text{umur isolasi normal}} \dots\dots\dots(3.7)$$

Keterangan : pada perhitungan umur isolasi yang normal (*normal insulation life*), IEEE menetapkan standar 180.000 jam atau 20,55 tahun.

3.6. Minyak Transformator

Fungsi dari minyak trafo adalah :

Insulator yaitu mengisolasi kumparan didalam trafo agar tidak terjadi loncatan bunga api listrik (hubung singkat) akibat tegangan tinggi.

Pendingin yaitu mengambil panas yang diakibatkan beban lalu melepaskannya.

Melindungi yaitu komponen-komponen didalam trafo terhadap korosi dan oksidasi. Untuk itu minyak trafo harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- Kekuatan isolasi harus tinggi (lebih dari 10 kV/mm).
- Dapat menyalurkan panas dengan baik, berat jenis kecil sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
- Viskositas yang rendah, agar lebih mudah bersirkulasi dan memiliki kemampuan pendingin yang lebih baik.
- Titik nyala yang tinggi (minimum 140°C), untuk mencegah terlalu banyak hilangnya minyak menjadi gas yang dapat menimbulkan bahaya kebakaran.
- Tidak bereaksi terhadap material lain sehingga tidak merusak material isolasi padat.

3.7. Batas Suhu dan Pembebanan

Tabel 3.1 Batas suhu dan pembebanan

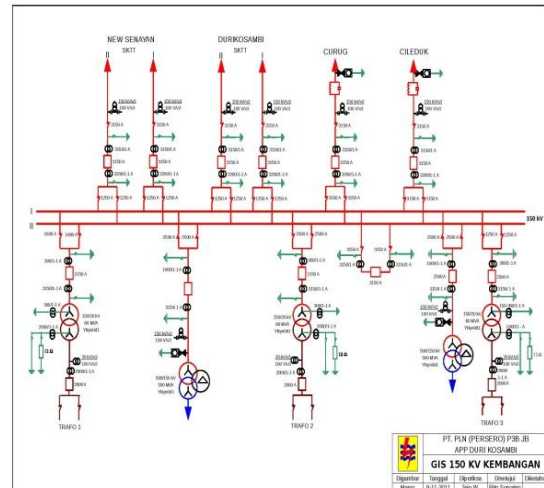
suhu minyak bagian atas	110 ⁰ C
suhu penghantar paling panas	180 ⁰ C
Pembebanan maksimum	200%

Sumber :IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformer

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Kajian Perhitungan Penyusutan Umur Transformator Tenaga

Data yang digunakan untuk menghitung dan mengkaji penyusutan umur transformator daya di GI Kembangan adalah data dari hasil pengukuran pembebanan yang dilakukan oleh pihak PT. PLN.



Gambar 4.1 Diagram kutub tunggal 150 kV GI Kembangan

4.2. Metode Perhitungan

Pembebanan suatu transformator tenaga dapat menyebabkan terjadinya penyusutan umur transformator tenaga yang disebabkan oleh penuaan isolasi karena pemanasan akibat pembebanan. Pada kenyataannya penyusutan umur transformator tenaga tidak hanya disebabkan oleh pembebanan saja, tapi banyak hal yang dapat mempengaruhi susut umur transformator tenaga. Beberapa faktor yang diduga dapat mempengaruhi susut umur transformator tenaga, antara lain :

- Hubung singkat internal
- Hubung singkat eksternal
- Kegagalan kerja proteksi
- Kelalaian operasi dan pemeliharaan
- Kesalahan operasi
- Gangguan petir

4.3.1. Analisa Perhitungan Pada Gardu Induk Kembangan Transformator 1

Data transformator

Data transformator tenaga yang dipakai yaitu data transformator tenaga dari PT. PLN (Persero) P3B Jawa-Bali APP Durikosambi area Gardu Induk Kembangan yang beralamat di Jl. Raya Kembangan Kp. Pasar Minggu Kembangan Selatan. Data Transformator tenaga yang telah dioperasikan dari tahun 2003 ini adalah sebagai berikut :

Merk : UNINDO

Daya Pengenal : 60 MVA
 Tegangan Pengenal : 150/20 kV
 Arus Pengenal : 230,9/1732 A
 Fasa : 3
 Rugi-rugi berbeban : 115 kW
 Rugi-rugi beban nol : 24,5 kW
 Rugi Total : 139,5 kW
 Imp. Hubung Singkat : 12,83%
 Pendingin : ONAN/ONAF
 Hub.KumparanTrafo : YNyn0(d1)
 Rasio CT : 2000/5
 Kenaikan Suhu : Minyak 50°C
 Kumparan : Minyak 53°C
 Kenaikan suhu : Minyak 55°C
 Frekuensi : 50 Hz

Berikut adalah tabel yang memperlihatkan data pembebanan transformator 1 pada bulan April 2016.

Tabel 4.1 Beban Tertinggi dan Suhu Transformator Bulan April 2016

Tanggal	Jam	Daya		Suhu (°C)	
		MW	MVAR	Top-Oil (θ _{TO,i})	Ambient (θ _A)
1	14.00	40	7	75	31
2	10.00	35	5	55	28
3	19.00	30	3	54	28
4	19.00	42	8	54	29
5	14.00	44	8	61	32
6	14.00	44	8	63	30
7	14.00	44	8	62	30
8	10.00	39	8	60	27
9	10.00	36	6	60	30
10	19.00	30	2	52	29
11	10.00	37	8	53	30
12	14.00	41	9	71	28
13	19.00	45	7	63	28
14	14.00	42	7	65	30
15	19.00	43	6	58	31
16	10.00	39	8	58	32
17	10.00	32	5	54	32
18	14.00	40	8	58	33
19	10.00	42	8	60	28
20	14.00	41	8	60	33
21	19.00	44	8	60	30
22	10.00	40	8	59	31
23	10.00	40	9	54	29
24	19.00	38	5	55	28
25	14.00	44	8	59	33
26	19.00	44	8	57	32
27	19.00	44	8	61	28
28	14.00	44	9	58	31
29	10.00	44	10	60	27
30	10.00	40	9	60	28

4.3.2. Perhitungan Data

Besarnya daya aktif dan daya reaktif transformator tenaga pada tanggal 1 April jam 14.00 adalah masing-masing 40 MW dan 17 MVAR sehingga besar daya semu S :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots(4.1)$$

$$S = \sqrt{40^2 + 7^2}$$

$$S = 40,61 \text{ MVA}$$

Faktor beban merupakan perbandingan antara daya semu (S) beban dan daya semu rating transformator (S_r) :

$$K = \frac{S}{S_r} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$K = \frac{40,61}{60}$$

$$K = 0.68 \text{ pu}$$

Perhitungan untuk mendapatkan kenaikan suhu *top-oil* akhir terhadap beban, dengan menggunakan persamaan, yaitu :

$$\Delta\theta_{TO,U} = \Delta\theta_{TO,R} \left[\frac{(K^2R+1)}{(R+1)} \right]^n \dots\dots\dots(4.3)$$

Harga n dapat dilihat pada perhitungan Rugi tanpa beban : 24,5 kW dari name Plate transformator. Rugi total : 139,5 kW dari *nameplate* transformator.

Δθ_{TO,R} : dari nameplate transformator
 R = rasio rugi-rugi total dan rugi-rugi tanpa beban

$$R = \frac{139,5 \text{ kW}}{24,5 \text{ kW}} = 5,6938$$

$$\Delta\theta_{TO,U} = 55 \left[\frac{(0,68^2 \cdot 5,6938 + 1)}{(5,6938 + 1)} \right]^1 \dots\dots\dots(4.4)$$

$$\Delta\theta_{TO,U} = 29,65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Perhitungan kenaikan suhu *top-oil*

$$\Delta\theta_{TO} = (\Delta\theta_{TO,u} + \theta_A - \Delta\theta_{TO,i}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{TO}}} \right) + \Delta\theta_{TO,i} \dots\dots\dots(4.5)$$

$$\Delta\theta_{TO} = 68,02$$

Perhitungan kenaikan suhu *hot-spot* dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\Delta\theta_H = H \cdot g \cdot K^{2M} \dots\dots\dots(4.6)$$

$$g = 46,7 - 33 = 13,7$$

$$\Delta\theta_H = 1,3 \cdot 13,7 \cdot 0,68^{2,1}$$

$$\Delta\theta_H = 8,16 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Perhitungan untuk mendapatkan suhu akhir *hot-spot* dengan persamaan :

$$\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H \dots\dots\dots(4.8)$$

$$\theta_H = 31 + 68,02 + 8,16$$

$$\theta_H = 107,18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Perhitungan untuk mendapatkan faktor penuaan dengan menggunakan persamaan (3.6)

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{15000}{383} \frac{15000}{\theta_H + 273} \right]} \dots\dots\dots(4.9)$$

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{15000}{383} \frac{15000}{107,18+273} \right]}$$

$$F_{AA} = 0,7478$$

Dengan cara perhitungan yang sama untuk setiap pembebanan. Perhitungan ekivalen faktor penuaan dengan persamaan dibawah didapat :

$$F_{EQA} = \frac{\sum_{l=1}^L F_{AA_l} \Delta t_l}{\sum_{l=1}^L \Delta t_l} \dots\dots\dots(4.10)$$

$$F_{EQA} = \frac{10,0623}{720}$$

$$F_{EQA} = 0,0139$$

Perhitungan persentase kehilangan umur dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\%kehilangan\ umur = \frac{F_{EQA} \times t \times 100}{umur\ isolasi\ normal} \dots\dots\dots(4.11)$$

$$\%kehilangan\ umur = \frac{0,0139 \times 720 \times 100}{180000} =$$

$$0,00556$$

Pada transformator di Gardu Induk Kembangan, apabila kita lihat dari hasil perhitungan persen hilangnya umur transformator yaitu sebesar 0,00556%. Jika dihitung dalam waktu satu tahun dengan cara yang sama maka:

$$\%kehilangan\ umur = \frac{0,0139 \times 8760 \times 100}{180000} =$$

$$0,0676$$

Maka berdasarkan *IEEE Guide for loading mineral-oil immersed Transformer* umur isolasi transformator adalah sebesar 180.000 jam atau 20,55 tahun, maka umur transformator akan berkurang sebesar :
20,55 X 0,0676 = 1,3891 tahun.

4.4. Analisa Perhitungan

Pada transformator tenaga di GI Kembangan, susut umur transformator sebesar 0,0676%, suhu rata-rata hot-spot cukup tinggi pada bulan April 2016, yakni 97,94°C, jika diasumsikan pembebanan terus terjadi seperti ini maka transformator 1 akan mengalami susut umur 1,3891 tahun. Karena pembebanan transformator pada suhu *hot-spot* hanya mencapai

107.18°C, maka umur transformator akan bertambah sebesar 1,3891 tahun.

Transformator tenaga di GI Kembangan bisa beroperasi selama 20,55 tahun (standar IEEE) + 1,3891 tahun (penambahan umur) = 21,9391 tahun. Karena trafo sudah beroperasi selama 13 tahun maka sisa umur trafo menjadi 21,9391 tahun – 13 tahun = 8,9391 tahun.

5. KESIMPULAN

1. Nilai suhu akhir hot-spot Transformator Tenaga semakin besar, maka umur Trafo semakin kecil dan kemampuan mensuplai beban juga berkurang. Apabila beban Trafo mengalami kenaikan, maka akan menaikkan suhu akhir hot-spot dengan mendekati nilai maksimum yang diijinkan.
2. Pembebanan Transformator pada suhu hot-spot hanya mencapai 107,18^o C, maka umur transformator akan makin bertambah sebesar 1,3891 tahun.
3. Transformator tenaga di GI Kembangan bisa beroperasi selama 20,55 tahun (standar IEEE) + 1,3891 tahun (penambahan umur) = 21,9391 tahun, karena trafo sudah beroperasi selama 13 tahun, maka sisa umur trafo menjadi 21,9391 tahun – 13 tahun = .8,9391 tahun.

6. REFERENSI

1. IEEE Std C57.91. (1995). *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers*.
2. Kadir, Abdul. Transformator edisi ketiga. (2010). Jakarta: UI-Press
3. Engineers, Central Station: *Electrical Transmission and Distribution*. (1950)
4. SPLN 17:(1979). *Pedoman Pembebanan. Transformator Terendam Minyak*.
5. H. Harlow James: *Electric Power Transformer Engineering Second Edition*. (2007)