

Analisis Pengaruh Suhu Akibat Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Daya Di Gardu Induk Lambaro

Muhammad Aidil Muzar^{#1}, Syahrizal^{#2}, Mahdi Syukri^{#3}

[#] Jurusan Teknik Elektro dan Komputer, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No.7 Darussalam, Banda Aceh 23111, Indonesia

¹aidil.muzar@gmail.com

²syahrizal.ee@unsyiah.ac.id

³mahdisyukri@yahoo.co.id

Abstrak— Temperatur *Hot Spot* pada sebuah transformator dapat dipengaruhi oleh besarnya beban serta temperatur lingkungan. Perlu dianalisis nilai temperatur *Hot Spot* pada sebuah transformator berdasarkan standar PLN yang diterapkan yaitu maksimal 98°C. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai temperatur *Hot Spot* transformator daya di Gardu Induk Lambaro kemudian membandingkan dengan nilai yang telah ditargetkan PLN serta mendapatkan besar susut umur dari transformator dengan menggunakan metode IEC354 tahun 1972. Hasil penelitian menunjukkan bahwa temperatur *Hot Spot* transformator tersebut masih berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan yaitu pada saat ONAN yaitu 92,74°C. Sedangkan saat ONAF yaitu 66,63°C. Besar susut umur transformator ONAN/ONAF yaitu sebesar 0,10 jam/hari atau 35,53 jam/tahun. Sisa umur transformator ONAN/ONAF yaitu 13,92 tahun.

Kata Kunci— Transformator, Temperatur Lingkungan, Susut Umur.

I. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi yang kian pesat menjadikan listrik berperan penting di dalam kehidupan masyarakat, maka pendistribusian energi listrik yang handal begitu dibutuhkan untuk mentransfer beban-beban yang ada. Tenaga listrik yang dihasilkan pembangkit listrik dinaikan tegangannya oleh gardu induk menggunakan transformator *Step Up* kemudian dialirkan melalui jaringan transmisi. Dari jaringan transmisi tegangan diturunkan lagi menggunakan transformator *Step Down* di gardu induk.

Transformator daya di gardu induk merupakan komponen utama dalam sistem pendistribusian energi listrik. Transformator begitu penting di dalam pendistribusian energi listrik maka dibutuhkan perhatian khusus pada transformator terutama dalam hal pembebanannya yang akan berpengaruh kepada susut umur transformator tersebut. Isolasi belitan transformator serta minyak transformator dapat mempengaruhi susut umur transformator [1].

Penuaan isolasi ini begitu cepat bilamana isolasi tersebut beroperasi dalam suhu yang melampaui dari batas yang diizinkan (dalam hal ini adalah *Hot Spot*). Menurut standar IEC354, sebuah transformator akan mengalami umur yang

normal pada kondisi suhu *Hot Spot* 98°C pada pembebanan yang terus-menerus. Apabila transformator tersebut mengalami suhu *Hot Spot* yang melampaui dari 98°C, maka susut umurnya akan begitu cepat sehingga dapat mengurangi umur transformator yang diharapkan [2].

Faktor pembebanan pada transformator ini mempengaruhi temperatur minyaknya, semakin besar bebannya maka semakin tinggi temperaturnya, semakin rendah bebannya maka semakin rendah temperaturnya. Kerusakan isolasi dari minyak transformator disebabkan oleh pergantian suhu akibat beban atau suhu *Ambien* (suhu lingkungan) pada transformator daya tersebut. Pemanasan pada belitan transformator menyebabkan isolasi mengalami kerusakan dan kenaikan temperatur minyak akan mengganti komposisi serta sifat minyak transformator. Apabila perubahan ini dibiarkan maka akan menyebabkan nilai isolasi dari minyak menurun.

Mengingat kerja keras dari suatu transformator maka diusahakan agar peralatan ini berusia panjang dan dapat lebih lama dipergunakan, maka transformator harus dipelihara dengan menggunakan sistem pembebanan serta peralatan yang benar, baik dan tepat.

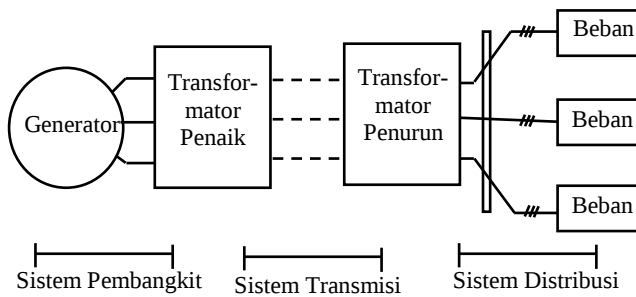
Oleh karena itu, penulis melaksanakan penelitian pengaruh pembebanan transformator daya dan pengaruh suhu lingkungan terhadap susut umur ditinjau dari penurunan isolasi belitan transformator serta menganalisis susut umur transformator daya dengan acuan standar *International Electrotechnical Commission* (IEC) 354 tahun 1972 [3].

II. DASAR TEORI

A. Sistem Tenaga Listrik

Sistem Tenaga Listrik merupakan sistem penyediaan energi listrik yang terdiri dari pusat listrik terhubung satu dengan lainnya oleh jaringan transmisi sampai ke distribusi.

Struktur penyaluran sistem tenaga listrik cukup besar dan kompleks karena terdiri dari beberapa komponen seperti generator, transformator, alat-alat pengaman dan beban serta pengaturan yang saling berkaitan.



Gambar 1 Sistem tenaga listrik [4]

Secara umum terdapat tiga bagian utama dari struktur sistem tenaga listrik seperti yang terlihat pada gambar 1, Pertama yaitu pusat pembangkit tenaga listrik (*power station*) dimana energi listrik dihasilkan, biasanya pembangkit terletak jauh dari pusat beban. Selanjutnya adalah sistem transmisi yaitu setelah energi listrik dibangkitkan, energi tersebut dinaikkan tegangannya lalu disalurkan melalui jaringan transmisi menuju gardu induk (GI). Kemudian sistem distribusi yaitu sebelum sampai pada gardu induk (GI), tegangan yang telah dinaikkan sebelumnya diturunkan agar energi listrik dapat disalurkan kepada pelanggan [4].

B. Transformator

Transformator merupakan suatu peralatan mesin listrik statis yang beroperasi dengan induksi elektromagnetik. Transformator berfungsi untuk menyuplai energi dari satu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya [5]. Adapun pada inti ferromagnetik terdapat lilitan sekunder dan primer. Tipe inti dan cangkang merupakan dua jenis konstruksi dari transformator [6]. Berikut dapat dilihat bentuk fisik dari transformator pada Gambar 2.



Gambar 2 Transformator

Terdapat dua jenis transformator berdasarkan sistem penyaluran tenaga listrik. Pertama yaitu transformator *Step Up* dimana transformator yang mempunyai lilitan sekunder lebih banyak dari primer yang berfungsi untuk menaikkan tegangan pada proses penyaluran daya. Selanjutnya transformator *Step Down* dimana transformator yang

mempunyai lilitan sekunder lebih sedikit dari primer yang berfungsi untuk menurunkan tegangan pada proses penerimaan daya [1].

C. Prinsip Kerja Transformator

Pada transformator terdapat kumparan primer dan sekunder. Kumparan primer ini apabila dihubungkan pada sumber tegangan yang bolak-balik, maka fluks bolak-balik ini akan muncul di dalam inti (*core*) dan membentuk jaringan tertutup (*close loop*), maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks pada kumparan primer, maka dikumparan primer terjadi induksi (*self induction*). Selain itu, juga terdapat induksi dikumparan sekunder karena pengaruh kumparan primer (*mutual induction*) sehingga menyebabkan munculnya fluks magnet pada kumparan sekunder. Jika rangkaian sekunder dibebani energi listrik dapat disalurkan secara menyeluruh (magnetisasi) [7].

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \text{ (Volt)} \quad (1)$$

Keterangan :

e = Gaya gerak listrik (Volt)

N = Jumlah lilitan

$\frac{d\Phi}{dt}$ = Perubahan Fluks Magnetik (Weber/detik)

D. Umur Transformator

Dalam pengoperasian transformator terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi umur transformator diantaranya adalah kualitas minyak, suhu minyak, pola pembebanan, pengaruh suhu sekitar, kualitas bahan, kualitas minyak, cuaca, kadar oksigen dan kelembapan udara. Oleh karena itu, dilakukan pemeliharaan transformator agar umur transformator berusia panjang. Pemeliharaannya seperti pengujian minyak secara berkala, melakukan manajemen secara rutin dan pemasangan transformator sesuai dengan standar konstruksinya [8].

Kenaikan suhu terhadap pembebanan yang berlebih pada transformator akan menimbulkan efek panas. Setiap kenaikan suhu pada batas yang diizinkan sebesar 6°C mengakibatkan umur transformator mengalami penuaan. Di Indonesia berdasarkan SPLN diatur suatu transformator hanya bisa bekerja pada suhu sekitar tidak melebihi 40°C dengan suhu rata-rata harian dan tahunan sekitar 30°C. Berdasarkan IEC (*International Electrotechnical Commission*) menetapkan bahwa umur transformator hanya berkisar 20 tahun [9].

E. Sistem Pendinginan Transformator

Sistem pendinginan pada transformator berfungsi untuk menjaga kondisi transformator tidak terlalu panas saat memikul beban. Media yang digunakan pada sistem pendinginan transformator berupa udara/gas, minyak dan air merupakan media yang digunakan pada sistem pendinginan. Pengalirannya (sirkulasi) dapat menggunakan dua metode yaitu: secara alamiah (*natural*) dan paksaan (*forced*). Pada metode alamiah (*natural*) transformator dilengkapi dengan

sirip-sirip (radiator) yang bertujuan untuk mempercepat perpindahan panas ke luar. Bila ingin mempercepat lagi perpindahan panas yaitu dengan memakai pompa-pompa sirkulasi minyak, udara dan air. Metode ini disebut dengan paksaan (*forced*). Jenis-jenis sistem pendingin transformator berdasarkan media dan metode pengalirannya seperti pada Tabel I [9]:

TABEL I
MACAM-MACAM SISTEM PENDINGIN

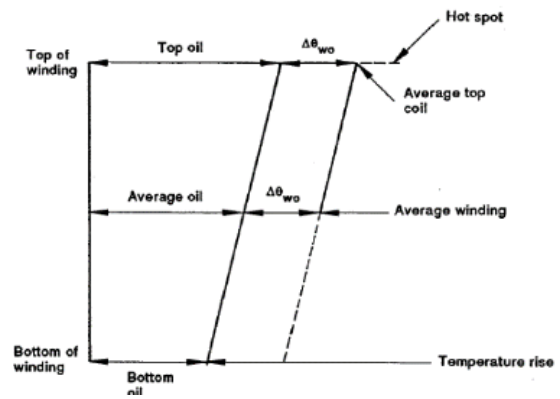
No	Macam Sistem Pendingin	Media			
		Dalam Transformator		Di luar Transformator	
		Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa
1	ONAN	Minyak	-	Udara	-
2	ONAF	Minyak	-	-	Udara
3	OFAN	-	Minyak	Udara	-
4	OFAF	-	Minyak	-	Udara
5	OFWF	-	Minyak	-	Air
6	AN	-	-	Udara	-
7	AF	-	-	-	Udara
8	ONAN/OFAF	Penggabungan 1 dan 4			
9	ONAN/OFWF	Penggabungan 1 dan 5			
10	ONAN/ONAF	Penggabungan 1 dan 2			
11	ONAN/OFAN	Penggabungan 1 dan 3			

F. ONAN/ONAF Cooling Method

Sebuah transformator yang didinginkan secara alami (ONAN) adalah jenis pendingin transformator yang dapat diandalkan dan tidak bersuara. Transformator yang didinginkan secara paksa (ONAF) memang lebih efisien akan tetapi memiliki tingkat kebisingan yang lebih tinggi dan kurang dapat diandalkan karena kemungkinan terjadinya kerusakan kipas. Jenis pendingin ini dapat ditentukan dengan memenuhi satu keadaan atau lebih. Pertama jika pembebanan di bawah 60% dari daya pengenal maksimum maka jenis pendinginnya adalah ONAN, sedangkan pembebanan di atas 60% dari daya pengenal maksimum maka jenis pendinginnya adalah ONAF. Selanjutnya jika temperatur *Top Oil* kurang dari atau sama dengan 50°C maka jenis pendinginnya adalah ONAN, sedangkan temperatur *Top Oil* di atas 50°C maka jenis pendinginnya adalah ONAF [10].

G. Diagram Thermal Transformator

Besarnya pembebanan yang diberikan terhadap transformator menentukan kenaikan suhu transformator tersebut. Dalam menentukan besarnya kenaikan suhu transformator diasumsikan sebuah diagram *Thermal* yang sederhana seperti pada Gambar 3.



Gambar 3 Diagram Thermal [11]

Diagram *Thermal* pada Gambar 3 menjelaskan tentang kenaikan temperatur minyak di dalam transformator. Minyak di dalam transformator itu sebenarnya tidak merata dari bawah sampai ke atas. Temperatur pada bagian bawah biasanya lebih rendah dari bagian atas. Temperatur minyak ini pelan-pelan akan bertambah secara linier dari bawah ke atas dan akan bertambah sesuai dengan perubahan suhu di kumparan, apapun jenis pendingin transformator tersebut. Temperatur kumparan juga akan bertambah secara linier dari bawah ke atas sesuai dengan bertambahnya kenaikan temperatur minyak. Perbedaan temperatur antara minyak pada puncak kumparan dengan minyak yang berada di dasar kumparan adalah sama untuk semua bagian kumparan. Sebagai indikator pertama, kenaikan temperatur dari tembaga pada posisi di atas kumparan meningkat secara linier sejalan dengan kenaikan temperatur minyak yang mempunyai selisih konstan $\Delta\theta_{wo}$ antara dua garis lurus. Kenaikan temperatur rata-rata puncak kumparan adalah kenaikan temperatur rata-rata minyak ditambah $\Delta\theta_{wo}$. Bila dibandingkan dengan kenaikan temperatur rata-rata puncak kumparan, kenaikan temperatur *Hot Spot* masih lebih tinggi. Perbedaan antara kedua kenaikan temperatur ini dapat dihitung dengan $\Delta\theta_{wo}$. Sehingga kenaikan temperatur *Top Oil* ditambah $1.2 \Delta\theta_{wo}$ [2].

Adapun kondisi dengan beban stabil, beban yang berubah-ubah dan juga kondisi nilai daya tertentu merupakan pengaruh pembebanan dan suhu pada transformator daya.

1) *Pembebanan transformator* : Dalam menjaga stabilitas sistem tenaga listrik, kualitas daya merupakan bagian yang terpenting. Untuk menjaga stabilitas tersebut perlu diperhatikan pembebanan pada transformator daya. Maka ratio pembebanan dapat ditentukan sebagai berikut [1] :

$$K = \frac{S}{S_r} \quad (2)$$

Keterangan :

K : ratio pembebanan
S : beban transformator (MVA)
Sr : kapasitas transformator (MVA)

2) Sirkulasi minyak alami :

Kenaikan temperatur rata-rata kumparan = 55°C

Kenaikan temperatur *Top Oil* ($\Delta\theta_{br}$) = 50°C

Kenaikan temperatur rata-rata minyak = 40°C

Perbedaan antara kenaikan rata-rata temperatur minyak dan kenaikan temperatur rata-rata kumparan $\Delta\theta_{wo}$ = 15°C

Berikut kenaikan temperatur *Hot Spot* ($\Delta\theta_{cr}$) [1]:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{cr} &= \Delta\theta_{br} + 1,2 \Delta\theta_{wo} \\ &= 50 + 18 \\ &= 68^\circ\text{C}\end{aligned}\quad (3)$$

3) *Temperatur Hot Spot* : Temperatur *Hot Spot* (θ_c) merupakan sebuah parameter temperatur yang digunakan untuk menentukan kemampuan *Thermal* pada transformator. Dimana temperatur ini merupakan batas kenaikan temperatur yang diizinkan pada transformator yang juga digunakan untuk menentukan umur isolasi yang digunakan transformator. Standar IEC354, menetapkan bahwa temperatur *Hot Spot* yaitu sebesar 98°C. Pada umumnya lokasi *Hot Spot* terdapat pada inti dan kumparan transformator. Hal ini disebabkan karena pada daerah tersebut terdapat *Eddy Current Losses* (rugi-rugi arus eddy) yang tinggi karena fluks bocor senantiasa berputar secara radial di ujung kumparan. Temperatur *Hot Spot* ini juga dipengaruhi oleh suhu temperatur sekitar, kenaikan suhu rata-rata kumparan dan kenaikan suhu minyak [12]. Penyebab terjadinya temperatur *Hot Spot* yaitu *Partial Discharge*, harmonisa karena beban-beban yang tidak linier dan hubung singkat antar belitan atau dengan inti besi [13].

Untuk menentukan temperatur *Hot Spot* dapat digunakan persamaan berikut [14]:

$$\theta_c = \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{td} \quad (4)$$

Keterangan :

θ_c : temperatur *Hot Spot* (°C)
 θ_a : temperatur lingkungan (°C)
 $\Delta\theta_{on}$: kenaikan temperatur *Top Oil* (°C)
 $\Delta\theta_{td}$: selisih antara *Hot Spot* dengan *Top Oil* (°C)

Sedangkan untuk mengetahui selisih temperatur antara *Hot Spot* dengan *Top Oil* dapat digunakan persamaan berikut [15]:

$$\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br})K^{2y} \quad (5)$$

Keterangan :

$\Delta\theta_{cr}$: kenaikan temperatur *Hot Spot* : 68°C

$\Delta\theta_{br}$: kenaikan temperatur *Top Oil* : 50°C untuk ON

K : ratio pembebanan

y : 0,8 untuk ON

4) *Kenaikan temperatur Top Oil kondisi untuk beban stabil* : Kenaikan temperatur ini sebanding dengan kenaikan temperatur *Top Oil* pada nilai daya yang dikalikan ratio dari jumlah kerugian berdasarkan eksponen x [15]:

$$\Delta\theta_b = \Delta\theta_{br} \left(\frac{1+dK^2}{1+d} \right)^x \quad (6)$$

Keterangan :

K : ratio pembebanan

d : perbandingan rugi

: $\frac{\text{Rugi Tembaga Pada Daya Pengenal}}{\text{Rugi Beban Nol}}$

x : konstanta

x : 0.9 (ONAN dan ONAF)

$\Delta\theta_{br}$: kenaikan temperatur minyak (puncak)

$\Delta\theta_{br}$: 50°C untuk ON

5) *Kenaikan temperatur Top Oil kondisi untuk beban berubah-ubah* : Kenaikan temperatur *Top Oil* $\Delta\theta_{on}$ adalah sangat mendekati dengan kenaikan eksponensial pada waktu t setelah pemberian beban sebagai berikut [15]:

$$\Delta\theta_{on} = \Delta\theta_{o(n-1)} + (\Delta\theta_b - \Delta\theta_{o(n-1)}) (1 - e^{-t/\tau}) \quad (8)$$

Keterangan :

$\Delta\theta_{o(n-1)}$: kenaikan temperatur awal minyak.

$\Delta\theta_b$: kenaikan temperatur akhir minyak yang distabilkan

τ : 3 (ONAN dan ONAF)

t : lama pengamatan (Jam)

τ : konstanta waktu minyak dalam jam

6) *Kenaikan temperatur Hot Spot kondisi untuk beban stabil* : Kenaikan temperatur *Hot Spot* $\Delta\theta_c$ untuk beban yang stabil dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [2]:

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_b + (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) K^{2y} \quad (9)$$

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_{br} \left(\frac{1+dK^2}{1+d} \right)^x + (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) K^{2y} \quad (10)$$

Keterangan :

$\Delta\theta_{cr}$: 68°C

y : konstanta

y : 0.8 (ONAN dan ONAF)

$\Delta\theta_{br}$: 50°C Untuk ON

7) *Kenaikan temperatur Hot Spot kondisi untuk beban berubah-ubah* : Kenaikan temperatur *Hot Spot* sebelum

kondisi stabil adalah mendekati perkiraan dengan asumsi bahwa kenaikan temperatur *Hot Spot* di atas adalah kenaikan temperatur *Top Oil* yang terbentuk dengan seketika. Kenaikan temperatur *Hot Spot* di waktu tertentu [1]:

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_b + (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) K^{2y} \quad (11)$$

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_{br} \left(\frac{1+dK^2}{1+d} \right) + (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) K^{2y} \quad (12)$$

Keterangan :

$\Delta\theta_{cr}$: 68°C
y : konstanta
y : 0.8 (ONAN dan ONAF)
 $\Delta\theta_{br}$: 50°C Untuk ON

8) *Laju penuaan Thermal relatif* : Hubungan *Montsinger* sekarang telah digunakan untuk mendapatkan nilai relatif dari umur pemakaian pada temperatur θ_c , dibandingkan dengan nilai normal dari umur pemakaian pada temperatur θ_{cr} [2].

$$X = \frac{\text{Laju penggunaan umur saat } \theta_c}{\text{Laju penggunaan umur saat } \theta_{cr}} = 2^{(\theta_c - \theta_{cr})/6} \quad (13)$$

Persamaan 13 dapat disederhanakan dengan memberikan log10 sebagai faktor pengali maka persamaan akan menjadi [3]:

$$X = 10^{(\theta_c - \theta_{cr})/19.93} \quad (14)$$

Keterangan :

X : laju penuaan *Thermal* relatif (Jam)
 θ_{cr} : kenaikan temperatur *Hot Spot* (98°C)
 θ_c : temperatur *Hot Spot* (°C)

9) *Susut umur transformator* : Pada saat transformator memikul beban, semakin besar beban yang dipikul transformator semakin besar pula susut umurnya, demikian juga sebaliknya semakin kecil beban yang dipikul transformator maka semakin kecil pula susut umur pada transformator tersebut. Hal ini berkaitan dengan kenaikan temperatur pada inti transformator dan belitan kawat. Dimana kenaikan beban berbanding lurus dengan kenaikan temperatur inti transformator dan belitan kawat. Besar susut umur pada transformator karena pengaruh isolasi belitan saja tanpa memperhitungkan pengaruh yang lain dapat ditentukan sebagai berikut [16]:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n \quad (15)$$

Keterangan :

L : susut umur (Jam)
 X_n : laju penuaan *Thermal* relatif pada jam ke-n dikalikan dengan waktu operasional transformator

III. METODE PENELITIAN

A. Variabel Data yang Digunakan

Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan nilai susut umur transformator daya Gardu Induk Lambaro. Perhitungan dilakukan dengan cara menginput data pada *Software Microsoft Excel*. Data mengenai pembebanan transformator diperoleh dari Gardu Induk Lambaro yaitu data pembebanan harian bulan November 2017 pada transformator daya, sedangkan suhu sekitar/suhu lingkungan transformator daya diperoleh dari BMKG. Data-data tersebut digunakan untuk dapat menganalisis pengaruh suhu akibat pembebanan terhadap susut umur transformator daya di Gardu Induk Lambaro.

B. Proses Perhitungan Susut Umur

Untuk melakukan perhitungan susut umur transformator menggunakan standar IEC354 terdapat beberapa tahap, yaitu: menghitung ratio pembebanan dan perbandingan rugi yang kemudian digunakan untuk menghitung kenaikan temperatur stabil *Top Oil* serta kenaikan temperatur *Top Oil*. Dari persamaan ratio pembebanan yang diperoleh selanjutnya dilakukan perhitungan untuk menentukan selisih temperatur antara *Hot Spot* dengan *Top Oil*. Kemudian dari persamaan kenaikan temperatur *Top Oil* dan selisih temperatur antara *Hot Spot* dengan *Top Oil* yang diperoleh dilakukan perhitungan temperatur *Hot Spot* dengan menggunakan data temperatur lingkungan wilayah lambaro pada bulan yang sama diperoleh dari BMKG Blang Bintang. Selanjutnya berdasarkan hasil persamaan perhitungan temperatur *Hot Spot* maka laju penuaan *Thermal* relatif dapat dihitung dengan menggunakan metode IEC354 yang kemudian hasilnya digunakan untuk menghitung pengurangan umur transformator daya. Setelah dilakukannya tahapan perhitungan tersebut, maka didapatkan susut umur dan sisa umur dari transformator yang digunakan pada Gardu Induk Lambaro yang berkapasitas 60 MVA dan membandingkan hasil dari metode tersebut dengan standar yang ditetapkan oleh PT.PLN (Persero).

C. Analisis Perhitungan Transformator Beban Konstan

Untuk mendapatkan pengaruh dari berbagai pembebanan terhadap transformator daya maka besarnya beban dibuat konstan menjadi 80%, 90% dan 100%. Berdasarkan data dan menggunakan persamaan 1-15 maka dapat dihitung nilai susut umur pada beban konstan seperti pada Tabel II:

TABEL II
HASIL PERHITUNGAN TRANSFORMATOR BEBAN KONSTAN

No	Beban (%)	K	$\Delta\theta_b$ (°C)	θ_c (°C)	X (jam)	L (jam/hari)
1	100	1	50	102,60	1,70	1,70
2	90	0,9	42,65	92,46	0,53	0,53
3	80	0,8	35,95	83,14	0,18	0,18

D. Analisis Real dengan Data yang Ada

Berdasarkan data pembebanan transformator daya dan menggunakan persamaan 1-15 maka dapat dihitung nilai susut umur dengan data yang ada seperti pada Tabel III:

TABEL III
HASIL PERHITUNGAN TRANSFORMATOR BEBAN YANG ADA

K	$\Delta\theta_b$ (°C)	θ_c (°C)	X (jam)	L (jam/hari)	N (tahun)
0,70	30,79	68,59	0,03	0,10	13,92
0,74	33,03	71,80	0,05		
0,76	34,29	73,58	0,06		
0,78	35,24	74,94	0,07		
0,78	35,24	74,94	0,07		
0,79	35,77	75,69	0,08		
0,79	35,78	75,71	0,08		
0,80	36,66	76,96	0,09		
0,83	38,66	79,78	0,12		
0,85	39,66	81,19	0,14		
0,92	44,33	87,76	0,31		
0,97	47,55	92,27	0,52		
0,97	47,88	92,74	0,54		
0,60	24,63	60,30	0,01		
0,60	24,73	60,44	0,01		
0,61	24,94	60,74	0,01		
0,61	25,02	60,85	0,01		
0,62	25,52	61,56	0,01		
0,62	25,62	61,71	0,02		
0,63	26,35	62,75	0,02		
0,64	26,79	63,37	0,02		
0,65	26,97	63,62	0,02		
0,65	27,19	63,94	0,02		
0,69	29,09	66,63	0,03		

E. Analisis Optimum

Untuk pembebanan 100% dan 90% dengan menggunakan persamaan 4, maka dapat dihitung pada temperatur maksimal berapa agar menghasilkan temperatur *Hot Spot* 98°C Berikut hasil perhitungan seperti pada Tabel III:

TABEL III
HASIL PERHITUNGAN SUHU SEKITAR TRANSFORMATOR

No	Beban (%)	θ_a (°C)
1	100	30
2	90	40

Dapat dilihat pada Tabel III bahwa suhu sekitar maksimum agar temperatur *Hot Spot* tidak melebihi 98°C untuk pembebanan 100% adalah 30°C dan 40°C untuk pembebanan 90%.

F. Pembebanan Optimum

Transformator harus dijaga besar bebannya agar temperatur *Hot Spot* tidak melebihi batas maksimal yang ditetapkan yaitu 98°C.

$$f(K) = 42,6K^2 + 18K^{1,6} - 56,03$$

$$f'(K) = 2 \times 42,6K + 1,6 \times 18K^{0,6}$$

Persamaan di atas dapat diselesaikan dengan menggunakan metode *Newton*, yaitu :

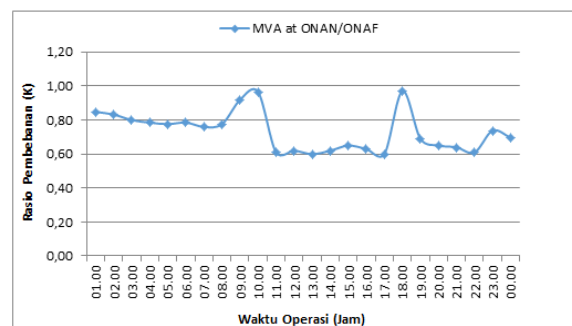
$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(x)}{f'(x)}$$

Dengan menggunakan metode *Newton* di atas didapatkanlah $K = 0,96$. Agar temperatur *Hot Spot* (θ_c) tidak melebihi 98°C, maka besar pembebanan maksimal yang diizinkan adalah sebesar 96% dari kapasitas transformator.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pembebanan Rata-rata Harian Transformator Daya

Setelah dilakukan perhitungan pada Bab 3, maka didapat grafik hasil pembebanan rata-rata harian transformator daya seperti pada Gambar 4:

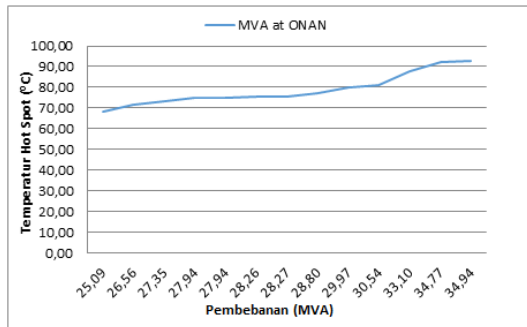


Gambar 4 Grafik Rasio Pembebanan

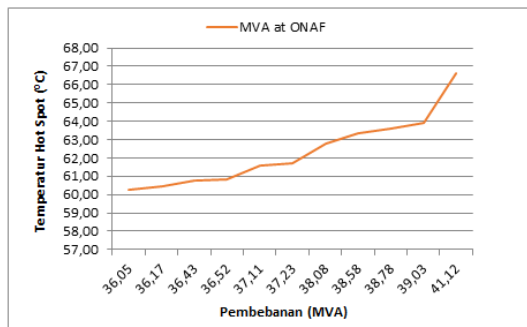
Dapat dilihat grafik rasio pembebanan yang ditunjukkan pada Gambar 4. Dimana rasio pembebanan transformator tertinggi saat ONAN/ONAF beroperasi selama 24 jam adalah 0,97 yaitu pada jam 10.00 dan jam 18.00. Hal ini karena sebelum dilakukan perhitungan pada sub bab D data yang menjadi acuan telah menunjukkan kondisi pembebanan yang maksimal pada jam 10.00 dan jam 18.00. Besarnya beban puncak pada jam 10.00 dan jam 18.00 pada transformator ONAN/ONAF masih berada dalam pembebanan yang normal karena kondisi suhu *Hot Spot* di bawah 98°C, sehingga akan mengalami umur yang normal.

B. Pengaruh Pembebanan Terhadap Temperatur *Hot Spot*

Setelah dilakukan perhitungan pada Bab 3, maka didapat grafik hasil pengaruh pembebanan terhadap susut umur transformator daya seperti pada Gambar 5 dan Gambar 6:



Gambar 5 Hubungan Pembebanan dengan Hot Spot

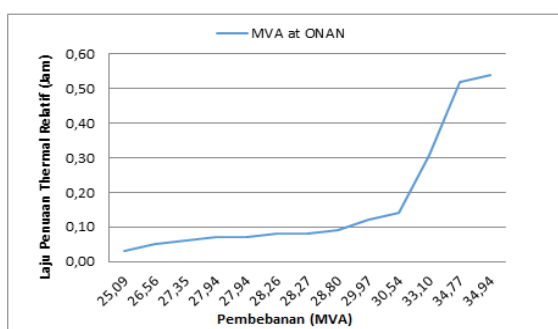


Gambar 6 Hubungan Pembebanan dengan Hot Spot

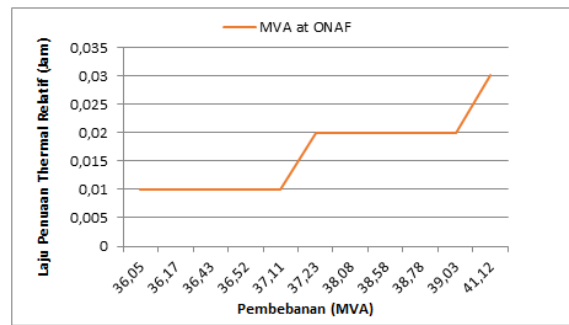
Dapat dilihat grafik hubungan pembebanan dengan temperatur *Hot Spot* selama 24 jam operasi yang ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Dimana saat ONAN yang ditunjukkan pada Gambar 5 temperatur *Hot Spot* tertinggi adalah 92,74°C pada jam 18.00, sedangkan saat ONAF yang ditunjukkan pada Gambar 6 temperatur *Hot Spot* tertinggi adalah 66,63°C pada jam 19.00. Besarnya pembebanan yang diberikan pada transformator pendingin ONAN/ONAF akan berbanding lurus terhadap besarnya temperatur *Hot Spot*.

C. Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator

Setelah dilakukan perhitungan pada Bab 3, maka didapat grafik hasil pembebanan terhadap susut umur transformator daya seperti pada Gambar 7 dan Gambar 8:



Gambar 7 Hubungan Laju Penuaan Thermal Relatif dengan Pembebanan

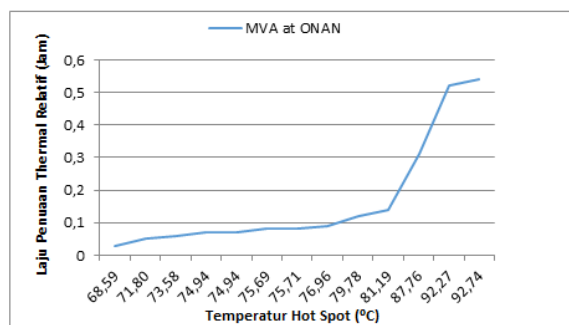


Gambar 8 Hubungan Laju Penuaan Thermal Relatif dengan Pembebanan

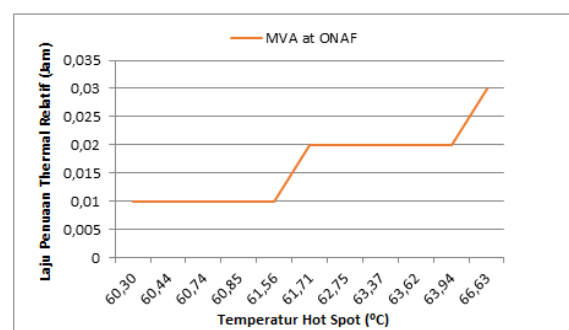
Dapat dilihat grafik hubungan laju penuaan *Thermal* relatif dengan pembebanan selama 24 jam operasi yang ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Dimana saat ONAN yang ditunjukkan pada Gambar 7 laju penuaan *Thermal* relatif tertinggi adalah 0,54 jam pada jam 18.00, sedangkan saat ONAF yang ditunjukkan pada Gambar 8 laju penuaan *Thermal* relatif tertinggi adalah 0,03 jam pada jam 19.00. Besarnya pembebanan pada transformator pendingin ONAN/ONAF akan berbanding lurus terhadap besarnya laju penuaan *Thermal* relatifnya.

D. Pengaruh Hot Spot Terhadap Susut Umur Transformator

Setelah dilakukan perhitungan pada Bab 3, maka didapat grafik hasil pengaruh *Hot Spot* terhadap susut umur transformator daya seperti pada Gambar 9 dan Gambar 10:



Gambar 9 Hubungan Laju Penuaan Thermal Relatif dengan Hot Spot



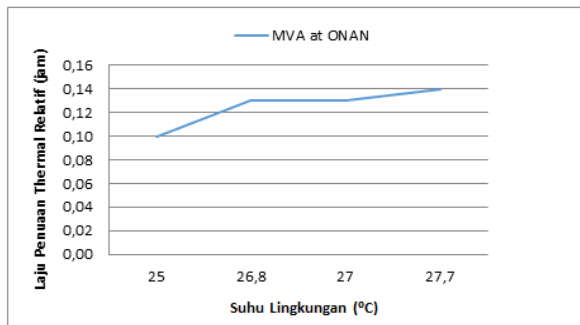
Gambar 10 Hubungan Laju Penuaan Thermal Relatif dengan Hot Spot

Dapat dilihat grafik hubungan laju penuaan *Thermal* relatif dengan temperatur *Hot Spot* selama 24 jam operasi. Dimana saat ONAN yang ditunjukkan pada Gambar 9

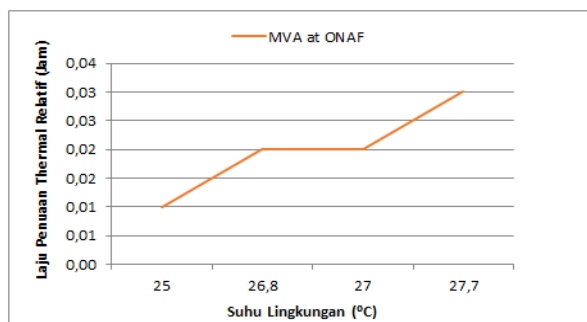
temperatur tertingginya adalah 92,74°C pada jam 18.00, sedangkan saat ONAF yang ditunjukkan pada Gambar 10 temperatur tertingginya adalah 66,63°C pada jam 19.00. Besarnya temperatur *Hot Spot* pada transformator pendingin ONAN/ONAF masih berada di bawah batas maksimum dari standar yang digunakan yaitu 98°C.

E. Pengaruh Suhu Lingkungan Terhadap Susut Umur Transformator

Setelah dilakukan perhitungan pada Bab 3, maka didapat grafik hasil pengaruh suhu lingkungan terhadap susut umur transformator daya seperti pada Gambar 11 dan Gambar 12:



Gambar 11 Hubungan Laju Penuaan Thermal Relatif dengan Suhu Lingkungan



Gambar 12 Hubungan Laju Penuaan Thermal Relatif dengan Suhu Lingkungan

Dapat dilihat grafik hubungan laju penuaan *Thermal* relatif dengan suhu lingkungan berbeda yang ditunjukkan pada Gambar 11 dan Gambar 12. Dimana saat ONAN yang ditunjukkan pada Gambar 11 laju penuaan *Thermal* relatif tertingginya adalah 0,14 jam pada suhu lingkungan 27,7°C dengan asumsi pembebanan 30,54 MVA, sedangkan saat ONAF yang ditunjukkan pada Gambar 12 laju penuaan *Thermal* relatif tertingginya adalah 0,03 jam pada suhu lingkungan 27,7°C dengan asumsi pembebanan 41,12 MVA. Besarnya suhu lingkungan pada transformator pendingin ONAN/ONAF akan berbanding lurus terhadap laju penuaan *Thermal* relatifnya.

V. KESIMPULAN

Hasil penelitian dari tiga perhitungan untuk pembebanan 100%, 90% dan 80% dimana pada pembebanan 100% diperoleh susut umur 1,70 jam/hari, pembebanan 90%

diperoleh susut umur 0,53 jam/hari dan pembebanan 80% diperoleh susut umur 0,18 jam/hari.

Untuk nilai akhir *Hot Spot* dari transformator saat ONAN adalah 71,80°C-92,74°C, sedangkan saat ONAF adalah 60,44°C-66,63°C. Dimana kondisi ini cukup aman untuk beroperasi karena masih di bawah batas nilai maksimum yang ditetapkan PLN yaitu 98°C. Apabila keadaan ini dapat terus dipertahankan masa guna transformator akan lebih optimal.

Hasil penelitian susut umur yang didapatkan hanya berasal dari pengaruh penurunan kemampuan isolasi akibat pemanasan dari pembebanan dan suhu lingkungan tanpa menghitung dari pengaruh yang lainnya yang dapat mengakibatkan penambahan laju penyusutan umur.

REFERENSI

- [1] Purnama Sigid, "Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga (Studi Kasus Trafo GTG 1.3 PLTGU Tambak Lorok Semarang)," Universitas Diponegoro. Semarang, 2011
- [2] International Electrotechnical Commission, "Loading Guide For Oil Immersed Transformer," IEC Publication, 1972
- [3] Odianto, Tjahja, "Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Usia Transformator Distribusi Di PT. PLN Distribusi APJ Gresik," Institut Teknologi Adhi Tama Jurusan Teknik Elektro. Surabaya, 2014
- [4] Siregar, D, "Studi Pemanfaatan Distributed Generation (DG) Pada Jaringan Distribusi," Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara. Medan, 2011
- [5] Wijaya, Mochtar ST, Dasar-dasar Mesin Listrik. Jakarta: Djambatan, 2001
- [6] Fitzgerald.E.A, dkk, Mesin-mesin Listrik, Edisi Keempat. Jakarta: Erlangga, 1992
- [7] Zuhail, Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya, Jakarta: Gramedia, 1995
- [8] Eddy Warman, Pandapotan Junedy, "Studi Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Daya (Aplikasi Pada Gardu Induk PematangSiantar)," Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara. Medan, Vol.1, No.1, 2013
- [9] Kristovel Alvian Kodoati, "Analisa Perkiraan Umur Transformator," Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi. Manado, 2015
- [10] Godec. Z and Sarunac. R, "Steady-state Temperature Rises of ONAN/ONAF/OFAF Transformers," IEE Proceedings, Vol.139, No.5, September, 1992
- [11] Lucas, JR dkk, "Estimation of Optimum Transformer Capacity Based on Load Curve," Transactions of IEEE Sri Lanka. Vol.3, No.1, January, 2001
- [12] D. Sitompul, Andigan, "Studi Pengaruh Temperatur Ambien Terhadap Karakteristik Temperatur Hotspot Pada Transformator Daya," Program Studi Teknik Elektro, Universitas Indonesia. Depok, 2011
- [13] Sumaryadi,"Manajemen Asset, Upaya Mempertahankan Unjuk Kerja Transformator Terhadap Pengaruh Harmonisa Pada Sistem Tenaga Listrik (Studi Kasus di PT. PLN (Persero) P3B Region Jakarta & Banten)," Program Studi Magister Teknologi dan Bisnis Kelistrikan, Institut Teknologi Bandung. Bandung, 2009
- [14] Indian Standard, "Guide For Loading Of Oil Immersed Transformer,"1972
- [15] Perera, KBMI. Dan Lucas J.R, "Loading Of Transformers Beyond Nameplate Rating," Transactions of IEEE Sri Lanka, University of Moratuwa. Vol.30, No.3, pp. 58-65, 1999
- [16] Najdenkoski, K dkk, "Thermal Aging of Distribution Transformers According to IEEE and IEC Standards," IEEE Publication, 2007