

Studi pengaruh pembebanan terhadap perubahan suhu dan perubahan rugi - rugi daya pada transformator

Rachmat Sutjipto¹, Dhimas Dhesah K², dan Rohmanita Duanaputri³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 5 Maret 2020
Direvisi 20 April 2020
Diterima 28 April 2020

Kata kunci:

% pembebanan
efisiensi trafo
relokasi

Keywords:

% loading
transformer efficiency
relocation

Penulis Korespondensi:

Rachmat Sutjipto,
Jurusan Teknik Elektro,
Politeknik Negeri Malang,
Jl. Sukarno Hatta No. 9, Malang, Jawa Timur, Indonesia.
Email: rachmat.sutjipto@polinema.ac.id

ABSTRAK

Obyek dari penelitian ini adalah transformator no 6 di Gardu Induk Kebonagung (150 kV / 20 kV, 60 MVA) di mana pada saat beroperasi akan mengalami fluktuasi pembebanan yang bervariasi. Untuk mendukung proses analisis maka pengambilan data (name plate, data harian trafo, suhu dll) dalam penelitian ini dilaksanakan secara langsung dalam periode tertentu pada transformator no 6 di GI Kebonagung. Setelah dilaksanakan analisa secara perhitungan & grafis maka diketahui bahwa fluktuasi pembebanan dari transformator dan perubahan suhu lingkungan menyebabkan perubahan temperature hotspot dari kumparan. Semakin besar temperatur hotspot dan suhu lingkungan, maka akan berimbas dengan naiknya nilai tahanan transformator. Jika tahanan semakin besar maka menyebabkan nilai rugi tembaga transformator juga akan semakin besar.. Meskipun demikian, besarnya temperature hotspot (52,5oC) masih di bawah standar IEC 60076-7 (120oC) dan besarnya rugi inti (26,47 kW (0,0367 %)) dan rugi total (1.721,99 kW (2,87 %)) juga masih di bawah standar yang ditentukan pada SPLN D3.002-1:2007 yaitu 10% untuk rugi inti dan 5% untuk rugi total transformator.

ABSTRACT

The object of this research is transformer no. 6 at the Kebonagung Substation (150 kV / 20 kV, 60 MVA) where during operation it will experience variable loading fluctuations. To support the analysis process, the data collection (name plate, daily transformer data, temperatures, etc.) in this study was carried out directly in a certain period in transformer no 6 in Kebonagung GI. After calculating & graphical analysis, it is known that the fluctuation in loading of the transformer and changes in ambient temperature cause changes in the hotspot temperature of the coil. The greater the hotspot temperature and ambient temperature, the higher the impact value of the transformer. If the resistance increases, the copper loss value of the transformer will also increase. However, the magnitude of the hotspot temperature (52.5oC) is still below the IEC 60076-7 (120oC) standard and the amount of core loss (26.47 kW (0, 0367%)) and total loss (1,721.99 kW (2.87%)) are also still below the standard specified in SPLN D3.002-1: 2007 which is 10% for core loss and 5% for total transformer loss.

1. PENDAHULUAN

Faktor-faktor lain yang juga dapat mempengaruhi besarnya nilai rugi – rugi transformator, antara lain adalah temperature hotspot yang terjadi pada sebuah transformator. Besarnya temperature hotspot banyak dipengaruhi oleh perubahan besar pembebanan dan perubahan suhu lingkungan. Saat transformator mengalami kenaikan temperature hotspot, maka nilai tahanan dari material transformator akan membesar karena faktor suhu. Semakin besar nilai tahanan transformator maka rugi – rugi transformator tersebut juga akan semakin besar. Perubahan nilai tahanan ini merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi besar rugi tembaga (I²R) pada transformator. [1-6]

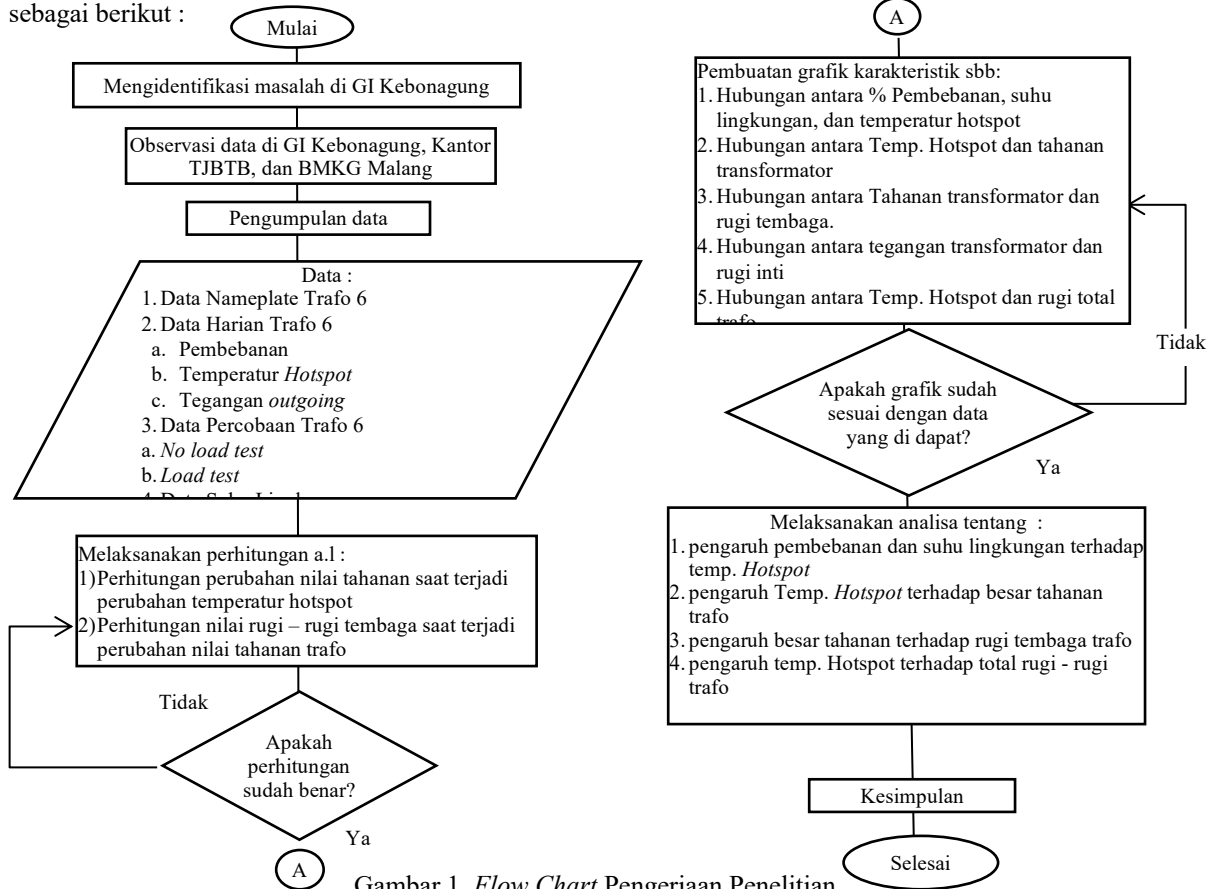
Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh perubahan pembebanan terhadap perubahan suhu dan pengaruhnya pada rugi-rugi transformator, maka pada penelitian ini menggunakan transformator no 6 (150 kV / 20 kV, 60 MVA) di Gardu Induk Kebonagung sebagai obyek penelitian ini. Dalam operasinya, transformator mengalami fluktuasi pembebanan yang bervariasi pada setiap waktunya, hal ini akan berpengaruh pada perubahan temperature hotspot yang berimbas pada perubahan besarnya tahanan transformator penyebab rugi-rugi transformator.

2. METODE PENELITIAN (11 PT)

Dalam melakukan penyusunan penelitian ini, proses pengambilan data dilaksanakan melalui observasi di PT PLN (Persero) Gardu Induk Kebon Agung, Kantor PT. PLN (Persero) TJBTB, dan BMKG Malang melalui wawancara dan observasi langsung dan data yang diambil adalah sebagai berikut :

1. Data dari Gardu Induk Kebonagung
 - a) Data nameplate transformator 6 GI Kebonagung
 - b) Data harian transformator 6 GI Kebonagung
2. Data yang diperoleh dari Kantor PT. PLN (Persero) TJBTB
 - a) Data hasil no load test transformator 6 GI Kebonagung
 - b) Data hasil full load test transformator 6 GI Kebonagung
3. Data yang diperoleh dari BMKG Malang
 - a) Data suhu lingkungan

Untuk memperjelas proses pengerjaan dari penelitian ini maka digunakan diagram alir / flowchart sebagai berikut :



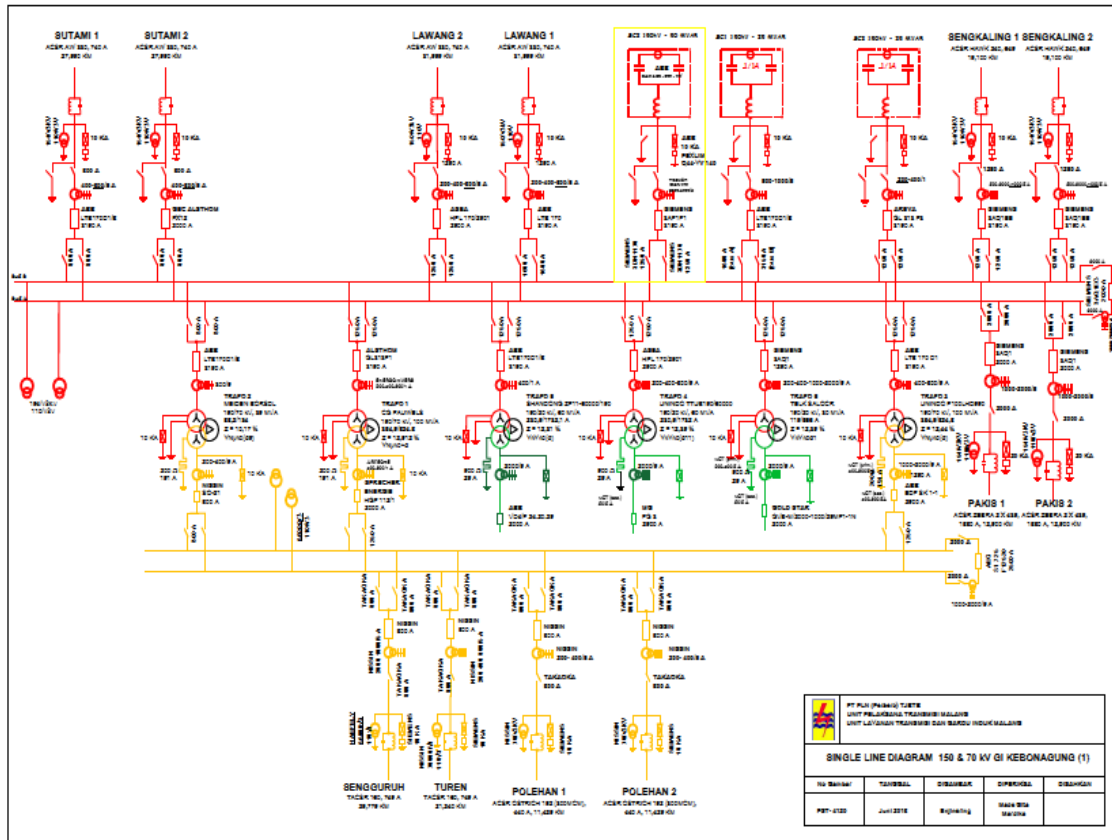
Gambar 1. Flow Chart Pengerjaan Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Tinjauan Umum Gardu Induk (GI) Kebonagung

Gambar 2 menunjukkan bahwa Gardu Induk Kebonagung digunakan untuk melayani beban pada daerah Malang Selatan dan sekitarnya. Ditinjau dari jenisnya maka Gardu Induk Kebonagung merupakan gardu induk konvensional dimana sebagian besar peralatan tegangan tingginya berada diluar ruangan (outdoor) dan sistem double busbar. Gardu Induk Kebonagung memiliki enam buah transformator. Tiga diantaranya (transformator 1, 2 dan 3) merupakan Inter Bus Transformer (IBT) dengan tegangan kerja 150/70 kV, sedangkan transformator 4, 5 dan 6 merupakan transformator distribusi dengan tegangan kerja 150/20 kV. Total kapasitas GI Kebonagung (6 buah trafo) adalah sebesar 385 MVA dengan rincian kerja sebagai berikut :

- a. menerima suplai daya dari GI Lawang dan GI Pakis.
- b. mengirim daya untuk GI Sengkaling, GI Sutami GI Sengguruh, GI Polehan, dan GI Turen.



Gambar 2. Single Line Diagram 150 KV & 70 KV di GI Kebonagung

3.2. Spesifikasi Transformator Distribusi 6 Gardu Induk Kebonagung

Nameplate dari transformator 6 dari Gardu Induk Kebonagung adalah sebagai berikut :

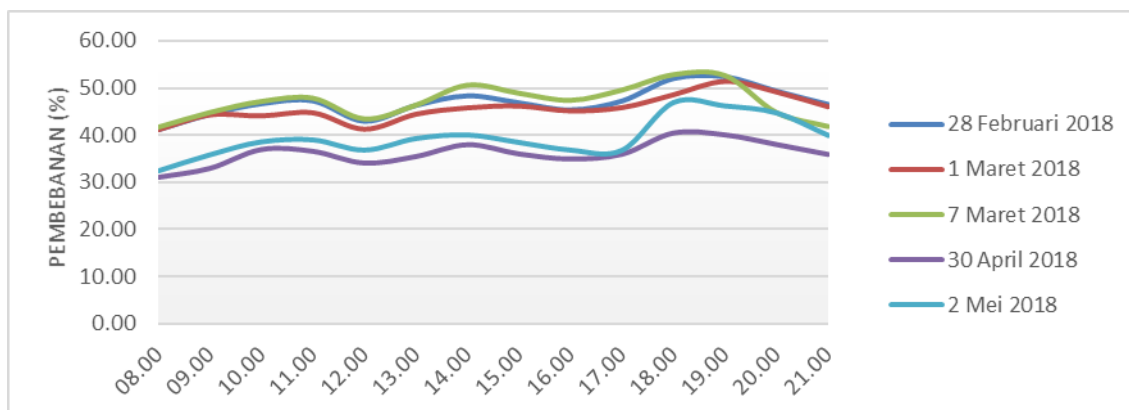
Tabel 1 Nameplate Transformator 6 Gardu Induk Kebonagung

Merk Transformator	Shandong Taikai	Vector Group	YNyn0(d)
Type/Tipe	SFZ11-60000/150	Tipe Pendinginan	ONAN/ONAF (60/100%)
Jumlah Fasa	3	Suhu Belitan	55 K
Rating Daya	60000/60000/20000 kVA	Suhu Minyak	50 K
Frekuensi	50 Hz	Ketinggian	Di bawah 1000 m
Rating Tegangan	(150 ± 8 x 1.25%)/20/10	No Seri Pabrik	11324

Secara singkat, dapat diketahui bahwa trafo yg digunakan dalam penelitian ini adalah trafo 3 fasa Ynyn0(d) dan mempunyai daya output nominal sebesar 60 MVA dengan tegangan nominal sebesar 150 KV/20KV. Selain itu trafo ini bekerja pada frekuensi 50 Hz dan mempunyai sistem pendingan ONAN atau ONAF.

3.3. Analisis Karakteristik Pembebanan Transformator 6 Gardu Induk Kebonagung

Karakteristik pembebanan Transformator 6 Gardu Induk Kebonagung digambarkan dalam bentuk grafik sebagai berikut :

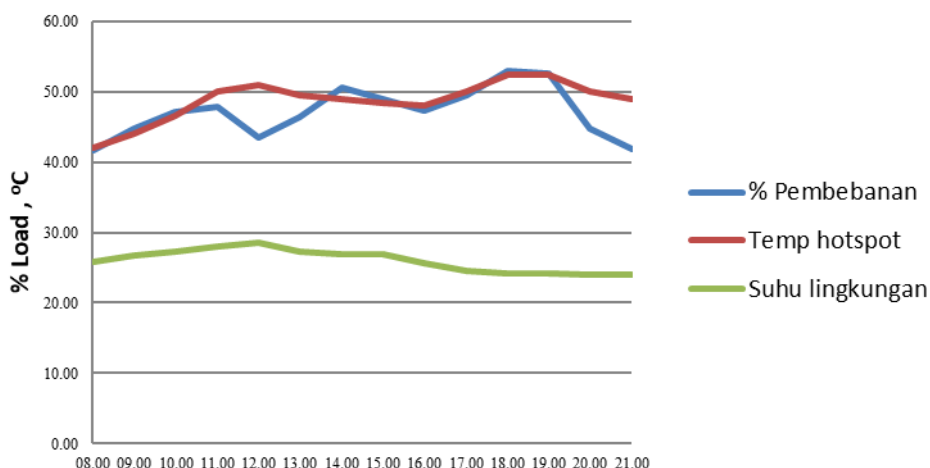


Gambar 3. Grafik Karakteristik Pembebanan Transformator 6 GI kebonagung

Dari gambar 3 pada dapat diketahui bahwa pembebanan pada transformator 6 selalu bervariasi pada setiap jam pada setiap harinya. beban rata-rata tertinggi terjadi pada pembebanan tanggal 7 Maret 2018 sebesar 47,14 % dari total kapasitas transformator dan beban puncak terbesar dari transformator 6 yang pada umumnya terjadi diantara pukul 18.00 dan 19.00 WIB adalah sebesar 52,88 % dari total kapasitas transformator. Ditinjau dari klasifikasi pembebanannya maka besarnya beban tersebut masih dalam skala kecil (kurang dari 60%) dan masih dalam ruang lingkup persyaratan gardu induk yaitu besarnya pembebanan transformator tidak boleh melebihi 100% dari kemampuan nominal transformator.

3.4. Analisis Pengaruh Perubahan Pembebanan dan Suhu Lingkungan Terhadap Temperatur Hotspot Transformator 6 Gardu Induk Kebonagung

Dari data pada tanggal 07 Maret 2018 dapat diketahui bahwa harga suhu lingkungan dan temperature hotspot selalu berbeda-beda seperti digambarkan pada gambar 2 di bawah ini.



Gambar 4. Grafik Karakteristik Pembebanan, Suhu Lingkungan, Dan Temperatur Hotspot Transformator 6 GI Kebonagung Pada 7 Maret 2018

Dari gambar 4 maka dapat diketahui bahwa setiap adanya perubahan suhu lingkungan (*ambient temperature*) dan perubahan beban dari transformator maka akan berimbas pada perubahan temperature hotspot dari transformator. Besarnya *temperature hotspot* (suhu kumparan transformator) dipengaruhi oleh besarnya pembebanan transformator dan suhu lingkungan (*ambient temperature*). Kenaikan *Temperature Hotspot* dipengaruhi oleh adanya perubahan suhu *top oil* yang disebabkan adanya perubahan besar beban dari transformator yang mengakibatkan timbulnya kenaikan arus. Kenaikan arus pada belitan akan menyebabkan panas dalam belitan transformator akan bertambah dan berkontribusi pada kenaikan temperature *Top Oil* dan berakibat naiknya *temperature Hotspot* Selain karena faktor pembebanan, suhu lingkungan di sekitar transformator juga mempengaruhi kinerja dari transformator, semakin besar suhu lingkungan akan menurunkan kinerja transformator tersebut karena naiknya *temperature hotspot*. [7-9]

Untuk menjelaskan analisis diatas dan perhitungan pada tabel 2, maka digunakan langkah-langkah perumusan sebagai berikut :

1. Penentuan Kenaikan Temperatur *Top Oil*

Kenaikan temperatur ini sepadan dengan kenaikan suhu *top oil* pada nilai daya yang dikalikan ratio dari total kerugian dengan eksponen x . [8-9]

$$\Delta\theta_{ou} = \Delta\theta_{or} \left(\frac{1+RK^2}{1+R} \right)^x$$

Keterangan:

R : 6

K : konstanta minyak (*oil exponent*)

x : 0,8 (ONAN dan ONAF)

$\Delta\theta_{ou}$: kenaikan temperatur stabil *top oil*

$\Delta\theta_{or}$: kenaikan temperatur *top oil* (at rated 52 °C untuk ON)

2. Penentuan Temperatur *Hot spot*

Temperatur *hotspot* θ_h merupakan penjumlahan nilai *ambient temperature* (θ_a) dan kenaikan *temperature hot spot* $\Delta\theta_h$ untuk beban yang stabil dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut : [8-9]

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_h$$

$$\Delta\theta_h : \Delta\theta_{ou} + Hg_r K^y$$

$$\Delta\theta_h : \Delta\theta_{or} \left(\frac{1+RK^2}{1+R} \right)^x + Hg_r K^y$$

Keterangan :

θ_h : temperatur *hotspot*

θ_a : suhu lingkungan

$\Delta\theta_h$: kenaikan temperatur *hotspot*

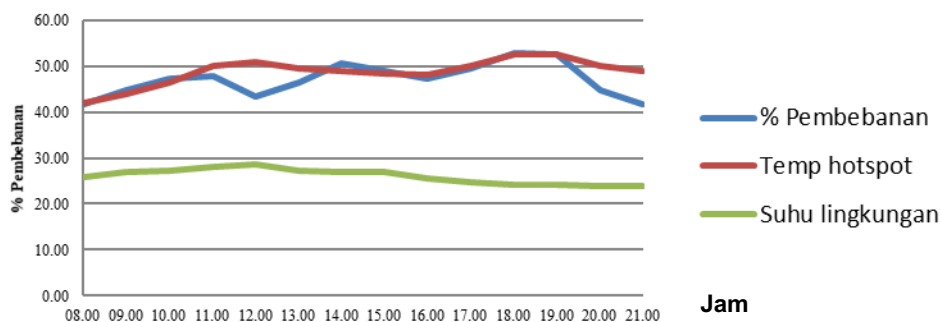
Hg_r : perbedaan kenaikan temperatur *hotspot* dengan *top oil* (at rated 26 °C)

y : konstanta (winding exponent) = 1,3 (ONAN dan ONAF)

Tabel 2 Data Pengaruh Perubahan % Pembebanan Terhadap Temperature Hotspot Dari Transformator 6 GI Kebon Agung

Jam	Tegangan (kV)	Arus (A)	cos θ	% Pembebanan	Load factor K	Ambient Temp (°C)	Temp hotspot (°C)
08.00	20,3	721,4	0,956	41,65	0,42	25,8	42
09.00	19,9	776,1	0,953	44,81	0,45	26,8	44
10.00	19,9	816,7	0,958	47,15	0,47	27,3	46,5
11.00	19,7	828,8	0,958	47,85	0,48	28,0	50
12.00	20,3	752,1	0,942	43,42	0,43	28,6	51
13.00	20,4	803,4	0,952	46,39	0,46	27,2	49,5
14.00	19,8	877,2	0,951	50,65	0,51	27,0	49
15.00	19,8	847,0	0,947	48,90	0,49	27,0	48,5
16.00	20,2	821,0	0,940	47,40	0,47	25,6	48
17.00	20,2	859,0	0,948	49,60	0,50	24,6	50
18.00	20,5	916,0	0,953	52,89	0,53	24,2	52,5
19.00	20,7	912,0	0,945	52,66	0,53	24,2	52,5
20.00	20,7	775,0	0,947	44,75	0,45	24,0	50
21.00	20,8	724,0	0,955	41,80	0,42	24,0	49

Berdasarkan tabel 2 maka dapat dibuat gambar karakteristik perubahan pembebanan, suhu lingkungan, dan temperatur *hotspot*, sebagai berikut :



Gambar 5. Grafik Perubahan Pembebanan, Suhu Lingkungan, dan *Temperature Hotspot* Transformator 6 GI Kebonagung pada 7 Maret 2018

Dari table 2 dan gambar 5 diketahui bahwa, *temperature hotspot* tertinggi tercatat pada pukul 18.00 dan 19.00 yakni sebesar 52,5°C dengan pembebanan sebesar 52,89% dan 52,66% dan dengan suhu lingkungan sebesar 24,2°C. Sedangkan *temperature hotspot* terendah terjadi pada pukul 08.00 yakni sebesar

42°C dengan pembebanan sebesar 41,65% dan dengan suhu lingkungan sebesar 25,8°C. Dari tabel 2 dan gambar 3 dapat diketahui bahwa *temperature hotspot* akan berubah saat terjadi perubahan nilai % pembebanan transformator dan perubahan nilai besarnya suhu lingkungan (*ambient temperature*). Hal ini membuktikan bahwa yang mempengaruhi besarnya nilai *temperature hotspot* tidak hanya dipengaruhi oleh nilai pembebanan tetapi juga oleh suhu lingkungan (*ambient temperature*). Walaupun demikian, *temperature hotspot* dari transformator 6 di GI Kebonagung tidak pernah melampaui standar yang telah ditetapkan oleh IEC 60076-7 yaitu batas *temperature hotspot* untuk transformator besar dengan pembebanan normal adalah sebesar 120°C.

3.5. Analisis Pengaruh Temperature Hotspot Terhadap Rugi–Rugi Transformator 6 Gardu Induk Kebonagung

Untuk menganalisa besarnya pengaruh dari *temperature hotspot* terhadap rugi-rugi transformator maka harus diketahui terlebih dahulu :

- a. Pengaruh perubahan *temperature hotspot* yang disebabkan oleh perubahan beban transformator terhadap nilai tahanan belitan.
- b. Pengaruh perubahan nilai tahanan transformator terhadap rugi-rugi transformator khususnya rugi tembaga

3.5.1. Analisis Pengaruh Temperature Hotspot Terhadap Nilai Tahanan Transformator 6 Gardu Induk Kebonagung

Pembebanan dan suhu lingkungan pada transformator dapat menimbulkan panas pada belitan (*temperature hotspot*) yang berakibat naiknya nilai tahanan pada transformator sehingga nilai rugi – rugi pada transformator tersebut meningkat. Untuk menganalisa pengaruh *temperature hotspot* terhadap nilai tahanan transformator maka dapat menggunakan persamaan berikut : [10]

$$R_2 : R_1 \{1 + \alpha_1 (t_2 - t_1)\}$$

Nilai α_1 belum diketahui dan harus dilaksanakan perhitungan terlebih dahulu menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\alpha_1 : \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_0} + t\right)}$$

Jika besarnya $t : 34,5^\circ\text{C}$ maka dapat dihitung besarnya α_1 sebagai berikut :

$$\alpha_1 : \frac{1}{\left(\frac{1}{0,00427} + 34,5\right)} : 0,00362$$

Untuk menentukan harga R_2 maka harus ditentukan terlebih dahulu besarnya nilai R_1 dengan menggunakan sebagai berikut : [11]

$$P_{cu} : 3 I_F^2 R \rightarrow R_1 : \frac{P_{cu}}{3 I_F^2}$$

Sebagai contoh perhitungan maka digunakan data pada *Transformer Test - Load Loss and Impedance Voltage Test (ONAN)* sebagai berikut :

- $P_{cu} : 125,301 \text{ W}$
- $I_F = I_L : 257,057 \text{ A (transformator hubungan Y)}$
- $R_1 : \frac{125301}{3 \cdot 257,057^2} : 0,632 \Omega$

Dari perhitungan di atas maka nilai tahanan transformator R_2 pada tanggal 07 Maret 2018 pukul 08.00 (R_2) dapat ditentukan sebagai berikut:

- $R_1 : 0,632 \Omega$ $\alpha_1 : 0,00362$
- $t_1 : 34,5 \text{ }^\circ\text{C}$ $t_2 : 42 \text{ }^\circ\text{C};$

maka :
 $R_2 : 0,632 (1 + (0,00362 (42 - 34,5))) : 0,649 \Omega$

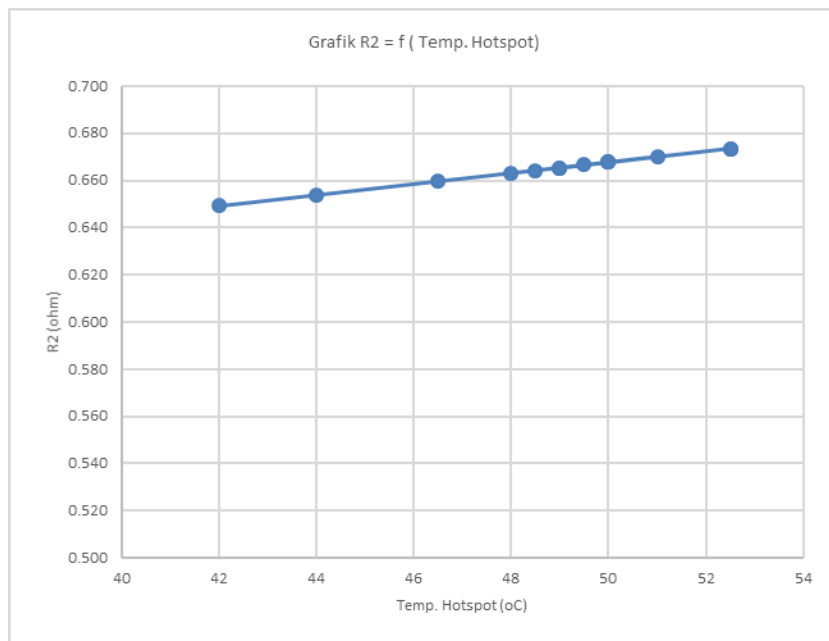
- Keterangan :
- $R_2 : \text{Resistansi (tahanan) pada suhu } t_2 \text{ }^\circ\text{C (ohm)}$
 - $R_1 : \text{Resistansi (tahanan) pada suhu } t_1 \text{ }^\circ\text{C (ohm)}$
 - $t_2 : \text{Suhu akhir (}^\circ\text{C)}$
 - $t_1 : \text{Suhu mula – mula (}^\circ\text{C)}$
 - $\alpha_1 : \text{Koefisien suhu tahanan jenis pada suhu } t_1 \text{ (}^\circ\text{C)}$
 - $\alpha_0 : \text{Koefisien suhu tahanan jenis saat suhu } t : 0 \text{ }^\circ\text{C}$
 - $t : \text{Suhu (}^\circ\text{C)}$

Dengan cara perhitungan yang sama, maka besarnya nilai tahanan transformator pada suhu belitan $t^\circ\text{C}$ (R_2) pada tanggal 07 Maret 2018 dapat ditentukan, sebagai berikut:

Tabel 3. Data Hasil Perhitungan R_2 Tanggal 07 Maret 2018

Jam	Arus (A)	Temp hotspot	$R_1 (\Omega)$	$t_1 (^\circ\text{C})$	$\alpha_1 (^\circ\text{C})$	$R_2 (\Omega)$
-----	----------	--------------	----------------	------------------------	-----------------------------	----------------

	(°C)					
08.00	721,4	42	0,632	34,5	0,00362	0,649
09.00	776,1	44	0,649	42	0,00359	0,654
10.00	816,7	46,5	0,654	44	0,00356	0,660
11.00	828,8	50	0,660	46,5	0,00352	0,668
12.00	752,1	51	0,668	50	0,00350	0,670
13.00	803,4	49,5	0,670	51	0,00352	0,667
14.00	877,2	49	0,667	49,5	0,00353	0,665
15.00	847,0	48,5	0,665	49	0,00353	0,664
16.00	821,0	48	0,664	48,5	0,00354	0,663
17.00	859,0	50	0,663	48	0,00352	0,668
18.00	916,0	52,5	0,668	50	0,00348	0,674
19.00	912,0	52,5	0,674	52,5	0,00348	0,674
20.00	775,0	50	0,674	52,5	0,00352	0,668
21.00	724,0	49	0,668	50	0,00353	0,665



Gambar 6. Hubungan antara *Temperature Hotspot* dan Tahanan R2 Transformator 6 pada Tanggal 07 Maret 2018

Berdasarkan gambar 6 dapat diketahui bahwa semakin tinggi temperature *hotspot* transformator maka nilai tahanan transformator juga akan semakin besar. Nilai tahanan R2 tertinggi tercapai saat jam 18.00 & 19.00 dimana R2 mencapai harga 0,674 Ω dengan temperature *hotspot* tertinggi tercatat sebesar 52,5 $^{\circ}\text{C}$.

3.5.2. Perhitungan rugi tembaga saat terjadi perubahan perubahan nilai tahanan transformator

Untuk mendapatkan nilai rugi tembaga (P_{cu}) digunakan persamaan sebagai berikut : $P_{cu} : 3 I_F^2 R_2$ dan besarnya nilai rugi tembaga transformator pada tanggal 07 Maret 2018 pukul 08.00 WIB dapat dihitung sebagai berikut :

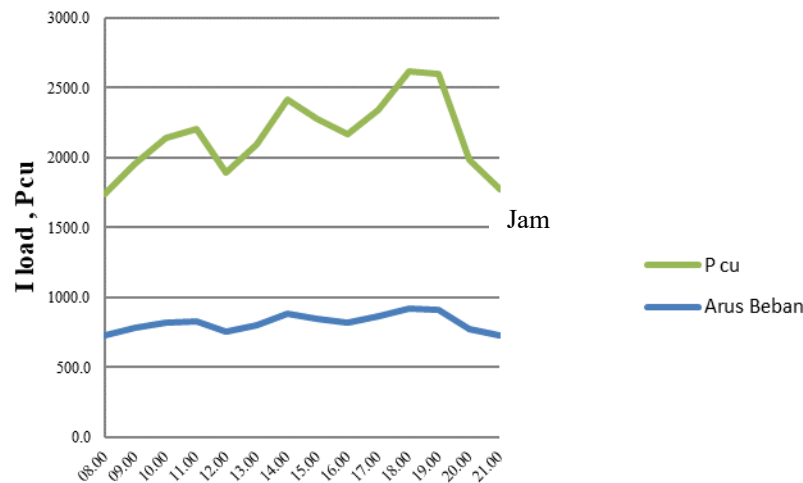
$$I_F : 721,4 \text{ A} \quad \text{dan} \quad R_2 : 0,649 \Omega$$

$$P_{cu} : 3 \times 721,4^2 \times 0,649 : 1.013,62 \text{ kW}$$

Dengan cara perhitungan yang sama, maka nilai rugi tembaga transformator (P_{cu}) dapat dilihat pada tabel sebagai berikut:

Jam	Arus (A)	Temp hotspot ($^{\circ}\text{C}$)	R_1 (Ω)	t_1 ($^{\circ}\text{C}$)	α_1 ($^{\circ}\text{C}$)	R_2 (Ω)	P_{cu} (kW)
08.00	721,4	42	0,632	34,5	0,00362	0,649	1.013,62
09.00	776,1	44	0,649	42	0,00359	0,654	1.181,58

10.00	816,7	46,5	0,654	44	0,00356	0,660	1.320,08
11.00	828,8	50	0,660	46,5	0,00352	0,668	1.376,22
12.00	752,1	51	0,668	50	0,00350	0,670	1.137,25
13.00	803,4	49,5	0,670	51	0,00352	0,667	1.290,83
14.00	877,2	49	0,667	49,5	0,00353	0,665	1.536,16
15.00	847,0	48,5	0,665	49	0,00353	0,664	1.429,68
16.00	821,0	48	0,664	48,5	0,00354	0,663	1.340,87
17.00	859,0	50	0,663	48	0,00352	0,668	1.478,19
18.00	916,0	52,5	0,668	50	0,00348	0,674	1.695,52
19.00	912,0	52,5	0,674	52,5	0,00348	0,674	1.680,74
20.00	775,0	50	0,674	52,5	0,00352	0,668	1.203,04
21.00	724,0	49	0,668	50	0,00353	0,665	1.046,21



Gambar 7. Pengaruh Arus Beban Terhadap Rugi Tembaga Transformator 6 pada Tanggal 07 Maret 2018

Dari gambar 7 dan tabel 4 dapat diketahui bahwa rugi tembaga pada transformator akan meningkat seiring dengan peningkatan pembebanan dan rugi tembaga tertinggi terhitung sebesar 1.695,52 kW.

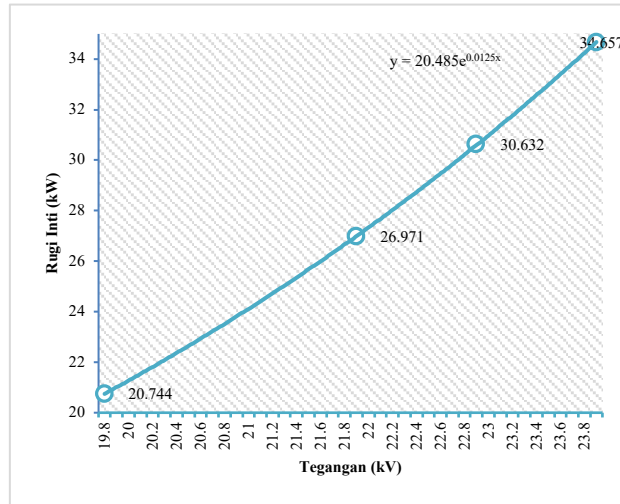
3.6. Analisis pengaruh temperature hotspot terhadap rugi - rugi Transformator 6 Gardu Induk Kebonagung

Pada sebuah transformator terdapat 2 rugi utama yaitu rugi tembaga dan rugi inti. Kedua jenis rugi-rugi tersebut bervariasi tergantung dari faktor-faktor yang mempengaruhinya yaitu :

- a. Rugi inti tergantung dari V supply dan frekuensinya. Hubungan antara rugi inti dengan tegangan suplynya dapat dilihat pada tabel 5 dan gambar 6

Tabel 5. Hubungan Antara Tegangan dan Rugi Inti Transformator 6 Berdasarkan Percobaan No Load

% Tegangan	Tegangan (kV)	Rugi inti (kW)
90	19,8	20,744
100	22,0	26,971
105	23,1	30,632
110	24,2	34,657

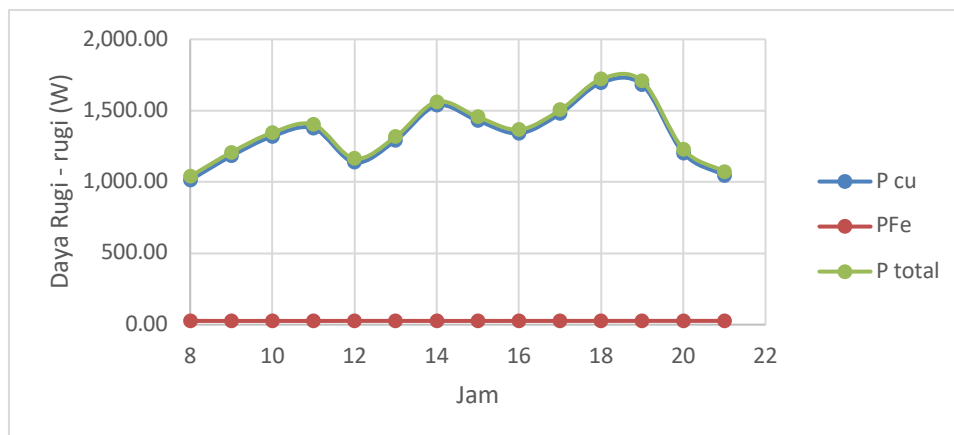


Gambar 8. Hubungan Antara Tegangan dan Rugi Inti

Berdasarkan gambar 8, transformator akan memiliki rugi inti terbesar pada tanggal 07 Maret 2018 sebesar 26,57 kW dengan tegangan sebesar 20,8 kV

Tabel 6. Hubungan Antara *Temperature Hotspot* dan Rugi – Rugi Transformator 6 pada Tanggal 07 Maret 2018

Jam	Arus (A)	Temp hotspot (°C)	t ₁ (°C)	α ₁ (°C)	R ₂ (Ω)	P _{cu} (kW)	P _{fe} (kW)	P Total (kW)
08.00	721,4	42	34,5	0,003617	0,649232	1.013,62	26,40	1.040,02
09.00	776,1	44	42	0,003591	0,653895	1.181,58	26,27	1.207,85
10.00	816,7	46,5	44	0,003559	0,659713	1.320,08	26,27	1.346,35
11.00	828,8	50	46,5	0,003516	0,667831	1.376,22	26,20	1.402,42
12.00	752,1	51	50	0,003503	0,67017	1.137,25	26,40	1.163,66
13.00	803,4	49,5	51	0,003522	0,66663	1.290,83	26,44	1.317,27
14.00	877,2	49	49,5	0,003528	0,665454	1.536,16	26,24	1.562,40
15.00	847	48,5	49	0,003534	0,664278	1.429,68	26,24	1.455,92
16.00	821	48	48,5	0,003534	0,663102	1.340,87	26,37	1.367,24
17.00	859	50	48	0,003516	0,667765	1.478,19	26,37	1.504,56
18.00	916	52,5	50	0,003485	0,673583	1.695,52	26,47	1.721,99
19.00	912	52,5	52,5	0,003485	0,673583	1.680,74	26,53	1.707,28
20.00	775	50	52,5	0,003516	0,667662	1.203,04	26,53	1.229,58
21.00	724	49	50	0,003528	0,665307	1.046,21	26,57	1.072,78



Gambar 9. Grafik Rugi Transformator pada 07 Maret 2018

Dari gambar 9 dan table 6, maka dapat diketahui bahwa rugi tembaga pada transformator jauh lebih besar dari rugi inti. Semakin besar beban terpasang maka arus akan semakin besar dan berakibat semakin besarnya panas yang ditimbulkan sehingga *temperature hotspot* juga akan semakin besar. Jika temperaturee

hotspot semakin besar maka R_2 akan menjadi lebih besar sehingga besarnya rugi tembaga (P_{cu}) semakin besar pula. Untuk mengatasi hal tersebut maka diperlukan *maintenance* terhadap sistem pendinginan secara teratur dan terperiodisasi khususnya *treatment* terhadap minyak transformator. Selain itu juga harus diperhatikan tentang kelancaran proses pendinginan udara baik secara natural maupun paksa (*force*).

Dari analisa, gambar 7 dan tabel 6 dapat disimpulkan bahwa besarnya rugi-rugi transformator masih di bawah standar yang ditentukan pada SPLN D3.002-1:2007 bahwa besarnya rugi besi (P_{fe}) adalah sebesar 26,47 kW (0,044 %) masih di bawah standar rugi inti yang ada (10%) dan untuk total rugi sebesar 1.721,99 kW (2,87 %), juga masih di bawah standar total rugi yang ada (5%).

4. KESIMPULAN

Dari data tabel, data perhitungan, gambar serta analisa yang telah dilaksanakan pada penelitian ini, maka dapat disimpulkan antara lain :

1. Perubahan besar pembebanan transformator dan perubahan suhu lingkungan (*ambient temperature*) akan menyebabkan perubahan suhu pada kumparan transformator (*temperature hotspot*). Meskipun demikian besarnya *temperature Hotspot* terbesar (52,5 °C) masih di bawah standar IEC 60076-7 yaitu batas *temperature hotspot* untuk transformator besar dengan pembebanan normal adalah sebesar 120°C.
2. Besarnya rugi tembaga transformator berubah seiring dengan perubahan beban dari transformator sedangkan besarnya rugi inti relatif lebih konstan. Saat pembebanan pada transformator meningkat, maka rugi tembaga meningkat karena meningkatnya arus beban dan suhu belitan transformator (*temperature hotspot*). Meskipun demikian besarnya rugi inti sebesar 22,65 kW (0,0367 %) dan rugi total sebesar 1.718,17 kW (2,86 %) masih di bawah standar yang ditentukan pada SPLN D3.002-1:2007 yaitu max 10 % untuk rugi inti dan 5% untuk rugi total transformator.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wuwung, JO, 2010, Pengaruh Pembebanan Terhadap Kenaikan Suhu Pada Belitan Transformator Daya Jenis Terendam Minyak, Tekno, vol 07, no.52, p 31-37
- [2] Sutjipto, Rachmat. 2019, Studi Perencanaan Peningkatan Kinerja Trafo Distribusi Dengan Relokasi Antara 2 Buah Trafo. Jurnal ELTEK
- [3] Rusdjaja, T, dkk., 2014, Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga. Jakarta : PT PLN (Persero)
- [4] Yadollahi, Hamid Lesani. 2018, Power transformer optimal design (PTOD) using an innovative heuristic method combined with FEM technique
- [5] Daniswara, Geraldy. 2019, Studi Analisis Mereduksi Arus Inrush Akibat Energizing Pada Transformator Daya Di Gardu Induk Banyudono 150 kV Menggunakan Metode Sequential Phase Energization (SPE)
- [6] Falcon, R. (2008). Analisis Karakteristik Termal dan Resistansi Konduktor Pada Kabel Inti Ganda NYM 2x1,5 mm². Jakarta : Universitas Indonesia
- [7] SPLN 17 A:1979. "Loading Guide for Oil-Immersed Transformer". Jakarta. PT. PLN (Persero)
- [8] IEC 60354, 1991-11, *Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers*
- [9] IEC 60076-2, 1993, *Power Transformers Part 2 : Temperature Rise*.
- [10] Theraja, BL, 2005, *Electrical Technology*.
- [11] Zuhail, 2000 : Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya.