

STUDI PENGGUNAAN SISTEM PENDINGIN UDARA TEKAN UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI TRANSFORMATOR PADA BEBAN LEBIH (Aplikasi pada PLTU Labuhan Angin, Sibolga)

Yohannes Anugrah, Eddy Warman

Konsentrasi Teknik Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara (USU)
Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA
e-mail: sianess_19@yahoo.com

Abstrak

Suatu transformator bila dibebani, maka akan timbul rugi tembaga pada belitan transformator dan inti yang diubah menjadi panas. Panas yang ditimbulkan dapat menaikkan temperatur transformator. Semakin besar beban yang diterima, menyebabkan kenaikan temperatur yang semakin tinggi, rugi-rugi menjadi semakin besar, dan efisiensi menjadi turun. Paper ini akan membahas pengaruh penggunaan sistem pendingin dengan pendingin udara tekan yang bertujuan untuk menurunkan temperatur pada transformator. Dengan diberikan pendinginan, didapatkan perbandingan rugi-rugi, temperatur dan efisiensi transformator adalah: Beban 80% ; $T_n = 57,58^{\circ}\text{C}$; $P_{loss} = 4391,936\text{kVA}$; $\eta = 97,38\%$; Beban 130% ; $T_n = 67,24^{\circ}\text{C}$; $P_{loss} = 11917,448\text{kVA}$; $\eta = 96,11\%$; Beban 150% ; $T_n = 77,14^{\circ}\text{C}$; $P_{loss} = 1559,26\text{kVA}$; $\eta = 95,12\%$. Dengan menjaga temperatur di bawah batas yang diizinkan, maka transformator dapat dibebani lebih besar, bahkan sanggup lebih dari 150%.

Kata kunci : transformator daya, resistansi, temperatur, rugi-rugi, efisiensi.

1. Pendahuluan

Suatu transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet.

Transformator berfungsi untuk menyalurkan daya/tenaga dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Dalam operasi penyaluran tenaga listrik transformator dapat dikatakan sebagai jantung dari transmisi dan distribusi.

Transformator satu fasa mempunyai satu sisi masukan dan satu sisi keluaran. Sisi masukan disebut sisi primer, dan sisi keluaran disebut sisi sekunder. Sedangkan transformator tiga fasa mempunyai tiga buah sisi masukan dan tiga buah sisi keluaran, Transformator tiga fasa dapat dibentuk dari tiga buah transformator satu fasa ataupun dari bentuk konstruksi transformator tiga fasa satu inti. Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu sebagai berikut:

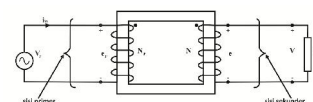
- i. Transformator daya
- ii. Transformator distribusi
- iii. Transformator ukur

Kerja transformator yang berdasarkan induksi elektromagnet, menghendaki adanya gandingan

magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama [1].

2. Transformator

Suatu trafo, dalam bentuk yang sederhana, pada dasarnya terdiri dari dua kumparan yang diisolasikan yang terganggu dengan medan magnet bersama yang dibangkitkan dalam inti bahan magnetik, seperti terlihat pada Gambar 1. Kumparan yang dihubungkan dengan sumber arus bolak-balik diberi nama kumparan primer, dan kumparan yang dihubungkan dengan beban, diberi nama kumparan sekunder.



Gambar 1. Bagan dari transformator [1]

Kumparan primer bila dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka fluks bolak-balik akan muncul dalam inti (*core*) yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup, maka mengalir arus primer. Akibat adanya fluks di kumparan primer, maka dikumparan primer terjadi induksi (*self induction*).

Selain itu, terjadi pula induksi dikumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet dikumparan sekunder, serta arus sekunder jika rangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetik).

Adapun konstruksi dari transformator terdiri dari beberapa bagian, yaitu [2]:

- i. Inti besi
- ii. Kumparan transformator
- iii. Minyak Transformator
- iv. Tangki Konservator
- v. *Brushing* (penyikat)
- vi. Peralatan bantu seperti: pendingin, relay, konservator, *dehydrating breather*, dan *tap changer*.

Rangkaian Ekuivalen Transformator merupakan rangkaian pengganti seperti yang terlihat pada Gambar 2.9, yang bisa digunakan untuk melakukan analisis terhadap kinerja trafo. Rangkaian ini dibentuk dengan menghilangkan rangkaian magnetik dari trafo, sehingga terjadilah rangkaian ekuivalen dari trafo yang lebih sederhana, yang hanya terdiri dari rangkaian elektrik saja [3].

Rugi-rugi daya transformator berupa rugi inti atau rugi besi dan rugi tembaga yang terdapat pada kumparan primer maupun kumparan sekunder. Untuk memperkecil rugi-rugi tembaga harus diambil kawat tembaga yang penampangnya cukup besar untuk mengalirkan arus listrik yang diperlukan. Pada keadaan tanpa beban, besarnya daya adalah ;

$$P = V I \cos \phi \quad (1)$$

Efisiensi menunjukkan tingkat keefisienan kerja suatu peralatan dalam hal ini transformator yang merupakan perbandingan rating output (keluaran) terhadap input (masukan) dan dinyatakan dengan persamaan dibawah ini :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (2)$$

dimana;

P_{in} : daya masukan (Watt)

P_{out} : daya keluaran (Watt)

Pembacaan ammeter pada tes hubungan terbuka menunjukkan arus nol beban nol atau arus eksitasi I_e . Karena arus eksitasi masih kecil, maka drop tegangan pada impedansi bocor diabaikan. ditulis kedalam persamaan :

$$P_c = V_1 I_e \cos \phi_0 \quad (3)$$

Jadi, tes hubungan terbuka memberikan informasi sebagai berikut [3]:

- a. Rugi inti pada tegangan rating
- b. Parameter pada cabang magnetisasi pada tegangan dan frekuensi rating, yakni R_c dan X_m
- c. Rasio transformasi dari transformator.

Tes Hubung Singkat dalam kondisi ini impedansi trafo semata-mata adalah impedansi ekuivalen. Pelaksanaan testing dengan tegangan tinggi adalah salah satu cara yang paling sesuai karena tegangan yang dipakai bisa diatur hanya beberapa persen dari tegangan rating. Pembacaan alat ukur bisa dikoreksi bila dibutuhkan. Misal V_{sc} , I_{sc} dan P_{sc} adalah pembacaan voltmeter, ammeter dan wattmeter

$$Z_{ekH} = V_{sc} / I_{sc} \quad (4)$$

$$R_{ekH} = V_{sc} / I_{sc}^2 \quad (5)$$

$$X_{ekH} = \sqrt{(Z_{ekH}^2 - R_{ekH}^2)} \quad (6)$$

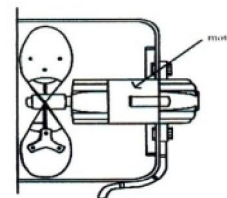
Disini R_{ekH} , X_{ekH} , Z_{ekH} berturut-turut adalah tahanan ekuivalen, reaktansi ekuivalen, dan impedansi ekuivalen ditinjau dari sisi tegangan tinggi. Parameter-parameter ini dapat juga dinyatakan dalam sisi tegangan rendah bila dikehendaki.

Analisis dari rangkaian ekuivalen trafo adalah harga dari tahanan ekuivalen dan reaktansi ekuivalen ditinjau dari sisi yang lain digunakan. Namun, bila parameter impedansi bocor untuk kedua sisi primer dan sekunder dipisahkan, maka diambil [3].

$$R_1 = R_2 = R_{ek} / 2 \quad (7)$$

$$X_1 = X_2 = X_{ek} / 2 \quad (8)$$

Kipas pendingin terdiri dari sirip-sirip yang secara langsung saling berhubungan yang ujung-ujungnya terhubung ke besi baja, seperti yang terlihat dalam Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Kipas pendingin[3]

Besar debit udara yang dibutuhkan adalah :

$$Q = \frac{P_T}{\rho C_p \Delta T} = K_0 \frac{P_T}{\Delta T} \quad (9)$$

dimana:

Q = debit aliran udara (m^3/s)

K = konstanta (berubah sesuai dengan kenaikan temperatur)

P_T = total losses (kW)

ρ = massa jenis udara (saat $T = 0^\circ C$, $\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$)

C_p = koefisien pemanasan udara [saat $T=0^{\circ}\text{C}$,
 $C_p = 1,004 \text{ kWs}/(\text{Kg.K})$
 ΔT = selisih antara temperatur minyak saat
kondisi normal

Besar daya motor dari kipas yang digunakan
untuk mendinginkan transformator, yaitu:

$$P_m = (Q \times p) / n_m \quad (10)$$

dimana :

Q = debit aliran udara (m^3/menit)

P_m = daya motor kipas (W)

p = tekanan nominal (mbar)

n_m = efisiensi motor kipas ($n_m = 0,2$)

Semakin tingginya temperatur, maka
menyebabkan semakin tinggi pula resistansi dari
trafo. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut ini
[4]:

$$R = R_0 \times [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (11)$$

dimana :

R = resistansi pada temperatur akhir

R_0 = resistansi pada temperatur awal

T = temperatur akhir

T_0 = temperatur awal

α = koefisien temperatur dari resistansi

Kenaikan temperatur minyak transformator
pada berbagai kondisi pembebanan dapat
ditentukan dengan menggunakan persamaan
berikut [5]:

$$T_{F(n)} = T_{fl} - T_a \quad (12)$$

$$T_F = T_{F(n)} \left(\left(\frac{P_T}{\text{total loss saat beban penuh}} \right)^m \right) \quad (13)$$

$$T_n = T_F - T_a \quad (14)$$

dimana:

$T_{F(n)}$ = kenaikan temperatur minyak saat
beban penuh

T_{fl} = temperatur minyak saat beban penuh

T_n = temperatur minyak akhir

T_a = temperatur lingkungan

T_F = kenaikan temperatur minyak trafo
saat terjadi pembebanan yang berubah-
ubah

m = 0,9 untuk trafo tipe ONAF

P_T = total rugi-rugi (dalam kW) pada
beban S

Nilai T_F berubah-ubah dengan beban S yang
bervariasi. Dan dengan mengetahui besar rugi
tembaga saat beban penuh dan rugi inti, maka dapat

ditentukan rugi-rugi daya saat transformator
menerima beban, dengan substitusi dari tes yang
telah ada. Besarnya PT untuk beban S dapat
diketahui dengan persamaan :

$$P_T = \left[\left(\frac{S}{kVA_{fl}} \right)^2 (P_{cu}) + (P_{fe}) \right] \quad (15)$$

dimana :

S = beban transformator (kVA)

kVA_{fl} = beban penuh (kVA)

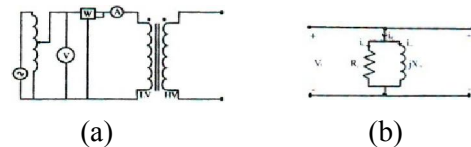
P_{cu} = rugi tembaga saat beban penuh (kW)

P_{fe} = rugi inti atau rugi tanpa beban (kW)

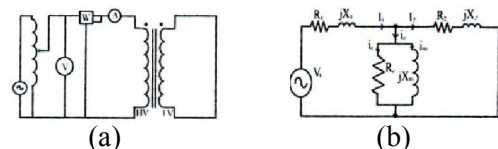
3. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan di PLTU Labuhan Angin,
Sibolga, pada hari Kamis, tanggal 26 September
2013, pukul 08.00 – 17.00 WIB untuk menghitung
nilai efisiensi sebelum diberikannya pendingin dan
setelah diberikan media pendingin udara tekan
dengan nilai pembebanan yang berbeda-beda.

Gambar 3 dan Gambar 4 merupakan
rangkaian ekivalen transformator untuk
mendapatkan nilai dari parameter-parameter
transformator yaitu :



Gambar 3. Diagram untuk tes hubungan terbuka:
(a) rangkaian untuk tes, (b) rangkaian
ekivalen untuk hubungan terbuka



Gambar 4. Diagram untuk tes hubungan tertutup:
(a) rangkaian untuk tes, (b) rangkaian
ekivalen untuk hubungan terbuka

Prosedur percobaan adalah sebagai berikut:

- i. Buatlah rangkaian seperti pada Gambar 3 dan 4.
- ii. Tentukan nilai parameter-parameter yang ada dalam rangkaian.
- iii. Saat pengoperasian normal, hitung nilai dari perubahan nilai temperatur, resistansi, arus, rugi-rugi dan efisiensi yang terjadi terhadap pembebanan variabel yang terjadi sebesar 10% - 150%.
- iv. Saat pengoperasian memakai media pendinginan udara tekan, hitung

perubahan nilai dari temperatur, resistansi, arus, rugi-rugi dan efisiensi yang terjadi terhadap pembebanan variabel yang terjadi sebesar 10% - 150%,

- v. Lakukan perbandingan dalam tabel dan bentuk grafik perubahan nilai saat pengoperasian normal dan saat diberikan media pendinginan udara tekan pada transformator

4. Hasil Penelitian Dan Pembahasan

Hasil penelitian adalah mencari nilai dari parameter-parameter yang diperlukan. Data hasil perhitungan untuk tes tanpa beban dan hubung singkat dengan persamaan (3), (4), (5), (6), (7), dan (8) didapat nilai dari parameter-parameter:

$$R_c = \frac{V_1}{I_c} = \frac{20 \text{ kV}}{0,984} = 20325 \text{ ohm}$$

$$X_m = \frac{V_1}{I_m} = \frac{20 \text{ kV}}{0,319} = 62696 \text{ ohm}$$

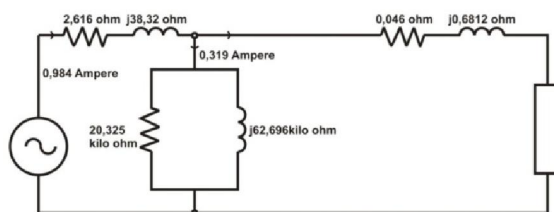
$$R_1 = a^2 x R_2 = \frac{R_{ek}}{2} = \frac{5,232}{2} = 2,616 \text{ ohm}$$

$$R_2 = \frac{R_1}{a^2} = \frac{2,616}{7,5^2} = 0,046 \text{ ohm}$$

$$X_1 = \frac{X_{ek}}{2} = \frac{76,64}{2} = 38,32 \text{ ohm}$$

$$X_2 = \frac{X_1}{a^2} = \frac{38,32}{7,5^2} = 0,6812 \text{ ohm}$$

Nilai semua parameter-parameter yang telah didapat akan terlihat dalam Gambar 5, yaitu:



Gambar 5. Rangkaian ekivalen transformator dengan parameter-parameter yang telah didapatkan dalam analisis

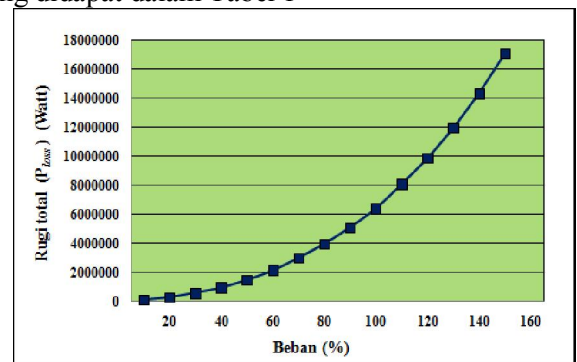
Hasil perhitungan nilai perubahan temperatur, resistansi, arus rugi-rugi dan efisiensi dicari serta dibandingkan perubahan nilai saat pengoperasian normal dari transformator dan saat diberikan media pendinginan udara tekan terhadap pembebanan variabel yang terjadi sebesar 10% – 150%. Rumus yang digunakan untuk menghitung temperatur, resistansi, rugi-rugi, dan efisiensi terhadap pembebanan yang variabel sebelum diberikan media pendinginan adalah persamaan (2), (11),

(14), dan (15). Maka akan didapat perubahan nilai rugi-rugi daya dan efisiensi saat beban berubah-ubah seperti dalam Tabel 1.

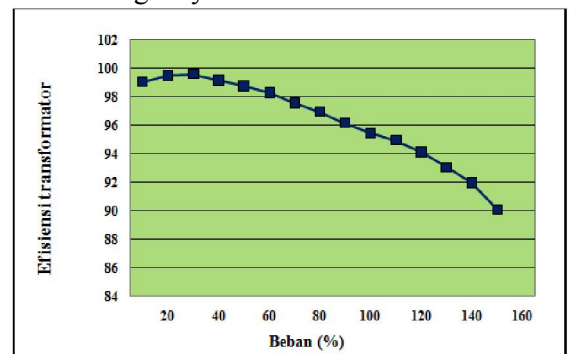
Tabel 1. Perubahan rugi-rugi daya dan efisiensi saat beban berubah-ubah

Beban (%)	P_{loss} Total (Watt)	P_{loss} Total (VA)	Stray Losses (VA)	Efisiensi (%)
10	114723,87	134969,259	98823,53	99,24
20	277150,11	326058,953	98823,53	99,46
30	554589,09	652457,753	98823,53	99,61
40	951245,79	1119112,694	98823,53	99,2
50	1475747,46	1736173,482	98823,53	98,8
60	2141325,54	2519206,518	98823,53	98,3
70	2994671,70	3523143,176	98823,53	97,6
80	3941226,27	4636736,788	98823,53	97
90	5089886,94	5988102,282	98823,53	96,2
100	6383775,57	7510324,200	98823,53	95,5
110	8056939,17	9478751,965	98823,53	95,1
120	9884540,25	11628870,880	98823,53	94,15
130	11974201,95	14087296,410	98823,53	93,1
140	14305686,57	16830219,490	98823,53	92,02
150	17059868,25	20070433,240	98823,53	90,15

Grafik perbedaan rugi-rugi dan efisiensi seperti yang dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7 yang didapat dalam Tabel 1



Gambar 6. Grafik pengaruh pembebanan terhadap rugi daya transformator



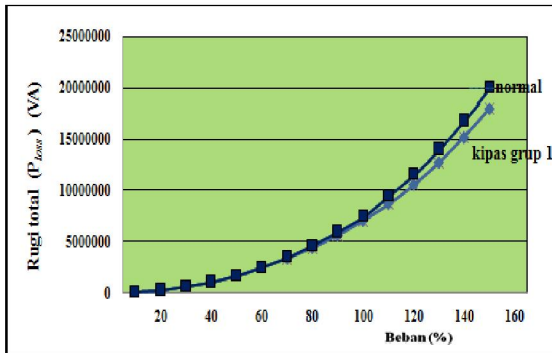
Gambar 7. Grafik pengaruh pembebanan terhadap efisiensi transformator

Perubahan nilai rugi daya total dan efisiensi saat diberikan media pendinginan udara tekan (kipas grup 1) terhadap pembebanan variabel (kipas ON saat $T_{ON} = 60^{\circ}C$ dan akan mati saat $T_{off} = 50^{\circ}C$, maka didapat dalam Tabel 2, yaitu:

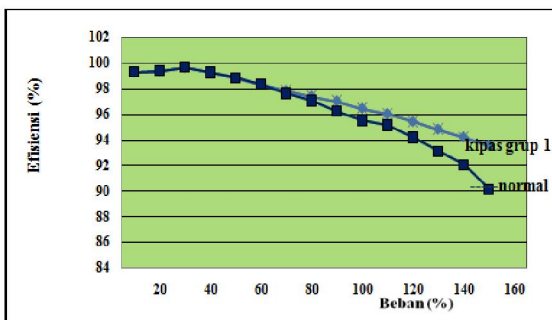
Tabel 2. Rugi daya total dan efisiensi trafo saat diberikan pendinginan oleh kipas grup pertama

Beban (%)	P_{loss} Total (Watt)	P_{loss} Total (VA)	Stray Losses (VA)	Daya Kipas (VA)	Efisiensi (%)
70	2835096,3	3335407,412	98823,53	21121,85	97,8
80	3733145,52	4391935,906	98823,53	21121,85	97,38
90	4786104,99	5630711,75	98823,53	21121,85	97
100	5998719,57	7057317,14	98823,53	21121,85	96,43
110	7402864,05	8709251,82	98823,53	21121,85	96
120	8999335,02	10587452,96	98823,53	21121,85	95,4
130	10833027,18	12744737,86	98823,53	21121,85	94,81
140	12913821,45	15192731,12	98823,53	21121,85	94,2
150	15293814,33	17992722,74	98823,53	21121,85	93,55

Tabel 2, akan didapat grafik perbedaan rugi-rugi dan efisiensi seperti yang dapat dilihat pada Gambar 8 dan 9.



Gambar 8. Perbedaan rugi-rugi saat sebelum dan sesudah diberikan pendinginan oleh kipas grup pertama.



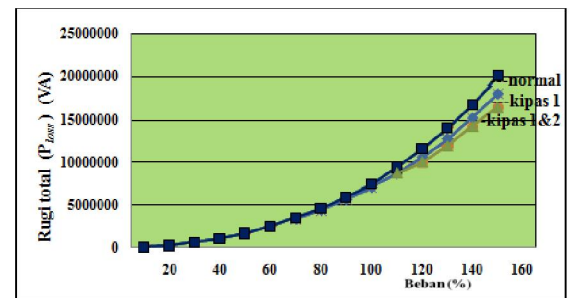
Gambar 9. Perbedaan efisiensi sebelum dan sesudah diberikan pendinginan oleh kipas grup pertama

Perubahan nilai rugi daya total dan efisiensi saat diberikan media pendinginan udara tekan (kipas grup 2) terhadap pembebanan variabel (kipas ON saat $T_{ON} = 78^{\circ}C$ dan akan mati saat $T_{off} = 60^{\circ}C$, maka didapat dalam Tabel 3, yaitu:

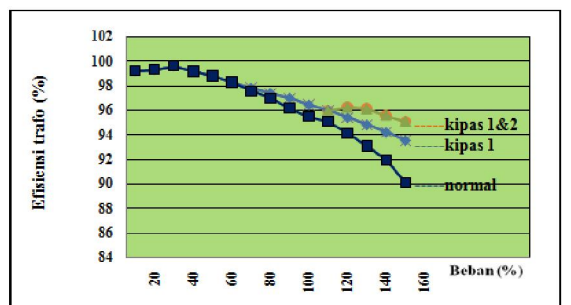
Tabel 3. Rugi daya total dan efisiensi trafo saat diberikan pendinginan oleh kipas grup pertama dan kedua

Beban (%)	P_{loss} Total (Watt)	P_{loss} Total (VA)	Stray Losses (VA)	Daya Kipas (VA)	Efisiensi (%)
120	8506643,171	10007815,5	98823,53	50709,872	96,25
130	10129830,61	11917447,78	98823,53	50709,872	96,11
140	12074635,68	14205453,74	98823,53	50709,872	95,60
150	13995990,99	16465871,75	98823,53	50709,872	95,12

Tabel 3, akan didapat grafik perbedaan rugi-rugi dan efisiensi seperti yang dapat dilihat pada Gambar 10 dan 11.



Gambar 10. Perbedaan rugi-rugi saat sebelum dan sesudah diberikan pendinginan oleh kipas grup pertama dan kedua



Gambar 11. Perbedaan efisiensi trafo saat sebelum dan sesudah diberikan pendinginan oleh kipas grup pertama dan kedua

5. Kesimpulan

Hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Resistansi suatu rangkaian ekivalen transformator dapat berubah-ubah dengan nilai yang berbanding lurus dengan perubahan temperatur. Semakin tinggi temperatur, maka resistansi juga akan semakin besar. Dibandingkan resistansi

antara tanpa beban dan saat beban penuh, didapatkan: $R_1(26,8^\circ\text{C}) = 2,616\ \Omega < R_1(75^\circ\text{C}) = 3,0976\ \Omega$; $R_2(26,8^\circ\text{C}) = 0,046\ \Omega < R_2(75^\circ\text{C}) = 0,0544\ \Omega$; dan $R_c(26,8^\circ\text{C}) = 20,325\ \text{k}\Omega < R_c(75^\circ\text{C}) = 25,223\ \text{k}\Omega$.

2. Semakin besar beban yang diterima oleh transformator, menyebabkan rugi-rugi menjadi besar dan menyebabkan temperatur dari transformator meningkat. Hal ini dapat menyebabkan rugi-rugi menjadi besar dan efisiensi dari transformator menurun. Dari analisis perhitungan didapatkan: Beban 80% ; $T_n = 70,30^\circ\text{C}$; $P_{loss} = 4636,7368\text{kVA}$; $\eta = 97\%$; beban 130% ; $T_n = 112,46^\circ\text{C}$; $P_{loss} = 14087,2964\text{kVA}$; $\eta = 93,1\%$; dan beban 150% ; $T_n = 133,78^\circ\text{C}$; $P_{loss} = 1771,61\ \text{kVA}$; $\eta = 90,15\%$.
3. Rugi-rugi daya transformator menjadi lebih kecil dan temperatur dapat terjaga dibawah batas yang diijinkan saat diberikan pendinginan. Sehingga, efisiensi transformator juga meningkat. Pada saat diberikan pendinginan, didapatkan perbandingan rugi-rugi dan efisiensi transformator: Beban 80% ; $T_n = 57,58^\circ\text{C}$; $P_{loss} = 4391,936\ \text{kVA}$; $\eta = 97,38\%$; Beban 130% ; $T_n = 67,24^\circ\text{C}$; $P_{loss} = 11917,448\ \text{kVA}$; $\eta = 96,11\%$; Beban 150% ; $T_n = 77,14^\circ\text{C}$; $P_{loss} = 1559,26\ \text{kVA}$; $\eta = 95,12\%$
4. Dengan menjaga temperatur di bawah batas yang diizinkan, maka transformator dapat dibebani lebih besar, bahkan sanggup lebih dari 150%.

6. Daftar Pustaka

- [1] Abdul Kadir, Transformator, Jakarta: PT. Elex Media Komputindo, 1989.
- [2] <http://id.wikipedia.org/wiki/Transformator>
- [3] Soebagio, Transformator, Surabaya: ITS, 2009.
- [4] Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, Bandung: ITB, 1991.
- [5] *Osaka Transformer Co.LTD manual book*, Osaka: *Osaka Transformer Company*, 1981.