

Analisis Kenaikan Suhu Pada Transformator Daya dengan Sistem Pendingin Oil Natural Air Natural (ONAN)

Abeth Sonjaya^{1*}, Rizki Aldino¹, Sri Wiji Lestari², Yeti Widyawati³

¹ Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Jayabaya, Jakarta, 16452, Indonesia

² Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Jayabaya, Jakarta, 16452, Indonesia

³ Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Jayabaya, Jakarta, 16452, Indonesia

*Email Corresponding Author: abethw21@gmail.com

ABSTRAK

Desain termal transformator berpendingin oli, umumnya dilakukan dengan metode persamaan empiris dan faktor keamanan yang besar. Dikarenakan penggunaan faktor keamanan yang cukup besar, maka seringkali hasil uji kenaikan suhu jauh lebih kecil dibandingkan suhu rancangan. Hal ini tentunya tidak efisien karena penggunaan pendingin yang berlebih. Sehingga transformator daya dengan sistem pendingin Oil Natural Air Natural (ONAN) perlu diprediksi kenaikan suhunya. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan prediksi suhu top oli, winding dan hotspot yang akurat sesuai hasil temperature rise test dan mendapat komparasi yang baik dari metode perhitungan empiris yang dipakai terhadap aplikasi koelvt dan radkoel. Dari hasil perhitungan numerik diprediksi average oil temperature rise ($\Delta\theta_{oac}$) sebesar 38,662°C, top oil temperature rise ($\Delta\theta_{om}$) sebesar 49,463°C, winding temperature rise ($\Delta\theta_w$) sebesar 54,662°C, dan diperoleh toleransi 1.72% terhadap uji kenaikan suhu. Sedangkan hasil perhitungan Radkoel mempunyai toleransi 5.96% terhadap hasil uji kenaikan suhu.

Kata kunci: ONAN; suhu winding; suhu oli; suhu top oli; suhu hot spot; transformator daya

ABSTRACT

Thermal design of oil-cooled transformers, generally carried out by the method of empirical equations and a large safety factor. Due to the use of a large enough safety factor, the temperature rise test results are often much smaller than the design temperature. This is certainly inefficient due to the use of excess coolant. So that power transformers with Oil Natural Air Natural (ONAN) cooling systems need to be predicted for temperature rise. This study aims to obtain accurate predictions of top oil, winding and hotspot temperatures according to the results of temperature rise tests and get a good comparison of the empirical calculation methods used against koelvt and radkoel applications. From the results of numerical calculations predicted average oil temperature rise ($\Delta\theta_{oac}$) of 38.662°C, top oil temperature rise ($\Delta\theta_{om}$) of 49.463°C, winding temperature rise ($\Delta\theta_w$) of 54.662°C, and obtained a tolerance of 1.72% to the temperature rise test. While the Radkoel calculation results have a tolerance of 5.96% to the temperature rise test results.

Keywords: hot spot temperature; oil temperature; ONAN; power transformers; top oil temperature; winding temperature

PENDAHULUAN

Dalam mendesain sebuah transformator umumnya mempunyai masalah mengenai termal, elektrik dan hidrolis. Dalam hal ini terjadi fenomena fisika yaitu pemanasan dan pendinginan pada transformator saat beroperasi. dimana oli sebagai *oil immersed transformers*, yaitu fungsi tambahan oli sebagai isolator dan sebagai media *heat exchanger*, yaitu sebagai media untuk perpindahan panas. yang ditimbulkan oleh inti dan belitan yang kemudian didinginkan oleh radiator, yang disebut juga *compact oil air cooling*. Pada sistem pendinginan trafo dengan oli terdiri dari beberapa konfigurasi dan model, yaitu transformator daya pada umumnya adalah transformator yang berukuran besar, sehingga

diperlukan sistem pendinginan transformator yang lebih baik dibanding jenis tranformator lainnya. Beberapa penelitian menyelidiki suhu titik panas transformator terendam oli dengan mempertimbangkan mode pendinginan yang berbeda, yaitu, mode pendinginan *oil natural air natural* (ONAN), *oil natural air forced* (ONAF), *oil forced air forced* (OFAF), dan mode pendinginan *oil directed air forced* (ODAF) [1]. Dalam Umumnya media pendingin yang digunakan pada transformator daya berukuran besar adalah oli. Fungsi oli pada transformator daya selain sebagai media pendingin juga sebagai media isolasi. Salah satu tes yang digaransikan untuk transformator daya adalah *temperature rise test*. Dengan adanya garansi ini, maka kenaikan suhu pada transformator dibatasi sesuai dengan standar yang berlaku. Batasan-batasan tersebut

dapat berbeda antara standar yang satu dengan standar yang lain. Dengan adanya batasan *temperature rise*, maka dalam mendesain transformator daya perlu diperhatikan desain termal dan pendingin yang dibutuhkan untuk menjaga agar *temperature rise* transformator tidak melebihi garansi yang ditetapkan.

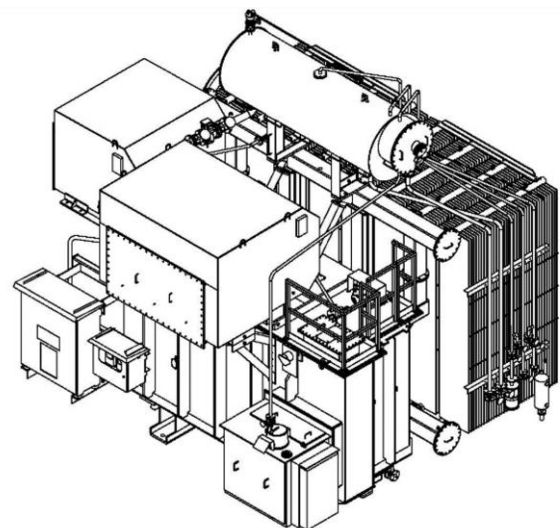
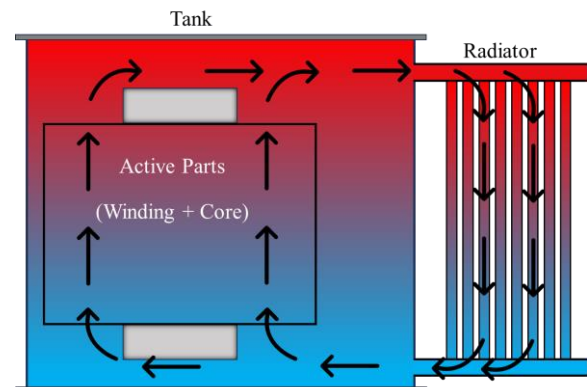
Desain termal pada transformator daya berpendingin oli pada umumnya diselesaikan dengan menggunakan metode persamaan empiris. Meskipun metode tersebut menyajikan desain yang cukup handal dan aman, metode tersebut memiliki batasan dan faktor keamanan yang cukup besar dalam rangka untuk mempertanggung jawabkan berbagai perkiraan yang akan terjadi, khususnya ketika mengembangkan desain baru. Dikarenakan penggunaan faktor keamanan yang cukup besar, maka seringkali hasil *temperature rise test* jauh lebih dingin dibandingkan hasil perhitungan. Hal ini tentunya tidak efisien karena penggunaan pendingin yang berlebih [2].

Oil Natural Air Natural (ONAN) artinya transformator daya ini menggunakan media pendingin internal oli mineral atau isolasi cair sintetis dengan titik api ≤ 300 °C, sedangkan mekanisme sirkulasi media pendingin internalnya mengalir secara natural melalui peralatan pendingin dan kumparan dimana volume yang ditempati oleh fluida, di mana wilayah yang ditempati oleh belitan dianggap sebagai berpori homogen media [3]. Media pendingin eksternal dari transformator daya tipe ini menggunakan udara dan bersirkulasi secara konveksi natural [4][5][6]. Dalam transformator yang direndam dengan oli, oli berfungsi sebagai media pendingin dan media isolasi. Untuk itu oli transformator harus memenuhi persyaratan sebagai berikut: kekuatan isolasi tinggi, penyalur panas yang baik dengan berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel dalam oli dapat mengendap dengan cepat, viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik, titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yang dapat membahayakan, tidak merusak bahan isolasi padat, sifat kimia yang stabil, dan pengujian tegangan tembus oli [7]. Pengujian tegangan tembus oli dimaksudkan untuk mengetahui kemampuan dielektrik oli. Hal ini dilakukan karena selain berfungsi sebagai pendingin dari trafo, oli juga berfungsi sebagai isolasi. Dikarenakan penggunaan faktor keamanan yang cukup besar, maka seringkali hasil uji kenaikan suhu jauh lebih kecil dibandingkan suhu rancangan. Hal ini tentunya tidak efisien karena penggunaan pendingin yang berlebih. Sehingga transformator daya dengan sistem pendingin Oil Natural Air Natural (ONAN) perlu diprediksi kenaikan suhunya. Penelitian ini bertujuan untuk

mendapatkan prediksi suhu *top oli*, *winding* dan *hotspot* yang akurat sesuai hasil *temperature rise test* dan mendapat komparasi yang baik dari metode perhitungan empiris yang dipakai terhadap aplikasi Koelvt dan Radkoel.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini akan mencoba menganalisis konsep umum dan fenomena yang berhubungan dengan sistem pendingin pada transformator daya secara teoritis dan membandingkan hasil perhitungan yang didapat dengan perhitungan program *Radkoel* yang selama ini digunakan dan hasil pengukuran aktual dari *temperature rise test*. Skema sistem pendingin pada transformator daya ONAN dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Skema pendinginan ONAN

Prosedur perhitungan prediksi kenaikan suhu transformator adalah sebagai berikut [8]:

1. Menghitung total rugi-rugi yang timbul dalam transformator (Q). Total rugi-rugi

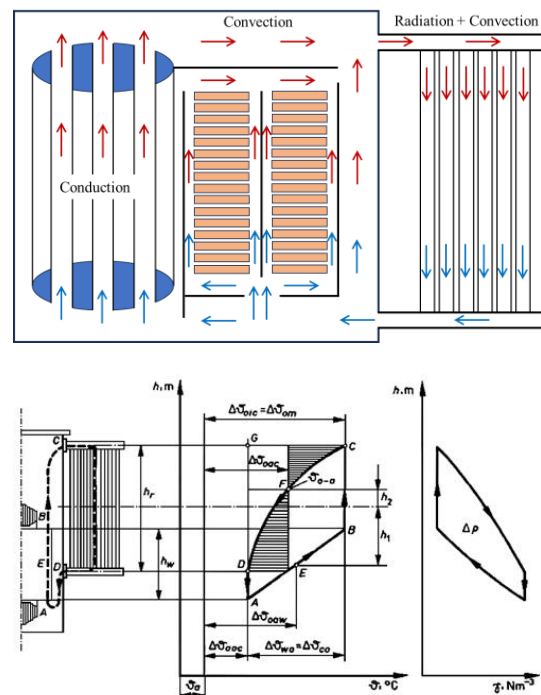
- yang timbul dapat diketahui dari kalkulasi desain elektrikal.
2. Menentukan gradien ($\Delta\vartheta_{w-o}$) antara suhu rata-rata winding (ϑ_w), dan suhu rata-rata oli di winding (ϑ_{ow}). Gradien dapat diketahui dari kalkulasi desain elektrikal dan diambil nilai gradien tertinggi sebagai acuan perhitungan.
 3. Menentukan nilai maksimum kenaikan suhu top oli ($\Delta\vartheta_{om}$) sesuai dengan spesifikasi transformator atau standar yang jadi acuan.
 4. Menentukan nilai maksimum rata-rata kenaikan suhu winding ($\Delta\vartheta_w$) sesuai dengan spesifikasi transformator atau standar yang jadi acuan.
 5. Menentukan nilai maksimum kenaikan suhu hot spot ($\Delta\vartheta_c$) sesuai dengan spesifikasi transformator atau standar yang jadi acuan.
 6. Menentukan nilai Hot Spot Factor (HSF). Nilai ini dapat diketahui dari kalkulasi desain elektrikal. Kemudian periksa kembali nilai maksimum kenaikan suhu top oli ($\Delta\vartheta_{om}$). Jika $\Delta\vartheta_{om} < (\Delta\vartheta_c - \text{HSF} \times \Delta\vartheta_{w-o})$ maka $\Delta\vartheta_{om} = \Delta\vartheta_{om}$; Jika $\Delta\vartheta_{om} > (\Delta\vartheta_c - \text{HSF} \times \Delta\vartheta_{w-o})$ maka $\Delta\vartheta_{om} = (\Delta\vartheta_c - \text{HSF} \times \Delta\vartheta_{w-o})$
 7. Menghitung rata-rata kenaikan suhu oli ($\Delta\vartheta_{oac}$) dengan persamaan.
 8. Memperkirakan kenaikan suhu dari bawah ke atas winding ($\Delta\vartheta_{wo}$).
 9. Menghitung pelepasan panas berdasarkan kesetimbangan energi
 10. Menghitung total perpindahan panas konveksi yang terjadi pada tangki didapat dari konveksi mantel tangki dan konveksi top cover.
 11. Menghitung total perpindahan panas radiasi pada tangki bisa diperoleh melalui perhitungan radiasi mantel tangki dan daerah top cover.
 12. Menghitung panas yang harus dilepaskan oleh radiator ($Q_{radiator}$).
 13. Merancang luas permukaan radiator yang dibutuhkan ($A_{radiator_required}$). Total luas permukaan radiator yang dibutuhkan berdasarkan panas yang harus dilepaskan.
 14. Menentukan jumlah radiator (n_{rad}), jumlah elemen (n_{el}), dan ukuran radiator ($L_R; W_R$) yang akan digunakan, kemudian hitung total luas permukaan radiator ($A_{radiator_design}$). Lalu periksa kembali apakah luas permukaan yang dibutuhkan terpenuhi.
 15. Menghitung penurunan tekanan yang terjadi di winding (Δp_w) dan radiator (Δp_r).
 16. Menghitung tekanan (Δp) yang diperoleh dari perputaran suhu (temperature loop).
 17. Memeriksa tekanan (Δp) terhadap kesetimbangan tekanan..
 18. Menghitung ulang berdasarkan kesetimbangan energi. Kesetimbangan energi

dihitung berdasarkan komputasi numerik untuk mempermudah dan mempercepat perhitungan.

19. Hingga didapatkan persamaan yang setimbang dan nilai $\Delta\vartheta_{ow}$ diketahui.
20. Hingga kesetimbangan energi terpenuhi, maka didapat nilai $\Delta\vartheta_{ow}$ dan $\Delta\vartheta_{om}$. Setelah didapat nilai $\Delta\vartheta_{ow}$ dan $\Delta\vartheta_{om}$ maka nilai $\Delta\vartheta_w$ dan $\Delta\vartheta_c$ dapat diketahui.
21. Hasil akhir perhitungan adalah $\Delta\vartheta_w$; $\Delta\vartheta_{ow}$; $\Delta\vartheta_{om}$; $\Delta\vartheta_c$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Diagram pendinginan pada Gambar 2 sebagai bahan untuk menjelaskan bentuk aliran pendinginan oli dalam tangki transformator yang terdapat inti dan kumparan (active part) sebagai sumber panas dan mengalir ke bagian luar, yaitu radiator sebagai pendingin dan pembuang panas.



Gambar 2 Skema dan diagram pendingin ONAN [9]

Sepanjang garis vertikal A-B pada kumparan, terjadi perpindahan panas P dari kumparan ke oli menyebabkan kenaikan suhu oli sebesar $\Delta\vartheta_{wo}$, rata-rata panas spesifik (mean heat specific - c) dan aliran masa oli (oil mass flow - Φ). Sehingga terjadi penurunan suhu pada kumparan (winding), oli panas mengalir ke bagian atas dan dibagian bawah diganti dengan oli yang lebih dingin. Oli panas masuk ke bagian C pada radiator, terjadi disipasi panas P dan oli dingin turun ke bagian

bawah, hal ini menyebabkan nilai spesifik gravitasi meningkat dan keluar dari radiator pada bagian D. Kemudian oli yang telah dingin masuk kembali ke kumparan pada bagian A, sirkulasi ini terjadi berulang terus menerus.

Tabel 1. Sifat fisik oli transformator [9]

Temp.	Density	Specific heat	Thermal Conductivity	Coefficient of thermal expansion	Kinematic viscosity	Temp. distribution coefficient	Prandtl number
T °C	ρ kg/m ³	c_p W s kg ⁻¹ °C ⁻¹	γ W m ⁻¹ °C ⁻¹	β °C ⁻¹	ν m ² s ⁻¹	α m ² s ⁻¹	Pr
-15	902	1700	0,1341	6,20x10 ⁻⁴	450x10 ⁻⁶	8,758x10 ⁻⁸	5130
-10	899	1720	0,1337	6,35x10 ⁻⁴	290x10 ⁻⁶	8,663x10 ⁻⁸	3340
-5	896	1740	0,1333	6,40x10 ⁻⁴	180x10 ⁻⁶	8,568x10 ⁻⁸	2100
0	893	1764	0,1330	6,55x10 ⁻⁴	120x10 ⁻⁶	8,453x10 ⁻⁸	1419
5	890	1785	0,1326	6,70x10 ⁻⁴	85x10 ⁻⁶	8,359x10 ⁻⁸	1016
10	887	1805	0,1322	6,80x10 ⁻⁴	62x10 ⁻⁶	8,270x10 ⁻⁸	749
15	884	1825	0,1318	6,90x10 ⁻⁴	45x10 ⁻⁶	8,182x10 ⁻⁸	549
20	882	1848	0,1314	7,00x10 ⁻⁴	35x10 ⁻⁶	8,074x10 ⁻⁸	433
25	879	1870	0,1310	7,15x10 ⁻⁴	27x10 ⁻⁶	7,989x10 ⁻⁸	337
30	876	1890	0,1306	7,25x10 ⁻⁴	21x10 ⁻⁶	7,906x10 ⁻⁸	265
35	873	1910	0,1303	7,40x10 ⁻⁴	17x10 ⁻⁶	7,823x10 ⁻⁸	217
40	870	1930	0,1299	7,50x10 ⁻⁴	14x10 ⁻⁶	7,742x10 ⁻⁸	180
45	867	1950	0,1295	7,65x10 ⁻⁴	11,5x10 ⁻⁶	7,662x10 ⁻⁸	150
50	864	1975	0,1291	7,75x10 ⁻⁴	9,7x10 ⁻⁶	7,583x10 ⁻⁸	127
55	861	1995	0,1287	7,80x10 ⁻⁴	8,2x10 ⁻⁶	7,524x10 ⁻⁸	108
60	858	2015	0,1283	7,90x10 ⁻⁴	7,0x10 ⁻⁶	7,447x10 ⁻⁸	93,9
65	855	2040	0,1280	7,90x10 ⁻⁴	6,1x10 ⁻⁶	7,371x10 ⁻⁸	82,7
70	852	2060	0,1276	7,95x10 ⁻⁴	5,4x10 ⁻⁶	7,297x10 ⁻⁸	74
75	849	2080	0,1272	7,95x10 ⁻⁴	4,7x10 ⁻⁶	7,223x10 ⁻⁸	65
80	847	2100	0,1268	7,95x10 ⁻⁴	4,2x10 ⁻⁶	7,151x10 ⁻⁸	58,7
85	844	2120	0,1264	8,00x10 ⁻⁴	3,8x10 ⁻⁶	7,079x10 ⁻⁸	53,6
90	841	2140	0,1260	8,00x10 ⁻⁴	3,5x10 ⁻⁶	7,025x10 ⁻⁸	49,8
95	838	2160	0,1257	8,00x10 ⁻⁴	3,2x10 ⁻⁶	6,955x10 ⁻⁸	46
100	835	2180	0,1253	8,00x10 ⁻⁴	3,0x10 ⁻⁶	6,887x10 ⁻⁸	43,5

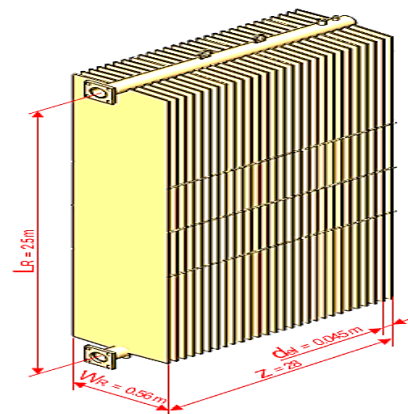
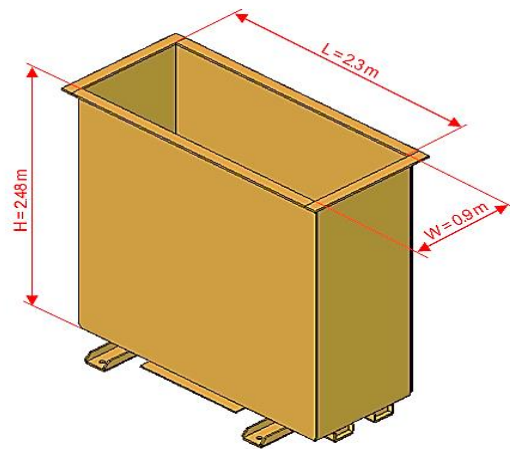
Proses perpindahan panas pada transformator yang direndam oli melibatkan tiga mekanisme perpindahan panas yang berbeda, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Proses konduksi melibatkan perpindahan panas antara bagian padat, sedangkan proses konveksi melibatkan perpindahan panas antara permukaan padat ke fluida atau sebaliknya. Perpindahan panas oleh radiasi adalah antara benda padat atau fluida ke suhu lingkungan sekitarnya. Mekanisme perpindahan panas yang paling penting dalam transformator yang direndam oli adalah melalui konveksi.

Tabel Error! No text of specified style in document.. Nilai fungsi $\frac{v(\vartheta)}{\vartheta - \vartheta_a}$ untuk viskositas axial [9]

Suhu	$\frac{v(\vartheta)}{\vartheta - 10^\circ\text{C}} \times 10^6$	$\frac{v(\vartheta)}{\vartheta - 20^\circ\text{C}} \times 10^6$	$\frac{v(\vartheta)}{\vartheta - 30^\circ\text{C}} \times 10^6$
$T, ^\circ\text{C}$	$\text{m}^2\text{s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$\text{m}^2\text{s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$\text{m}^2\text{s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
25	1,8	-	-
30	1,05	2,1	-
35	0,68	1,132	3,4
40	0,467	0,7	1,4
45	-	-	0,765
50	0,243	0,323	0,485

Suhu	$\frac{v(\vartheta)}{\vartheta - 10^\circ\text{C}} \times 10^6$	$\frac{v(\vartheta)}{\vartheta - 20^\circ\text{C}} \times 10^6$	$\frac{v(\vartheta)}{\vartheta - 30^\circ\text{C}} \times 10^6$
$T, ^\circ\text{C}$	$\text{m}^2\text{s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$\text{m}^2\text{s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$\text{m}^2\text{s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
60	0,14	0,175	0,233
70	0,09	0,118	0,135
80	0,06	0,07	0,084
90	0,0437	0,05	0,0583
100	0,0333	0,0376	0,0428

Transformator yang akan dijadikan studi kasus adalah transformator dengan data dimensi tangki sebagai berikut; Panjang (L) 2300 mm, Lebar (W) 900 mm, dan Tinggi (H) 2480 mm.



Gambar 3. Dimensi tangki dan radiator

Tabel 3. Data properti dimensi dan elektikal

Properti	Satuan	Nilai
Dimensi active part		
Window height (WH)	mm	1555
Tinggi stack inti (BP)	mm	390
Jarak inti ke dasar tangki (BB)	mm	30
Jarak top cover ke top radiator (TT)	mm	360
Tinggi kumparan (HW)	mm	1413
Diameter kumparan (DM)	mm	715
Jumlah kaki inti (n_{legs})		3
Lebar saluran kumparan (w_{ducts})	mm	4
Properti Radiator		

Properti	Satuan	Nilai
Jumlah radiator (n)		7
Jumlah elemen (z)		28
Jarak elemen (d_{ei})	mm	45
Jarak center-center (L_R)	mm	2500
Lebar radiator (W_R)	mm	560
Data elektrik		
Kapasitas daya transformator dalam kondisi $ONAN$ (P)	MVA	18
Total $losses$ (rugi-rugi) dalam kondisi $ONAN$ (Q)	kW	114
Gradien kumparan maksimum dalam kondisi $ONAN$ ($\Delta\vartheta_{w-o}$)	$^{\circ}C$	16
Batas kenaikan suhu top oli ($\Delta\vartheta_{om}$)	$^{\circ}C$	53
Batas kenaikan suhu rata-rata kumparan ($\Delta\vartheta_w$)	$^{\circ}C$	58
Batas kenaikan suhu $hot\ spot$ ($\Delta\vartheta_c$)	$^{\circ}C$	71
$Hot\ spot\ factor$ (HSF)		1,3

Prosedur perhitungan menggunakan rumus perhitungan yang telah dijelaskan.

- Total $losses$ (Q) pada transformator 114 kW.
- Gradien ($\Delta\vartheta_{w-o}$) antara suhu rata-rata winding (ϑ_w), dan suhu rata-rata oli di winding (ϑ_{ow}). Diambil nilai gradien tertinggi sebagai acuan perhitungan adalah $16^{\circ}C$.
- Nilai maksimum kenaikan suhu top oli ($\Delta\vartheta_{om}$) = $53^{\circ}C$
- Nilai maksimum rata-rata kenaikan suhu winding ($\Delta\vartheta_w$) = $58^{\circ}C$
- Nilai maksimum kenaikan suhu $hot\ spot$ ($\Delta\vartheta_c$) = $71^{\circ}C$
- Koefisien $hot\ spot$ = 1,3. Periksa kembali nilai maksimum kenaikan suhu top oli ($\Delta\vartheta_{om}$). Karena $53^{\circ}C > (71^{\circ}C - 1,3 \times 16^{\circ}C)$, maka $\Delta\vartheta_{om} = (\Delta\vartheta_c - HSF \times \Delta\vartheta_{w-o}) = 50,2^{\circ}C$
 $\Delta\vartheta_{om}$ ini masih berupa asumsi awal berdasarkan nilai batasan $\Delta\vartheta_c$ maksimum. Nilai ΔT_{om} akan dikoreksi kembali berdasarkan nilai $\Delta\vartheta_{oac}$ terakhir.
- Hitung rata-rata kenaikan suhu oli ($\Delta\vartheta_{oac}$)
 $\Delta\vartheta_{oac} = \Delta\vartheta_w - \Delta\vartheta_{w-o} = 58^{\circ}C - 16^{\circ}C = 42^{\circ}C$
 $\Delta\vartheta_{oac}$ ini masih berupa asumsi awal berdasarkan nilai batasan $\Delta\vartheta_w$ maksimum. Nilai $\Delta\vartheta_{oac}$ akan dikoreksi kembali hingga memenuhi kesetimbangan energi;

$$Q_{losses} = Q_{(convection+radiation)tank} + Q_{radiator}$$

Panas yang dilepaskan oleh tangki berdasarkan $\Delta\vartheta_{oac}$ dimana suhu lingkungan = $30^{\circ}C$

Luas mantel tangki;

$$A_{mantle} = 2 \times (L + W) \times H = 15872000 \text{ mm}^2 = 15,872 \text{ m}^2$$

Luas cover tangki;

$$A_{cover} = L \times W = 2070000 \text{ mm}^2 = 2,07 \text{ m}^2$$

Konveksi

$$Q_c = Q_{c.mantle} + Q_{c.top}$$

$$Q_c = [1,5248 \times (\Delta\vartheta_{oac})^{1,3219} \times A_{mantle}] + [1,5248 \times (\Delta\vartheta_{om})^{1,3219} \times A_{cover}]$$

$$Q_c = [(1,5248 \times 42^{1,3219})W.m^{-2} \times 15,872 \text{ m}^2] + [(1,5248 \times 50,2^{1,3219})W.m^{-2} \times 2,07 \text{ m}^2]$$

$$Q_c = 3944,373 \text{ W}$$

Radiasi

$$Q_r = Q_{r.mantle} + Q_{r.top}$$

$$Q_r = (5,67 \times 10^{-8} \times ((237 + \vartheta_a + \Delta\vartheta_{oac})^4 - (273 + \vartheta_a)^4) \times A_{mantle}) + (5,67 \times 10^{-8} \times ((237 + \vartheta_a + \Delta\vartheta_{om})^4 - (273 + \vartheta_a)^4) \times A_{cover})$$

$$Q_r = (5,67 \times 10^{-8} \times ((237 + 30 + 42)^4 - (273 + 30)^4)W.m) \times 15,872 \text{ m}^2 + (5,67 \times 10^{-8} \times ((237 + 30 + 50,2)^4 - (273 + 30)^4)W.m) \times 2,07 \text{ m}^2$$

$$Q_r = 6001,2 \text{ W}$$

- Panas yang harus dilepaskan oleh radiator;

$$Q_{losses} = Q_{(convection+rad)tank} + Q_{radiator}$$

$$Q_{radiator} = Q_{losses} - Q_{(convection+rad)tank}$$

$$Q_{radiator} = 114000 - (3944,37 + 6001,20) = 104054,43 \text{ W}$$

- Total minimum luas permukaan radiator yang dibutuhkan;

$$A_{radiator_required} = \frac{Q_{radiator}}{q_c \times \Delta\vartheta_{oac}}$$

$$= \frac{104054,427 \text{ W}}{(1,5248 \times (42)^{1,3219})W.m^{-2}}$$

$$= 487,836 \text{ m}^2$$

- Total luas permukaan radiator yang akan digunakan;

$$A_{radiator_design} = n_{rad} \times n_{el} \times 2 \times L_r \times W_R = 7 \times 28 \times 2 \times 2,5 \times 0,56 = 548,8 \text{ m}^2$$

$A_{radiator_design} > A_{radiator_required}$; artinya radiator yang dipilih telah memenuhi syarat luas permukaan minimum.

- Perbedaan suhu antara inlet pendingin dan outlet pendingin

$$q = h \times \Delta\vartheta; \text{ atau } \Delta\vartheta = \frac{q}{h}; \text{ atau } \Delta\vartheta_{co} = \frac{q}{h}$$

$$q = \frac{Q}{\pi \times DM \times HW \times n_{legs}}$$

$$= \frac{114000 \text{ W}}{\pi \times 0,715 \text{ m} \times 1,413 \text{ m} \times 3} = 11972,52 \text{ W/m}^2$$

$$\Delta\vartheta_{co} = \frac{11972,52 \text{ W/m}^2}{554,232 \text{ W/m}^2 \text{ } ^{\circ}C} = 21,602^{\circ}C$$

- Pelepasan panas berdasarkan radiator yang akan digunakan

$$Q_{last} = (1,5248 \times (\Delta\vartheta_{oac})^{1,3219} \times A_{radiator})$$

$$\begin{aligned}
& +5,67 \times 10^{-8} \times 0,95 \\
& \times ((273 + T_a + \Delta T_{oac} + 0,5 \times \Delta \vartheta_{co})^4 \\
& - (273 + T_a)^4) \times (n_{el} - 1) \times d_{el} \times W_R \\
& +5,67 \times 10^{-8} \times 0,95 \\
& \times ((273 + \vartheta_a + \Delta \vartheta_{oac})^4 - (273 + \vartheta_a)^4) \\
& \times A_{mantle} + 5,67 \times 10^{-8} \times 0,95 \\
& \times (273 + \vartheta_a + \Delta \vartheta_{oac} + 0,5 \times \Delta \vartheta_{co})^4 \\
& - (273 + \vartheta_a)^4 \times A_{cover} \\
& + (1,5248 \times (\Delta \vartheta_{oac})^{1,3219} \times A_{mantle}) \\
& + (1,5248 \times (\Delta \vartheta_{oac} + 0,5 \times \Delta \vartheta_{co})^{1,3219} \\
& \times A_{cover} \\
Q_{last} & = (1,5248 \times 42^{1,3219} \times 548,8) \\
& + 5,67 \times 10^{-8} \times 0,95 \\
& \times ((273 + 30 + 42 + 0,5 \times 21,602)^4 \\
& - (273 + 30)^4) \\
& \times (28 - 1) \times 0,045 \times 0,56 + 5,67 \times 10^{-8} \\
& \times 0,95 \times ((273 + 30 + 42)^4 \\
& - (273 + 30)^4) \\
& \times 15,872 + 5,67 \times 10^{-8} \times 0,95 \\
& \times (((273 + 30 + 42 + 0,5 \times 21,602)^4 \\
& - (273 + 30)^4)) \\
& \times 2,07 + (1,5248 \times (42)^{1,3219} \times 15872) \\
& + (1,5248 \times (42 + 0,5 \times 21,602)^{1,3219} \\
& \times 2,07 \\
Q_{last} & = 127071,9913 \text{ W}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Rasio} & = \text{Nilai absolut} \frac{(Q_{last} - Q)}{Q} \\
& = \frac{127071,9913 - 114000}{114000} \\
& = 0,1147
\end{aligned}$$

Agar tercapai kondisi setimbang, rasio harus $\leq 0,0001$ nilai absolut, diimana nilai rasio yang dicapai adalah $0,1147 > 0,0001$, berarti belum tercapai kesetimbangan. Maka dilakukan perhitungan ulang:

$$\begin{aligned}
Q_{radlast} & = (1,5248 \times (\Delta \vartheta_{oac})^{1,3219} \\
& \times A_{radlast} + 5,67 \times 10^{-8} \times 0,95 \times \\
& ((273 + \vartheta_a + (\Delta \vartheta_{oac} + 0,5 \times \Delta \vartheta_{co}))^4 \\
& - (273 + \vartheta_a)^4) \times (n_{el} - 1) \times d_{el} \times W_R \\
Q_{tankradlast} & = 5,67 \times 10^{-8} \times 0,95 \\
& \times ((273 + T_a + \Delta T_{oac})^4 - (273 + \vartheta_a)^4) \\
& \times A_{mantle} + 5,67 \times 10^{-8} \times 0,95 \\
& \times ((273 + \vartheta_a + \Delta \vartheta_{oac} + 0,5 \times \Delta \vartheta_{co})^4 \\
& - (273 + \vartheta_a)^4) \times A_{cover} \\
Q_{tankconvlast} & = (1,5248 \times (\Delta \vartheta_{oac})^{1,3219} \\
& \times A_{mantle}) \\
& + (1,5248 \times (\Delta \vartheta_{oac} + 0,5 \times \Delta \vartheta_{co})^{1,3219} \\
& \times A_{cover}
\end{aligned}$$

Hingga tercapai kondisi setimbang dan didapat nilai ΔT_{oac} pada kondisi setimbang:

$$Q_{last} = Q_{radlast} + Q_{tankradlast} + Q_{tankconvlast}$$

$Q_{last} \approx Q$; dimana nilai ΔT_{oac} setelah melalui proses iterasi menggunakan komputasi numerik:
 $\Delta \vartheta_{oac} = 38,662 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned}
Q_{last} & = (1,5248 \times (38,662)^{1,3219} \times 548,8) \\
& + 5,67 \times 10^{-8} \times 0,95 \\
& \times ((273 + 30 + 38,662 + 0,5 \times 21,602)^4 \\
& - (273 + 30)^4) \\
& \times (28 - 1) \times 0,045 \times 0,56 + 5,67 \times 10^{-8} \\
& \times 0,95 \times ((273 + 30 + 38,662)^4 \\
& - (273 + 30)^4) \\
& \times 15,872 + 5,67 \times 10^{-8} \times 0,95 \\
& \times (((273 + 30 + 38,662 + 0,5 \times 21,602)^4 \\
& - (273 + 30)^4)) \\
& \times 2,07 + (1,5248 \times (38,662)^{1,3219} \times 15872) \\
& + (1,5248 \times (38,662 + 0,5 \times 21,602)^{1,3219} \\
& \times 2,07 \\
Q_{last} & = 114005,087 \text{ W}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Rasio} & = \text{Nilai absolut} \frac{(Q_{last} - Q)}{Q} \\
& = \frac{114005,087 - 114000}{114000} \\
& = 0,00004
\end{aligned}$$

Nilai rasio yang dicapai adalah $0,00004 \leq 0,0001$; maka $Q_{last} \approx Q$ (terpenuhi)

13. Kesetimbangan tekanan

$$\Delta \vartheta_{oac} = 38,662 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned}
\gamma_{38,662} & = \rho_{38,662} g \\
& = 871,2 \text{ kg.m}^{-3} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \\
& = 8546,472 \text{ N.m}^{-3}
\end{aligned}$$

$$\beta_{38,662} = 7,46 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\begin{aligned}
\gamma_{38,662} \beta_{38,662} & = 8546,472 \text{ N.m}^{-3} \times 7,46 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \\
& = 6,375 \text{ N.m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}
\end{aligned}$$

$$\Delta \vartheta_{oic} = \Delta \vartheta_{oac} + 0,5 \times \Delta \vartheta_{co}$$

$$\Delta \vartheta_{oic} = 38,662 \text{ } ^\circ\text{C} + 0,5 \times 21,602 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta \vartheta_{oic} = 49,463 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned}
\Delta \vartheta_{o-a} & = \frac{\Delta \vartheta_{co}}{\ln \frac{1}{1 - \frac{\Delta \vartheta_{co}}{\Delta \vartheta_{oic}}}} = \frac{21,602 \text{ } ^\circ\text{C}}{\ln \frac{1}{1 - \frac{21,602 \text{ } ^\circ\text{C}}{49,463 \text{ } ^\circ\text{C}}}} \\
& = 37,634 \text{ } ^\circ\text{C}
\end{aligned}$$

$$\vartheta = h_l \Delta \vartheta_{co} + h_r (\Delta \vartheta_{oic} - \Delta \vartheta_{o-a} - 0,5 \Delta \vartheta_{co})$$

$$h_l = (H + TT - 0,5 \times L_R) - (BB + BP + 0,5 \times WH)$$

$$= ((2,48 + 0,36 - 0,5 \times 2,5) - (0,03 + 0,39 + 0,5 \times 1,555)) \text{ m}$$

$$= (1,59 - 1,1975) \text{ m}$$

$$= 0,3925 \text{ m}$$

$$T = h_l \Delta \vartheta_{co} + h_r (\Delta \vartheta_{oic} - \Delta \vartheta_{o-a} - 0,5 \Delta \vartheta_{co})$$

$$T = (0,3925 \times 21,602 + 2,5 (49,463 - 37,634 - 0,5 \times 21,602)) \text{ m}^\circ\text{C}$$

$$T = 11,048 \text{ m}^\circ\text{C}$$

$$\Delta p = \gamma_a \beta_a T$$

$$\Delta p = 6,375 \text{ N.m}^{-3}\text{C}^{-1} \times 11,048 \text{ m}^\circ\text{C}$$

$$\Delta p = 70,431 \text{ N.m}^{-2}$$

Penurunan tekanan di radiator

$$C = h_r \times 48,5 \times 10^9 \text{ m}^{-7} \text{ kg}$$

$$= 2,5 \text{ m} \times 48,5 \times 10^9 \text{ m}^{-7} \text{ kg}$$

$$= 1,2125 \times 10^{11} \text{ m}^{-6} \text{ kg}$$

$$B = 5,63 \times 10^6 \text{ m}^{-7} \text{ kg}$$

$$\Phi_o = Q/(\Delta\vartheta_{co} \times c_o \Delta\vartheta_{oac})$$

$$\Phi_o = 114000 \text{ W}/(21,602^\circ\text{C} \times 1924,648 \text{ W.s.kg}^{-1}\text{C}^{-1})$$

$$= 2,74 \text{ kg s}^{-1}$$

$$\rho_o = \rho \Delta\vartheta_{oac} = 870,8028 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\Delta p_r = C v_{ai} \frac{\Phi_o}{\rho_o n z} + B z^2 \left(\frac{\Phi_o}{\rho_o n z} \right)^2$$

Dengan menggunakan diagram $\frac{\vartheta(\vartheta)}{\vartheta-30^\circ\text{C}}$, maka diketahui luas area antara 57,86 °C dan 79,4 °C adalah 1332 mm² atau 13,32 cm². Karena skala suhu kurva adalah 1 cm = 2,5 °C, dan skala fungsi $\frac{\vartheta(\vartheta)}{\vartheta-30^\circ\text{C}}$ adalah 1 cm = 0,1 × 10⁻⁶ m² s⁻¹ °C⁻¹, maka skala luas area kurva adalah 1 cm² = 0,25 × 10⁻⁶ m² s⁻¹ maka nilai integral tentu $\int_{57,86}^{79,4} \frac{\vartheta(\vartheta)}{\vartheta-30^\circ\text{C}}$ adalah: 0,25 × 10⁻⁶ × 13,32 m² s⁻¹ = 3,33 × 10⁻⁶ m² s⁻¹. Dengan demikian, nilai viskositas rata-rata adalah:

$$v_{ai} = \frac{\Delta\vartheta_{o-a}}{\Delta\vartheta_{co}} \int_{\vartheta_{oac}}^{\vartheta_{oic}} \frac{v(\vartheta)}{\vartheta - \vartheta_a} d\vartheta$$

$$= \frac{37,634}{21,602} \times 3,33 \times 10^{-6}$$

$$= 5,8 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\Delta p_r = C v_{ai} \frac{\Phi_o}{\rho_o n z} + B z^2 \left(\frac{\Phi_o}{\rho_o n z} \right)^2$$

$$= \left(\frac{1,2125 \times 10^{11} \times 5,8 \times 10^{-6} \times 1,6 \times 10^{-5}}{870,8028 \times 7 \times 2} \right)$$

$$+ (5,63 \times 10^6 \times 784 \times 2,56 \times 10^{-10})$$

$$= (11,252 + 1,129) \text{ Nm}^{-2}$$

$$= 12,381 \text{ Nm}^{-2}$$

Penurunan tekanan di *winding*

Diameter hidrolik saluran:

$$d_{h1} = 4 \frac{\delta_r l_1}{2(\delta_r + l_1)} = 2 \frac{\delta_r l_1}{\delta_r + l_1}$$

$$= 2 \frac{0,56 \times 0,0546}{0,56 + 0,0546} = 0,099 \text{ m}$$

$$d_{h2} = 2 \frac{\delta_r l_2}{\delta_r + l_2} = 2 \frac{0,56 \times 0,11038}{0,56 + 0,11038}$$

$$= 0,184 \text{ m}$$

$$d_h = \frac{d_{h1} + d_{h2}}{2} = \frac{0,099 + 0,184}{2}$$

$$= 0,1415 \text{ m}$$

$$A_o = 0,082 \text{ m}^2$$

$$\Delta p_w = \frac{3}{4} A \times \frac{h_w}{d_h^2 A_o} \times \frac{Q}{c_o \Delta T_{wo}} \times v$$

$$\Delta p_w = \left[\frac{3}{4} \times 96 \times \frac{2,5}{0,1415^2 \times 0,082} \right. \\ \left. \times \frac{114000}{1855,0488} \times 14,8 \right. \\ \left. \times 10^{-6} \right] \text{ Nm}^{-2}$$

$$\Delta p_w = 56,358 \text{ Nm}^{-2}$$

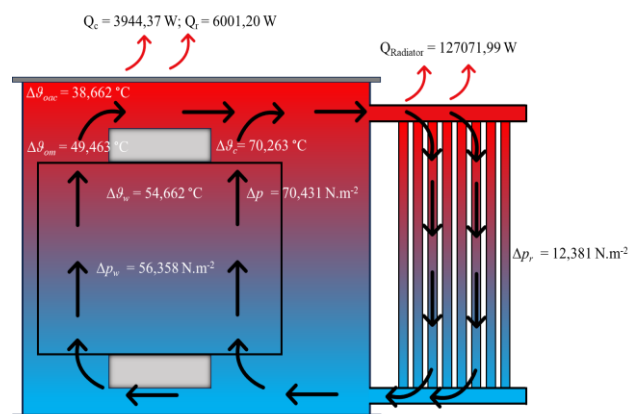
$$\Delta p_r + \Delta p_w = 68,74 \text{ Nm}^{-2}$$

$$\Delta p = 70,431 \text{ Nsm}^{-2}$$

$$\Delta p_r + \Delta p_w < \Delta p \text{ terpenuhi, sehingga perhitungan dapat dilanjutkan.}$$

14. Menghitung koreksi nilai $\Delta\vartheta_{om}$
 $\Delta\vartheta_{om} = \Delta\vartheta_{oac} + (0,5 \times \Delta\vartheta_{co})$
 $\Delta\vartheta_{om} = 38,662^\circ\text{C} + (0,5 \times 21,602^\circ\text{C})$
 $\Delta\vartheta_{om} = 49,463^\circ\text{C}$
15. Menghitung nilai $\Delta\vartheta_w$
 $\Delta\vartheta_w = \Delta\vartheta_{oac} + \Delta\vartheta_{w-o}$
 $\Delta\vartheta_w = 38,662^\circ\text{C} + 16^\circ\text{C}$
 $\Delta\vartheta_w = 54,662^\circ\text{C}$
16. Menghitung nilai $\Delta\vartheta_c$
 $\Delta\vartheta_c = \Delta\vartheta_{om} + (\text{HSF} \times \Delta\vartheta_{w-o})$
 $\Delta\vartheta_c = 49,463^\circ\text{C} + (1,3 \times 16^\circ\text{C})$
 $\Delta\vartheta_c = 70,263^\circ\text{C}$
17. Hasil akhir perhitungan didapat prediksi suhu sebagai berikut:
 $\Delta\vartheta_w = 54,662^\circ\text{C}$
 $\Delta\vartheta_{oac} = 38,662^\circ\text{C}$
 $\Delta\vartheta_{om} = 49,463^\circ\text{C}$
 $\Delta\vartheta_c = 70,263^\circ\text{C}$

Hasil perhitungan analisis kenaikan suhu transformator daya ini dan sebaran titik pada sistem dapat ditampilkan pada Gambar 4.

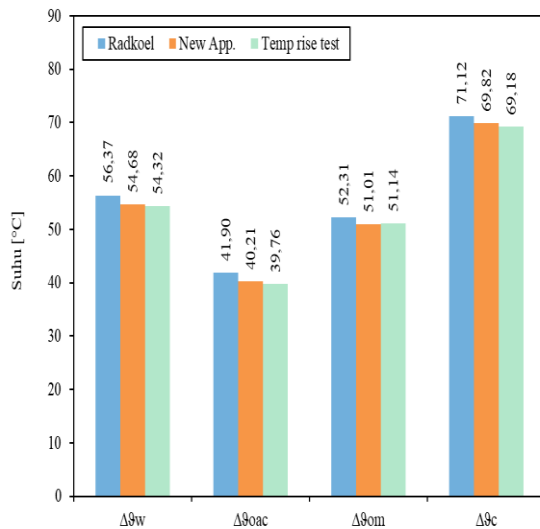
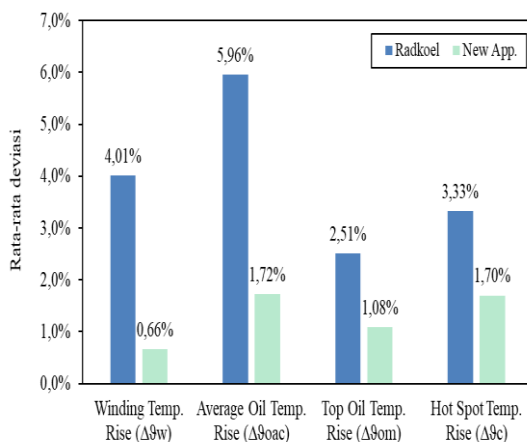


Gambar 4. Hasil perhitungan analisis kenaikan suhu pada transformator daya

Data hasil perhitungan pada Tabel 4 dari setiap transformator yang diuji dalam analisis ini adalah sebagai berikut:

Tabel 4. Data hasil perhitungan

Trafo No.	E0532	E0544	E0507	E0616	E0511	Avg.	
MVA	13	18	20	25	45		
$\Delta\vartheta_w$ [°C]	Radkoel	61,35	55,75	61,45	54,56	48,75	56,37
	New App.	60,18	54,66	60,70	52,87	45,00	54,68
	Temp. Rise Test	60,10	53,70	60,30	52,50	45,00	54,32
$\Delta\vartheta_{oac}$ [°C]	Radkoel	47,87	39,75	46,49	38,76	36,65	41,90
	New App.	46,70	38,66	45,74	37,07	32,90	40,21
	Temp. Rise Test	46,00	38,20	45,60	37,50	31,50	39,76
$\Delta\vartheta_{om}$ [°C]	Radkoel	57,54	52,36	57,55	48,28	45,84	52,31
	New App.	57,50	49,46	56,54	47,87	43,70	51,01
	Temp. Rise Test	57,30	49,80	57,60	47,00	44,00	51,14
$\Delta\vartheta_c$ [°C]	Radkoel	75,06	73,16	77,00	68,82	61,57	71,12
	New App.	75,02	70,26	75,99	68,41	59,43	69,82
	Temp. Rise Test	75,70	68,70	76,60	65,90	59,00	69,18

**Gambar 5.** Hasil perbandingan dari nilai suhu rata-rata program Radkoel, temperature rise test dan hasil perhitungan**Gambar 6.** Rata-rata deviasi hasil perhitungan terhadap hasil tes actual program baru dibandingkan dengan program lama (Radkoel).

Pada Gambar 6 menggambarkan deviasi program Radkoel terhadap hasil temperature rise test cukup tinggi dengan deviasi tertinggi sebesar 5.96% pada average oil temperature rise ($\Delta\vartheta_{oac}$). Sedangkan deviasi terendah sebesar 2.51% pada top oil temperature rise ($\Delta\vartheta_{om}$). Deviasi program baru terhadap hasil tes actual lebih kecil dibandingkan deviasi program Radkoel dengan deviasi tertinggi terhadap hasil temperature rise test adalah pada average oil temperature rise ($\Delta\vartheta_{oac}$), yaitu 1.72%. Sedangkan deviasi terendah sebesar 0.66% pada winding temperature rise ($\Delta\vartheta_w$).

Program Cooling Application 1.0 dapat dijadikan acuan baru untuk memprediksi kenaikan suhu transformator daya dengan pendingin ONAN karena hasil perhitungan yang lebih akurat dibandingkan program Radkoel.

KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan numerik diprediksi average oil temperature rise ($\Delta\vartheta_{oac}$) sebesar 38,662°C, top oil temperature rise ($\Delta\vartheta_{om}$) sebesar 49,463°C, winding temperature rise ($\Delta\vartheta_w$) sebesar 54,662°C, dan diperoleh toleransi 1.72% terhadap uji kenaikan suhu. Sedangkan hasil perhitungan Radkoel mempunyai toleransi 5.96% terhadap hasil uji kenaikan suhu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Zhao, Q. Liu, M. Wilkinson, G. Wilson, and Z. Wang, "A Reduced Radiator Model for Simplification of ONAN Transformer CFD Simulation," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 37, no. 5, pp. 4007–4018, 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3142889.
- [2] M. Sippola and R. E. Sepponen, "Accurate prediction of high-frequency power-transformer losses and temperature rise," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 17, no. 5, pp. 835–847, 2002, doi: 10.1109/TPEL.2002.802193.
- [3] P. A. Córdoba, E. Dari, and N. Silin, "A 3D numerical model of an ONAN distribution transformer," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 148, no. July 2018, pp. 897–906, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.11.098.
- [4] D. Xiao, R. Xiao, F. Yang, C. Chi, M. Hua, and C. Yang, "Simulation Research on Onan Transformer Winding Temperature Field Based on Temperature Rise Test," *Therm. Sci.*, vol. 26, no. 4, pp. 3229–3240, 2022, doi: 10.2298/TSCI211127047X.
- [5] IEC Standard. IEC 60076-2:2011, "Power transformers - Part 2: Temperature rise for

- liquid-immersed transformers. Edition 3rd.," 2011.
- [6] IEEE Power and Energy Society, *IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2015. doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7469278.
- [7] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering*. 2017. doi: 10.1201/b13011.
- [8] J. A. R. Dofan, "Study on Thermal Model for Calculating Transformer Hot Spot Temperature," University Tun Hussein Onn Malaysia (UTHM), 2011.
- [9] L. Karsai, K.; Kerényi, D.; Kiss, *Large Power Transformers. (STUDIES IN ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING)*. Publisher: Elsevier Science Ltd. ISBN 10: 0444995110. 1987.