

**ANALISIS PERHITUNGAN PENDINGINAN TRAFU MENGGUNAKAN  
ISOLATOR CAIR MINYAK SAWIT**

***CALCULATION ANALYSIS OF COOLING TRANSFORMERS USING PALM OIL  
LIQUID ISOLATORS***

**Muhamad Mustangin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Politeknik LPP Yogyakarta, Jl. LPP No. 1A,  
Balapan Yogyakarta

\*Corresponding Email : [mst.lpp.yk@gmail.com](mailto:mst.lpp.yk@gmail.com)

**Abstract**

*The transformer that functions to increase/decrease the voltage is heated due to the flow of electric current. The heat must be removed so as not to damage the winding. The heat dissipation method uses a liquid to propagate heat into the air. Currently, mineral oil is generally used, but to improve the environment and be more sustainable, it can be replaced with palm oil (CPO). The heat transfer palm oil of the transformer can be calculated. The heat propagates from the heat source through the paper to the CPO, then to the iron casing of the transformer and then to the free air. In order for CPO to cool properly, CPO needs to be cooled using forced air so that the heat transfer process is optimal. Based on the assumption of transformer parameters and CPO parameters such as heat capacity, conductivity, density, viscosity and others, it is obtained that the flow properties of CPO are laminar with Reynolds number of 293. Prandtl number of 173.99 and Prandtl number of 30, then the convection coefficient CPO heat is 509.4 W/m<sup>2</sup>.oC. Based on the temperature in the coil of 80oC, the temperature calculation on the coil wrapping paper is 72oC, the temperature on the inside wall of the casing is 54.17oC and the temperature on the outer wall of the transformer or in the free air is 53.53oC so that it is still below the standard or acceptable. This shows that a 5,000 Watt heat source with a transformer casing length and width of 0.5 meters and a total radiator pipe length of 10 meters can reduce heat in the transformer. The comparison of the outside temperature in the air compared to the standard is 53.5oC/60oC or 89.2%.*

**Keywords:** *heat convection, Palm oil, Transformer cooling, heat transfer*

**How to Cite :** Mustangin, M. (2021). Analisis Perhitungan Pendinginan Trafo Menggunakan Isolator Cair Minyak Sawit. Jurnal Agro Fabrica Vol.2 (2) : 40-51.

**PENDAHULUAN**

Transformer atau trafo merupakan peralatan listrik yang digunakan untuk menaikkan/menurunkan tegangan. Trafo terdiri atas lilitan yang memiliki inti besi, dialiri arus listrik sehingga terjadi panas. Panas yang timbul karena adanya arus di

lilitan dan losses karena arus eddy (Olivares-Galván et al., 2009). Panas trafo dihasilkan oleh lilitan keluar melalui kertas pembungkus lilitan ke pendingin udara atau cairan kemudian panas melewati besi sebagai *body* trafo dan ke udara bebas. Untuk itu diperlukan sistem

pembuangan/disipasi panas karena dapat merusak lilitan maupun isolatornya. Untuk menjaga agar lilitan tetap beroperasi dengan baik, maka harus dijaga suhu lilitan agar tidak terjadi kerusakan. Untuk itu sistem pendinginan harus dapat menurunkan suhu tersebut. Semakin tinggi beban trafo, semakin tinggi suhunya, maka sistem pendingin harus mampu bekerja lebih keras untuk dapat mendinginkan trafo. Apabila trafo tidak memiliki pendingin, suhu trafo meningkat 3°C per jam (Cosemans, 2013).

Saat ini isolator cair untuk peralatan listrik umumnya menggunakan bahan berbasis minyak bumi dengan nilai perdagangan sebesar 182,3 miliar dollar dengan komposisi berbahan nabati sangat kecil, namun diproyeksikan semakin meningkat (Research, 2017). Isolator berbasis minyak bumi bersifat anorganik dan termasuk limbah B3 sehingga memerlukan penanganan khusus untuk mengelolanya (PLN, 2017). Untuk itu diperlukan alternatif pengganti yang berbasis terbarukan dan ramah lingkungan.

Isolator pengganti dapat menggunakan bahan *vegetable oil* yang bersifat organik dan dapat diperbaharui. Isolator ini dapat menggunakan minyak sawit (CPO), minyak kernel, minyak kelapa, minyak kedelai, minyak bunga matahari (Rafiq et al., 2015). Penelitian menunjukkan penggunaan isolator berbasis minyak

kelapa sawit merupakan salah satu terbaik dibandingkan dengan *vegetable oil* yang lain (Devi et al., 2016). Saat ini sudah ada produk isolasi nabati dengan merk BIOTEMP milik ABB berbasis bunga matahari, safflower, dan kedelai (Cherry, 2005). Secara ekonomi, harga minyak trafo dapat mencapai Rp47.000/1,05 kg, jauh lebih tinggi dari pada harga CPO (Tokopedia, 2021). Hal ini secara ekonomi menguntungkan bagi petani kelapa sawit.

Standar isolator trafo mengikuti IEC 60156 dan ASTM F 3487 isolator memiliki Breakdown voltage > 30 kV, kadar asam < 0,03 mg/KOH, viskositas < 12 mm<sup>2</sup>/s, kadar air < 30 mg/kg (IEC, 2018)(ASTM, 2006) . Untuk itu perlu dilakukan analisis terkait CPO sebagai pendingin trafo.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi proses pendinginan menggunakan hasil penelitian lain terkait dengan sifat termal CPO dikaitkan dengan standar-standar panas trafo sehingga diperoleh formulasi matematika pendinginan trafo menggunakan CPO. Formulasi tersebut dapat digunakan untuk menghitung apabila parameter-parameter tersebut berubah, maka kita dapat menghitung parameter yang ingin diketahui tanpa harus melakukan percobaan.

Tabel 1. Propertis untuk bahan – bahan trafo

| Property                                  | Copper | Steel | Paper | Resin |
|---|--------|-------|-------|-------|
| $\rho$ (Kg.m <sup>-3</sup> )              | 8.933  | 8.030 | 930   | 1.190 |
| Cp (J.Kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) | 385    | 502,5 | 1.340 | -     |
| K (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )   | 401    | 60    | 0,18  | 0,16  |

Penelitian ini untuk mengetahui apakah pendingin trafo menggunakan CPO bersifat *laminar* atau *turbulence* serta mengetahui nilai koefisien konveksi CPO sehingga diketahui parameter/ukuran minimal peralatan pendingin trafo seperti luas penampang, panjang pipa dan panas maksimal sumber agar suhu memenuhi standar trafo.

Berdasarkan standar-standar *thermal* trafo diperoleh formulasi matematika pendinginan trafo menggunakan CPO. Formulasi tersebut dapat digunakan untuk menghitung apabila parameter – parameter tersebut berubah, maka kita dapat menghitung parameter yang ingin diketahui tanpa harus melakukan percobaan. Perhitungan panas trafo dapat menggunakan parameter-parameter terkait.

Untuk itu diperlukan nilai untuk parameter densitas ( $\rho$ ), kapasitas panas (Cp) dan konduktivitas panas (k). Perhitungan dapat menggunakan acuan sebagai berikut (Mendes, n.d.). CPO harus diketahui beberapa parameter fisiknya. Untuk menganalisis dalam kondisi *steady state* pada suhu operasional 70°C

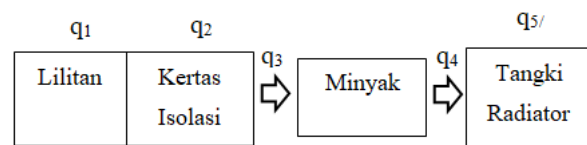
menggunakan data sebagai berikut (technologies, 2008):

Tabel 2. Properties CPO

| Viscosity | Heat capacity | Conductivity | Density           | Viscosity |
|-----------|---------------|--------------|-------------------|-----------|
| mPas      | KJ/kg°C       | W/m°C        | kg/m <sup>3</sup> | cST       |
| 12.75     | 1,988         | 0,1683       | 865,4             | 14,73     |

Untuk sumber panas menggunakan asumsi 5000 W/m<sup>3</sup>. Trafo dengan surface area yang lebih banyak terbukti memiliki kenaikan suhu yang lebih baik. Luas area sebesar 5,9 m<sup>2</sup>; 10,08 m<sup>2</sup> dan 35 m<sup>2</sup> memiliki kenaikan suhu masing – masing 116 °C, 87°C dan 57,6°C (Sriram et al. 2010).

Untuk pendekatan perhitungan sistem pendinginan trafo dapat menggunakan perjalanan kalor dari sumber panas ke udara bebas. Lilitan sebagai sumber panas kemudian menembus kertas dan oli menuju ke radiator untuk melepaskan kalor ke udara bebas (Roslan & Azis, 2017).



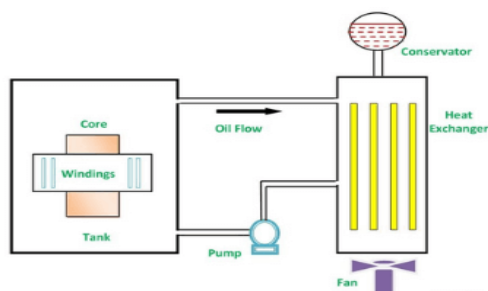
Gambar 1. Jalur panas dari sumber ke udara bebas.

Kecepatan aliran oli pendingin trafo sangat berpengaruh pada kinerja trafo. Kecepatan aliran memiliki standar 0,5 mm/s sampai dengan 1 mm/s. Viskositas kinematik antara 4 mm<sup>2</sup>/s sampai dengan 6 mm<sup>2</sup>/s cukup signifikan. Kenaikan viskositas

kinematik sebesar 1 mm<sup>2</sup>/s mengakibatkan penambahan panas sebesar 3°C (Cosemans, n.d.)

### METODE PENELITIAN

Lilitan trafo didinginkan dengan oli yang dipompa ke radiator. Panas pada lilitan diijinkan tergantung kelas isolasi trafo dalam oC. Suhu oli maksimal mengikuti maksimal suhu lilitan, apabila suhu lilitan diatas 130oC, maka suhu oli maksimal 130oC. Kelas isolasi trafo sebagai berikut (dalam oC): Y = 90 ; A = 105 ; E = 120 ; B = 130 ; F = 155 ; H = 180 (Ota, 1985).



Gambar 2. Sistem trafo jenis ONAF (*Oil Natural Oil Forced*).

Luas tangki sekitar 0,5 m x 0,5 m = 0,25 m<sup>2</sup>. Suhu dinding tangki maksimal 65°C diatas suhu *ambient*, sehingga apabila suhu *ambient* sebesar 30°C, maka suhu di dinding tangki 95°C. Tebal dinding tangki adalah 3 mm. Kecepatan pompa dan kipas sebesar 1500 rpm. Panjang pipa radiator total dengan menghitung seluruh pipa sepanjang 10 m. Luas penampang pipa adalah 1 cm dan tebal 0,2 mm<sup>2</sup>. Untuk penelitian ini menggunakan metode analisis terhadap thermal secara konduksi dan konveksi.

Untuk panas yang dihasilkan oleh trafo secara konduksi berlaku:

$$q = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{dT}{dx} \dots \dots \dots (1)$$

- q = jumlah panas/kalor (kalori)
- k = konduktivitas panas (W/m.s.°C)
- A = luas daerah yang dialiri panas (m<sup>2</sup>)
- dT/dx = perubahan suhu per satuan Panjang (°C/m)

Untuk panas yang dihasilkan oleh trafo dan memanasi fluida secara konveksi berlaku:

$$q_{oil} = h_{oil} \cdot A \cdot (T_a - T_1) \dots \dots \dots (2)$$

- q = jumlah panas/kalor (kalori)
- h<sub>oil</sub> = koefisien perambatan panas konveksi (kal/m<sup>2</sup>.s.°C)
- A = luas daerah yang dialiri panas (m<sup>2</sup>)
- T<sub>a</sub>-T<sub>1</sub>= selisih suhu (°C)

Bilangan Reynolds dapat dihitung sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho Dv}{\mu} \dots \dots \dots (3)$$

- ρ = densitas fluida (kg/m<sup>3</sup>)
- v = laju aliran (m/s)
- μ = viskositas dinamis (absolut) fluida (Pa.s) atau kg/m.s
- D = diameter pipa (m)

Bilangan Prandtl dapat dihitung sebagai berikut (Incopera et al., 2007) :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \dots \dots \dots (4)$$

- C<sub>p</sub> = panas jenis fluida (kj/kg.°C) atau 1.988 kj/kg.°C
- k = konduktivitas termal (W/m°C) atau 0,1683 W/m°C

$\mu$  = viskositas dinamis (absolut) fluida (Pa.s) atau 14,73 Pa.

Untuk menentukan parameter densitas ( $\rho$ ), kapasitas panas ( $C_p$ ) dan konduktivitas termal ( $k$ ) menggunakan beberapa data penelitian. Rumus yang digunakan untuk menghitung pendinginan trafo dapat menggunakan parameter sebagai berikut: Lilitan trafo menggunakan *copper* atau tembaga dengan konduktivitas tembaga ( $k$ ) sebesar 401 W/m<sup>0</sup>K dan kapasitas panas ( $C_p$ ) sebesar 385 J/kg.<sup>0</sup>K dan densitas  $\rho$  sebesar 8.933 kg/m<sup>3</sup>. Untuk kertas pembungkus lilitan dengan  $k$  sebesar 0,18 W/m<sup>0</sup>K, kapasitas panas ( $C_p$ ) sebesar 1.340 J/kg<sup>0</sup>K dan densitas  $\rho$  sebesar 930 Kg/m<sup>3</sup>(Mendes, 2010).

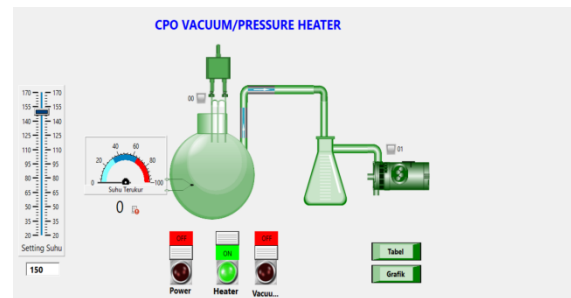
Untuk bahan pendingin, yaitu CPO, maka untuk menganalisis menggunakan parameter CPO pada suhu operasional 70°C. Parameter tersebut antara lain *heat capacity* CPO sebesar 1.988 kJ/kg<sup>0</sup>C, konduktivitas 0,1683 W/m<sup>0</sup>C, densitas 865,4 kg/m<sup>3</sup> dan viskositas 14,73 cSt. Untuk sumber panas menggunakan asumsi dengan sumber panas sebesar 5000 W/m<sup>3</sup>.

Untuk melakukan pengujian terhadap nilai koefisien perambatan panas konveksi minyak sawit, maka dilakukan pemanasan menggunakan labu sebanyak 1 liter dan mantel pemanas dengan daya 300 Watt.



Gambar 3. Labu dan Mantel Pemanas Minyak Sawit

Untuk pengambilan data dan terekam dengan baik, maka dapat dilakukan dengan Winlog SCADA dan PLC Omron CP1E yang mampu mengambil data per detik atau per 10 detik dalam penelitian ini.



Gambar 4. Proses pengambilan data

Gambar 4 merupakan model dari gambar 3. Labu sebagai tempat pemanasan CPO dengan sumber panas dari pemanas listrik resistif. Tekanan pada labu dapat diatur bertekanan diatas 1 atmosfer atau dalam kondisi vacuum. Untuk membuat vacuum digunakan pompa vakum yang dapat diatur. Proses pemanasan di setting pada posisi suhu tertentu sesuai keinginan dengan menentukan nilai suhu pada penampil bar. Suhu pemanasan dapat diketahui karena dipasang sensor termokopel. Proses pengambilan nilai suhu dilakukan untuk setiap 10 detik. Pada saat

suhu tercapai, alat akan otomatis mematikan pemanas. Untuk pengambilan data menggunakan Programmable Logic Controller merk Omron CP1E yang dihubungkan dengan Analog to Digital Conversion dan komputer serta perangkat lunak SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition).



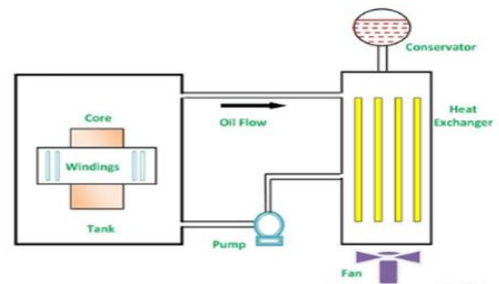
Gambar 5. PLC Omron CP1E

<https://www.omron.co.id/products/family/2064/>

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Model Pendinginan

Trafo yang dipilih menggunakan system ONAF sehingga cairan pendingin (CPO) dimasukkan dalam sebuah tempat berbentuk kubus dengan trafo berada ditengah (direndam) dan CPO sebagai pendingin mengalir dengan dipaksa ke radiator sebagai alat penukar panas. Radiator didinginkan secara paksa menggunakan angin melalui sebuah blower. CPO yang panas dipompa untuk dialirkan dan dihembus oleh sebuah blower untuk membuang panas ke udara sekitar.

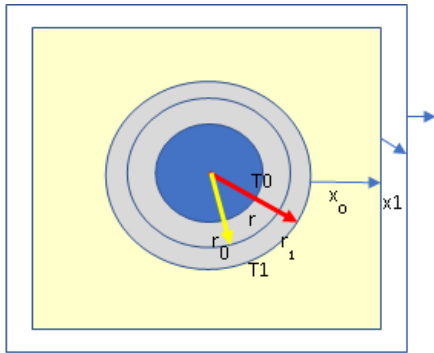


Gambar 6. Model trafo dan sistem pendingin

Untuk konstruksi trafo, maka trafo terdiri atas lilitan dengan inti besi (*coil*) dibungkus dengan kertas. Panas dihasilkan oleh lilitan karena adanya arus yang mengalir di *lilitan* sehingga panas tersebut memanasi besi bagian dalam dan lilitan. Panas yang ada dalam lilitan keluar menembus kertas (resin) secara konduksi. Perambatan panas secara system dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Panas} \\ \text{CPO di} \\ \text{trafo} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Panas} \\ \text{yang} \\ \text{dihasil-} \\ \text{kan} \\ \text{coil} \end{array} \right\} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \text{Panas} \\ \text{yang} \\ \text{menem-} \\ \text{bus} \\ \text{kertas} \end{array} \right\} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \text{Panas} \\ \text{konvek-} \\ \text{si CPO} \\ \text{di trafo} \\ \text{(kotak)} \end{array} \right\} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \text{Panas} \\ \text{konduk-} \\ \text{si} \\ \text{dinding} \\ \text{casing} \end{array} \right\} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \text{Panas} \\ \text{yang} \\ \text{dilepas-} \\ \text{kan ke} \\ \text{udara} \end{array} \right\} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \text{Panas} \\ \text{yang} \\ \text{dibuang} \\ \text{oleh} \\ \text{sirkulasi} \\ \text{pipa} \end{array} \right\} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \text{Panas} \\ \text{yang} \\ \text{dibuan-} \\ \text{g oleh} \\ \text{blower} \end{array} \right\}$$

Untuk menentukan suhu CPO maka dilakukan analisis secara bertahap atau per bagian. Untuk analisis awal, trafo yang direndam di CPO mengalirkan panas dari pusat panas ke kertas, kemudian ke CPO untuk selanjutnya ke dinding casing trafo kemudian ke udara.



Gambar 7. Perambatan panas dari lilitan ke udara

$$q = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{dT}{dr} \dots \dots \dots (5)$$

Ketebalan layer kertas dinyatakan dengan  $\Delta r$  atau  $dr$  sedangkan perbedaan suhu antara lilitan dan CPO sebesar  $\Delta T$  atau  $dT$ . Panas yang dilalui pada luasan lilitan (tabung) sebesar keliling dikalikan tinggi atau  $2\pi rL$  sehingga

$$q = k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \dots \dots \dots (6)$$

maka diintegrasikan menjadi

$$\frac{q}{2\pi rL} \int_r^{r_0} \frac{dr}{r} = -k \int_{T_1}^{T_0} dT \dots \dots \dots (7)$$

$$\frac{qr}{2\pi L} \ln \ln (r_0 - r) = -k(T_1 - T_0) \dots \dots \dots (8)$$

$$q = \frac{2\pi Lk(T_0 - T_1)}{\ln \frac{r_0}{r_1}} \dots \dots \dots (9)$$

Untuk proses konveksi di CPO sebagai pendingin adalah:

$$q = \frac{\Delta Q}{dt} = -hA \frac{dT}{dx} \dots \dots \dots (10)$$

Sehingga jumlah panas tergantung h (koefisien pindah panas konveksi,  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ , luas penampang, ketebalan x, suhu awal dan suhu akhir.

Apabila dikelompokkan maka

$$\frac{qx}{A} dx = -h \cdot dT \dots \dots \dots (11);$$

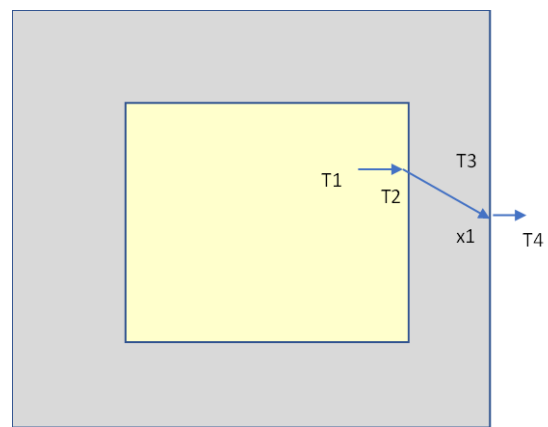
maka diintegrasikan menjadi

$$\frac{q}{A} \int_{x_1}^x dx = - \int_{T_0}^{T_1} k \cdot dT, \dots \dots \dots (12)$$

hasil integral menjadi

$$\frac{qx}{A} (x - x_1) \cdot dx = -h \cdot (T_1 - T_0) \dots \dots \dots (13)$$

$$q = \frac{hA(T_0 - T_1)}{(x_1 - x_0)} \dots \dots \dots (14)$$



Gambar 8. Perpindahan panas dari CPO ke udara bebas.

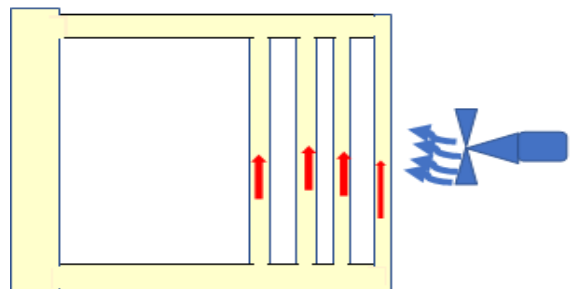
Pada gambar 6 terdapat 3 perpindahan panas, yaitu konveksi, konduksi dan konveksi, sehingga persamaan menjadi :

$$q_{oil} = h_{oil} A (T_1 - T_2) \dots \dots \dots (15)$$

$$q_x = kA \frac{(T_2 - T_3)}{dx} \text{ atau } q = kA \frac{(T_2 - T_3)}{\Delta x} \dots \dots \dots (16)$$

sehingga:

$$q_{udara} = h_o A (T_3 - T_4) \dots \dots \dots (17)$$





Gambar 9. Radiator dengan blower pendingin

Untuk bagian berikutnya yaitu proses pendinginan CPO yang panas menggunakan hembusan angin secara paksa yang merupakan pendinginan konveksi secara paksa. Untuk itu pendekatan yang dilakukan adalah dengan melakukan pengecekan terhadap aliran laminar atau turbulen dengan mencari bilangan Reynolds dan bilangan Nusselt.

Asumsi yang digunakan, cairan bersifat Newtonian

Bilangan Reynolds dapat dihitung sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu} \dots\dots\dots(17)$$

- $\rho$  = densitas fluida (kg/m<sup>3</sup>)
- $v$  = laju aliran (m/s)
- $\mu$  = viskositas dinamis (absolut) fluida (Pa.s) atau kg/m.s
- $D$  = diameter pipa (m)

Bilangan Reynold sebesar

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu} = \frac{865 \cdot 0,01 \cdot 0,5}{0,01473} = 293 \text{ (laminar)}$$

Hasil perhitungan menunjukkan flow dari CPO bersifat laminar.

Untuk bilangan Prandtl (Pr) dapat dihitung sebagai berikut :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}, \dots\dots\dots(18)$$

- $C_p$  = panas jenis fluida (kj/kg.°C) atau 1.988 kj/kg.°C
- $k$  = konduktivitas panas (W/m°C) atau 0,1683 W/m°C

$\mu$  = viskositas dinamis (absolut) fluida (Pa.s) atau 14,73 Pa.s

Bilangan Prandtl untuk CPO di trafo sebesar:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} = \frac{0,01473 \text{ Pa.s} \times 1.988 \text{ kj/kg.oC}}{0,1683} = 173,99$$

Rasio panas konveksi terhadap panas konduksi pada cairan laminar disebut bilangan Nusselt. Untuk menghitung diperlukan nilai perkalian Reynolds dan Prandtl sebagai berikut:

$$Re \times Pr \times \frac{D}{L} = 293 \times 173,99 \times \frac{0,01}{10} = 50,97$$

Hasil tersebut menunjukkan nilai bilangan Nusselt kurang dari 100, maka bilangan Nusselt (Nu) pada dapat dihitung sebagai berikut:

$$Nu = 3,66 + \frac{0,085 \left( Re \times Pr \times \frac{D}{L} \right)}{1 + 0,045 \left( Re \times Pr \times \frac{D}{L} \right)^{0,66}} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0,14},$$

Dengan asumsi  $\frac{\mu_b}{\mu_w} = 1$ , maka

$$Nu = 30.$$

Koefisien perpindahan konveksi fluida sebesar :

$h = \frac{k Nu}{D}$  dengan  $k$  = konduktivitas panas (W/m°C), maka:

$$h = \frac{0,1683 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} \times 30}{0,01 \text{ m}} = 504,9 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$$

Setelah diketahui koefisien konveksi CPO, maka perhitungan dilakukan dari awal sistem. Perhitungan awal dilakukan dengan menghitung suhu di CPO dan suhu udara di luar trafo akibat pemanasan trafo



(gambar 5). Untuk menghitung suhu di dinding, berdasarkan persamaan nomor 9, maka:

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_0 - T_1)}{\ln \frac{r_0}{r_1}}$$

$$q_r = 5.000 \text{ Watt}$$

$$k = 401 \text{ W/m}^\circ\text{C} \text{ (lilitan tembaga)}$$

$T_0$  (asumsi/standar suhu lilitan saat kena panas) =  $80^\circ\text{C}$

$$R_o \text{ (jari - jari lilitan)} = 0,01 \text{ m}$$

$$R_1 \text{ (jari - jari kertas)} = 0,012 \text{ m}$$

$$L \text{ (tinggi lilitan)} = 0,03 \text{ m}$$

Maka:

$$5.000 \text{ W} = \frac{2\pi \cdot 0,03 \text{ m} \cdot 401 \text{ W/m}^\circ\text{C} \cdot (80^\circ\text{C} - T_1)}{\ln \frac{0,01}{0,012}} = 72^\circ\text{C}$$

Panas sisi dinding casing trafo sebesar :

$$q = \frac{hA(T_0 - T_1)}{(x_1 - x_0)}$$

$$q_r = 4.500 \text{ W (pada suhu } 72^\circ\text{C)}$$

$$h = \text{koefisien konveksi yaitu } 504,9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$T_0$  (suhu perhitungan sebelumnya atau diluar kertas) =  $72^\circ\text{C}$

$$X_1 - X_0 \text{ (jarak ke dinding)} = 0,5 \text{ m}$$

$$A \text{ (luas penampang)} = 0,25 \text{ m}^2$$

Maka;

$$4.500 \text{ W} = \frac{504,9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 0,25 \text{ m}^2 (72 - T_1)}{0,5} = 54,2^\circ\text{C}$$

Sehingga suhu di dinding sebelah dalam adalah  $54,2^\circ\text{C}$ .

Setelah itu, untuk mencari suhu dinding sebelah luar yang terbang ke udara menggunakan persamaan 16, maka

$$q = kA \frac{(T_2 - T_3)}{\Delta x}$$

$$q = 3.375 \text{ W (pada suhu } 54,2^\circ\text{C)}$$

$$k = \text{konduktivitas besi yaitu } 60 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$T_2$  (suhu perhitungan sebelumnya atau diluar kertas) =  $54,2^\circ\text{C}$

$$\Delta x \text{ (tebal dinding)} = 0,003 \text{ m}$$

$$A \text{ (luas penampang)} = 0,25 \text{ m}^2$$

Maka

$$3.375 = 60 \cdot 0,25 \frac{(54,2 - T_3)}{0,003} = 53,5^\circ\text{C}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa suhu di luar sebesar  $53,5^\circ\text{C}$  atau lebih kecil dari standar yaitu  $65^\circ\text{C}$ , sehingga parameter - parameter yang ada bisa diterima.

### Data Percobaan

Data dilakukan dengan mengambil data pemanasan CPO dari tabung kaca dengan pemanas resistif jenis mantel secara non kontak secara langsung. CPO dipanaskan dari  $17^\circ\text{C}$  sampai dengan diatas  $100^\circ\text{C}$ .

Tabel 1. Data suhu terhadap waktu

| <b>Jam:menit:deti</b><br><b>k</b> | <b>Suhu (°C)</b> |
|-----------------------------------|------------------|
| 10:06:00                          | 103              |
| 10:06:10                          | 103              |
| 10:06:20                          | 103              |
| 10:06:30                          | 103              |
| 10:06:40                          | 104              |
| 10:06:50                          | 104              |
| 10:07:00                          | 104              |
| 10:07:10                          | 105              |
| 10:07:20                          | 105              |
| 10:07:30                          | 105              |
| 10:07:40                          | 106              |
| 10:07:50                          | 106              |
| 10:08:00                          | 106              |
| 10:08:00                          | 107              |
| 10:08:10                          | 107              |
| 10:08:20                          | 107              |
| 10:08:30                          | 107              |
| 10:08:40                          | 108              |
| 10:08:50                          | 108              |
| 10:08:00                          | 108              |
| 10:08:00                          | 108              |

Untuk melakukan uji dari perhitungan, maka dapat dilakukan uji berdasarkan data yang diperoleh maka dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut:

Jari – jari bola labu sebesar 6,2 cm sehingga luas bola labu sebesar 0,048 m<sup>2</sup> dengan luas yang terkena pemanas dianggap sebesar 50% sehingga A= 0,024 m<sup>2</sup>.

Berdasarkan data tabel 1 diatas, maka kenaikan suhu 1°C dicapai selama sekitar 31 detik sehingga dalam 1 jam mengalami kenaikan sebesar 116°C. Pemanas yang digunakan sebesar 300 Watt sehingga koefisien konveksi minyak sawit dapat dihitung:  $300/(60^{\circ}\text{C} \times 0,024 \text{ m}^2) = 124,6 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ .

Berdasarkan tebal media labu sekitar 2 mm atau 20% dari 10 mm (besi pada perhitungan diatas), maka besarnya

koefisien konveksi panas minyak kelapa sawit setara dengan 5 x tebal besi dalam perhitungan, sebesar :  $124,6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \times 5 = 498,4 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  atau selisih  $504,9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} - 498,4 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} = 6,5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  atau sekitar 1,3%.

Berdasarkan suhu yang dicapai sebesar  $53,5^\circ\text{C}$ , maka trafo memiliki efisiensi yang baik dibandingkan suhu standar sebesar  $60^\circ\text{C}$ . Perolehan perbandingan suhu luar di udara dibandingkan standar yaitu sebesar  $53,5^\circ\text{C}/60^\circ\text{C}$  atau sebesar 89,2%.

### KESIMPULAN

Berdasarkan asumsi parameter trafo dan parameter CPO seperti kapasitas panas, konduktivitas, densitas, viskositas dan lain – lain, diperoleh hasil, sifat aliran CPO adalah laminar dengan hasil Reynold sebesar 293. Bilangan Pradle sebesar 173,99 dan bilangan Nusselt sebesar 30, maka koefisien konveksi panas CPO sebesar  $509,4 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ .

Berdasarkan suhu pada *lilitan* sebesar  $80^\circ\text{C}$  menghasilkan perhitungan suhu pada kertas pembungkus lilitan sebesar  $72^\circ\text{C}$ , suhu pada dinding dalam casing sebesar  $54,17^\circ\text{C}$  dan suhu pada dinding luar trafo atau di udara bebas sebesar  $53,53^\circ\text{C}$  sehingga masih dibawah standar atau bisa diterima. Hal ini menunjukkan sumber panas 5.000 Watt dengan panjang dan lebar *casing* trafo 0,5

meter dan panjang total pipa radiator 10 meter dapat menurunkan panas pada trafo.

Nilai panas konveksi minyak sawit dari perhitungan sebesar  $504,9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  terhadap percobaan sebesar  $498,4 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  sehingga selisih  $6,5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  atau 1,2%. Perolehan perbandingan suhu luar di udara dibandingkan standar yaitu sebesar  $53,5^\circ\text{C}/60^\circ\text{C}$  atau sebesar 89,2%.

### DAFTAR PUSTAKA

- ASTM, A. 2006. Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus (ASTM D3487).
- Cherry, D. 2005. ABB BIOTEMP.
- Cosemans, H. 2013. Properties behind effective Transformer Oil Cooling. 15.
- Devi, K. G., Ravindran, M., & Kumar, S. S. 2016. Analysis of critical parameters of vegetable oil as an alternate dielectric fluid to mineral oil.
- IEC, standard. 2018. Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method.
- Incopera, F., Dewitt, D., Bergman, T., & Levinn, A. 2007. Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6th ed.).
- Mendes, J., Santis, E., & Azevedo, T. 2010. Analysis of the Cooling Design in Electrical Transformer. 10.
- Olivares-Galván, J. C., Georgilakis, P. S., & Ocon-Valdez, R. 2009. A Review of Transformer Losses. Electric

- Power Components and Systems, 37(9), 1046–1062.
- Ota, S. 1985. Temperature Classes of Electrical Insulators. Three Bond Technical News. <http://www.threebond.co.jp/en/technical/technicalnews/pdf/tech13.pdf>
- PLN, P. 2017. Pengelolaan limbah B3.
- Rafiq, M., Lv, Y. Z., Zhou, Y., Ma, K. B., Wang, W., Li, C. R., & Wang, Q. 2015. Use of vegetable oils as transformer oils – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 308–324. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.032>
- Research, G. V. 2017. Transformer Oil Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Mineral, Silicone, Bio-Based), By Application (Small-Scale, Large-Scale Transformers, Utilities), By Region, And Segment Forecasts, 2018-2025. [www.Grandviewresearch.com](http://www.Grandviewresearch.com). <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/transformer-oil-market>
- Roslan, M. H., & Azis, N. 2017. A Simplified Top-Oil Temperature Model for Transformers Based on the Pathway of Energy Transfer Concept and the Thermal-Electrical Analogy. 15.
- Sriram, S., Reddy, B. P., & Satyanarayana, V. 2010. Thermal Analysis of Transformer Cooling System. 5 (8), 10.
- Technologies, L. 2008. Technical\_references\_palm\_oil\_properties.html. [http://www.lipico.com/technical\\_references\\_palm\\_oil\\_properties.html](http://www.lipico.com/technical_references_palm_oil_properties.html)
- Tokopedia. 2021. ECERAN oli Trafo listrik—Shell Diala B/S4 ZX-I. Bening. 2 Januari. <https://www.tokopedia.com/olisby/eceran-oli-trafo-listrik-shell-diala-b-s4-zx-i-bening-1?whid=0>.