

**ANALISA PIPA *HEAT EXCHANGER (COOLING TUBE)* BERVARIASI PADA  
TURBINE *GUIDE BEARING* PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR SIGURAGURA**

**Tambos August Sianturi, S.T.,M.T.**

Program Studi Teknik Mesin  
Fakultas Teknik dan Pengelolaan Sumber Daya Perairan  
Universitas HKBP Nommensen Pematangsiantar

Email : tambos.sianturi73@gmail.com

**ABSTRAK**

*Alat penukar kalor (heat exchanger) adalah suatu media yang digunakan untuk menghasilkan perpindahan kalor dari suatu fluida ke fluida lain. Proses perpindahan panas pada alat penukar kalor terjadi karena adanya kontak antara dua fluida yang pada umumnya dipisahkan oleh suatu batas dengan temperatur yang berbeda. Heat Exchanger dapat digunakan untuk menaikkan temperatur atau sebagai pemanas (regenerator) maupun menurunkan temperatur atau sebagai pendingin (recuperator) tergantung pada tinjauan perpindahan panas yang terjadi. Heat exchanger sudah banyak dipergunakan dalam dunia industri seperti industri kimia, industri kertas, pembangkit listrik, serta industri lainnya. Pada contoh setiap unit mesin menggunakan media heat exchanger (khususnya mesin tipe rotary) untuk menjaga temperatur bearing agar berada dalam suhu normal meskipun unit dioperasikan secara continuous atau terus menerus. Dalam makalah tugas akhir ini, penulis akan menganalisa penurunan temperatur yang terjadi ketika dilakukan penambahan panjang pipa heat exchanger yang berada pada guide bearing turbin PLTA Siguragura.*

**Kata kunci:** *alat penukar kalor, guide bearing, pembangkit listrik*

## I. PENDAHULUAN

Sistem pemeliharaan (*maintenance*) rutin dilakukan terhadap turbin PLTA Siguragura guna menjaga kehandalan (*performace*), daya tahan (*lifetime*), dan fungsi sesuai dengan kebutuhan. Sistem pemeliharaan (*maintenance*) juga sangat penting dilakukan guna menjaga terjadinya kerusakan sehingga tidak dapat digunakan (*function failure*). Salah satu komponen pada PLTA yang rutin dilakukan kegiatan pemeliharaan (*maintenance*) adalah Guide Bearing Cooling Tube.

Dalam menjaga posisi turbine shaft yang berputar dengan kecepatan mencapai 333 rpm, digunakan guide bearing yang berfungsi untuk menjaga agar turbine shaft tetap berada dalam satu poros (*center*). Pada saat pengoperasian, guide bearing terkena gaya gesek akibat rotasi *turbine shaft* menyebabkan temperatur mengalami kenaikan. Untuk menjaga agar guide bearing tetap dalam temperatur yang normal, guide bearing diberikan pelumasan menggunakan oli, dengan kondisi guide bearing direndam didalam oli secara terus menerus dalam proses operasi. Untuk menurunkan temperatur oli yang meningkat dikarenakan terjadi perpindahan panas pada guide bearing, didalam oil dam atau tangki oli dialiri air yang bersirkulasi terus menerus melalui

pipa yang disebut dengan Cooling Tube. Oli yang digunakan pada proses heat exchanger tersebut adalah Pertamina *TURBOLUBE XT-46*, pada kondisi dilapangan temperatur oli dijaga dengan standar maksimum 60°C

## II. LANDASAN TEORI

Termodinamika adalah ilmu yang menggambarkan usaha untuk mengubah kalor (perpindahan energi yang disebabkan perbedaan suhu) menjadi energi serta sifat-sifat pendukungnya. Termodinamika berhubungan erat dengan fisika energi, panas, kerja, entropi dan kespontanan proses. Termodinamika juga berhubungan dengan mekanika statik. Aplikasi dan penerapan termodinamika bisa terjadi pada tubuh manusia, peristiwa meniup kopi panas, perkakas elektronik, refrigerator, mobil, pembangkit listrik dan industri.

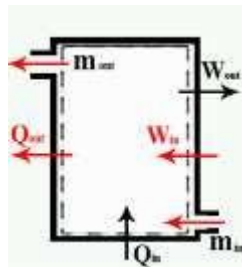
### 21. SISTEM TERMODINAMIKA

Klasifikasi sistem termodinamika berdasarkan sifat dari batasan dan arus benda, energi dan materi yang melaluinya. Ada tiga jenis sistem berdasarkan jenis pertukaran yang terjadi antara sistem dan lingkungannya, yakni sebagai berikut:

#### a. Sistem terbuka

Sistem yang menyebabkan terjadinya pertukaran energi (panas dan kerja) dan benda (materi) dengan lingkungannya.

Sistem terbuka ini meliputi peralatan yang melibatkan adanya suatu aliran massa kedalam atau keluar sistem seperti pada kompresor, turbin, nozzle, dan motor bakar

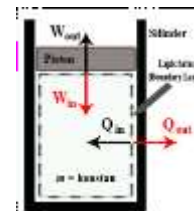


Gambar 1. Sistem Terbuka

b. Sistem tertutup

Sistem yang mengakibatkan terjadinya pertukaran energi (panas dan kerja) tetapi tidak terjadi pertukaran zat dengan lingkungan. Sistem tertutup terdiri atas suatu jumlah massa yang tertentu dimana massa ini tidak bisa melintasi lapis batas sistem. Tetapi, energi baik dalam bentuk panas (*heat*) maupun usaha (*work*) bisa melintasi lapis batas sistem tersebut. Dalam sistem tertutup, walaupun massa tidak bisa berubah selama proses berlangsung, tapi *volume* bisa saja berubah disebabkan adanya lapis batas yang bisa bergerak (*moving boundary*) pada salah satu bagian dari lapis batas sistem tersebut. Contoh sistem tertutup yaitu suatu balon udara yang dipanaskan, dimana massa udara didalam balon tetap, tetapi

*volumenya* berubah dan energi panas masuk kedalam masa udara didalam balon.



Gambar 2 Sistem Tertutup

c. Sistem terisolasi

Sistem terisolasi ialah sistem yang menyebabkan tidak terjadinya pertukaran panas, zat atau kerja dengan lingkungannya, contohnya: air yang disimpan dalam termos dan tabung gas yang terisolasi. Dalam kenyataan, sebuah sistem tidak bisa terisolasi sepenuhnya dari lingkungan, karena pasti ada terjadi sedikit pencampuran, walaupun hanya sedikit melalui atmosfer atau kondisi lingkungan. Dalam analisis sistem terisolasi, energi yang masuk kesistem sama dengan energi yang keluar dari sistem.

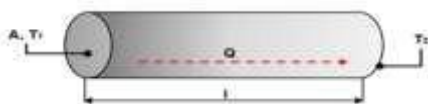
22. PERPINDAHAN KALOR

Perpindahan kalor adalah ilmu yang mempelajari berpindahnya suatu energi (berupa kalor) dari suatu sistem ke sistem lain karena adanya perbedaan temperatur. Perpindahan kalor tidak akan terjadi pada sistem yang memiliki temperatur sama. Perbedaan temperatur menjadi daya

penggerak untuk terjadinya perpindahan kalor.

### 23. PERPINDAHAN KALOR KONDUKSI

Konduksi adalah perpindahan kalor dari suatu bagian substansi ke suatu substansi tanpa adanya perpindahan modul/ partikel secara permanen. (Roger Kinsky, *Heat Engineering*, P.100)



Gambar3 Perpindahan kalor konduksi

Berdasarkan kemampuan menghantar kalor, zat dibagi menjadi dua golongan besar, yaitu konduktor dan isolator. Konduktor ialah zat yang mudah menghantar kalor. Isolator adalah zat yang sukar menghantar kalor. Banyaknya kalor ( $Q$ ) yang melalui dinding selama selang waktu ( $t$ ), dinyatakan sebagai berikut:

$$H = \frac{Q}{t} = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T}{L} \text{ (Roger Kinsky, Heat Engineering, P.102)}$$

atau :

$$Q = k \cdot A \cdot t \cdot \frac{\Delta T}{L}$$

Keterangan:

$Q$  = Kalor yang diterima atau dilepaskan

$k$  = Koefisien konduktivitas termal ( $W/m^{\circ}$

K)

$A$  = Luas penampang ( $m^2$ )

$\Delta T$  = Perbedaan temperatur [ $^{\circ}K$ ]

$L$  = Panjang [m]

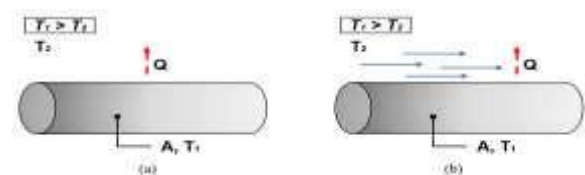
$H$  = Kalor yang merambat persatuan waktu (J/s) atau (W)

$t$  = Waktu [s]

Hukum konduksi panas disebut juga *Hukum Fourier*, menyatakan bahwa tingkat (*rate*) perpindahan panas melalui sebuah material adalah berbanding lurus dengan gradien negatif pada suhu dan luas, pada sudut siku pada gradien tersebut, melalui dimana panas mengalir.

### 24. PERPINDAHAN KALOR KONVEKSI

Adapun pada konveksi paksa, fluida yang telah dipanasi langsung diarahkan ke tujuannya oleh sebuah peniup (*blower*) atau pompa.



Gambar 4 Perpindahan konveksi secara alamiah (a) dan paksa (b)

Laju kalor sebuah panas memindahkan kalor ke fluida sekitarnya secara konveksi sebanding dengan luas permukaan benda yang bersentuhan dengan fluida dan beda suhu di antara benda dan fluida. Hal tersebut dapat ditulis sebagai berikut :

$$H = \frac{Q}{t} = h \cdot A \cdot \Delta T$$

(Roger Kinsky, *Heat Engineering*, P.112)

$Q$  = Kalor yang diterima atau dilepaskan

$h$  = Koefisien konduktivitas termal ( $W/m^{\circ}K$ )

$A$  = Luas penampang ( $m^2$ )

$\Delta T$  = Perbedaan temperatur [ $^{\circ}K$ ]

$H$  = Kalor yang merambat persatuan

waktu

$t$  = Waktu [s]

## 25. PERPINDAHAN KALOR RADIASI

Perpindahan kalor radiasi adalah perpindahan energi kalor dalam bentuk gelombang elektromagnetik yang tidak memerlukan zat/ molekul perantara atau perpindahan panas radiasi adalah proses dimana panas mengalir dari benda yang bersuhu tinggi ke benda yang bersuhu rendah bila benda-benda itu terpisah di dalam ruang hampa diantara benda-benda tersebut. Persamaan yang didapat sama dari hubungan ini dikenal sebagai hukum *Stefan-Boltzmann* yang berbunyi “*Energi yang dipancarkan oleh suhu permukaan (A) dan sebanding dengan pangkat empat suhu mutlak permukaan itu ( $T^4$ )*” dan ditulis sebagai berikut:

$$H = \frac{Q}{t} = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

(Roger Kinsky, *Heat Engineering*, P.129)

Keterangan :

$H$  = Kalor yang merambat persatuan waktu [J/s] atau [W]

$Q$  = Kalor yang diterima atau dilepaskan [J]

$t$  = Waktu [s]

$\sigma$  = Konstanta Stefan – Boltzman =  $5,67 \times 10^{-8} [W/M^{-2}K^{-4}]$

$A$  = Luas penampang [ $m^2$ ]

$T$  = Suhu mutlak [ $^{\circ}K$ ]

Karena tidak semua benda dianggap sebagai benda hitam sempurna maka persamaan Stefan- Boltzman untuk benda memiliki koefisien emisivitas, dengan nilai besaran faktor diantar 0 sampai 1 bergantung dengan zat dan keadaan permukaan. Sehingga benda dengan hitam sempurna dinyatakan dengan nilai besaran faktor = 1, dengan persamaan dapat ditulis sebagai berikut :

$$H = \frac{Q}{t} = e \cdot \sigma \cdot A (T_2^4 - T_1^4)$$

(Roger Kinsky, *Heat Engineering*, P.131)

Keterangan :

$H$  = Kalor yang merambat persatuan waktu [J/s] atau [W]

$Q$  = Kalor yang diterima atau dilepaskan [J]

$t$  = Waktu [s]

$\sigma$  = Konstanta Stefan – Boltzman =  $5,67 \times 10^{-8} [W/M^{-2}K^{-4}]$

$A$  = Luas penampang [ $m^2$ ]

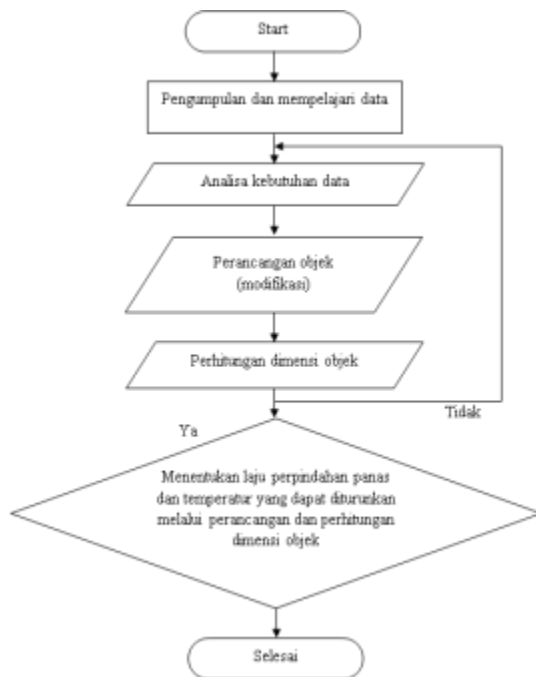
$T_2$  = Suhu mutlak pada benda/ material [ $^{\circ}K$ ]

$T_1$  = Suhu mutlak pada area sekitar (surrounding) [ $^{\circ}K$ ]

$e$  = Koefisien emisivitas

benda hitam sempurna  $e = 1$ , benda bukan hitam  $0 < e < 1$

### III. METODOLOGI PENELITIAN

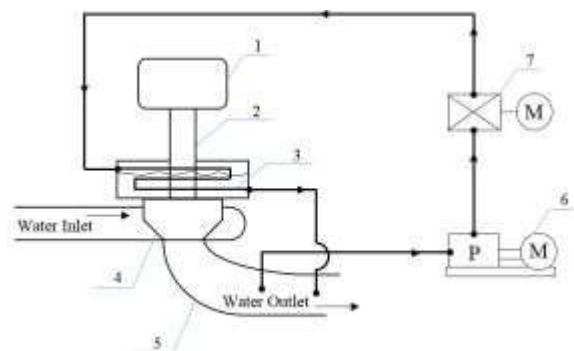


Gambar5 Diagram alir metodologi penelitian

#### 3,1, PENGAMBILAN DATA

##### 3.1.1. SIKLUS *HEAT EXCHANGER* PADA TURBIN PLTA SIGURAGURA

Berdasarkan Siklus *heat exchanger* pada turbin PLTA Siguragura, siklus alat penukarkalor (*heat exchanger*) pada pembangkit listrik tenaga air Siguragura (PLTA Siguragura) dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 6 Siklus *heat exchanger* pada turbin PLTA Siguragura

Keterangan :

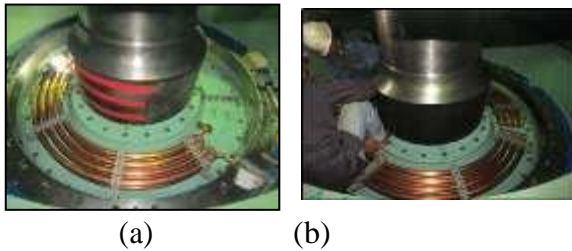
1. *Rotor*
2. *Turbine Shaft*
3. *Turbine Guide Bearing Cooling Tube*
4. *Runner*
5. *Drafttube*
6. *Main Water Supply Pump*
7. *Main Water Strainer*

##### 3.1.2. DESAIN *GUIDE BEARING COOLING TUBE*

*Guide bearing cooling tube* merupakan komponen yang direncanakan akan dimodifikasi. Hasil pengukuran pada komponen tersebut, *guide bearing cooling tube* memiliki bentuk seperti berikut :



Gambar 7 *Guide bearing cooling tube* *Guide bearing cooling tube* yang memiliki fungsi sebagai pipa penyalur air yang digunakan untuk proses perpindahan panas (*heat transfer*) antara air yang berada dalam tube dan oli yang berada pada *oil dam*.



Gambar 8 (a) Proses pemasangan dan (b) pengukuran dimensi *guide bearing cooling tube*

Dari hasil pengukuran pada saat pemasangan *guide bearing cooling tube* dilapangan, didapatkan dimensi dapat dilihat pada tabel Dimensi *Layer Guide Bearing Cooling Tube*

Tabel 1 Dimensi *Layer Guide Bearing Cooling Tube*

<i>Upper Layer Guide Bearing Cooling Tube</i>		
<i>Item Pengukuran</i>	<i>Dimensi Jari-jari [mm]</i>	<i>Sudut Keliling [°]</i>
<i>Jari-jari 1 (R1)</i>	620 [mm]	302 [°]
<i>Jari-jari 2 (R2)</i>	680 [mm]	302 [°]
<i>Jari-jari 3 (R3)</i>	740 [mm]	302 [°]
<i>Jari-jari 4 (R4)</i>	800 [mm]	302 [°]
<i>Jari-jari 1 (R1')</i>	620 [mm]	340 [°]
<i>Jari-jari 2 (R2')</i>	680 [mm]	302 [°]
<i>Jari-jari 3 (R3')</i>	740 [mm]	302 [°]
<i>Jari-jari 4 (R4')</i>	800 [mm]	322 [°]

$$K = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{x}{360} \text{ (Naniek A. Agus,}$$

*MudahBelajarMatematika, P.19)*

Keterangan:

$K$  = Keliling [mm]

$\pi$  = koefisien *phi* = 3.14159

$r$  = Jari – jari [mm]

$x$  = sudut bentangan [°]

Panjang bentangan:

$$K = (2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot \frac{x_1'}{360}) + (2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \frac{x_2'}{360}) + (2 \cdot \pi \cdot r_3 \cdot \frac{x_3'}{360}) + (2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot \frac{x_4'}{360}) + (2 \cdot \pi \cdot r_1' \cdot \frac{x_1'}{360}) + (2 \cdot \pi \cdot r_2' \cdot \frac{x_2'}{360}) + (2 \cdot \pi \cdot r_3' \cdot \frac{x_3'}{360}) + (2 \cdot \pi \cdot r_4' \cdot \frac{x_4'}{360})$$

Rumus luas penampang :

$$A = \pi \cdot d \cdot L \text{ (Naniek A. Agus, MudahBelajarMatematika,)}$$

Keterangan:

$A$  = Luas permukaan [mm<sup>2</sup>]

$\pi$  = koefisien *phi* = 3.1415

$d$  = Diameter [mm]

$L$  = Panjang bentangan [mm]

### 3.1.3. DATA TEMPERATUR *GUIDE BEARING COOLING TUBE*

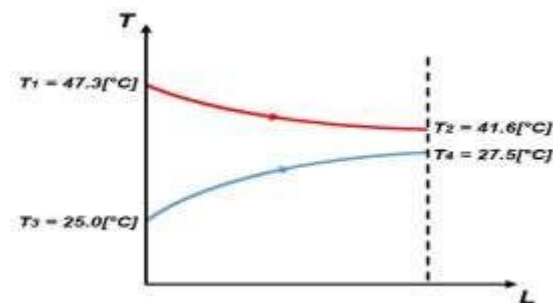
Berdasarkan hasil pengambilan data temperatur air dan oli *guide bearing cooling tube* dapat kita lihat pada tabel



Tabel 2 Temperatur air dan oli pada PLTA Sigurgura Unit No. 2

Item	Description	Temperature
Guide Bearing Cooling Tube	W/T G. Metal (Inlet) (T <sub>1</sub> )	47.3 [°C]
	W/T G. Oil (Outlet) (T <sub>2</sub> )	41.6 [°C]
Cooling Water System	Inlet (T <sub>3</sub> )	25.0 [°C]
	Outlet (T <sub>4</sub> )	27.5 [°C]
Ambient Temperatur	Turbine Pit	28.0 [°C]
	Generator Room	27.5 [°C]

Profil temperatur *heat exchanger guide bearing cooling tube* dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 8 Profil temperature aliran sejajar pada *guide bearing cooling tube*

Dari hasil pengambilan data temperature air dan oli pada *guide bearing cooling tube*, didapatkan profil temperatur yang digunakan untuk melakukan perhitungan perbedaan temperatur rata-rata logaritma (*LMTD*) dengan hasil perhitungan sebagai berikut:

$$LMTD = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln \left( \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}} \right)}$$

(RogerKinsky, Heat Engineering,)

Keterangan:

$\Delta T_{max}$  = Perbedaan temperatur maksimal / tertinggi [°C]

$\Delta T_{min}$  = Perbedaan temperatur minimal / terendah [°C]

Perbedaan temperatur rata-rata logaritma (*LMTD*):

$$LMTD = \frac{(47.3 - 25.0)[°C] - (41.6 - 27.5)[°C]}{\ln \left( \frac{(47.3 - 25.0)[°C]}{(41.6 - 27.5)[°C]} \right)}$$

$$LMTD = 17.8898 [°C]$$

### 3.1.4. KOEFISIEN PERPINDAHAN KALOR MENYELURUH *GUIDE BEARING COOLING TUBE*

Koefisien perpindahan kalor total *turbine guide bearing cooling tube* didapatkan melalui hasil perhitungan dari koefisien konvektivitas dan koefisien konduktivitas. Dimana pada table didapatkan data dan perhitungannya dapat dilakukan seperti berikut:

Tabel. 3 Nilai massa jenis dan koefisien pindah panas konveksi dari bahan cair

JenisZat	$\rho$ Bahan [kg/m <sup>3</sup> ]	$h$ Bahan
Air	990	203.54
Garam	0.4	155.98
OliPelumas	543	192.34
RumputLaut	962.15	128.59

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \sum \frac{x}{k} + \frac{1}{h_o}$$

(RogerKinsky, Heat Engineering,)

Keterangan:

$U$  = Keofisien perpindahan kalor menyeluruh [W/m<sup>2</sup> °C]

$h_i$  = Koefisien konveksi air [W/m<sup>2</sup> °C]

$x$  = Tebal material [m]

$k$  = Konduktivitas termal material [W/m °C]

$h_o$  = Koefisien konveksi oli [W/m<sup>2</sup> °C]



Koefisien perpindahan kalor menyeluruh :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{203.54 [W/m^2 \text{ }^\circ\text{C}]} + \frac{0.0008 [m]}{385 [W/m \text{ }^\circ\text{C}]} + \frac{1}{192.34 [W/m^2 \text{ }^\circ\text{C}]}$$

$$U = 98.87 [W/m^2 \text{ }^\circ\text{C}]$$

### 3.1.5. LAJU PERPINDAHAN KALOR GUIDE BEARING COOLING TUBE

Laju perpindahan kalor dapat ditentukan setelah luas penampang, *LMTD*, dan koefisien menyeluruh sudah ditentukan, maka:

$$Q = U \cdot A \cdot LMTD$$

(Roger Kinsky, Heat Engineering)

Keterangan :

$Q$  = Laju perpindahan kalor [W]

$U$  = Koefisien perpindahan kalor menyeluruh [ $W/m^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ]

$A$  = Luas penampang [ $m^2$ ]

*LMTD* = Perbedaan temperatur rata-rata logaritma [ $^\circ\text{C}$ ]

Sehingga,

$$Q = 98.87 [W/m^2 \text{ }^\circ\text{C}] \cdot 3.85 [m^2] \cdot 17.89 [^\circ\text{C}]$$

$$Q = 6,809.03 [W]$$

Data laju perpindahan panas dapat digunakan untuk menentukan laju aliran massa fluida melalui persamaan berikut:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (\text{Ali H. Pane, Alat Penukar Kalor,})$$

Keterangan :

$Q$  = Laju perpindahan kalor [W]

$\dot{m}$  = Laju aliran masa [kg/s]

$C_p$  = Kalor jenis fluida [ $J/kg^\circ\text{C}$ ]

$T_{h,in}$  = Temperatur fluida saat masuk [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_{h,out}$  = Temperatur air saat keluar [ $^\circ\text{C}$ ]

Sehingga,

$$6,809.03 [W] = \dot{m} \cdot 4180 [J/kg^\circ\text{C}] \cdot (27.5 - 25) [^\circ\text{C}]$$

$$\dot{m} = 0.65 [kg/s]$$

Dari hasil perhitungan perbedaan laju

perpindahan kalor pada *guide bearing cooling tube* didapatkan nilai sebesar 6,809.03 [W] dengan laju aliran massa sebesar 0.65 [kg/s].

## IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

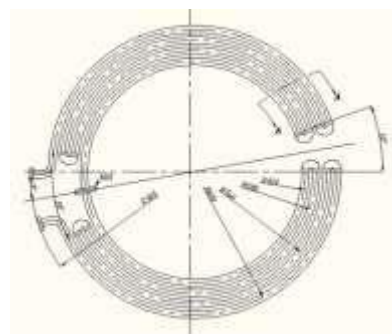
### 4.1 ANALISA GUIDE BEARING COOLING TUBE 1 LAYER

*Guide bearing cooling tube* merupakan komponen yang direncanakan akan dimodifikasi dari desain awal. Pada desain yang direncanakan, *cooling tube* akan dianalisa menjadi satu layer saja, dengan bentuk rancangan *cooling tube* sebagai berikut:



Gambar 9 *Guide bearing cooling tube 1 layer*

Dari hasil perhitungan pada rencana perancangan *cooling tube* yang dimodifikasi, didapatkan dimensi yang digunakan untuk perhitungan luas penampang yang merupakan permukaan area kontak (*surface area*) luas perhitungan sebagai berikut:



Gambar 10 *Detail Drawing Turbine Guide Bearing Cooling Tube 1 layer*

Tabel 4 Dimensi 1 Layer Guide Bearing Cooling Tube

Lower Layer Guide Bearing Cooling Tube		
Item Pengukuran	Dimensi Jari-jari [mm]	Sudut Keliling [°]
Jari-jari 1 (R1)	620 [mm]	340 [°]
Jari-jari 2 (R2)	680 [mm]	302 [°]
Jari-jari 3 (R3)	740 [mm]	302 [°]
Jari-jari 4 (R4)	800 [mm]	322 [°]

$$K = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{x}{360^\circ}$$

Keterangan :

$K$  = Keliling [mm]

$\pi$  = koefisien phi = 3.14159

$r$  = Jari - jari [mm]

$x$  = sudut bentangan [°]

Panjang bentangan guide bearing cooling tube, :

$$K = (2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot \frac{x_1}{360^\circ}) + (2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \frac{x_2}{360^\circ}) + (2 \cdot \pi \cdot r_3 \cdot \frac{x_3}{360^\circ}) + (2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot \frac{x_4}{360^\circ})$$

$$K = (2 \cdot \pi \cdot 620 [mm] \cdot \frac{340^\circ}{360^\circ}) + (2 \cdot \pi \cdot 680 [mm] \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}) + (2 \cdot \pi \cdot 740 [mm] \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}) + (2 \cdot \pi \cdot 800 [mm] \cdot \frac{322^\circ}{360^\circ})$$

$$K = 15,666.10 [mm]$$

Luas penampang:

$$A = \pi \cdot d \cdot L$$

Keterangan

$$A = \text{Luas permukaan [mm}^2\text{]}$$

$$\pi = \text{koefisien phi} = 3.14159$$

$d$  = Diameter [mm]

$L$  = Panjang bentangan [mm]

Dimanadimensi luaspermukaan guide bearing cooling tube:

$$A = \pi \cdot L \cdot d$$

$$A = \pi \cdot 40 [mm] \cdot 15,666.10 [mm]$$

$$A = 1,967,661.56 [mm^2] = 1.97 [m^2]$$

Dari hasil analisis turbine guide bearing cooling tube dilapangan, perhitungan luas penampang yang merupakan permukaan area kontak (surface area) atau yang biasa disebut permukaan utama (primary) didapatkan luas permukaan utama sebesar 1,967,661.56 [mm<sup>2</sup>] = 1.97 [m<sup>2</sup>], sehingga didapatkan:

$$NTU = \frac{U \cdot A}{C_{min}} \quad (\text{Ali H. Pane, Alat Penukar Kalor, 1.20})$$

NTU = Jumlah satuan perpindahan panas

U = Keofisien perpindahan kalor menyeluruh

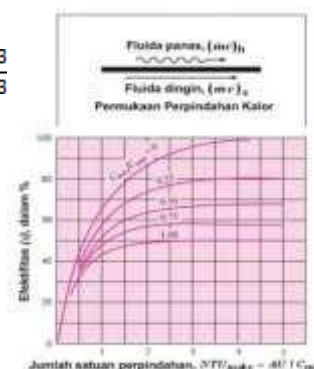
A = Luas permukaan [m<sup>2</sup>]

C<sub>min</sub> = Kalor jenis terkecil yang digunakan = C<sub>oil</sub> = 1,450 [J/kg °C]

Dimana :

$$NTU = \frac{98.87 [W/m^2 \text{ }^\circ\text{C}] \cdot 1.97 [m^2]}{1,450 [J/kg \text{ }^\circ\text{C}]}$$

$$NTU = 0.13$$



Gambar 11 Grafik Efektivitas Heat Exchanger aliran searah

Berdasarkan Gambar 10 Efektivitas Heat Exchanger aliran sejajar, dimana C<sub>min</sub>/C<sub>max</sub> = 0.35 & NTU = 0.13, maka

diperoleh efektivitas = 14 %.

Berdasarkan hasil pengambilan data temperatur air dan oli *guide bearing cooling tube* yang dilakukan di PLTA Siguragura (*Temperature Daily Report – Siguragura P.S.*), temperatur inlet air dan oli sebesar  $T_{c,in} = 25.0$  [°C] &  $T_{h,in} = 47.3$  [°C]. Maka didapatkan laju perpindahan kalor maksimal yang memungkinkan dengan persamaan:

$$Q_{maks} = C_{min} \cdot (T_{h,in} - T_{c,in})$$

(Ali H. Pane, Alat Penukar Kalor, 1.23)

Keterangan

$Q_{maks}$  = Laju perpindahan kalor maksimal yang memungkinkan [W]  
 $C_{min}$  = Kalor jenis terkecil yang digunakan =  $C_{oil} = 1,450$  [J/kg°C]  
 $T_{h,in}$  = Temperatur fluida panas saat masuk [°C]  
 $T_{c,in}$  = Temperatur fluida dingin saat masuk [°C]

Dimana,

$$Q_{maks} = 1,450 \text{ [J/kg °C]} \cdot (47.3 \text{ [°C]} - 25.0 \text{ [°C]})$$

$$Q_{maks} = 32,335 \text{ [W]}$$

Persamaan efektivitas digunakan untuk menentukan laju perpindahan kalor aktual, sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{Q_{aktual}}{Q_{maks}}$$

(Ali H. Pane, Alat Penukar Kalor,

Keterangan

$\varepsilon$  = Nilai efektivitas  
 $Q_{aktual}$  = Laju perpindahan kalor aktual [W]  
 $Q_{maks}$  = Laju perpindahan kalor maksimal yang memungkinkan [W]

Sehingga,

$$14 \text{ [%]} = \frac{Q_{aktual}}{32,335 \text{ [W]}}$$

$$Q_{aktual} = 4,203.55 \text{ [W]}$$

Hasil perhitungan laju perpindahan kalor digunakan untuk menentukan temperatur yang dapat dicapai dengan formula sebagai berikut :

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{c,out} - T_{c,in})_{air}$$

(Ali H. Pane, Alat Penukar Kalor)

Keterangan :

$Q$  = Laju perpindahan kalor [W]  $\dot{m}$  = Laju aliran masa [kg/s]  $C_p$  = Kalor jenis fluida  
 $C_{water} = 4,180$  [J/kg°C]  $T_{c,in}$  = Temperatur air saat masuk [°C]  $T_{c,out}$   
 = Temperatur air saat keluar [°C]

Sehingga,

$$4,203.55 \text{ [W]} = 0.65 \text{ [kg/s]} \cdot 4,180 \text{ [J/kg °C]} \cdot (T_{c,out} - 25.0 \text{ [°C]})$$

$$T_{c,out} = 26.54 \text{ [°C]}$$

Sedangkan perhitungan untuk menentukan temperatur oli dengan formula sebagai berikut:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{h,in} - T_{h,out})_{oli}$$

(Ali H. Pane, Alat Penukar Kalor)

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{h,in} - T_{h,out})_{oli}$$

(Ali H. Pane, Alat Penukar Kalor, 1.3)

Keterangan :

$Q$  = Laju perpindahan kalor  
 $\dot{m}$  = Laju aliran masa [kg/s]  
 $C_p$  = Kalor jenis fluida =  $C_{oil} = 1,450$  [J/kg °C]  
 $T_{h,in}$  = Temperatur oli saat masuk [°C]  
 $T_{h,out}$  = Temperatur oli saat keluar [°C]

Sehingga,

$$4,203.55 \text{ [W]} = 0.65 \text{ [kg/s]} \cdot 1,450 \text{ [J/kg °C]} \cdot (47.3 \text{ [°C]} - T_{h,out})$$

$$T_{h,out} = 42.85 \text{ [°C]}$$

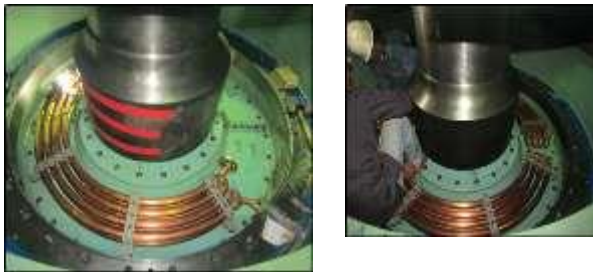
## 4.2. ANALISA GUIDE BEARING COOLING TUBE 2 LAYER

Sementara pada *guide bearing cooling tube* dengan 2 layer merupakan yang

terpasang saat ini di PLTA Siguragura dengan bentuk sebagai berikut :

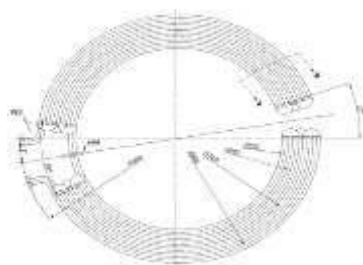


Gambar 12 Guide bearing cooling tube



(a) (b)  
Gambar 13 (a) Proses pemasangan dan (b) pengukuran dimensi guide bearing cooling tube

Dari hasil pengukuran pada saat pemasangan guide bearing cooling tube dilapangan, didapatkan dimensi yang digunakan untuk perhitungan luas penampang yang merupakan permukaan area kontak (*surface area*) atau yang biasa disebut permukaan utama (*primary*) dengan luas hasil perhitungan sebagai berikut :



Gambar 14 Detail Drawing Turbine Guide Bearing Cooling Tube

Tabel 5 Dimensi Layer Guide Bearing Cooling Tube

Upper Layer Guide Bearing Cooling Tube		
Item Pengukuran	Dimensi Jari-jari [mm]	Sudut Keliling [°]
Jari-jari 1 (R1)	620 [mm]	302 [°]
Jari-jari 2 (R2)	680 [mm]	302 [°]
Jari-jari 3 (R3)	740 [mm]	302 [°]
Jari-jari 4 (R4)	800 [mm]	302 [°]
Jari-jari 1 (R1')	620 [mm]	340 [°]
Jari-jari 2 (R2')	680 [mm]	302 [°]
Jari-jari 3 (R3')	740 [mm]	302 [°]
Jari-jari 4 (R4')	800 [mm]	322 [°]

$$K = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{x}{360^\circ}$$

Item	Description	Temperature
Guide Bearing Cooling Tube	W/T G. Metal (Inlet) (T1)	47.3 [°C]
	W/T G. Oil (Outlet) (T2)	41.6 [°C]
Cooling Water System	Inlet (T3)	25.0 [°C]
	Outlet (T4)	27.5 [°C]
Ambient Temperatur	Turbine Pit	28.0 [°C]
	Generator Room	27.5 [°C]

Keterangan:

$K$  = Keliling [mm]

$\pi$  = koefisien phi = 3.14159

$r$  = Jari - jari [mm]

$x$  = sudut bentangan [°]

Panjang bentangan:

$$K = (2 \cdot \pi \cdot 620 \text{ [mm]} \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}) + (2 \cdot \pi \cdot 680 \text{ [mm]} \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}) + (2 \cdot \pi \cdot 740 \text{ [mm]} \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}) + (2 \cdot \pi \cdot 800 \text{ [mm]} \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}) + (2 \cdot \pi \cdot 620 \text{ [mm]} \cdot \frac{340^\circ}{360^\circ}) + (2 \cdot \pi \cdot 680 \text{ [mm]} \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}) + (2 \cdot \pi \cdot 740 \text{ [mm]} \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}) + (2 \cdot \pi \cdot 800 \text{ [mm]} \cdot \frac{322^\circ}{360^\circ})$$

$$K = 30,641.46 \text{ [mm]}$$

Rumus luas penampang:

$$A = \pi \cdot d \cdot L$$

Keterangan

$A$  = Luas permukaan [ $\text{mm}^2$ ]  
 $\pi$  = koefisien  $\phi$  = 3.14159  
 $d$  = Diameter [ $\text{mm}$ ]

$L$  = Panjang bentangan [ $\text{mm}$ ]

Dimana dimensi luas permukaan *guide*

*bearing cooling tube*:

$$A = \pi \cdot L \cdot d$$

$$A = \pi \cdot 40 [\text{mm}] \cdot 30,641.46 [\text{mm}]$$

$$A = 3,850,519.42 [\text{mm}^2] = 3.85 [\text{m}^2]$$

Dari hasil pengukuran pada saat pemasangan *turbine guide bearing cooling tube* dilapangan, perhitungan luas penampang yang merupakan permukaan area kontak (*surface area*) atau yang biasa disebut permukaan utama (*primary*) didapatkan luas permukaan utama  $3,850,519.42 [\text{mm}^2] = 3.85 [\text{m}^2]$ .

Berdasarkan hasil pengambilan data temperatur air dan oli *guide bearing cooling tube* yang dilakukan di PLTA Siguragura Unit No. 2 didapatkan data seperti berikut:

#### 4.3. ANALISA GUIDE BEARING COOLING TUBE 3 LAYER

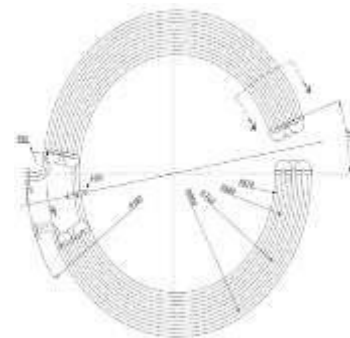
Pada desain yang direncanakan berikutnya, *turbine guide bearing cooling tube* akan dianalisa menjadi 3 layer. Pada *turbine guide bearing cooling tube* ini akan direncanakan penambahan panjang dan dianalisa perubahan temperatur yang dapat dicapai dengan *turbine guide bearing cooling tube 3 layer* tersebut. Rancangan

*turbine guide bearing cooling tube 3 layer* sebagai berikut :



Gambar 15 *Guide bearing cooling tube 3 layer*

Dari hasil perhitungan pada rencana perancangan *turbine guide bearing cooling tube* yang dimodifikasi, didapatkan dimensi yang lebih panjang dari *turbine guide bearing cooling tube* dengan 1 layer atau 2 layer digunakan untuk perhitungan luas penampang yang merupakan permukaan area kontak (*surface area*) atau biasa disebut permukaan utama (*primary surface*) dengan perhitungan dimensi atau luas penampang sebagai berikut :



Gambar 16 *Detail Drawing Turbine Guide Bearing Cooling Tube 3 layer*



Tabel 7 Dimensi 3 Layer Guide Bearing Cooling Tube

Lower Layer Guide Bearing Cooling Tube		
Item Pengukuran	Dimensi Jari-jari [mm]	Sudut Keliling [°]
Jari-jari 1 (R1)	620 [mm]	340 [°]
Jari-jari 2 (R2)	680 [mm]	302 [°]
Jari-jari 3 (R3)	740 [mm]	302 [°]
Jari-jari 4 (R4)	800 [mm]	322 [°]
Jari-jari 1 (R1')	620 [mm]	302 [°]
Jari-jari 2 (R2')	680 [mm]	302 [°]
Jari-jari 3 (R3')	740 [mm]	302 [°]
Jari-jari 4 (R4')	800 [mm]	302 [°]
Jari-jari 1 (R1'')	620 [mm]	302 [°]
Jari-jari 2 (R2'')	680 [mm]	302 [°]
Jari-jari 3 (R3'')	740 [mm]	302 [°]
Jari-jari 4 (R4'')	800 [mm]	302 [°]

$$K = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{x}{360^\circ}$$

Keterangan:

$K$  = Keliling [mm]

$\pi$  = koefisien phi = 3.14159

$r$  = Jari – jari [mm]

$x$  = sudut bentangan [°]

Panjang bentangan guide bearing cooling tube:

$$K = \left(2 \cdot \pi \cdot 620 \text{ [mm]} \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}\right) + \left(2 \cdot \pi \cdot 680 \text{ [mm]} \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}\right) + \left(2 \cdot \pi \cdot 740 \text{ [mm]} \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}\right) + \left(2 \cdot \pi \cdot 800 \text{ [mm]} \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}\right) + \left(2 \cdot \pi \cdot 620 \text{ [mm]} \cdot \frac{340^\circ}{360^\circ}\right) + \left(2 \cdot \pi \cdot 680 \text{ [mm]} \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}\right) + \left(2 \cdot \pi \cdot 740 \text{ [mm]} \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}\right) + \left(2 \cdot \pi \cdot 800 \text{ [mm]} \cdot \frac{322^\circ}{360^\circ}\right) + \left(2 \cdot \pi \cdot 620 \text{ [mm]} \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}\right) + \left(2 \cdot \pi \cdot 680 \text{ [mm]} \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}\right) + \left(2 \cdot \pi \cdot 740 \text{ [mm]} \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}\right) + \left(2 \cdot \pi \cdot 800 \text{ [mm]} \cdot \frac{302^\circ}{360^\circ}\right)$$

$$K = 45,616.83 \text{ [mm]}$$

Rumus luas penampang:

$$A = \pi \cdot d \cdot L$$

Keterangan

$A$  = Luas permukaan [mm<sup>2</sup>]

$\pi$  = koefisien phi = 3.14159

$d$  = Diameter [mm]

$L$  = Panjang bentangan [mm]

Dimana dimensi luas permukaan guide bearing cooling tube:

$$A = \pi \cdot L \cdot d$$

$$A = \pi \cdot 40 \text{ [mm]} \cdot 45,616.83 \text{ [mm]}$$

$$A = 5,729,473.27 \text{ [mm}^2\text{]} = 5.73 \text{ [m}^2\text{]}$$

Dari hasil analisa turbine guide bearing cooling tube dilapangan, perhitungan luas penampang yang merupakan permukaan area kontak (surface area) atau yang biasa disebut permukaan utama (primary) didapatkan luas permukaan utama sebesar 5,729,473.27 [mm<sup>2</sup>]/ 5.73 [m<sup>2</sup>], sehingga didapatkan :

$$NTU = \frac{U \cdot A}{C_{min}} \quad (\text{Ali H. Pane, Alat Penukar Kalo}),$$

Keterangan

$NTU$  = Jumlah satuan perpindahan panas

$U$  = Keofisien perpindahan kalor menyeluruh [W/m<sup>2</sup> °C]

$A$  = Luas permukaan [m<sup>2</sup>]

$C_{min}$  = Kalor jenis terkecil yang digunakan =

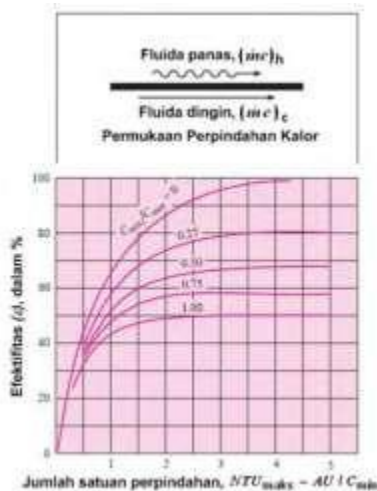
$C_{oil} = 1,450 \text{ [J/kg °C]}$

]

Dimana :

$$NTU = \frac{98.87 [W/m^2\text{C}] \cdot 5.73 [m^2]}{1,450 [J/kg\text{C}]}$$

$$NTU = 0.39$$



Gambar 17 Grafik Efektivitas Heat Exchanger aliran searah

Berdasarkan hasil pengambilan data temperatur air dan oli *guide bearingcooling tub* yang dilakukan di PLTA Siguragura Unit No. 2

Maka didapatkan laju perpindahan kalor maksimal yang memungkinkan dengan persamaan:

$$Q_{maks} = C_{min} \cdot (T_{h,in} - T_{c,in})$$

(Ali H. Pane, Alat Penukar Kalor, )

Keterangan

- $Q_{maks}$  = Laju perpindahan kalor maksimal yang memungkinkan [W]
- $C_{min}$  = Kalor jenis terkecil yang digunakan = Coil = 1,450 [J/kg°C]
- $T_{h,in}$  = Temperatur fluida panas saat masuk [°C]
- $T_{c,in}$  = Temperatur fluida dingin saat masuk [°C]

Dimana,

$$Q_{maks} = 1,450 [J/kg\text{C}] (47.3 [^{\circ}\text{C}] - 25.0 [^{\circ}\text{C}])$$

$$Q_{maks} = 32,335 [W]$$

Persamaan efektivitas digunakan untuk menentukan laju perpindahan kalor aktual, sebagai berikut :

$$\varepsilon = \frac{Q_{aktual}}{Q_{maks}}$$

(Ali H. Pane, Alat Penukar Kalor, 1.20)

$\varepsilon$  = Nilai efektivitas

Keterangan:

$Q_{aktual}$  = Laju perpindahan kalor aktual [W]

$Q_{maks}$  = Laju perpindahan kalor maksimal yang memungkinkan [W]

Sehingga,

$$34 [\%] = \frac{Q_{aktual}}{32,335 [W]}$$

$$Q_{aktual} = 10,933.9 [W]$$

Hasil perhitungan laju perpindahan kalor digunakan untuk menentukan temperatur yang dapat dicapai dengan formula sebagai berikut:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{c,out} - T_{c,in})_{air}$$

(Ali H. Pane, Alat Penukar Kalor, )

Keterangan :

$Q$  = Laju perpindahan kalor

$\dot{m}$  = Laju aliran masa [kg/s]

$C_p$  = Kalor jenis fluida =  $C_{water} = 4,180 [J/kg\text{C}]$

$T_{c,in}$  = Temperatur air saat masuk [°C]

$T_{c,out}$  = Temperatur air saat keluar [°C]

Sehingga,

$$10,933.9 [W] = 0.65 [kg/s] \cdot 4,180 [J/kg\text{C}] \cdot (T_{c,out} - 25.0 [^{\circ}\text{C}])$$

$$T_{c,out} = 29.04 [^{\circ}\text{C}]$$

Sedangkan perhitungan untuk menentukan temperatur oli dengan formula sebagai berikut :

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{h,in} - T_{h,out})_{oli}$$



(Ali H. Pane, Alat Penukar Kalor, 1.3)

Keterangan :

$Q$  = Laju perpindahan kalor [W]

$\dot{m}$  = Laju aliran masa [kg/s]

$C_p$  = Kalor jenis fluida =  $C_{oil} = 1,450$  [J/kg °C]

$T_{h,in}$  = Temperatur oli saat masuk [°C]

$T_{h,out}$  = Temperatur air saat keluar [°C]

Sehingga,

$$10,933.9 \text{ [W]} = 0.65 \text{ [kg/s]} \cdot 1,450 \text{ [J/kg °C]} \cdot (47.3 \text{ [°C]} - T_{h,out})$$

$$T_{h,out} = 35.66 \text{ [°C]}$$

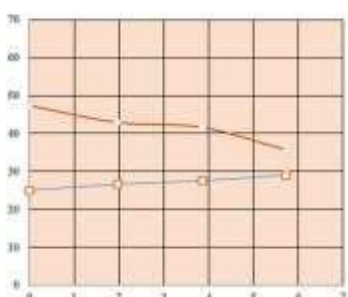
#### 4.4 PEMBAHASAN

Dari hasil analisa yang dilakukan terhadap *turbine guide bearing cooling tube* dengan beberapa variasi dimensi (luas penampang) didapatkan data temperatur oli terendah mencapai nilai 35.66 [°C] dengan variasi pipa *heat exchanger 3 layer* atau luas penampang sebesar 5.73 [m²].

Tabel 4.3 Perhitungan dimensi dan temperatur pada *guide bearing cooling tube*

Guide Bearing Cooling Tube	Luas [m²]	Air		Oli		$\Delta T_{max}$ [°C]	$\Delta T_{min}$ [°C]
		$T_{c,in}$ [°C]	$T_{c,out}$ [°C]	$T_{h,in}$ [°C]	$T_{h,out}$ [°C]		
1 Layer	1.97	25.00	26.54	47.30	42.85	22.30	16.31
2 Layer	3.85	25.00	27.5	47.30	41.60	22.30	14.10
3 Layer	5.73	25.00	29.04	47.30	35.66	22.30	6.63

Perbandingan Temperatur Oli & Air dengan Luas Penampang Pipa



Gambar 16 Grafik Perbandingan Temperatur Oli & Air dengan Luas Penampang Pipa

Pada Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Temperatur Oli & Air dengan Luas Penampang Pipa dijelaskan bahwa  $\Delta T_{min}$  yang dapat dicapai dengan luas penampang 5.73 [m²] adalah sebesar 6.63 [°C].

#### 5. KESIMPULAN

Dari hasil pengambilan data, analisa perancangan, dan perhitungan yang sudah dilakukan pada *turbine guide bearing cooling tube*, maka dapat diambil kesimpulan :

1. Temperatur maksimum pada *guide bearing cooling tube* mencapai 47.3 [°C].
2. Pada *guide bearing cooling tube* terdapat perpindahan yang terjadi dengan cara perindahan kalor konduksi dan konveksi.
3. Hasil perhitungan koefisien perpindahan kalor menyeluruh pada *guide bearing cooling tube* adalah 98.87 [W/m²°C].
4.  $\Delta T_{min}$  pada *guide bearing cooling tube* yang terpasang sekarang (dengan 2 layer) adalah 14.1 [°C].
5.  $\Delta T_{min}$  yang dapat dicapai dengan luas penampang 5.73 [m²] adalah sebesar 6.63 [°C].

## DAFTAR PUSTAKA

1. <https://nurulimantmunib.wordpress.com/2011/08/14/sistem-thermodinamika/>
2. 2010, *Tarik Al-Shemmeri, Engineering Thermodynamics (First Edision), ISBN 978-87-7681-670-4*
3. <http://www.sainsseru.com/2018/01/perpindahan-kalor-konduksi-konveksi-radiasi.html>
4. <http://seputarpengertian.blogspot.com/2017/07/pengertian-perpindahan-kalor-secara-.html>
5. <http://sriwulandaritermodinamika.blogspot.com/2015/03/alat-penukar-kalor-heat-exchanger.html>
6. <http://sriwulandaritermodinamika.blogspot.com/2015/03/alat-penukar-kalor-heat-exchanger.html>
7. <https://artikel-teknologi.com/macam-macam-heat-exchanger-alat-penukar-panas-bagian-5/>
8. 2014, Ali Hasimi Pane, *Alat Penukar Kalor(Heat Exchanger), Advance Learning Consultant*
9. 1989, *Roger Kinsky, Heat Engineering (An Introduction to Thermodynamics)*
10. Agus, NuniekAvianti. 2008. *Mudah Belajar Matematika 3 Untuk Kelas IX Sekolah Menengah Pertama/Madrasah Tsanawiyah.* Jakarta :Pusat Perbukuan, Departemen Pendidikan Nasional

