

**ANALISA PENGARUH JUMLAH *PLUG* PADA KONDENSER
TERHADAP *EFFISIENSI* DAN *HEAT TRANSFER* YANG HILANG
DI PLTU UNIT 3 DAN 4 PT. PJB UP. GRESIK**

Masrufaiyah, Tri Joko Sulistiono

ABSTRAK

Kondenser merupakan salah satu komponen utama pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Pada kondenser terdapat permasalahan kebocoran *tube* yang akan mempengaruhi *efisiensi* dan *heat transfer* yang dihasilkan. Cara pemeliharanya adalah dengan pemberian *Plug* pada *tube* yang bocor sehingga *fluida* air laut yang melewati *tube* tidak tercampur dengan air kondensasi uap dari turbin. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perpindahan panas kondenser Pembangkit listrik tenaga uap dan pengaruh perpindahan panas apabila terdapat *plug* pada PLTU unit 3 dan 4 di PT. PJB Sektor gresik. Selain itu peneliti juga membandingkan *effisiensi* apabila terdapat *plug* dan tidak terdapat *plug*. Perhitungan perpindahan panas menggunakan rumus LMTD (*logarithmic mean temperature difference*) dan rumus *efektifitas/effisiensi*.

Hasil perhitungan diketahui PLTU Gresik unit 3 dan 4 memiliki heat transfer 194.738.408 W atau setara dengan 194.73 MW. Jumlah plug maksimum adalah 6000 plug dan tube minimum yang diijinkan 8528 dari total keseluruhan tube 14528 buah. *Effisiensi* kondenser PLTU gresik unit 3 dan 4 apabila tidak terdapat plug adalah 93,64% akan tetapi terjadi penurunan 0,01 % apabila terdapat satu plug.

Kata Kunci : *Heat transfer, maksimum plug, efisiensi*

PENDAHULUAN

Pemerintah dalam program 35.000 MW yang ditugaskan pada PT.PLN (persero) tidak lepas dari dukungan perusahaan PT. Pembangkitan Jawa Bali yang merupakan anak perusahaan PLN. PT Pembangkitan Jawa Bali bergerak dalam bidang pembangkitan guna

membantu menyuplai kebutuhan listrik di seluruh Indonesia. PT. PJB khususnya pada wilayah Gresik terpasang Pembangkit listrik tenaga gas (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), dan Pembangkit Listrik tenaga Gas Uap (PLTGU) yang total daya yang terpasang 2.218,98 MW.[5] Untuk memenuhi ketersediaan tenaga

listrik agar tetap terpenuhi diperlukan pemeliharaan-pemeliharaan peralatan utama guna memperpanjang usia pakai (*lifetime*) dan dapat beroperasi normal.

Pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) terdapat berbagai macam peralatan utama yaitu boiler, Pompa, Kondenser, Turbin dan generator untuk membentuk siklus Rankine sehingga menghasilkan tenaga listrik. Kondenser merupakan salah satu komponen utama. Kondensor sebagai komponen untuk membentuk siklus tertutup atau siklus rankine yang pada prinsip kerjanya uap yang digunakan untuk memutar turbin tidak dibuang akan tetapi dikondensasikan menjadi air dan dialirkan ke boiler menggunakan pompa untuk dijadikan uap kembali membentuk siklus. Untuk itu perlu dilakukan pemeliharaan kondenser agar kinerjanya dapat maksimal, memperpanjang usia pakai (*lifetime*) dan dapat mentransfer panas dengan baik.

Pada kondenser terdapat permasalahan kebocoran *tube* yang akan mempengaruhi *efisiensi* dan *heat transfer* yang dihasilkan. Apabila terjadi kebocoran *tube* condenser cara pemeliharanya adalah dengan pemberian *Plug* pada *tube* yang bocor sehingga *fluida* air laut yang melewati *tube* tidak tercampur dengan air kondensasi uap dari turbin. Air kondensasi yang tercampur air laut dan masuk pada boiler akan mengakibatkan korosi pada *tube* boiler. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui Jumlah *plug* maksimum dan jumlah *tube* minimum yang masih diijinkan pada

kondenser PLTU gresik unit 3-4 sampai kondenser tersebut tidak efisien lagi dan perlu dilakukan *Retubing* dan untuk mengetahui pengaruh *effisiensi* terhadap *heat transfer* condenser setelah dilakukan plugging pada PLTU gresik unit 3-4. Kondenser merupakan *heat exchanger* tipe *sheel and tube, indirect contact* karena menggunakan fluida pendingin air laut

1. *Fluida* yang didinginkan adalah *steam*
2. *Fluida* pendingin air laut (*sea water*)

KAJIAN TEORI

Perpindahan Panas

Menurut [Brogan, R.J., 2011] perpindahan panas adalah salah satu dari disiplin ilmu teknik termal yang mempelajari cara menghasilkan panas, menggunakan panas, mengubah panas, dan menukarkan panas di antara sistem fisik. Perpindahan panas diklasifikasikan menjadi konduktivitas termal, konveksitermal, radiasi termal, dan perpindahan panas melalui perubahan fasa.

Konduksi termal adalah pertukaran mikroskopis langsung dari energi kinetik partikel melalui batas antara dua sistem. Ketika suatu objek memiliki temperatur yang berbeda dari benda atau lingkungan di sekitarnya, panas mengalir sehingga keduanya memiliki temperatur yang sama pada suatu titik kesetimbangan termal. Perpindahan panas secara spontan terjadi dari tempat bertemperatur tinggi ke tempat bertemperatur rendah, seperti

yang dijelaskan oleh hukum kedua termodinamika.

Konveksi terjadi ketika aliran bahan curah atau fluida (gas atau cairan) membawa panas bersama dengan aliran materi. Aliran fluida dapat terjadi karena proses eksternal, seperti gravitasi atau gaya apung akibat energi panas mengembangkan volume fluida. Konveksi paksa terjadi ketika fluida dipaksa mengalir menggunakan pompa, kipas, atau cara mekanis lainnya.

Heat Exchanger atau sering kita sebut alat penukar panas merupakan alat yang berfungsi untuk memindahkan energi panas antara dua atau lebih fluida dan terjadi pada temperatur yang berbeda antara fluida, dimana fluida tersebut ada yang bertindak sebagai fluida panas (*hot fluid*) dan yang lain bertindak sebagai fluida dingin (*cold fluid*).

Heat Exchanger dapat digunakan sebagai pemanas (*regenerator*) maupun sebagai pendingin (*recuperator*) tergantung pada tinjauan perpindahan panas yang terjadi. Dalam kehidupan sehari-hari kita tidak akan terlepas pada alat ini baik dari skala kecil, seperti AC (*Air Conditioner*) maupun skala besar seperti Powerplant.

Berdasarkan jumlah fluida kerjanya, *Heat Exchanger* dapat dibagi menjadi dua fluida, tiga fluida dan N-fluida ($N > 3$), namun harus sesuai dengan konsep dasar *heat exchanger*, yaitu harus ada yang bertindak sebagai fluida panas dan fluida dingin. Umumnya terdapat dua fluida kerja pada *Heat Exchanger* baik untuk proses pemanasan, pendinginan, penambahan

panas maupun penyerapan panas. Penggunaan fluida kerja yang lebih dari dua fluida biasanya diaplikasikan pada industri yang menggunakan proses kimia seperti proses penghilangan kandungan nitrogen dari bahan baku gas alam.

Aliran fluida yang mengalir di dalam *Heat Exchanger* dapat dikelompokkan menjadi single pass dan multi pass *heat exchanger*. *Heat Exchanger* dapat disebut single pass ketika suatu fluida tepat mengalir hanya satu kali di dalam *Heat Exchanger* tersebut. Sedangkan dikatakan multi pass apabila fluida mengalir lebih dari satu kali di dalam sebuah *heat exchanger*. Untuk single pass *Heat Exchanger* terdapat dua jenis arah alirannya itu counter flow dan parallel flow. Klasifikasi *Heat Exchanger* dilihat dari alirannya Ada empat konfigurasi aliran dasar yaitu aliran berlawanan (*Countercurrent Flow*), aliran searah (*Cocurrent Flow*), aliran bersilangan (*Cross Flow*).

Analisa Perhitungan Heat transfer Kondenser

Uap air jenuh keluar dari turbin akan langsung menuju kondenser untuk dikondensasikan sehingga uap air berubah fase seluruhnya menjadi air. Tekanan uap air masuk ke kondensor diasumsikan sama dengan air keluaran kondenser. Selanjutnya di cari berapa nilai entalpi uap outlet turbin. Kita akan menggunakan tabel uap air saturasi. Pada tabel uap saturasi dengan diketahui *temperature fluida steam* diperoleh *entalpi inlet condenser* berupa *steam* $I_{in} = 2444,35$ kJ/kg dan entalpi outlet kondenser berupa air (*liquid*) $I_{out} = 159.153$ kJ/kg.

Dari nilai –nilai desain tersebut maka dapat dicari berapakah besarnya

target desain yang sebenarnya diinginkan oleh pabrikan menyangkut perpindahan panasnya. Persamaan perpindahan panas dalam kondenser secara termodinamis adalah sebagai berikut:

$$\dot{Q} = (\dot{m}_{h_{in}} \times I_{in}) - (\dot{m}_{h_{out}} \times I_{out})$$

[2.1]

Dimana :

\dot{Q} = Perpindahan panas di dalam kondenser

$\dot{m}_{h_{in}}$ = Mass flow rate steam masuk kondenser

I_{in} = Enthalpysteam masuk kondenser

$\dot{m}_{h_{out}}$ = Mass flow rate keluar kondenser

I_{out} = Enthalpy air keluar kondenser

Persamaan diatas kita dapat mengetahui target desain yang sebenarnya diinginkan oleh pabrikan menyangkut perpindahan panasnya *heat transfer* dari kondenser.

Perhitungan Jumlah *plug* Maksimum yang masih Diijinkan.

Sebelum melakukan Analisa perhitungan jumlah *plug* maksimum kita cari nilai koefisien konveksi fluida panas dengan perpindahan fasa pada tabel. Pada tabel cari nilai koefisien konveksi fluida panas minimumnya sehingga kita dapat mencari perpindahan panas minimum yang diijinkan untuk dapat merubah fasa menjadi air dengan menggunakan rumus dibawah. Dengan mengetahui perpindahan panas minimumnya kita

dapat mencari maksimum *plugging* pada *tube* kondenser.

$$\dot{Q} = U \times A \times F \times \Delta T_{lm,CF}$$

[2.2]

Dengan :

$$U = \frac{1}{(1/h_i) + (1/h_o)}$$

[2.3]

$$\Delta T_{lm,CF} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln[(T_{hi} - T_{co}) / (T_{ho} - T_{ci})]}$$

[2.4]

Dimana :

U = Overall koefisien konveksi

A = Cooling Surface

F = Faktor Koreksi untuk *heat exchanger type shell and tube*

$\Delta T_{lm,CF}$ = Log Mean Temperatur Difference

$A = N \cdot \pi \cdot D \cdot L$

Analisa perhitungan Effisiensi kondenser

Effisiensi atau Effectiveness merupakan sebuah besaran yang dapat menjelaskan seberapa efektif kerja sebuah *heat exchanger*. Persamaan yang digunakan untuk menghitung effectiveness tersebut adalah :

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_{cmax}}$$

[2.5]

Dengan :

$$\dot{Q}_{cmax} = C_{min} (T_{hi} - T_{ci})$$

[2.6]

$$C_{min} = C_c = \dot{m}_{ci} \times Cp_c$$

[2.7]

Atau

$$C_{min} = C_h = \dot{m}_{hi} \times Cp_h$$

[2.8]

Dimana :

$\dot{Q}_{c\max}$ = Perpindahan panas maximum yang mungkin dicapai oleh kondenser

C_c = Kapasitas panas *fluida* pendingin

C_h = Kapasitas panas *fluida* panas

C_{\min} = Kapasitas panas minimum

Artinya bila $C_c < C_h$, maka $C_{\min} = C_c$

; bila $C_h < C_c$, maka $C_{\min} = C_h$

Sehingga bisa dihitung :

$$C_{p_c} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{ci} \times (T_{co} - T_{ci})} \quad [2.9]$$

$$C_c = \frac{\dot{Q}}{(T_{co} - T_{ci})} \quad [2.10]$$

$$C_{p_h} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{m}_h \times (T_{ho} - T_{hi})} \quad [2.11]$$

$$C_h = \frac{\dot{Q}_c}{(T_{ho} - T_{hi})} \quad [2.11]$$

Kondenser pada PLTU

Kondenser adalah merupakan *Heat Exchanger Indirect Contact type shell and tube*. Kondenser merupakan peralatan utama dalam PLTU. Kondenser adalah peralatan yang berfungsi untuk mengubah uap menjadi air. Proses perubahannya dilakukan dengan cara mengalirkan uap ke dalam suatu ruangan yang berisi pipa-pipa (*tubes*). Uap mengalir di luar pipa-pipa (*shell side*) sedangkan air sebagai pendingin mengalir di dalam pipa-pipa (*tube side*). Kondenser seperti ini disebut kondenser tipe *surface* (permukaan). Kebutuhan air untuk pendingin di kondenser sangat besar sehingga dalam perencanaan

biasanya sudah diperhitungkan. Air pendingin diambil dari sumber yang cukup persediannya, yaitu dari danau, sungai atau laut. Posisi kondenser umumnya terletak dibawah turbin sehingga memudahkan aliran uap keluar turbin untuk masuk kondenser karena gravitasi.

Di dalam PLTU UP GRESIK menggunakan pendingin air laut karena lokasi pembangkit yang dekat dengan laut dan persediaannya air laut banyak. Untuk pendinginan menggunakan air laut harus menggunakan *Heat Exchanger (condenser) type indirect contact* karena air kondensasi tidak boleh tercampur langsung dengan air laut. Air laut mengandung conductivity yang sangat tinggi sedangkan syarat air pengisi boiler *conductivitynya* dibawah $1\mu S$ untuk itu air laut tidak diperbolehkan tercampur dengan air kondensasi uap dari turbin yang akan masuk kembali ke dalam boiler PLTU maka dalam hal itu PLTU memilih kondenser *indirect contact*.

Laju perpindahan panas tergantung pada aliran air pendingin, kebersihan pipa-pipa dan perbedaan temperatur antara uap dan air pendingin. Proses perubahan uap menjadi air terjadi pada tekanan dan temperatur jenuh, dalam hal ini kondenser berada pada kondisi vakum. Karena temperatur air pendingin sama dengan temperatur udara luar, maka temperatur air kondensatnya maksimum mendekati temperatur udara luar. Apabila laju

perpindahan panas terganggu, maka akan berpengaruh terhadap tekanan dan temperature.



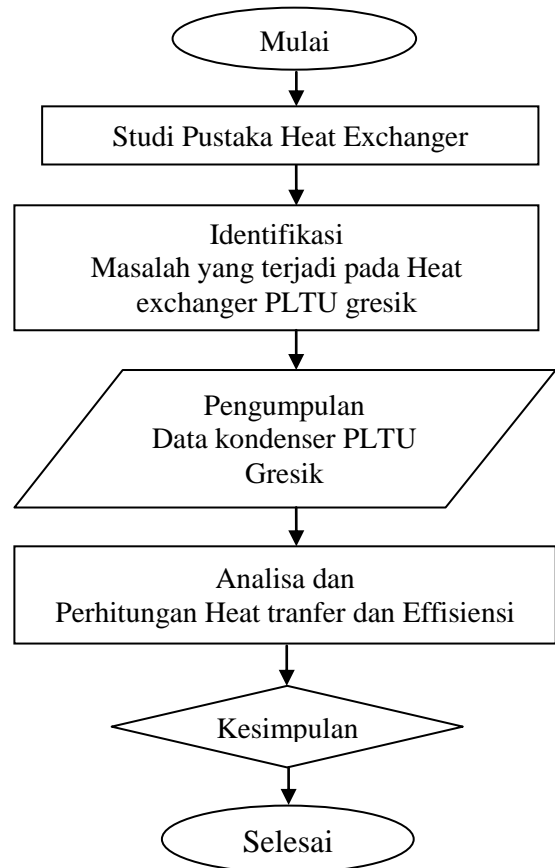
Gambar 1 Condenser PLTU Gresik Unit 4

Spesifikasi :

- Design absolut pressure* : 65 mmHg.abs
- Water Velocity in tube* : 2 m / sec
- Cleanliness factor* : 85 %
- Circulating water capacity* : 21.660
- Circulating water inlet temperatur* : 30 C°
- Circulating water outlet temperatur* : 39.89 C°
- Total effective tube surface* : 10.590
- Hot well capac* : 35 m³

METODE PENELITIAN

Dalam melakukan penelitian agar tersusun secara baik dan runtut diperlukan alur penelitian. Adapun alur penelitian yang peneliti lakukan adalah sebagai berikut:



Gambar 2 Metode Penelitian

Lokasi yang digunakan melakukan penelentian/Analisa pengaruh banyaknya plug terhadap *effisiensi condenser* dan penurunan *heat transfer* adalah di PT PJB UP Gresik khususnya pada PLTU unit 3 dan 4. Untuk memperoleh data yang diperlukan maka peneliti menggunakan metode sebagai berikut sebagai acuan penelitian :

- a. Penelitian lapangan (*Field Research*), yaitu penelitian yang dilakukan untuk mengumpulkan data primer melalui observasi di lapangan dengan cara wawancara terhadap bidang perencanaan dan pengendalian operasi serta

central control room (CCR) di PLTU UNIT 3 dan 4 untuk memberikan informasi masalah batasan operasi dan parameter-parameter yang diperlukan dalam penelitian.

- b. Penelitian kepustakaan (*Library Research*), yaitu yang dilakukan dengan membaca buku-buku yang berhubungan dengan masalah yang diteliti ataupun dengan cara *browsing* di internet untuk mencari refreansi atau data-data yang dapat membantu hasil dari penelitian.

Variabel Penelitian adalah suatu nilai/ sifat dari objek, yang mempunyai banyak variasi tertentu antara satu dan lainnya yang telah ditentukan oleh peneliti untuk dipelajari dan dicari Informasinya serta ditarik kesimpulannya. Dalam penelitian Analisa pengaruh banyaknya plug terhadap *effisiensi* kondenser dan penurunan *heat transfer* ditemukan data desain sebagai berikut untuk ditentukan sebagai variable perhitungan:

Sea water flow : 46070 m³/h
(*V_{ci}*)
Sea water inlet : 30°C
temperature (T_{in})
Sea water outlet : 39.89°C
temperature (T_{out})
Steam flow (M_{h in}) : 306.77 ton/hr
atau
306770 kg/hr
Steam pressure : 0.6702385
(*P_{in}*) kg/cm.². Abs

Steam inlet : 38,33 °C
temperature (T_{hi})
Steam outlet : 38,33 °C
temperature (T_{ho})
Vacum condenser 758,90 mmhg
Number of tube : 14528
(*N*)
Tube diameter : 25 mm
(*D*)
Tube length (L) : 8909 mm

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan *Heat transfer* kondenser

Data yang diperoleh pada penelitian pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) gresik untuk menghitung *heat transfer* adalah sebagai berikut:

Diketahui

$\dot{m}_{h\text{in}}$: 306770 kg/hr atau 85,214 kg/s
 I_{in} : 2444,35 kJ/kg
 $\dot{m}_{h\text{out}}$: 306770 kg/hr atau 85,214 kg/s
 I_{out} : 159.153 kJ/kg.

Setelah diketahui data-data di atas dapat dimasukan pada rumus sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= (85,214 \text{ kg/s} \times 2444,35 \text{ kJ/kg}) - (85,214 \text{ kg/s} \times 159.153 \text{ kJ/kg}) \\ &= 194730.7 \text{ KW} \\ &= 194.73 \text{ MW} \end{aligned}$$

Berdasarkan nilaidariperhitungan tersebut, maka dapat diketahui bahwa kondenser PLTU unit 3 dan 4 dirancang untuk dapat membuang

panas uap sebesar $\pm 194.73\text{MW}$ hingga fasanya berubah menjadi cair.

Perhitungan jumlah plug maksimum yang masih diijinkan.

Sebelum melakukan perhitungan menggunakan rumus di atas kita harus mencari *Overall koefisien konveksi (U), Cooling Surface, Faktor Koreksi untuk heat exchanger type shell and tube, Log Mean Temperatur Difference,*

$$U : \frac{1}{(1/h_i) + (1/h_o)}$$

Untuk mencari nilai *overall koefisien konveksi* terlebih dahulu mencari Koefisien Konveksi Fluida Pendingin (h_i) dan Koefisien Konveksi Fluida Panas (h_o).

Perhitungan Koefisien Konveksi Fluida Pendingin (h_i)

Perpindahan panas yang terdapat dalam kondenser merupakan perpindahan panas konveksi, karena merupakan perpindahan panas antara fluida dengan suatu permukaan tertentu. Dalam hal ini yang bertindak sebagai fluida panas adalah uap (h_o), fluida pendinginnya (h_i) adalah air laut dan permukaan yang dimaksud adalah *tube* kondenser. Maka koefisien perpindahan panas yang akan dicari merupakan koefisien konveksi. Koefisien konveksi merupakan sebuah satuan yang dapat menggambarkan berapakah panas yang dipindahkan fluida per satuan luas permukaan tiap kenaikan satu derajat temperaturnya. Karena ada

dua macam fluida yang bekerja, maka ada dua nilai koefisien konveksi, yaitu koefisien konveksi fluida panas dan koefisien konveksi fluida pendingin.

Koefisien konveksi fluida pendingin dicari dengan persamaan berikut ini :

$$h_i = Nu \cdot k/D$$

Dimana :

h_i = Koefisien konveksi dalam *tube* (fluida pendingin)

Nu = Nusselt Number

k = Konduktifitas panas

D = Diameter tube

Nusselt number didapatkan dari persamaan berikut :

$$Nu = 0.023 \times Re^{4/5} \times Pr^{0.4}$$

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}_{ci}}{\pi \cdot D \cdot \mu}$$

Dimana :

Re = Reynolds Number

Pr = Prandtl Number

\dot{m}_{ci} = *Mass flow rate* fluida pendingin masuk

μ = Viskositas

Berdasarkan persamaan diatas, maka untuk mendapatkan koefisien konveksi harus diketahui lebih dahulu Reynolds Number dan Nusselt Numbernya, dan untuk nilai properties didapatkan dari tabel "*Thermophysical Properties of Saturated Water*".

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ci} &= \dot{V}_{ci} \times \rho / N \\ &= 46070 \text{ m}^3/\text{h} \times 1000 \text{ Kg/m}^3 / 14528 \\ &= 3171,118 \text{ Kg/h (per tube)} \end{aligned}$$

$$\approx 0,880 \text{ Kg/s (per tube)}$$

$$\begin{aligned} \bar{T}_c &= (T_{ci} + T_{co}) / 2 \\ &= (30 \text{ }^\circ\text{C} + 39,89 \text{ }^\circ\text{C}) / 2 \\ &= 34,94 \text{ }^\circ\text{C} \\ &= 308,09 \text{ K} \end{aligned}$$

Dengan nilai temperatur rata-rata tersebut maka dapat dicari propertiesnya :

$$\begin{aligned} k &= 0,62304 \text{ W/m. K} \\ \mu &= 0,0007409 \text{ N s/m}^2 \\ Pr &= 4,83 \end{aligned}$$

Maka :

$$\begin{aligned} Re &= \frac{4 \times 0,880 \text{ Kg/s}}{3,14 \times 0,025 \text{ m} \times 0,0007409 \text{ N s/m}^2} \\ &= 60522,02 \\ Nu &= 0,023 \times 60522,02^{4/5} \times 4,83^{0,4} \\ &= 292,516 \\ h_i &= 288,959 \times 0,62304 / 0,025 \\ &= 7289,966 \text{ W/m}^2 \text{ K} \end{aligned}$$

Dengan demikian, sekarang sudah diketahui bahwa target koefisien konveksi untuk fluida pendingin yang dirancang oleh pabrikan sebesar $\pm 7289,966 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Perhitungan Koefisien Konveksi Fluida Panas (ho)

Berdasarkan kaidah ilmu perpindahan panas, ada dua metode untuk mencari koefisien konveksi fluida panas, yaitu Log Mean Temperature Different (LMTD) dan Number of Thermal Unit (NTU). Metode yang akan digunakan dalam paparan berikut adalah metode LMTD karena inputan data yang

dibutuhkan telah lengkap sehingga lebih mudah untuk menggunakan metode ini. Persamaan yang digunakan adalah :

$$\dot{Q}_c = U \times A \times F \times \Delta T_{lm,CF}$$

Dengan :

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{(1/h_i) + (1/h_o)} \\ A &= N \cdot \pi \cdot D \cdot L \\ \Delta T_{lm,CF} &= \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln[(T_{hi} - T_{co}) / (T_{ho} - T_{ci})]} \end{aligned}$$

Dimana :

U = Overall koefisien konveksi
A = Cooling Surface
F = Faktor Koreksi untuk heat exchanger type shell and tube

$\Delta T_{lm,CF}$ = Log Mean Temperatur Difference

Maka dapat dicari nilainya :

$$\begin{aligned} \Delta T_{lm,CF} &= \frac{(T_{hi} - T_{out}) - (T_{ho} - T_{in})}{\ln[(T_{hi} - T_{out}) / (T_{ho} - T_{in})]} \\ &= \frac{(38,33 - 39,89) - (38,33 - 30)}{\ln[(38,33 - 39,89) / (38,33 - 30)]} \\ &= \frac{-1,56 - 8,33}{\ln[(-1,56) / (8,33)]} \\ &= \frac{-9,89}{\ln[-0,187]} \\ &= 5,9 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Dengan nilai $\dot{Q} = 194738408 \text{ W}$ maka dapat dicari nilai U :

$$\begin{aligned} U &= \dot{Q}_c / (A \times F \times \Delta T_{lm,CF}) \\ &= 194738408 / (10165,4 \times 1 \times 5,9) \\ &= 3246,945 \text{ W/m}^2 \text{ K} \end{aligned}$$

Karena :

$$U = \frac{1}{(1/h_i) + (1/h_o)}$$

Maka :

$$\begin{aligned} 1/h_o &= (1/U) - (1/h_i) \\ &= (1/3246,945) - (1/7289.966) \\ &= 0,0002978 - 0,0002486 \\ &= 0,000170 \\ h_o &= 5882.35 \text{ W/m}^2 \text{ K} \end{aligned}$$

Berdasarkan nilai tersebut, maka dapat diketahui bahwa kondenser PLTU Gresik unit 3 dan 4 dirancang dengan koefisien konveksi fluida panas sebesar $\pm 5882.35 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Perhitungan koefisien konveksi fluida panas sebenarnya telah selesai, namun peneliti perlu memberikan nilai persyaratan koefisien konveksi fluida panas dalam kondenser untuk dapat berubah fasa, tujuannya sebagai validasi apakah perhitungan yang dilaksanakan peneliti benar dan rancangan kondenser PLTU Gresik 3 dan 4 telah sesuai dengan kaidah ilmu perpindahan panas yang ada, Maka berikut disajikan tabel persyaratan nilai koefisien konveksi untuk beberapa jenis perpindahan panas secara konveksi :

Tabel 1 Nilai Koefisien Konveksi

Process	h ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
Free convection	
Gases	2-25
Liquids	50-1000
Forced convection	
Gases	25-250
Liquids	50-20,000
Convection with phase change	
Boiling or condensation	2500-100,000

Sumber: Incropera Frank P., David P., Theodore L., dan adrinne s., 2007

Nilai koefisien konveksi fluida panas (*steam*) pada kondenser PLTU Gresik

unit 3-4 adalah $5882.35 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ maka hasil tersebut apabila dilihat dari tabel diatas sudah masuk range $2500-100000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Mengetahui Batas Minimum Perpindahan Panas

Pada tabel 3.1. dapat dilihat bahwa nilai koefisien konveksi fluida panas minimum adalah $h_o = 2500 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Nilai koefisien fluida pendingin $h_i = 7289.966 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ sesuai perhitungan diatas maka dapat dihitung perpindahan panas minimum kondenser PLTU gresik unit 3-4 dengan persamaan dibawah ini.

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= U \times A \times F \times \Delta T_{lm,CF} \\ U &= \frac{1}{(1/h_i) + (1/h_o)} \\ &= \frac{1}{(1/7289.966) + (1/2500)} \\ &= 1861.59 \text{ W/m}^2 \text{ K} \end{aligned}$$

$$A = N \cdot \pi \cdot D \cdot L$$

Diketahui

$$N = 14528$$

$$D = 25 \text{ mm}$$

$$= 0.025 \text{ m}$$

$$L = 8909 \text{ mm}$$

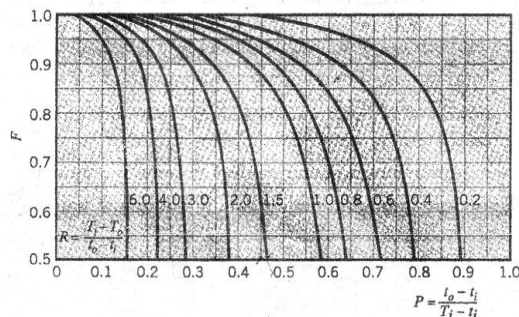
$$= 8.909 \text{ m}$$

$$A = 14528 \cdot \pi \cdot 0.025 \cdot 8.909$$

$$A = 10165.4 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{lm,CF} &= \frac{(T_{hi} - T_{out}) - (T_{ho} - T_{in})}{\ln[(T_{hi} - T_{out}) / (T_{ho} - T_{in})]} \\ &= \frac{(38,33 - 39,89) - (38,33 - 30)}{\ln[(38,33 - 39,89) / (38,33 - 30)]} \\ &= \frac{-1,56 - 8,33}{\ln[(-1,56) / (8,33)]} \\ &= \frac{-9,89}{\ln[-0,187]} \\ &= 5,9 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Heat exchanger Shell and tube harus mencari faktor koreksi. Faktor koreksi untuk Heat exchangertipe shell and tube dapat dicari menggunakan grafik sebagai berikut



Grafik 1 Faktor Koreksi

Untuk itu perlu dicari dahulu P dan R-nya :

$$\begin{aligned} P &= \frac{T_{out} - T_{in}}{T_{hi} - T_{in}} \\ R &= \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{out} - T_{in}} \\ P &= \frac{39,89 - 30}{38,33 - 30} \\ &= 1,1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R &= \frac{38,33 - 38,33}{39,89 - 30} \\ &= 0 \end{aligned}$$

Maka didapatkan F dari grafik sebesar F = 1

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= 1861,59 \times 10165,4 \times 1 \times 5,9 \\ &= 111650461,2174 \text{ watt} \\ &= 111,650 \text{ MW} \end{aligned}$$

Perpindahan panas minimum kondenser PLTU Gresik unit 3 dan 4 \pm 111.650 MW sedangkan target desain dari pabrikan \pm 194.73MW. Setelah kita mengetahui perpindahan panas minimum kondenser maka kita dapat menghitung maksimal plugging yang diijinkan dengan cara simulasi perhitungan dibawah ini dengan rumus

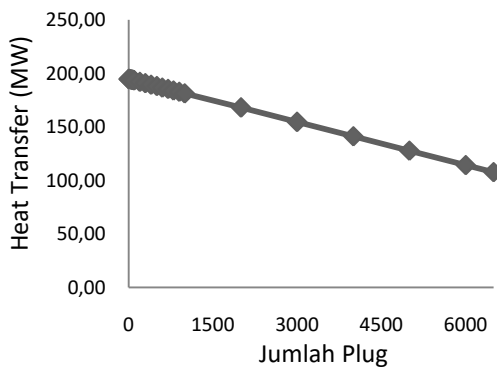
$$\dot{Q} = U \times A \times F \times \Delta T_{lm,CF}$$

Tabel 2 Simulasi Perhitungan Heat Transfer

No	Σ plug (N)	Tube Aktif	Surface Area	Heat transfer (MW)	Penurunan heat transfer (MW)
1	0	14528	10165,4	194,74	0,00
2	1	14527	10164,7	194,73	0,01
3	10	14518	10158,4	194,60	0,13
4	20	14508	10151,4	194,47	0,27
5	30	14498	10144,4	194,34	0,40
6	40	14488	10137,4	194,20	0,54
7	50	14478	10130,4	194,07	0,67
8	60	14468	10123,4	193,93	0,80
9	70	14458	10116,4	193,80	0,94
10	80	14448	10109,4	193,67	1,07
11	90	14438	10102,4	193,53	1,21
12	100	14428	10095,4	193,40	1,34
13	200	14328	10025,5	192,06	2,68
14	300	14228	9955,5	190,72	4,02
15	400	14128	9885,5	189,38	5,36
16	500	14028	9815,5	188,04	6,70
17	600	13928	9745,6	186,70	8,04
18	700	13828	9675,6	185,36	9,38
19	800	13728	9605,6	184,01	10,72
20	900	13628	9535,7	182,67	12,06
21	1000	13528	9465,7	181,33	13,40
22	2000	12528	8766,0	167,93	26,81
23	3000	11528	8066,3	154,53	40,21
24	4000	10528	7366,6	141,12	53,62

25	5000	9528	6666,8	127,72	67,02
26	6000	8528	5967,1	114,31	80,43
27	6500	8028	5617,3	107,61	87,13

Tabel simulasi perhitungan *Heat transfer* diatas dapat disimpulkan bahwa setiap satu *plugging* kondenser dapat menurunkan *Heat Transfer* 0,01 MW atau setara dengan 10000 Watt. Maksimal *plugging* yang diijinkan adalah 6000 plug karena heat transfer yang dihasilkan pada plugging tube sebanyak 6000 buah adalah 114,31 MW sedangkan heat transfer minimum yang diijinkan kondenser supaya dapat digunakan merubah fasa adalah 111.650 MW.



Grafik 2 Simulasi Perhitungan *Heat Transfer*

Pada Grafik 1 Apabila dilihat dari hubungan *plugging* dan *heat transfer* dapat disimpulkan bahwa semakin banyak *plugging* pada condenser heat transfer yang dihasilkan akan cenderung berkurang.

Analisa perhitungan Effisiensi kondenser

Perhitungan effisiensi atau effectiveness kondenser pada PLTU

gresik unit 3-4 dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_{cmax}}$$

Dengan :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{cmax} &= C_{min} (T_{hi} - T_{ci}), \\ C_{min} &= C_c = \dot{m}_{ci} \times Cp_c \text{ atau} \\ C_{min} &= C_h = \dot{m}_{hi} \times Cp_h \end{aligned}$$

Dimana :

- \dot{Q}_{cmax} = Perpindahan panas maximum yang mungkin dicapai oleh kondenser
- C_c = Kapasitas panas *fluida* pendingin
- C_h = Kapasitas panas *fluida* panas
- C_{min} = Kapasitas panas minimum

Artinya bila $C_c < C_h$, maka $C_{min} = C_c$; bila $C_h < C_c$,maka $C_{min} = C_h$

Sehingga bisa dihitung :

$$\begin{aligned} Cp_c &= \frac{\dot{Q}_c}{\dot{m}_{ci} \times (T_{co} - T_{ci})} \\ C_c &= \frac{\dot{Q}_c}{(T_{co} - T_{ci})} \\ &= \frac{194738408}{(37,8 - 30)} \\ &= 24966462,56 \text{ W/K} \\ Cp_h &= \frac{\dot{Q}_c}{\dot{m}_h \times (T_{ho} - T_{hi})} \\ C_h &= \frac{\dot{Q}_c}{(T_{ho} - T_{hi})} \\ &= \frac{194738408}{(38,33 - 38,33)} \end{aligned}$$

= ~

Maka $C_{\min} = C_c$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{c \max} &= 24966462,56 (38,33 - 30) \\ &= 207970633,12 \text{ W} \\ &= 207,97 \text{ MW} \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{194,73}{207,97} \\ &= 0,9364 \end{aligned}$$

Perhitungan efisiensi diatas disimpulkan bahwa kondenser PLTU gresik apabila tidak terdapat *plugging* efisiensi yang dapat dicapai adalah 0.936 bila dijadikan presentase adalah $0,936 \times 100 \% = 93,64 \%$. *Tube* kondenser apabila terdapat *plugging* tentu effisiensinya akan turun. Untuk mengetahui penurunan efisiensi yang terjadi kita dapat simulasikan pada tabel dibawah ini dengan rumus.

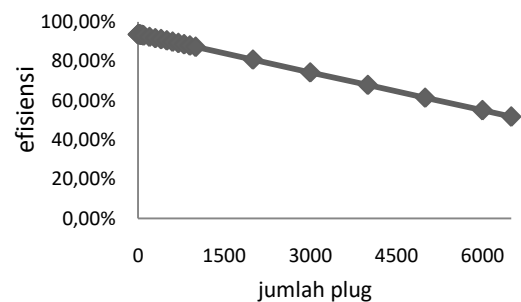
$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_{c \max}}$$

Tabel 3 Simulasi Perhitungan Efisiensi Condenser

No	Jumlah plug (N)	Heat transfer (MW)	Efisiensi	Penurunan efisiensi
1	0	194,74	93,64%	0,00%
2	1	194,73	93,63%	0,01%
3	10	194,60	93,57%	0,07%
4	20	194,47	93,51%	0,13%
5	30	194,34	93,44%	0,20%
6	40	194,20	93,38%	0,26%
7	50	194,07	93,32%	0,32%
8	60	193,93	93,25%	0,39%
9	70	193,80	93,19%	0,45%
10	80	193,67	93,12%	0,52%
11	90	193,53	93,06%	0,58%

12	100	193,40	92,99%	0,65%
13	200	192,06	92,35%	1,29%
14	300	190,72	91,70%	1,94%
15	400	189,38	91,06%	2,58%
16	500	188,04	90,41%	3,23%
17	600	186,70	89,77%	3,87%
18	700	185,36	89,13%	4,51%
19	800	184,01	88,48%	5,16%
20	900	182,67	87,84%	5,80%
21	1000	181,33	87,19%	6,45%
22	2000	167,93	80,75%	12,89%
23	3000	154,53	74,30%	19,34%
24	4000	141,12	67,86%	25,78%
25	5000	127,72	61,41%	32,23%
26	6000	114,31	54,97%	38,67%
27	6500	107,61	51,74%	41,90%

Simulasi perhitungan diatas dapat kita simpulkan bahwa pada kondenser dengan jumlah 6000 *plug* effisiensinya 54,97% dan effisiensinya turun 38,67 % dari desain awal apabila tidak ada *plug*.



Grafik 3 Efisiensi condenser

Pada grafik 3 Apabila dilihat dari hubungan efisiensi dan banyaknya *plugging* dapat disimpulkan semakin banyak *plugging* maka efisiensi yang dihasilkan kondenser semakin berkurang.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian tentang “Analisa pengaruh jumlah *plug* kondenser terhadap *efisiensi* dan *Heat transfer* yang hilang pada PLTU unit 3 dan 4 PT.PJB UP GRESIK” dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengambilan data dan perhitungan tentang perpindahan panas kondenser PLTU gresik unit 3-4 dapat diketahui bahwa kondenser tersebut memiliki *heat transfer* 194738408 W atau setara dengan 194.73 MW.
2. Pengaruh Jumlah *plug* pada kondenser adalah apabila terdapat 1 *plug* pada tube dapat menurunkan *heat transfer* 10000 W. *Plug* maksimal yang diijinkan pada kondenser PLTU gresik adalah 6000 buah karena total *plug* tersebut masih dapat mencapai *heat transfer* 114,31 MW sedangkan batas minimumnya adalah 111.650 MW sedangkan *tube* minimum kondenser adalah 8528 buah.
3. Kondenser PLTU gresik unit 3-4 apabila tidak terdapat *plug* dapat diketahui memiliki *Effisiensi* 93.6 % sedangkan bila terdapat 1 *plug* dapat menurunkan *effisiensi* 0,01 %. *Plug* maksimal yang diijinkan adalah 6000 *plug* dari total 14528 tube namun *effisiensi* yang dihasilkan apabila terdapat *plug* 6000 adalah 54,97% hal tersebut merupakan suatu

kerugian dan harus dilakukan *retubing*

Saran

Berdasarkan penelitian tersebut saran dari peneliti adalah walaupun jumlah maksimal *plug* 6000 buah akan tetapi tidak disarankan untuk menunggu sampai jumlah tersebut baru dilakukan *retubing* karena hal tersebut merupakan sebuah kerugian *efisiensi* dan kehilangan kemampuan *heat transfer*. Kerugian *efisiensi* apabila terdapat 1 (satu) *plug* adalah 0,01 %. Hal tersebut akan menurunkan kemampuan kondenser dalam mentransfer panas. Peneliti menyarankan apabila sedang dilakukan *overhaul* unit maka berapapun jumlah *plug* perlu dilakukan *retubing partial* agar tetap terjaga *efisiensi* kondenser tersebut dalam kemampuan maksimalnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Incopera Frank P., David P., Theodore L., dan Adrinne s., 2007. *Fundamental of heat and mass transfer sixth edition*, United State of america, John willey & Son.
- Brogan, R.J., 2011. *Heat exchanger*. Diambil dari www.Thermopedia.com. Tanggal 25 November 2017.: Pukul 19.00
- Dzulqornain, Fitroh,. 2015. prinsip kerja *heat exchanger*. Diambil dari www.Insinyoer.com. Tanggal 28 November 2017 : Pukul 19.00
- Instrution manual,. 1986. *Steam Turbine and Auxiliary Equipment*.

Gresik. PT PLN PJB II Sektor Gresik.

Nalendra permana dan eko prasetyo,2008. *Sistem pengaman listrik pada generator PLTGU PT PJB up gresik*. Laporan Kerja praktek, jurusan teknik elektro fakultas teknologi industri. ITS. Surabaya.

K. Shah, 1994. "Heat Exchangers," in *Encyclopedia of Energy Technology and the Environment*, edited by A. Bisio and S. G. Boots, pp. 1651-1670, , New York. .John Wiley & Sons.

Tubular Exchanger Manufacturers Association, *Standards of TEMA*, 7th ed., New York, 1988