

ANALISIS ALAT PENUKAR KALOR TIPE *SHELL AND TUBE* PADA PENDINGIN TERTUTUP UNTUK AIR DEMIN (*CLOSE COOLING WATER HEAT EXCHANGER*) DI ST 1.0 PLTGU UPDK BELAWAN

Ismawani Dewi¹, Marcella Perawati br. Ginting², Husin Ibrahim³
Teknik Konversi Energi^{1,2,3}, Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan
ismawanidewi@students.polmed.ac.id¹, marcellaginting16@gmail.com²,
husin.19611018@polmed.ac.id³

ABSTRAK

Alat penukar kalor merupakan alat yang berfungsi melakukan suatu proses perpindahan panas antara dua fluida (cair atau gas) yang memiliki temperatur yang berbeda dengan cara memindahkan zat dengan temperatur tinggi ke zat bertemperatur rendah. Salah satu tipe alat penukar kalor yang banyak digunakan oleh industri yaitu tipe selongsong dan pipa. Salah satu industri Indonesia yang menggunakan alat penukar kalor tipe selongsong dan pipa adalah Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) yang terletak di kepulauan Belawan. PLTGU Belawan memiliki berbagai sistem peralatan utama dan peralatan penunjang untuk setiap proses operasionalnya. Peralatan utama yang digunakan seperti HRSG, generator, turbin dan lain-lain. Sedangkan peralatan penunjangnya seperti CCWHE (*Close Cooling Water Heat Exchanger*). Alat ini berfungsi mendinginkan air Demin dengan media air pendingin (air laut) melalui sistem air pendingin tertutup yang kemudian akan mendinginkan peralatan bantu yang terdapat di PLTGU dimana temperatur fluida masuk pipa adalah 30°C dan temperatur fluida keluar pipa adalah 35,6°C sedangkan temperatur fluida masuk selongsong adalah 42,8°C dan temperatur fluida keluar selongsong adalah 37,6°C. Pipa-pipa yang berada di dalam CCWHE rentan terhadap gangguan karena berfungsi sebagai lintasan air pendingin yaitu air laut yang mempunyai sifat korosi dan membawa kotoran kecil yang tidak tersaring. Oleh karena itu, alat ini perlu dijaga kebersihannya karena akan berpengaruh terhadap efektivitas alatnya. Untuk itu penelitian ini berfokus pada analisis CCWHE. Setelah dianalisis diperoleh efektivitas CCWHE pada kondisi bersih adalah 43,75% sedangkan efektivitas CCWHE pada kondisi kotor adalah 22,497%.

Kata Kunci : Perpindahan Panas, *Shell and Tube*, Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap, Sistem Air Pendingin Tertutup, *Close Cooling Water Heat Exchanger*, Efektivitas

PENDAHULUAN

Alat penukar kalor (*heat exchanger*) merupakan alat yang berfungsi melakukan suatu proses perpindahan panas antara dua fluida (cair atau gas) yang memiliki temperatur yang berbeda dengan cara memindahkan zat dengan temperatur tinggi ke zat bertemperatur rendah. Alat penukar kalor banyak digunakan oleh industri di Indonesia untuk proses produksi atau operasi terutama pada pembangkit-pembangkit yang ada di Indonesia. Hal ini dikarenakan APK memiliki banyak keuntungan, seperti konstruksi yang sederhana, biaya yang relatif murah, tahan terhadap tekanan maupun temperatur tinggi, dan tidak membutuhkan tempat yang luas.

Salah satu tipe alat penukar kalor yang banyak digunakan oleh industri yaitu tipe selongsong dan pipa (*shell and tube*). Tipe ini memiliki selongsong silindris di bagian luar dan sejumlah pipa di bagian dalam. Temperatur fluida di dalam pipa berbeda dengan temperatur di selongsong sehingga terjadi pertukaran kalor antara fluida yang mengalir di dalam *tube* dengan fluida yang mengalir di dalam *shell*.

Salah satu industri Indonesia yang menggunakan alat penukar kalor tipe *shell and tube* adalah Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) yang terletak di kepulauan Belawan. PLTGU Belawan memiliki berbagai sistem peralatan utama dan peralatan penunjang untuk setiap proses operasionalnya. Peralatan utama yang digunakan seperti HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*), generator, turbin dan lain-lain. Sedangkan peralatan penunjangnya seperti CCWHE (*Close Cooling Water Heat Exchanger*). Alat ini berfungsi mendinginkan air Demin dengan media air pendingin (air laut) melalui sistem air pendingin tertutup (*close cooling water*).

PLTGU UPDK Belawan menggunakan alat penukar kalor tipe *shell and tube* pada sistem pendingin tertutup karena air demin dan air laut terpisah alirannya dalam alat tersebut. Air laut digunakan untuk mendinginkan air demin di dalam CCWHE. PLTGU UPDK Belawan menggunakan air laut karena tata letak pembangkit ini dekat dengan laut dan pembangkit ini memiliki kapasitas yang besar (817,6 MW) sehingga membutuhkan media pendingin dengan kapasitas yang lebih besar. (Sumber: Laporan Tugas Akhir Wida Aprilla, 2017)

Pipa-pipa yang berada di dalam CCWHE rentan terhadap gangguan karena berfungsi sebagai lintasan air pendingin yaitu air laut yang mempunyai sifat korosi. Sampah kecil yang tidak tersaring dengan baik juga menyebabkan gangguan pada CCWHE berupa kecepatan aliran air akan berkurang serta mengakibatkan kotoran tersebut menempel pada permukaan dalam pipa yang dapat mengganggu proses kondensasi. Oleh karena itu, alat ini perlu dijaga kebersihannya. Perawatan pada CCWHE sangat berpengaruh terhadap baik buruknya proses perpindahan panas yang terjadi.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya maka didapatkan rumusan masalah, yaitu bagaimana perhitungan koefisien perpindahan panas menyeluruh, LMTD, dan efektivitas alat tersebut, serta bagaimana pengaruh kebersihan peralatan terhadap efektivitas perpindahan panas.

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Untuk mengetahui koefisien perpindahan panas dari alat *Close Cooling Water Heat Exchanger (CCWHE)*.
2. Untuk mengetahui efektivitas dari alat *Close Cooling Water Heat Exchanger (CCWHE)*.
3. Untuk mengetahui pengaruh kebersihan peralatan terhadap efektivitas perpindahan panasnya.

TINJAUAN PUSTAKA

Perpindahan Panas

Alih bahang (perpindahan kalor) adalah sebuah ilmu yang mendeteksi adanya perpindahan panas akibat perbedaan suhu antara dua material. Dari hukum Termodinamika dapat diketahui bahwa kalor merupakan energi yang berpindah. Ilmu ini tidak hanya membahas bagaimana energi panas berpindah dari satu material ke material lain, tetapi juga menjelaskan laju perpindahan yang terjadi. Yang membedakan ilmu alih bahang dengan ilmu termodinamika adalah masalah laju perpindahan. Pada ilmu termodinamika tidak membahas kecepatan perpindahan panas, melainkan sistem keseimbangan dan energi yang dibutuhkan untuk mengubah sistem dari suatu keadaan seimbang ke keadaan seimbang lainnya. Sedangkan dalam ilmu perpindahan kalor terdapat penjelasan mengenai laju perpindahan panas. Ilmu ini melengkapi hukum pertama dan kedua Termodinamika.

Mekanisme perpindahan panas dibagi menjadi tiga cara, yaitu:

- a. Perpindahan kalor secara konduksi.
- b. Perpindahan kalor secara konveksi.
- c. Perpindahan kalor secara radiasi.

Alat Penukar Kalor (*Heat Exchanger*)

Alat penukar kalor (*heat exchanger*) merupakan alat yang berfungsi melakukan suatu proses perpindahan panas antara dua fluida (cair atau gas) yang memiliki temperatur yang berbeda dengan cara memindahkan zat dengan temperatur tinggi ke zat bertemperatur rendah. Alat penukar kalor banyak digunakan oleh industri di Indonesia untuk proses produksi atau operasi terutama pada pembangkit-pembangkit yang ada di Indonesia. Hal ini dikarenakan APK memiliki banyak keuntungan, seperti konstruksi yang sederhana, biaya yang relatif murah, tahan terhadap tekanan maupun temperatur tinggi, dan tidak membutuhkan tempat yang luas.

Karena banyaknya jenis alat penukar kalor, maka dapat diklasifikasikan dalam beberapa kelompok sebagai berikut.

- a. Konstruksi *tubular (shell and tube)*.
- b. *Tube* ganda (*double tube*).
- c. Sekat plat (*plate baffle*).
- d. *Tube spiral*.

Alat Penukar Kalor Tipe *Shell and Tube*

APK tipe *shell and tube* adalah APK yang secara konstruksi terdiri dari sebuah *shell* (cangkang) berbentuk silinder yang di dalamnya terdapat beberapa *tubes* (pipa) dengan diameter yang kecil dimana terdapat dua jenis fluida yang mengalir secara terpisah dan saling bertukar kalor. Satu fluida mengalir di luar pipa (di dalam cangkang) sedangkan fluida lainnya mengalir di dalam pipa. Untuk memperbesar koefisien perpindahan panas konveksi dan menjaga aliran *shell Turbulen*, maka dipasang sekat (*baffle*) pada bagian dalam *shell*.

Sistem Air Pendingin Tertutup (*Close Cooling Water*)

Sistem air pendingin adalah suatu sistem yang berfungsi mendinginkan peralatan yang beroperasi pada unit pembangkit sehingga tidak mengalami kerusakan akibat panas yang berlebih. Salah satu sistem air pendingin adalah sistem air pendingin tertutup (*close cooling water*). Sistem ini biasa disebut juga sistem pendingin bantu yang memiliki fungsi sebagai pemasok kebutuhan air pendingin pada peralatan bantu PLTGU. Sistem ini menggunakan air demin (*demineralize water*) sebagai air yang didinginkan dan air laut sebagai air pendinginnya (yang mendinginkan). (Sumber : PLN. 2021. Modul Pengoperasian PLTGU. Jakarta: Pusdiklat PT PLN (Persero).

Air Demin (*Demineralize Water*)

Air demin adalah air hasil dari proses pemurnian (destilasi) dan sudah bebas dari kadar mineral dan ion logam yang terlarut. (Sumber : PLN. 2021. Modul Pengoperasian PLTGU. Jakarta: Pusdiklat PT PLN (Persero).

Alat Penukar Kalor CCWHE (*Close Cooling Water Heat Exchanger*)

APK *close cooling water heat exchanger* adalah jenis APK tipe *shell and tube* yang pertukaran kalornya terjadi antara air laut dan air demin yang berfungsi mendinginkan peralatan bantu yang terdapat di PLTGU sehingga dapat meningkatkan efisiensi komponen yang didinginkan. Air laut dialirkan pada sisi *tube* sedangkan air demin dialirkan pada sisi *shell*. (Sumber : PLN. 2021. Modul Pengoperasian PLTGU. Jakarta: Pusdiklat PT PLN (Persero).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan berdasarkan tahap-tahap penelitian berikut.

- a. Studi Pustaka
Mencari referensi baik dari situs internet maupun buku-buku perpustakaan sebagai landasan teori untuk mendapatkan metode perhitungan yang dibutuhkan dalam penyusunan penelitian.
- b. Observasi langsung
Mengumpulkan data-data yang dibutuhkan untuk dapat melakukan perhitungan teoritis.
- c. Analisis data
Menganalisis data dengan memasukkannya ke dalam rumus-rumus perhitungan hingga mendapat hasil perhitungan yang diinginkan terutama mengetahui hasil efektivitas alat penukar kalor CCWHE.
- d. Wawancara dan diskusi dengan mentor lapangan dan dosen pembimbing
Melakukan secara langsung dengan mentor lapangan mengenai alat penukar kalor CCWHE dan melakukan diskusi dengan dosen pembimbing untuk mengetahui kebenaran dari hasil perhitungan.
- e. Penarikan kesimpulan
Menganalisis penarikan kesimpulan berdasarkan hasil perhitungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN**Hasil****Menganalisis sifat fluida**

Sifat fluida dalam *tube* (air laut)

Temperatur air pendingin rata-rata berfungsi untuk menentukan sifat fluida. Adapun persamaannya, yaitu:

$$T_c = \frac{T_{c_i} + T_{c_o}}{2} = \frac{30^\circ\text{C} + 35,6^\circ\text{C}}{2} = \frac{65,6^\circ\text{C}}{2} = 32,8^\circ\text{C}$$

Setelah dilakukan interpolasi, maka diperoleh sifat fluida:

$$C_{p_c} = 4178 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$\mu_c = 0,75432 \cdot 10^{-3} \text{ kg/ms}$$

$$P_{r_c} = 5,0896$$

$$\rho_c = 994,88 \text{ kg/m}^3$$

$$K_c = 0,61948 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Sifat fluida dalam *shell* (air demin)

Temperatur air pendingin rata-rata berfungsi untuk menentukan sifat fluida. Adapun persamaannya, yaitu:

$$T_h = \frac{T_{h_i} + T_{h_o}}{2} = \frac{42,8^\circ\text{C} + 37,6^\circ\text{C}}{2} = \frac{80,4^\circ\text{C}}{2} = 40,2^\circ\text{C}$$

Setelah dilakukan interpolasi, maka diperoleh sifat fluida:

$$C_{p_h} = 4179,04 \text{ j/kg}^\circ\text{C}$$

$$\mu_h = 0,65072 \cdot 10^{-3} \text{ kg/ms}$$

$$P_{r_h} = 4,3036$$

$$\rho_h = 992,02 \text{ kg/m}^3$$

$$K_h = 0,63124 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Menganalisis jenis aliran fluida

Jenis aliran fluida dalam *tube* (air laut)

a. Mencari luas permukaan fluida (A_c)

$$A_c = \frac{1}{4} (\pi)(D_i)^2(N_t) = \frac{1}{4} (3,14)(0,0226\text{m})^2(696) = 0,2790588336 \text{ m}^2$$

b. Mencari diameter ekivalen (D_e)

$$D_e = D_i = 0,0226 \text{ m}$$

c. Mencari kecepatan massa fluida (G_c)

$$G_c = \frac{\dot{m}_c}{A_c} = \frac{170 \text{ kg/s}}{0,279058833 \text{ m}^2} = 609,19053450813 \text{ kg/m}^2$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka bilangan Reynold untuk sisi *tube* adalah:

$$R_e = \frac{G_c D_e}{\mu_c} = \frac{609,19053450813 \text{ kg/m}^2\text{s} (0,0226 \text{ m})}{0,75432 \cdot 10^{-3} \text{ kg/ms}} = 18251,811008436$$

Jenis aliran fluida dalam *shell* (air demin)

a. Mencari luas permukaan fluida (A_h)

$$A_h = \frac{D_s \times c \times L_b}{P_t}$$

Dimana:

A_h = Luas permukaan fluida (m^2)

D_s = Diameter *shell* (m)

c = Kelonggaran antar *tube* (m)

L_b = Jarak antar sekat (m)

P_t = *Pitch tube* (m)

$$A_h = \frac{1,024 \text{ m} (0,006 \text{ m})(0,3 \text{ m})}{0,03 \text{ m}}$$

$$A_h = 0,06144 \text{ m}^2$$

Mencari diameter ekivalen (D_e)

Konferensi Nasional Sosial dan Engineering Politeknik Negeri Medan Tahun 2022

Pola susunan *tube* di dalam *shell* dapat digunakan untuk menentukan diameter ekuivalennya. Pola susunan *tube* pada alat penukar kalor *Close Cooling Water Heat Exchanger* (CCWHE) adalah *triangular*, maka persamaan untuk mencari nilai D_e adalah:

$$D_e = \frac{4 \left[\frac{\sqrt{3} (P_t)^2}{4} - \pi \frac{(D_o)^2}{8} \right]}{\pi (D_o)} = \frac{4 \left[\frac{\sqrt{3} (0,03m)^2}{4} - (3,14) \frac{(0,024m)^2}{8} \right]}{3,14 (0,024m)}$$

$$D_e = 17,3706404 \cdot 10^{-3}m$$

- b. Mencari kecepatan massa fluida (G_h)

$$G_h = \frac{\dot{m}_h}{A_h} = \frac{200 \text{ kg/s}}{0,06144 \text{ m}^2} = 3255,20833 \text{ kg/m}^2s$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka bilangan Reynold untuk sisi *shell* adalah:

$$Re = \frac{G_h D_e}{\mu_h} = \frac{3255,20833 \text{ kg/m}^2s (17,3706404 \cdot 10^{-3}m)}{0,65072 \cdot 10^{-3} \text{ kg/ms}}$$

$$Re = 86896,135511433$$

Menganalisis koefisien perpindahan kalor menyeluruh

Koefisien perpindahan kalor pada sisi *tube*

- a. Mencari bilangan Nusselt (Nu_c)

$$Nu_c = 0,023 (Re_c)^{0,8} (Pr_c)^n$$

(sumber: J.P.Holman, hal. 252)

Dimana:

$n = 0,3$ untuk pendinginan

Sehingga:

$$Nu_c = 0,023 (Re_c)^{0,8} (Pr_c)^{0,3} = 0,023 (18251,811008436)^{0,8} (5,0896)^{0,3}$$

$$Nu_c = 96,112019355427$$

- b. Mencari koefisien perpindahan kalor (h_i)

$$h_i = \frac{Nu_c K_c}{D_i} = \frac{96,112019355427 (0,61948 \text{ W/m}^2\text{C})}{0,0226 \text{ m}}$$

$$h_i = 2634,4899889513 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Koefisien perpindahan kalor pada sisi *shell*

- a. Mencari bilangan Nusselt (Nu_h)

$$Nu_h = 0,023 (Re_h)^{0,8} (Pr_h)^n$$

(sumber: J.P.Holman, hal. 252)

Dimana:

$n = 0,4$ untuk pemanasan

Sehingga:

$$Nu_h = 0,023 (Re_h)^{0,8} (Pr_h)^{0,4} = 0,023 (86896,135511433)^{0,8} (4,3036)^{0,4}$$

$$Nu_h = 368,51991789137$$

- b. Mencari koefisien perpindahan kalor (h_o)

$$h_o = \frac{Nu_h K_h}{D_e} = \frac{368,51991789137 (0,63124 \text{ W/m}^2\text{C})}{17,3706404 \cdot 10^{-3}m}$$

$$h_o = 13391,821349876 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Konduktivitas thermal zat padat baja karbon adalah $43 \text{ W/m}^2\text{C}$ (sesuai Tabel 1). Berdasarkan perhitungan di atas, maka koefisien perpindahan kalor menyeluruh adalah:

$$U = \frac{1}{\frac{r_o}{r_i} \left(\frac{1}{h_i} \right) + \frac{(r_o) \ln \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right)}{k} + \frac{1}{h_o}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{0,012}{0,0113} \left(\frac{1}{2634,4899889513 \text{ W/m}^2\text{C}} \right) + \frac{(0,012 \text{ m}) \ln \ln \left(\frac{0,012}{0,0113} \right)}{43 \text{ W/m}^2\text{C}} + \frac{1}{13391,821349876 \text{ W/m}^2\text{C}}}$$

$$U = 2022,0829646746 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Menganalisis beda temperatur rata-rata (LMTD)

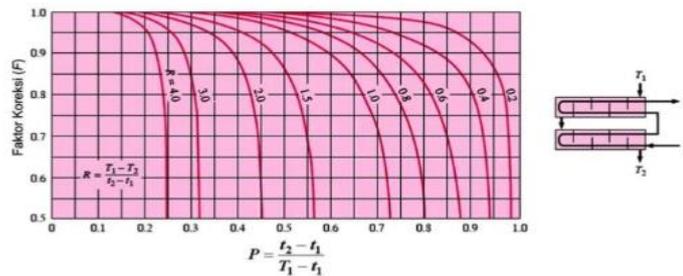
$$LMTD = \frac{(T_{h_i} - T_{c_o}) - (T_{h_o} - T_{c_i})}{\ln \ln \left[\frac{(T_{h_i} - T_{c_o})}{(T_{h_o} - T_{c_i})} \right]}$$

$$LMTD = \frac{(42,8^\circ\text{C} - 35,6^\circ\text{C}) - (37,6^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C})}{\ln \ln \left[\frac{(42,8^\circ\text{C} - 35,6^\circ\text{C})}{(37,6^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C})} \right]} = 7,39819784^\circ\text{C}$$

Menganalisis faktor koreksi

$$a. P = \frac{T_{c_o} - T_{c_i}}{T_{h_i} - T_{c_i}} = \frac{35,6^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}}{42,8^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}} = 0,4375$$

$$b. R = \frac{T_{h_i} - T_{h_o}}{T_{c_o} - T_{c_i}} = \frac{42,8^\circ\text{C} - 37,6^\circ\text{C}}{35,6^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}} = 0,928571429$$



Gambar 1. Grafik faktor koreksi untuk dua aliran pada shell dan n aliran pada tube

Berdasarkan gambar 15 maka faktor koreksinya adalah 0,98.

Menganalisis luas perpindahan kalor menyeluruh

$$A_{total} = 2\pi(D_o)(L)(N_t) = 2(3,14)(0,024 \text{ m})(7,47 \text{ m})(696) = 783,611366 \text{ m}^2$$

Menganalisis laju perpindahan kalor

$$Q = U(A_{total})(F)(LMTD)$$

$$Q = 2022,0829646746 \text{ W/m}^2\text{C} (783,611366 \text{ m}^2)(0,98)(7,39819784^\circ\text{C})$$

$$Q = 11,4881927516171 \text{ MW}$$

Menganalisis efektivitas alat penukar kalor CCWHE

a. Mencari laju kapasitas air pendingin (C_c)

$$C_c = \dot{m}_c \times C_{p_c} = 170 \text{ kg/s} (4178 \text{ J/kg}^\circ\text{C}) = 710,26 \text{ kJ/s}^\circ\text{C}$$

b. Mencari laju kapasitas air pemanas (C_h)

$$C_h = \dot{m}_h \times C_{p_h} = 200 \text{ kg/s} (4179,04 \text{ J/kg}^\circ\text{C}) = 835,808 \text{ kJ/s}^\circ\text{C}$$

Terlihat bahwa $C_c < C_h$, maka $C_{min} = C_c$. Dengan demikian fluida dingin adalah fluida minimum. Efektivitas alat penukar kalor tipe shell and tube untuk aliran berlawanan arah dengan fluida dingin sebagai fluida minimum adalah:

$$\varepsilon = \frac{T_{c_o} - T_{c_i}}{T_{h_i} - T_{c_i}} \times 100\% = \frac{35,6^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}}{42,8^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}} \times 100\% = 43,75\%$$

Maka efektivitas alat penukar kalor Close Cooling Water Heat Exchanger (CCWHE) pada kondisi normal adalah 43,75%.

Pembahasan

Selama dilakukan observasi data di lapangan, pada tanggal 26 Oktober 2021 temperatur keluar air panas (T_{h_o}) meningkat menjadi 42°C dan temperatur air pendingin masuk (T_{c_i}) menjadi $33,51^\circ\text{C}$, sedangkan temperatur air panas masuk dan temperatur air pendingin keluar tetap. Hal ini disebabkan karena kondisi *tube* CCWHE yang kotor, sehingga mengakibatkan pendinginan peralatan bantu di ST 1.0 tidak optimal.

Uraian di atas membuktikan bahwa kebersihan peralatan mempengaruhi temperatur fluida yang mengalir. Selain itu, juga dapat mempengaruhi efektivitas alat penukar kalor yang dapat dibuktikan melalui perhitungan berikut.

Diketahui $T_{c_i} = 33,51^\circ\text{C}$

$T_{c_o} = 35,6^\circ\text{C}$

$T_{h_i} = 42,8^\circ\text{C}$

$T_{h_o} = 42^\circ\text{C}$

Menganalisis sifat fluida

Sifat fluida dalam *tube* (air laut)

Temperatur air pendingin rata-rata berfungsi untuk menentukan sifat fluida. Adapun persamaannya, yaitu:

$$T_c = \frac{T_{c_i} + T_{c_o}}{2} = \frac{33,51^\circ\text{C} + 35,6^\circ\text{C}}{2} = \frac{69,11^\circ\text{C}}{2} = 34,555^\circ\text{C}$$

Setelah dilakukan interpolasi, maka diperoleh sifat fluida:

$C_{p_c} = 4178 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$\mu_c = 0,726942 \cdot 10^{-3} \text{ kg/ms}$

$Pr_c = 4,88251$

$\rho_c = 994,178 \text{ kg/m}^3$

$K_c = 0,622288 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Sifat fluida dalam *shell* (air demin)

Temperatur air pendingin rata-rata berfungsi untuk menentukan sifat fluida. Adapun persamaannya, yaitu:

$$T_h = \frac{T_{h_i} + T_{h_o}}{2} = \frac{42,8^\circ\text{C} + 42^\circ\text{C}}{2} = \frac{84,8^\circ\text{C}}{2} = 42,4^\circ\text{C}$$

Setelah dilakukan interpolasi, maka diperoleh sifat fluida:

$C_{p_h} = 4179,48 \text{ j/kg}^\circ\text{C}$

$\mu_h = 0,650264 \cdot 10^{-3} \text{ kg/ms}$

$Pr_h = 4,1232$

$\rho_h = 991,14 \text{ kg/m}^3$

$K_h = 0,63388 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Menganalisis jenis aliran fluida

Jenis aliran fluida dalam *tube* (air laut)

a. Mencari luas permukaan fluida (A_c)

$$A_c = \frac{1}{4} (\pi)(D_i)^2(N_t) = \frac{1}{4} (3,14)(0,0226\text{m})^2(696) = 0,2790588336 \text{ m}^2$$

b. Mencari diameter ekivalen (D_e)

$$D_e = D_i = 0,0226 \text{ m}$$

c. Mencari kecepatan massa fluida (G_c)

$$G_c = \frac{\dot{m}_c}{A_c} = \frac{170 \text{ kg/s}}{0,2790588336 \text{ m}^2} = 609,19053450813 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka bilangan Reynold untuk sisi *tube* adalah:

$$R_e = \frac{G_c D_e}{\mu_c} = \frac{609,19053450813 \text{ kg/m}^2\text{s} (0,0226 \text{ m})}{0,726942 \cdot 10^{-3} \text{ kg/ms}}$$

$$R_e = 18939,20846488955$$

Jenis aliran fluida dalam *shell* (air demin)

a. Mencari luas permukaan fluida (A_h)

$$A_h = \frac{D_s \times c \times L_b}{P_t} = \frac{1,024 \text{ m} (0,006 \text{ m})(0,3 \text{ m})}{0,03 \text{ m}} = 0,06144 \text{ m}^2$$

b. Mencari diameter ekivalen (D_e)

$$D_e = \frac{4 \left[\frac{\sqrt{3} (P_t)^2}{4} - \pi \frac{(D_o)^2}{8} \right]}{\pi (D_o)} = \frac{4 \left[\frac{\sqrt{3} (0,03\text{m})^2}{4} - (3,14) \frac{(0,024\text{m})^2}{8} \right]}{3,14 (0,024\text{m})}$$

$$D_e = 17,3706404 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

c. Mencari kecepatan massa fluida (G_h)

$$G_h = \frac{\dot{m}_h}{A_h} = \frac{200 \text{ kg/s}}{0,06144 \text{ m}^2} = 3255,20833 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka bilangan Reynold untuk sisi *shell* adalah:

$$R_e = \frac{G_h D_e}{\mu_h} = \frac{3255,20833 \text{ kg/m}^2\text{s} (17,3706404 \cdot 10^{-3} \text{ m})}{0,650264 \cdot 10^{-3} \text{ kg/ms}} = 86957,07174316893$$

Menganalisis koefisien perpindahan kalor menyeluruh

Koefisien perpindahan kalor pada sisi *tube*

a. Mencari bilangan Nusselt (Nu_c)

$$Nu_c = 0,023 (Re_c)^{0,8} (Pr_c)^{0,3}$$

$$Nu_c = 0,023 (18939,20846488955)^{0,8} (4,88251)^{0,3}$$

$$Nu_c = 97,771040764039835252749549172152$$

b. Mencari koefisien perpindahan kalor (h_i)

$$h_i = \frac{Nu_c K_c}{D_i}$$

$$h_i = \frac{97,771040764039835252749549172152 (0,622288 \text{ W/m}^\circ\text{C})}{0,0226 \text{ m}}$$

$$h_i = 2692,112628981098274325796967046 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Koefisien perpindahan kalor pada sisi *shell*

a. Mencari bilangan Nusselt (Nu_h)

$$Nu_h = 0,023 (Re_h)^{0,8} (Pr_h)^{0,4}$$

$$Nu_h = 0,023 (86957,07174316893)^{0,8} (4,1232)^{0,4}$$

$$Nu_h = 362,48510298810395156317481229864$$

b. Mencari koefisien perpindahan kalor (h_o)

$$h_o = \frac{Nu_h K_h}{D_e}$$

$$h_o = \frac{362,48510298810395156317481229864 (0,63388 \text{ W/m}^\circ\text{C})}{17,3706404 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$h_o = 13227,610024216455071907725982276 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Konduktivitas thermal zat padat baja karbon adalah $43 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (sesuai Tabel 1). Berdasarkan perhitungan di atas, maka koefisien perpindahan kalor menyeluruh adalah:

$$U = \frac{1}{\frac{r_o}{r_i} \left(\frac{1}{h_i}\right) + \frac{(r_o) \ln \ln \left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k} + \frac{1}{h_o}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{0,012}{0,0113} \left(\frac{1}{2692,112628981098274325796967046 \text{ W/m}^2\text{C}}\right) + \frac{(0,012 \text{ m}) \ln \ln \left(\frac{0,012}{0,0133}\right)}{43 \text{ W/m}^2\text{C}} + \frac{1}{13227,610024216455071907725982276 \text{ W/m}^2\text{C}}}$$

$$U = 2054,5123854869644609686109820923 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Menganalisis beda temperatur rata-rata logaritma (LMTD)

$$LMTD = \frac{(T_{h_i} - T_{c_o}) - (T_{h_o} - T_{c_i})}{\ln \ln \left[\frac{(T_{h_i} - T_{c_o})}{(T_{h_o} - T_{c_i})} \right]} = \frac{(42,8^\circ\text{C} - 35,6^\circ\text{C}) - (42^\circ\text{C} - 33,51^\circ\text{C})}{\ln \ln \left[\frac{(42,8^\circ\text{C} - 35,6^\circ\text{C})}{(42^\circ\text{C} - 33,51^\circ\text{C})} \right]}$$

$$LMTD = 7,82729117^\circ\text{C}$$

Menganalisis faktor koreksi

$$a. P = \frac{T_{c_o} - T_{c_i}}{T_{h_i} - T_{c_i}} = \frac{35,6^\circ\text{C} - 33,51^\circ\text{C}}{42,8^\circ\text{C} - 33,51^\circ\text{C}} = 0,224973089$$

$$b. R = \frac{T_{h_i} - T_{h_o}}{T_{c_o} - T_{c_i}} = \frac{42,8^\circ\text{C} - 42^\circ\text{C}}{35,6^\circ\text{C} - 33,51^\circ\text{C}} = 0,38277512$$

Berdasarkan gambar 15 maka faktor koreksinya adalah 1.

Menganalisis luas perpindahan kalor menyeluruh

$$A_{total} = 2\pi(D_o)(L)(N_t) = 2(3,14)(0,024 \text{ m})(7,47 \text{ m})(696)$$

$$A_{total} = 783,611366 \text{ m}^2$$

Menganalisis laju perpindahan kalor

$$Q = U(A_{total})(F)(LMTD)$$

$$Q = 2054,5123854869644609686109820923 \text{ W}$$

$$/m^2\text{C} (783,611366 \text{ m}^2)(1)(7,82729117^\circ\text{C})$$

$$Q = 12,601463329420311874658918138178 \text{ MW}$$

Menganalisis efektivitas APK CCWHE kondisi kotor

a. Mencari laju kapasitas air pendingin (C_c)

$$C_c = \dot{m}_c \times C_{p_c} = 170 \text{ kg/s} (4178 \text{ J/kg}^\circ\text{C}) = 710,26 \text{ kJ/s}^\circ\text{C}$$

b. Mencari laju kapasitas air pemanas (C_h)

$$C_h = \dot{m}_h \times C_{p_h} = 200 \text{ kg/s} (4179,48 \text{ J/kg}^\circ\text{C}) = 835,836 \text{ kJ/s}^\circ\text{C}$$

Terlihat bahwa $C_c < C_h$, maka $C_{min} = C_c$. Dengan demikian fluida dingin adalah fluida minimum. Efektivitas alat penukar kalor tipe *shell and tube* untuk aliran berlawanan arah dengan fluida dingin sebagai fluida minimum adalah:

$$\varepsilon = \frac{T_{c_o} - T_{c_i}}{T_{h_i} - T_{c_i}} \times 100\% = \frac{35,6^\circ\text{C} - 33,51^\circ\text{C}}{42,8^\circ\text{C} - 33,51^\circ\text{C}} \times 100\% = 22,497\%$$

Maka efektivitas alat penukar kalor *Close Cooling Water Heat Exchanger* (CCWHE) pada kondisi kotor adalah 22,497%. Hal ini membuktikan bahwa kondisi CCWHE yang kotor mempengaruhi efektivitas perpindahan panasnya.

SIMPULAN

Setelah mengamati dan menganalisis data dari alat penukar kalor tipe *shell and tube* CCWHE (*Close Cooling Water Heat Exchanger*) Blok I PLTGU UPDK Belawan, maka penulis dapat mengambil beberapa simpulan. Adapun simpulan yang diperoleh dalam penelitian ini adalah Koefisien perpindahan panas menyeluruh dari alat *Close Cooling Water Heat Exchanger* (CCWHE) pada kondisi bersih adalah $2022,0829646746 \text{ W/m}^2\text{C}$ dan koefisien perpindahan panas menyeluruh dari alat *Close Cooling Water Heat Exchanger* (CCWHE) pada kondisi kotor adalah $2054,5123854869644609686109820923 \text{ W/m}^2\text{C}$. Efektivitas dari alat *Close Cooling*

Water Heat Exchanger (CCWHE) pada kondisi bersih adalah 43,75% dan efektivitas dari alat *Close Cooling Water Heat Exchanger (CCWHE)* pada kondisi kotor adalah 22,497%. Pengaruh kebersihan peralatan terhadap efektivitas perpindahan panasnya sangat berpengaruh. Dari analisis terlihat bahwa efektivitas CCWHE menurun pada saat CCWHE ber kondisi kotor

SARAN

Setelah melakukan analisis data dari alat penukar kalor tipe *shell and tube* CCWHE (*Close Cooling Water Heat Exchanger*) Blok I PLTGU UPDK Belawan, penulis memberikan saran sebagai berikut:

1. Untuk mengoptimalkan efektivitas dari alat penukar kalor tipe *shell and tube* CCWHE (*Close Cooling Water Heat Exchanger*) maka dapat dilakukan dengan menjaga kebersihan peralatan serta dilakukan pemeriksaan dan perawatan rutin sesuai dengan prosedur yang ditetapkan.
2. Dalam menyelesaikan penelitian ada baiknya penulis memperbanyak referensi bacaan baik media cetak maupun internet.
3. Diharapkan adanya penelitian lebih lanjut mengenai penukar kalor tipe *shell and tube* CCWHE (*Close Cooling Water Heat Exchanger*) dengan menggunakan metode perhitungan lainnya yang lebih *update*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada P3M Politeknik Negeri Medan dan Program Studi Teknik Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan yang telah membantu dan mendukung penelitian ini sehingga dapat diselesaikan dengan baik. Kepada para kolega yang telah membantu dengan dukungan materil dan moril kepada peneliti, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ambarita, Juanda. 2011. *Eksperimental Optimasi Laju Perpindahan Kalor dan Penurunan Tekanan Pengaruh Baffle Cut pada Alat Penukar Kalor Tabung Cangkang dengan Susunan Tabung Segiempat*. Skripsi. Medan: Jurusan Teknik Mesin Universitas Sumatera Utara.
- Agra, S.W. 1988. *Jurnal Perpindahan Panas Konduksi dan Radiasi, Edisi Pertama*. Yogyakarta : Gajah Mada Press.
- Aprilla, Wida. 2017. *Analisa Perpindahan Panas pada Close Cooling Water Heat Exchanger dengan Kapasitas Air Pendingin 200 kg/s Unit 2 PLTGU PT PLN (Persero) Sektor Pembangkitan Belawan*. Tugas Akhir. Medan: Jurusan Teknik Mesin Program Studi Teknik Konversi Energi Politeknik Negeri Medan.
- Badruz, Zaman. 2008. Dalam Adhitiya, Anggareza, dan Djatmiko Ichsan. 2013. *Simulasi Performansi Heat Exchanger Type Shell And Tube Dengan Double Segmental Baffle Terhadap Helical Baffle*. Jurnal Teknik POMITS Vol. 2 No. 3.
- Bambang, Setyoko. 2012. *Evaluasi Kinerja Heat Exchanger dengan Metode Fouling*. Vol. 29, No. 2, pp. 148-153.
- Bizy, I dan R.Setiadi. 2013. *Jurnal Studi Perhitungan Alat Penukar Kalor Tipe Shell and Tube dengan Program Heat Transfer Research Inc. (HTRI)*. Inderalaya: Universitas Sriwijaya.

Konferensi Nasional Sosial dan Engineering Politeknik Negeri Medan Tahun 2022

- Budiman, Ahmad. 2014. *Jurnal Analisis Perpindahan Panas dan Efisiensi Efektif High Pressure Heater (HPH) di PLTU Asam-Asam Vol. 03 No.2 pp 76-82*. Mangkurat : Universitas Lambung Mangkurat.
- Budiman, Arif. 2015. *Pengaruh Pemilihan Jenis Material Terhadap Nilai Koefisien Perpindahan Panas Perancangan Heat Exchanger Shell-Tube dengan Solidworks*. Universitas Gunadarma. Banjarmasin.
- Byrne C. Richard. 1999. *Journal Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association*. New York : Tubular Exchanger Manufacturers Association.
- Ekadewi A. Handoyo. 2000. *Jurnal Pengaruh Kecepatan Aliran Terhadap Efektivitas Shell and Tube Heat Exchanger*. Jakarta : Teknik Mesin Universitas Kristen Petra.
- Energie. 1955. *Manual Book Stork Ketels*. Belawan: PT PLN (Persero).
- Eswanto. 2020. *Modul Pengenalan Alat Perpindahan Panas*. Medan: Institute Teknologi Medan.
- Gusdiantoro. 2016. *Analisis Perpindahan Panas Alat Penukar Kalor Shell and Tube pada Pipa Tembaga dengan Tube Susunan Bujur Sangkar Skala Laboraturium*. Tugas Akhir. Medan: Jurusan Teknik Mesin Universitas Medan Area.
- Harini. 2017. *Jurnal Analisis Perhitungan Laju Perpindahan Panas Alat Penukar Kalor Tipe Pipa Ganda di Laboraturium Universitas 17 Agustus 1945*. Jakarta : Universitas 17 Agustus 1945.
- Holman, J.P. 1988. *Perpindahan Kalor*. Jakarta: Erlangga.
- Incropera, Frank P dan David P. Dewitt. 1985. *Journal Fundamentals of Heat and Mass Transfer, second edition*. New York : John Wiley & Sons.
- Ibid Sularso. 1987. *Jurnal Pompa dan Kompresor*. Jakarta : PT Pradnya Paramita.
- Jian-feng, Zhou. 2015. *Journal Semi-Numerical Analysis of Heat Transfer Performance of Fractal Based Tube Bundle in Shell-and-Tube Heat Exchanger*. Elsevier : International Journal of Heat and Mass Transfer 84 (2015) 282–292.
- Kern , D. 1993. *Journal Process Heat Transfer, International Student Edition*. Jepang : Mc Graw-Hill.
- Koestoer, Raldi Artono. 2002. *Jurnal Perpindahan Kalor Untuk Mahasiswa Teknik*. Jakarta : Salemba Teknika.
- Kreith, Frank. 1997. *Jurnal Prinsip-prinsip Perpindahan Panas, Edisi 3*. Jakarta: PT Gelora Aksara Pratama.
- Mahmudin, Muhammad Syahrir. 2016. *Karakteristik Perpindahan Panas pada Pipa Penukar Kalor Selongsong Aliran Searah Vertikal*. Makasar : Fakultas Teknik Universitas Muslim Indonesia.
- Pitts, R Donald. 1997. *Journal Theory and Problems of Heat Transfer, second edition*. New York : Mc Graw Hill.
- PLN. 2021. *Modul Pengoperasian PLTGU*. Jakarta: Pusdiklat PT PLN (Persero).

Konferensi Nasional Sosial dan Engineering Politeknik Negeri Medan Tahun 2022

- Sarboy, Angelina. 2020. *Analisis Efektivitas Heat Exchanger Tipe Shell and Tube Blok 2 PLTGU Sicanang-Belawan*. Tugas Akhir. Medan: Jurusan Teknik Mesin Program Studi Teknik Konversi Energi Politeknik Negeri Medan.
- Saunders. 1998. *Journal Heat Exchanger Selection , Design and Construction*. London : John Willey & Sons.
- Sharqawy, Mostafa., dkk. 2010. *Journal Thermophysical Properties of Seawater, A Review of Existing Correlations and Data, Desalination and Water Treatment*.
- Siagian, Saut. 2016. *Jurnal Analisa Efektivitas Alat Penukar Kalor Jenis shell and Tube Hasil Perencanaan Mahasiswa Skala Laboratorium*. Jakarta : UPN Veteran Jakarta, Bina Teknika.
- Sitanggang, Kiki. 2019. *Analisis Perpindahan Panas Brine Heater pada Proses Desalination Plant di PLTGU PT PLN (Persero) Unit Pembangkitan Belawan*. Tugas Akhir. Medan: Jurusan Teknik Mesin Program Studi Teknik Konversi Energi Politeknik Negeri Medan.
- Sitompul, Tunggul M. 1993. *Jurnal Alat Penukar Kalor, edisi 1*. Jakarta : PT Raja Grafindo Persada.
- Sudrajat, Jajat. 2017. *Analisis Kinerja Heat Exchanger Shell & Tube Pada Sistem Cog Booster Di Integrated Steel Mill Krakatau*. Jurnal Teknik Mesin (JTM): Vol. 06, No. 3. Universitas Mercu Buana.
- Sugiyanto. 2005. *Jurnal Analisis Alat Penukar Kalor Tipe Shell and Tube Dan Aplikasi Perhitungan Dengan Microsoft Visual Basic 6.0*. Depok : Jurusan Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Gunadarma.
- T, Rohman., dkk. 2013. *Jurnal Penambahan dan variasi dimensi sirip aluminium pada tube terhadap laju dan efektifitas perpindahan panas dalam heat exchanger tipe shell and tube, Volume 6 Nomor 2*. Jurnal Rotor.
- Thome, John R. 2010. *Journal Wolverine Engineering Databook III*. Lausanne : Wolverine.
- Yunianto, Bambang., dkk. 2011. *Jurnal Pengaruh Perubahan Debit Aliran Fluida Panas dan Flida Dingin terhadap Efektivitas pada Penukar Kalor Tipe Plat Aliran Silang*. Semarang : Universitas Diponegoro.
- Yunus A. Cengel. 2003. *Journal Heat Transfer A Practical Approach, Second Edition*. Singapore : Mc Graw-Hill, Book Company.