

## ANALISIS KINERJA KONDENSOR SISTEM PENDINGIN PUSAT PERBELANJAAN

Hadi Wibowo \*, Prawoto \*\*

Program Studi Teknik Mesin Universitas Pancasila\*,  
Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Pancasila\*\*,  
Email: [hadimaula@gmail.com](mailto:hadimaula@gmail.com), [pra\\_woto@yahoo.com](mailto:pra_woto@yahoo.com)

### ABSTRACT

*Shell and tubes condenser in chiller capacity 600 Tons Refrigerations with refrigerant HFC 134-a (R134-a) is as heat exchanger with functioned to change refrigerant in superheated gas to be fluid. After several months of operation the condenser will decrease performance, because of decreasing in the rate of heat transfer. Condenser daily operational data that is used as an evaluation of analysis condenser performance in which the water temperature inlet and outlet condenser, refrigerant temperature inlet and outlet condenser, with a mass flow of refrigerant. Some parameters associated with the rate of heat transfer is the heat transfer coefficient, the Log Mean Temperature Difference, fouling factor and heat transfer surface area. Through calculation and analysis, obtained a decrease in heat transfer rate 0.81%, overall heat transfer coefficient 42.15 %, and note the increase in the Log Mean Temperature Difference 29.51 %, fouling factor 66.15 %, with heat transfer surface area 29.65 %.*

*Keywords: condenser, performance analysis, fouling factor.*

### PENDAHULUAN

Kondensor merupakan alat penukar kalor yang didalamnya terdapat dua siklus yang saling berkaitan, yaitu siklus fluida panas (refrigeran) dan siklus fluida dingin (air kondensor), yang keduanya saling berlawanan arah (*counter flow*). Refrigeran sebagai fluida panas dalam bentuk yang berada di luar pipa kondensor akan melepaskan kalor ke air kondensor sebagai fluida dingin yang terletak di dalam pipa. Dengan demikian laju perpindahan panas dari refrigeran ke air kondensor melalui dinding pipa kondensor sangat dipengaruhi oleh adanya kotoran dari refrigeran sekunder yang terbawa dan melekat pipa-pipa kondensor yang disebut dengan *fouling*. Dengan adanya *fouling* akan menghambat laju perpindahan kalor, yang akan menurunkan kinerja kondensor sehingga akan mempercepat waktu *cleaning*.

Tujuan penelitian adalah mengetahui pengaruh faktor *fouling* terhadap laju perpindahan kalor yang dilepas refrigeran. Dengan diperoleh informasi harga faktor *fouling* aktual pada kondensor yang dipasang pada instalasi pusat perbelanjaan, maka dapat digunakan untuk menganalisis kinerja kondensor.

### METODE PENELITIAN

Sebagai bahan penelitian adalah sebuah kondensor sebuah *chiller* pada sebuah pusat

perbelanjaan yang berlokasi di kota Tegal Jawa Tengah, yang dilaksanakan pada setiap minggu dari bulan April sampai dengan bulan Juli 2010 secara kontinu. *Centrifugal chiller* (PEH087, Evaporator/Condensor : 3016/3016) merk Mc Quay tersebut berkapasitas 600 Tons (2110 kW), menggunakan HFC- 134a (R134-a) sebagai fluida pemanas (refrigeran primer) dan air sebagai fluida pendingin (refrigeran sekunder).

Aktifitas penelitian dimulai dengan mengumpulkan data spesifikasi teknik *chiller* khususnya kondensor dan air kondensor, yang dilanjutkan dengan mengukur (*mencatat*) temperatur dan tekanan refrigeran dan air kondensor pada saat pengoperasian.

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode teoritis, analisis dan developmental. Kajian secara teoritis, penjelasan utama fenomena atau data dikembangkan, diusulkan dan diuraikan. Untuk mendapatkan parameter-parameter utama dalam kondensor dengan berbagai sumber literatur, baik berupa buku teks maupun jurnal. Pendekatan secara analisis dilakukan dengan pengamatan (visualisasi) kinerja operasional kondensor dan pengambilan data operasional harian yang yang dikoleksi dan diteliti dijadikan petunjuk penelitian. Sedangkan secara developmental, perubahan pada faktor yang diamati sehingga dapat ditelusuri pertumbuhannya maupun penurunannya.

**PARAMETER KINERJA KONDENSOR**

Evaluasi kinerja kondensor dilakukan dengan mengevaluasi parameter-parameter sebagai berikut :

- a. Laju perpindahan kalor ( $Q_h$ ).
- b. logaritmik ( $LMTD$ )
- c. Koefisien perpindahan kalor menyeluruh ( $U$ )
- d. Faktor pengotoran ( $\Sigma R_f$ ) dan over sizing ( $OS$ ).

Laju perpindahan kalor yang dilepas refrigeran pada kondensor dievaluasi dengan menggunakan persamaan :

$$Q_h = m_h \cdot (h_3 - h_4) \tag{1}$$

dimana,  $Q_h$ = laju perpindahan kalor yang dilepas refrigeran (kW),  $m_h$ = laju aliran massa refrigeran (kg/s),  $h_3$ = entalpi refrigeran pada temperatur masuk dan tekanan kondensor (kJ/kg),  $h_4$ = entalpi refrigeran pada temperatur keluar kondensor (kJ/kg) Laju aliran massa refrigeran dievaluasi berdasarkan kapasitas beban pendinginan pada mesin pendingin yang digunakan.

$$LMTD = F_c \cdot \Delta T_m \tag{2}$$

Beda temperatur rata-rata logaritmik dievaluasi dengan menggunakan persamaan :

dimana :

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \tag{3}$$

dimana,  $\Delta T_1$ = beda temperatur fluida panas masuk kondensor dengan temperatur fluida dingin keluar kondensor (K).

$$\Delta T_1 = T_{hi} - T_{co} \tag{4}$$

$\Delta T_2$ = beda temperatur fluida panas keluar kondensor dengan temperatur fluida dingin masuk kondensor (K).

$$\Delta T_2 = T_{ho} - T_{ci} \tag{5}$$

Besarnya faktor koreksi untuk proses kondensasi pada kondensor  $F_c = 1$ .<sup>[5,13]</sup> Saat kondensor beroperasi, maka nilai koefisien perpindahan kalor akan berubah terhadap waktu (kondisi kotor). Koefisien perpindahan kalor kondisi kotor, dievaluasi menggunakan persamaan :

$$Q_h = U_f A_o LMTD \tag{6}$$

$$\text{atau: } U_f = \frac{Q_h}{A_o LMTD} \tag{7}$$

dimana,  $U_f$ = koefisien perpindahan kalor pada kondisi kotor ( $W/m^2 K$ ),  $A_o$ =luas permukaan perpindahan kalor ( $m^2$ ),  $LMTD$ = beda temperatur rata-rata logaritmik kondensor (K)

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{U_c} + \Sigma R_{fd} \tag{8}$$

Sedangkan koefisien perpindahan kalor kondensor kondisi bersih, dievaluasi dengan persamaan :

atau :

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{U_f} - \Sigma R_{fd} \tag{9}$$

dimana,  $U_c$ = koefisien perpindahan kalor pada kondisi bersih ( $W/m^2 K$ ),  $\Sigma R_{fd}$ = faktor *fouling* total kedua permukaan, ( $m^2 K/W$ ).

Faktor *fouling* total yang digunakan untuk mengevaluasi koefisien perpindahan kalor kondisi bersih, sesuai spesifikasi kondensor C3016 adalah  $\Sigma R_{fd} = 0,000044 m^2 W/K$ .<sup>[15]</sup> Saat kondensor beroperasi, besarnya factor pengotoran akan berubah terhadap waktu dan koefisien perpindahan kalor kondisi kotor ( $U_f$ ) juga berubah terhadap waktu, sedangkan koefisien perpindahan kalor kondisi bersih merupakan besaran yang konstan  $U_c = \text{konstan}$ .

$U_{f1}$  ( $W/m^2 K$ ), pada t = 1

$U_{f1}$  ( $W/m^2 K$ ), pada t = 1

$U_{f2}$  ( $W/m^2 K$ ), pada t = 2

Luas permukaan perpindahan kalor kondisi kotor, dievaluasi dengan persamaan :

$$\frac{A_f}{A_o} = 1 + U_c \Sigma R_f \tag{10}$$

atau :

$$A_f = (1 + U_c \Sigma R_f) A_o \tag{11}$$

dimana,  $A_f$  = luas permukaan perpindahan kalor pada kondisi kotor ( $m^2$ ),  $\Sigma R_f$  = koefisien perpindahan kalor kondisi kotor ( $m^2$ )

K/W),  $A_o$  = luas permukaan luar perpindahan kalor kondisi bersih( $m^2$ ) Prosentase penambahan perluasan permukaan perpindahan kalor (*oversizing*) akibat faktor *fouling* dievaluasi dengan persamaan:

$$OS = (U_c \Sigma R_f) 100 \text{ (%) (12)}$$

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Laju aliran massa refrigeran dari data spesifik mesin adalah 3 lbm/min/Tons. Sehingga laju aliran massa refrigeran yang digunakan adalah:

$$m_h = 3 \left[ \frac{\text{lbm}}{\text{min/Tons}} \right] \times 0,4536 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{lbm}} \right] \times \frac{600 \text{ Tons}}{60 \left[ \frac{\text{s}}{\text{min}} \right]}$$

$$m_h = 13,6080 \text{ kg/s}$$

Tingkat keadaan refrigeran masuk kondensor hasil pengukuran adalah temperatur gas panas lanjut 33,6°C dan tekanan kondensor 0,7 MPa, sehingga :

$$h_3 = 269,17 \text{ kJ/kg}$$

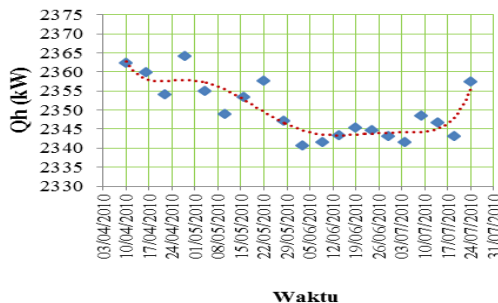
Tingkat keadaan refrigeran keluar kondensor hasil pengukuran adalah temperatur fluida 32,8 °C, sehingga :

$$h_4 = 95,58 \text{ kJ/kg}$$

Dengan persamaan (1), laju perpindahan kalor yang dilepas refrigeran adalah :

$$Q_h = 2362,26 \text{ kW}$$

Dari hasil evaluasi laju aliran perpindahan kalor yang dilepas refrigeran diperoleh, bahwa laju aliran perpindahan kalor yang dilepas refrigeran ke air kondensor mengalami penurunan sebesar 0,81% (tabel 2. dan gambar 2.).

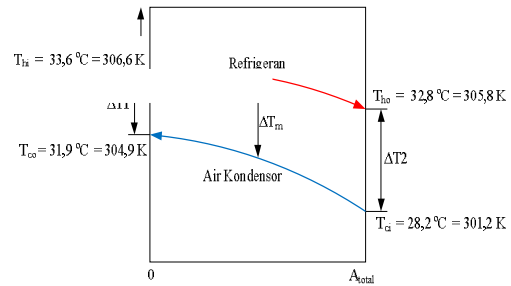


Gambar 2. Grafik laju perpindahan kalor terhadap waktu

Pada kondisi yang ideal adalah laju perpindahan kalor yang dilepas refrigeran adalah tetap, dikarenakan koefisien hambatan termal

hanya terdapat pada konduktifitas termal pipa yang besarnya tetap (bukan fungsi waktu).

Jika terjadi penurunan laju perpindahan kalor yang dilepas refrigeran, dikarenakan terdapat hambatan termal lain, yaitu faktor pengotoran pada dinding didalam pipa (deposit) karena air yang mengalir didalam pipa yang besarnya berubah (fungsi waktu), sedangkan faktor pengotoran diluar pipa diabaikan karena refrigeran dianggap bersih.



Gambar 3. Distribusi temperatur refrigeran dan air kondensor

Beda temperatur fluida panas masuk dengan temperatur fluida dingin keluar kondensor dievaluasi dengan persamaan (3).

dimana :

$$T_{hi} = 33,6 \text{ } ^\circ\text{C} = 306,6 \text{ K}$$

$$T_{co} = 31,9 \text{ } ^\circ\text{C} = 304,9 \text{ K}$$

Sehingga diperoleh :  $\Delta T_1 = 1,7 \text{ K}$

Beda temperatur fluida panas keluar dengan temperatur fluida dingin masuk kondensor dievaluasi dengan persamaan (5).

dimana:

$$T_{ho} = 32,8 \text{ } ^\circ\text{C} = 305,8 \text{ K}$$

$$T_{ci} = 28,2 \text{ } ^\circ\text{C} = 301,2 \text{ K}$$

Sehingga diperoleh :  $\Delta T_2 = 4,6 \text{ K}$

Sehingga dari persamaan (1), beda temperatur rata-rata adalah:

$$\Delta T_m = 2,91 \text{ K}$$

Besarnya faktor koreksi ( $F_c$ ), adalah :

$$F_c = 1$$

Sehingga dari persamaan (2), beda temperatur rata-rata logaritmik adalah:

$$LMTD = 2,91 \text{ K}$$

Dari hasil evaluasi, diperoleh  $LMTD$  mengalami kenaikan sebesar 29,51%. Koefisien

perpindahan kalor kondisi kotor, menggunakan persamaan (7), dimana :  $Q_n = 2362,26 \text{ kW}$

$$LMTD = 2,91 \text{ K}$$

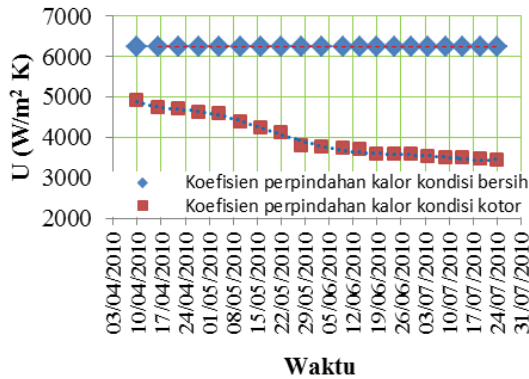
Luas total permukaan perpindahan kalor, sesuai spesifikasi alat,  $A_o = 165,64 \text{ m}^2$ . Sehingga koefisien perpindahan kalor kondisi kotor adalah:

$$U_f = 4902,27 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Koefisien perpindahan kalor pada kondisi bersih dievaluasi pada kondisi awal pengambilan, dengan menggunakan faktor *fouling* total, sesuai alat  $\Sigma R_{fd} = 0,0000440 \text{ m}^2 \text{ K/W}^{[7]}$ . Sehingga dengan asumsi  $U_f = \text{konstan}$  (pada kondisi awal pengambilan data), dengan persamaan (9) diperoleh :

$$U_c = 6250,50 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Tabel 4. Analisa koefisien perpindahan kalor pada kondisi kotor



Gambar 4. Grafik koefisien perpindahan kalor terhadap waktu

Dari hasil evaluasi diperoleh bahwa laju perpindahan kalor refrigeran yang dilepas ke air kondensor mengalami penurunan sebesar 42,15%. Sedangkan pada kondisi bersih, yaitu pada harga faktor *fouling* total yang konstan (spesifikasi kondensor) diperoleh laju perpindahan kalor kondisi yang bersih dengan harga konstan yang lebih besar daripada harga laju perpindahan kalor pada kondisi kotor.

Saat kondensor beroperasi, besarnya faktor pengotoran akan berubah terhadap waktu dan koefisien perpindahan kalor kondisi kotor  $U_f$  juga berubah terhadap waktu, sedangkan koefisien perpindahan kalor kondisi bersih merupakan besaran yang konstan  $U_c = \text{konstan}$ . Dimana:  $U_c = 6250,50 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  (konstan)ada  $t=1$ ,  $U_{f1} = 4902,27 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Pada  $t=2$ ,  $U_{f2} = 4731,39 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Sehingga dengan persamaan (9), faktor pengotoran total kedua permukaan pipa kondensor adalah :

$$\text{Pada } t = 1, \Sigma R_{f1} = 0,0000440 \text{ (m}^2 \text{ K/W)}$$

$$\text{Pada } t = 2, \Sigma R_{f2} = 0,0000514 \text{ (m}^2 \text{ K/W)}$$

Sedangkan luas permukaan perpindahan kalor kondisi kotor, dievaluasi dengan persamaan (11), dimana :

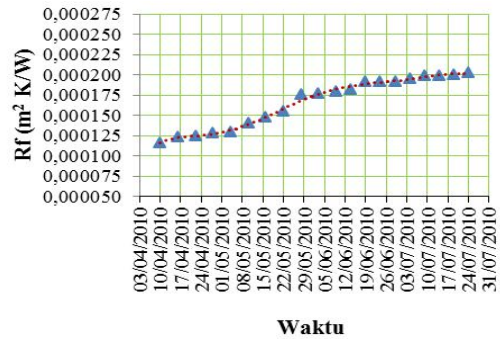
$$\Sigma R_f = 0,0000440 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$A_o = 165,40 \text{ m}^2$$

Sehingga luas permukaan perpindahan kalor kondisi kotor adalah  $A_f = 210,89 \text{ m}^2$

Presentase penambahan perluasan permukaan perpindahan kalor (*over sizing*) akibat faktor *fouling* total dievaluasi dengan persamaan (12), diperoleh :  $OS = 27,50 \%$

Dari tabel 5. dan gambar 5, dapat dilihat bahwa adanya penambahan faktor *fouling* yang semakin meningkat mulai pada minggu ke-1 pada pipa-pipa kondensor.



Gambar 5. Grafik faktor *fouling* terhadap waktu

Pada saat  $t = 0$  adalah penambahan faktor *fouling* ( $\Sigma R_f$ ) adalah  $0 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ , sedangkan pada  $t = 1$  penambahan faktor *fouling* adalah  $0,0000514 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ . Dan sampai minggu terakhir kenaikan faktor *fouling* total pada permukaan bagian dalam pipa adalah 66,15%

Luas total permukaan perpindahan kalor saat kondensor beroperasi ( $A_f$ ) akan mengalami kenaikan sebesar 29,65%, hal ini karena koefisien perpindahan kalor kondisi kotor yang semakin menurun akibat adanya penambahan faktor *fouling* total kedua sisi permukaan yang berubah terhadap waktu.

### KESIMPULAN

Dari analisis hasil penelitian kinerja kondensor yang menggunakan data hasil pengukuran selama 120 hari berturut-turut dan evaluasi parameter-parameter kinerja kondensor, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Laju perpindahan kalor menyeluruh pada kondensor semakin menurun, dikarenakan terjadi kenaikan temperatur refrigeran keluar kondensor.
2. Adanya kenaikan beda temperatur rata-rata logaritmik (*LMTD*) yang cukup besar, dikarenakan temperatur refrigeran keluar kondensor kenaikan, sedangkan perbedaan temperatur air masuk dan keluar kondensor relatif konstan.
3. Dengan adanya penurunan laju perpindahan kalor, sebanding dengan menurunnya koefisien laju perpindahan kalor menyeluruh.
4. Dengan menurunnya nilai koefisien perpindahan kalor kondensor, hal ini menunjukkan adanya nilai tahanan termal pada pipa-pipa kondensor yang semakin naik yang disebabkan karena adanya faktor *fouling* (deposit) pada pipa-pipa kondensor.

Melalui perhitungan dan analisis, diperoleh adanya penurunan laju perpindahan kalor 0,81%, penurunan koefisien perpindahan kalor menyeluruh 42,15%, dan diketahui adanya kenaikan beda temperatur rata-rata logaritmik 29,51%, kenaikan faktor *fouling* 66,15%, dengan kenaikan luas permukaan perpindahan kalor 29,65%.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Brown, G.G, 1984, *Unit Operation*, 3 th Ed, Mc. Graw-Hill Book Co, Singapore.
- [2] CQM-Tech.,(Industrial Air Conditioning and Refrigeration Systems 2010), "Loss of Efficiency and output in closed cycle water systems",[www.cqm-tech.com](http://www.cqm-tech.com). [10/5/2010]
- [3] Donald Q Kern, 1984, *Process Heat Transfer*, Mc Graw-Hill Book Co, Singapore,.
- [4] Frank Kreith & William Z. Black. 1980. *Basic Heat Transfer*. New York : Harper & Row Publisher.
- [5] John H. Leinhard IV, 2003, *A Heat Transfer Text Book*, 3 th Ed., Phlogiston Press, CambridgeMassachusetts.
- [6] McQuay Air Conditioning 31-002. 2000. *Application Guide : Centrifugal Chiller Fundamentals*. McQuay International.
- [7] McQuay Air Conditioning 31-003-1. 2002. *Application Guide : Chiller Plant Design*. McQuay International.
- [8] McQuay Air Conditioning. 1999. *Installation, Operating and Maintenance :Single/Dual Compressor Centrifugal Chiller*. McQuay International.
- [9] McQuay Air Conditioning. Product Manual PEH087. Revisi V. 2010. *Centrifugal Chiller*. McQuay International.
- [10] McQuay Air Conditioning. Product Manual PM PEH/PFH-1. 1999. *Centrifugal Compressor Water Chiller*. McQuay International.
- [11] Merle C. Potter etc., 2001. *Mechanics of Fluids*. Prentice-Hall. Inc.
- [12] Michael J. Moran, etc, 2003, *Introduction to Thermal System Engineering* , John Wiley and Sons.
- [13] Robert-Field, 1992, *Chemical Engineering: Introductory Aspects*, The Macmilland Press Ltd, London.
- [14] S. J. Pugh. etc, Juli 2007, *Fouling During The Use of Fresh Water as Coolant-The Development of A User Guide*, Engineering Conferences International, Tomar, Portugal. [10/5/2010]
- [15] Shan K. Wang. Edisi 2. 2001. *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*. McGraw-Hill. New York.
- [16] Thackery, P.A, , 1980, *The Cost of Fouling in Heat Exchange Plant*, Effluent and Water Treatment Journal, Vol.20, Washington D.C.
- [17] UNEP. Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia. *Peralatan Energi Listrik : Refrigerasi dan Penyejuk AC*.
- [18] Y. D. Jun, etc., Juni 2005, *Fouling reduction Characteristics of a circulating Fluidized Bed Heat Exchanger*, Proceedings of 6th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning Challenges and Opportunities, Germany.[10/5/2010]
- [19] Yunus A. Cengel & Michael A. Boles. 2007. *Thermodynamics : An Engineering Approach*. McGraw-Hill. Singapore.
- [20] Zainus Salimin dan Endang Nuraeni. 17 Oktober 2009. *Estimasi Biaya Fouling pada Alat Penukar Panas untuk Pengolahan Limbah Radioaktif Cair*. Prosiding Seminar Nasional ke-15 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif Batan. Surakarta.[10/5/2010]
- [21] Zainus Salimin dan Gunandjar, 21 Juni 2007. *Persoalan Fouling dan Solusinya pada Evaporator untuk Pengolahan Limbah Radioaktif Cair*, Prosiding Seminar Nasional X, Kimia Dalam Pembangunan, Hotel Grand Mercure Yogyakarta.