

PERANCANGAN ALAT PENUKAR KALOR MENGGUNAKAN HARGA *FOULING* FUNGSI WAKTU DAN KONDISI OPERASI BEDA TEMPERATUR RATA-RATA KONSTAN

Wahid Nur Irianto

Teknik Mesin

STT Yuppentek Tangerang, Banten

e-mail : wahid.irianto@yahoo.com

ABSTRAK

Persoalan utama pada perancangan alat penukar kalor adalah menentukan dimensi alat sesuai dengan data perancangan yang ditetapkan. Tulisan ini bertujuan merancang alat penukar kalor tipe shell and tube, one pass shell two pass tube dengan menggunakan harga fouling fungsi waktu. Alat akan dioperasikan pada kondisi beda temperatur rata-rata konstan. Pada perancangan ini, dilakukan perhitungan dengan beberapa variasi waktu alat akan dilakukan perawatan (*cleaning*), yaitu setelah 6 ; 9 dan 12 bulan, serta variasi beban termal, yaitu beban termalnya tinggal 60% ; 70% ; 80% dan 90% dari kondisi awal. Beban termal yang direncanakan, $Q = 506\ 900\ W$. Temperatur fluida yang direncanakan, $T_{ci} = 38\ ^\circ C$, $T_{co} = 44\ ^\circ C$, $T_{hi} = 62\ ^\circ C$, $T_{ho} = 50\ ^\circ C$. Dan ukuran pipa yang dipilih adalah, diameter pipa $d_o = 0,013\ m$, panjang pipa $L = 3,556\ m$.

I. PENDAHULUAN

Persoalan utama pada perancangan alat penukar kalor adalah menentukan dimensi alat sesuai dengan data perancangan yang ditetapkan. Dan untuk mengantisipasi terjadinya lapisan deposit pada saat alat dioperasikan, maka dalam perhitungan perancangan, perlu dilakukan pemilihan harga faktor *fouling* (*fouling factor*) yang sesuai dengan fluida kerjanya. Biasanya faktor *fouling* diambil dari standart TEMA, dimana harganya konstan. Pemilihan harga faktor *fouling* yang terlalu besar, mengakibatkan jumlah pipa yang diperlukan terlalu banyak, sehingga harganya mahal dan dimensinya juga besar. Sedang pemilihan harga faktor *fouling* yang terlalu kecil akan mengakibatkan waktu perawatan (*cleaning interval*) lebih cepat dari yang direncanakan. Dan hal ini akan mengganggu proses produksi.

Untuk mengatasi masalah di atas, maka perlu dicari suatu harga faktor *fouling* yang sesuai dengan fluida kerjanya.

Proses pembentukan lapisan deposit di permukaan alat penukar kalor merupakan fenomena yang sangat kompleks, dan proses pembentukannya sangat beragam. Berdasar proses pembentukannya, lapisan deposit dapat terbentuk dari partikel yang terangkut dalam aliran fluida, senyawa biologi, hasil proses korosi dan lainnya.

Pembentukan lapisan deposit merupakan hasil kompetisi dari laju pembentukan massa deposit dengan laju *removal* (pengikisan) deposit oleh aliran. Pertumbuhan lapisan deposit dapat membentuk kurva linear atau asimptotik. Kurva linear menggambarkan deposit yang sangat keras. Kurva asimptotik menggambarkan deposit yang tidak terlalu keras, dan mudah terkikis oleh aliran fluida. Pertumbuhan lapisan deposit yang bersifat asimptotik, ditunjukkan pada persamaan (1) (Wahid Nur Irianto, 2012).

$$R_f = R_f^* (1 - e^{(-t/t_c)}) \quad (1)$$

R_f = faktor *Fouling*.

R_f^* = faktor *Fouling* asimptotik.

t_c = konstanta waktu.

t = waktu.

Fokus perancangan alat penukar kalor dengan *fouling* fungsi waktu, juga untuk mendapatkan dimensi utama alat, yaitu luas permukaan perpindahan kalor (A). Parameter tersebut tergantung parameter lain, yaitu beban termal (Q), koefisien perpindahan panas menyeluruh (U) dan beda temperatur rata-rata logaritmik (ΔT_{lm}).

Pada saat awal pengoperasian, ketika belum ada deposit, maka persamaan beban termal adalah (Sadik Kakac & Hongtan Liu, 2002) :

$$Q_c = U_c \cdot A_c \cdot \Delta T_{lm,c} \quad (2)$$

Q_c = Beban termal.

Wahid Nur Irianto ,perancangan alat penukar kalor menggunakan harga fouling fungsi waktu dan kondisi operasi beda temperatur Rata-rata konstan

U_c = Koefisien perpindahan panas menyeluruh pada kondisi belum terjadi *fouling* (*clean*).
 A_c = Luas permukaan perpindahan panas sebelum terjadi *fouling*.
 $\Delta T_{lm,c}$ = Beda temperatur rata-rata logaritmik sebelum terjadi *fouling*.

Setelah terjadi deposit pada permukaan alat penukar kalor, maka persamaannya menjadi:

$$Q_f = U_f \cdot A_f \cdot \Delta T_{lm,f} \quad (3)$$

dengan,

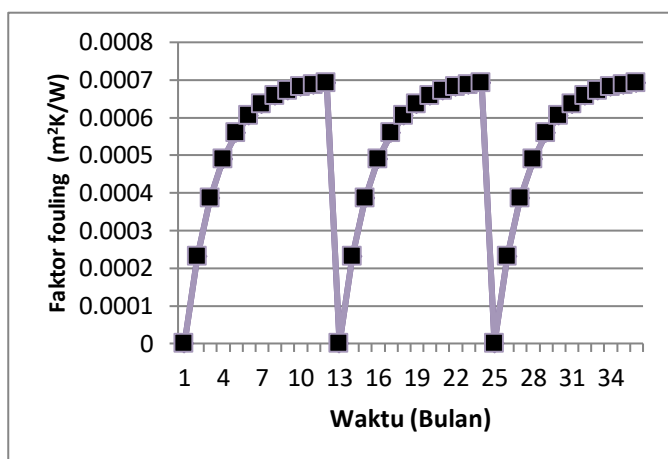
$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{U_c} + R_f \quad (4)$$

Atau,

$$U_f = \left(\frac{1}{U_c} + R_f \right)^{-1} \quad (5)$$

U_f = koefisien perpindahan panas menyeluruh pada kondisi telah terjadi *fouling*.
 A_f = luas permukaan perpindahan panas setelah terjadi *fouling*.
 $\Delta T_{lm,f}$ = beda temperatur rata-rata logaritmik setelah terjadi *fouling*.

Saat mulai dioperasikan, pada alat penukar kalor belum terjadi deposit, dan harga faktor *fouling*, $R_f=0$. Seiring dengan berjalannya waktu, harga R_f akan bertambah, sampai dilakukan perawatan (*cleaning*). Setelah dilakukan perawatan, maka alat kembali bersih seperti pada saat awal pengoperasian, dan harga R_f akan kembali bertambah seiring dengan berjalannya waktu pengoperasian. Hubungan antara waktu perawatan (*cleaning interval*) t , dengan faktor *fouling* R_f , dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. *Cleaning interval* alat penukar kalor.

Pada tahap perancangan , harus ditentukan waktu *cleaning interval* yang diinginkan, dan kondisi pengoperasian alat.

II. PENGOPERASIAN ALAT PENUKAR KALOR

Alat penukar kalor dapat dioperasikan pada kondisi beban thermal konstan atau pada beda temperatur rata-rata konstan.

Pada saat beroperasi, akan terjadi pertukaran kalor diantara kedua fluida yang ada. Jumlah kalor yang dilepas fluida panas (Q_h) dan kalor diterima fluida dingin (Q_c) adalah:

$$Q_h = m_h \cdot C_{ph} \cdot (T_{hi} - T_{ho}) \quad (6)$$

$$Q_c = m_c \cdot C_{pc} \cdot (T_{co} - T_{ci}) \quad (7)$$

Dimana, m_h = laju aliran massa fluida panas, m_c = laju aliran massa fluida dingin, C_{ph} = panas jenis fluida panas, C_{pc} = panas jenis fluida dingin, T_{hi} = temperatur fluida panas masuk alat, T_{ho} = temperatur fluida panas keluar alat, T_{ci} = temperatur fluida dingin masuk alat, T_{co} = temperatur fluida dingin keluar alat.

Wahid Nur Irianto ,perancangan alat penukar kalor menggunakan harga fouling fungsi waktu dan kondisi operasi beda temperatur Rata-rata konstan

Secara ideal, kalor dilepas fluida panas akan sama dengan kalor diterima fluida dingin. Namun pada kenyataannya, sebagian kalor akan dibuang ke lingkungan, sehingga kalor diterima fluida dingin akan lebih kecil dari kalor dilepas fluida panas.

Pada saat proses perancangan alat penukar kalor, harus ditentukan apakah alat tersebut akan dioperasikan pada kondisi beban termal konstan atau pada kondisi beda temperatur rata-rata konstan. Pada penelitian ini, alat penukar kalor direncanakan akan dioperasikan pada kondisi beda temperatur rata-rata konstan.

2.1. Beda Temperatur Rata-Rata Konstan

Beda temperatur rata-rata sebelum terjadi *fouling* pada alat penukar kalor dapat dicari dari persamaan (2), yaitu:

$$\Delta T_{lm,c} = \frac{Q_c}{U_c \cdot A_c} \quad (8)$$

Sedang beda temperatur rata-rata setelah terjadi *fouling* pada alat penukar kalor dapat dicari dari persamaan (3), yaitu:

$$\Delta T_{lm,f} = \frac{Q_f}{U_f \cdot A_f} \quad (9)$$

Untuk beda temperatur rata-rata konstan, berarti beda temperatur sebelum terjadi *fouling* sama dengan setelah terjadi *fouling*, yaitu:

$$\Delta T_{lm,c} = \Delta T_{lm,f} \quad (10)$$

Atau,

$$\frac{Q_c}{U_c \cdot A_c} = \frac{Q_f}{U_f \cdot A_f} \quad (11)$$

Sehingga,

$$\frac{Q_c}{Q_f} = \frac{U_c \cdot A_c}{U_f \cdot A_f} \quad (12)$$

Luas permukaan perpindahan kalor sebelum terjadi *fouling* sama dengan luas permukaan perpindahan kalor setelah terjadi *fouling* ($A_c = A_f$), maka persamaan (12) dapat ditulis menjadi:

$$\frac{Q_c}{Q_f} = \frac{U_c}{U_f} \quad (13)$$

Dari persamaan (4),

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{U_c} + R_f$$

Maka persamaan (13) dapat ditulis menjadi:

$$\frac{Q_c}{Q_f} = U_c \cdot \left(\frac{1}{U_c} + R_f \right) \quad (14)$$

Atau,

$$\frac{Q_f}{Q_c} = \frac{1}{1 + U_c \cdot R_f} \quad (15)$$

Sehingga,

$$Q_f = \frac{Q_c}{1 + U_c \cdot R_f} \quad (16)$$

Wahid Nur Irianto ,perancangan alat penukar kalor menggunakan harga fouling fungsi waktu dan kondisi operasi beda temperatur Rata-rata konstan

Pada saat perancangan harus ditetapkan kapan waktu perawatan (*cleaning interval*) akan dilakukan. Misalnya *cleaning* akan dilakukan pada saat beban thermal (setelah terjadi *fouling*) tinggal 60 % dari kondisi awalnya , atau:

$$\frac{Q_f}{Q_c} = 0,6 \quad (17)$$

III. PROSEDUR DESAIN DENGAN FAKTOR *FOULING* FUNGSI WAKTU

Pada bagian ini akan diuraikan prinsip dasar perancangan alat penukar kalor apabila kondisi operasinya ditetapkan pada beda temperatur rata-rata konstan.

Dasar perhitungan desain dengan kondisi operasi beda temperatur rata-rata konstan adalah persamaan (15), yaitu:

$$\frac{Q_f}{Q_c} = \frac{1}{1 + U_c \cdot R_f}$$

Dalam hal ini, $\frac{Q_f}{Q_c}$ adalah gambaran beban termal alat penukar kalor setelah dioperasikan selama selang waktu tertentu (Q_f) dibandingkan dengan kondisi awalnya (Q_c). Sedangkan R_f adalah harga faktor *fouling* fungsi waktu yang diperoleh dari eksperimen pada fluida kerjanya, dan U_c adalah koefisien perpindahan panas menyeluruh alat pada kondisi *clean*.

Dengan menetapkan kondisi beban termal pada saat alat akan dilakukan *maintenance* untuk *cleaning* ($\frac{Q_f}{Q_c}$) dan dengan menetapkan *cleaning interval* yang diinginkan (t) yang terdapat pada persamaan faktor *fouling* fungsi waktu (R_f), maka akan diperoleh gambaran besarnya harga koefisien perpindahan panas menyeluruh pada kondisi *clean* (U_c).

Dimensi alat penukar kalor yang dirancang dapat diperoleh melalui persamaan (2), yaitu:

$$A_c = \frac{Q_c}{U_c \cdot \Delta T_{lm,c}} \quad (18)$$

Beda temperatur rata-rata logaritmik pada kondisi *clean* dapat diperoleh melalui persamaan :

$$\Delta T_{lm,c} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (19)$$

dengan,

$$\Delta T_1 = T_{hi} - T_{co} \quad (20)$$

$$\Delta T_2 = T_{ho} - T_{ci} \quad (21)$$

T_{hi} = Temperatur fluida panas masuk alat.

T_{ho} = Temperatur fluida panas keluar alat.

T_{ci} = Temperatur fluida dingin masuk alat.

T_{co} = Temperatur fluida dingin keluar alat.

Hubungan luas perpindahan panas (A_c) dengan jumlah pipa dalam alat penukar kalor adalah:

$$A_c = \pi \cdot d_o \cdot L \cdot N_i \quad (22)$$

dengan,

d_o = diameter luar pipa.

L = panjang pipa.

N_i = jumlah pipa.

Sebagai contoh, akan dilakukan perancangan ulang terhadap alat penukar kalor yang telah diuji, dengan kondisi:

a. Faktor *Fouling*nya adalah,

Wahid Nur Irianto ,perancangan alat penukar kalor menggunakan harga fouling fungsi waktu dan kondisi operasi beda temperatur Rata-rata konstan

$$R_f = R_f^* (1 - e^{(-t/t_c)})$$

dengan,

$$R_f^* = 0,00066 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$t_c = 11$ minggu (2,7 bulan).

- b. *Cleaning interval* dipilih sebesar 6 bulan ($t = 6$ bulan). Dalam hal ini, alat penukar kalor akan dilakukan *maintenance* setelah dioperasikan selama 6 bulan.
- c. Pada saat alat penukar kalorkan dilakukan *maintenance /cleaning*, yaitu setelah beroperasi selama 6 bulan, kondisi termalnya juga ditetapkan, yaitu beban termal atau efektifitas perpindahan panasnya telah turun 40 % atau tinggal tinggal 60 %.
- d. Temperatur fluida yang direncanakan, $T_{ci} = 38 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{co} = 44 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{hi} = 62 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ho} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$.
- e. Ukuran pipa yang dipilih adalah, $d_o = 0,013 \text{ m}$, $L = 3,556 \text{ m}$.
- f. Alat penukar kalor dipilih tipe *shell and tube, one pass shell two pass tube*.
- g. Beban termal yang direncanakan, $Q = 506 \text{ 900 W}$

3.1. Perhitungan Desain

a.

Perhitungan

faktor *Fouling*.

Harga faktor *Fouling* dapat diperoleh melalui persamaan (1), yaitu:

$$R_f = R_f^* (1 - e^{(-t/t_c)})$$

dengan,

$$R_f^* = 0,00066 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$t_c = 11$ minggu (2,7 bulan).

Harga *cleaning interval* dipilih selama 6 bulan ($t = 6$ bulan = 24 minggu). Maka besarnya faktor *fouling* adalah:

$$\begin{aligned} R_f &= R_f^* (1 - e^{(-t/t_c)}) \\ &= 0,00066 \cdot (1 - e^{(-24/11)}) \text{ m}^2 \text{ K/W} \\ &= 0,00066 \cdot 0,88716 = 0,000586 \text{ m}^2 \text{ K/W} \end{aligned}$$

b.

Perhitungan

koefisien perpindahan panas menyeluruh.

Koefisien perpindahan panas menyeluruh (U_c) dapat dihitung menggunakan persamaan (15), yaitu:

$$\frac{Q_f}{Q_c} = \frac{1}{1 + U_c \cdot R_f}$$

Sesuai dengan kriteria desain, yaitu akan dilakukan *cleaning* setelah alat beroperasi selama 6 bulan, dan kondisi beban termalnya tinggal 60 %, maka harga $\frac{Q_f}{Q_c} = 60 \% = 0,6$.

Dengan menggunakan harga $\frac{Q_f}{Q_c} = 0,6$ dan $R_f = 0,000586 \text{ m}^2 \text{ K/W}$, maka dari persamaan (15) di atas diperoleh,

$$0,6 = \frac{1}{1 + U_c \cdot 0,000586 \text{ m}^2 \text{ K/W}}$$

Dan hasilnya,

$$U_c = 1137,6564 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

c.

Perhitungan

dimensi alat penukar kalor.

Dimensi alat penukar kalor, yaitu luas permukaan perpindahan panas (A_c) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (18), yaitu:

$$A_c = \frac{Q_c}{U_c \cdot \Delta T_{lm,c}}$$

dengan,

Q_c = beban termal yang sesuai dengan spesifikasi desain = 506 900 W

U_c = koefisien perpindahan panas menyeluruh = 1137,6564 W/m² K

$\Delta T_{lm,c}$ = beda temperatur rata-rata logaritmik pada kondisi belum ada *fouling*..

Beda temperatur rata-rata logaritmik pada kondisi *clean* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (19), yaitu:

$$\Delta T_{lmc} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(T_{hi}-T_{co}) - (T_{ho}-T_{ci})}{\ln\left(\frac{T_{hi}-T_{co}}{T_{ho}-T_{ci}}\right)}$$

Sesuai data desain, yaitu:

$$T_{ci} = 38 \text{ } ^\circ\text{C} = 311 \text{ K}$$

$$T_{co} = 44 \text{ } ^\circ\text{C} = 317 \text{ K}$$

$$T_{hi} = 62 \text{ } ^\circ\text{C} = 335 \text{ K}$$

$$T_{ho} = 50 \text{ } ^\circ\text{C} = 323 \text{ K}$$

Maka,

$$\Delta T_{lmc} = \frac{(335-317)\text{K} - (323-311)\text{K}}{\ln\left(\frac{335-317}{323-311}\right)} = 14,7978\text{K}$$

Jadi, luas permukaan perpindahan panas:

$$A_c = \frac{506\,900 \text{ W}}{1137,6564 \text{ W/m}^2 \text{ K} \cdot 14,7978 \text{ K}} = 30,1102 \text{ m}^2$$

Dan jumlah pipa dapat dihitung melalui persamaan (22), yaitu:

$$A_c = \pi \cdot d_o \cdot L \cdot N_t$$

Sehingga,

$$30,1102\text{m}^2 = \pi \cdot 0,013 \text{ m} \cdot 3,556 \text{ m} \cdot N_t$$

Maka,

$$N_t = 207,3$$

Dibulatkan, $N_t = 208$. batang.

Wahid Nur Irianto ,perancangan alat penukar kalor menggunakan harga fouling fungsi waktu dan kondisi operasi beda temperatur Rata-rata konstan

Apabila perhitungan dengan cara yang sama dilakukan untuk harga *cleaning interval* = 9 bulan dan 12 bulan serta batasan beban termal saat *cleaning*, $\frac{Q_f}{Q_c} = 0,7 ; 0,8 \text{ dan } 0,9$, maka hasilnya dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Perkiraan dimensi utama *oil cooler* (N_t) untuk harga t dan Q_f/Q_c yang berbeda-beda.

NO.	t (bln.)	Q_f/Q_c	$R_f (m^2K/W)$	$U_c (W/m^2K)$	$Q_c(W)$	$N_t(\text{tube})$
1	6	0,6	0,000586	1137,6564	506900	208
2	6	0,7	0,000586	731,3506	506900	322
3	6	0,8	0,000586	426,6212	506900	552
4	6	0,9	0,000586	189,6094	506900	1244
5	9	0,6	0,000635	1049,8688	506900	224
6	9	0,7	0,000635	674,9156	506900	350
7	9	0,8	0,000635	393,7008	506900	600
8	9	0,9	0,000635	174,9781	506900	1348
9	12	0,6	0,000652	1022,4949	506900	230
10	12	0,7	0,000652	657,3181	506900	358
11	12	0,8	0,000652	383,4356	506900	616
12	12	0,9	0,000652	170,4158	506900	1384

Dari hasil perhitungan tersebut (tabel 1), dapat dijelaskan beberapa hal sebagai berikut:

1. Apabila alat penukar kalor tersebut didesain dengan *cleaning interval* yang sama, misalnya 6 bulan, maka dimensi alat (jumlah *tube*) akan semakin besar bila batasan beban termal saat *cleaning* ($\frac{Q_f}{Q_c}$) yang ditetapkan semakin tinggi. Hal tersebut berlaku juga bagi desain dengan *cleaning interval* 9 bulan dan 12 bulan. Dengan jumlah pipa yang semakin banyak, maka biaya pembuatan (*initial cost*) juga akan semakin tinggi.
2. Untuk nilai ($\frac{Q_f}{Q_c}$) tertentu (misal = 0,6), maka dimensi alat (jumlah *tube*) akan semakin besar bila waktu *cleaning interval* semakin lama.
3. Dari ke-12 hasil perhitungan desain alat penukar kalor tersebut di atas, bila dipilih alat penukar kalor dengan waktu *cleaning interval* 12 bulan dan kondisi beban termal tinggal 70%, maka jumlah pipanya = 358..

Hasil desain tersebut dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Desain alat penukar kalor dengan harga faktor *Fouling* fungsi waktu, *cleaning interval* 12 bulan dan kondisi beban termal tinggal 70%.

No	Parameter	Nilai
1.	Dimensi alat penukar <i>kalor</i> (A)	67,096m ²
2.	Jumlah <i>tube</i> (N_t)	358Tube
3.	Jumlah <i>tube/phases</i>	179Tube
4	Koef. perpindahan panas menyeluruh clean (U_c)	657,3181 W/m ² K
5.	Diameter luar <i>tube</i> (d_o)	0,013 m
6.	Diameter dalam <i>tube</i> (d_i)	0,0106 m
7.	Faktor <i>fouling</i> asymptot (R_f^*)	0,00066 m ² K/W
8	Beda temperatur rata-rata logaritmik (ΔT_{lmc})	14,7978K
9	Beban termal (Q)	506900 W

Wahid Nur Irianto ,perancangan alat penukar kalor menggunakan harga fouling fungsi waktu dan kondisi operasi beda temperatur Rata-rata konstan

10	Panjang tube (L)	3,556 m
11	Jumlah baffle	13

IV. KESIMPULAN

Pemilihan harga faktor *fouling* pada saat perancangan alat penukar kalor, selain berdasarkan standart dari TEMA, dapat juga dipilih faktor *fouling* sebagai fungsi waktu sesuai dengan fluida kerjanya.

Pada perancangan dengan faktor *fouling* fungsi waktu, harus ditentukan bahwa alat akan dioperasikan pada kondisi beban termal konstan atau beda temperatur rata-rata konstan.

Bila alat akan dioperasikan pada kondisi beda temperatur rata-rata konstan, maka harus ditetapkan kapan waktu perawatan (*cleaning interval*) akan dilakukan dan kondisi beban termalnya. Misalnya *cleaning* akan dilakukan setelah alat beroperasi selama 12 bulan dan beban thermal (setelah terjadi *fouling*) tinggal 70 % dari kondisi awalnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Chandrasa Soekardi. 2002. Implikasi Perancangan Sebuah Penukar Kalor Dengan Faktor Pengotoran Fungsi Waktu Terhadap Kinerjanya Pada Kondisi Operasi Beban Termal Konstan. POROS. Vol. 5 No. 2: 129 – 137.
- Frank Kreith & William A. Black. 1980, *Basic Heat Transfer*, Harper and Row, New York.
- Sadik Kakac & Hongtan Liu. 2002. *Heat Exchanger, Selection, Rating and Thermal Design*, CRC Press, Boca Raton.
- Wahid Nur Irianto, 2012, Prediksi Pembentukan *Fouling* Pada Alat penukar Kalor, Jurnal STT Yuppentek, Vol. 8: 136 – 143.
- Yogi S. Gaos & Chandra D. Widiawati. 2008. Reverse Engineering Oil Cooler PLTU Bukit Asam. Heat Exchanger. Vol. 1 No. 1: 1 - 8.