

# ANALISIS SCALING KETEL UAP PIPA API DI INDUSTRI TEKSTILCIREBON

JURNAL TEKNIK MESIN

Oleh

W. Djoko Yudisworo  
[yudisworjoko@yahoo.co.id](mailto:yudisworjoko@yahoo.co.id).TM-Untag.Crb

## ABSTRAK

Penelitian terhadap unjuk kerja Ketel uap (*Boiler steam*) Pipa Api di sebuah Industri Jaring berawal dari permasalahan timbulnya *cleaning interval* yang berlangsung setiap dua kali dalam setahun. Penelitian diawali dengan pencatatan data operasional instalasi ketel uap terpasang di Industri jaring selama enam bulan. Melalui analisa perhitungan didapatkan adanya penurunan panas yang diterima oleh fluida dingin sebesar 0,881 kW sampai pada 0,995 kW pada akhir pengujian 1704 jam. Selain itu deposit pertumbuhan kerak (*fouling*) yang terjadi pada 1176 jam dengan harga faktor pengotor 0.0000712 m<sup>2</sup>.K/W. Penurunan kinerja pada ketel uap dapat berimplikasi pada proses produksi maupun pada peningkatan biaya produksi. Penurunan ketel uap biasanya ditandai dengan tingginya suhu cerobong dan penurunan perpindahan panas yang akan diterima oleh fluida air di dalam pipa/ *tube*. Indikasi lain adalah penurunan efektifitas ketel uap pipa api. Dengan mempelajari faktor-faktor yang berpengaruh terhadap unjuk kerja ketel uap ini salah satunya dengan mengetahui interval *cleaning* yang di sebabkan oleh faktor pengotor (*Fouling*). Dengan memperpanjang masa *interval cleaning* sehingga akan menghemat biaya produksi dan proses produksi akan berlangsung dengan baik.

Kata kunci : Ketel Uap Pipa Api, Faktor

Pengotor, *Interval Cleaning*

### 1. Pendahuluan

Penelitian ini dilakukan dari masalah industri, sehingga termotivasi untuk di cari solusi . yaitu masalah yang dihadapi oleh instalasi industri pembuatan jaring, khususnya pada alat ketel uap pipa api. Permasalahan utama yang dihadapi oleh instalasi ketel uap tersebut adalah lebih sering mengalami *maintenance* untuk *cleaning* daripada seharusnya. Menurut spesifikasi alat tersebut seharusnya *cleaning* dilakukan satu kali setahun. Namun dalam praktik

pengoperasiannya *cleaning* rata rata dilakukan dua kali setahun.

Hal tersebut tentunya menyebabkan biaya *maintenance* alat tersebut menjadi tinggi sekali, yaitu dua kali lipat dari semestinya.

Pada saat yang bersamaan, seringnya *maintenance* mengakibatkan proses produksi yang terganggu sehingga berdampak kerugian yang lebih besar.

Latar belakang Permasalahan yang di hadapi didalam ketel uap pipa ini adalah sebagai berikut :

1. Unjuk kerja ketel uap ini cepat turun
2. Dengan turun unjuk kerja ketel inilah mengakibatkan terganggunya proses produksi.

Dengan permasalahan diatas sehingga perlu diteliti bila tidak ditanggulangi permasalahan di atas akan menimbulkan dampak dampak sebagai berikut :

1. Biaya operasional tinggi
2. Biaya perawatan yang besar (*Cost maintenance*) yang besar.

Faktor yang menyebabkan masalah tersebut diantaranya adalah tingkat operasional faktor yang berkaitan dengan instalasi operasi ketel uap pipa api seperti air isian ketel dan bahan bakar.

Batasan Penelitian Penelitian ini akan dilakukan dengan tahapan sebagai berikut :

- a. Pada tahap pertama akan dilakukan pengukuran, selama jangka waktu pengoperasian tertentu setelah alat mengalami *maintenance* untuk *cleaning*, tingkat keadaan aliran kedua fluida kerja yang mengalir didalam alat ketel uap pipa api yaitu temperatur masuk dan keluar alat tersebut serta laju alirannya. Data-data yang diperoleh akan dipergunakan untuk melakukan evaluasi tingkat kinerja alat tersebut selama kurun waktu tertentu, sehingga dapat dipelajari mengapa alat tersebut harus mengalami *cleaning* rata-rata dua kali pertahun.
- b. Pada tahap kedua, data-data pengukuran yang diperoleh akan dipergunakan melakukan evaluasi kinerja ketel uap pipa api setelah di operasikan dalam jangka waktu tertentu. Parameter-parameter *performance* yang dievaluasi meliputi: laju aliran panas yang dilepas oleh aliran gas panas, laju aliran panas yang di terima oleh aliran air, efektifitas perpindahan panas, koefisien perpindahan panas global, dan tahanan termal pengotoran permukaan. manfaat yang diperoleh adalah dapat dilakukan perbandingan kondisi pengoperasian alat yang menjadi objek studi terhadap kondisi awalnya. Selain itu, data hasil

rangkaiian pengukuran yang diperoleh tersebut akan bermanfaat sebagai masukan data, terutama data faktor pengotorannya.

- c. Ketiga, akan dilakukan input data pengoperasian ketel uap kaitannya dengan penurunan kinerja ketel uap yang disebabkan oleh *fouling*, sehingga diharapkan data tersebut akan menjadi bermanfaat kaitannya dengan operasian dan perawatan instalasi ketel uap.

## 2. Teori Penunjang

*Boiler* adalah suatu kombinasi antara sistem peralatan yang dipakai untuk terjadinya perpindahan panas radiasi dan *konveksi* energi termal gas gas hasil pembakaran ke fluida kerja yaitu air.

besarnya laju perpindahan energi panas pada saat kondisi awal atau saat bersih atau setelah dilakukan *maintenance* (tidak ada faktor pengotor) dan seberapa besar efektifitasnya, berapa besar laju perpindahan panas pada saat tertentu atau pada interval waktu tertentu sebagai akibat dari pengaruh faktor pengotor (*fouling factor*) dan berapa besar efektifitasnya, sehingga dengan data tadi dapat di jadikan dasar untuk memprediksi waktu kapan terjadi efektifitas ketel uap yang minimum, *interval* waktu inilah yang akan di jadikan acuan untuk di jadikan patokan waktu, kapan di lakukan *maintenance* ketel uap . dengan adanya interval waktu itu, di harapkan bisa di *schedule* - kan untuk *maintenance* ketel uap dengan tidak mengganggu kegiatan produksi.

## 3. Dimensi Dasar Perhitungan Alat Penukar Kalor

### 3.1. Dimensi Utama Alat Penukar Kalor

Dimensi utama alat penukar kalor atau jumlah *tubes* yang diperlukan dapat diestimasi melalui besarnya luas permukaan perpindahan panas yang harus tersedia di dalam APK. Besarnya parameter tersebut tergantung kepada :

- Beban termal atau laju pertukaran energi panas di dalam APK.
- Beda temperatur rata-rata di antara kedua fluida yang mengalir di dalam APK
- Koefisien perpindahan panas global atau menyeluruh di dalam APK.

Hubungan fungsional diantara ketiga parameter tersebut di atas dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$Q = U \cdot A_{total} \cdot LMTD \quad [1]$$

$$A_{total} = \pi d_o \cdot L \cdot N \quad [2]$$

### 3.2. Beban Termal atau Laju Pertukaran Energi Panas didalam APK

Beban termal atau laju perpindahan energi panas didalam alat penukar kalor , apabila APK dianggap adiabatik, besarnya sama dengan laju energi panas yang dilepaskan oleh aliran fluida panas,  $Q_h$  atau sama dengan laju energi panas yang diterima oleh aliran fluida pendingin  $Q_c$  yang mana ;

$$Q_h = m_h C_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) \quad [3]$$

### 3.3. Koefisien Global Perpindahan Panas di dalam APK

Koefisien global perpindahan panas bagi kedua aliran fluida di dalam alat penukar kalor, U dapat diestimasi menggunakan persamaan :

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{UA_1} = \frac{1}{UA_o} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln(d_o/d_1)}{2\pi kLN} + \frac{1}{h_o A_o} + \frac{R_{f1}}{A_1} + \frac{R_{fo}}{A_o} \quad [4]$$

Di sini A adalah luas permukaan *reference* , harganya dapat dipilih sama dengan  $A_1$  atau  $A_o$  . Pada umumnya A didasarkan pada luas permukaan luar pipa,  $A_o$  sehingga ;

$$\frac{1}{UA_o} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln(d_o/d_1)}{2\pi kLN} + \frac{1}{h_o A_o} + \frac{R_{f1}}{A_1} + \frac{R_{fo}}{A_o} \quad [5]$$

atau

$$\frac{1}{U} = \frac{A_o}{h_1 A_1} + \frac{A_o \ln(d_o/d_1)}{2\pi kLN} + \frac{1}{h_o} + \frac{A_o R_{f1}}{A_1} + R_{fo} \quad [6]$$

### 3.4. Koefisien Perpindahan Panas Konveksi Aliran Fluida di Luar Pipa

Koefisien perpindahan panas fluida yang mengalir dipermukaan luar pipa,  $h_o$  dapat diestimasi besarnya melalui persamaan laju perpindahan panas konveksi antara aliran fluida dengan permukaan luar pipa :

$$Q_o = h_o \cdot A_o (T_h - T_{wo}) \quad [7]$$

Pada persamaan di atas  $T_{wo}$  dapat dievaluasi dengan menggunakan persamaan laju perpindahan panas konduksi secara radial dari permukaan luar pipa ke permukaan dalam pipa:

$$Q_k = \frac{2\pi kLN}{\ln(d_o/d_1)} (T_{wo} - T_{wi}) \quad [8]$$

Sementara itu,  $T_{wi}$  dapat diperoleh dari persamaan laju perpindahan panas konveksi antara permukaan dalam pipa dengan aliran fluida di dalam pipa :

$$Q_i = h_i \cdot A_i (T_{wi} - T_o) \quad [9]$$

### 3.5. Tahanan Termal Pengotoran Permukaan Perpindahan Panas didalam APK

Setelah beberapa lama APK dioperasikan maka akan terbentuk lapisan pengotoran atau fouling pada permukaan perpindahan panasnya. Deposit yang terbentuk umumnya mempunyai konduktivitas termal yang cukup rendah sehingga akan menyebabkan turunnya laju pertukaran energi panas didalam APK. Pengotoran pada alat penukar kalor adalah suatu lapisan deposit yang terbentuk pada permukaan alat penukar kalor yang bersentuhan dengan fluida, faktor pengotor tersebut adalah partikel-partikel asing yang terbawa oleh aliran fluida, kemudian partikel-partikel tersebut tersangkut/ menempel pada permukaan alat penukar kalor yang bersentuhan dengan fluida, kemudian pada interval waktu tertentu akan terbentuk suatu lapisan pada permukaan tersebut. Laju pertumbuhan deposit dapat di nyatakan dalam persamaan berikut :

$$\frac{dmd}{dt} = \phi_d - \phi_r \quad [10]$$

yang mana

$$\phi_d = hm - (C_{pc} - C_{pw}) \phi_r \quad [11]$$

$$\phi_r = \frac{m_d}{d_t} \cdot \phi_r \quad [12]$$

#### 4. Hasil Analisa Penelitian

##### 4.1. Perhitungan Kalor Dilepas Aliran Gas

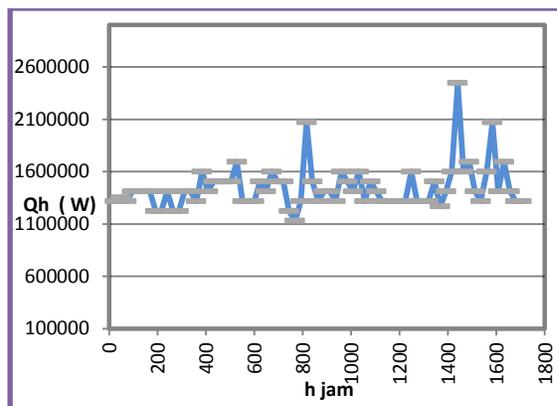
Besar kalor yang dilepas aliran gas dapat dievaluasi dengan persamaan yaitu:

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

Tabel 4.1. Kalor yang dilepas aliran gas

No	Waktu (h) jam	T <sub>hi</sub> gas (°C)	T <sub>ho</sub> gas (°C)	m gas kg/s	Q <sub>h</sub> kW
1	0	350	230	1.6	1317.3
2	24	345	230	1.7	1352.5
3	48	351	230	1.6	1317.3
4	72	350	230	1.7	1411.4
5	96	351	230	1.7	1411.4
6	120	350	230	1.7	1411.4
10	216	350.5	231	1.7	1411.4
30	696	350	230	1.6	1505.4
40	936	350	230	1.6	1599.6
50	1176	350	230	1.6	1317.2
71	1680	350	273	1.6	1317.2

##### 4.2. Karakteristik Kalor dilepas oleh aliran gas



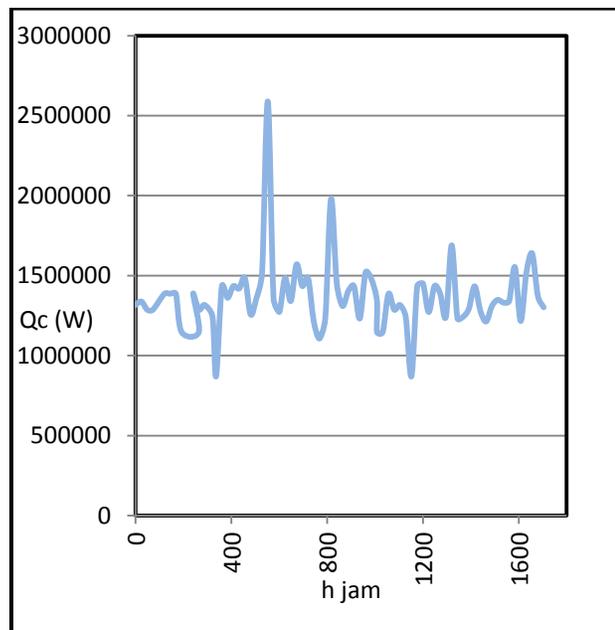
Perhitungan Kalor Diterima Aliran Air Dengan kalor yang diterima aliran air dapat dievaluasi dengan persamaan yaitu:

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

Tabel 4.2. Kalor yang diterima fluida air

No	Waktu h (jam)	T <sub>ci</sub> air (°C)	T <sub>co</sub> air (°C)	m air kg/s	Q <sub>c</sub> kW
1	0	85	174	3.5	1316.4
2	24	91	175	3.8	1316.4
3	48	87	174	3.5	1286.8
4	72	87	174	3.5	1286.8
5	120	91	175	3.8	1385.8
10	240	87	174	3.8	1385.8
20	480	90	175	3.5	1257.2
30	720	85	174	4.1	1484.8
40	960	85	174	4.1	1518.9
50	1176	85	174	3.8	1433.6
60	1416	85	174	4.1	1433.6
72	1704	85	174	3.5	1301.6

##### 4.3. Karakteristik kalor yang diterima aliran fluida air



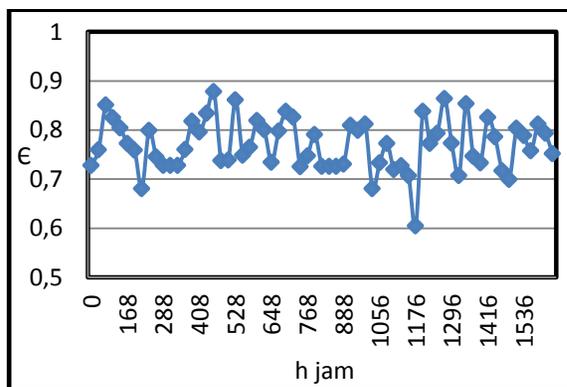
4.4. Efektifitas Ketel Uap Pipa Api  
Efektifitas ketel uap dapat dievaluasi dengan menggunakan persamaan yaitu:

$$\epsilon = \frac{Q_{act}}{Q_{mac}}$$

Tabel 4.4 efektifitas perpindahan panas

No	h	Qc aktual kW	Qmaks kW	ε
1	0	1316.8	18099.6	0.72
2	24	1374.7	18099.6	0.75
3	48	1540.1	18099.6	0.85
5	120	1492.7	18099.6	0.82
10	240	1445.6	18099.6	0.79
20	480	1334.3	18099.6	0.73
25	600	1482.8	18099.6	0.81
50	1176	1316.2	18099.6	0.72
60	1416	1350.8	18099.6	0.74
71	1680	1360.7	18099.6	0.75

#### 4.5. Grafik Efektifitas



#### 4.6. Perhitungan Tahanan Thermal Fouling

Perhitungan ini bertujuan untuk mendapatkan tahanan thermal fouling (  $R_f$  ) dari persamaan sebagai berikut :

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

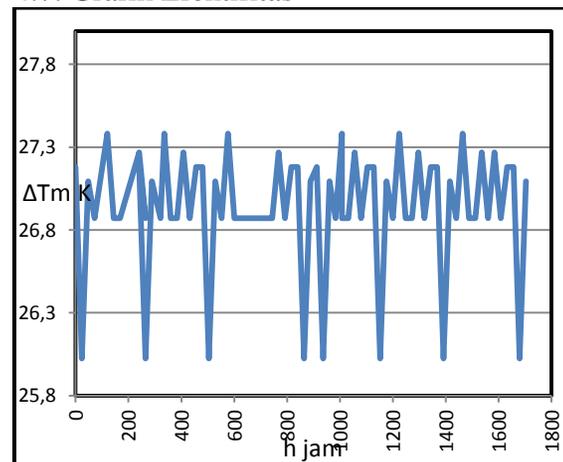
Beda temperatur rata – rata logaritmik kedua fluida pada ketel uap pipa api dapat dievaluasi menggunakan persamaan yaitu ;

$$\Delta T_{im} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

Tabel 4.16 .Perhitungan beda Temperatur rata – rata logaritmik

No	h	T <sub>hi</sub> gas (°C)	T <sub>ho</sub> gas (°C)	T <sub>in</sub> air (°C)	T <sub>out</sub> air (°C)	ΔT <sub>im</sub> (K)
1	0	352	230	85	174	27.1
2	24	345	230	91	174	26.0
3	48	351	230	87	174	27.0
4	72	350	230	87	174	26.8
5	120	351	230	91	174	27.3
10	240	350.5	230	87	174	27.1
20	456	350	230	87	174	27.1
30	600	350	232	88	174	26.8
40	960	350	233	85	174	27.0
50	1176	350	233	85	174	27.0
60	1416	350	233	85	174	27.0
71	1680	350	234	85	174	26.0

#### 4.7. Grafik Efektifitas



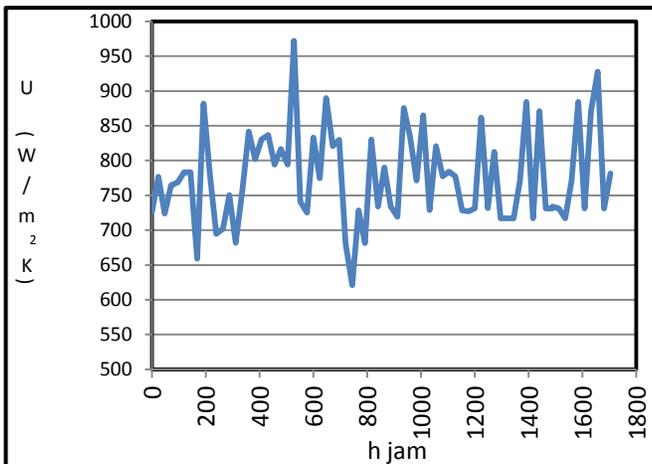
Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh

Koefisien perpindahan panas menyeluruh (U) dari ketel uap pipa api dapat dievaluasi dengan menggunakan persamaan yaitu :  $U = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_{im}}$

Tabel 4.8. Koefisien Perpindahan Panas Global (U)

No	h	Qc (kW)	Q (kW)	$\Delta T_{im}$ (K)	U (W/m <sup>2</sup> K)
1	0	1316.4	1975.5	27.1	726.8
2	24	1338.0	2021.5	26.0	776.7
3	48	1286.8	1960.7	27.0	723.6
7	144	1385.8	2104.3	26.8	783.1
8	168	1146.9	1796.7	27.2	658.8
9	192	1146.9	2370.1	26.8	882.0
10	216	1385.8	2104.3	26.9	779.9
20	456	1257.2	2134.1	26.8	794.2
30	696	1484.8	2247.9	27.0	830.0
40	936	1518.9	2359.1	26.9	875.6
50	1176	1242.5	1938.5	26.6	726.9
70	1632	1518.9	2359.0	27.0	871.0
71	1656	1638.4	2512.9	27.0	927.8
70	1632	1518.9	2359.0	27.0	871.0

Tabel 4.8. Grafik Perpindahan Panas menyeluruh



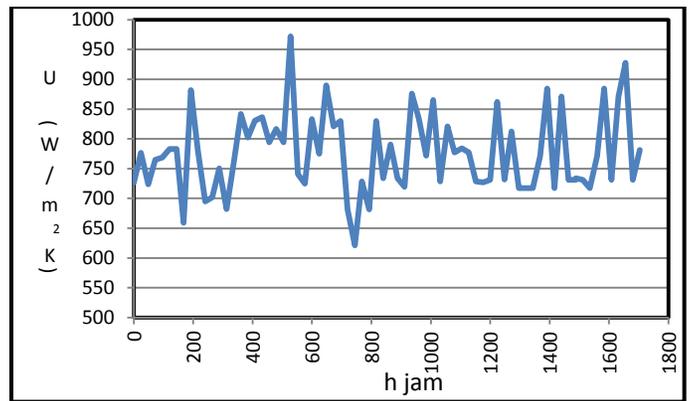
4.9. Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh

Koefisien perpindahan panas menyeluruh (U) dari ketel uap pipa api dapat dievaluasi dengan menggunakan persamaan yaitu :

$$U = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_{im}}$$

$$U = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_{im}} = \frac{1316899.449}{100 \cdot 27.179}$$

$$= 726.8535932W$$



Gambar 4.9 . Karakteristik koefisien

perpindahan panas global (U) di ketel uap pipa api

4.10. Perhitungan Faktor Pengotoran

Tahanan thermal fouling terjadi karena adanya deposit lapisan pengotoran pada permukaan bidang pertukaran kalor. Pembentukan deposit faktor pengotoran selama pengoperasian ketel

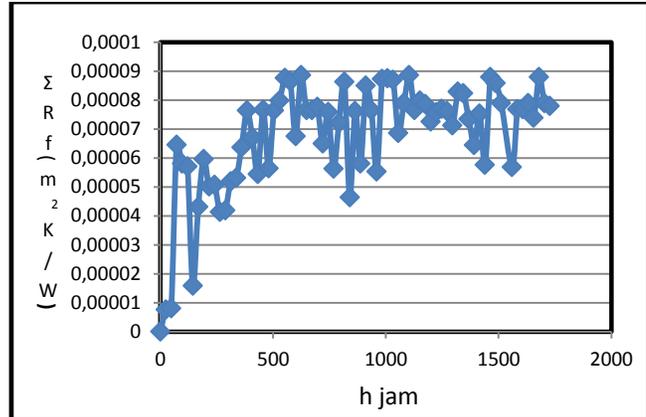
uap pipa api dapat di evaluasi dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{U_{clean}} + \Sigma R_f$$

$$R_f = \frac{1}{726.8539} - \frac{1}{726.85394} = 0 \text{ m}^2 \text{ k/W}$$

Tabel 4.10. Harga faktor pengotoran

No	Waktu h jam	U W /m <sup>2</sup> K	ΣR <sub>f</sub> (m <sup>2</sup> .K/W)
1	0	726.85	0
2	24	776.78	1.34E-05
3	48	723.69	1.60E-06
4	72	764.73	1.68E-05
9	192	801.89	1.34E-05
10	216	779.90	2.94E-05
20	456	794.23	0.00006876
30	696	830.00	6.74E-05
40	936	833.99	0.00007634
50	1176	726.92	7.70E-05
60	1416	569.83	0.000170365
70	1632	569.83	0.000170365
71	1656	829.58	0.000017914
72	1680	748.27	0.000017791
73	1704	748.27	0.000077914



Gambar 4.11. Karakteristik pembentukan

deposit faktor pengotor pada ketel uap pipa api

Jika karakteristik faktor pengotor tersebut, massa jenis dan konduktifitas termalnya dianggap relatif konstan maka faktor pengotor terhadap waktu dapat didekati dengan fungsi *asymptot*, seperti pada persamaan yaitu :

$$\Sigma R_f = R^*_f \left( 1 - e^{-\frac{t}{tc}} \right)$$

$R^*_f$  = Tahanan termal *asymptot*

t = Waktu pengoperasian ketel uap pipa api

$tc$  = Waktu pembentukan faktor pengotor (*fouling*) atau kontanta waktu

harga  $R^*_f$  dan  $tc$  adalah konstanta yang harus ditentukan, ini ditentukan berdasarkan terbentuknya faktor pengotor terhadap waktu yaitu dari data hasil pengujian pada tabel 4.20. dengan mengambil data dari 2 titik untuk *trial and error* sehingga diperoleh harga konstanta yang membentuk kurva yang mendekati dengan kurva hasil pengujian, 2 titik yang paling mendekati hasilnya yaitu pada :

1) Pengukuran kewaktu = 1056 jam di peroleh  $\Sigma R_f = 0.000076 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)}$

2) Pengukuran kewaktu = 1176 jam di peroleh  $\Sigma R_f = 0.000077 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)}$

Sehingga diperoleh 2 persamaan :

$$0.000076 = R^*_f \left( 1 - e^{-\frac{1056}{tc}} \right)$$

$$0.000077 = R^*_f \left( 1 - e^{-\frac{1176}{tc}} \right)$$

Dengan menggunakan *software MathCad* harga kedua kontanta tersebut diperoleh

$$R^*_f = 0.000071$$

$$t_c = 1056$$

sehingga fungsi asymptot menjadi :

$$\Sigma Rf = 0.000071(1 - e^{-\frac{tc}{1056}})$$

Dengan fungsi *asymptot* tersebut , pertumbuhan faktor pengotor dianalisa pada setiap titik pengujian atau pengukuran yaitu pada pengukuran ke - 1 yaitu waktu = 0 jam

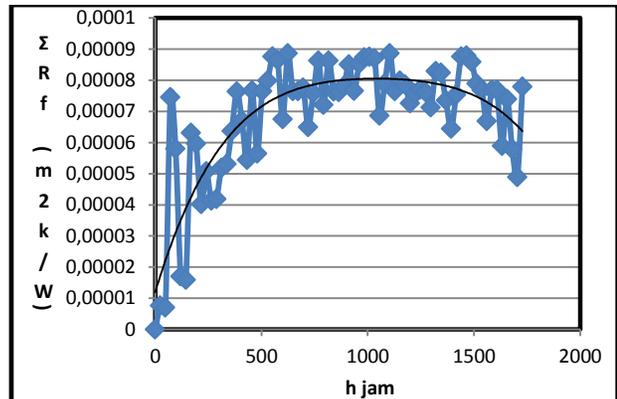
$$\Sigma Rf = 0.000071(1 - e^{-\frac{0}{1056}})$$

$$\Sigma Rf = 0$$

Pada pengukuran ke -2 yaitu waktu = 24 jam

$$\Sigma Rf = 0.000071(1 - e^{-\frac{48}{1056}})$$

$$\Sigma Rf = 0.0000782 \text{ (m}^2\text{.K/W)}$$



Gambar 412. Karakteristik hasil pendekatan *asymptotic* untuk faktor pengotor di ketel uap pipa api

Kurva karakteristik faktor pengotor (*fouling*) aktual hasil pengujian selama 6 bulan dengan kurva karakteristik faktor pengotor (*fouling*) yang membentuk kurva asimtotis (gambar 4.24) terlihat tahanan termal akibat faktor pengotor ( $\Sigma Rf$ ) pada akhir waktu mulai 1176 jam atau lebih dari harga itu kurva pada grafik berbentuk asimtotis ,artinya harga tahanan termal mulai konstan .Hal ini yang menyebabkan mengapa pada prakteknya harus *maintenance* selama 6 bulan sekali.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Nag. pk,2002.power plant engineering , second edition, international edition. Mc Graw Hill, Singapore.
2. Cengel A. Yunus & Boles.A. Michael, 2007.Thermodynamics, An Engineering Approach Sixth Edition (SI Units), Mc Graw Hill, Singapore,
3. Kreith Frank & Black. Z. William,2003. Basic Heat Transfer, Harper & Row, Publisher, New York.
4. Wilcox & Babcox, 1999 .Steam /its generation and use, 161 east42 nd street, New York
5. Sadik Kakac & Hongtan Liu.2002.Heat Exchangers, selection, rating and termal design, second edition,
6. Soekardi Chandrassa, Prediksi Karakteristik Termal Sebuah Penukar Kalor Dampak Pemilihan Faktor Pengotoran Yang Konstan , Poros, Jakarta, Volume 4 ,Nomor 2, April 2001.
7. Boiler Steam ,melalui <<http://www.engineeringtoolbox.com> diundu 10/23/2010 *Specific heat capacity*
8. Jurnal Boiler Vol. 5 No. 1, Analisa performance ketel uap ,Traksi, Undip, Semarang Juni 2007.
9. Potter,Meriie C,& Wiggert, David C,2002,Mechanics of Fluids, USA, BROOKS/ COLE
10. El-Wakil ,M.M,1985,Power Plant Teechnology,Singapore,McGraw –Hill Book CO