



BAB IX

URAIAN TUGAS KHUSUS

IX.1 *Furnace*

Furnace adalah suatu ruangan yang digunakan sebagai tempat pembakaran yang dilengkapi alat-alat pembakaran, seperti *burner* atau *stoker*. *Burner* adalah perlengkapan yang digunakan untuk melangsungkan pembakaran bahan bakar berupa gas dan cair, sedangkan yang digunakan sebagai bahan bakar padat disebut *stoker*. *Furnace* terdiri dari daerah radiasi dan daerah konveksi. Pada daerah radiasi tube umpan terkena radiasi panas dari pembakaran secara langsung dan pantulandari dinding *furnace*, sedangkan pada daerah konveksi umpan panas terkena panas secara konveksi dari panas yang melewati sekat dari tube umpan yang lain:

1) Tipe *Furnace*

a) Tipe *Furnace* Berdasarkan Konstruksinya

Berdasarkan konstruksinya *furnace* dibedakan menjadi 3 macam yakni :

1. *Furnace* tipe silinder

Tipe ini berbentuk silinder tegak, tube pada daerah radiasi dipasang secara vertical. Tube yang satu dengan yang lainnya disambung dengan menggunakan *U bend*. Burner terletak pada lantai bagian bawah, sehingga nyala api sejajar dengan tube dapur.

2. *Furnace* tipe box

Tipe ini mempunyai bentuk kotak atau box, daerah radiasi dan konveksi dipisahkan oleh *great wall*. Dapur ini digunakan untuk kapasitas besar. Tube - tube dapur dipasang pada bagian atap, lantai dan sisi dari "bridge dapur", burner dipasang secara horizontal pada dinding *furnace*.

3. *Furnace* tipe kabin

Tipe kabin ini mempunyai kamar terdiri dari daerah radiasi dan konveksi. Tube-tube dipasang secara horizontal sedangkan burner

terletak pada lantai *furnace*, sehingga nyala api sejajar dengan dinding *furnace*.

b) Tipe *Furnace* Berdasarkan Draft Tekanan

Berdasarkan pengaturan tekanan dalam *furnace*, *furnace* dapat dibedakan menjadi 4 macam yakni :

1. *Natural Draft Furnace*

Perbedaan tekanan inlet dan outlet air register disebabkan perbedaan berat jenis. Berat jenis fuel gas yang keluar dari *stack* dengan berat jenis udara keluar. Masuknya udara di dalam *furnace* jenis ini dibantu juga dengan menggunakan ketinggian *stack*. *Furnace* yang masuk natural draft biasanya digunakan pada *furnace* yang mempunyai hambatan aliran yang kecil terhadap *fuel gas*, tanpa menggunakan air preheater, dan mempunyai *stack* yang cukup tinggi.

2. *Forced draft furnace*

Tekanan udara yang masuk melalui air register diperbesar dengan menggunakan blower sehingga dapat menjadi lebih besar. Biasanya digunakan pada *furnace* yang mempunyai hambatan terhadap aliran *fuel gas* yang kecil, mempunyai air preheater dan *stack* yang cukup tinggi.

3. *Induced draft furnace*

Furnace jenis ini pengaturan tekanan outlet air register diperkecil dengan menghisap aliran *fuel gas* menggunakan blower, sehingga draft menjadi lebih kecil. Jenis ini biasanya dipakai pada *furnace* yang mempunyai *stack* rendah dan hambatan terhadap aliran *fuel gas* yang cukup besar.

4. *Balance draft furnace*

Merupakan kombinasi antara *forced draft* dan *induced draft* dengan memperbesar tekanan suplay inlet air register dan memperkecil tekanan outlet air register dengan bantuan blower. Jenis ini biasanya digunakan pada *furnace* yang mempunyai hambatan terhadap aliran *fuel gas* yang

cukup besar, mempunyai air preheater, dan mempunyai *stack* yang rendah.

2) Bagian-Bagian *Furnace*

Dalam penggunaannya, *furnace* memiliki bagian-bagian dengan fungsi yang berbeda-beda. Konstruksi *furnace* dapat dibedakan menjadi 4 bagian utama yaitu :

a. Dinding dapur

Dinding dapur terbuat dari baja (*Carbon steel*) yang dilapisi dengan isolasi, batu tahan api dan *refractory* yang semuanya itu bertujuan untuk mencegah terjadinya kehilangan panas.

b. Tube coil

Merupakan bagian yang paling penting pada instalasi *furnace*. Biasanya *tube coil* terdiri dari beberapa tube yang disambung dengan menggunakan *U-bend*. Apabila terjadi pembentukan kerak didalam tube *furnace* saat dibersihkan dengan menggunakan fasilitas *Steam Air Decoding* (SAD) mengingat beban panas dan tekanan yang berbeda dengan kondisi masing proses, maka pemilihan bahan tube dapat digolongkan sebagai berikut :

1. Untuk beban *furnace* 10000F, dipakai *carbon steel*
2. Untuk beban *furnace* 1000-20000F, dipakai *chrome alloy steel*
3. Untuk beban *furnace* >20000F, dipakai nikel dan *chrome alloy steel*

Tube yang dipasang pada daerah konveksi berguna untuk memperbesar perpindahan panas, sehingga dibutuhkan *extended surface tube* (tube bersirip).

c. Burner

Merupakan sarana pembakaran yang dilengkapi dengan sistem pengapian dan pencampuran dengan menggunakan udara primer dan sekunder serta sistem atomizing steam, sehingga bahan bakar dapat terbakar sempurna.

Adapun jenis - jenis burner adalah :

1. Gas burner
2. *Fuel oil* burner

3. *Combination burner*

d. *Stack*

Material yang digunakan pada *stack* biasanya terbuat dari *carbon steel* pada temperatur *stack* perlu dijaga agar suhunya tidak terlalu tinggi supaya tidak terjadi korosi. Untuk menjaga agar kondisi temperatur *stack* tetap berada pada temperatur yang diharapkan, maka pada *stack* dipasang fasilitas - fasilitas diantaranya :

1. Damper: berfungsi untuk mengatur tekanan dan kecepatan aliran gas hasil pembakaran yang keluar dari *stack*.
2. Thermocouple: berfungsi untuk mengatur temperatur *flue gas* yang meninggalkan *furnace*
3. Sample Top: untuk pengambilan *flue gas* (sisa pembakaran) untuk dianalisa
4. Draft Gauge : untuk mengukur tekanan didalam ruang bakar

3) Metode Perhitungan

Metode yang digunakan untuk perhitungan ini adalah menggunakan metode *Heat Losses* yaitu dengan cara menghitung neraca panas pada *furnace*. Effisiensi *furnace* adalah kemampuan atau performa dari *furnace* untuk memberikan panas dari hasil pembakaran bahan bakar kepada cairan (fluida) yang dipanaskan dalam tube dapur. Metode yang dipergunakan dalam perhitungan ini adalah dengan menggunakan metode perhitungan panas yang hilang (*Heat Losses*) yaitu dengan cara menghitung panas yang masuk dapur dan menghitung panas yang keluar dapur. Effisiensi *furnace* digunakan untuk mengetahui seberapa besar panas yang dihasilkan oleh *furnace* untuk memanaskan bahan, dalam hal ini crude oil. Effisiensi *furnace* diketahui dengan cara mengurangi panas yang masuk dengan panas yang keluar, kemudian dibagi dengan panas yang masuk dikalikan 100%. Atau dapat ditulis sebagai berikut :

$$\text{Effisiensi} = \frac{\text{panas masuk} - \text{panas keluar}}{\text{panas masuk}} \times 100\%$$



IX.2 Perhitungan Evaluasi *Furnace*

Tabel IX.1 Data Temperature *Furnace*, *Crude Oil*, dan *Fuel Oil*

Tanggal	T in <i>Crude Oil</i> (°C)	T out <i>Crude Oil</i> (°C)	T in <i>Fuel Gas</i> (°C)	T Dinding (°C)	T <i>Fuel Oil</i> Masuk (°C)	T <i>Stack</i> (°C)
9/11/2024	143.8	326.6	63,9	807.2	39	260
9/12/2024	131.8	327.1	66,5	764.33	39	284.4
9/13/2024	128.7	337.5	64,8	753.07	39	293.7
9/16/2024	146	328	65,8	664.3	39	282.7
9/17/2024	134.2	359.5	64	734.9	39	298.2
Rata- Rata	136.9	335.74	65	744.76	39	283.8

Tabel IX.2 Data Tekanan *Crude Oil*

Tanggal	P in <i>Crude Oil</i> (kg/cm ²)	P out <i>Crude Oil</i> (kg/cm ²)	P in <i>Fuel Oil</i> (kg/cm ²)
9/11/2024	0.3	0.106	7.9
9/12/2024	0.3	0.131	9.8
9/13/2024	0.4	0.15	7.9
9/16/2024	0.2	0.104	7.3
9/17/2024	0.3	0.173	8.8
Rata- Rata	0.3	0.1328	8.34

Tabel IX.3 Kapasitas *Crude Oil* dan *Fuel Oil*

Tanggal	Kapasitas <i>Crude Oil</i> (m ³ /hari)	Kapasitas <i>Fuel Oil</i> (m ³ /hari)	Kapasitas <i>Crude Oil</i> (m ³ /jam)	Kapasitas <i>Fuel Oil</i> (m ³ /jam)
9/11/2024	138.2	115.9	5.759	4.830
9/12/2024	133.6	112.8	5.567	4.700
9/13/2024	123.5	122.5	5.146	5.105
9/16/2024	128.48	112.5	5.354	4.688
9/17/2024	106.4	128.2	4.434	5.342
Rata- Rata	126.036	118.38	5.252	4.933

Tabel IX.4 Densitas *Crude Oil* dan *Fuel Oil*

Tanggal	<i>Crude Oil</i> (kg/m ³)	<i>Fuel Oil</i> (kg/m ³)
9/11/2024	0.83	0.88
9/12/2024	0.84	0.88
9/13/2024	0.83	0.88
9/16/2024	0.85	0.88
9/17/2024	0.85	0.88
Rata-Rata	0.84	0.88

1. Spesifikasi *Furnace-01*

Tipe : Box
Kapasitas : 200 m³/hari
Tinggi : 7,405 m
Panjang : 6 m
Lebar : 3,8 m
Dimensi Tube
Diameter : 4 inch
Panjang : 6 m
Jarak antar tube : 250/330 mm
Tata Letak : Horizontal
Bahan : *Low Chrom Molidenum*
Bahan Bakar : *Fuel Oil & Fuel Gas*

2. Spesifikasi *Crude Oil*

Temperatur masuk *crude oil* : 136,9 °C
Temperatur keluar *crude oil* : 335,74 °C
Tekanan masuk *crude oil* : 0,3 kg/cm²
Tekanan keluar *crude oil* : 0,1328 kg/cm²
Fasa : Cair
Densitas : 0,84 kg/m²
SG : 0,8404 (ASTM Tabel 51)



°API : 36,87 (ASTM Tabel 51)

3. Spesifikasi Fuel Oil

Temperatur masuk *Fuel oil* : 39 °C

Tekanan masuk *fuel oil* : 8,34 kg/cm²

Fasa : Cair

Densitas : 0,88 kg/m³

SG : 0,8805 (ASTM Tabel 51)

°API : 29,21 (ASTM Tabel 51)

4. Udara Pembakaran

Temperatur masuk : 35 °C

Tekanan masuk : 4,5 kg/cm²

Temperatur masuk dapur : 60 °F

A. Perhitungan Panas Masuk

1. Mencari Jumlah *Fuel Gas* yang Digunakan

Pemakaian *fuel gas* dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$Ws = 44,35 \frac{T_s}{P_s} \times d^{2,667} \times \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{L \times SG \times T}} \quad (\text{Perry : 130 - furnace operation})$$

Keterangan:

Ws : *gass flow* (SCF/day)

D : internal diameter (inch)

P1 : *initial pressure* (psia)

P2 : *final pressure* (psia)

L : *length of line* (miles)

T : *absolute temperature of following gas* (°R)

Ts : *standart absolute temperature* (°R)

Ps : *standart pressure* (psia)

Diketahui :

Tekanan *fuel gas* masuk dapur = 14,6959 psia

R = 10,371 psia.cuft/lbmil °R

BM	= 25,06 lb/lbmol
T	= 609 °R
Ts	= 549,27 °R
P1	= 15,2366 psia
P2	= 14,7 psia
Ps	= 14,7 psia
D	= 4 inch
L	= 6 m

Menghitung *Specific Gravity*

$$\rho_{\text{fuel gas}} = \frac{P \times BM}{R \times T}$$
$$= \frac{(14,6959 \text{ psia} \times 25,06 \frac{\text{lb}}{\text{lbmol}})}{(10,371 \text{ psia} \cdot \frac{\text{cuft}}{\text{lbmol}^\circ\text{R}} \times 609^\circ\text{R})} = 0,058 \text{ lb/cuft}$$

$$\text{SG fuel gas} = \frac{\rho_{\text{fuel gas}}}{\rho_{\text{udara}}}$$
$$= \frac{0,058}{0,075} = 0,777$$

Maka:

$$Ws = 443,35 \frac{549,27^\circ\text{R}}{14,7 \text{ psia}} \times 4^{2,667} \times \sqrt{\frac{(15,2366^2 - 14,7^2) \text{ psia}}{6 \text{ m} \times 0,776 \times 609^\circ\text{R}}}$$
$$= 50277,464 \frac{\text{SCF}}{\text{hari}}$$
$$= 104,745 \text{ lb/jam}$$

2. Mencari Nilai Bakar Fuel Oil

$$\text{SG 60/60 Fuel Oil} = 0,8805$$

$$^\circ\text{API} = 29,21$$

$$\text{Temperatur fuel oil masuk} = 39^\circ\text{C} = 102,2^\circ\text{F}$$

$$\text{Temperatur basis} = 60^\circ\text{F}$$

Mencari kandungan hidrogen dalam *fuel oil* dengan asumsi *fuel oil* tidak mengandung sulfur

$$H = 26 - 15S$$

keterangan:

H : Kandungan hidrogen (%wt)

S : *Specific gravity* 60/60

$$\%wt \text{ hidrogen} = 26 - 15(0,8805) = 12,79\%$$

$$\begin{aligned}\%karbon &= 100 - \%wt \text{ hidrogen} \\ &= 100 - 12,79\% \\ &= 87,21\%\end{aligned}$$

Berdasarkan table 5-1 (Nelson), *Mid boiling point fuel oil* 335,74 °C atau 636,332 °F. Koreksinya 65,78 °F (interpolasi tabel 5-1)

$$\text{Average boiling point fuel oil} = (636,332 - 65,78) ^\circ\text{F} = 570,552^\circ\text{F}$$

Didapatkan harga K = 11,52 (Figure 5-23, Nelson)

$$\text{Gross Heating Value (GHV)} = 19250 \text{ Btu/lb (Figure 5-22, Nelson)}$$

3. Mencari Lower Heating Value (LHV) *Fuel Oil*

$$Q_L = Q_H - 92,7H$$

Keterangan:

Q_L : LHV (Btu/lb)

Q_H : GHV (Btu/lb)

H : Kandungan Hidrogen (%wt)

$$Q_L = 19250 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} - 92,7(12,79\%) = 18064,14 \text{ Btu/lb}$$

Maka,

$$\text{GHV} = 19250 \text{ Btu/lb}$$

$$\text{LHV} = 18064,14 \text{ Btu/lb}$$

4. Panas Pembakaran *Fuel Oil* (Q₁)

$$\text{SG 60/60 Fuel Oil} = 0,8805$$

$$\text{API} = 29,21$$

$$\rho \text{ fuel oil} = \text{SG 60/60 fuel oil} \times \rho \text{ air}$$

$$= 0,8805 \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$= 880,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\begin{aligned}\text{Kebutuhan fuel oil} &= \text{mass flow fuel oil} \times \rho \text{ fuel oil} \times 2,205 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \\ &= 4,933 \frac{\text{m}^3}{\text{jam}} \times 880,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 2,205 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \\ &= 9577,23 \frac{\text{lb}}{\text{jam}}\end{aligned}$$

Maka kebutuhan udara pembakaran *fuel oil* sebenarnya :

$$\begin{aligned}Q1 &= \text{Kebutuhan fuel oil} \times \text{LHV fuel oil} \\ &= 9577,23 \frac{\text{lb}}{\text{jam}} \times 18064,14 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \\ &= 173004327,43 \text{ Btu/jam}\end{aligned}$$

5. Panas Sensibel *Fuel Oil* (Q2)

Temperatur *Fuel Oil* = 39 °C = 102,2 °F

Berdasarkan figure 5-1, Nelson

Pada temperature 102,2 °F $C_p \text{ fuel oil} = 0,46 \text{ Btu/lb } ^\circ\text{F}$

Pada temperature 77 °F $C_p \text{ fuel oil} = 0,435 \text{ Btu/lb } ^\circ\text{F}$

Maka,

$$C_p \text{ rata - rata} = \frac{(0,46 + 0,435) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ\text{F}}}{2} = 0,448 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ\text{F}}$$

Panas sensibel *Fuel Oil* (Q2)

$$\begin{aligned}Q2 &= 9577,23 \frac{\text{lb}}{\text{jam}} \times 0,4475 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ\text{F}} \times (102,2 - 77)^\circ\text{F} \\ &= 108002,391 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}\end{aligned}$$

6. Panas yang Dibawa Umpan (Q3)

SG 60/60 *Crude Oil* = 0,8404

°API = 36,87

Temperatur umpan masuk = 136,9 °C = 278,42 °F

Flow rate = 5,252 m³/jam

$$\rho \text{ air pada } 60^\circ\text{F} = 998 \text{ kg/m}^3$$

$$\begin{aligned}\text{Massa umpan} &= \text{flow rate} \times \rho \text{ air} \times \text{SG} \times 2,205 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \\ &= 5,252 \frac{\text{m}^3}{\text{jam}} \times 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,8404 \times 2,205 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \\ &= 9712,774 \frac{\text{lb}}{\text{jam}}\end{aligned}$$

Dari figure 5-1, Nelson didapatkan :

$$C_p \text{ crude oil pada suhu } 60^\circ\text{F} = 0,45 \text{ Btu/lb } ^\circ\text{F}$$

$$C_p \text{ crude oil pada suhu } 278,42^\circ\text{F} = 0,58 \text{ Btu/lb } ^\circ\text{F}$$

$$\text{Faktor koreksi} = 0,98$$

Maka,

$$\begin{aligned}C_p \text{ rata - rata} &= \frac{((0,45 \times 0,98) + (0,58 \times 0,98)) \frac{\text{Btu}}{\text{lb } ^\circ\text{F}}}{2} \\ &= 0,5047 \frac{\text{Btu}}{\text{lb } ^\circ\text{F}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Q_3 &= m \times C_p \times \Delta T \\ &= 9712,774 \frac{\text{lb}}{\text{jam}} \times 0,5047 \frac{\text{Btu}}{\text{lb } ^\circ\text{F}} \times (278,42 - 60)^\circ\text{F} \\ &= 1070702,948 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}\end{aligned}$$

7. Panas Pembakaran *Flue Gas* (Q4)

$$\text{Temperatur } \textit{flue gas} \text{ masuk} = 35^\circ\text{C} = 554,67^\circ\text{R}$$

$$\text{Tekanan } \textit{flue gas} \text{ masuk} = 1,029 \text{ atm}$$

$$\text{Kebutuhan } \textit{flue gas} = 50277,464 \text{ SCF/hari}$$

Kebutuhan *flue gas* pada tekanan 0,03 kg/m³ dan temperature 35 °C adalah

$$V_o = 50277,464 \text{ SCF/hari}$$

$$P_o = 1 \text{ atm}$$

$$T_o = 491,67^\circ\text{R}$$

$$P_1 = 1,029 \text{ atm}$$

$$T_1 = 554,67 \text{ }^{\circ}\text{R}$$

$$V_1 = \frac{P_o \times V_o \times T_1}{T_o \times P_1}$$

$$V_1 = \frac{1 \text{ atm} \times 50277,464 \frac{\text{SCF}}{\text{hari}} \times 554,67 \text{ }^{\circ}\text{R}}{491,67 \text{ }^{\circ}\text{R} \times 1,029 \text{ atm}} \times \frac{1 \text{ hari}}{24 \text{ jam}} = 2296,72 \frac{\text{cuft}}{\text{jam}}$$

Jadi panas pembakaran *flue gas* (Q4)

$$Q_4 = \text{kebutuhan } \textit{flue gas} (V_1) \times \text{LHV } \textit{flue gas}$$

$$= 2296,72 \frac{\text{cuft}}{\text{jam}} \times 18064,14 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}$$

$$= 41488228,72 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}$$

8. Panas Sensible *Flue Gas* (Q5)

$$\text{Temperatur } \textit{flue gas} \text{ masuk dapur} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C} = 95 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$\text{Temperatur basis} = 32 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$\Delta T = 63 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$W_s \text{ dalam berat} = 146,234 \text{ lb/jam}$$

Panas spesifik tiap komponen

Panas spesifik tiap komponen

Tabel IX.5 Perhitungan Panas Masuk *Furnace*

Komponen	A	B	C	D	E	F
	BM	%mol	Mol fraksi	D = A × C	LHV	F = C × E
				(lb/lbmol)	(Btu/cuft)	(Btu/lb)
C ₃ H ₈	44	49	0,49	21,56	2371	1161,79
C ₄ H ₁₀	58	49	0,49	28,42	2977	1458,73
C ₅ H ₁₂	72	2	0,02	1,44	3479	69,58
Total		100	1	51,42	8827	2690,1

$$\text{Maka panas sensible } \textit{flue gas} (Q_5) = 2690,1 \text{ Btu/jam}$$

9. Panas Automizing Steam (Q6)

Steam merupakan steam keluaran dari boiler

Tekanan *fuel oil* masuk = 8,34 kg/cm²

Untuk *inside burners* memiliki range tekanan antara 40-60 psig

Kebutuhan steam antara 0,2 lc/lbFO – 0,5 lc/lbFO (Nelson, 2006)

Asumsi kebutuhan steam = 0,4 lc/lbFO

$$\begin{aligned}\text{Kebutuhan steam (M steam)} &= 0,4 \frac{\text{lc}}{\text{lbFO}} \times 20997,859 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}} \\ &= 8399,144 \frac{\text{lb}}{\text{jam}}\end{aligned}$$

Berdasarkan tabel 7 didapatkan nilai entalpi *saturated steam* (Kern, 2019)

Entalpi steam pada 32 °F = 1075,8 Btu/lb

Entalpi steam pada 60 °F = 1088 Btu/lb

$$\begin{aligned}\text{Entalpi rata – rata} &= \frac{(1075,8 + 1088) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}}{2} \\ &= 1081,9 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}\end{aligned}$$

Q6 = M steam × Entalpi rata – rata

$$\begin{aligned}&= 8399,144 \frac{\text{lb}}{\text{jam}} \times 1081,9 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \\ &= 9087033,461 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}\end{aligned}$$

10. Panas Udara Pembakaran (Q7)

Tekanan udara = 4,5 kg/cm²

Temperatur udara masuk = 35 °C

Mencari kebutuhan udara pembakaran

Komposisi minyak bakar *fuel oil* (H₂) = 12,79 %wt

Komposisi carbon (C) = 87,21 %wt

artinya untuk setiap 1 kg *fuel oil* mengandung:

H₂ = 0,128 kg

$$C = 0,872 \text{ kg}$$

Menghitung udara teoritis (W_a) dalam (kg/kg bahan bakar)

$$\begin{aligned} W_a &= 11,59C + 34,78 \left(H_2 - \left(\frac{O_2}{8} \right) \right) + 4,35S \\ &= 11,59(0,872 \text{ kg}) + 34,8 \left(0,128 \text{ kg} - \left(\frac{0}{8} \text{ kg} \right) \right) + 4,35(0,8805) \\ &= 18,387 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \text{ bahan bakar} \end{aligned}$$

Menghitung *excess* udara:

Tabel IX.6 Data Komposisi *Flue Gas* (Data Lab Penguji Produksi PPSDM Migas)

Komponen	%Volume
CO ₂	11,57
O ₂	5,6
CO	0
N ₂	82.83

Perhitungan *excess* udara:

$$\begin{aligned} X &= \frac{O_2}{0,266 N_2 - O_2} \times 100\% \\ &= \frac{5,6 \%}{0,266 (82,83\%) - 5,6\%} \times 100\% = 34,08\% \end{aligned}$$

Menghitung kebutuhan udara pembakaran *fuel oil* sebenarnya

$$\begin{aligned} W_A &= \left(1 + \frac{X}{100} \right) \times W_a \\ &= \left(1 + \frac{34,08\%}{100} \right) \times 18,387 \frac{\text{kg}}{\text{kg bahan bakar}} \\ &= 24,65 \frac{\text{kg}}{\text{kg bahan bakar}} \end{aligned}$$

$$\text{Penggunaan fuel oil} = \text{jumlah umpan fuel oil} \times \text{SG fuel oil} \times \rho \text{ air}$$

$$\begin{aligned} &= 4,944 \frac{\text{m}^3}{\text{jam}} \times 0,8805 \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ &= 4343,414 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \end{aligned}$$

Maka kebutuhan udara pembakaran *fuel oil* sebenarnya :

$$\begin{aligned}\text{Kebutuhan udara pembakaran} &= \text{WA} \times \text{penggunaan } \textit{fuel oil} \\ &= 24,65 \frac{\text{kg}}{\text{kg bahan bakar}} \times 4343,414 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \\ &= 107076,597 \frac{\text{kg}}{\text{jam}}\end{aligned}$$

Menghitung udara pembakaran *flue gas* teoritis.

Tabel IX.7 Kebutuhan Udara Teoritis

Komponen	Berat Komponen (lb)	Kebutuhan udara pembakaran (lb)	udara pembakaran (lb)
CH ₄	0,943	17,27	16,28561
C ₃ H ₆	1,147	16,12	18,48964
C ₃ H ₈	1,64	15,7	25,748
I C ₄ H ₁₀	2,228	15,49	34,51172
n C ₄ H ₁₀	3,81	15,49	59,0169
I C ₅ H ₁₂	5,522	15,35	84,7627
n C ₅ H ₁₂	6,64	15,25	101,26
C ₆ H ₁₄	78,657	15,27	1201,09239
Total			1541,16696

(Sumber: Tabel 12-4. Rehm, 2012 “*Underbalance Drilling*”)

$$\begin{aligned}\text{Kebutuhan udara } \textit{flue gas} \text{ sebenarnya} &= \sum \text{udara pembakaran} \times \\ &\quad \textit{excess udara} \\ &= 1541,16696 \times \left(1 + \frac{x}{100}\right) \\ &= 1541,16696 \times \left(1 + \frac{34,07\%}{100}\right) \\ &= 1546,42 \frac{\text{lb}}{\text{jam}} \\ &= 702,07 \frac{\text{kg}}{\text{jam}}\end{aligned}$$

Maka:

Kebutuhan udara pembakaran seluruhnya =

kebutuhan udara pembakaran *fuel oil* +

kebutuhan udara pembakaran *flue gas*

$$= 107076,597 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} + 702,07 \frac{\text{kg}}{\text{jam}}$$

$$= 107778,671 \frac{\text{kg}}{\text{jam}}$$

Jadi panas udara pembakaran (Q7)

Q7 = kebutuhan udara pembakaran seluruhnya $\times$ Cp udara

$$\times (T_{\text{aktual}} - T_{\text{basis}})$$

$$= 107778,671 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 0,2402 \frac{\text{kkal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \times (32^\circ\text{C} - 0) \times 3,968 \frac{\text{btu}}{\text{kkal}}$$

$$= 3287210,136 \frac{\text{btu}}{\text{jam}}$$

11. Panas Sensibel Air karena Kelembaban Udara (Q8)

$$Q8 = (WA \times Ma) \times Cp \text{ air} \times (T_{\text{aktual}} - T_{\text{basis}})$$

Keterangan:

WA : Kebutuhan udara seluruhnya (lb/jam)

Ma : Berat air dalam udara kering (*Humidity Chart* = 0,027)

Cp air : 1 kkal/kg $^\circ\text{C}$

$$Q8 = \left(1546,42 \frac{\text{lb}}{\text{jam}} \times 0,027 \right) \times 1 \frac{\text{kkal}}{\text{kg}} ^\circ\text{C} \times (32^\circ\text{C} - 0) \times 3,968 \frac{\text{btu}}{\text{kkal}}$$

$$= 5301,664 \frac{\text{btu}}{\text{jam}}$$

B. Perhitungan Panas yang Termanfaatkan

1. Perhitungan *Crude Oil* yang Teruapkan

Tabel IX.8 Analisa Distilasi *Crude Oil*, ASTM-86

No	% Distilasi	T (°C)	T (°F)
1	IBP	65	149
2	10	108	226,4
3	20	130	266
4	30	155	311
5	40	188	370,4
6	50	221	429,8
7	60	257	494,6

(Data Lab. Pengujian Produksi PPSDM Migas, tanggal 19 September 2024)

2. Perhitungan T EFV

Perhitungan T EFV diperlukan *figure* 12.8 dan 12.9 dari literatur: Wayne C. Edmister “*Applied Hydrocarbon Thermodynamic*”.

Pada *figure* 12.8 digunakan untuk mencari ΔT pada perhitungan T EFV 50%. $\Delta \text{ASTM} = T \text{ ASTM } 30\% - T \text{ ASTM } 10\%$

$$= 311^{\circ}\text{F} - 226,4^{\circ}\text{F}$$

$$= 84,6^{\circ}\text{F}$$

Berdasarkan *figure* 12,8 pada ASTM 50% = 429,8°F dan $\Delta T = 84,6^{\circ}\text{F}$ diperoleh ΔT sebesar -10°F. Maka:

$$\begin{aligned} T \text{ EFV } 50\% &= T \text{ ASTM } 50\% + \Delta T \\ &= (429,8 + (-10))^{\circ}\text{F} \\ &= 419,8^{\circ}\text{F} \end{aligned}$$

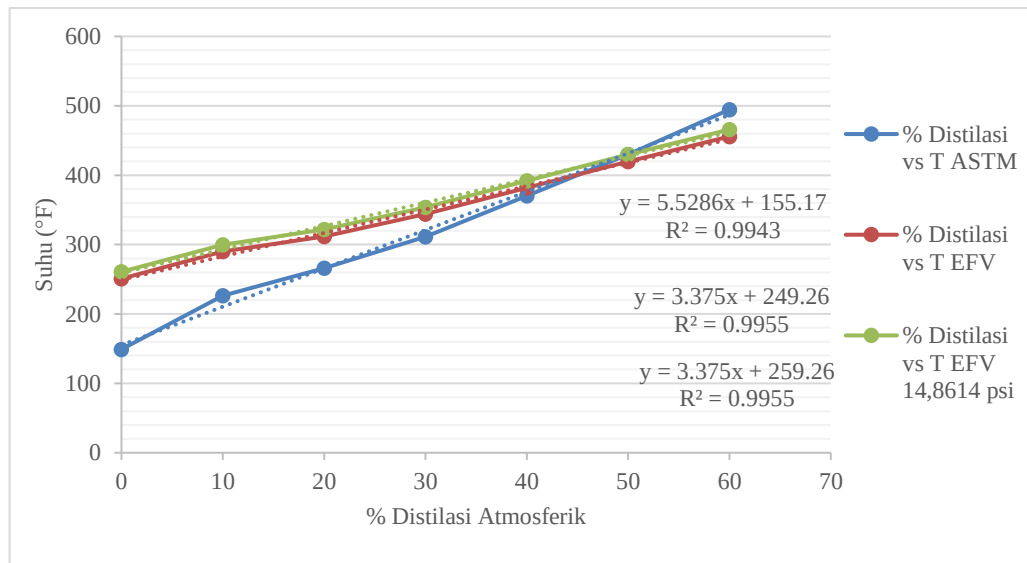
Berdasarkan *figure* 12.9 digunakan untuk mencari beda *temperature* pada masing-masing %distilasi untuk menentukan T EFV.

Tabel IX.9 Konversi T ASTM menjadi T EFV

% Distilasi	Rata-rata Crude Oil				
	Suhu ASTM		% Volume	Suhu EFV	
	T (°F)	ΔT		ΔT	T (°F)
IBP	149			49,8	
		77,4	0-10		39
10	226,4			116,8	
		39,6	10-30		22
20	266			179,8	
		45	10-30		32
30	311			249,8	
		59,4	30-50		38
40	370,4			334,8	
		59,4	30-50		38
50	429,8			419,8	
		64,8	50-70		36
60	494,6			501,8	

Hasil perhitungan tabel IV.8 diplot pada grafik IV.1 Hubungan antara %distilasi atmosferik dengan T ASTM dan T EFV. Setelah itu ditampilkan juga kurva antara %distilasi dengan T EFV pada tekanan operasi 14,8614 psi.

Gambar IX.1 Grafik Hubungan % Distilasi Atmosferik vs T ASTM dan T EFV



Perpotongan antara kurva T ASTM dan T EFV merupakan titik campuran yaitu pada *temperature* 400°F. Suhu campuran digunakan untuk menentukan titik didih *crude oil* pada keadaan standar (dicari pada *figure* 5.27, W. L. Nelson). Pada tekanan 14,7 psi dan *temperature* 400°F diperoleh T *boiling* pada suhu 400°F. Setelah diperoleh titik didih standarnya kemudian dicari titik didih pada kondisi operasi *furnace*:

$$P \text{ crude oil keluar furnace} = 0,1328 \text{ kg/cm}^2 \\ = 14,8328 \text{ psi}$$

$$T \text{ crude oil keluar furnace} = 335,74 \text{ } ^\circ\text{C} \\ = 636,332 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Berdasarkan *figure* 5.27 pada tekanan operasi 14,8328 psi diperoleh T *boiling* 390°F. Beda suhu *boiling* antara tekanan pada kondisi standar dan operasi sebesar 10°F. Sehingga dapat diplot kurva antara %distilasi dan T EFV pada P = 14,8328 psi yang sejajar dengan kurva T EFV pada kondisi standar. Suhu keluar *furnace* dapat dihitung menggunakan persamaan garis pada kurva %distilasi vs T EFV pada P=14,8326 psi:

$$y = 3,375 + 259,26 \\ x = \frac{(636,332 - 259,26)}{3,375}$$

$$x = 77,84\%$$

C. Perhitungan Masing-masing Panas yang Termanfaatkan

1. Panas yang Terbawa *Crude Oil* dalam Fase Cair

$$Q_a = m \times L$$

Keterangan:

m : Massa *crude oil* pada fase cair

L : *heat content crude oil* pada fase cair

massa yang teruapkan = 77,84%, sehingga:

$$\text{massa fase cair} = 100\% - 77,84\%$$

$$= 22,16\%$$

$$m = 0,2216 \times 5,252 \frac{\text{m}^3}{\text{jam}} \times 264,172 \frac{\text{gal}}{\text{m}^3}$$

$$= 307,450 \frac{\text{gal}}{\text{jam}}$$

$$L = 611,4 \frac{\text{btu}}{\text{gal}}$$

Maka:

$$Q_a = 307,450 \frac{\text{gal}}{\text{jam}} \times 611,4 \frac{\text{btu}}{\text{gal}}$$

$$= 187974,997 \frac{\text{btu}}{\text{jam}}$$

2. Panas yang Terbawa *Crude Oil* dalam Fase Uap

$$Q_b = m \times H$$

Keterangan:

m : Massa *crude oil* pada fase cair

H : *heat content crude oil* pada fase uap

massa yang teruapkan = 77,84%, sehingga:

$$m = 0,7784 \times 5,252 \frac{\text{m}^3}{\text{jam}} \times 264,172 \frac{\text{gal}}{\text{m}^3}$$

$$= 1079,960 \frac{\text{gal}}{\text{jam}}$$

$$H = 1378,68 \frac{\text{btu}}{\text{gal}}$$

Maka:

$$\begin{aligned} Q_b &= 1079,960 \frac{\text{gal}}{\text{jam}} \times 1378,68 \frac{\text{btu}}{\text{gal}} \\ &= 1488919,435 \frac{\text{btu}}{\text{jam}} \end{aligned}$$

D. Perhitungan Panas yang Hilang

1. Panas Terbawa Oleh Gas Asap Kering (Q1')

a. Perhitungan Cp Gas Asap

Tabel IX.10 Data Cp Gas Asap

Komponen	A	B	C	D	E	F
	BM	%	(A*B)/100	Fraksi berat	Cp	D*E
	kg/kgmol	Mol	kg/kgmol	D=C/ΣC	kkal/kg	
CO ₂	44	11,57	5,0908	0,16926903	0,2015	0,03411
N ₂	28	82,83	23.1924	0,77114699	0,2483	0,19148
O ₂	32	5.6	1.792	0,05958398	0,2919	0,01739
Σ		100	30,0752	1		0,24298

$$\Sigma F = 0,243 \text{ kkal/kg}^\circ\text{C}$$

$$\text{Panas pembakaran } flue \text{ gas} = 41488228,727 \text{ btu/jam}$$

$$\text{LHV } fuel \text{ oil} = 18064,14 \text{ btu/lb}$$

b. Perhitungan Berat Gas Asap per kg Bahan Bakar

Jika bahan bakar *fuel* gas diganti *fuel oil*, maka =

$$= \frac{41488228,727 \text{ btu/jam}}{18064,14 \text{ btu/lb}}$$

$$= 2296,718 \text{ lb/jam}$$

c. Penggunaan Bahan Bakar Fuel Oil Seluruhnya

$$= 2296,718 \text{ lb/jam} + 9577,23 \text{ lb/jam}$$

$$= 11873,95 \text{ lb/jam}$$

$$= 5343,275 \text{ kg/jam}$$

d. Berat Bahan Bakar

$$W_{FG} = \frac{11}{3}C + 9H^2 + 2S + 0,77W_a + (0,00023 \times X \times W_A)$$

Diketahui:

$$\%wt \text{ C} : 87,2075\% = 0,872075$$

$$\%wt \text{ H}_2 : 12,7925\% = 0,127925$$

$$X = 34,08$$

$$W_a = 18,38675575 \text{ kg/kg bahan bakar}$$

$$W_A = 24,65 \text{ kg/kg bahan bakar}$$

$$\begin{aligned} W_{FG} &= \frac{11}{3}0,872075 + 9(0,127925)^2 + 2(0) + \\ &0,77(18,38675575) + (0,00023 \times (34,08) \times (24,65)) \\ &= 14,789 \text{ kg/kg bahan bakar} \end{aligned}$$

e. Berat Gas Asap Keseluruhan

$$\begin{aligned} &= W_{FG} \times \text{penggunaan fuel oil seluruhnya} \\ &= 14,789 \text{ kg/kg bahan bakar} \times 5343,275 \text{ kg/jam} \\ &= 79021,72195 \text{ kg/jam} \end{aligned}$$

f. Panas yang Terbawa Asap Kering (Q1')

$$\begin{aligned} Q1' &= \text{berat gas asap seluruhnya} \times C_{FG} \times \Delta T \\ &= 78863,82851 \text{ kg/jam} \times 0,238 \text{ kkal/kg}^\circ\text{C} \times (32 - 0)^\circ\text{C} \\ &\quad \times 3,97 \text{ btu/jam} \\ &= 2389262,854 \text{ btu/jam} \end{aligned}$$

2. Panas Terbawa Oleh Asap Uap Air dalam Gas Asap karena Adanya H₂ dalam Bahan Bakar (Q2')

$$Q2' = 9H_2 \times H_{\text{sup}} \times \text{penggunaan bahan bakar fuel oil}$$

Keterangan:

$$H_{\text{sup}} : 2875,3 \text{ kJ/kg} = 687,1967 \text{ kkal/kg}$$

(Tabel A.2-10 Geankoplis, 2003)

$$H_2 : \% \text{wt } H_2 = 0,127925$$

Maka:

$$\begin{aligned} Q2' &= 9(0,127925) \times 687,1967 \text{ kkal/kg} \times 5343,275 \text{ kg/jam} \times \\ &\quad 3,968 \text{ btu/kkal} \\ &= 16774833,808 \text{ btu/jam} \end{aligned}$$

3. Panas yang Terbawa Oleh Uap Air dalam Gas Asap Karena Kandungan Air (H_2O) dalam Udara Bahan Bakar ($Q3'$)

$$Q3' = W \times H_{\text{sup}} \times \text{penggunaan bahan bakar fuel oil}$$

Keterangan:

$$W : \text{Kandungan air dalam bahan bakar} = 0,1$$

(Data Analisa PPSDM Migas)

$$H_{\text{sup}} : 2875,3 \text{ kJ/kg} = 687,1967 \text{ kkal/kg}$$

(Tabel A.2-10 Geankoplis, 2003)

Maka:

$$\begin{aligned} Q3' &= 0,1 \times 687,1967 \text{ kkal/kg} \times 5343,275 \text{ kg/jam} \times 3,968 \text{ btu/kkal} \\ &= 1457002,48 \text{ btu/jam} \end{aligned}$$

4. Panas yang Terbawa Oleh Uap Air dalam Gas Karena Adanya Kelembaban Udara dalam Bahan Bakar ($Q4'$)

$$Q4' = W_a \times M_a \times H_{\text{sup}} \times \text{penggunaan bahan bakar fuel oil}$$

Keterangan:

$$W_a : 24,65 \text{ kg/kg bahan bakar}$$

$$M_a : \text{Berat air dalam udara kering (Humidity Chart} = 0,027)$$

$$H_{\text{sup}} : 2875,3 \text{ kJ/kg} = 687,1967 \text{ kkal/kg}$$

(Tabel A.2-10 Geankoplis, 1993)

Maka:

$$\begin{aligned} Q4' &= 24,65 \text{ kg/kg bahan bakar} \times 0,027 \times 687,1967 \text{ kkal/kg} \times \\ &\quad 5343,275 \text{ kg/jam} \times 3,968 \text{ btu/kkal} \\ &= 9698116,999 \text{ btu/jam} \end{aligned}$$

5. Panas yang Hilang Melalui Dinding *Furnace* (Q_5')

- a. *Temperature* Luar Dinding (T_2)

$$T_2 = 80^\circ\text{C} = 176^\circ\text{F} = 635,67^\circ\text{R}$$

- b. *Temperature* Lingkungan Sekitar *Furnace* (T_1)

$$T_1 = 32^\circ\text{C} = 89,6^\circ\text{F} = 549,27^\circ\text{R}$$

- c. Luas Permukaan Radiasi

$$A = 2052,036 \text{ ft}^2$$

- d. *Emissivity of External Wall Surface of the Furnace*

$$\epsilon = 0,8$$

(Tabel 5-6, Perry)

- e. Asumsi Kecepatan Angin

$$V = 10 \text{ km/jam}$$

- f. Mencari Nilai h

$$\begin{aligned} h &= (17,2 \times 10^{-10} \times \epsilon \times (T_2^4 - T_1^4)) + ((1 + 0,255V) \times (T_2 - T_1)) \\ &= (17,2 \times 10^{-10} \times 0,8 \times (635,67^4 - 549,27^4)) + ((1 + 0,255(10 \text{ km/jam}) \times (635,67 - 549,27)) \\ &= 387,7583778 \text{ btu/jam. ft}^2 \end{aligned}$$

- g. Mencari Nilai h_i

$$\begin{aligned} h_i &= \frac{h}{T_2 - T_1} \\ &= \frac{387,7583778 \text{ btu/jam. ft}^2}{635,67^\circ\text{R} - 549,27^\circ\text{R}} \\ &= 4,487944187 \text{ btu/jam. ft. }^\circ\text{R} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_5' &= h_i \times A \times (T_2 - T_1) \\ &= 4,487944187 \text{ btu/jam. ft. }^\circ\text{R} \times 2052,036 \text{ ft}^2 \times (635,67^\circ\text{R} - 549,27^\circ\text{R}) \\ &= 795694,1505 \frac{\text{bt}}{\text{jam}} \end{aligned}$$

Tabel IX.11 Neraca Panas Masuk dan Keluar *Furnace*



Panas Masuk	Btu/jam	Panas Keluar	Btu/jam
Panas pembakaran <i>fuel oil</i> (Q1)	173004327,427	Panas yang Terbawa <i>Crude Oil</i> dalam Fase Cair (Qa)	187974,997
Panas sensibel <i>fuel oil</i> (Q2)	108002,391	Panas yang Terbawa <i>Crude Oil</i> dalam Fase Uap (Qb)	1488919,435
Panas yang dibawa umpan (Q3)	1070702,948	Panas Terbawa Oleh Gas Asap Kering (Q1')	2389262.854
Panas pembakaran <i>flue gas</i> (Q4)	41488228,720	Panas Terbawa Oleh Asap Uap Air dalam Gas Asap karena Adanya H ₂ dalam Bahan Bakar (Q2')	16774833,808
Panas sensibel <i>flue gas</i> (Q5)	2690,1	Panas yang Terbawa Oleh Uap Air dalam Gas Asap Karena Kandungan Air (H ₂ O) dalam Udara Bahan Bakar (Q3')	1457002,48
Panas <i>automizing steam</i> (Q6)	9087033,461	Panas yang Terbawa Oleh Uap Air dalam Gas Karena Adanya Kelembaban Udara dalam Bahan Bakar (Q4')	9698116,999
Panas udara pembakaran (Q7)	3287210,136	Panas yang Hilang Melalui Dinding Furnace (Q5')	795694,151

Panas Sensibel Air karena Kelmbaban Udara (Q8)	5301,664		
Total	228056288,545		32791804,725

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi Furnace} &= \frac{\text{total panas masuk} - \text{total panas keluar}}{\text{total panas masuk}} \times 100\% \\ &= \frac{(228056288,545 - 32791804,725) \text{ Btu/jam}}{228056288,545 \text{ Btu/jam}} \times 100\% \\ &= 85,62 \%\end{aligned}$$

Jadi, efisiensi pada *furnace*-01 menurut Trinks pada tahun 2004 menyatakan bahwa efisiensi *furnace* yang masih layak dipakai yaitu sekitar 70%-80%.

IX.3 Pembahasan

Pada proses pengolahan *crude oil* diperlukan peralatan untuk memanaskan *crude oil* terlebih dahulu sebelum memasuki kolom fraksinasi agar kerja kolom fraksinasi tidak terlalu berat. Salah satu alat yang digunakan untuk proses tersebut adalah *furnace*. Bahan bakar dari *furnace* berasal dari *fuel oil* dan *fuel gas*. Tujuan dari pemanasan *furnace* yaitu untuk menyesuaikan suhu dengan kondisi operasi yang diinginkan untuk proses pengolahan selanjutnya. Sistem perpindahan panas yang terjadi di *furnace* yaitu perpindahan panas secara konduksi, konveksi, dan radiasi. Perpindahan panas secara konduksi terjadi karena adanya panas yang ditransfer dari dinding luar tube *furnace* ke di dinding bagian dalam tube tersebut. Perpindahan panas secara konveksi terjadi karena adanya perpindahan panas dari dinding bagian dalam tube ke *crude oil* yang terdapat di dalam tube *furnace*. Perpindahan panas yang terakhir secara radiasi terjadi karena adanya energi panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar yang kemudian diterima secara langsung oleh dinding luar tube *furnace* tanpa adanya media pengantar.

Efisiensi *furnace* merupakan persen energi panas masuk yang digunakan secara efektif pada umpan yang dihasilkan. Efisiensi *furnace* merupakan



performance dari suatu *furnace* untuk memberikan panas yang dihasilkan oleh pembakaran sejumlah *fuel oil* pada fluida yang dipanaskan dalam tube. Efisiensi *furnace* dapat dihitung sebagai indikasi kelayakan suatu *furnace* untuk dioperasikan. Operasi *furnace* dapat dikatakan efisiensi apabila sistem penyalan api burner sempurna, reaksi pembakaran berlangsung sempurna, panas pembakaran dari *fuel oil* dan *fuel gas* dapat tersalur dengan baik pada cairan yang dipanaskan, permukaan tube bersih, serta dapat memperkecil panas yang hilang baik melalui *stack* maupun dinding *furnace*. Penentuan efisiensi suatu *furnace* dapat dilakukan dengan membandingkan panas yang diserap *crude oil* dengan total panas masuk ke dalam *furnace*.

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh efisiensi *furnace*-01 pada PPSDM MIGAS cepu sebesar 86,35%. Menurut Trinks pada tahun 2004 menyatakan bahwa efisiensi *furnace* yang masih layak dipakai yaitu sekitar 70%-80%. Jika efisiensi *furnace* melebihi 80%, beberapa hal positif dapat terjadi. Pertama, *furnace* yang efisien dapat mengubah lebih dari 80% energi dari bahan bakar menjadi panas yang berguna, sehingga mengurangi biaya operasional. Kedua, efisiensi yang lebih tinggi berarti lebih sedikit emisi gas buang dan polutan, berkontribusi pada pengurangan dampak lingkungan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa *furnace*-01 PPSDM MIGAS Cepu masih layak beroperasi. Penurunan efisiensi *furnace* disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk excess air, alat yang sudah tua, pembentukan kerak, korosi, kebocoran, dan panas yang terbuang melalui dinding *furnace* serta gas buang. *Excess air* yang berlebihan dapat menurunkan suhu pembakaran dan meningkatkan *heat loss*. Perangkat yang lebih tua cenderung kurang efisien karena keausan dan teknologi yang ketinggalan zaman. Selain itu, penumpukan kerak menghambat aliran panas, sedangkan kerusakan akibat korosi dapat mengganggu kinerja *furnace* dan meningkatkan kehilangan panas. Kebocoran udara atau gas juga mengganggu proses pembakaran dan meningkatkan kebutuhan bahan bakar. Semua faktor ini berkontribusi pada peningkatan nilai *heat loss*, yang mengarah pada penggunaan energi yang lebih tinggi dan biaya operasional yang meningkat.