

“BALANCE TÉRMICO DE UNA CALDERA”

Laboratorio de Operaciones Unitarias

INTRODUCCION

Al diseñarse una caldera, se debe tener en cuenta que tenga una superficie lo suficientemente grande, como para permitir una buena transferencia de calor para que la combustión se realice de la forma más eficiente posible y también de un modo tal, que las pérdidas en calor sean lo más pequeñas, para así, obtener el máximo rendimiento.

Estas se clasifican, atendiendo a la posición relativa de los gases calientes y del agua, en acuotubulares y pirotubulares. En las calderas acuotubulares, por el interior de los tubos pasa agua o vapor, y los gases calientes se hallan en contacto con la superficie externa.

Una caldera se puede elegir para un servicio determinado depende del combustible de que se disponga, tipo de servicio, capacidad de producción de vapor requerida, duración probable de la instalación, y de otros factores de carácter económico.

Con respecto a la operación de la caldera, es importante realizar el Balance Térmico, el cual consiste en saber la distribución del calor resultante de la combustión del combustible, el balance térmico consiste en la confección de una tabla con el calor absorbido por el generador de vapor y con las varias pérdidas caloríficas concurrentes en la combustión.

En la presente experiencia se utiliza una caldera del tipo acuotubular para realizar el balance térmico de la misma.

OBJETIVOS

Determinar cuantitativamente y en forma experimental, la distribución del calor contenido por el combustible, para un generador de vapor.

EQUIPO USADO

1. Caldera

Para la realización de la experiencia se utilizó una caldera de las siguientes características:

Marca y año de fabricación : BROSSE-1968

Capacidad		150 Kg vapor/hora
Superficie		6.85 m ²
Tipo		Acuotubular
Presión nominal		8 atmósferas (relativas)

2. **Calorímetro de mezcla**

Los calorímetros del tipo de mezcla, utilizan la mezcla de un líquido con entalpía conocida, que se mezcla con el líquido del cual se desea saber la entalpía. A través, de los valores de temperatura y masa inicial y final, se puede determinar el valor de la entalpía.

3. **Calorímetro de estrangulación**

Los calorímetros del tipo de estrangulación se fundan en que si el vapor se estrangula y a continuación se expande sin realizar trabajo o sin pérdida de calor, la energía total del vapor permanece invariable. . El vapor entra por una tobera de toma de muestra y se expande al pasar por un orificio.

4. **Analizador de Orsat**

Mediante el Analizador de Orsat puede efectuarse un análisis de los productos de escape a partir del cual es posible calcular la relación aire/combustión. También puede determinarse el grado de efectividad de la combustión, este dato es de vital importancia para el funcionamiento de una caldera.

Las partes fundamentales de un analizador de Orsat típico son: La bureta de medida, el frasco nivelador, el filtro de gas y las pipetas de absorción, las cuales se conectan entre sí mediante las llaves. Cada una de las pipetas de absorción va provista de un pequeño número de tubos de vidrio, con el fin de exponer una gran cantidad de superficie, mojada por los reactivos absorbentes, al gas sometido a análisis. La bureta de medida está rodeada e una camisa de agua, para evitar las variaciones de temperatura y densidad del gas. El anhídrido carbónico es absorbido en una pipeta, la cual está llena de potasa cáustica KOH; en otra pipeta queda retenido el oxígeno, dicha pipeta contiene una disolución alcalina de ácido pirogálico; finalmente, el óxido de carbono es absorbido por una solución ácida de cloruro cuproso en otras pipetas. Estas pipetas deben contener algo de cobre metálico, con el fin de mantener la solución activada. Las absorciones deben realizarse en el orden indicado, obteniéndose el nitrógeno por diferencia. Deben utilizarse reactivos recién preparados, y han de mantenerse protegidos del aire. Las conexiones existentes entre las diversas partes del aparato no deben presentar fugas.

5. **Indicador de consumo de combustible**

En la caldera existe un elemento que nos indica cantidad de combustible (en este caso un litro), para determinar el gasto de combustible se toma el tiempo que demora en consumirse esta cantidad (un litro).

ECUACIONES DE COMBUSTION

Para determinar el balance térmico del generador de vapor, se utilizaron las siguientes ecuaciones :

1. **Calor Útil**

Es el calor utilizado en generar vapor. Se determina si se conoce el gasto de vapor (m_v) generado y las entalpías del vapor (h_v) y del agua de alimentación (h_e).

$$Q_1 = m_v (h_v - h_e)$$

2. **Entalpía de vapor de agua (h_v)**

Para determinar la entalpía de vapor de agua se utilizan dos métodos: con calorímetro de estrangulación y calorímetro de mezcla.

En el calorímetro de estrangulación, se estrangula el vapor hasta la presión atmosférica. El estrangulamiento es un proceso entalpático, pues, no hay intercambio de vapor y no se realiza trabajo alguno. Si la temperatura del vapor es mayor de 108°C, se trata entonces de vapor sobrecalentado, con estos datos se ingresa a las tablas termodinámicas y se obtiene el valor de la entalpía. Si el valor de la temperatura es inferior a 108°C, este método no sirve.

El segundo método es a través del calorímetro de mezcla. Se trata de mezclar en un espacio térmicamente aislado, una masa conocida de agua a temperatura inicial conocida, con el vapor cuya entalpía se desea determinar. En el proceso de mezclado, el vapor se condensa en la masa líquida pasando a formar parte de ella, elevando la temperatura de ésta, debido al calor de condensación. Se mide la masa final del líquido y su temperatura.

La entalpía del agua es numéricamente igual a su temperatura en grados celsius, porque se ha tomado como referencia entalpía igual a cero a 0° C y el calor específico del agua es 1 Kcal/Kg ° C.

se utiliza la siguiente expresión:

$$h_v = \frac{m_f h_f - m_i h_i}{m_v}$$

Se saca el promedio de los datos entregados por el calorímetro de estrangulación y el de mezcla

3. Pérdida de calor por combustión incompleta del carbono (Q2)

Mediante el aparato de Orsat se mide la composición de los gases quemados secos, y conociendo la composición (de acuerdo a los porcentajes obtenidos de la muestra tomada) y consumo de combustible se determina Q2.

$$Q_2 = 5685C \frac{\% CO}{\% CO + \% CO_2}$$

$$C = 0.86m_c$$

$$m_c = \text{consumo}_{\text{combustible}} \cdot \text{Densidad}_{\text{combustible}}$$

4. Pérdida de calor sensible en los gases de escape (Q3)

si se conoce el porcentaje en volumen de CO y CO2 y la cantidad de carbono que tiene el combustible se puede determinar el flujo de gases quemados secos. Por otro lado el porcentaje de hidrógeno del combustible es conocido, entonces se puede determinar la cantidad de vapor de agua formado como producto de la combustión. Hay que considerar también el vapor de agua contenida en el aire, para lo cual se mide la humedad relativa del aire. Entonces conocido el flujo de gases secos y el flujo de vapor de agua, la temperatura ambiente y la temperatura de los gases de escape, se puede calcular el calor perdido considerando el calor específico promedio de los gases secos ($C_{pgs}=0.24$) y del vapor de agua ($C_p=0.46$), para estos cálculos se utilizan las siguientes expresiones:

$$Q_3 = (m_{gs} \cdot C_{pgs} + m_v \cdot C_{pv})(T_g - T_a)$$

$$mgs = \frac{44(\% CO_2) + 32(\% O_2) + 28(\% CO) + 28(\% N_2)}{12(\% CO) + 12(\% CO_2)} \cdot C$$

$$\dot{m}_v = 1.26 \cdot \dot{m}_c + \dot{m}_a \cdot K$$

$$\dot{m}_a = \dot{m}_s + 0.26 \dot{m}_c$$

K= valor obtenido de la carta psicrométrica

5. Otras Pérdidas (Q4)

Se evalúa como la siguiente expresión:

$$Q_4 = \dot{m}_c \cdot PCI - (Q_1 + Q_2 + Q_3)$$

Donde mc corresponde al flujo de combustible y PCI al poder calorífico inferior del combustible (petróleo diesel).

El combustible utilizado (petróleo diesel A1) utilizamos el valor del PCI como 10500 Kcal/Kg.

Los valores de Q1, Q2 y Q3 son los obtenidos de las expresiones de los puntos anteriores.

DATOS EXPERIMENTALES

Calorímetro de Mezcla

Masa de calorímetro vacío	: 10.52 Kg
Masa inicial (mi)	: 16.26 Kg
Masa final (mf)	: 17.1 Kg
Temperatura inicial (ti)	: 18.8 ° C
Temperatura final (tf)	: 85.4 ° C

Calorímetro de estrangulación

Presión	: 1 atmósfera
Temperatura	: 122.2 ° C

Consumo de combustible

Combustible	: Petróleo diesel A1
Cantidad de combustible	: 1 litro
Tiempo de consumo	: 5'3'' = 5.05 min

Medición de Gasto

Masa recipiente vacío	: 0.98 Kg
Masa de recipiente con agua	: 4.92 Kg
Tiempo de medición	: 3 min

Proceso de combustión

Volumen de muestra	: 100 cm ³	
Volumen de CO ₂	: 100 - 85.4	= 14.6 %
Volumen de O ₂	: 85.4 - 85	= 0.4 %
Volumen de CO	: 85 - 84.6	= 0.4 %
Volumen de N ₂	: 100 - (14.6+0.4+0.4)	= 84.6 %
Temperatura de gases	: 330 ° C	

Otros datos

Temperatura de Agua de Alimentación	: 23 ° C
Temperatura ambiente	: 34 ° C
Humedad relativa	: 43.5 %
Densidad del Petróleo diesel	: 850 Kg/m ³
C _{pgs}	: 0.24 Kcal/Kg °C
C _{pv}	: 0.46 Kcal/Kg °C

CALCULOS

Cálculo de calor: Cálculo de entalpía

Calorímetro de mezcla

Se consideraron los valores de entalpía numéricamente igual al de las temperaturas.

$$h_v = \frac{m_f h_f - m_i h_i}{m_v}$$

$$m_i = m_{\text{agua}} - m_{\text{calorímetro vacío}} = 16.26 - 10.52 = 5.74 \text{ Kg}$$

$$m_f = m_{\text{agua vapor}} - m_{\text{calorímetro vacío}} = 17.1 - 10.52 = 6.58 \text{ Kg}$$

$$m_v = m_f - m_i = 6.58 - 5.74 = 0.84 \text{ Kg}$$

$$h_v = \frac{6.58 * 85.4 - 5.74 * 18.8}{0.84} = 540.5 \text{ Kcal/Kg}$$

Calorímetro de estrangulación

Con el valor de la temperatura y las tablas termodinámicas para vapor saturado, se obtiene el valor de h_v .

$$\text{Para } T^{\circ} = 122.2^{\circ}\text{C} = 251.96^{\circ}\text{F} \quad \Rightarrow \quad h_v = 645.14 \text{ Kcal/Kg}$$

El valor final de h_v obtenido es el promedio del valor del calorímetro de mezcla y de estrangulación.

$$h_v = \frac{540.5 + 645.14}{2} = 592.85 \text{ Kcal/Kg}$$

Cálculo de la masa de vapor agregado(m_v)

$$\dot{m}_v = \frac{\text{Peso } H_2O}{T}$$

Peso H_2O = (Peso recipiente + H_2O) – Peso recipiente

Peso H_2O = 4.92 Kg – 0.98 Kg = 3.94 Kg

$$\begin{aligned} \dot{m}_v &= \frac{3.92}{3} \text{ Kg/min} \\ &= 1.31 \text{ Kg/min} \\ &= 78.6 \text{ Kg/Hr} \end{aligned}$$

Cálculo de Calor Útil (Q1)

$$Q_1 = \dot{m}_v (h_v - h_e)$$

Considerando la temperatura del agua de alimentación (23°C), obtenemos el valor de h_e .

$$h_e = 23 \text{ Kcal/Kg}$$

$$Q_1 = 78.6 * (592.85 - 23) = 44790.29 \text{ Kcal/Hr}$$

Cálculo de Perdida de calor por combustión incompleta del carbono (Q2)

$$Q_2 = 5685C \frac{\% CO}{\% CO + \% CO_2}$$

Donde,

$$C = 0.86 \dot{m}_c$$

$$m_c = \frac{1}{5.05} \text{ Lt/min} * 0.85 \text{ Kg/Lt} = 0.168 \text{ Kg/min} \Rightarrow 10.09 \text{ Kg/Hr}$$

$$C = 0.86 * 10.09 = 8.67 \text{ Kg/Hr}$$

$$Q_2 = 5685 * 8.67 * \frac{0.4}{0.4 + 14.6} = 3375.95 \text{ Kcal/Hr}$$

Cálculo de pérdida de calor sensible a los gases (Q3)

$$Q_3 = (m_{gs} \cdot C_{p_{gs}} + m_v \cdot C_{p_v})(T_g - T_a)$$

$$m_{gs} = \frac{44(\% CO_2) + 32(\% O_2) + 28(\% CO) + 28(\% N_2)}{12(\% CO) + 12(\% CO_2)} \cdot C$$

$$m_{gs} = \frac{44*(14.6) + 32*(0.4) + 28*(0.4) + 28*(84.6)}{12*(0.4) + 12*(14.6)} * 8.67 = 146.19 \text{ Kg/Hr}$$

$$m_v = 1.26 \cdot \dot{m}_c + \dot{m}_a \cdot K$$

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{gs} + 0.26 \dot{m}_c$$

$$\dot{m}_a = 146.19 + 0.26*10.09 = 148.8 \text{ Kg/Hr}$$

El valor de K se obtiene de la carta psicrométrica para un valor de 34°C y 43.5% de temperatura ambiente y humedad relativa.

$$K = 0.0145$$

$$m_v = 1.26 * 10.09 + 148.8 * 0.0145 = 14.871 \text{ Kg/Hr}$$

$$Q_3 = (146.19 * 0.24 + 14.871 * 0.46) * (330 - 34) = 12342.09 \text{ Kcal/Kg}$$

Cálculo de Otras pérdidas (Q4)

$$Q_4 = \dot{m}c \cdot PCI - (Q_1 + Q_2 + Q_3)$$

$$PCI = \text{Poder calorífico inferior del petróleo diesel} = 10500 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right]$$

$$Q_4 = 10.09 * 10500 - (44790.29 + 3375.95 + 12342.09) = 45436.67 \text{ Kcal/Kg}$$

Otros Cálculos

Rendimiento

Para calcular el rendimiento de la caldera debemos sacar la relación entre el calor utilizado o calor útil (Q1) y el calor suministrado (mc PCI), los valores de Q2, Q3 y Q4 son pérdidas, por lo tanto no son útiles.

$$\eta = \frac{Q_1}{\dot{m}c \cdot PCI} = \frac{44790.29}{10.09 * 10500} = 0.422 = 42.2 \%$$

Resultados

Tabla de Balance Térmico.

	Kcal/hr	PORCENTAJE
CALOR UTIL (Q1)	44790.29	41.27 %
PERDIDA DE CALOR POR COMBUSTION (Q2)	3375.95	3.18 %
PERDIDA DE CALOR SENCIBLE (Q3)	12342.09	11.64 %
OTRAS PERDIDAS (Q4)	45436.67	42.88 %
TOTAL	105945	100 %

Conclusiones

Bibliografía

- Severns, W.H , “La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases”, Editorial Reverté S.A. 1982.
- Guía de Laboratorio de Operaciones Unitarias.