Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química y Bioprocesos
IIQ1003 - Termodinámica 2022-2

Pauta Tarea 1

Fecha de entrega: 23 de septiembre a través de CANVAS.

.

La tarea debe ser trabajada en grupos de a 2 o 3 personas. Tiene que ser entregada con una portada la cual indique el nombre de los integrantes del grupo, el número de grupo, el curso y la fecha de entrega. **Se descontaran 2 décimas si no se cumple con el formato pedido.**

Pregunta 1 (2 pts)

Un sistema contiene 100 g de vapor de agua en un conjunto cilindro pistón vertical con topes que evitan que el pistón baje sobre un cierto nivel. El pistón tiene una masa de 102 kg y un área transversal de 100 cm^2, y la presión atmosférica es de 100 kPa. Inicialmente, el vapor de agua se encuentra a 300°C y se comprime isobáricamente hasta que el pistón descanse sobre los topes, alcanzando un volumen de 71,87 L (proceso 1-2). Luego, se deposita un objeto de 51 kg sobre el pistón, ejerciendo una fuerza adicional sobre el sistema (proceso 2-3). Se le pide:

a) Determinar la presión interna, temperatura, volumen, energía interna y fase de cada estado.

b) Calcular el calor y el trabajo, en kJ, para cada proceso.

c) Calcular el calor y el trabajo global, en kJ.

d) Realice un gráfico cualitativo P-V que muestre los estados y los procesos que ocurren.

Solución Descontar un poco de puntaje en caso de que no se pongan las unidades en la respuesta final

Puntos por item:

a) 1,0 puntos

b) 0.4 puntos

c) 0.2 puntos

d) 0.4 puntos

a) Para el estado 1 se calcula la presión interna del sistema:

$$P_{interna} = P_{pistn} + P_{atm}$$

$$P_{pistn} = \frac{\sum F}{A} = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{102 \cdot 9.81}{100 \cdot 10^{-4}} = 100062 \text{ Pa} \approx 1 \text{ bar}$$

$$P_{atm} = 100 \text{ kPa} = 1 \text{ bar}$$

$$P_1 = 2 \text{ bar}$$

0,1 por obtener la presión

Para el volumen y la energía interna específica se interpola doble en la tabla A4 ya que es un vapor sobrecalentado. Se tiene:

$$v_1 = 1.463 \ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$u_1 = 2808.65 \ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Finalmente multiplicándolo por el peso se tiene:

$$V_1 = 0.1463 \text{ m}^3$$

$$U_1 = 280.865 \text{ kJ}$$

0,2 por obtener el volumen y la energía interna

Estado 1:

- Fase: Vapor sobrecalentado
- P_1: 2 bar
- T_1: 300 °C
- V_1: 0.1463 m^3
- U_1: 280.865 kJ

Para el estado 2 la presión es igual que el estado 1 ya que ocurre un proceso isobárico.

0,1 por obtener la presión

El volumen para el estado 2 es 0.07187 m^3

Finalmente, se tiene que la fase en la que se encuentra el agua es mezcla líquido vapor. Luego, para buscar la energía interna se calcula la calidad:

$$x = \frac{0.7187 - 1.0605 \cdot 10^{-3}}{0.8857 - 1.0605 \cdot 10^{-3}} = 0.811$$

$$u_2 = u^L \cdot (1 - x_2) + u^V \cdot x_2$$

$$u_2 = 504.49 \cdot (1 - 0.811) + 2529.5 \cdot 0.811 = 2146.77 \text{ kJ/kg}$$

$$U_2 = 214.677 \text{ kJ}$$

0,2 por obtener la la energía interna y la temperatura

Estado 2:

- Fase: Mezcla líquido vapor
- P_2: 2 bar
- T_2: 120.2 °C
- V_2: 0.07187 m^3
- U_2: 214.677 kJ

Para el estado 3, el volumen se mantiene constante. La presión por otro lado cambia, ya que hay una fuerza adicional sobre el sistema, por lo que calculando se tiene:

$$P_{interna} = P_{pistn} + P_{masa} + P_{atm}$$

$$P_{pistn} = \frac{\sum F}{A} = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{102 \cdot 9.81}{100 \cdot 10^{-4}} = 100062 \text{ Pa} \approx 1 \text{ bar}$$

$$P_{masa} = \frac{\sum F}{A} = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{51 \cdot 9.81}{100 \cdot 10^{-4}} = 50031 \text{ Pa} \approx 0.5 \text{ bar}$$

$$P_{atm} = 100 \text{ kPa} = 1 \text{ bar}$$

$$P_3 = 2.5 \text{ bar}$$

0,2 por obtener la presión y determinar el volumen

Luego, buscando en la tabla A3, se tiene que la fase es el Vapor Saturado, por lo que se toman las propiedades del vapor saturado cuando la presión es 2 bar.

0,2 por obtener la temperatura y la energía interna

Estado 3:

- Fase: Vapor saturado
- P_3: 2.5 bar
- T_3: 127.4 °C
- V_3: 0.07187 m^3
- U_3: 253.72 kJ

b) Proceso 1-2:

$$W_{1-2} = -P_1(V_2 - V_1) = 2 \cdot 10^5(0.1463 - 0.07187)$$

$$W_{1-2} = 14886 \text{ J} = 14.886 \text{ kJ}$$

$$\Delta U = (U_2 - U_1) = -66.188 \text{ kJ}$$

$$Q_{1-2} = \Delta U - W = -81.074 \text{ kJ}$$

0,2 por el trabajo y el calor del proceso 1-2

Proceso 2-3:

$$W_{2-3} = 0$$

$$\Delta U = (U_3 - U_2) = 39.043 \text{ kJ}$$

$$Q_{1-2} = \Delta U - W = 39.043 \text{ kJ}$$

0,2 por el trabajo y el calor del proceso 2-3

c)

$$Q_{total} = Q_{1-2} + Q_{2-3} = -42.031 \text{ kJ}$$

$$W_{total} = W_{1-2} + W_{2-3} = 14.886 \text{ kJ}$$

0,2 por el trabajo y el calor de todo el proceso

d) 0,4 por el gráfico. Debe tener los ejes con las unidades respectivas, la campana, los estados y sus procesos con dirección.

Pregunta 2 (2 pts)

Un intercambiador de calor que opera de manera estacionaria, busca condensar una corriente de 135 kg/h de tolueno que entra a 125 °C. Para esto, se utilizará como corriente de

refrigeración, 240 kg/h de líquido saturado del refrigerante 134a a 3,2 bar.

a) Si el refrigerante sale como vapor sobrecalentado a 66 °C ¿cuál es la temperatura de salida del tolueno?

b) Si ahora como corriente de refrigeración se utilizan 30 kg/h de agua como líquido saturado a 0,06 bar y esta sale como vapor a 100 °C y la misma presión, ¿cuál es la nueva temperatura de salida del tolueno?

c) Comente los resultados obtenidos de la parte a y b. ¿Tienen sentido según lo aprendido en clases? Si tuviera que escoger entre el agua y el refrigerante, ¿cuál escogería?

Hint: Para el tolueno utilice las capacidades caloríficas del archivo "Capacidades Caloríficas de Gas y Liquido.pdf".

Solución

Puntos por item:

a) 1,0 puntos

b) 0,6 puntos

c) 0,4 puntos

a) Primero se debe plantear un balance de energía para el proceso completo:

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{k=1}^{K} \dot{m}_k u_k + \dot{Q} - P\frac{dV}{dt} + \dot{W}_s + \sum_{k=1}^{k} \dot{m}_k (PV)_k$$

Como el proceso es estacionario, los diferenciales con respecto al tiempo se anulan. Además, no existe trabajo de eje. Por último, no hay transferencia de calor desde el exterior, todo el calor se transfiere entre las corrientes. Por otro lado, podemos acoplar los términos de energía interna y PV en entalpía, obteniendo la siguiente ecuación.

$$0 = \sum_{k=1}^{K} \dot{m}_k h_k$$

Denotando con el subíndice T al tolueno y R al refrigerante:

$$\dot{m_{T,in}} h_{T,in} + \dot{m_{R,in}} h_{R,in} - \dot{m_{T,out}} h_{T,out} - \dot{m_{R,out}} h_{R,out} = 0$$

0,2 por plantear el balance de energía y eliminar los términos a 0

Ahora se debe calcular las entalpías. Para el refrigerante se obtienen de tablas:

- $h_{R,in}$ = 53,31 kJ/kg, de la tabla, líquido saturado a 3,2 bar.
- $h_{R,in}$ = 308,534 kJ/kg. Para este se debe interpolar para 3,2 bar y 66 °C en la tabla de vapor sobrecalentado para el refigerante 134a.

0,2 por las entalpías del refrigerante

Para la corriente de tolueno, se utiliza la capacidad calorífica a presión constante tal que:

$$h_{T,in} - h_{T,out} = \int_{T_{ebu}}^{T_{in}} C_{pg}(T) \cdot dT + \Delta H_{lv} + \int_{T_{out}}^{T_{ebu}} C_{pl}(T) \cdot dT$$

0,3 por la expresión para la entalpía del tolueno

Del archivo "Capacidades Caloríficas de Gas y Liquido.pdf":

$$C_{pg}(T) = a_g + b_g T + c_g T^2 + d_g T^3 + e_g T^4$$
$$a_g = 31,8200 \quad b_g = -0,16165 \cdot 10^{-1} \quad c_g = 14,44650 \cdot 10^{-4}$$
$$d_g = -2,28948 \cdot 10^{-6} \quad e_g = 11,35730 \cdot 10^{-10}$$

$$C_{pl}(T) = a_l + b_l T + c_l T^2 + d_l T^3$$
$$a_l = 1,8083 \quad b_l = 8,12223 \cdot 10^{-1} \quad c_l = -1,51267 \cdot 10^{-3} \quad d_l = 0,16300 \cdot 10^{-5}$$

Por otro lado, del archivo "Propiedades de Compuestos"se tiene que:

$$\Delta H_{lv} = 33461 \ J/mol$$
$$PM = 92.1 \ g/mol$$

Recordar que la temperatura debe estar en Kelvin. Además, recordar que este C_p y C_l, esta en unidades de J/mol por lo que debemos primero dividir por el peso molecular para llegar a kJ/kg. Por lo que queda la siguiente ecuación:

$$135 \cdot \left(\int_{383,8}^{398,15} C_{pg}(T) \cdot dT + 33461 + \int_{T_{T,out}}^{383,8} C_{pl}(T) \cdot dT \right) \cdot \frac{1}{92,1} + 240 \cdot (53,31 - 308,534) = 0$$

Resolviendo la ecuación en Wolfram Mathematica. Para el código ver el anexo final. Se obtiene un resultado final de

$$T_{T,out} = 347,636\ K$$

0,3 por la expresión final y el resultado

b) Ahora solo se debe cambiar el valor del flujo másico de la corriente de refrigeración y las entalpías correspondientes.

- $h_{R,in}$ = 151,53 kJ/kg, de la tabla, líquido saturado a 0,06 bar.
- $h_{R,out}$ = 2688,05 kJ/kg. Para este se debe hacer una interpolación para 100 °C a los 0,06 bar.

0,2 por las entalpías del refrigerante

Luego, se plantea una ecuación paralela a la ecuación del inciso anterior, pero con los valores para el agua. Se obtiene la siguiente ecuación:

$$135 \cdot \left(\int_{383,8}^{398,15} C_{pg}(T) \cdot dT + 33461 + \int_{T_{T,out}}^{383,8} C_{pl}(T) \cdot dT \right) \cdot \frac{1}{92,1} + 30 \cdot (151,53 - 2688,05) = 0$$

0,2 por la expresión del balance

De nuevo se debe resolver esta ecuación usando alguna herramienta computacional (ver anexo). Se obtiene que

$$T_{T,out} = 283,866\ K$$

0,2 por el resultado

c) Se puede ver que en el caso del refrigerante 134a, este entra a 2,48 °C = 275,63 K y sale a 66 °C = 339,15 K. Por otro lado el tolueno entra a 398,15 K y sale a 347,636 K, por lo que los resultados hacen sentido, una corriente se calienta y la otra se enfría.

Sin embargo en el caso del agua, esta entra a 36,16 °C = 311,31 K y sale a 100 °C = 373,15 K. Aquí es donde surge un problema, en este caso el tolueno esta saliendo a 283,866 K, es decir se esta enfriando un compuesto con otro que esta a temperatura mayor, o en otras palabras, el calor esta yendo desde un compuesto a menor temperatura

hacia una con mayor temperatura. Esto rompe la ley 0 de la termodinámica, por lo que el resultado no es correcto.

Sin embargo, claramente el utilizar agua es mas eficiente debido a que es capaz de absorber mas calor en su cambio de fase que el refrigerante, lo que se traduce en un menor flujo másico y menor costo. Por eso lo mas eficiente seria utilizar un sistema múltiple que primero enfriara con agua y luego con refrigerante, con tal de cumplir con la Ley 0 de la termodinámica. En caso de solo poder utilizar un fluido, se tendría que usar el refrigerante.

0,4 por las conclusiones

Pregunta 3 (2 pts)

En la Figura 2 se muestra un calentador de agua que opera de manera transiente y está siendo calentado. El estanque tiene una capacidad de 0,2 m^3. El agua en el interior, inicialmente, tiene una temperatura de 50 °C. Cuando alguien abre el grifo de la ducha, el agua fluye desde el estanque a una velocidad de 0,2 kg/s, y el agua de reposición a 5 °C fluye hacia el estanque desde el sistema de distribución de agua municipal con el mismo flujo con el que sale. El agua en el estanque recibe de las resistencias eléctricas calor a una taza de 12 kW. Suponga que el estanque está perfectamente mezclado en todo momento. Utilice la capacidad calorífica del agua líquida del archivo "Capacidades Caloríficas de Gas y Liquido.pdf" de Canvas.

a) Planteé el balance de energía para el sistema de la forma más detallada y específica para este sistema.

b) Realice un gráfico que muestre la variación de la temperatura del estanque en el tiempo.

c) ¿Cuál es el valor de la temperatura cuando se llega al estado estacionario?

d) ¿Cuánto se demora el estanque en llegar a 300 K?

Nota: Para este ejercicio deberá utilizar Wolfram Mathematica o algún otro programa para resolver el ejercicio.

Solución

Puntos por item:

a) 0,8 puntos

b) 0,5 puntos

c) 0,4 puntos

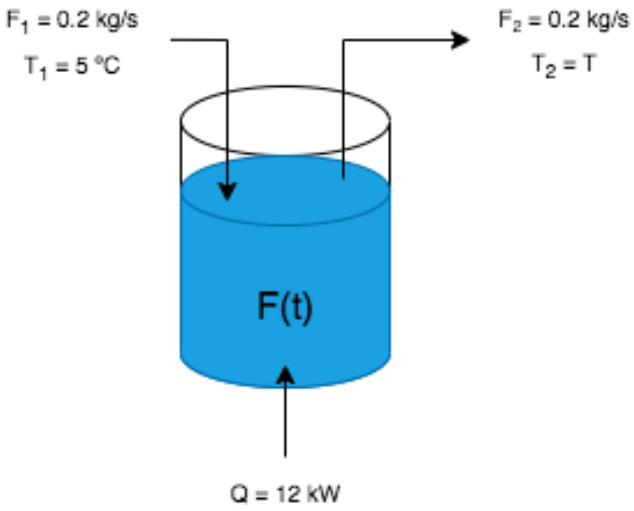


Figura 1: Estanque de calentamiento transiente

d) 0,3 puntos

a) Primero, se plantea el balance de masa para el sistema. Como la masa dentro del estanque no cambia con el tiempo se tiene que

$$\cancel{\frac{dm}{dt}}^{0} = 0$$

$$\dot{m_{in}} = \dot{m_{out}}$$

0,1 pts por plantear el balance de masa y eliminar los términos a 0

Por otro lado, se plantea el balance de energía para el sistema. Este es transiente, con transferencia de calor, sin agitación y sin trabajo de expansión compresión.

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \dot{Q} + \cancel{\dot{W}_s}^{0} - P\cancel{\frac{dV}{dt}}^{0}$$

0,2 pts por plantear la primera ley y eliminar los términos a 0

Luego se desarrolla cada término. Para el término de energía interna, como la masa dentro del estanque no cambia con el tiempo y el Cp no depende del tiempo:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d\left(m\int C_p \cdot dT\right)}{dt} = mC_p\frac{dT}{dt}$$

El Cp del agua es:

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

Donde T está en Kelvin, C_p en J/molK y $a = 18,2964$, $b = 4,72118 \cdot 10^{-1}$, $c = -1.33878 \cdot 10^{-3}$ y $d = 0.13142 \cdot 10^{-5}$.

Sin embargo, recordar que C_p está en J/mol = kJ/kmol, por lo tanto, se debe cambiar a kJ/kg con el peso molecular (PM = 18 kg/kmol)

$$\frac{dU}{dt} = m\frac{C_p}{PM}\frac{dT}{dt}$$

0,1 punto por desarrollar correctamente dU/dt

Para las entradas y las salidas. Como la masa que entra es la misma a la que sale, se tiene

$$\sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i = F\left(h_{in} - h_{out}\right)$$

Además $h_{in} - h_{out}$ se puede expresar en térmicos de C_p

$$F\left(h_{in} - h_{out}\right) = F\int_{T}^{T_{in}} \frac{C_p}{PM}dT$$

0,1 por desarrollar el lado de los flujos correctamente con la integral de C_p polinómico

Finalmente el calor es 12 kW y la masa que se encuentra en el estanque es $m = \rho V$

Luego combinando:

$$m\frac{C_p}{PM}\frac{dT}{dt} = F\int_{T}^{T_{in}} \frac{C_p}{PM}dT + \dot{Q}$$

$$T\left(0\right) = 323,15\ K$$

0,3 por plantear el sistema final, con la condición inicial correctamente

b) Esta es una EDO sin solución analítica pues C_p es un polinomio de 4to grado. Por ende se debe usar Wolfram Mathematica. El código lo pueden encontrar en el anexo. De esta forma se obtiene el siguiente gráfico:

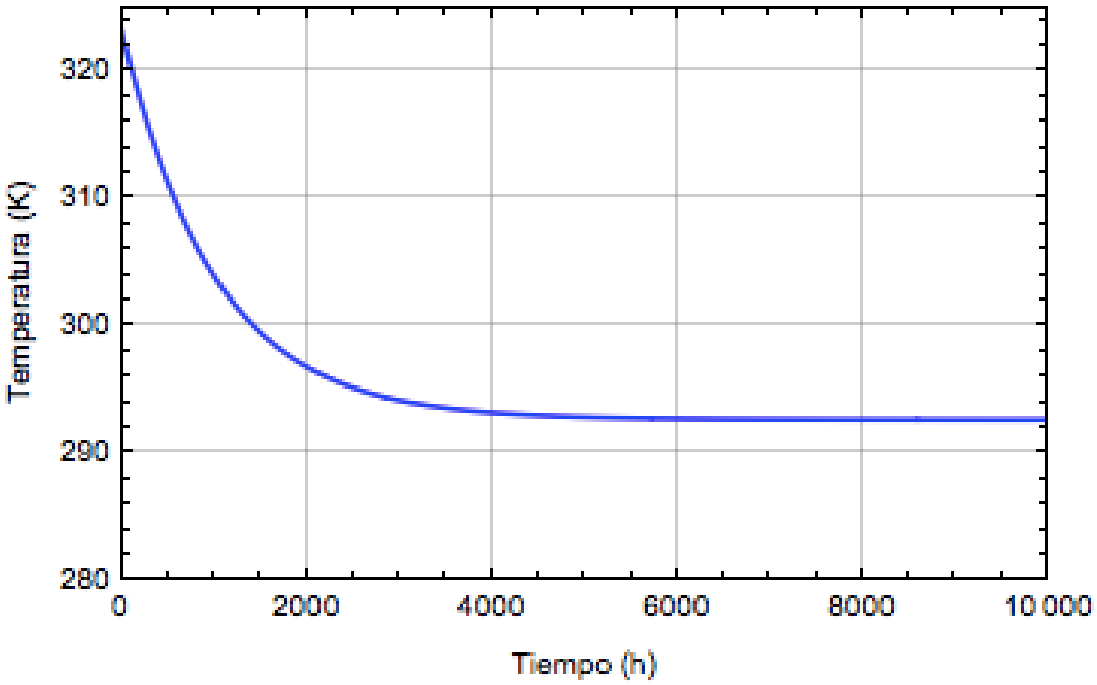


Figura 2: Variación de temperatura en el estanque

0,5 por resolver la EDO numericamente en Wolfram u otro. Se plantea el gráfico correctamente. El gráfico tiene los ejes con nombre y unidades correctas. Se muestra un intervalo correcto (se muestran al menos 6000 segundos) y se muestra todo el rango del gráfico. Descontar si se ve que la curva esta çortada"(sucede cuando le ponen mucho tiempo al plot y no ponen la opción PlotRange-All)

c) En el infinito se llega al estado estacionario. Es decir $\frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{dt}} = 0$. Luego:

$$F \int_{T}^{T_{in}} \frac{C_p}{PM} dT + \dot{Q} = 0$$

0,2 por plantear el balance estacionario

Resolviendo esto en Wolfram, se obtiene:

$$T_\infty = 292,639\ K$$

0.2 por resolver

Nota: El alumno podría haber encontrado otra forma de resolución (tirando el limite al infinito u otro). Asignar correspondientemente

Nota 2: El alumno podría haber encontrado el limite al ojo mirando el gráfico. Asignar máx 0,15 pts

d) Para el tiempo se puede utilizar nuevamente Wolfram Mathemtica (ver anexo)

$$t_{300K} = 1421,99\ s$$

0,3 por encontrar el tiempo correctamente

Nota: El alumno podría haber encontrado el valor al ojo por gráfico. Asignar 0,2 por utilizar esta forma