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

Pauta I2 2021-1

Profesores: Matías Campos y Nestor Escalona

P4) En un motor, 10 moles de un gas ideal se comprimen desde 30°C y 2 bar hasta 20 bar. El cambio de entropía para el gas es 50 J/K. Calcule la temperatura final del gas en Kelvin. Considere $C_P = \frac{5}{2}R$.

Solución

Del formulario, la ecuación de cambio de entropía de un gas ideal con C_P cte es:

$$\Delta S_{12}^{\text{ig}} = n\int_{T_1}^{T_2} \frac{C_P^{\text{ig}}}{T} dT - n \cdot R \ln \frac{P_2}{P_1} = nC_P^{\text{ig}} \ln \frac{T_2}{T_1} - n \cdot R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Se puede despejar T_2

$$T_2 = T_1 \exp\left(\frac{\Delta S_{12}^{\text{ig}} + n \cdot R \ln \frac{P_2}{P_1}}{C_P \cdot n}\right)$$

Reemplazando:

$$T_2 = 303.15 \exp\left(\frac{50 + 10 \cdot 8.314 \ln \frac{20}{2}}{(5/2) \cdot 8.314 \cdot 10}\right) = 968.57 \text{ K}$$

P5) 92 kg de etanol líquido se calientan desde 30°C hasta que es vapor saturado. Calcule el cambio de entropía para el etanol en kJ/K. Considere que:

- $C_P = 127$ kJ/kmol
- $T_{eb} = 78.3$°C
- $\Delta h_{vap} = 38577$ kJ/kmol
- PM = 46 kg/kmol

Solución

Se tienen dos cambios de entropía, del proceso 1-2 que es el calentamiento sensible desde 30°hasta 78.3°C y del proceso 2-2 que es calor latente. Primero se calculan los moles:

$$n = \frac{92}{46} = 2 \text{ kmol}$$

Del formulario:

$$\Delta S_{12} = n \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_P}{T} dT = nC_P \ln \frac{T_2}{T_1} = 2 \cdot 127 \cdot \ln \frac{78.3 + 273.15}{30 + 273.15} = 37.55$$

$$\Delta S_{2,3} = \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{T^{\text{sat}}} = \frac{n\Delta h_{\text{vap}}}{T^{\text{sat}}} = \frac{2 \cdot 38577}{78.3 + 273.15} = 219.53$$

$$\Delta S_T = \Delta S_{12} + \Delta S_{2,3} = 257.1 \text{ kJ/K}$$

P6) 40 kg/s de metano son comprimidos desde 0.16 MPa y 140K hasta 2.5 MPa y 340K. Debido a que el compresor estaba mal aislado, hubo una transferencia de calor desconocida Q desde un reservorio a 50°C hacia el gas. Se sabe que el sistema genero una entropía de 14.4 kJ/K · s. Determine el valor de Q en kJ/s.

Solución

El balance general de entropía para un compresor estacionario, no adiabático es:

$$\cancelto{0}{\frac{dS}{dt}} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} + \sum_{\text{entra}} \dot{m}_e \hat{S}_e - \sum_{\text{sale}} \dot{m}_s \hat{S}_s + \dot{S}_{\text{gen}}$$

$$\frac{Q}{T_B} = -\left(\dot{m}(\hat{S}_{in} - \hat{S}_{out}) + \dot{S}_{gen}\right)$$

Del gráfico del metano: $\hat{S}_{in} = 5.5$ y $\hat{S}_{out} = 6$. Luego:

$$Q = -(50 + 273.15)\,(40(5.5 - 6) + 14.4) = 1800 \text{ kJ/s}$$

P8) **Pregunta de desarrollo 1**.

Se tiene un proceso que utiliza vapor de agua para generar trabajo. En este, dos corrientes; la corriente 1 que está a 500°C y 40 bar y la corriente 2 que esta a

600°C y 60 bar, entran a las turbinas T1 y T2 respectivamente. En ambas turbinas se expande el flujo hasta 1 bar (flujos 3 y 4). Luego, estos flujos son unidos en un mezclador adiabático, y salen en la corriente 5 como vapor saturado. La turbina 1 es completamente reversible y la turbina 2 tiene un 75 % de eficiencia. Considere que el flujo másico que pasa por la corriente 5 es $\dot{m}_5 = 100$ kg/min.

Determine:

a) La fase, las entalpías y entropías especificas de cada uno de los flujos. (1.5 pts)

b) El flujo másico que pasa por la corriente 1 y la corriente 2 respectivamente (en kg/min). (1 pto)

c) La potencia de cada una de las turbinas en kW. (0.5 pts)

d) La entropía generada en el proceso completo en kJ/K · min (1 pto)

Solución: Forma 1

a) Lo primero es caracterizar todas las corrientes:

Nota: Se debe determinar la entalpía, entropía, fase y calidad (si se esta mezcla) de todas las corrientes. El resto de las propiedades (ie, T, U, V) no importan

Corriente 1: $T_1 = 500$°C y $P_1 = 40$ bar. Propiedades se obtienen de la Tabla A-4 de VSC

- $T_1 = 500$°C
- $P_1 = 40$ bar
- Fase = VSC
- $h_1 = 3445.3$ kJ/kg
- $s_1 = 7.0901$ kJ/kg K

0.2 pts

Corriente 2: $T_2 = 600$°C y $P_2 = 60$ bar. Propiedades se obtienen de la Tabla A-4 de VSC

- $T_2 = 600$°C
- $P_2 = 60$ bar
- Fase = VSC
- $h_2 = 3658.4$ kJ/kg
- $s_2 = 7.1677$ kJ/kg K

0.2 pts

Corriente 3: Después de la turbina 1 con $\eta = 100\,\%$ y $P_3 = 1$ bar. Esto significa que es isoentrópica: $s_1 = s_3$. Esta entropía en 1 bar esta como mezcla liquido vapor. Sus propiedades se obtienen de la Tabla A-3. La calidad se obtiene por regla de la palanca:

$$s_3 = s_L + x(s_V - s_L) \longrightarrow x = \frac{s_3 - s_L}{s_V - s_L} = \frac{7.0901 - 1.3026}{7.3594 - 1.3026} = 0.9555$$

$$h_3 = h_L + x(h_V - h_L) = 2575.06$$

- $P_3 = 1$ bar
- $s_3 = s_1 = 7.0901$ kJ/kg K
- Fase = Liq-Vap
- $x = 0.9555$
- $h_3 = 2575.6$ kJ/kg

0.4 pts

Corriente 4 ideal: Después de la turbina 2 y $P_4 = 1$ bar. Para la corriente ideal se asume que la turbina es isoentrópica (subindice s). Esto es $s_{4s} = s_2$. Esta entropía en 1 bar esta como mezcla liquido vapor. Sus propiedades se obtienen de la Tabla A-3. La calidad se obtiene por regla de la palanca:

$$s_4 = s_L + x_s(s_V - s_L) \longrightarrow x_s = \frac{s_4 - s_L}{s_V - s_L} = \frac{7.1677 - 1.3026}{7.3594 - 1.3026} = 0.9683$$

$$h_{4s} = h_L + x_s(h_V - h_L) = 2603.99$$

0.2 pts

Corriente 4 real: Ahora se utilizará la eficiencia de $75\,\%$ para calcular la entalpía y entropía real:

$$\eta = \frac{W_{real}}{W_{ideal}} = \frac{h_4 - h_2}{h_{4s} - h_2} \longrightarrow h_4 = \eta(h_{4s} - h_2) + h_2 = 0.75 \cdot (2603.99 - 3658.4) + 3658.4 = 2867.6$$

Notar que esta entalpía es de VSC, por ende para la entropía se debe interpolar en la Tabla A-4 con h_4 y $P_4 = 1$:

$$\frac{7.8343 - 7.6597}{s_4 - 7.6597} = \frac{2875.3 - 2796.2}{2867.6.6 - 2796.2} \longrightarrow s_4 = 7.832$$

Entonces:

- $P_4 = 1$ bar
- Fase = VSC
- $h_3 = 2867.6$ kJ/kg
- $s_4 = 7.832$ kJ/kg K

0.3 pts

Corriente 5: Como los mezcladores son isobáricos $P_5 = P_4 = P_3 = 1$ bar. Además es vapor saturado. Propiedades se obtienen de la Tabla A-3

- $P_5 = 1$ bar
- Fase = Vsat
- $h_5 = 2675.5$ kJ/kg
- $s_5 = 7.3594$ kJ/kg K

0.2 pts

b) Para encontrar el flujo másico, se debe plantar un balance de materia y energía en el mezclador:

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_4 = \dot{m}_5 = 100 \longrightarrow \dot{m}_3 = \dot{m}_5 - \dot{m}_4$$

0.2 pts

Del balance de energía para un mezclador estacionario y adiabático, sin agitación:

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

$$\Longrightarrow \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_5 h_5$$

0.2 pts

Combinando:

$$(\dot{m}_5 - \dot{m}_4) h_3 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_5 h_5$$

0.2 pts

Despejando el flujo 4:

$$\dot{m}_4 = \frac{\dot{m}_5(h_5 - h_3)}{h_4 - h_3} = \frac{100 \cdot (2675.5 - 2575.6)}{(2867.6 - 2575.6)} = 34.33 \text{ kg/min}$$

0.2 pts

$$\dot{m}_3 = 100 - 34.33 = 65.67 \text{ kg/min}$$

0.2 pts

Además $\dot{m}_1 = \dot{m}_3$ y $\dot{m}_2 = \dot{m}_4$.

c) Para la potencia de las turbinas se puede plantear un balance (aunque no es necesario ya que es bastante directo):

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

O simplemente:

$$\dot{W}_s = \dot{m}(h_{out} - h_{in})$$

0.2 pts

Luego para la turbina 1:

$$\dot{W}_1 = \dot{m}_1(h_3 - h_1) = 65.67(2575.6 - 3445.3) = -57145 \text{ kJ/min} = -952.4 \text{ kW}$$

0.15 pts

Luego para la turbina 2:

$$\dot{W}_2 = \dot{m}_2(h_4 - h_2) = 34.33(2867.6 - 3658.4) = -27151 \text{ kJ/min} = -452.5 \text{ kW}$$

0.15 pts

d) Para la entropía generada en el proceso se tienen 2 opciones:

Opción 1: Plantear el balance de entropía para cada equipo que genere entropía (turbina 2 y mezclador) y sumarlas. La turbina 1 no genera entropía ya que es reversible.

Luego del balance de entropía para la turbina 2, estacionaria y adiabática.

$$\cancel{\frac{dS}{dt}}^{0} = \cancel{\sum_i \frac{Q_i}{T_i}}^{0} + \sum_{\text{entra}} \dot{m}_e \hat{S}_e - \sum_{\text{sale}} \dot{m}_s \hat{S}_s + \dot{S}_{\text{gen}}$$

0.2 pts

$$\Longrightarrow \dot{S}_{\text{gen}} = \dot{m}_2(s_4 - s_2) = 34.33 \cdot (7.832 - 7.1677) = 22.832 \text{ kJ/K} \cdot \text{min}$$

0.2 pts

Luego del balance de entropía para el mezclador, estacionario y adiabática.

$$\cancel{\frac{dS}{dt}}^{0} = \cancel{\sum_i \frac{Q_i}{T_i}}^{0} + \sum_{\text{entra}} \dot{m}_e \hat{S}_e - \sum_{\text{sale}} \dot{m}_s \hat{S}_s + \dot{S}_{\text{gen}}$$

0.2 pts

$$\dot{S}_{\text{gen}} = \dot{m}_5 s_5 - \dot{m}_4 s_4 - \dot{m}_3 s_3 = 100 \times 7.3594 - 34.33 \times 7.832 - 65.67 \times 7.0901 = 1.433 \text{ kJ/K} \cdot \text{min}$$

0.2 pts

Luego sumando ambas:

$$\dot{S}_{gen} = 22.832 + 1.433 = 24.265 \text{ kJ/K} \cdot \text{min}$$

0.2 pts

Opción 2: Plantear el balance de entropía para el proceso completo tomando solo sus entradas y salidas globales:

Como en el proceso no adición de calor y es estacionario:

$$\cancel{\frac{dS}{dt}}^{0} = \cancel{\sum_i \frac{Q_i}{T_i}}^{0} + \sum_{\text{entra}} \dot{m}_e \hat{S}_e - \sum_{\text{sale}} \dot{m}_s \hat{S}_s + \dot{S}_{\text{gen}}$$

0.5 pts

$$\dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_2 s_2 - \dot{m}_5 s_5 + \dot{S}_{\text{gen}} = 0$$

0.25 pts

$$\implies \dot{S}_{\text{gen}} = 100 \times 7.3594 - 65.67 \times 7.0901 - 34.33 \times 7.1677 = 24.265 \text{ kJ/K} \cdot \text{min}$$

0.25 pts

Solución: Forma 2

Se sigue el mismo procedimiento que antes. Los resultados son:

a)

- $h_1 = 3517$
- $s_1 = 6.999$
- $h_2 = 3536.9$
- $s_2 = 7.2056$
- $h_3 = 2485.769$
- $s_3 = 6.999$
- $x_3 = 0.923$
- $h_{4s} = 2561.039$
- $s_{4s} = 7.2506$
- $x_{4s} = 0.9564$
- $h_4 = 2853.79$
- $s_4 = 7.9506$
- $h_5 = 2660$
- $s_5 = 7.4797$

b)

- $m_1 = 78.99$ kg/min
- $m_2 = 71.01$ kg/min

c)

- $\dot{W}_1 = -1357.6$ kW
- $\dot{W}_2 = -808.48$ kW

d)

- $\dot{S}_{gen} = 57.36$ kJ/K min

P9) Pregunta de desarrollo 2.

Se tiene un proceso de licuefacción de metano. En este la corriente 1 de $\dot{m}_1 = 50$ kg/min a 300K y 18 MPa entra a un intercambiador de calor donde se enfría hasta 220K (corriente 2). Este luego pasa por una válvula de expansión para posteriormente entrar a un separador flash que opera a 1 bar. El metano liquido (flujo 4) se retira como producto, y el metano gaseoso (flujo 5) se envía al intercambiador de calor para enfriar el flujo 1.

Determine:

a) Las entalpías especificas de todos los flujos (1.8 pts)

b) La cantidad de metano liquido (corriente 4) y gaseoso (corriente 6) en kg/min que se obtiene del proceso (1 pts)

c) El calor involucrado en el proceso del intercambiador de calor (0.2 pts)

Solución: Forma 1

a) Primero se debe determinar las entalpías de cada flujo:

Corriente 1: $T_1 = 300$K y $P_1 = 18$ MPa. Entalpía se obtiene del diagrama de metano.

- $T_1 = 300$K
- $P_1 = 18$ MPa
- Fase = VSC
- $h_1 = 820$ kJ/kg

0.3 pts

Corriente 2: $T_2 = 220$K y como el HX es isobárico: $P_2 = P_1 = 18$ MPa. Entalpía se obtiene del diagrama de metano.

- $T_2 = 220$K
- $P_2 = 18$ MPa
- Fase = VSC
- $h_2 = 490$ kJ/kg

0.3 pts

Corriente 3: Después de la válvula isoentálpica $h_3 = h_2$ y como el separador flash es isobárico $P_3 = P_4 = 1$ bar $= 0.1$ MPa. No hay propiedades nuevas que obtener.

- $h_3 =$
- $P_3 = 0.1$ MPa
- Fase = Liq-vapor

0.3 pts

Corriente 4: Después del separador flash, $P_4 = 0.1$ MPa, y es liquido saturado. Entalpía se obtiene del diagrama:

- $P_4 = 0.1$ MPa
- Fase = Liq. sat
- $h_4 = 70$ kJ/kg

0.3 pts

Corriente 5: Después del separador flash, $P_5 = 0.1$ MPa, y es vapor saturado. Entalpía se obtiene del diagrama:

- $P_5 = 0.1$ MPa
- Fase = Vap. sat
- $h_5 = 580$ kJ/kg

0.3 pts

Corriente 6: Primero necesitamos los flujos así que se deja para el final.

b) Para obtener los flujos se debe plantar un balance de materia y energía en el separador flash:

$$\dot{m}_3 = 50 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 \longrightarrow \dot{m}_3 - \dot{m}_4 = \dot{m}_5$$

0.2 pts

Del balance de energía para un sep. flash estacionario y adiabático, sin agitación:

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

$$\Longrightarrow \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_5 h_5$$

0.2 pts

Combinando ambas ecuaciones y despejando $\dot{m}_4$:

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 + (\dot{m}_3 - \dot{m}_4) h_5 \Longrightarrow \dot{m}_4 = \frac{\dot{m}_3 (h_3 - h_5)}{h_4 - h_5}$$

0.2 pts

$$\dot{m}_4 = \frac{50 \cdot (490 - 580)}{70 - 580} = 8.824 \text{ kg/min}$$

0.2 pts

Finalmente:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 = 50 - \dot{m}_4 = 41.176 \text{ kg/min}$$

0.2 pts

c) Ahora obtendremos el calor del intercambiador y la entalpía h_6:

Para esto se plantea un balance de energía en el HX:

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

$$\implies \dot{m}_5(h_5 - h_6) + \dot{m}_1(h_1 - h - 2) = 0$$

$$h_6 = \frac{m_1(h_1 - h_2)}{m_5} + h_5 = \frac{50(820 - 490)}{41.176} + 580 = 980$$

0.3 pts de la pregunta a)

El calor que se transmite es:

$$\dot{Q} = \dot{m}_5(h_6 - h_5) = \dot{m}_1(h_1 - h_2) = 16500 \text{ kJ/min}$$

0.2 de a pregunta c) pts

Solución: Forma 2

Siguiendo el mismo procedimiento pero con Nitrógeno, se obtendrá

a)

- $h_1 = 350$
- $h_2 = 185$
- $h_3 = 185$
- $h_4 = 30$
- $h_5 = 230$
- $h_6 = 116.25$

b)

- $\dot{m}_4 = 33.75$ kg/min
- $\dot{m}_5 = 116.25$ kg/min

c) $Q = 24750$ kJ/min