Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química y Bioprocesos
IIQ1003 - Termodinámica 2022-1

Pauta Tarea 2

Fecha de entrega: 24 de mayo a través de CANVAS.

La tarea debe ser trabajada en grupos de a 3. 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)

El ciclo dual es una serie de 5 procesos que utilizan los motores de combustión interna. Considere los siguientes procesos del ciclo, que utiliza aire que inicialmente esta a 300 K y 100 kPa y ocupa un volumen inicial de 14 L.

- 1-2: Una compresión adiabática y reversible tal que $V_1/V_2 = 9$.
- 2-3: Un calentamiento isocórico
- 3-4: Un calentamiento isobarico
- 4-5: Una expansión adiabática y reversible.
- 5-1: Un enfriamiento a volumen constante hasta volver al estado inicial (300 K y 100 kPa)

Considere que la cantidad de calor total añadida en los procesos de calentamiento es de 22.7 kJ y se agrega en partes de iguales entre estos dos procesos. Además $\gamma = 1.4$ y PM=29 kg/kmol. Determine:

a) La temperatura y presión de cada estado.

b) La cantidad de trabajo generado

c) El cambio de entropía para el gas en cada proceso

d) La eficiencia térmica del ciclo

Solución

Primero se importante calcular C_P y C_V. Para un gas ideal se tiene que:

$C_P - C_V = R \quad C_P/C_V = \gamma \Longrightarrow C_V = R/(\gamma - 1) = 20.785 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \quad C_P = 29.099 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$

a) Para cada estado:

Estado 1: $P_1 = 100$ kPa, $T_1 = 300$K, $V_1 = 14$ L

$$n = \frac{RT}{PV} = 0.56 \text{ mol}$$

Estado 2: $V_2 = V_1/9 = 1.56$L, luego de gas ideal para proceso adiabático:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma - 1} = 722.5 \text{ K}$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma} = 2167 \text{ kPa}$$

Estado 3: $V_3 = V_2 = 1.56$L, luego de gas ideal para un proceso isocórico y sabiendo que $Q_{23} = 11.35$kJ:

$$Q_{23} = \Delta U = nC_V(T_3 - T_2) \Longrightarrow T_3 = 1695.3$$

$$P_3 = \frac{nRT_3}{V_3} = 5086 \text{ kPa}$$

Estado 4: $P_4 = P_3 = 5086$L, luego de gas ideal para un proceso isobárico y sabiendo que $Q_{34} = 11.35$kJ:

$$Q_{34} = \Delta H = nC_P(T_4 - T_3) \Longrightarrow T_4 = 2390.2$$

$$V_4 = \frac{nRT}{P_4} = 2.19 \text{ L}$$

Estado 5: Este es luego de una expansión adiabática. Pero además se sabe que $V_5 = V_1 = 14$L. Luego:

$$T_5 = T_4 \left(\frac{V_4}{V_5}\right)^{\gamma-1} = 1138.7$$

$$P_5 = P_4 \left(\frac{V_4}{V_5}\right)^{\gamma} = 379.6 \text{ kPa}$$

b) Para la cantidad de trabajo generado se puede hacer de dos formas. Una es sacar el trabajo de cada proceso y la otra mediante los calores. Esto ya que para un ciclo:

$$Q + W = 0$$

Luego para el proceso 1-2:

$$Q_{12} = 0$$
$$W_{12} = nC_V(T_2 - T_1) = 4929 \text{ J}$$

Para el proceso 2-3:

$$Q_{23} = 11350 \text{ J}$$
$$W_{23} = 0 \text{ J}$$

Para el proceso 3-4:

$$Q_{34} = 11350 \text{ J}$$
$$W_{34} = -P(V_4 - V_3) = -3243\text{J}$$

Para el proceso 4-5:

$$Q_{45} = 0 \text{ J}$$
$$W_{45} = nC_V(T_5 - T_4) = -14601\text{J}$$

Para el proceso 5-1:

$$Q_{51} = nC_V(T_1 - T_1) = -9785 \text{ J}$$

$$W_{51} = 0\text{J}$$

Luego: $Q_T = 12915$ J y $W_T = -12915$ J.

c) Para el cambio de entropía del gas en cada proceso:

Para el proceso 1-2 al ser adiabático reversible

$$\delta S_{12} = 0$$

Para el proceso 2-3 al ser isocórico:

$$\Delta S_{23} = nC_V \ln \frac{T_3}{T_2} = 10.25 \text{ J/k}$$

Para el proceso 3-4 al ser isobárico:

$$\Delta S_{34} = nC_P \ln \frac{T_4}{T_3} = 5.611 \text{ J/k}$$

Para el proceso 4-5 al ser adiabático reversible

$$\delta S_{45} = 0$$

Finalmente para el proceso 5-1 al ser enfriamiento isocórico:

Para el proceso 2-3 al ser isocórico:

$$\Delta S_{51} = nC_V \ln \frac{T_1}{T_5} = -15.562 \text{ J/k}$$

d) Para la eficiencia térmica:

$$\eta = \frac{-W_T}{Q_{in}} = \frac{12915}{22700} = 56.89\,\%$$

Pregunta 2 (2 pts)

Usted esta trabajando como analista de inversión para una firma de energías renovables. A usted le encargan evaluar un nuevo sistema para generar trabajo desde energía sustentable

para decidir determinar si es factible el proceso y por ende invertir en el o no. Para esto le entregan los siguientes datos del proceso:

- Existe dos corrientes de entrada (F1 y F2) y dos corrientes de salida (F3 y F4), todas las corrientes son agua.
- F1 es una corriente de 4 kg/s a 1 bar y 450°C.
- F3 es una corriente de 5 kg/s a 200°Cy 2 bar.
- F4 es una corriente de 3 kg/s a 4 bar y 400°C.
- F2 esta a 1 bar,
- El proceso opera de manera estacionaria, es adiabático y genera 1174.9 kW

a) Evalué la factibilidad del proceso propuesto y determine si vale la pena invertir o no

b) En el caso de que no sea factible determine la cantidad de calor que se debe retirar o agregar del proceso para que se vuelva factible.

Solución

a) Para que el proceso sea factible se debe tener que $\dot{S}_{gen} \geq 0$. Primero se caracterizan las corrientes, sacando su entalpía y entropía.

La primera corriente se obtiene por interpolación simple entre temperaturas:

$$h_1 = 3382.4 \quad s_1 = 8.6926$$

La tercera corriente pro medio de interpolación simple entre presiones:

$$h_3 = 2870.5 \quad s_3 = 7.5066$$

Finalmente la cuarta corriente por interpolación simple entre presiones:

$$h_4 = 3273.4 \quad s_4 = 7.8985$$

Luego se plantea el balance de materia para el sistema:

$$\frac{dM}{dt}^{0} = F_1 + F_2 - F_3 - F_4$$

$$F_2 = 8 - 4 = 4 \text{ kg/s}$$

Del balance de energía:

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

$$F_1 h_1 + F_2 h_2 - F_3 h_3 - F_4 h_4 + \dot{W}_s \Longrightarrow h_2 = \frac{F_3 h_3 + F_4 h_4 - F_1 h_1 - \dot{W}_s}{F_2} = 2954.5$$

Luego por en 1 bar y la entalpía h_2:

$$s_2 = 7.9949$$

Finalmente del balance de entropía:

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

$$F_1 s_1 + F_2 s_2 - F_3 s_3 - F_4 s_4 + \dot{S}_{gen} \Longrightarrow \dot{S}_{gen} = -5.5215 \text{ kW/K}$$

Por lo que el proceso no es factible y no se recomienda invertir.

b) Para que se cumpla el balance manteniendo los flujos constantes agregando removiendo calor a 20°C se tendria que:

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

$$(F_4 s_4 + F_3 s_3 - F_2 s_2 - F_1 s_1) T = \dot{Q} \longrightarrow \dot{Q} = -5.5215 \cdot 293.15 = -1619 \text{ kW}$$

Pregunta 3 (2 pts)

Usted esta trabajando como ingeniero de proyectos en una planta química. Le piden diseñar dos estanque para almacenar 80 kmol de CO2 a 310 K. Uno debe estar a 8 bar y el otro a 75 bar. Calcule el volumen que debe tener cada estanque utilizando:

a) La ecuación de Gas Ideal

b) El método de Lee Kesler

c) La ecuación virial truncada al segundo coeficiente.

d) La ecuación de Van der Waals.

e) La ecuación de Soave-Redlich-Kwong.

f) La ecuación de Peng Robinson.

g) Considerando que el valor real para los volúmenes específicos son de 70.58 L/kg y 3.90 L/kg respectivamente,

Además discuta cual de estas predicen comportamientos similares, y cuales se alejan del resto: ¿Cuál EOS tiene menor % de error en los cálculos? ¿A que presión se desvia más del comportamiento ideal? ¿Por qué? ¿Qué problemas puede tener diseñar el estanque usando una EOS muy básica o usar gas ideal?

Solución

Este ejercicio utilizara Wolfram para despejar los volúmenes, el codigo se encuentra como anexo al final. Se tiene además que $P_C = 73.82$ bar, $T_C = 304.2$K y $\omega = 0.228$.

a) Para un gas ideal:

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{80 \cdot 0.08314 \cdot 310}{8} = 257.73 \text{ m}^3$$
$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{80 \cdot 0.08314 \cdot 310}{75} = 27.49 \text{ m}^3$$

0.2 pts

b) Para Lee-Kesler a 8 bar

$$P_r = 0.108 \quad T_r = 1.02 \longrightarrow Z^{(0)} = 0.98; \; Z^{(1)} = -0.01$$

$$Z = Z^{(0)} + \omega Z^{(1)} = 0.9772$$

$$V = Z\frac{nRT}{P} = 251.99 \text{ m}^3$$

Similarmente para 75 bar:

$$V = 11.19 \text{ m}^3$$

0.3 pts. Nota la segunda presión es dificil de sacar del gráfico asique ser flexibles en la respuesta.

c) Para la EOS virial truncada al segundo coeficiente a 8 bar:

$$Z = 1 + \frac{B}{v} \Longrightarrow P = \left(1 + \frac{B}{v}\right)\frac{RT}{v}$$

Donde

$$B^0 = 0.083 - \frac{0.422}{T_r^{1.6}} = -0.3264 \quad ; \quad B^1 = 0.139 - \frac{0.172}{T_{\text{r}}^{4.2}} = -0.01988$$

$$\frac{BP_c}{RT_c} = B^0 + \omega B^1 = -0.1133$$

Luego usando Wolfram Mathematica para encontrar el volumen.

$$v_1 = 3.104\text{m}^3/\text{kmol} \quad v_2 = 0.1176\text{m}^3/\text{kmol}$$

Se debe escoger el volumen más grande, que corresponde a la fase gaseosa. Luego:

$$V = n \cdot v_1 = 248.319 \text{ m}^3$$

0.2 pts

Para 75 bar no existe solución real por lo que no se puede obtener un volumen.

d) Para VDW 8 bar

$$a = \frac{27}{64}\frac{(RT_c)^2}{P_c} = 3.655 \quad ; \quad b = \frac{1}{8}\frac{RT_c}{P_c} = 0.04282$$

Luego usando Wolfram Mathematica para encontrar el volumen tal que:

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v^2}$$

$$v = 3.12 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

$$V = n \cdot v = 249.6 \text{ m}^3$$

Similarmente para 75 bar:

$$V = 14.44 \text{ m}^3$$

0.3 pts

e) Para SRK 8 bar:

$$\Omega = 0.480 + 1.574\omega - 0.176\omega^2 = 0.829$$

$$a = 0.42748 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \left[1 + \Omega \left(1 - T_r^{1/2}\right)\right]^2 = 3.646$$

$$b = 0.08664 \frac{RT_c}{P_c} = 0.02968$$

Luego usando Wolfram Mathematica para encontrar el volumen tal que:

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v\,(v + b)}$$

$$v_1 = 3.107 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

(Se debe escoger el volumen más grande en ambas presiones si hay más de uno, que corresponde a la fase gaseosa). Luego:

$$V = n \cdot v_3 = 248.598 \text{ m}^3$$

Similarmente para 75 bar:

$$V = 14.322 \text{m}^3$$

0.3 pts

f) Para PR:

$$\Omega = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 = 0.714$$

$$a = 0.45724\frac{R^2T_c^2}{P_c}\left[1 + \Omega\left(1 - T_r^{1/2}\right)\right]^2 = 3.908$$

$$b = 0.07780\frac{RT_c}{P_c} = 0.0266$$

Luego usando Wolfram Mathematica para encontrar el volumen tal que:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2 + 2bV_m - b^2}$$

$$v_1 = 3.0944 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

Se debe escoger el volumen real más grande, que corresponde a la fase gaseosa. Luego:

$$V = n \cdot v_1 = 247.556 \text{ m}^3$$

Similarmente para 75 bar:

$$V = n \cdot v = 13.5349 \text{ m}^3$$

0.3 pts

g) Con los valores reales

$$V = 80 \cdot PM \cdot 70.58/1000 = 248.44 \text{ m}^3$$
$$V = 80 \cdot PM \cdot 3.9/1000 = 13.728 \text{ m}^3$$

Como se ve todas las EOS predicen un comportamietno similar y cercano al real a bajas presiones. Sin embargo cuando se sube la presión, el modelo de gas ideal y lee Kesler se desvían enormemente. Luego VDW y SRK tiene un comportamiento más cercano al real, pero todavia no es tan cercano, mientras que PR consigue un número casi igual. Esto se debe a que a altas presiones el gas se desvia del comportamiento ideal, debido a que las

interacciones moleculares como también el volumen de las moléculas se vuelven relevantes al estar más comprimidos. Por lo mismo, si se diseña el estanque usando Gas ideal se puede diseñar el estanque con hasta 2 veces la capacidad necesaria, lo que involucra un gasto mucho mayor.