

SOLUZIONI problemi cap.8

8.1

La pressione del vapore è mantenuta costante. Perciò, la temperatura del vapore rimane costante anche alla temperatura

$$T = T_{\text{sat a 200 kPa}} = 120.2^\circ\text{C}$$

Se si suppone che la trasformazione non implichi irreversibilità interne come l'attrito, si può supporre che il vapore abbia subito una trasformazione isoterma internamente reversibile e quindi $S_{\text{gen, sis}} = 0$. Inoltre lo scambio di calore con la sorgente termica è una trasformazione reversibile e quindi non è generata entropia nella sorgente, $S_{\text{gen, sorg}} = 0$. Quindi l'unico luogo dove può essere generata entropia è il mezzo tra la sorgente e il vapore attraverso cui la temperatura scende da 500 °C a 120,2 °C. Se si sceglie come sistema questa «buffer zone» (che è un sistema chiuso perché nel sistema non entra massa né esce massa dal sistema) e si applica il bilancio di entropia, si ottiene

$$\Delta S \approx 0 = \sum \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{\text{gen}} \rightarrow \dot{S}_{\text{gen}} = -\sum \frac{\dot{Q}}{T}$$

Si noti che $\Delta S = 0$ per la buffer zone perché in questa zona lo stato rimane ovunque invariato durante la trasformazione. Quindi l'entropia generata durante la trasformazione diventa

$$S_{\text{gen}} = -\left[\left(\frac{Q}{T} \right)_{\text{contorno del vapore}} - \left(\frac{Q}{T} \right)_{\text{contorno della sorgente}} \right] = -\left[\frac{-450 \text{ kJ}}{393.4 \text{ K}} + \frac{450 \text{ kJ}}{773.2 \text{ K}} \right] = 0.562 \text{ kJ / K}$$

Questa trasformazione è **irreversibile** perché l'entropia generata è una quantità positiva.

8.2

Si tratta di una trasformazione isoterma di scambio di calore, che è reversibile. Perciò, durante questa trasformazione non è generata entropia e il bilancio di entropia per il fluido o per la sorgente (o per la combinazione dei due) può essere scritto come

$$\Delta S = \sum \frac{Q}{T} + S_{\text{gen}} \approx 0 \rightarrow \Delta S = \sum \frac{Q}{T}$$

Perciò,

(a)

$$\Delta S_{\text{fluido}} = \frac{Q_{\text{fluido}}}{T_{\text{fluido}}} = \frac{+900 \text{ kJ}}{673 \text{ K}} = 1.337 \text{ kJ / K}$$

(b)

$$\Delta S_{\text{sorgente}} = \frac{Q_{\text{sorgente}}}{T_{\text{sorgente}}} = \frac{-Q}{T_{\text{sorgente}}} = \frac{-900 \text{ kJ}}{673 \text{ K}} = -1.337 \text{ kJ / K}$$

(c) $S_{\text{gen}} = 0$ perché la trasformazione è reversibile, come si può vedere anche scrivendo

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{totale}} = \Delta S_{\text{fluido}} + \Delta S_{\text{sorgente}} = 1.337 - 1.337 = 0$$

8.3

(a) La pressione del refrigerante è mantenuta costante. Quindi la temperatura del refrigerante rimane costante anche a

$$T = T_{\text{sat a 200 kPa}} = -10.09^\circ \text{C} = 263 \text{ K}$$

Se si suppone che la trasformazione non implichi irreversibilità interne come l'attrito, si può supporre che il vapore abbia subito una trasformazione isoterma, internamente reversibile, e quindi $S_{\text{gen, sis}} = 0$. Ciò vale anche per l'ambiente raffreddato. Applicando il bilancio di entropia, la variazione di entropia per il sistema è data da

$$\Delta S_{\text{fluido}} = \sum \frac{Q}{T} + S_{\text{gen}} \approx 0 = \frac{Q}{T_{\text{fluido}}} = \frac{120 \text{ kJ}}{263 \text{ K}} = 0.456 \text{ kJ / K}$$

$$\Delta S_{\text{fluido}} = \frac{Q_{\text{fluido}}}{T_{\text{fluido}}} = \frac{120 \text{ kJ}}{263 \text{ K}} = 0.456 \text{ kJ / K}$$

(b) La variazione di entropia dell'ambiente raffreddato si ottiene analogamente da

$$\Delta S = \frac{Q}{T_{\text{ambiente}}} = \frac{-120 \text{ kJ}}{268 \text{ K}} = -0.448 \text{ kJ / K}$$

(c) In assenza di trasporto di massa, l'entropia totale generata è uguale alla variazione totale di entropia. Perciò,

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{totale}} = \Delta S_{\text{fluido}} + \Delta S_{\text{ambiente}} = 0.456 - 0.448 = 0.008 \text{ kJ / K}$$

8.4

Assumiamo come sistema il blocco di rame e l'acqua. Allora l'equazione di conservazione dell'energia per questa trasformazione si riduce a

$$Q^{\text{in}} - L^{\text{out}} = \Delta U + \Delta E_c^{\text{in}} + \Delta E_p^{\text{in}} \longrightarrow \Delta U_{\text{rame}} + \Delta U_{\text{acqua}} = 0$$

ossia

$$[mC(T_2 - T_1)]_{\text{rame}} + [mC(T_2 - T_1)]_{\text{acqua}} = 0$$

Inoltre,

$$m_{\text{acqua}} = \rho V = (1000 \text{ kg / m}^3)(0.120 \text{ m}^3) = 120 \text{ kg}$$

Usando i valori dei calori specifici per il rame e l'acqua liquida indicati nella Tabella A.3a, otteniamo

$$(50 \text{ kg})(0.386 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})(T_2 - 80^\circ \text{C}) + (120 \text{ kg})(4.184 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})(T_2 - 25^\circ \text{C}) = 0$$

$$T_2 = 27.0^\circ \text{C}$$

La variazione di entropia di differenti parti del sistema durante questa trasformazione è data da

$$\Delta S_{\text{rame}} = m c_{\text{med}} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = (50 \text{ kg})(0.386 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}) \ln\left(\frac{300.0 \text{ K}}{353 \text{ K}}\right) = -3.140 \text{ kJ / K}$$

$$\Delta S_{\text{acqua}} = m c_{\text{med}} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = (120 \text{ kg})(4.184 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}) \ln\left(\frac{300.0 \text{ K}}{298 \text{ K}}\right) = 3.358 \text{ kJ / K}$$

Applicando il bilancio di entropia al sistema complessivo (rame + acqua), che è adiabatico, otteniamo

$$\Delta S = \sum \frac{Q}{T} + S_{\text{gen}} \rightarrow S_{\text{gen,tot}} = \Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{acqua}} + \Delta S_{\text{rame}}$$

Sostituendo, otteniamo l'entropia totale generata durante questa trasformazione

$$S_{\text{gen,tot}} = \Delta S_{\text{acqua}} + \Delta S_{\text{rame}} = 3.358 - 3.140 = \mathbf{0.218 \text{ kJ / K}}$$

8.5

Assumiamo come sistema i blocchi di ferro e di alluminio. Quindi l'equazione di conservazione dell'energia per questa trasformazione si riduce a

$$Q^{\text{no}} - L^{\text{no}} = \Delta U + \Delta e_c^{\text{no}} + \Delta e_p^{\text{no}} \longrightarrow \Delta U_{\text{ferro}} + \Delta U_{\text{alluminio}} = 0$$

ossia

$$[mC(T_2 - T_1)]_{\text{ferro}} + [mC(T_2 - T_1)]_{\text{alluminio}} = 0$$

Usando i valori del calore specifico dell'alluminio alla temperatura media prevista di 450 K, otteniamo

$$(20 \text{ kg})(0.45 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})(T_2 - 100^\circ \text{C}) + (20 \text{ kg})(0.973 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})(T_2 - 200^\circ \text{C}) = 0$$

$$T_2 = \mathbf{168.4^\circ \text{C} = 441.4 \text{ K}}$$

La variazione di entropia di differenti parti del sistema durante questa trasformazione è data da

$$\Delta S_{\text{ferro}} = m c_{\text{med}} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = (20 \text{ kg})(0.45 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}) \ln\left(\frac{441.4 \text{ K}}{373 \text{ K}}\right) = 1.515 \text{ kJ / K}$$

$$\Delta S_{\text{alluminio}} = m c_{\text{med}} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = (20 \text{ kg})(0.973 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}) \ln\left(\frac{441.4 \text{ K}}{473 \text{ K}}\right) = -1.346 \text{ kJ / K}$$

Quindi, applicando il bilancio di entropia al sistema complessivo, che è adiabatico, otteniamo

$$\Delta S = \sum \frac{Q}{T} + S_{\text{gen}} \rightarrow S_{\text{gen,tot}} = \Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{ferro}} + \Delta S_{\text{alluminio}}$$

Sostituendo, otteniamo l'entropia totale generata durante questa trasformazione

$$S_{\text{gen,tot}} = \Delta S_{\text{ferro}} + \Delta S_{\text{alluminio}} = 1.515 - 1.346 = \mathbf{0.169 \text{ kJ / K}}$$

8.6

Assumiamo come sistema il blocco di ferro e l'acqua. Quindi l'equazione di conservazione dell'energia per questa trasformazione si riduce a

$$Q^{\text{in}} - L^{\text{out}} = \Delta U + \Delta E_c^{\text{in}} + \Delta E_p^{\text{in}} \longrightarrow \Delta U_{\text{ferro}} + \Delta U_{\text{acqua}} = 0$$

ossia

$$\left[mC(T_2 - T_1) \right]_{\text{ferro}} + \left[mC(T_2 - T_1) \right]_{\text{acqua}} = 0$$

Usando i valori dei calori specifici del ferro e dell'acqua liquida indicati nella Tabella A.3a, otteniamo

$$(50 \text{ kg})(0.386 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})(T_2 - 80^\circ \text{C}) + (120 \text{ kg})(4.184 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})(T_2 - 25^\circ \text{C}) = 0$$

$$T_2 = \mathbf{27.0^\circ \text{C}}$$

La variazione di entropia di differenti parti del sistema durante questa trasformazione è data da

$$\Delta S_{\text{ferro}} = m c_{\text{med}} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = (5 \text{ kg})(0.45 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}) \ln\left(\frac{296.7 \text{ K}}{623 \text{ K}}\right) = -1.67 \text{ kJ / K}$$

$$\Delta S_{\text{acqua}} = m c_{\text{med}} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = (100 \text{ kg})(4.184 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}) \ln\left(\frac{296.7 \text{ K}}{295 \text{ K}}\right) = 2.47 \text{ kJ / K}$$

Quindi, applicando il bilancio di entropia al sistema complessivo (rame + acqua), che è adiabatico, otteniamo

$$\Delta S = \sum \frac{Q}{T} + S_{\text{gen}} \rightarrow S_{\text{gen,tot}} = \Delta S_{\text{tot}} = \Delta S_{\text{acqua}} + \Delta S_{\text{ferro}}$$

Sostituendo, otteniamo l'entropia totale generata durante questa trasformazione

$$S_{\text{gen,total}} = \Delta S_{\text{water}} + \Delta S_{\text{iron}} = 2.47 - 1.67 = \mathbf{0.80 \text{ kJ / K}}$$

8.7

Nelle condizioni specificate, l'ossigeno può essere assimilato a un gas perfetto. Assumendo calori specifici costanti alla temperatura media, otteniamo

$$T_{\text{med}} = \frac{298 + 560}{2} = 429 \text{ K} \longrightarrow c_{v, \text{med}} = \mathbf{0.690 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}}$$

Perciò,

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= c_{v, \text{med}} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \\ &= (0.690 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}) \ln \frac{560 \text{ K}}{298 \text{ K}} + (0.2598 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}) \ln \frac{0.1 \text{ m}^3 / \text{kg}}{0.8 \text{ m}^3 / \text{kg}} \\ &= \mathbf{-0.105 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}} \end{aligned}$$

8.8

Nelle condizioni specificate l'aria può essere assimilata a un gas perfetto. La massa dell'aria e il lavoro elettrico compiuto durante questa trasformazione sono

$$m = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{(120 \text{ kPa})(0.3 \text{ m}^3)}{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{K})(290 \text{ K})} = 0.4325 \text{ kg}$$

$$L_e = \dot{L}_e \Delta t = (-0.2 \text{ kJ / s})(15 \times 60 \text{ s}) = -180 \text{ kJ}$$

L'equazione del primo principio per la trasformazione a pressione costante di questo sistema adiabatico ($\Delta U + L_e = \Delta H$) si semplifica diventando

$$Q^{\text{no}} - L_e - L_v = \Delta U + \Delta E_c^{\text{no}} + \Delta E_p^{\text{no}} \longrightarrow -L_e = \Delta H = m(h_2 - h_1)$$

Usando un valore di c_p a 450 K, la temperatura finale diventa

$$-L_e = m c_p (T_2 - T_1)$$

Perciò,

$$T_2 = T_1 - \frac{L_e}{m c_p} = 290 \text{ K} - \frac{-180 \text{ kJ}}{(0.4325 \text{ kg})(1.02 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})} = 698 \text{ K}$$

Quindi la variazione di entropia diventa

$$\begin{aligned} \Delta S_{\text{sis}} &= m(s_2 - s_1) = m \left(c_{p, \text{med}} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{P_2^{\text{no}}}{P_1} \right) = m c_{p, \text{med}} \ln \frac{T_2}{T_1} \\ &= (0.4325 \text{ kg})(1.020 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}) \ln \left(\frac{698 \text{ K}}{290 \text{ K}} \right) \\ &= \mathbf{0.387 \text{ kJ / K}} \end{aligned}$$

8.9

Assimilando l'azoto gassoso a un gas perfetto e assumendo calori specifici costanti a temperatura ambiente, otteniamo

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \longrightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} = (300 \text{ K})(2)^{1.3-1} = 369.3 \text{ K}$$

Quindi la variazione di entropia dell'azoto diventa

$$\begin{aligned}\Delta S_{N_2} &= m \left(c_{p, \text{med}} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right) \\ &= (1.2 \text{ kg}) \left((0.744 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \ln \frac{369.3 \text{ K}}{300 \text{ K}} + (0.297 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \ln(0.5) \right) \\ &= \mathbf{0.0615 \text{ kJ/K}}\end{aligned}$$

8.10

Se si assume come sistema l'intero recipiente rigido, l'equazione di conservazione dell'energia per questo sistema chiuso si riduce a

$$Q^{\rightarrow 0} - L^{\rightarrow 0} = \Delta U + \Delta E_c^{\rightarrow 0} + \Delta E_p^{\rightarrow 0} \quad \longrightarrow \quad m c_v (T_2 - T_1) = 0 \quad \longrightarrow \quad T_1 = T_2$$

Quindi la variazione di entropia di questo gas perfetto è data da

$$\begin{aligned}\Delta S &= N \left(\bar{c}_{p, \text{med}} \ln \frac{T_2}{T_1} + R_u \ln \frac{V_2}{V_1} \right) = N R_u \ln \frac{V_2}{V_1} \\ &= (5 \text{ kmol}) (8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}) \ln(2) \\ &= \mathbf{28.81 \text{ kJ/K}}\end{aligned}$$

Questa variazione di entropia è anche uguale all'entropia generata durante questa trasformazione perché l'applicazione del bilancio di entropia a questo sistema chiuso adiabatico dà

$$\Delta S = \sum \frac{Q}{T} + S_{\text{gen}} \quad \rightarrow \quad S_{\text{gen}} = \Delta S$$

8.11

Nelle condizioni specificate l'aria può essere assimilata a un gas perfetto. La trasformazione è reversibile e adiabatica (cioè, isoentropica), quindi si possono applicare le relazioni per le trasformazioni isoentropiche. Assumendo calori specifici costanti, otteniamo

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} = (290 \text{ K}) \left(\frac{800 \text{ kPa}}{100 \text{ kPa}} \right)^{0.4/1.4} = \mathbf{525.3 \text{ K}}$$

Quindi,

$$T_{\text{med}} = (290 + 525.3) / 2 = 407.7 \text{ K} \quad \longrightarrow \quad c_{v, \text{med}} = 0.727 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}$$

Il lavoro compiuto durante questa trasformazione, determinato mediante l'equazione di conservazione dell'energia in un sistema chiuso, è

$$q^{\text{no}} - l = \Delta u + \Delta e_c^{\text{no}} + \Delta e_p^{\text{no}} \quad \longrightarrow \quad l = -(u_2 - u_1)$$

Perciò,

$$l = -c_{v, \text{med}}(T_2 - T_1) = -(0.727 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})(525.3 - 290)\text{K} = -171.1 \text{ kJ / kg}$$

8.12

(a) Nelle condizioni specificate l'aria può essere assimilata a un gas perfetto. Ci attendiamo che la caduta di temperatura nell'ugello sia piccola e quindi assumiamo calori specifici costanti a temperatura ambiente. Dalla Tabella A.2a troviamo $k = 1,4$ e $c_p = 1,005 \text{ kJ / (kg} \cdot \text{K)}$. L'entalpia in uscita, determinata con l'equazione di conservazione dell'energia per un sistema a flusso stazionario, è

$$q - l^{\text{no}} = \Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p^{\text{no}} \quad \longrightarrow \quad q = c_p (T_2 - T_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}$$

Risolvendo rispetto a T_2 , otteniamo

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 + \frac{q}{c_p} - \frac{V_2^2 - V_1^2}{2c_p} \\ &= 350 \text{ K} + \frac{-3.2 \text{ kJ / kg}}{1.005 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}} - \frac{(320 \text{ m / s})^2 - (50 \text{ m / s})^2}{2(1.005 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})} \left(\frac{1 \text{ kJ / kg}}{1000 \text{ m}^2 / \text{s}^2} \right) = 297 \text{ K} \end{aligned}$$

(b) La variazione di entropia dell'aria durante questa trasformazione è

$$\Delta s_{\text{aria}} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} = (1.005 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}) \ln \frac{297 \text{ K}}{350 \text{ K}} - (0.287 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}) \ln \frac{85 \text{ kPa}}{280 \text{ kPa}} = 0.177 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}$$

L'entropia totale generata durante questa trasformazione si determina applicando il bilancio di entropia a un *sistema esteso* comprendente il sistema stesso e il suo ambiente immediato (affinché la temperatura al contorno del sistema esteso sia uguale alla temperatura dell'ambiente immediato),

$$\frac{dS_{\text{sist est}}}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{m}(s_i - s_e) + \dot{S}_{\text{gen, tot}} \rightarrow 0 = \frac{q}{T_{\text{ambimm}}} - (s_2 - s_1) + s_{\text{gen, total}}$$

Si noti $dS_{\text{sist est}}/dt = 0$ perché lo stato rimane invariato dovunque nel sistema esteso durante una trasformazione stazionaria. Quindi l'entropia totale generata durante questa trasformazione diventa

$$s_{\text{gen, tot}} = \Delta s - \frac{q}{T_{\text{ambimm}}} = 0.177 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} - \frac{-3.2 \text{ kJ/kg}}{293 \text{ K}} = 0.188 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

Questa trasformazione soddisfa il principio dell'aumento dell'entropia perché l'entropia generata è positiva.

8.13

(a) Nelle condizioni specificate l'aria può essere assimilata a un gas perfetto. Assumendo calori specifici costanti alla temperatura media, otteniamo,

$$T_{\text{med}} = \frac{290 + 600}{2} = 445 \text{ K} \rightarrow c_p \cong c_p \text{ a } T_{\text{med}} = 1.019 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

La portata massica dell'aria, determinata con l'equazione di conservazione dell'energia per un sistema a flusso stazionario, è

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m}(\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p) \rightarrow \dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \left(c_p (T_2 - T_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right)$$

Sostituendo, otteniamo

$$\frac{-1500 \text{ kJ}}{60 \text{ s}} - (-300 \text{ kJ/s}) = \dot{m} \left((1.019 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K})(600 - 290) + \frac{(120 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) \right)$$

Da cui

$$\dot{m} = 0.851 \text{ kg/s}$$

(b) La variazione di entropia dell'aria durante questa trasformazione è

$$\begin{aligned}\Delta s_{\text{aria}} &= \dot{m}(s_2 - s_1) = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \\ &= (0.851 \text{ kg/s}) \left((1.019 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}) \ln \frac{600 \text{ K}}{290 \text{ K}} - (0.287 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}) \ln \frac{1000 \text{ kPa}}{96 \text{ kPa}} \right) = 0.0581 \text{ kW/K}\end{aligned}$$

L'entropia totale generata durante questa trasformazione si determina applicando il bilancio entropico a un *sistema esteso* comprendente il sistema stesso e il suo ambiente immediato (affinché la temperatura al contorno del sistema esteso sia uguale alla temperatura dell'ambiente immediato),

$$\frac{dS_{\text{sist est}}}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{m}(s_e - s_u) + \dot{S}_{\text{gen, tot}} \quad \rightarrow \quad 0 = \frac{\dot{Q}}{T_{\text{ambimm}}} + \dot{m}(s_1 - s_2) + \dot{S}_{\text{gen, tot}}$$

Si noti che $dS_{\text{sist est}}/dt = 0$ perché lo stato rimane invariato dovunque nel sistema esteso durante una trasformazione stazionaria. Quindi l'entropia totale generata durante questa trasformazione diventa

$$\dot{S}_{\text{gen, tot}} = \Delta \dot{S} - \frac{\dot{Q}}{T_{\text{ambimm}}} = 0.0581 \text{ kW/K} - \frac{-1500/60 \text{ kW}}{290 \text{ K}} = \mathbf{0.144 \text{ kW/K}}$$

Questa trasformazione soddisfa il principio dell'aumento dell'entropia perché l'entropia generata è positiva.

8.14

La portata massica massima si realizzerà quando l'intera trasformazione è reversibile. Perciò si può determinarla con l'equazione del lavoro per un sistema a flusso stazionario per un liquido,

$$\dot{L} = \dot{m} \left(- \int_1^2 v dp + \Delta e_c + \Delta e_p \right) = \dot{m} \left\{ v(p_1 - p_2) + g(z_2 - z_1) \right\}$$

Perciò,

$$-15 \text{ kJ/s} = \dot{m} \left\{ (0.001 \text{ m}^3/\text{kg})(120 - 3000) \text{ kPa} \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3} \right) + (9.8 \text{ m/s}^2)(10 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) \right\}$$

da cui

$$\dot{m} = \mathbf{5.39 \text{ kg/s}}$$

8.15

Nelle condizioni specificate l'elio può essere assimilato a un gas perfetto. La portata massica dell'elio è data da

$$\dot{m} = \frac{p_1 \dot{V}_1}{RT_1} = \frac{(80 \text{ kPa})(0.2 \text{ m}^3 / \text{s})}{(2.0769 \text{ kJ} / \text{kg} \cdot \text{K})(293 \text{ K})} = 0.0263 \text{ kg} / \text{s}$$

(a) Compressione isoentropica con $k = 1,667$,

$$\begin{aligned} \dot{L}_{\text{compr}} &= \dot{m} \int_1^2 v dp = \dot{m} \int_1^2 \left(\frac{C_{\text{ost}}}{p} \right)^{1/k} dp = \dot{m} \frac{kRT_1}{k-1} \left\{ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} \right\} \\ &= (0.0263 \text{ kg} / \text{s}) \frac{(1.667)(2.0769 \text{ kJ} / \text{kg} \cdot \text{K})(293 \text{ K})}{1.667 - 1} \left\{ 1 - \left(\frac{600 \text{ kPa}}{80 \text{ kPa}} \right)^{0.667/1.667} \right\} \\ &= -49.6 \text{ kW} \end{aligned}$$

(b) Compressione politropica con $n = 1,2$,

$$\begin{aligned} \dot{L}_{\text{compr}} &= \dot{m} \int_1^2 v dp = \dot{m} \int_1^2 \left(\frac{C_{\text{ost}}}{p} \right)^{1/n} dp = \dot{m} \frac{nRT_1}{n-1} \left\{ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} \right\} \\ &= (0.0263 \text{ kg} / \text{s}) \frac{(1.2)(2.0769 \text{ kJ} / \text{kg} \cdot \text{K})(293 \text{ K})}{1.2 - 1} \left\{ 1 - \left(\frac{600 \text{ kPa}}{80 \text{ kPa}} \right)^{0.2/1.2} \right\} \\ &= -38.3 \text{ kW} \end{aligned}$$

(c) Compressione isoterma,

$$\begin{aligned} \dot{L}_{\text{compr}} &= \dot{m} \int_1^2 v dp = \dot{m} \int_1^2 \left(\frac{C_{\text{ost}}}{p} \right) dp = \dot{m} RT \ln \frac{p_1}{p_2} \\ &= (0.0263 \text{ kg} / \text{s})(2.0769 \text{ kJ} / \text{kg} \cdot \text{K})(293 \text{ K}) \ln \frac{80 \text{ kPa}}{600 \text{ kPa}} = -32.2 \text{ kW} \end{aligned}$$

8.16

Nelle condizioni specificate l'aria può essere assimilata a un gas perfetto.

(a) Compressione isoentropica con $k = 1,4$,

$$\dot{L}_{\text{compr}} = \dot{m} \int_1^2 v dp = \dot{m} \int_1^2 \left(\frac{C_{\text{ost}}}{p} \right)^{1/k} dp = \dot{m} \frac{kRT_1}{k-1} \left\{ 1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k} \right\}$$

ossia

$$-10 \text{ kJ/s} = \dot{m} \frac{(1.4)(0.287 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K})(300 \text{ K})}{1.4-1} \left\{ 1 - (480 \text{ kPa}/80 \text{ kPa})^{0.4/1.4} \right\}$$

da cui

$$\dot{m} = \mathbf{0.048 \text{ kg/s}}$$

(b) Compressione politropica con $n = 1,3$,

$$\dot{L}_{\text{compr}} = \dot{m} \int_1^2 v dp = \dot{m} \int_1^2 \left(\frac{C_{\text{ost}}}{p} \right)^{1/n} dp = \dot{m} \frac{nRT_1}{n-1} \left\{ 1 - (p_2/p_1)^{(n-1)/n} \right\}$$

ossia

$$-10 \text{ kJ/s} = \dot{m} \frac{(1.3)(0.287 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K})(300 \text{ K})}{1.3-1} \left\{ 1 - (480 \text{ kPa}/80 \text{ kPa})^{0.3/1.3} \right\}$$

da cui

$$\dot{m} = \mathbf{0.051 \text{ kg/s}}$$

(c) Compressione isoterma,

$$\dot{L}_{\text{compr}} = \dot{m} \int_1^2 v dp = \dot{m} \int_1^2 \left(\frac{C_{\text{ost}}}{p} \right) dp = \dot{m} RT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

ossia

$$-10 \text{ kJ / s} = \dot{m}(0.287 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})(300 \text{ K}) \ln\left(\frac{80 \text{ kPa}}{480 \text{ kPa}}\right)$$

da cui

$$\dot{m} = 0.063 \text{ kg / s}$$

8.17

Nelle condizioni specificate l'aria può essere assimilata a un gas perfetto. L'aria subisce una trasformazione reversibile e adiabatica (cioè, isoentropica), quindi si possono applicare le relazioni per le trasformazioni isoentropiche. Assumendo calori specifici costanti, la temperatura in uscita è data da

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k} = (520 \text{ K}) \left(\frac{80 \text{ kPa}}{400 \text{ kPa}}\right)^{0.4/1.4} = 328 \text{ K}$$

Il calore specifico dell'aria alla temperatura media di $(520 \text{ K} + 328 \text{ K})/2 = 424 \text{ K}$ è $c_p = 1,016 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Quindi la velocità in uscita, determinata con l'equazione di conservazione dell'energia per un sistema a flusso stazionario, è

$$q^{\dot{0}} - l^{\dot{0}} = \Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p^{\dot{0}} \quad \longrightarrow \quad 0 = c_p (T_2 - T_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}$$

Perciò,

$$V_2 = \sqrt{2c_p (T_1 - T_2) + V_1^2} = \sqrt{2(1.016 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K})(520 - 328) \text{K} \left(\frac{1000 \text{ m}^2 / \text{s}^2}{1 \text{ kJ / kg}}\right) + (60 \text{ m / s})^2} = 627 \text{ m / s}$$

8.18

L'area della superficie deputata agli scambi di calore è

$$A = (\pi d) l = \pi (0.005 \text{ m})(0.5 \text{ m}) = 7.854 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Assumiamo l'acqua come sistema, che è un sistema chiuso, e applichiamo l'equazione del primo principio:

$$\begin{aligned} Q - L^{\dot{}} &= \Delta U + \Delta E_c^{\dot{}} + \Delta E_p^{\dot{}} \\ Q &= m(u_2 - u_1) \\ \dot{Q}\Delta t &= mc(T_2 - T_1) \end{aligned}$$

Sostituendo, otteniamo

$$(800 \text{ J / s})\Delta t = (40 \text{ kg})(4184 \text{ J / kg}\cdot^\circ\text{C})(80 - 20)^\circ\text{C}$$

Risolvendo rispetto a Δt , otteniamo

$$\Delta t = 12,522 \text{ s} = 209.2 \text{ min} = 3.487 \text{ h}$$

Applicando il bilancio entropico al recipiente, che è un sistema chiuso adiabatico, otteniamo

$$\Delta S = \sum \frac{Q}{T} + S_{\text{gen}} \rightarrow S_{\text{gen,tot}} = \Delta S_{\text{tot}} = \Delta S_{\text{acqua}} + \Delta S_{\text{risc}} \cong \Delta S_{\text{acqua}} = mc \ln \frac{T_2}{T_1}$$

perché la variazione di entropia dell'elemento scaldante è trascurabile in virtù della sua massa relativamente piccola. Sostituendo, otteniamo l'entropia generata durante questa trasformazione

$$S_{\text{gen,tot}} = (40 \text{ kg})(4.184 \text{ kJ / kg}\cdot\text{K}) \ln \frac{353 \text{ K}}{293 \text{ K}} = 31.18 \text{ kJ / K}$$

8.19

(a) Nelle condizioni specificate l'aria può essere assimilata a un gas perfetto. Il lavoro compiuto sul compressore sarà minimo quando la trasformazione di compressione è reversibile. Nel caso adiabatico, la trasformazione sarà reversibile e adiabatica (cioè isoentropica), perciò si possono applicare le relazioni per le trasformazioni isoentropiche. Assumendo calori specifici costanti, otteniamo

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} = (290 \text{ K}) \left(\frac{700 \text{ kPa}}{100 \text{ kPa}} \right)^{0.4/1.4} = 506 \text{ K}$$

Il calore specifico dell'aria alla temperatura media di $(290 \text{ K} + 506 \text{ K})/2 = 398 \text{ K}$ è $c_p = 1,013 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. La potenza fornita al compressore si determina con l'equazione di conservazione dell'energia per un sistema a flusso stazionario,

$$\dot{Q}^{\text{no}} - \dot{L} = \dot{m}(\Delta h + \Delta e_c^{\text{no}} + \Delta e_p^{\text{no}}) \longrightarrow \dot{W} = -\dot{m}(h_2 - h_1) \cong -\dot{m} c_p (T_2 - T_1)$$

Perciò,

$$\dot{L} = -(2 / 60 \text{ kg / s})(1.013 \text{ kJ / kg.k})(506 - 290) \text{ kJ / kg} = -7.29 \text{ kW}$$

(b) Nel caso di una trasformazione isoterma reversibile, la potenza fornita al compressore diventa

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m}(\Delta h^{\text{no}} + \Delta e_c^{\text{no}} + \Delta e_p^{\text{no}}) \longrightarrow \dot{W} = \dot{Q} = \dot{m}T(s_2 - s_1)$$

dove

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2^{\text{no}}}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} = -R \ln \frac{P_2}{P_1} = -(0.287 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}) \ln \frac{700 \text{ kPa}}{100 \text{ kPa}} = -0.5585 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}$$

Sostituendo, otteniamo

$$\dot{L} = (2 / 60 \text{ kg / s})(290 \text{ K})(-0.5585 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}) = -5.40 \text{ kW}$$

8.20

(a) Assumiamo come sistema il ghiaccio e l'acqua. Quindi possiamo scrivere l'equazione del primo principio come

$$\begin{aligned} \dot{Q}^{\text{no}} - \dot{L}^{\text{no}} &= \Delta U + \Delta E_c^{\text{no}} + \Delta E_p^{\text{no}} = (\Delta U)_{\text{ghiaccio}} + (\Delta U)_{\text{acqua}} \\ &= \left[mc(0^\circ \text{C} - T_1)_{\text{solido}} + mh_{\text{ig}} + mc(T_2 - 0^\circ \text{C})_{\text{liquido}} \right]_{\text{ghiaccio}} + [mC(T_2 - T_1)]_{\text{acqua}} = 0 \\ (80 \text{ kg}) &\left[(2.1 \text{ kJ / kg} \cdot ^\circ \text{C})(0 - (-5))^\circ \text{C} + 333.7 \text{ kJ / kg} + (4.184 \text{ kJ / kg} \cdot ^\circ \text{C})(T_2 - 0)^\circ \text{C} \right] \\ &+ (1000 \text{ kg})(4.184 \text{ kJ / kg} \cdot ^\circ \text{C})(T_2 - 20^\circ \text{C}) = 0 \end{aligned}$$

Da cui otteniamo

$$T_2 = 12.4^\circ \text{C}$$

che è la temperatura finale di equilibrio nel recipiente.

(b) Assumiamo il ghiaccio e l'acqua come sistema, che è un sistema chiuso. Supponendo che il recipiente sia ben isolato, troviamo che l'entropia generata durante la trasformazione è

$$\Delta S = \sum \frac{Q}{T} + S_{\text{gen}} \rightarrow S_{\text{gen,tot}} = \Delta S_{\text{tot}} = \Delta S_{\text{acqua}} + \Delta S_{\text{ghiaccio}}$$

dove

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{acqua}} &= \left(m c \ln \frac{T_2}{T_1} \right)_{\text{acqua}} = (1000 \text{ kg})(4.184 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \ln \frac{285.4 \text{ K}}{293 \text{ K}} = -109.96 \text{ kJ/K} \\ \Delta S_{\text{ghiaccio}} &= \left(\Delta S_{\text{solido}} + \Delta S_{\text{fusione}} + \Delta S_{\text{liquido}} \right)_{\text{ghiaccio}} \\ &= \left(\left(m c \ln \frac{T_2}{T_1} \right)_{\text{solido}} + \frac{m h_{\text{ig}}}{T_{\text{fusione}}} + \left(m c \ln \frac{T_2}{T_1} \right)_{\text{liquido}} \right)_{\text{ghiaccio}} \\ &= (80 \text{ kg}) \left((2.1 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \ln \frac{273 \text{ K}}{268 \text{ K}} + \frac{333.7 \text{ kJ/kg}}{273 \text{ K}} + (4.184 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \ln \frac{285.4 \text{ K}}{273 \text{ K}} \right) \\ &= 115.77 \text{ kJ/K}\end{aligned}$$

Quindi,

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{acqua}} + \Delta S_{\text{ghiaccio}} = -109.96 + 115.77 = \mathbf{5.81 \text{ kJ/K}}$$