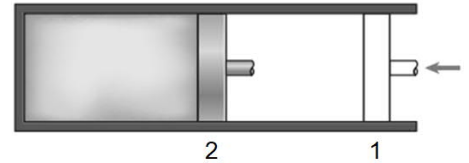


Tampereen yliopisto

KEB-40100 LÄMPÖTEKNIikka

Välikoe 1, 14.10.2020, ratkaisut

1. Kuvan mukaisessa säiliössä on helium-kaasua 0.3 kg. Alkutilanteessa heliumin paine on 120 kPa ja lämpötila 20 °C.



- (a) Säiliössä olevaa heliumia puristetaan isotermisesti paineeseen 250 kPa. Määritä puristuksessa tehty työ, W ja tuotu lämpö, Q .

- (b) Määritä tilavuus lopputilanteessa ja tehty työ, jos puristus loppupaineeseen 250 kPa tapahtuukin isentrooppisesti.

Heliumille: $M = 4.003 \text{ kg/kmol}$; $c_p = 5.193 \text{ kJ/(kg °C)}$; $c_v = 3.116 \text{ kJ/(kg °C)}$.

$$R = \frac{R_u}{M} = \frac{8.314}{4.003 \cdot 10^{-3}} = 2077 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}; k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{5.193}{3.116} = 1.667$$

(a)

$$T = \text{vakio} \rightarrow p_1 V_1 = p_2 V_2 \rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1}$$

$$W = mRT \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = mRT \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = 0.3 \cdot 2077 \cdot 293 \cdot \ln\left(\frac{250}{120}\right) = 134000 \text{ J} = 134 \text{ kJ}$$

$$\Delta T = 0 \rightarrow \Delta U = 0 \rightarrow Q = -W = -130 \text{ kJ (lämpöä poistuu)}$$

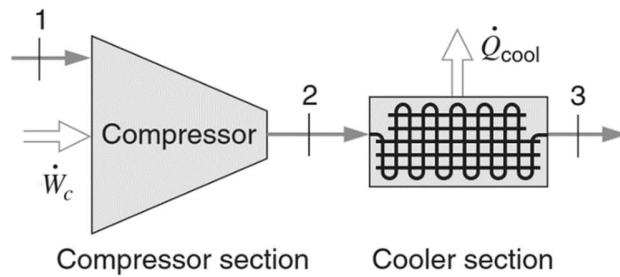
(b)

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k} \rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k} = 293 \cdot \left(\frac{250}{120}\right)^{(1.667-1)/1.667} = 393.0 \text{ K} = 120.0 \text{ °C}$$

$$W = mc_v(T_2 - T_1) = 0.3 \cdot 3.116 \cdot (120 - 20) = 93.5 \text{ kJ}$$

$$p_2 V_2 = mRT_2 \rightarrow V_2 = \frac{mRT_2}{p_2} = \frac{0.3 \cdot 2077 \cdot 393}{250000} = 0.980 \text{ m}^3$$

2. Kuvan mukaisessa tilanteessa ilma ensiksi puristetaan korkeampaan paineeseen adiabaattisesti toimivassa kompressorissa, jonka jälkeen se jäähdytetään. Ennen kompressoria ja kompressorin jälkeen ilman tila on seuraava: $p_1 = 100 \text{ kPa}$; $T_1 = 20 \text{ °C}$; $p_2 = 800 \text{ kPa}$; $T_2 = 300 \text{ °C}$. Jäähdytyksessä ilmasta poistuva lämpövirta $\dot{Q}_{\text{cool}} = 500 \text{ kW}$. Määritä kompressorin ottama teho \dot{W}_c , kompressorin isentrooppinen hyötysuhde sekä ilman lämpötila jäähdytyksen jälkeen (piste 3). Ilman massavirta on 2 kg/s . Ilmalle: $M = 28.97 \text{ kg/kmol}$; $c_p = 1.02 \text{ kJ/(kg °C)}$; $c_v = 0.73 \text{ kJ/(kg °C)}$.



$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1.02}{0.73} = 1.397$$

$$\dot{W} = \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}c_p(T_2 - T_1) = 2 \cdot 1.02 \cdot (300 - 20) = 571.2 \text{ kW}$$

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k} \rightarrow T_{2s} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k} = 293 \cdot \left(\frac{800}{100}\right)^{(1.397-1)/1.397} = 529.1 \text{ K} = 256.1 \text{ °C}$$

$$\rightarrow \eta_s = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{256.1 - 20}{300 - 20} = 0.843$$

$$\dot{Q}_{\text{cool}} = \dot{m}(h_2 - h_3) = \dot{m}c_p(T_2 - T_3)$$

$$\rightarrow T_3 = T_2 - \frac{\dot{Q}_{\text{cool}}}{\dot{m}c_p} = 300 - \frac{500}{2 \cdot 1.02} = 54.9 \text{ °C}$$

3. Säiliössä on kuivan ilman ja vesihöyryn seosta eli kostea ilmaa lämpötilassa 45 °C ja paineessa 100 kPa. Suhteellinen kosteus on 60 %. Säiliössä on kuivaa ilmaa 10 kg.

(a) Määritä säiliön tilavuus sekä vesihöyryn määrä (kg) säiliössä.

(b) Mihän lämpötilaan kostea ilma täytyy lämmittää, jos suhteelliseksi kosteudeksi halutaan 30 %. Entä mihin lämpötilaan kostea ilma täytyy (vähintään) jäähdyttää, jos suhteelliseksi kosteudeksi halutaan 100 %.

Moolimassat kuivalle ilmalle $M_i = 28.97$ kg/kmol ja vesihöyrylle $M_h = 18.01$ kg/kmol.

$$R_i = \frac{R_u}{M_i} = \frac{8.314}{28.97 \cdot 10^{-3}} = 287.0 \text{ J/(kg K)}; R_h = \frac{R_u}{M_h} = \frac{8.314}{18.01 \cdot 10^{-3}} = 461.6 \text{ J/(kg K)}$$

$$T = 45 \text{ °C} \rightarrow p'_h = 9.595 \text{ kPa}$$

$$\varphi = \frac{p_h}{p'_h} \rightarrow p_h = \varphi p'_h = 0.6 \cdot 9.595 = 5.757 \text{ kPa} \rightarrow p_i = p - p_h = 100 - 5.757 = 94.243 \text{ kPa}$$

$$p_i V = m_i R_i T \rightarrow V = \frac{m_i R_i T}{p_i} = \frac{10 \cdot 287 \cdot 318}{94243} = 9.68 \text{ m}^3$$

$$\omega = 0.622 \left(\frac{p_h}{p_i} \right) = 0.622 \cdot \left(\frac{5.757}{94.243} \right) = 0.0380$$

$$\omega = \frac{m_h}{m_i} \rightarrow m_h = \omega m_i = 0.038 \cdot 10 = 0.38 \text{ kg}$$

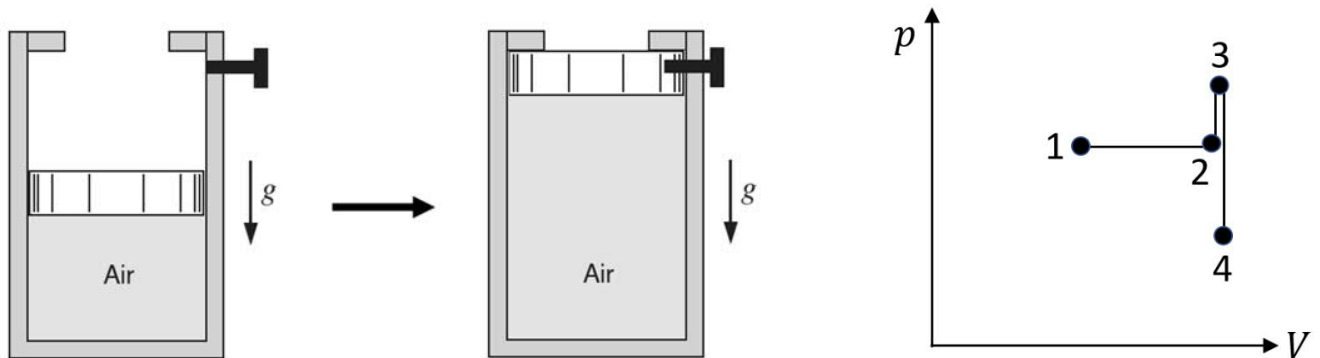
TAI NÄIN:

$$p_h V = m_h R_h T \rightarrow m_h = \frac{p_h V}{R_h T} = \frac{5757 \cdot 9.68}{461.6 \cdot 318} = 0.38 \text{ kg}$$

$$\varphi = 0.3 \rightarrow p'_h = \frac{p_h}{\varphi} = \frac{5.757}{0.3} = 19.2 \text{ kPa} \rightarrow T \approx 60 \text{ °C}$$

$$\varphi = 1 \rightarrow p'_h = p_h = 5.757 \text{ kPa} \rightarrow T \approx 35 \text{ °C} \quad (= \text{kastepisteen lämpötila})$$

4. Kuvan mukaisessa säiliössä on vapaasti liikkuva, mutta kuitenkin tiivis, mäntä. Säiliössä on ilmaa 2 kg, joka on alkutilanteessa (vasemmanpuoleinen kuva) paineessa 200 kPa ja lämpötilassa 200 °C. Säiliöön tuodaan lämpöä, jonka seurauksena mäntä nousee ylös saakka (oikeanpuoleinen kuva). Lämmöntuonnin jälkeen ilman paine säiliössä on 250 kPa ja tilavuus kaksinkertainen alkuperäiseen tilavuuteen verrattuna. Tämän jälkeen mäntä lukitaan yläasentoon ja sylinteristä poistetaan lämpöä siten, että lopputilanteessa ilman lämpötila on sama kuin alkutilanteessa, 200 °C. Määritä ilman paine lopputilanteessa sekä tehty työ ja tuotu/poistettu lämpö alku- ja lopputilanteen välillä. Ilmalle $c_p = 1.088 \text{ kJ}/(\text{kg K})$, $k = 1.36$ ja $M = 28.97 \text{ kg}/\text{kmol}$.



1-2: Paine = vakio: $p_1 = p_2 = 200 \text{ kPa}$; $V_2 = 2V_1$; $T_1 = 200 \text{ °C} = 473 \text{ K}$

2-3: Tilavuus = vakio (mäntä yläasennossa): $V_3 = V_2 = 2V_1$; $p_3 = 250 \text{ kPa}$

3-4: Tilavuus = vakio (mäntä lukittuna yläasentoon): $V_4 = V_3 = V_2 = 2V_1$; $T_4 = T_1 = 200 \text{ °C} = 473 \text{ K}$

$$R = \frac{R_u}{M} = \frac{8.314}{28.97 \cdot 10^{-3}} = 287.0 \text{ J}/(\text{kg K})$$

$$p_1 V_1 = mRT_1 \rightarrow V_1 = \frac{mRT_1}{p_1} = \frac{2 \cdot 287 \cdot 473}{200000} = 1.3575 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 2V_1 = 2.715 \text{ m}^3;$$

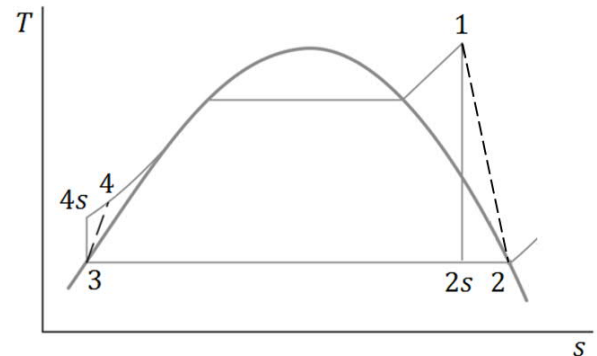
Työtä tehdään vain välillä 1-2, koska vain tällä välillä tilavuus muuttuu:

$$W = W_{12} = - \int_{p_1}^{p_2} p dV = -p_1(V_2 - V_1) = -200 \cdot (2.715 - 1.3575) = -271.4 \text{ kJ}$$

Siirtyneen lämmön saa helpoiten ratkaistua soveltamalla 1. pääsääntöä alku- ja loppupisteiden (1 ja 4) välille: $Q + W = U_4 - U_1$. Koska $T_4 = T_1 \rightarrow U_4 - U_1 = 0 \rightarrow Q = -W = 271.4 \text{ kJ}$

$$p_4 V_4 = mRT_4 \rightarrow p_4 = \frac{mRT_4}{V_4} = \frac{2 \cdot 287 \cdot 473}{2.715} = 100000 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa}$$

5. Kuvassa on esitetty lämpötila (T) - entropia (s) -tasossa yksinkertainen höyryvoimalaitosprosessi, jossa vesihöyry tulee turbiiniin tilassa $p_1 = 3 \text{ MPa}$ ja $T_1 = 520 \text{ °C}$. Vesihöyry poistuu turbiinista kylläisenä höyrynä lämpötilassa $T_2 = 60 \text{ °C}$. Höyryn massavirta on 10 kg/s . Lauhduttimen jälkeen (piste 3) vesi on kylläistä nestettä ($T_3 = T_2$).



Määritä:

- turbiinin antama teho
- turbiinin isentrooppinen hyötösuhde
- pumpun ottama teho, kun pumpun isentrooppinen hyötösuhde on 80 %.

$$\begin{cases} p_1 = 3 \text{ MPa} \\ T_1 = 520 \text{ °C} \end{cases} \xrightarrow{\text{hs-piirroksesta}} h_1 \approx 3500 \text{ kJ/kg}; s_1 \approx 7.29 \text{ kJ/(kg K)}$$

$$\begin{cases} T_2 = 60 \text{ °C} \\ x_2 = 1 \end{cases} \rightarrow h_2 = h''(60 \text{ °C}) = 2609 \text{ kJ/kg}; p_2 = 19.95 \text{ kPa} \approx 20 \text{ kPa}$$

Kylläisen veden / vesihöyryn ominaisuudet:

T [°C]	p [kPa]	v' [m³/kg]	v'' [m³/kg]	u' [kJ/kg]	u'' [kJ/kg]	h' [kJ/kg]	h'' [kJ/kg]	s' [kJ/kg °C]	s'' [kJ/kg °C]
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	0.001	2500.9	0.0000	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2381.8	21.020	2510.1	0.0763	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2388.7	42.022	2519.2	0.1511	8.8999
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2442.7	209.34	2591.3	0.7038	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2449.3	230.26	2600.1	0.7680	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2455.9	251.18	2608.8	0.8313	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2462.4	272.12	2617.5	0.8937	7.8296

$$\begin{cases} p_{2s} = p_2 = 20 \text{ kPa} = 0.02 \text{ MPa} \\ s_{2s} = s_1 = 7.29 \text{ kJ/(kg K)} \end{cases} \xrightarrow{\text{hs-piirroksesta}} h_{2s} \approx 2400 \text{ kJ/kg}$$

$$(a) \dot{W}_t = \dot{m}(h_1 - h_2) = 10 \cdot (3500 - 2609) = 8910 \text{ kW}$$

$$(b) \eta_{ts} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} = \frac{3500 - 2609}{3500 - 2400} = 0.81$$

$$(c) \dot{W}_p = \frac{\dot{m}(h_{4s} - h_3)}{\eta_{ps}} = \frac{\dot{m} v_3(p_4 - p_3)}{\eta_{ps}} = \frac{10 \cdot 0.001017 \cdot (3000 - 20)}{0.8} = 37.9 \text{ kW} \quad (p_4 = p_1)$$

$$(v_3 = v'(60 \text{ °C}) = 0.001017 \text{ m}^3/\text{kg})$$