

**2012/2013 II.  
félév**

SZTE MK Folyamatmérnöki Intézet

Beke Péter

SZTE TTIK Biomérnök III. évfolyam

Szeged, 2013. március 17.

# Gázok termodinamikája



**[ Műszaki áramlástan,  
hőtan és anyagtranszport ]**

### A FELADAT KIÍRÁSA

1 kg levegővel működő dugattyús hőerőgép ideális termodinamikai körfolyamata a következő tulajdonságokkal rendelkezik:

kompresszió viszony  $\epsilon = v_1/v_2$ , illetve kompresszió nyomásviszony  $\pi = p_2/p_1$ ,

nyomásemelkedési viszony  $\lambda = p_3/p_2$ ,

előzetes expanzióviszony  $\rho = v_3/v_2$  ( $\rho = v_4/v_3$  a 13-18. számú feladatoknál),

kiindulási hőmérséklet  $t_1$ , nyomás  $p_1$ .

$M_{\text{lev}} = 28,96 \text{ kg/kmol}$  és  $\kappa = 1,41$ .

**1.** Határozza meg a megadott termodinamikai körfolyamat állapotpontjainak  $p$ ,  $v$ ,  $t$ ,  $u$ ,  $s$ ,  $h$  állapotjelzőit! Az adatokat foglalja táblázatba!

**2.** Határozza meg az egyes állapotváltozásokra a  $\Delta u$ ,  $\Delta s$ ,  $\Delta h$ ,  $q$  és  $w$  értékeket! Az adatokat foglalja táblázatba!

**3.** A fent meghatározott adatok alapján számítsa ki a körfolyamatban résztvevő levegő hasznos térfogat változási munkáját és bizonyítsa be a hő és a munka egyenértékűségét, valamint

$$\oint u = 0 \quad \oint s = 0 \quad \oint h = 0$$

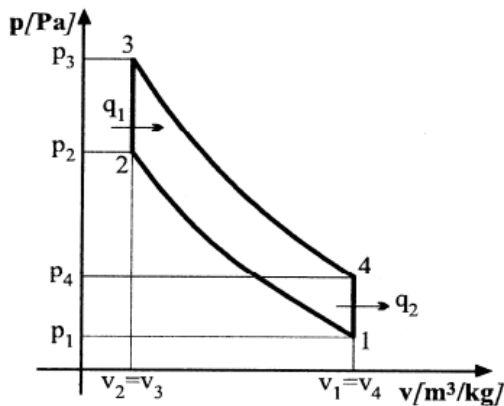
összefüggéseket!

**4.** Határozza meg a folyamat termikus hatásfokát!

**5.** Ábrázolja léptékhelyesen a termodinamikai körfolyamatot  $p$ - $v$  és  $T$ - $s$  állapotváltozási diagramban legalább 3-3 közbenső állapotpont meghatározásának segítségével! A megszerkesztett körfolyamaton jelölje az állapotpontokat, a közölt illetve elvont hőmennyiségeket, és a hasznos munkával egyenértékű területet!

**6.** Változtassa meg a hőbevezetés állapotváltozásának módját (izochor helyett izobár, izobár helyett izochor hőbevezetés, vegyes hőbevezetésű körfolyamatoknál a hőbevezetés módját szabadon megválaszthatja)! A bevezetett hőmennyisége, az 1. és 2. állapotpontok az első körfolyamattal megegyezők. Végezze el az 1-5. feladatpontokban leírt számításokat a megváltoztatott körfolyamatra! A megváltozott körfolyamatot ábrázolja ugyanezen az állapotváltozási diagramokon, és hasonlítsa össze a két körfolyamatot a feladatkiírás 1-5 pontja alapján!

A 4. variáns diagramja és kiindulási értékei:



$t_1$ [C°]	50 C°
$p_1$ [bar]	0,9 bar
$\epsilon$	6,4
$\lambda$	3,8

1-2 állapotpontok közötti változás: *adiabatikus kompresszió*.

2-3 állapotpontok közötti változás: *izochor hőbevezetés*.

3-4 állapotpontok közötti változás: *adiabatikus expanzió*.

4-1 állapotpontok közötti változás: *izochor hőelvezetés*.

### A FELADAT MEGOLDÁS:

#### 1. FELADAT

$$M_{lev} = 28,96 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1} = 28,96 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$R_s = \frac{R_u}{M} = \frac{8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}{28,96 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}} = 287,0856 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} =$$

$$= 0,287086 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_v = \frac{R_s}{\kappa - 1} = \frac{0,287086 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}{1,41 - 1} = 0,7002 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_p = \kappa \cdot c_v = 1,41 \cdot 0,7002 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = \mathbf{0,9873 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

### 1. állapotpont

$$T_1 = t_1 + T_0 = 50 + 273,15 = \mathbf{323,15 \text{ K}}$$

$$p_1 = \mathbf{0,9 \cdot 10^5 \text{ Pa}}$$

$$v_1 = \frac{R_s T_1}{p_1} = \frac{287,0856 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 323,15 \text{ K}}{0,9 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot (\text{m}^3)^{-1}} = \mathbf{1,03079 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$u_1 = c_v \cdot T_1 = 0,7002 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 323,15 \text{ K} = \mathbf{226,2696 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$h_1 = c_p \cdot T_1 = 0,9873 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 323,15 \text{ K} = \mathbf{319,0459 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$s_1 = \mathbf{1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} \quad (\text{megegyezés alapján})$$

### 2. állapotpont

1-2 állapotpontok közötti változás: *adiabatikus kompresszió*.

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon}$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{1,03079 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}{6,4} = \mathbf{0,16106 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$p_1 \cdot v_1^\kappa = p_2 \cdot v_2^\kappa \Rightarrow p_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\kappa = p_2 \Rightarrow p_1 \cdot (\varepsilon)^\kappa = p_2$$

$$p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^\kappa = 0,9 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 6,4^{1,41} = 1232980,683 \text{ Pa} = \mathbf{12,3298 \text{ bar}}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = (\varepsilon)^{\kappa-1} \Rightarrow T_1 \cdot \varepsilon^{\kappa-1} = T_2$$

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{\kappa-1} = 323,15 \text{ K} \cdot 6,4^{1,41-1} = 323,15 \text{ K} \cdot 6,4^{0,41} = \mathbf{691,732 \text{ K}}$$

$$u_2 = c_v \cdot T_2 = 0,7002 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 691,732 \text{ K} = \mathbf{484,3507 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$h_2 = c_p \cdot T_2 = 0,9873 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 691,732 \text{ K} = \mathbf{682,9470 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$s_2 = s_1 = \mathbf{1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

### 3. állapotpont

2-3 állapotpontok közötti változás: *izochor hőbevezetés.*

$$v_3 = v_2 = \mathbf{0,16106 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$p_3 = p_2 \cdot \lambda = 12,3298 \text{ bar} \cdot 3,8 = \mathbf{46,8532 \text{ bar}}$$

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3} \Rightarrow \frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} \Rightarrow \frac{T_3}{T_2} = \lambda \Rightarrow T_3 = \lambda \cdot T_2$$

$$T_3 = \lambda \cdot T_2 = 3,8 \cdot 691,732 \text{ K} = \mathbf{2628,582 \text{ K}}$$

$$u_3 = c_v \cdot T_3 = 0,7002 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 2628,582 \text{ K} = \mathbf{1840,5331 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$h_3 = c_p \cdot T_3 = 0,9873 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 2628,582 \text{ K} = \mathbf{2595,1991 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\begin{aligned} s_3 &= s_2 + c_v \cdot \ln \lambda = 1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} + 0,7002 \cdot \ln 3,8 = \\ &= 1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} + 0,7002 \cdot 1,3350 = \mathbf{1,9347 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} \end{aligned}$$

### 4. állapotpont

3-4 állapotpontok közötti változás: *adiabatikus expanzió*.

$$v_4 = v_1 = 1,03079 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$p_3 \cdot v_3^\kappa = p_4 \cdot v_4^\kappa \Rightarrow p_3 \cdot \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^\kappa = p_4 \Rightarrow p_3 \cdot \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^\kappa = p_4 \Rightarrow p_3 \cdot (\varepsilon^{-1})^\kappa = p_4 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow p_3 \cdot \varepsilon^{-\kappa} = p_4$$

$$p_4 = p_3 \cdot \varepsilon^{-\kappa} = 46,8532 \text{ bar} \cdot 6,4^{-1,41} = 3,42 \text{ bar}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^{\kappa-1} \Rightarrow \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa-1} \Rightarrow \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} \Rightarrow \frac{T_4}{T_3} = (\varepsilon^{-1})^{\kappa-1} \Rightarrow T_3 \cdot \varepsilon^{-\kappa+1} = T_4$$

$$T_4 = T_3 \cdot \varepsilon^{-\kappa+1} = 2628,582 \text{ K} \cdot 6,4^{-1,41+1} = 2628,582 \text{ K} \cdot 6,4^{-0,41} = 1227,97 \text{ K}$$

$$u_4 = c_v \cdot T_4 = 0,7002 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 1227,97 \text{ K} = 859,8246 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$h_4 = c_p \cdot T_4 = 0,9873 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 1227,97 \text{ K} = 1212,3748 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$s_4 = s_3 = 1,9347 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Összesítő táblázat:

	T [K]	p [bar]	v [m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]	u [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	h [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	s [kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
1	323,15	0,9	1,03079	226,2696	319,0459	1
2	691,732	12,3298	0,16106	484,3507	682,9470	1
3	2628,582	46,8532	0,16106	1840,5331	2595,1991	1,9347
4	1227,97	3,42	1,03079	859,8246	1212,3748	1,9347

### 2. FELADAT

$$\Delta u_{12} = u_2 - u_1 = 484,3507 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 226,2696 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{258,0811 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta u_{23} = u_3 - u_2 = 1840,5331 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 484,3507 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{1356,182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta u_{34} = u_4 - u_3 = 859,8246 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 1840,5331 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{-980,709 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta u_{41} = u_1 - u_4 = 226,2696 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 859,8246 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{-633,555 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta h_{12} = h_2 - h_1 = 682,9470 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 319,0459 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{363,9011 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta h_{23} = h_3 - h_2 = 2595,1991 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 682,9470 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{1912,252 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta h_{34} = h_4 - h_3 = 1212,3748 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 2595,1991 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{-1382,82 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta h_{41} = h_1 - h_4 = 319,0459 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 1212,3748 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{-893,329 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta s_{12} = s_2 - s_1 = 1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} - 1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = \mathbf{0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$\Delta s_{23} = s_3 - s_2 = 1,9347 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} - 1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = \mathbf{0,9347 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$\Delta s_{34} = s_4 - s_3 = 1,9347 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} - 1,9347 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = \mathbf{0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$\Delta s_{41} = s_1 - s_4 = 1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} - 1,9347 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = \mathbf{-0,9347 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$q_{be} = \Delta u_{23} = \mathbf{1356,182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$q_{ki} = \Delta u_{41} = \mathbf{-633,555 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$W_{12} = u_1 - u_2 = 226,2696 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 484,3507 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{-258,0811 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$W_{34} = u_3 - u_4 = 1840,5331 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 859,8246 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{980,709 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Összesítő táblázat:

	Kalorikus állapotjelzők			$q$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	$w$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]
	$\Delta u$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	$\Delta h$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	$\Delta s$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		
1 – 2.	258,0811	363,9011	0	0	-258,0811
2 – 3.	1356,182	1912,252	0,9347	1356,182	0
3 – 4.	-980,709	-1382,82	0	0	980,709
4 – 1.	-633,555	-893,329	-0,9347	-633,555	0

### 3. FELADAT

$$W_h = W_{34} - |W_{12}| = 980,709 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - |-258,0811 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}| = \mathbf{722,6279 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$q_h = q_{23} - |q_{41}| = 1356,182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - |-633,555 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}| = \mathbf{722,627 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$W_h - q_h = 722,627 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 722,627 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \Rightarrow \mathbf{W_h = q_h}$$

$$\begin{aligned} \oint u = 0 &= \sum \Delta u = \Delta u_{12} - \Delta u_{23} - \Delta u_{34} - \Delta u_{41} = \\ &= 258,0811 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + 1356,182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + (-980,709 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) + \\ &+ (-633,555 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) = \mathbf{0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \oint h = 0 &= \sum \Delta h = \Delta h_{12} + \Delta h_{23} + \Delta h_{34} + \Delta h_{41} = \\ &= 363,9011 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + 1912,252 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + (-1382,82 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) + \\ &+ (-893,329 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) = \mathbf{0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \oint s = 0 &= \sum \Delta s = \Delta s_{12} + \Delta s_{23} + \Delta s_{34} + \Delta s_{41} = \\ &= 0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} + 0,9347 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} + 0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} + (-0,9347 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) = \\ &= \mathbf{0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} \end{aligned}$$



Összesítő táblázat:

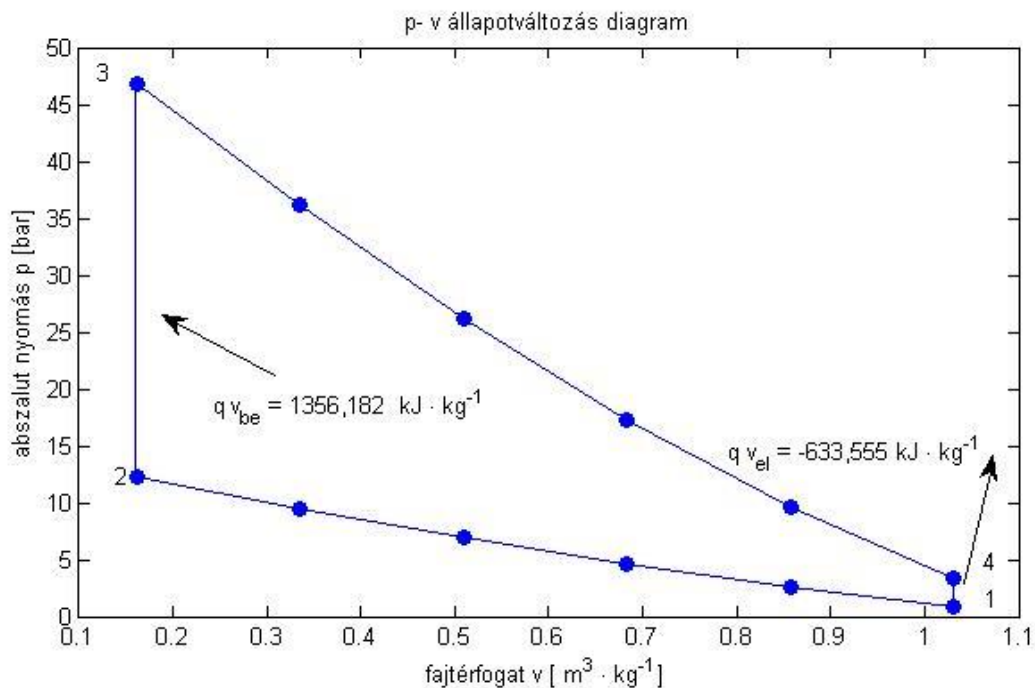
	Kalorikus állapotjelzők		
	$\Delta u$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	$\Delta h$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	$\Delta s$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
1 – 2.	258,0811	363,9011	0
2 – 3.	1356,182	1912,252	0,9347
3 – 4.	-980,709	-1382,82	0
4 – 1.	-633,555	-893,329	-0,9347
$\Sigma$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

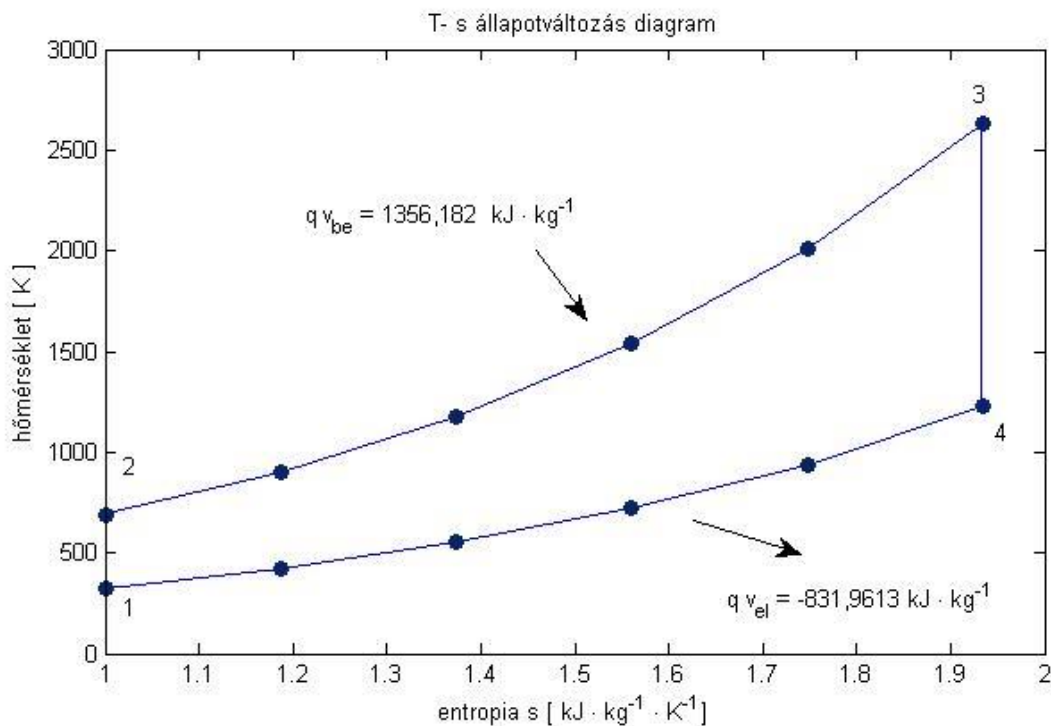
## 4. FELADAT

$$\eta_t = \frac{W_h}{q_{be}} = \frac{722,6279 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{1356,182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}} = \mathbf{0,5328}$$

$$\eta_t = \frac{W_h}{q_{be}} \cdot 100\% = \frac{722,6279 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{1356,182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}} \cdot 100\% = \mathbf{53,28\%}$$

## 5. FELADAT





## 6. FELADAT

### 6.1

A 4. variánstól annyiban tér el, hogy az 2-3 állapotpontok közötti változás *izochor hőbevezetés* helyett *izobár hőbevezetés*, a kiindulási értékek a  $\lambda$  kivételével nem változtak.

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2} \xrightarrow{p_2=p_3} \lambda = 1$$

1-2 állapotpontok közötti változás: *adiabatikus kompresszió*.

2-3 állapotpontok közötti változás: *izobár hőbevezetés*.

3-4 állapotpontok közötti változás: *adiabatikus expanzió*.

4-1 állapotpontok közötti változás: *izochor hőelvezetés*.

$$M_{lev} = 28,96 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$R_s = 287,0856 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = 0,287086 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_v = 0,7002 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_p = 0,9873 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

### 1. állapotpont

$$T_1 = t_1 + T_0 = 50 + 273,15 = 323,15 \text{ K}$$

$$p_1 = 0,9 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$v_1 = \frac{R_s T_1}{p_1} = \frac{287,0856 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 323,15 \text{ K}}{0,9 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot (\text{m}^3)^{-1}} = 1,03079 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$u_1 = c_v \cdot T_1 = 0,7002 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 323,15 \text{ K} = 226,2696 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$h_1 = c_p \cdot T_1 = 0,9873 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 323,15 \text{ K} = 319,0459 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$s_1 = 1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (\text{megegyezés alapján})$$

### 2. állapotpont

1-2 állapotpontok közötti változás: *adiabatikus kompresszió*.

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{1,03079 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}{6,4} = 0,16106 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$p_1 \cdot v_1^\kappa = p_2 \cdot v_2^\kappa \Rightarrow p_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\kappa = p_2 \Rightarrow p_1 \cdot (\varepsilon)^\kappa = p_2$$

$$p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^\kappa = 0,9 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 6,4^{1,41} = 1232980,683 \text{ Pa} = 12,3298 \text{ bar}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = (\varepsilon^1)^{\kappa-1} \Rightarrow T_1 \cdot \varepsilon^{\kappa-1} = T_2$$

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{\kappa-1} = 323,15 \text{ K} \cdot 6,4^{1,41-1} = 323,15 \text{ K} \cdot 6,4^{0,41} = \mathbf{691,732 \text{ K}}$$

$$u_2 = c_v \cdot T_2 = 0,7002 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 691,732 \text{ K} = \mathbf{484,3507 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$h_2 = c_p \cdot T_2 = 0,9873 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 691,732 \text{ K} = \mathbf{682,9470 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$s_2 = s_1 = \mathbf{1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

### 3. állapotpont

2-3 állapotpontok közötti változás: *izobár hőbevezetés.*

$$p_3 = p_2 = 12,3298 \text{ bar} = \mathbf{12,3298 \text{ bar}}$$

$$q_{be} = c_p \cdot (T_3 - T_2) \Rightarrow T_3 = \frac{q_{be}}{c_p} + T_2$$

$$T_3 = \frac{q_{be}}{c_p} + T_2 = \frac{1356,182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{0,9873 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} + 691,732 \text{ K} = \mathbf{2065,359 \text{ K}}$$

$$\frac{v_2}{v_3} = \frac{T_3}{T_2} \Rightarrow v_3 = v_2 \cdot \frac{T_2}{T_3}$$

$$v_3 = v_2 \cdot \frac{T_2}{T_3} = 0,16106 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \frac{691,732 \text{ K}}{2065,359 \text{ K}} = \mathbf{0,48099 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$u_3 = c_v \cdot T_3 = 0,7002 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 2065,359 \text{ K} = \mathbf{1446,1644 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$h_3 = c_p \cdot T_3 = 0,9873 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 2065,359 \text{ K} = \mathbf{2039,1289 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$s_3 = s_2 + c_p \cdot \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) = 1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} + 0,9873 \cdot \ln\left(\frac{2065,359 \text{ K}}{691,732 \text{ K}}\right) =$$

$$= 1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} + 0,9873 \cdot 1,0939 = \mathbf{2,08 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

### 4. állapotpont

3-4 állapotpontok közötti változás: *adiabatikus expanzió*.

$$v_4 = v_1 = \mathbf{1,03079 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$p_3 \cdot v_3^\kappa = p_4 \cdot v_4^\kappa \Rightarrow p_3 \cdot \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^\kappa = p_4$$

$$p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^\kappa = 12,3298 \text{ bar} \cdot \left(\frac{0,48099 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}{1,03079 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}\right)^{1,41} = \mathbf{4,2092 \text{ bar}}$$

$$T_4 = \frac{v_4 \cdot p_4}{R_s} = \frac{1,03079 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 4,2092 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot (\text{m}^3)^{-1}}{287,0856 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} = \mathbf{1511,323 \text{ K}}$$

$$u_4 = c_v \cdot T_3 = 0,7002 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 1511,323 \text{ K} = \mathbf{1058,2309 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$h_4 = c_p \cdot T_3 = 0,9873 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 1511,323 \text{ K} = \mathbf{1492,1328 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$s_4 = s_3 = \mathbf{2,08 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

Összesítő táblázat:

	T [K]	p [bar]	v [m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]	u [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	h [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	s [kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
1	323,15	0,9	1,03079	226,2696	319,0459	1
2	691,732	12,3298	0,16106	484,3507	682,9470	1
3	2065,359	12,3298	0,48099	1446,1644	2039,1289	2,08
4	1511,323	4,2092	1,03079	1058,2309	1492,1328	2,08

### 6.2

$$\Delta u_{12} = u_2 - u_1 = 484,3507 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 226,2696 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{258,0811 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta u_{23} = u_3 - u_2 = 1446,1644 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 484,3507 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{961,8137 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta u_{34} = u_4 - u_3 = 1058,2309 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 1446,1644 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{-387,9335 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta u_{41} = u_1 - u_4 = 226,2696 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 1058,2309 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{-831,9613 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta h_{12} = h_2 - h_1 = 682,9470 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 319,0459 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{363,9011 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta h_{23} = h_3 - h_2 = 2039,1289 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 682,9470 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{1356,1819 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta h_{34} = h_4 - h_3 = 1492,1328 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 2039,1289 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{-546,9961 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta h_{41} = h_1 - h_4 = 319,0459 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 1492,1328 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{-1173,0869 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta s_{12} = s_2 - s_1 = 1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} - 1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = \mathbf{0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$\Delta s_{23} = s_3 - s_2 = 2,08 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} - 1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = \mathbf{1,08 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$\Delta s_{34} = s_4 - s_3 = 1,9347 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} - 1,9347 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = \mathbf{0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$\Delta s_{41} = s_1 - s_4 = 1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} - 2,08 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = \mathbf{-1,08 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$q_{be} = q_{23} = \Delta u_{23} = \mathbf{1356,182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$q_{ki} = q_{41} = \Delta u_{41} = \mathbf{-831,9613 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$W_{12} = u_1 - u_2 = 226,2696 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 484,3507 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{-258,0811 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\begin{aligned} W_{23} &= p_2 \cdot (v_3 - v_2) = \\ &= 12,3298 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot (\text{m}^3)^{-1} \cdot (0,48099 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} - 0,16106 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) = \\ &= 12,3298 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot (\text{m}^3)^{-1} \cdot 0,31993 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{391,5879 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}} \end{aligned}$$

$$W_{34} = u_3 - u_4 = 1446,1644 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 1058,2309 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = \mathbf{387,9335 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Összesítő táblázat:

	Kalorikus állapotjelzők			$q$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	$w$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]
	$\Delta u$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	$\Delta h$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	$\Delta s$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		
1 – 2.	258,0811	363,9011	0	0	-258,0811
2 – 3.	961,8137	1356,1819	1,08	1356,182	391,5879
3 – 4.	-387,9335	-546,9964	0	0	387,9335
4 – 1.	-831,9613	-1173,0869	-1,08	-831,9613	0

6.3

$$\begin{aligned} W_h &= W_{23} + W_{34} - |W_{12}| = \\ &= 391,5879 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + 387,9335 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - |258,0811 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}| = \\ &= \mathbf{521,4403 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}} \end{aligned}$$

$$q_h = q_{23} - |q_{41}| = 1356,182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - |-831,9613 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}| = \mathbf{521,4403 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$W_h - q_h = 521,4403 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 521,4403 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \Rightarrow \mathbf{W_h = q_h}$$

$$\begin{aligned} \oint u &= \mathbf{0} = \sum \Delta u = \Delta u_{12} + \Delta u_{23} + \Delta u_{34} + \Delta u_{41} = \\ &= 258,0811 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + 961,8137 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + (-387,9335 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) - \\ &+ (-831,9613 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) = \mathbf{0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \oint h &= \mathbf{0} = \sum \Delta h = \Delta h_{12} + \Delta h_{23} + \Delta h_{34} + \Delta h_{41} = \\ &= 363,9011 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + 1356,1819 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + (-546,9961 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) - \\ &+ (-1173,0869 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) = \mathbf{0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \oint s &= \mathbf{0} = \sum \Delta s = \Delta s_{12} + \Delta s_{23} + \Delta s_{34} + \Delta s_{41} = \\ &= 0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} + 2,08 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} + 0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} + (-2,08 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) = \\ &= \mathbf{0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} \end{aligned}$$

Összesítő táblázat:

	Kalorikus állapotjelzők		
	$\Delta u$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	$\Delta h$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	$\Delta s$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
1 – 2.	258,0811	363,9011	0
2 – 3.	961,8137	1356,1819	1,08
3 – 4.	-387,9335	-546,9964	0
4 – 1.	-831,9613	-1173,0869	-1,08
$\Sigma$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

6.4

$$\eta_t = \frac{W_h}{q_{be}} = \frac{521,4403 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{1356,182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}} = \mathbf{0,3845}$$

$$\eta_t = \frac{W_h}{q_{be}} \cdot 100\% = \frac{521,4403 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{1356,182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}} \cdot 100\% = \mathbf{38,45 \%}$$

6.5

Körfolyamatok összehasonlítás:

A feladat leírásában szereplő 4-es számú variáns egy Otto-körfolyamat. Amely áll két adiabatából és két izochorából. A hőbevezetés és hőelvezetés izochor állapotban történik. A 6. feladat alapján a hőbevezetést izobár állapotúra módosítjuk akkor egy Dízel-körfolyamatot kapunk. Ez két adiabatából és egy-egy izobárából és izochorából áll. Megfigyelhető, hogy ugyanakkora hőbevezetés mellett az Otto-körfolyamat, azaz izochor állapotban történő hőbevezetés, nagyobb hatásfokkal bír, ill. nagyobb hasznos munka végzésére képes, mint az izobár állapotban hőbevezetés.



