



Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Studij računarstva

Fizika 1

Auditorne vježbe - 13

Termodinamika.

Ivica Sorić
(Ivica.Soric@fesb.hr)

Ponavljjanje

- ◆ Prvi zakon termodinamike:
- ◆ Specifični toplinski kapaciteti:

$$\delta Q = dU + \delta W$$

$$c_p = \frac{1}{m} \left(\frac{dQ}{dT} \right)_{p=\text{konst.}} \quad c_v = \frac{1}{m} \left(\frac{dQ}{dT} \right)_{V=\text{konst.}}$$

- ◆ Adijabatski koeficijent:

$$\kappa = c_p / c_v$$

- ◆ Molarni toplinski kapaciteti:
- ◆ Rad pri promjeni stanja plina:

$$C_v = \frac{R}{\kappa - 1} \quad C_p = \frac{\kappa R}{\kappa - 1}$$

- Izohorni proces

$$W = 0$$

- Izobarni proces

$$W = p(V_2 - V_1)$$

- Izotermni proces

$$W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} = nRT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

- Adijabatski proces

$$W = \frac{nR}{\kappa - 1} (T_1 - T_2)$$

Ponavljjanje

- ◆ Adijabatski proces u idealnom plinu: *Poissonove jednadžbe*

$$TV^{\kappa-1} = konst.$$

$$pV^{\kappa} = konst.$$

$$T^{\kappa} p^{1-\kappa} = konst.$$

- ◆ Koeficijent korisnog djelovanja toplinskog stroja:

$$\eta = \frac{W}{Q}$$

gdje je Q dovedena količina topline u jednom ciklusu.

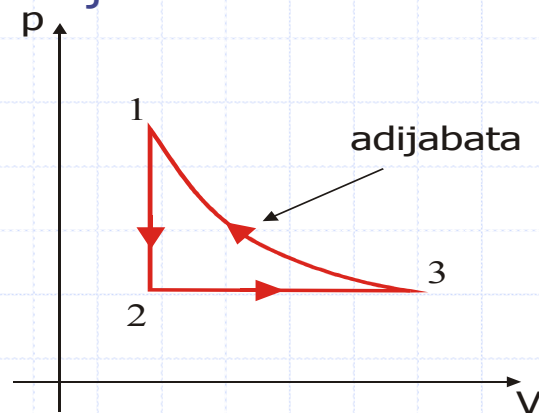
- ◆ Koeficijent korisnog djelovanja Carnotova stroja:

$$\eta_c = \frac{W}{Q} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

gdje je: T_1 -temperatura toplijeg spremnika,
 T_2 -temperatura hladnijeg spremnika

Primjer 1

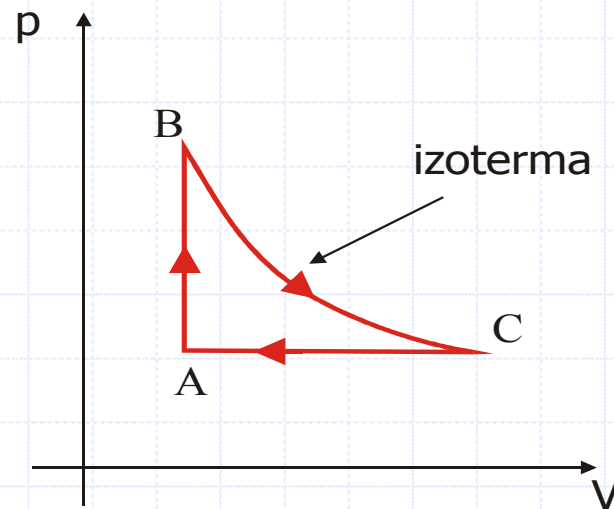
- ◆ Reverzibilni stroj radi s jednim molom jednoatomnog plina prema dijagramu prikazanom na slici. Početni tlak je $p_1 = 1 \text{ atm}$, a temperature su na početku i kraju izovolumnog procesa su $T_1 = 580 \text{ K}$ i $T_2 = 300 \text{ K}$. Izračunati koordinate presjeka u p-V dijagramu, te promjenu unutarnje energije, toplinu i izvršeni rad za svaki od tri procesa i za cijeli ciklus.



- ◆ Rezultat: $V_1 = V_2 = 47.6 \text{ l}$, $p_2 = p_3 = 0.517 \text{ atm}$, $V_3 = 70.7 \text{ l}$, $T_3 = 446 \text{ K}$
 $W_{12} = 0$, $Q_{12} = \Delta U_{12} = -3492 \text{ J}$,
 $W_{23} = 1210 \text{ J}$, $Q_{23} = 3025 \text{ J}$, $\Delta U_{23} = 1815 \text{ J}$,
 $W_{31} = -\Delta U_{31} = -1677 \text{ J}$, $Q_{31} = 0$,
 $W = -467 \text{ J}$, $Q = -467 \text{ J}$, $\Delta U = 0$

Primjer 2

- ◆ 1 kmol idealnog plina helija prolazi kroz ravnotežna stanja kružnog procesa prikazanog na slici. BC je izoterma, a $p_A = 1 \text{ atm}$, $V_A = 22,4 \text{ m}^3$, $p_B = 2 \text{ atm}$.
 - a) Koliko iznose T_A , T_B i V_C ?
 - b) Koliko iznosi rad dobiven u jednom ciklusu?



- ◆ Rezultat: a) $T_A = 273 \text{ K}$, $T_B = 546 \text{ K}$, $V_C = 44,8 \text{ m}^3$, b) $W = 876.5 \text{ kJ}$.

Primjer 3

- ◆ Carnotov stroj uzima toplinu iz spremnika temperature $317\text{ }^{\circ}\text{C}$, izvrši rad i ostatak topline preda hladnijem spremniku temperature $117\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ako je iz toplijeg spremnika uzeto 500 kJ topline, koliko iznosi izvršeni rad, a koliko je topline predano hladnijem spremniku?

- ◆ Rezultat: $Q_2 = 330,5\text{ kJ}$, $W = 169,5\text{ kJ}$.

Primjer 4

- ◆ Toplinski stroj radi po Carnotovom ciklusu. Početni volumen zraka je 2 l, temperatura 127 °C, tlak 7 atm. Poslije prvog izotermnog širenja zrak poprima volumen 5 l, a poslije adijabatskog širenja 8 l.

Izračunati:

- a) koordinate presjeka izoterma i adijabata,
- b) rad u pojedinim dijelovima ciklusa,
- c) ukupni rad i koeficijent korisnog djelovanja stroja.

- ◆ **Rezultat:** a) B(2,8 atm, 5 l), C(1,45 atm, 8 l), D(3,6 atm, 3,2 l), $T_c = T_D = 331$ K;
b) $W_{AB} = 1300$ J, $W_{BC} = -W_{DA} = 611$ J, $W_{CD} = -1077$ J, c)
 $W = 223$ J, $\eta = 17,2\%$.

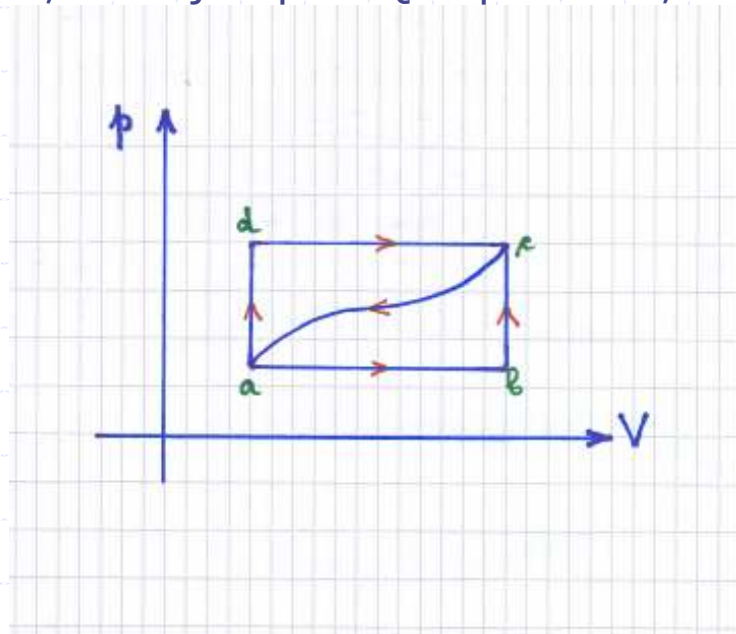
Primjer 5

- ◆ Jedan mol idealnog dvoatomnog plina prolazi kroz kružni proces sastavljen od dvije izovolumne i dvije izobarne promjene stanja. Početni tlak plina je 1 atm, a početni volumen 22 l. Plin se najprije izobarno sabija na 4 puta manji volumen od početnog, a zatim se izovolumno zagrijava do stanja s dvostruko većim tlakom. Nakon toga se izobarnim širenjem, te izovolumnim hlađenjem vraća u početno stanje. Odredite temperature svih četiriju točaka presjeka u p-V dijagramu, te koeficijent korisnog djelovanja stroja.

- ◆ Rezultat: $T_1=268 \text{ K}$, $T_2=67 \text{ K}$, $T_3=134 \text{ K}$, $T_4=536 \text{ K}$,
 $\eta=0.128$

Primjer 6

- ◆ Pri prijelazu iz stanja a u stanje c duž puta adc (vidi crtež) u sistem se dovodi 240 J topline, a sistem vrši rad 120 J.
 - a) Koliki je rad duž abc ako je dovedena količina topline 168 J?
 - b) Ako se sistem vraća iz stanja c u stanje a duž krivocrtnog puta ca , izvršeni rad na sistemu je 60 J. Da li sistem apsorbira ili oslobađa toplinu i koliko?
 - c) Ako je unutrašnja energija $U_a=208$ J, kolika je U_c ?
 - d) Ako je $U_b=80$ J, kolika je toplina Q za proces ab , a kolika za bc ?



- ◆ Rezultat: a) $W_{abc}=48$ J; b) $Q_{ca}=-180$ J; c) $U_c=328$ J;
d) $Q_{bc}=248$ J, $Q_{ab}=-80$ J.

Primjer 7

- ◆ Pri Carnotovom kružnom procesu početni tlak plina je 1 bar, početna temperatura 300 K, a početni volumen 10 litara. Zrak se sabija najprije izotermno do tlaka od 4 bara, a zatim adijabatski do volumena od jedne litre. Nakon toga se zrak širenjem, najprije izotermnim a zatim adijabatskim, vraća u početno stanje. Odredite koordinate karakterističnih točaka ovoga ciklusa u p-V dijagramu, temperaturu toplijeg spremnika, te koeficijent korisnog djelovanja toplinskog stroja. Adijabatska konstanta za zrak iznosi $\kappa=1,4$, a univerzalna plinska konstanta $R=8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

- ◆ **Rezultat:** Koordinate točaka presjeka izoterma i adijabata: B(4 bar; 2,5 l; 300 K); C(14,4 bar; 1 l; 433 K); D(3,6 bar; 4 l; 433 K); $\eta=0,3$.

Primjer 8

- ◆ U Dieselovom kružnom procesu, koji se sastoji od adijabatskog sabijanja, izobarnog zagrijavanja, adijabatskog širenja i izovolumnog hlađenja, početni tlak je 1 bar, a početna temperatura 300 K, i početni volumen V_1 . Jedan mol zraka najprije se adijabatski sabija na $V_1/15$, a zatim se izobarno zagrijava tako da mu volumen poraste do $V_1/10$ (izgaranje goriva zbiva se u vrućem zraku pri stalnom tlaku). Specifične topline za zrak su $c_v=0,72$ kJ/(kgK), $c_p=1,01$ kJ/(kgK), a molarna masa zraka $M=28,9$ g/mol.
 - a) Koliki su tlak, volumen i temperatura u karakterističnim točkama procesa?
 - b) Kolike su dovedena i odvedena toplina i koliki je koristan rad?
 - c) Koliki je koeficijent korisnog djelovanja motora?

- ◆ Rezultat: a) $V_1=24,9$ l, $p_2=44$ bar, $T_2=886$ K, $T_3=1326$ K, $p_4=1,75$ bar, $T_4=524$ K, b) $Q_1=12,9$ kJ, $Q_2=-4,7$ kJ, $W=8,2$ kJ, c) $\eta=0,64$

Primjer 9

- Motori s unutrašnjim izgaranjem rade tako da se toplina dovodi radnom fluidu u samom ekspanzijskom prostoru. Benzinski se motor koristi Ottovim ciklusom od dvije adijabate i dvije izohore. Neka je početni tlak $p_1=1$ bar i početna temperatura $T_1=300$ K. Količina zraka $n=1$ mol adijabatski se sabija na $1/5$ početnog volumena, a zatim se izovolumno zagrije toplinom $Q_1=12$ kJ (izgaranje zapaljive smjese odvija se pri stalnom volumenu). Nakon toga plin se adijabatskom ekspanzijom i izovolumnim hlađenjem vraća u početno stanje.

Specifične topline za zrak su $c_v=0,72$ kJ/(kgK), $c_p=1,01$ kJ/(kgK), a molarna masa zraka $M=28,9$ g/mol.

- a) Koliki su tlak, volumen i temperatura u karakterističnim točkama kružnog procesa (u p-V dijagramu)?
- b) Koliki su odvedena toplina i dobiveni rad?
- c) Koliki je koeficijent korisnog djelovanja?
- d) Koliki bi bio koeficijent korisnog djelovanja Carnovog kružnog procesa koji bi se odvijao između temperatura T_1 i T_3 ?

- Rezultat: a) $V_1=24,9$ l, $p_2=9,52$ bar, $T_2=571$ K, $T_3=1148$ K, $p_3=19,1$ bar, $p_4=2$ bar, $T_4=603$ K, b) $Q_2=-6,3$ kJ, $W=5,7$ kJ, c) $\eta=0.48$, d) $\eta_c=0,74$.

Primjer 10

- ◆ Toplinski stroj s jednim molom jednoatomnog plina ($\kappa=5/3$) radi u reverzibilnom kružnom procesu sastavljenom od adijabatskog sabijanja, izoternog širenja i izobarnog hlađenja. Minimalna i maksimalna temperatura u procesu su 280 K, odnosno 400 K, a minimalni tlak 10^5 Pa. Izračunati koordinate karakterističnih točaka presjeka u p-V dijagramu i koeficijent korisnog djelovanja stroja. Univerzalna plinska konstanta iznosi $R=8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

- ◆ Rezultat: A(1 bar; 23,3 l; 280 K), B(2,4 bar; 13,6 l; 400 K), C(1 bar; 33,3 l; 400 K)

Zadaci za vježbu

- ◆ P. Kulišić i ostali: *Riješeni zadaci iz mehanike i topline*, Poglavlje 13
 - Primjeri: 13.15., 13.18., 13.25.
 - Zadaci: 13.5. – 13.7.