

# Osnove kompresorskih procesa

V. prof. dr. Edin Berberović

[eberberovic@ptf.unze.ba](mailto:eberberovic@ptf.unze.ba)

# Osnovi kompresorskih procesa

---

- ▶ Promjene stanja idealnog gasa
- ▶ Rad idealnog i stvarnog klipnog kompresora
- ▶ Kapacitet, snaga i koeficijent iskorištenja kompresora

# Promjene stanja idealnog gasa

---

## ▶ Načini sabijanja gasa

- ▶ Osnovni zadatak kompresora je sabijanje gasa na visoki pritisak
- ▶ Veza između termodinamičkih veličina data je jednačinom stanja

$$pV = mRT \Rightarrow pv = RT \Rightarrow p = \frac{RT}{v}$$

- ▶ Sabijanje gasa može se izvršiti
  - Povećanjem temperature pri konstantnoj zapremini
  - Smanjenjem zapremine (povećanjem gustine) pri konstantnoj temperaturi
  - Moguće su i kombinacije (istovremena promjena temperature i zapremine)
- ▶ Sabijanje smanjenjem zapremine može se izvršiti
  - Statičkom kompresijom (cilindar sa pokretnim klipom)
  - Dinamičkom ili strujnom kompresijom (ubrzavanje strujanja gasa i naknadno provođenje kroz difuzor)

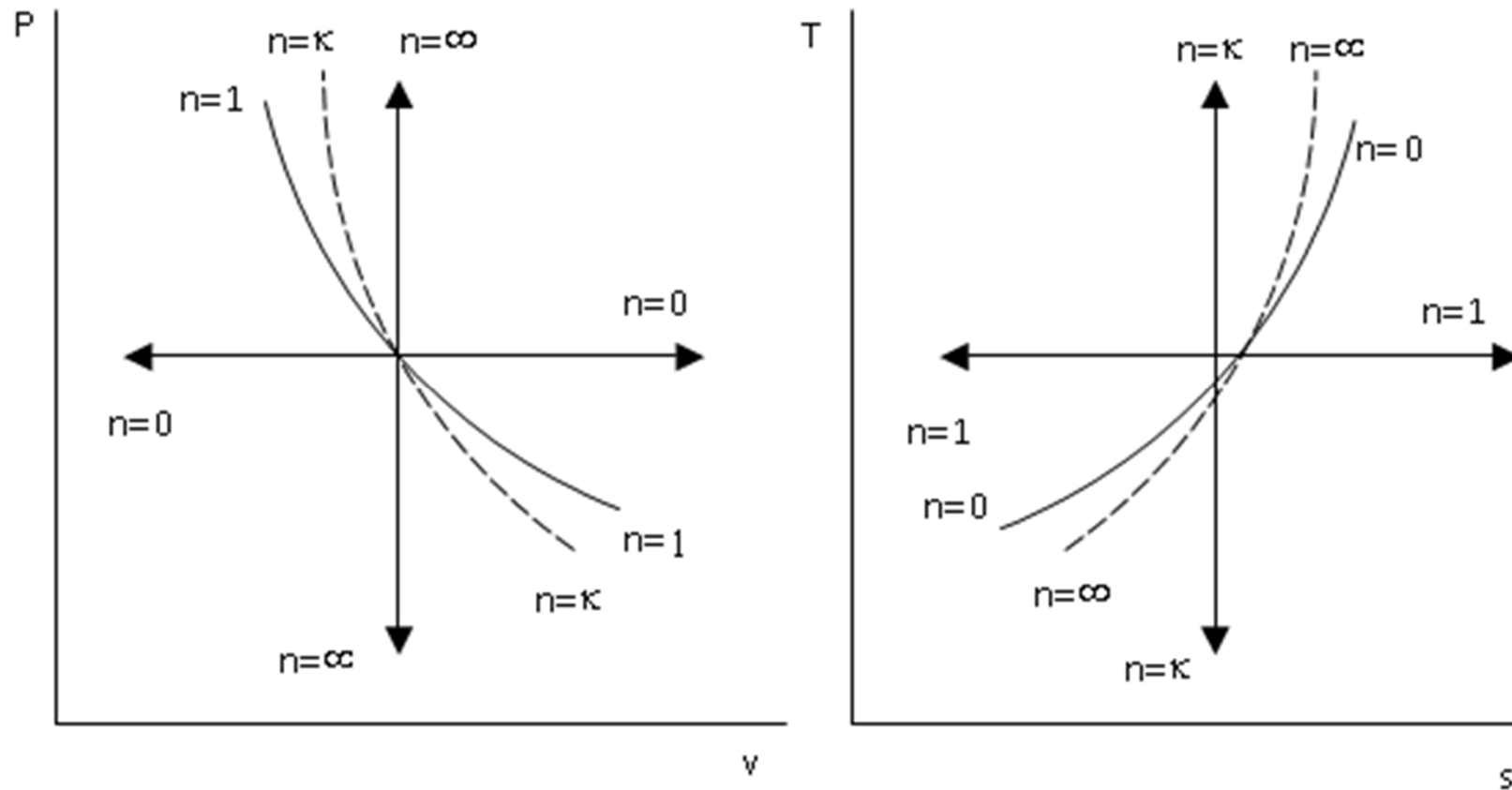
# Promjene stanja idealnog gasa

## ► Osnovni izrazi za proračun promjena stanja idealnog gasa

Proces	$n$	$p$ - $v$ - $T$ odnosi	Razmijenjena toplota	Slobodni rad	Tehnički rad
Izohorni	$\infty$	$v = \text{const}$ $T / p = \text{const}$	$c_v (T_2 - T_1)$	0	$v(p_2 - p_1)$
Izobarni	0	$p = \text{const}$ $T / v = \text{const}$	$c_p (T_2 - T_1)$	$p(v_2 - v_1)$	0
Izotermni	1	$T = \text{const}$ $pv = \text{const}$	$RT \ln \frac{v_2}{v_1}$	$p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$	$p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$
Adijabatski	$\kappa$	$pv^\kappa = \text{const}$ $Tv^{\kappa-1} = \text{const}$ $T^\kappa p^{1-\kappa} = \text{const}$	0	$\frac{R}{\kappa - 1} (T_1 - T_2)$	$\frac{\kappa}{\kappa - 1} (p_2 v_2 - p_1 v_1)$
Politropski	$n$	$pv^n = \text{const}$ $Tv^{n-1} = \text{const}$ $T^n p^{1-n} = \text{const}$	$c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} (T_2 - T_1)$	$\frac{R}{n - 1} (T_1 - T_2)$	$\frac{n}{n - 1} (p_2 v_2 - p_1 v_1)$

# Promjene stanja idealnog gasa

- Promjene stanja idealnog gasa u termodinamičkim dijagramima



# Rad idealnog i stvarnog klipnog kompresora

## ▶ Rad idealnog kompresora

### ▶ Sastoji se od 4 promjene stanja

#### ▶ Izobarno usisavanje a-1

$$L_{a-1} = p_1 (V_1 - V_a) = p_1 V_1$$

#### ▶ Kompresija 1-2

Formula za rad ovisna od vrste procesa

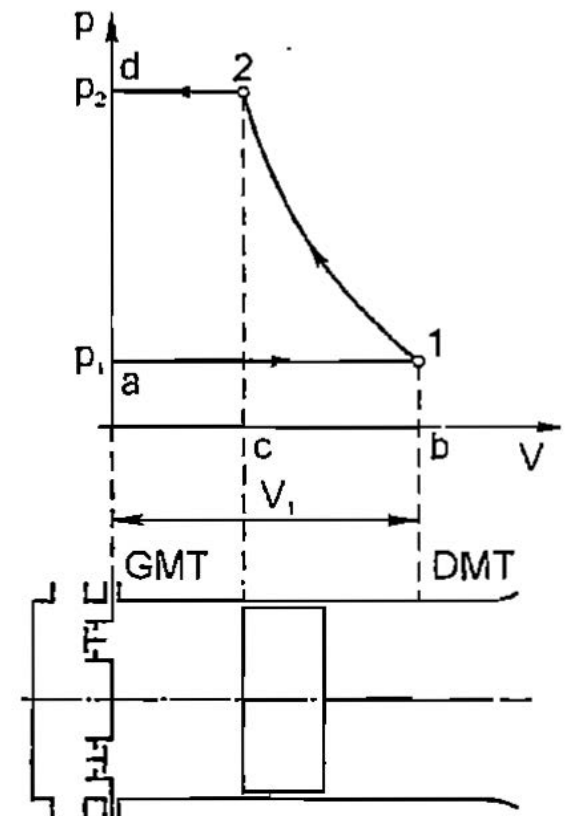
#### ▶ Izobarno istiskivanje 2-d

$$L_{2-d} = -p_2 (V_2 - V_d) = -p_2 V_2$$

### ▶ Ukupan rad (tehnički rad)

#### ▶ Predstavljen površinom a-1-2-d

$$L_k = -\int_1^2 v dp = L_{a-1} - L_{1-2} - L_{2-d}$$



# Rad idealnog i stvarnog klipnog kompresora

## ► Rad stvarnog kompresora

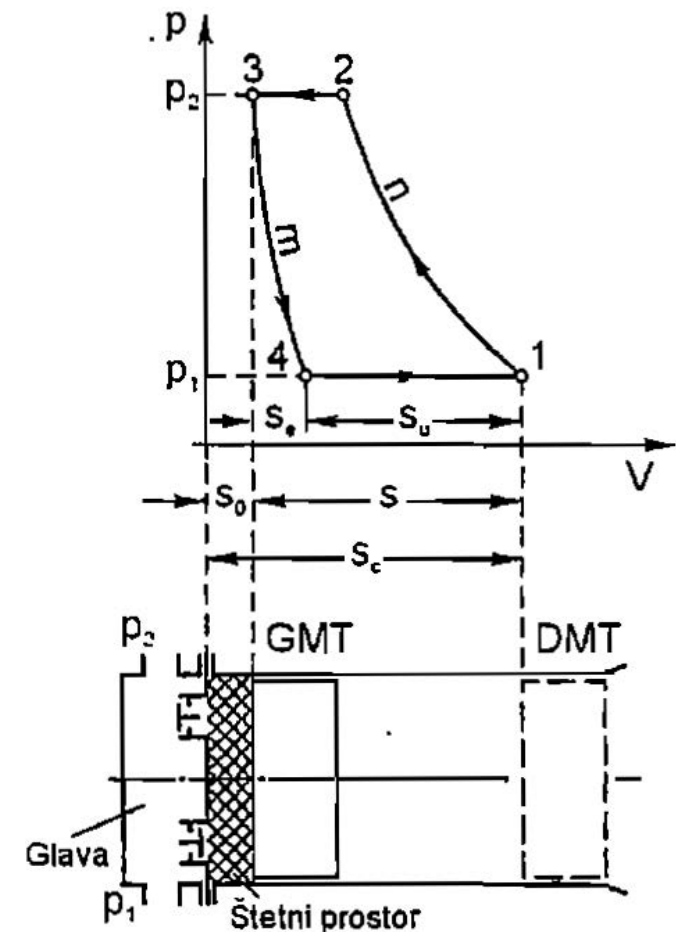
- ▶ Zbog gubitaka ima slabiji učinak od idealnog
  - ▶ Usisana masa je manja od teorijske
  - ▶ Zaostali gas stanja 4 prije usisavanja novog gasa prvo ekspanrira u procesu 3-4
  - ▶ Usisavanje novog gasa se dešava u procesu 4-1
  - ▶ Radna zapremina cilindra (od GMT do DMT)

$$V_s = As = \frac{D_c^2 \pi}{4} s$$

- ▶ Štetni prostor (koji se mora obezbijediti da ne dođe do udara klipa i površine cilindra)

$$V_0 = As_0$$

- Udio štetnog prostora  $a_s = \frac{V_0}{V_s} = \frac{s_0}{s}$



# Rad idealnog i stvarnog klipnog kompresora

- ▶ Stvarna zapremina usisavanja

$$V_u = As_u = A(s - s_e) = As \left(1 - \frac{s_e}{s}\right) = V_s \left(1 - \frac{s_e}{s}\right) = V_s \lambda_u$$

- ▶ Zapreminski stepen usisavanja (koeficijent punjenja)

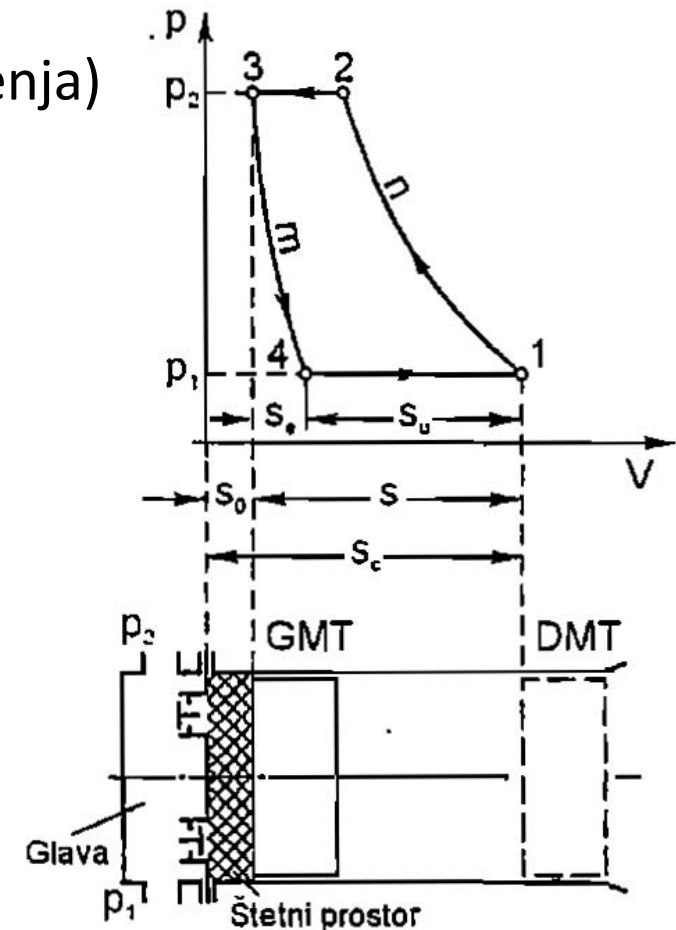
$$\lambda_u = \left(1 - \frac{s_e}{s}\right) = \frac{V_u}{V_s}$$

- ▶ Za politropsku kompresiju bit će

$$\frac{V_e}{V_0} = \frac{A(s_0 + s_e)}{As_0} = \frac{V_4}{V_3} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/n}$$

$$s_e = s_0 \left[ \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/n} - 1 \right]$$

$$\lambda_u = 1 - \frac{s_0}{s} \left[ \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/n} - 1 \right] = 1 - a(\varepsilon^{1/n} - 1)$$





# Kapacitet, snaga i koeficijent iskorištenja kompresora

---

## ► Kapacitet klipnog kompresora

- Za kompresor jednostranog dejstva sa jednim cilindrom

$$\dot{V}_k = \lambda V_s n$$

$V_s$  – radna zapremina cilindra

$n$  – broj obrtaja pogonskog vratila (dvostrukih hodova klipa)

$\lambda$  – ukupni zapreminski stepen iskorištenja (koeficijent punjenja)

$$\lambda = \lambda_u \lambda_{pr} \lambda_q \lambda_d$$

$\lambda_u$  – zapreminski stepen usisavanja zbog štetnog prostora

$\lambda_{pr}$  – zapreminski stepen usisavanja zbog prigušenja u ventilima

$\lambda_q$  – zapreminski stepen djelovanja zbog razmjene toplote sa zidovima cilindra

$\lambda_d$  – zapreminski stepen dobave

- Najveći uticaj ima  $\lambda_u$

# Kapacitet, snaga i koeficijent iskorištenja kompresora

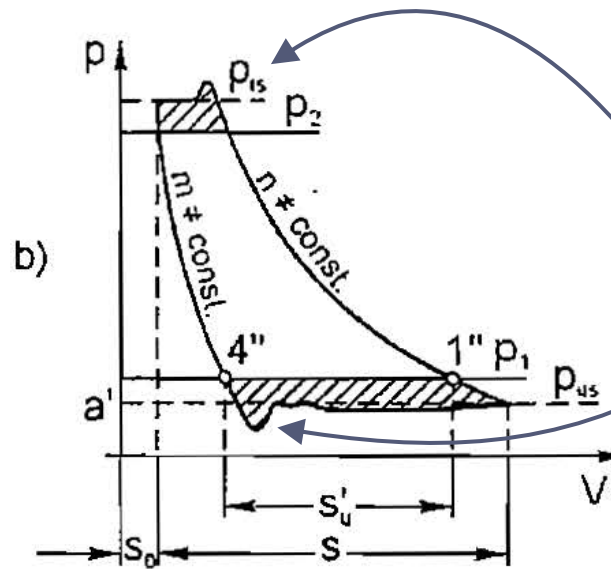
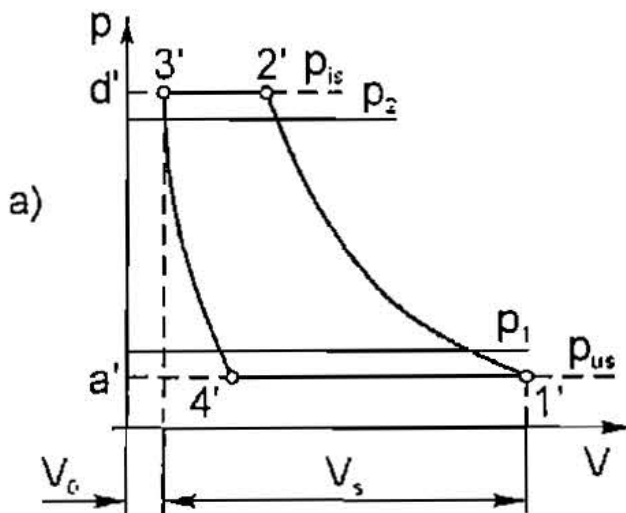
## ► Snaga klipnog kompresora

► Ako je kompresija izotermna

$$P_t = p_1 \dot{V}_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 \dot{V}_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

► Ako je kompresija politropska

$$P_t = \frac{n}{n-1} p_1 \dot{V}_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$



Dodatni utrošak rada zbog ubrzavanja i usporavanja pokretnih dijelova pri otvaranju i zatvaranju ventila

# Kapacitet, snaga i koeficijent iskorištenja kompresora

## ► Indikatorski dijagram kompresora

- Predstavlja u suštini termodinamički  $p$ - $V$  dijagram
  - Snimanje indikatorskog dijagrama vrši se eksperimentalno
  - Služi za određivanje snage kompresora

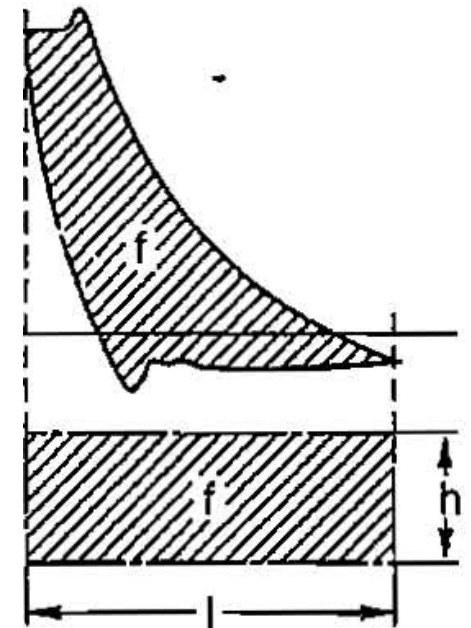
## ► Indicirani pritisak i indicirana snaga

- Predstavljaju srednju vrijednost pritiska i snage, na osnovu indikatorskog dijagrama

$$p_i = \frac{h_i}{l}, \quad P_i = Ap_i sn$$

- Mehanički koeficijent iskorištenja i efektivna snaga koju je potrebno obezbijediti

$$\eta_m = \frac{P_i}{P_e}, \quad P_e = \frac{Ap_i sn}{\eta_m}$$



# Kapacitet, snaga i koeficijent iskorištenja kompresora

## ▶ Indicirani koeficijenti iskorištenja kompresora

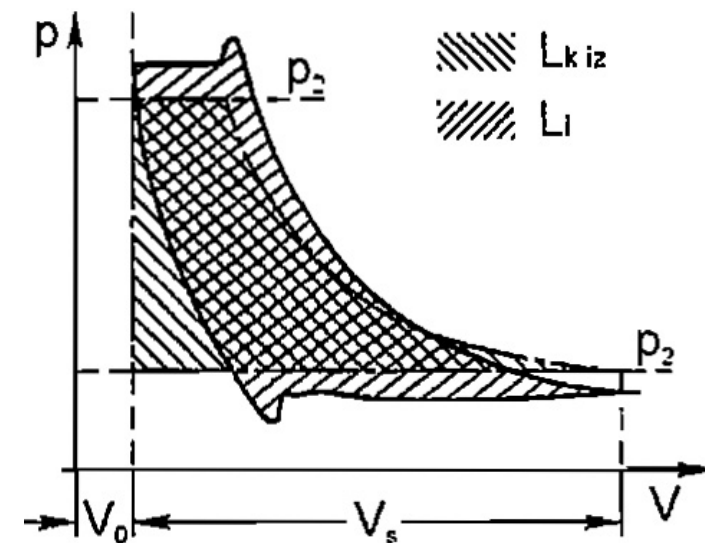
### ▶ Izotermni indicirani koeficijent iskorištenja

- ▶ Odnos najmanje moguće snage izoternog sabijanja idealnog kompresora i indicirane snage stvarnog kompresora (iste usisne mase)

$$\eta_{iz,i} = \lambda \frac{P_{iz}}{P_i}$$

### ▶ Efektivni indicirani koeficijent iskorištenja

- ▶ Odnos najmanje moguće snage izoternog sabijanja idealnog kompresora i efektivne snage stvarnog kompresora (iste usisne mase)



- Indicirani koeficijenti iskorištenja predstavljaju mjeru savršenosti utroška energije za potrebe sabijanja gasa

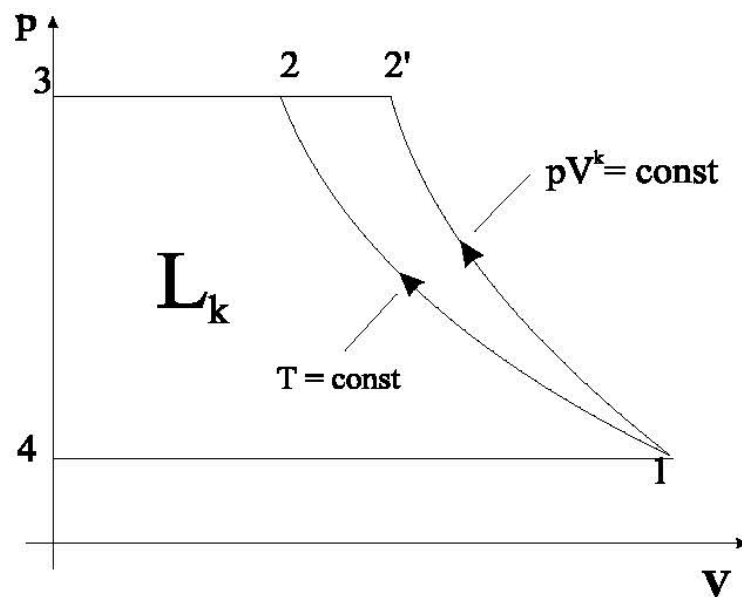
# Primjer



Klipni kompresor usisava zrak,  $R=287 \text{ J/(kg K)}$ , pritiska  $p_1=1 \text{ bar}$  i temperature  $t_1=20^\circ\text{C}$  i sabija ga do pritiska  $p_2=6 \text{ bar}$ . Ako je kapacitet kompresora  $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ , odrediti:

- a) masu usisanog zraka u toku  $1 \text{ h}$
- b) Teorijsku snagu kompresora pri izotermnom i adijabatskom sabijanju kod kojeg je temperatura nakon sabijanja  $t_2=240^\circ\text{C}$
- c) Potrošnju vode za hlađenje kod izoternog sabijanja, ako se voda tokom hlađenja kompresora zagrije za  $\Delta t=10^\circ\text{C}$
- d) Hod klipa u cilindru ako je koeficijent punjenja  $\lambda=0,87$ , prečnik cilindra  $D=120 \text{ mm}$ , broj obrtaja pogonskog vratila  $n=400\text{min}^{-1}$ .

# Primjer



1-2 - Kompresija (sabijanje)

2-3 - Izduvavanje komprimovanog vazduha

3-4 - U 3 se zatvara izduvni ventili , a u 4 otvara usisni ventil

4-1 - Usisavanje vazduha

a) Masa usisanog zraka

$$\dot{m} = \frac{p_1 \dot{V}}{RT_1} = \frac{10^5 \cdot 1200}{287 \cdot 293} = 1427 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

# Primjer



b) Teorijska snaga kompresora pri izotermnom i adijabatskom sabijanju

$$L_{iz} = RT_1 \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right) = 287 \cdot 293 \ln \frac{1}{6} = -150671 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = -150,671 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$P_{iz} = \dot{m} \cdot |L_{iz}| = \frac{1427}{3600} \cdot 150,671 = 59,7 \text{ kW}$$

$$L_{ad} = \frac{R}{\kappa - 1} (T_1 - T_2) = \frac{287}{1,4 - 1} (293 - 513) = -157850 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = -157,85 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$P_{ad} = \dot{m} \cdot |L_{ad}| = \frac{1427}{3600} \cdot 157,85 = 62,6 \text{ kW}$$

c) Potrošnja vode za hlađenje

$$\dot{m}_v = \frac{P_{iz}}{c_p \Delta t} = \frac{59,7}{4,18 \cdot 10} = 1,428 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 5141,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

d) Hod klipa u cilindru

$$\dot{V} = \lambda \frac{D^2 \pi}{4} s n, \quad s = \frac{4 \dot{V}}{\lambda D^2 \pi n} = \frac{4 \cdot 1200}{0,87 \cdot 0,12^2 \pi 400 \cdot 60} = 0,0509 \text{ m} = 5,09 \text{ cm}$$