ENERGETSKI STROJI

- Uvod
- Pregled teoretičnih osnov
    - Hidrostatika
    - Dinamika tekočin
    - Termodinamika
    - Podobnostni zakoni
- Volumetrični stroji
- Turbinski stroji
- Energetske naprave

TERMODINAMIKA

Zakon o ohranitvi energije

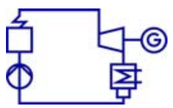
Krožni procesi

Delo, moč in izkoristek

Tok tekočine skozi šobe

Prenos toplote

Goriva in zgorevanje

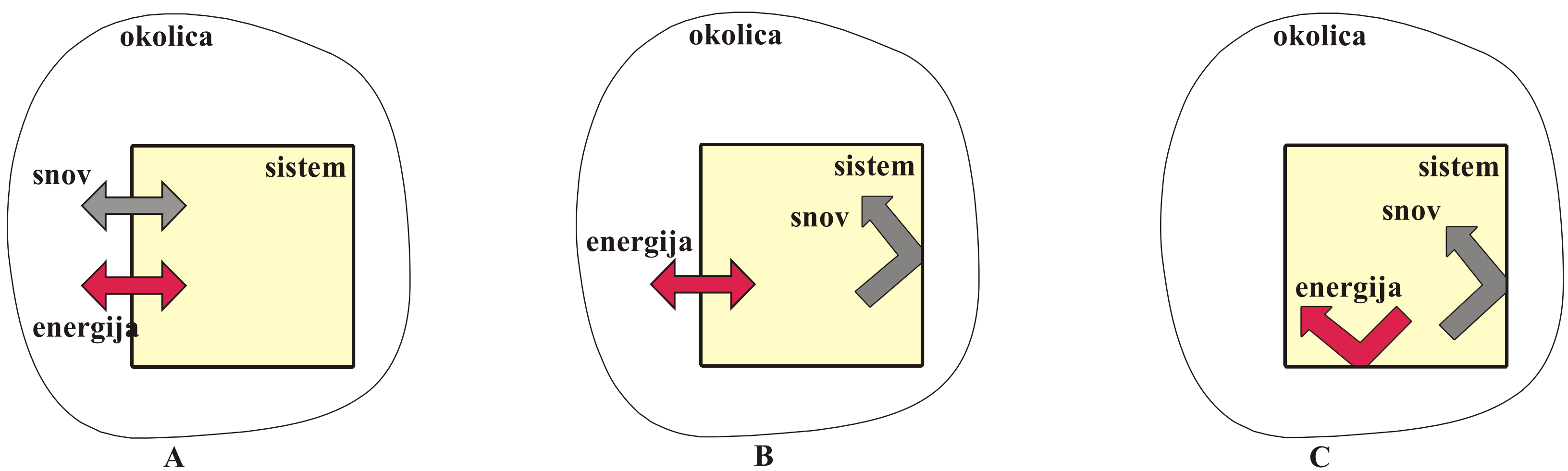


Zakon o ohranitvi energije

termodinamski sistemi

- Izoliran sistem: vsota energij (eksergij, anergij) je konstantna
- Sistem je omejen s stenami (prehod mase in energij)
- Sistem je obdan z okolico, s katero izmenjuje maso in energijo
- Delo ***W*** in toplote ***Q*** delujeta na ***meji*** sistema

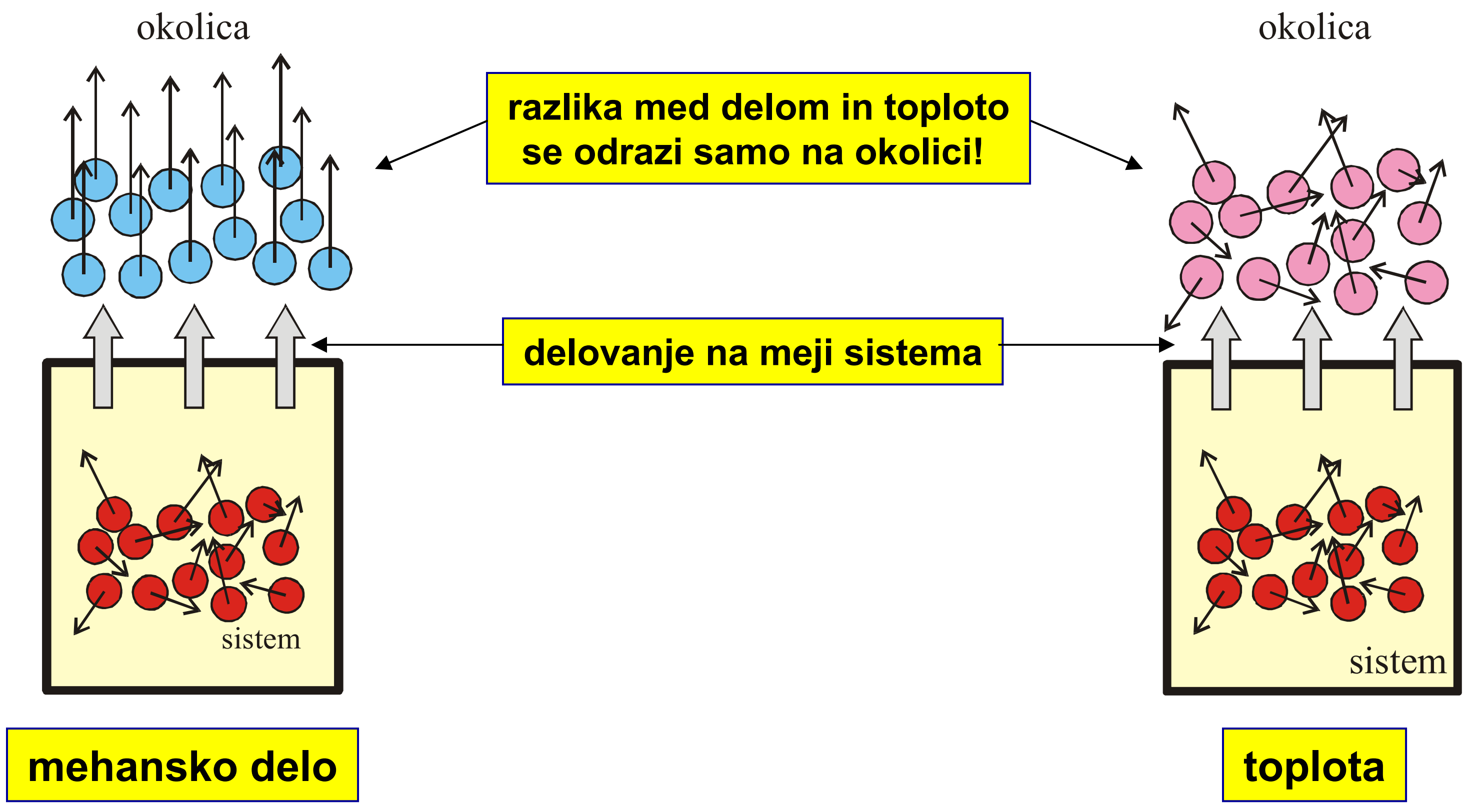
odprti **energijsko odprti** **zaprti**



energija, ki prehaja *mejo* sistema – prehodna energija: *mehansko delo* in *toplota*

Zakon o ohranitvi energije

sistem in okolica – mehansko delo in toplota



Zakon o ohranitvi energije

energijska bilanca splošne preobrazbe sistema

$$U_1 + p_1 \cdot V_1 + m \cdot \frac{v_1^2}{2} + m \cdot g \cdot H_1 + Q_{12} = U_2 + p_2 \cdot V_2 + m \cdot \frac{v_2^2}{2} + m \cdot g \cdot H_2 + W_{t12}$$

- notranja energija poljubne oblike
- tlačna energija (polnilno in praznilno delo)
- kinetična energija
- goedetska potencialna energija
- toplota
- tehnično delo

Zakon o ohranitvi energije

posebni primeri

Bernoullijeva enačba:

$$U_1 + p_1 \cdot V_1 + m \cdot \frac{v_1^2}{2} + m \cdot g \cdot H_1 + Q_{12} = U_2 + p_2 \cdot V_2 + m \cdot \frac{v_2^2}{2} + m \cdot g \cdot H_2 + W_{t12}$$

nestisljiva tekočina brez trenja

adiabatni tok: brez dovoda in odvoda toplote

brez pridobljenega ali porabljenega (tehničnega) dela

$$p_1 \cdot V_1 + m \cdot \frac{v_1^2}{2} + m \cdot g \cdot H_1 = p_2 \cdot V_2 + m \cdot \frac{v_2^2}{2} + m \cdot g \cdot H_2$$

Zakon o ohranitvi energije

posebni primeri

opravljanje tehničnega dela iz notranje energije (stacionarna preobrazba iz mirujočega stanja):

$$U_1 + p_1 \cdot V_1 + \cancel{m \cdot \frac{v_1^2}{2}} + \cancel{m \cdot g \cdot H_1} + Q_{12} = U_2 + p_2 \cdot V_2 + \cancel{m \cdot \frac{v_2^2}{2}} + \cancel{m \cdot g \cdot H_2} + W_{t12}$$

$$Q_{12} - W_{t12} = \underbrace{(U_2 + p_2 \cdot V_2)}_{\text{ENTALPIJA SNOVI V KONČNEM STANJU}} - \underbrace{(U_1 + p_1 \cdot V_1)}_{\text{ENTALPIJA SNOVI V ZAČETNEM STANJU}}$$

ENTALPIJA SNOVI V KONČNEM STANJU — **ENTALPIJA SNOVI V ZAČETNEM STANJU**

$$Q_{12} - W_{t12} = m \cdot (h_2 - h_1)$$

Entalpija je veličina stanja!

Energijo odprtega sistema:
- poveča dovedena toplota
- zmanjša iz sistema pridobljeno delo

Zakon o ohranitvi energije

posebni primeri

delo enkratne ekspanzije (absolutno delo)

$$U_1 + p_1 \cdot V_1 + m \cdot \frac{v_1^2}{2} + m \cdot g \cdot H_1 + Q_{12} = U_2 + p_2 \cdot V_2 + m \cdot \frac{v_2^2}{2} + m \cdot g \cdot H_2 + W_{t12}$$

polnilno delo

praznilno delo

Absolutno delo

$$W_{u12} = W_{t12} - p_1 \cdot V_1 + p_2 \cdot V_2$$

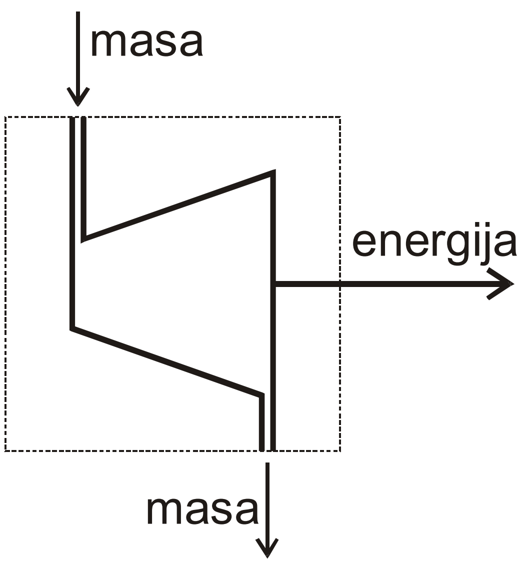
Tehnično delo, zaprt sistem:

$$W_{t12} = 0 \quad \Rightarrow \quad Q_{12} - W_{t12} = U_2 - U_1$$

Zakon o ohranitvi energije

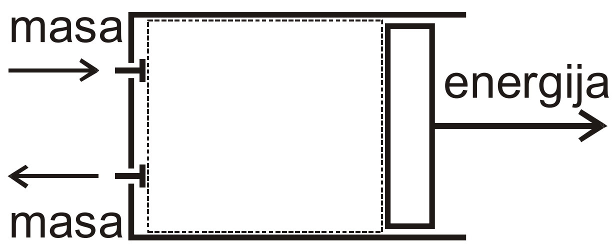
polnilno in praznilno delo

A turbinski stroj



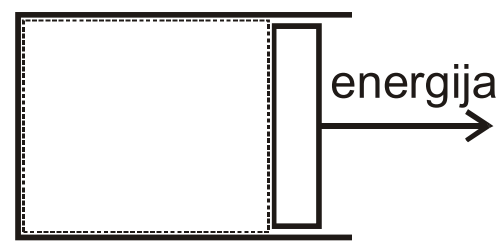
neprekinjeno polnjenje in praznjenje

B volumenski stroj



periodično polnjenje in praznjenje

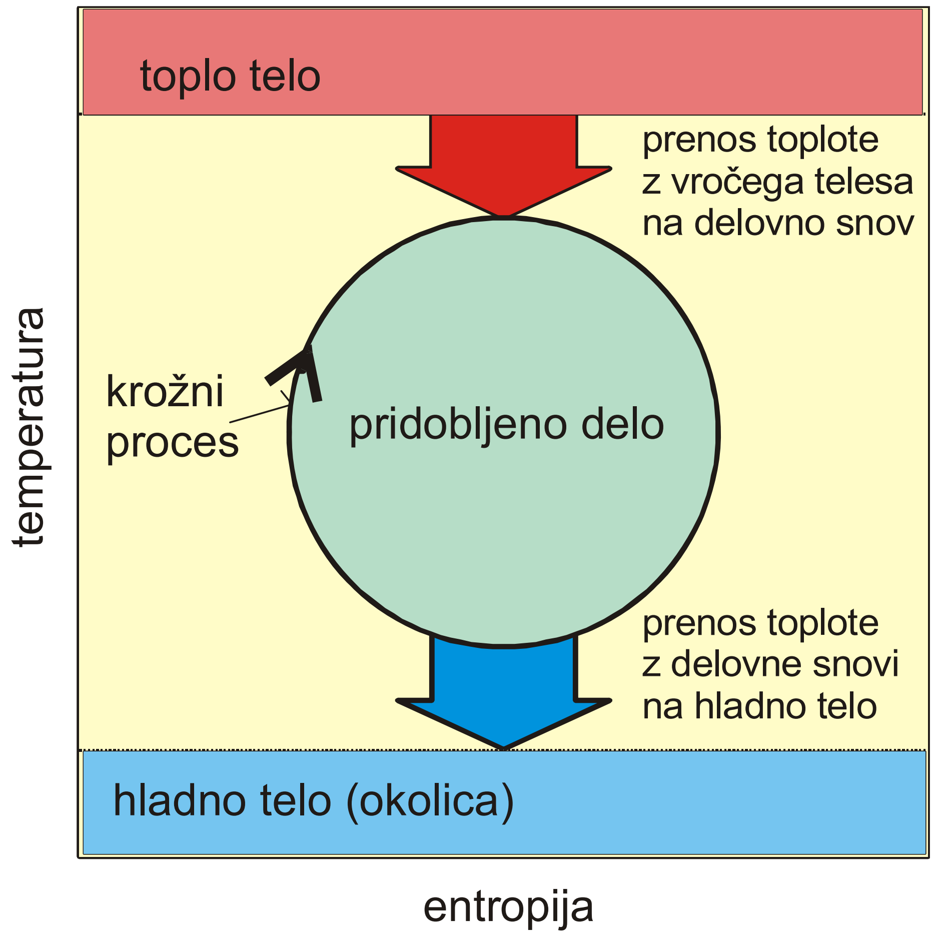
C volumenski stroj



brez polnjenjenja in praznjenja

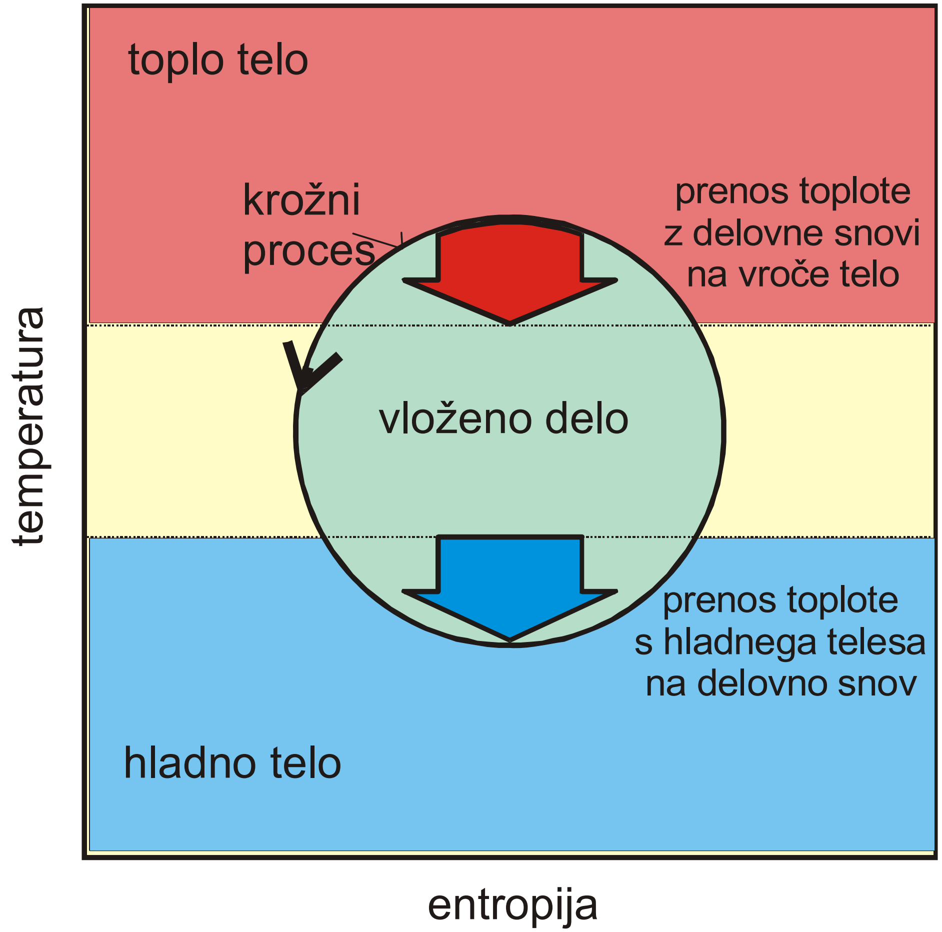
Krožni procesi

desni krožni procesi – toplotni stroji



Krožni procesi

levi krožni procesi – hladilni stroji



Krožni procesi

primerjalni krožni procesi

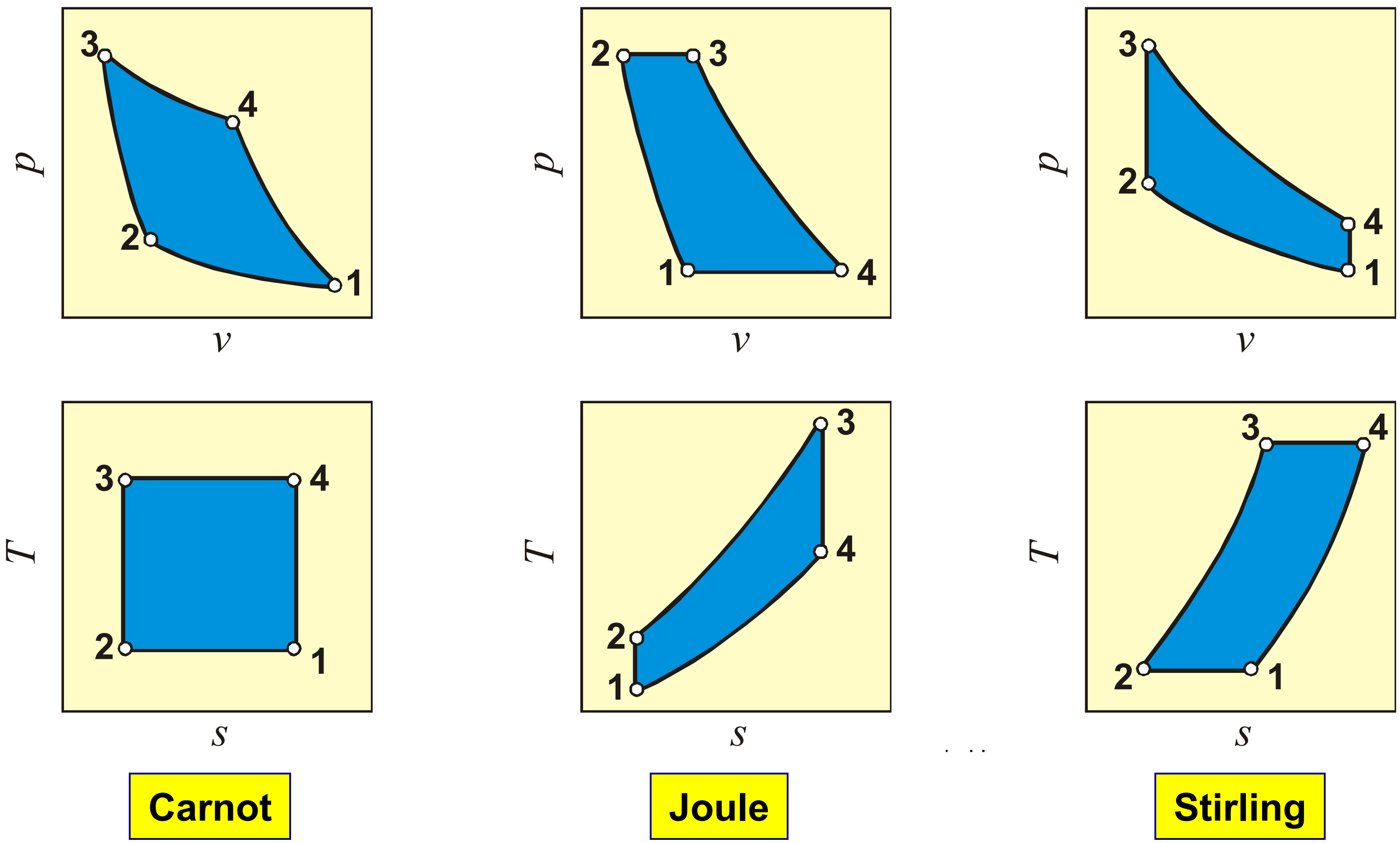
Pogoste predpostavke:
- idealni plin
- povračljive preobrazbe

Periodično delujoči stroji (volumenski toplotni stroji)
- vse preobrazbe se izvedejo v enem samem stroju
- uporaba diagrama $p - v$

Zvezno delujoči (turbinski) stroji (toplotno postrojenje)
- posamezne preobrazbe se izvedejo v ločenem stroju
- povezovanje strojev v postroje in postrojenja
- uporaba diagramov: $T - s$ (idelani plin)
  $h - s$ (realni plin)

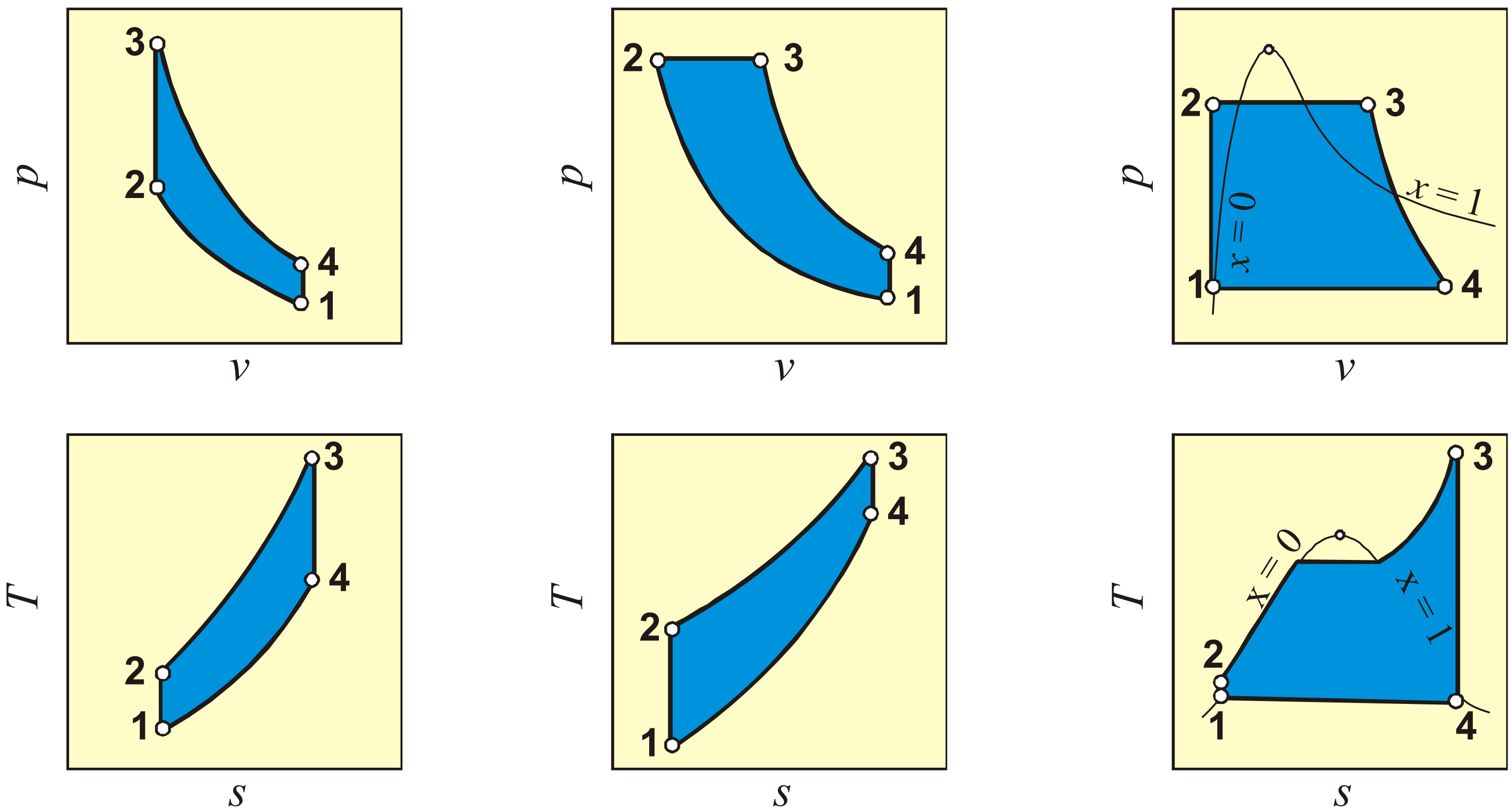
Krožni procesi

primerjalni krožni procesi



Krožni procesi

primerjalni krožni procesi



Otto **Diesel** **Clausius – Rankine**

Mollierov *h-s* diagram

prednosti za tehniško uporabo

1. glavni stavek termodinamike

$$\mathrm{d}q = T \cdot \mathrm{d}s = \mathrm{d}h - v \cdot \mathrm{d}p$$

izobarni dovod toplote

$$\mathrm{d}p = 0 \Rightarrow T\mathrm{d}s = \mathrm{d}h = \mathrm{d}q$$

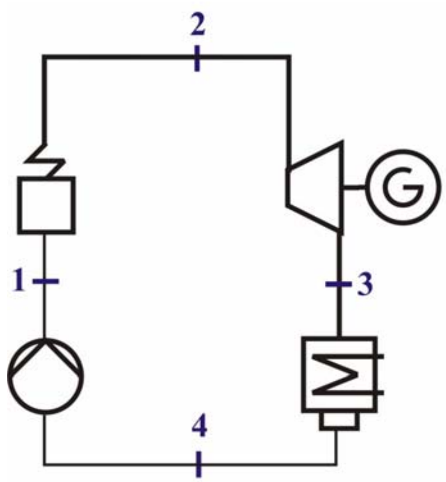
Pri konstantnem tlaku dovedena (odvedena) toplota je enaka razliki entalpij snovi, ki ji doploto dovajamo (odvajamo).

adiabatna delovan preobrazba (kompresija, ekspanzija)

$$\mathrm{d}q = 0 \Rightarrow v\mathrm{d}p = \mathrm{d}h$$

Ob adiabati pridobljeno ali porabljeno tehnično delo je enako entalpijski razliki snovi, ki je podvržena preobrazbi.

Primer: parni krožni proces



1 → 1a izobarno segrevanje vode

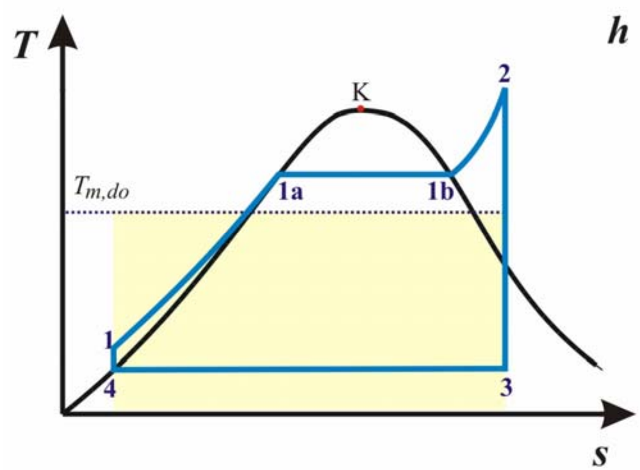
1a → 1b uparjanje vode: p=konst; T=konst

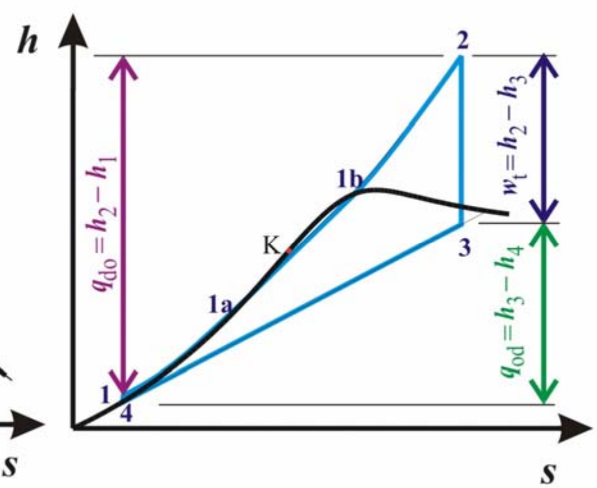
1b → 2 izobarno pregrevanje pare

2 → 3 izentropna ekspanzija

3 → 4 odvod toplote (kondenzacija): p=konst; T=konst

4 → 1 dvig tlaka v črpalki



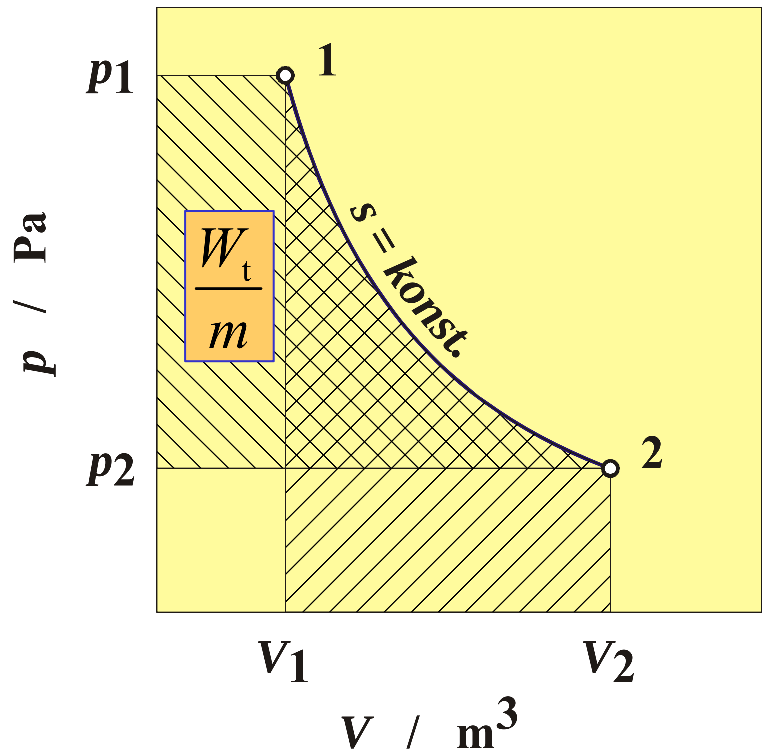


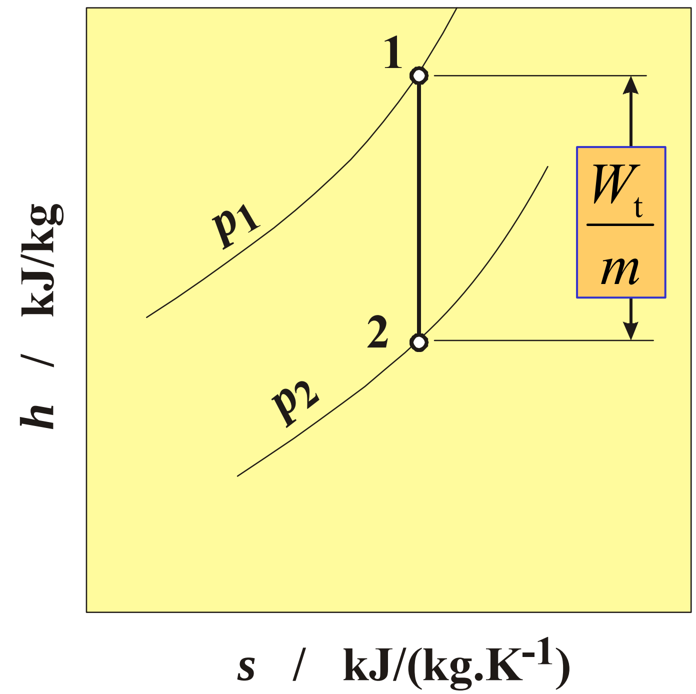
Krožni procesi

delo

Tehnično delo preobrazbe:

$$W_t = \int_{p_1}^{p_2} v \cdot \mathrm{d}p$$





Krožni procesi

delo, moč

Delo krožnega procesa:

V krožnem procesu pridobljeno tehnično delo (ekspanzije), zmanjšano za porabljeno tehnično delo (kompresije)

$$W = W_{\mathrm{tE}} - W_{\mathrm{tK}}$$

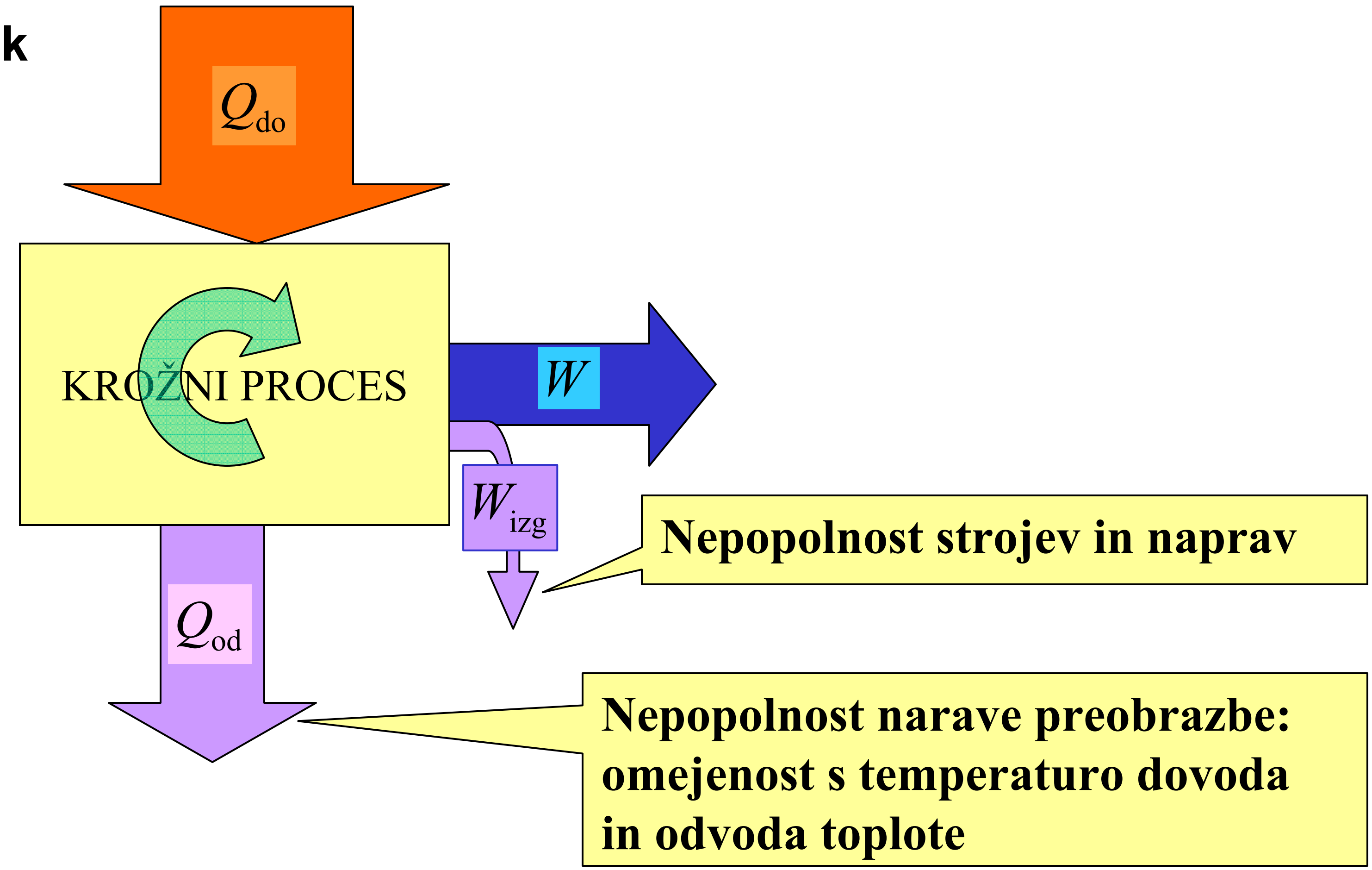
Moč krožnega procesa:

$$P = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = \dot{W}$$

Krožni procesi

Učinkovitost pretvorbe energije v krožnem procesu

izkoristek



Izkoristek: merilo za učinkovitost preobrazbe

$$\text{IZKORISTEK} = \frac{\text{IZKORIŠČENA ENERGIJA (MOČ)}}{\text{VLOŽENA ENERGIJA (MOČ)}}$$

POGONSKI STROJ: PRIDOBLJENO DELO JE MANJŠE OD TEORETIČNEGA

DELOVNI STROJ: PORABLJENO DELO JE VEČJE OD TEORETIČNEGA

TOPLOTNI KROŽNI PROCESI – PRETVORBA TOPLOTE V MEHANSKO DELO

Termični izkoristek krožnega procesa

$$\eta_c = \frac{P_{th}}{Q_{Go}} = \frac{P_{th}}{m_{Go} \cdot H_i}$$

P_{th} ... prosta moč krožnega procesa pri povračljivih preobrazbah

- **upošteva neopolnost narave preobrazbe**
- **pretežni del nepovračljivosti enostavnih krožnih procesov**

Notranji (indicirani) izkoristek

pogonski stroj:

$$\eta_i = \frac{P_i}{P_{th}}$$

delovni stroj:

$$\eta_i = \frac{P_{th}}{P_i}$$

P_i ... prosta moč krožnega procesa pri dejanskih (politropnih) preobrazbah ali teoretična moč (na gredi) stroja

- **upošteva neopolnost kompresij in ekspanzij v strojih (nepopolnost prenosa mehanske energije s fluida na gred)**
- **stiskanje kapljevin in ekspanzija plinov (par ugodna)**

Mehanski izkoristek

pogonski stroj:

$$\eta_{\mathrm{m}} = \frac{P_{\mathrm{m}}}{P_{\mathrm{i}}}$$

delovni stroj:

$$\eta_{\mathrm{m}} = \frac{P_{\mathrm{i}}}{P_{\mathrm{m}}}$$

P_{m} ... dejanska prosta moč krožnega procesa
ali dejanska moč na gredi stroja

- **upošteva neopolnost prenosa mehanske moči gredi (ležaji, tesnila,...)**

Dejanski (efektivni izkoristek)

pogonski stroj:

$$\eta_{\mathrm{e}} = \frac{P_{\mathrm{m}}}{Q_{\mathrm{do}}} = \prod_{j} \eta_{j}$$

delovni stroj:

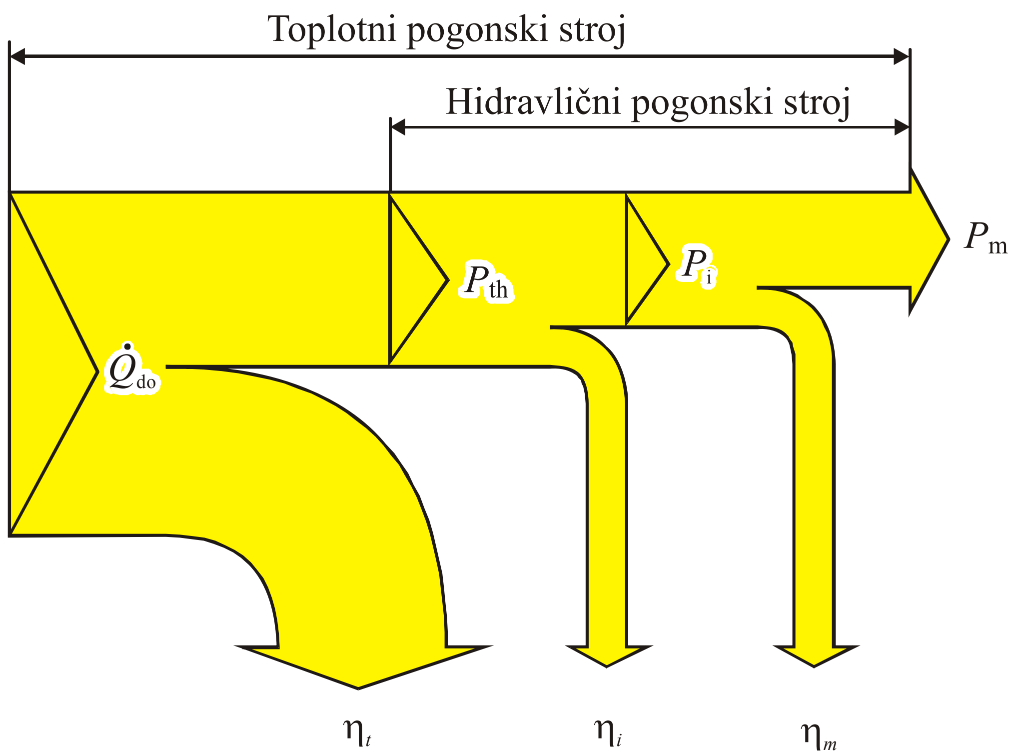
$$\eta_{\mathrm{e}} = \frac{P_{\mathrm{th}}}{P_{\mathrm{m}}} = \prod_{i} \eta_{i}$$

produkt izkoristkov vseh pretvorb – od začetnega do končnega stanja

- **upošteva uspešnost narave pretvorbe in**
- **pretvorb v posameznih strojih in napravah**

- **različne definicije za vsak posamičen primer**

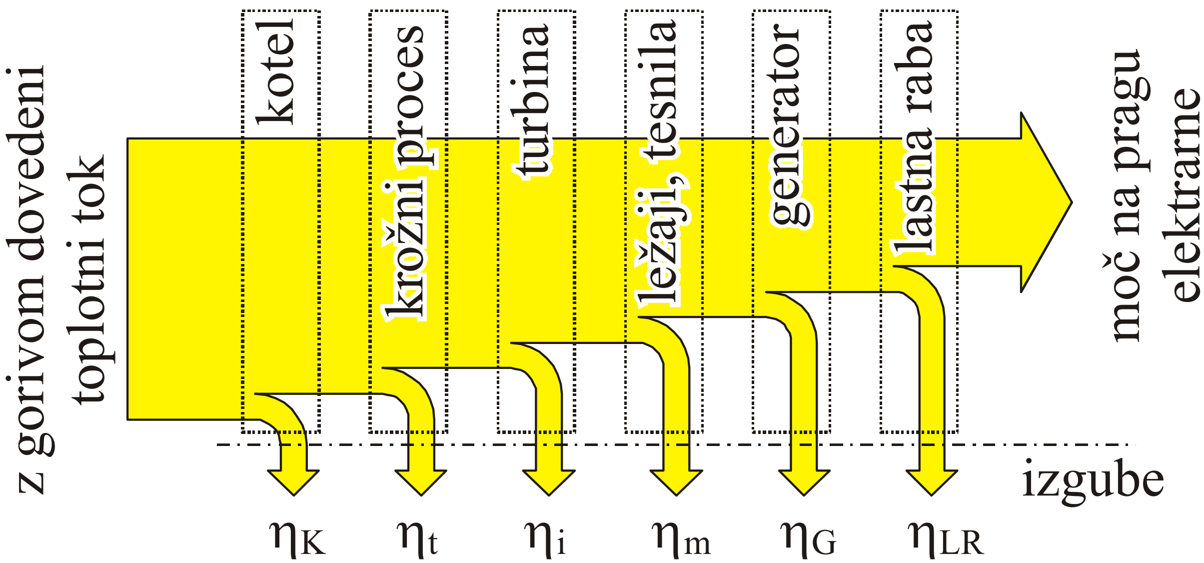
Izkoristek celotne pretvorbe



Primeri: PRETVORBA ENERGIJE V TERMOELEKTRARNI

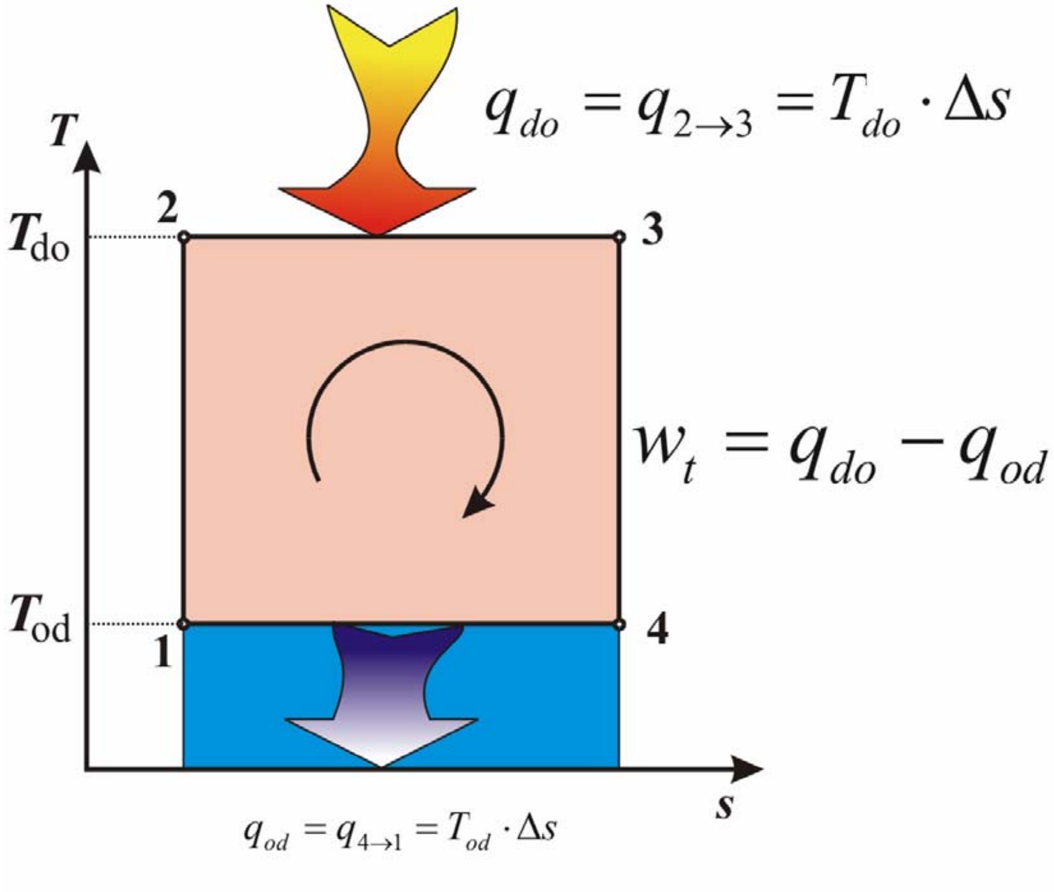
$$\eta_e = \underbrace{\frac{\dot{Q}_G}{\dot{Q}_K}}\cdot\underbrace{\frac{\dot{Q}_K}{W_{Tid}}}\cdot\underbrace{\frac{P_{Tid}}{P_T}}\cdot\underbrace{\frac{P_T}{P_m}}\cdot\underbrace{\frac{P_m}{P_G}}\cdot\underbrace{\frac{P_G}{P_E}}$$

$$\eta_e = \eta_K \cdot \eta_t \cdot \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_G \cdot \eta_{LR}$$

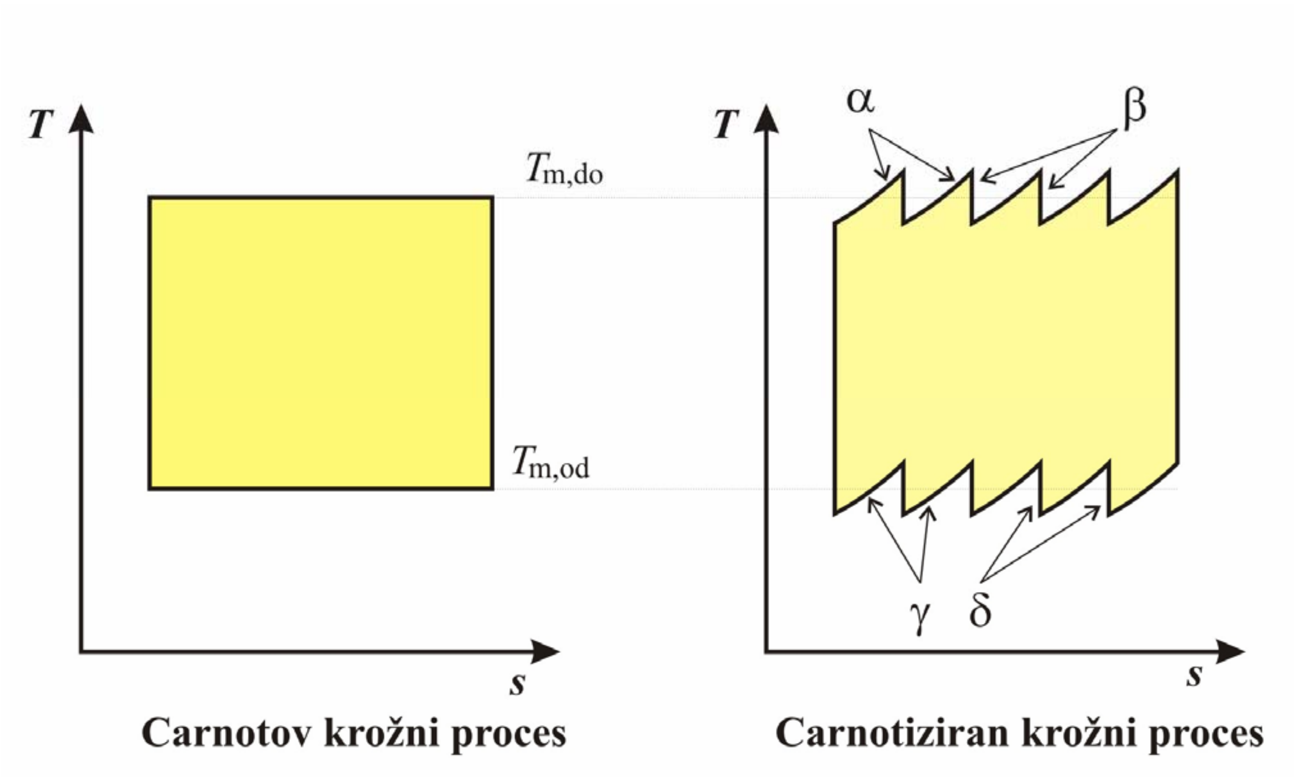


Princip optimiranja krožnih procesov

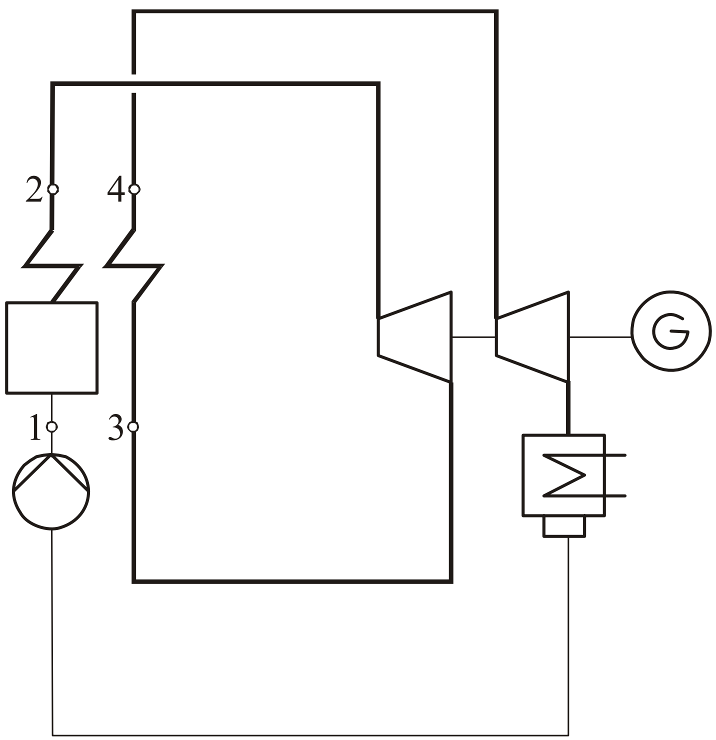
Carnotov krožni proces

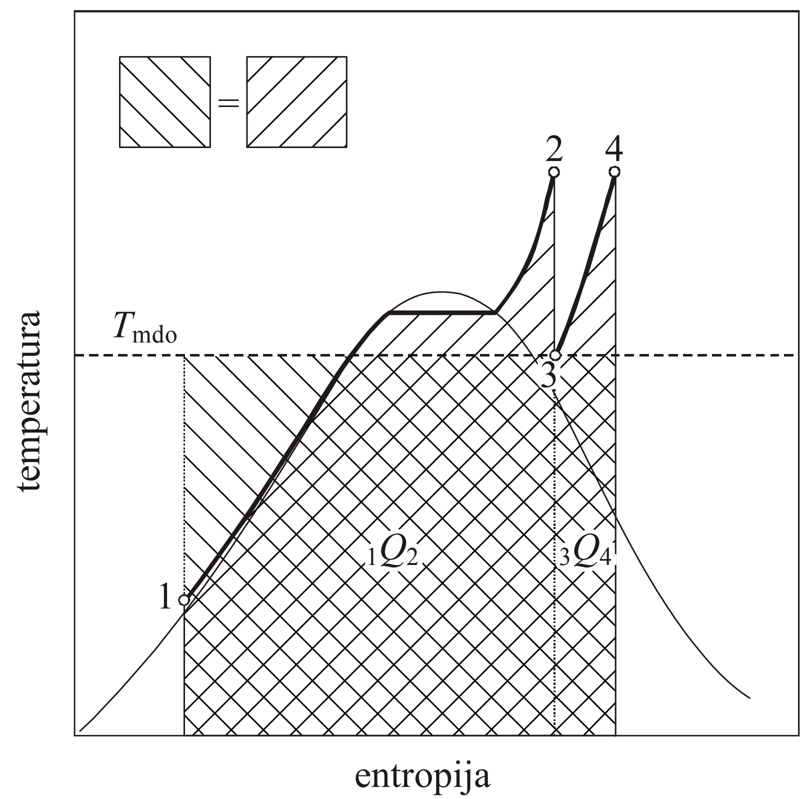


Carnotiziranje (optimiranje) poljubnega krožnega procesa

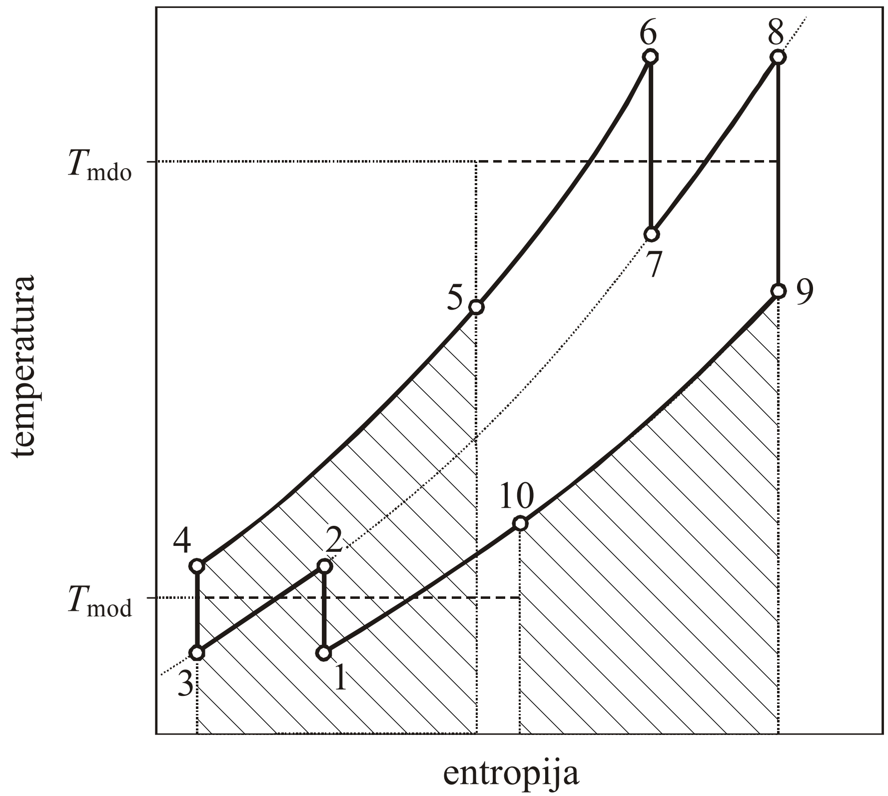


Primer: ponovno pregrevanje pare





Primer: Joulov plinski proces – vmesno hlajenje kompresije, sekvenčno zgorevanje (dovod toplote), regeneracija toplote



Tok tekočine skozi šobe

Tok plina skozi kanal: energijska enačba

$$U_1 + p_1 \cdot V_1 + m \cdot \frac{v_1^2}{2} + m \cdot g \cdot H_1 + Q_{12} =$$
$$U_2 + p_2 \cdot V_2 + m \cdot \frac{v_2^2}{2} + m \cdot g \cdot H_2 + W_{t12}$$

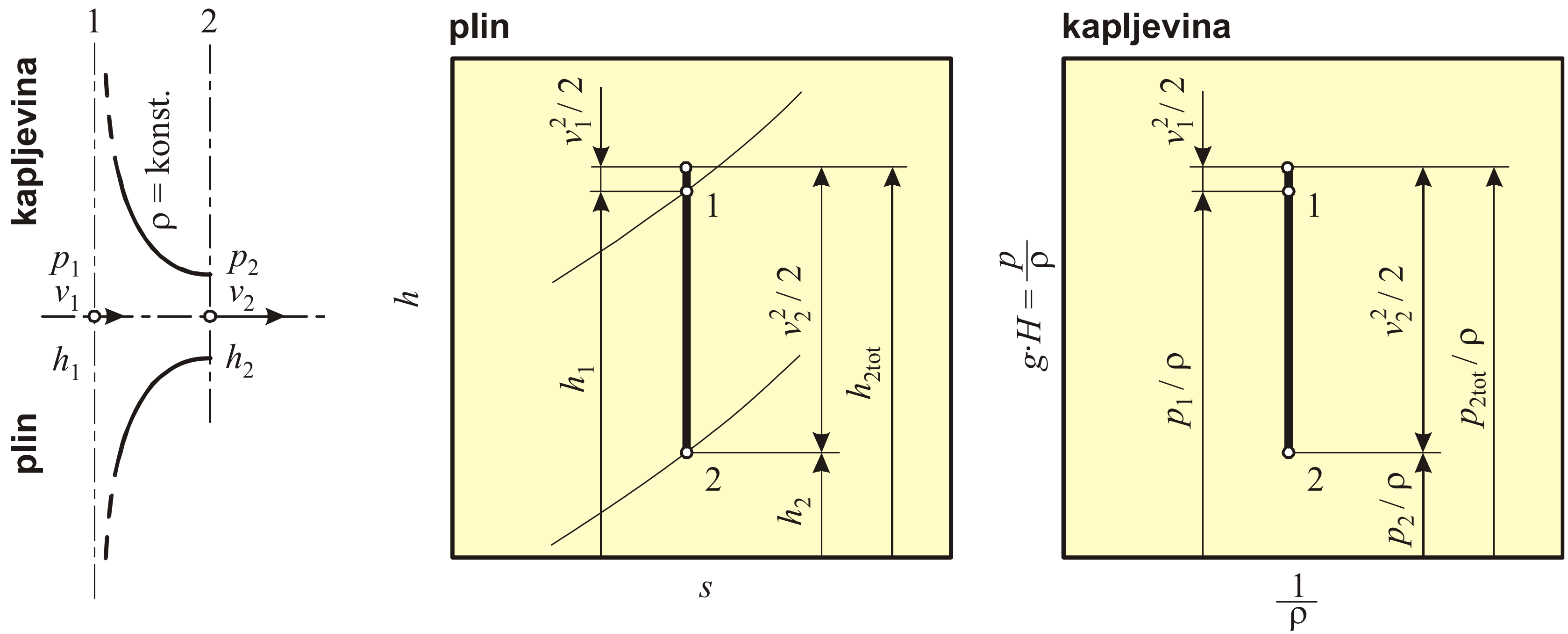
Izentropni tok brez opravljanja dela:

$$U_1 + p_1 \cdot V_1 + m \cdot \frac{v_1^2}{2} = U_2 + p_2 \cdot V_2 + m \cdot \frac{v_2^2}{2}$$

Totalna entalpija se ohranja:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} = h_2 + \frac{v_2^2}{2}$$

Tok tekočine skozi šobe



HITROST IZTEKANJA PLINA

Pospeševanje toka skozi konfuzor
(primer šoba v vodilniku parne turbinske stopnje)

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + 2 \cdot \left(h_1 - h_2\right)}$$

poenostavitev:

$$v_1^2 << v_2^2 \Rightarrow v_2 = \sqrt{2 \cdot \left(h_1 - h_2\right)}$$

za nestisljive tekočine:
(primer šoba Peltonove turbine)

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho \Rightarrow v_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{p_1 - p_2}{\rho}}$$

Iztekanje idealnega plina

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot (h_1 - h_2)} = \sqrt{2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2)}$$

$$c_p = \left. \frac{\delta h}{\delta T} \right|_{p = konst.}$$

enačba stanja idealnega plina:

$$T = \frac{p}{\rho \cdot R}$$

izentropna ekspanzija:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}$$

Iztekanje idealnega plina

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}$$

kontinuitetna enačba:

$$\dot{m} = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A$$

gostota masnega toka skozi šobo:

$$\frac{\dot{m}}{A} = \sqrt{2 \cdot \rho_1 \cdot p_1} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[\left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right]} = \sqrt{2 \cdot \rho_1 \cdot p_1} \cdot \Psi$$

Pretočna funkcija

$$\Psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}$$

Ničle pretočne funkcije:

$$\Psi = 0\,;\ \frac{p_2}{p_1} = 0 \qquad \boldsymbol{p_2 = 0}$$

$$\Psi = 0\,;\ \frac{p_2}{p_1} = 1 \qquad \boldsymbol{p_2 = p_1}$$

Maksimum pretočne funkcije:

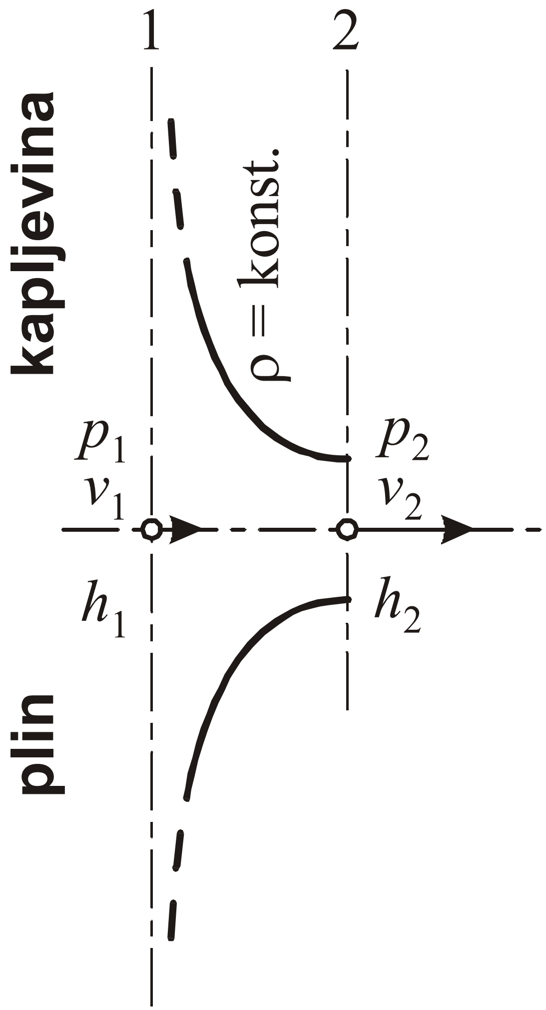
$$\frac{\partial \Psi}{\partial \left(\frac{p_2}{p_1} \right)} = 0$$

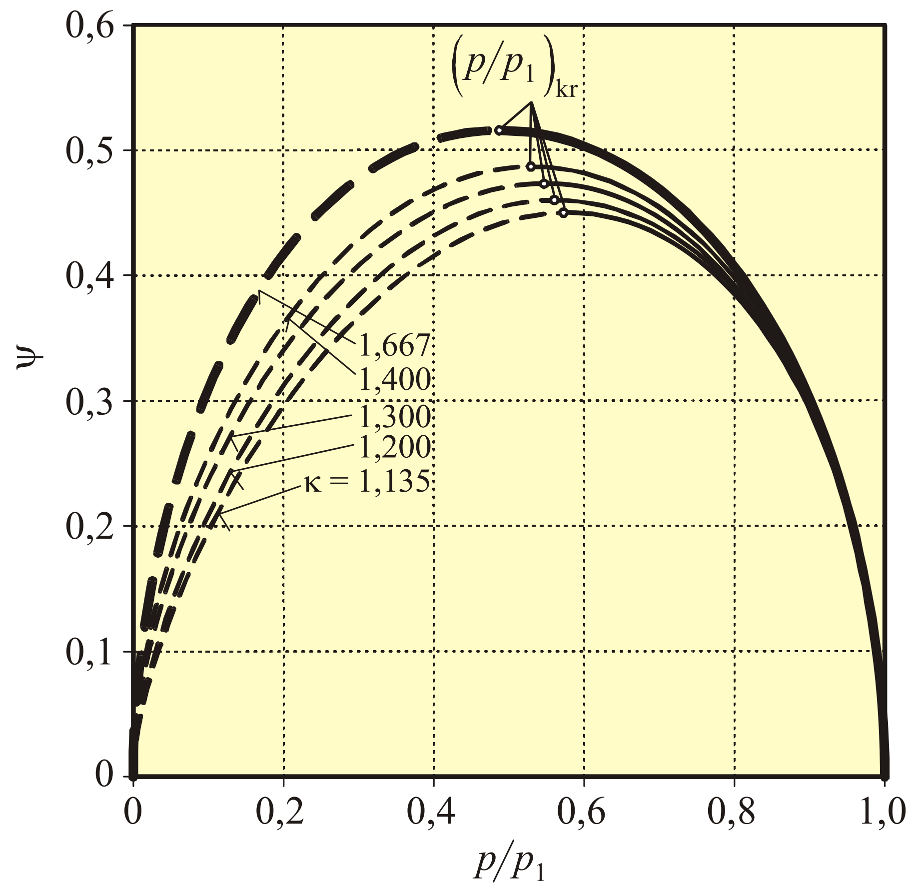
$$\Psi_{\max} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa + 1}}$$

Kritično (Lavalovo) tlačno razmerje:

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\mathrm{kr}} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$$

Iztekanje idealnega plina

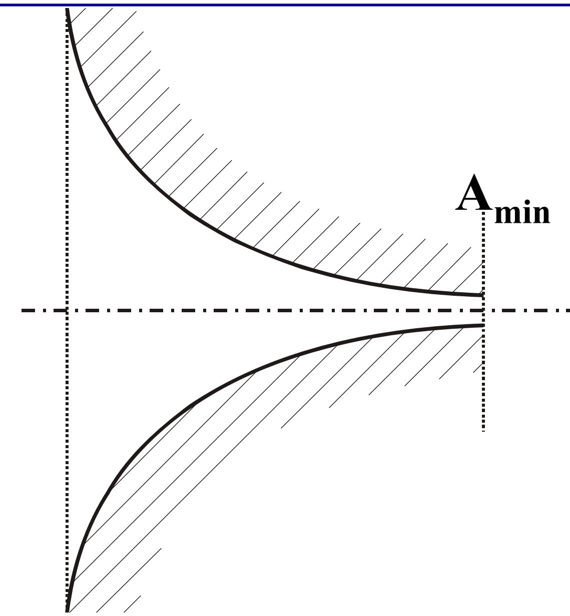




Iztekanje idealnega plina

Vrsta plina	κ	$(p_1/p_2)_{kr}$	Ψ_{max}
enoatomni plin	1,667	0,487	0,514
dvoatomni plin (zrak)	1,400	0,528	0,484
triatomni plin (pregreta para)	1,300	0,546	0,472

Kontinuitetna enačba



$$\dot{m} = A \cdot \Psi \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_1 \cdot p_1} = konst.$$

Konvergentna šoba: $$\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}l} < 0$$

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right) > \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{kr}$$

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right) < \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{kr} \Rightarrow \Psi < \Psi_{max} \Rightarrow \frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}l} > 0$$

Na najožjem preseku konvergentne šobe ne more vladati manjši tlak kot je kritični (Lavalov)

Kritično (Lavalovo) tlačno razmerje

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{\mathrm{kr}}$$

Zvočna hitrost

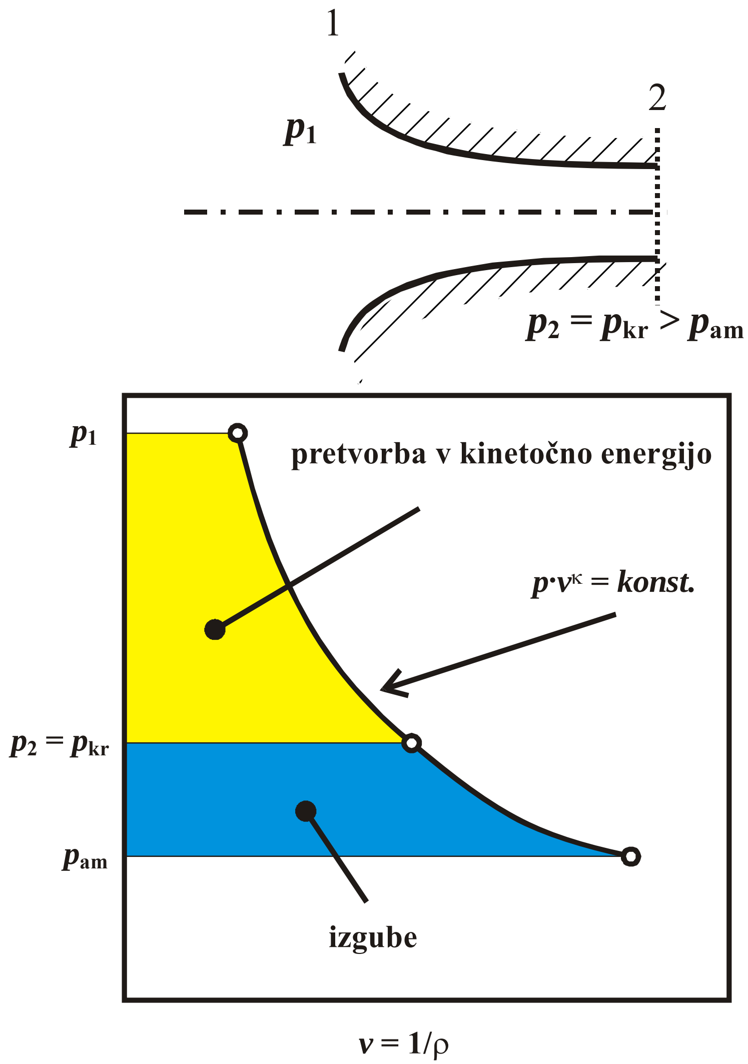
$$v_{\mathrm{kr}} = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T_2}$$

Na najožjem preseku konvergentne šobe hitrost ne more biti večja od zvočne (Lavalove) hitrosti

Machovo število

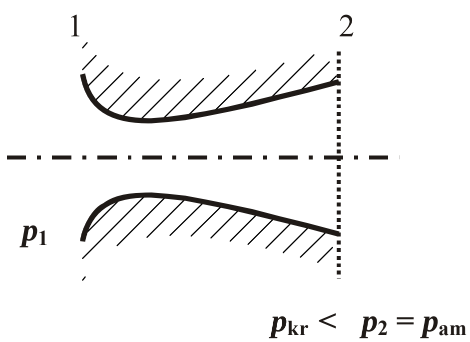
$$\mathrm{Ma} = \frac{v}{v_{\mathrm{kr}}} = \frac{\text{lokalna hitrost}}{\text{lokalna zvocna hitrost}}$$

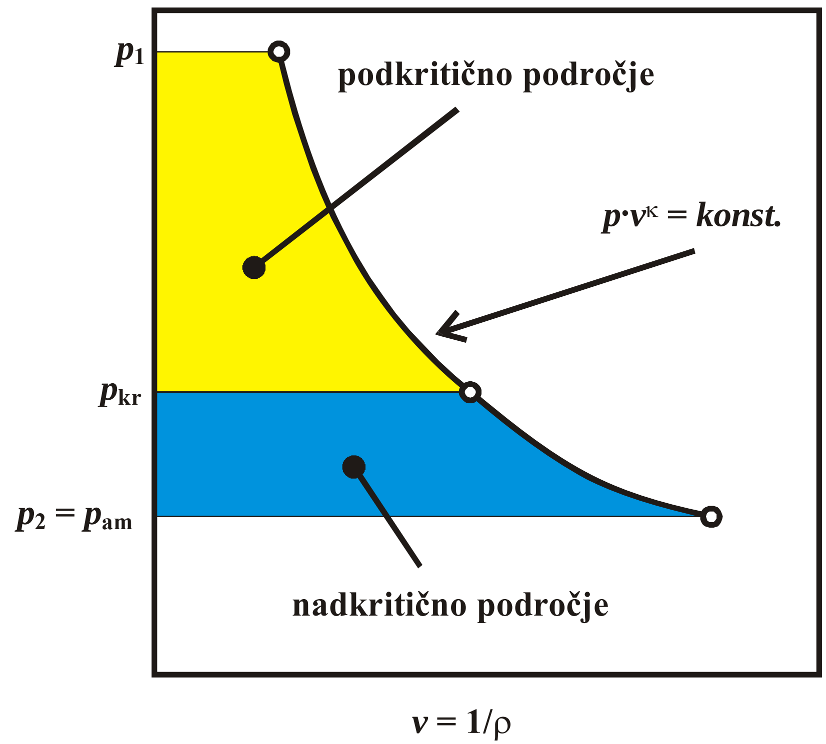
Zvočna hitrost je veličina stanja, saj je odvisna od lokalnega stanja (T_2) in od plina (κ, R)


1
2
p_1
$p_2 = p_{kr} > p_{am}$
p_1
pretvorba v kinetočno energijo
$p \cdot v^{\kappa} = konst.$
$p_2 = p_{kr}$
p_{am}
izgube
$v = 1/\rho$

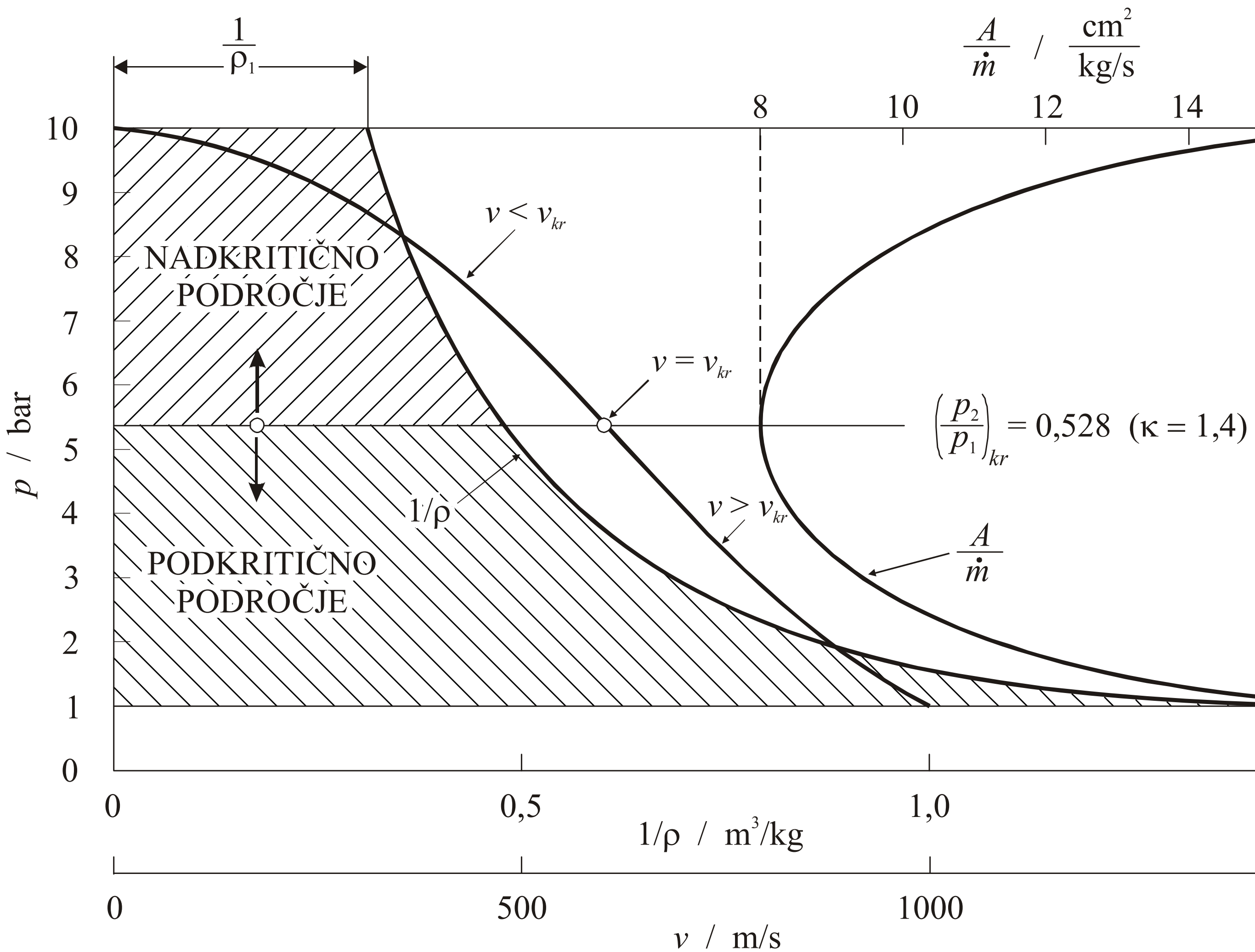
Konvergentno-divergentna šoba:

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right) < \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{\mathrm{kr}} \Rightarrow \Psi < \Psi_{\max} \Rightarrow \frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}l} > 0$$

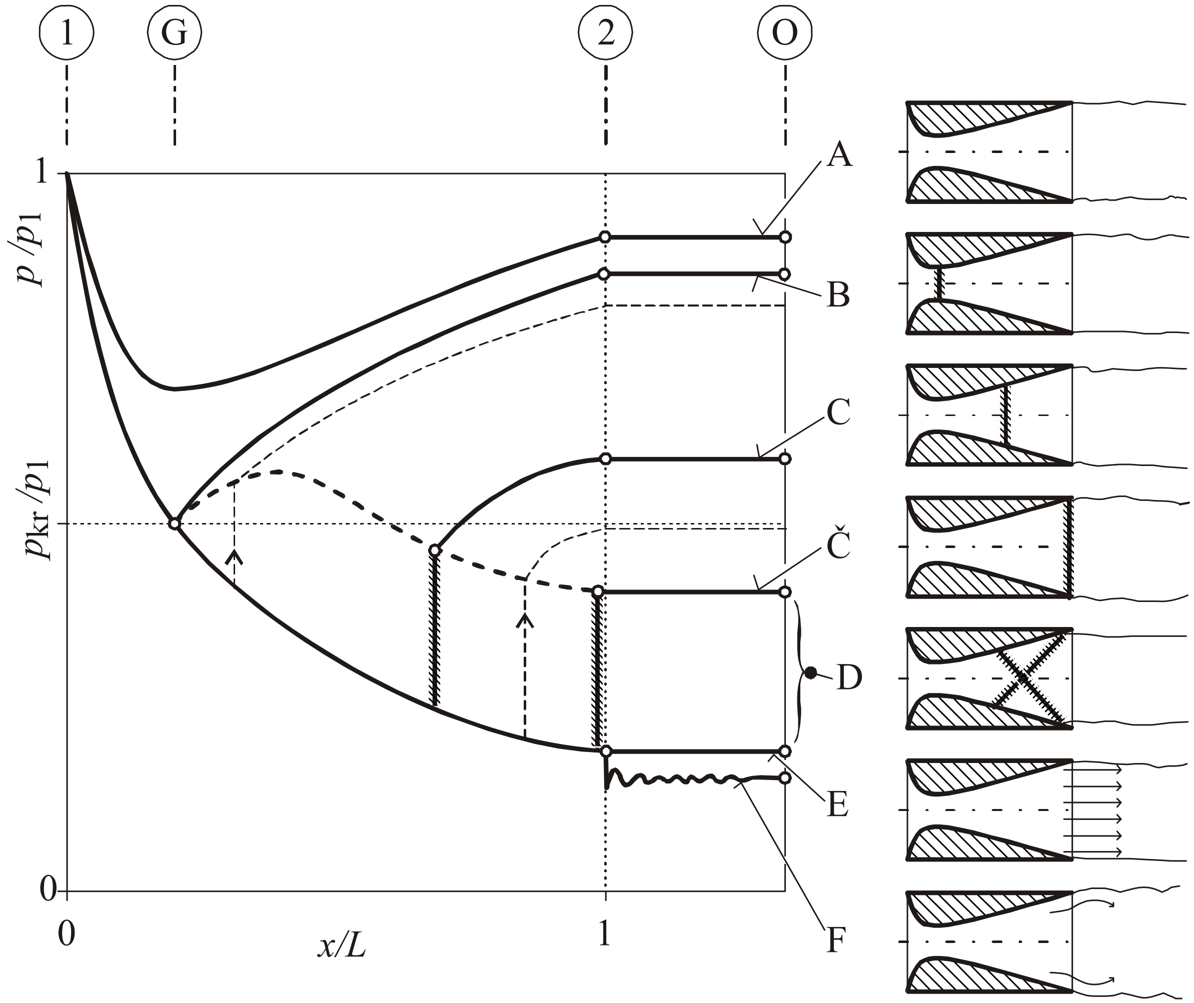




Razmere v nadzvočni šobi, p_1 = 10 bar

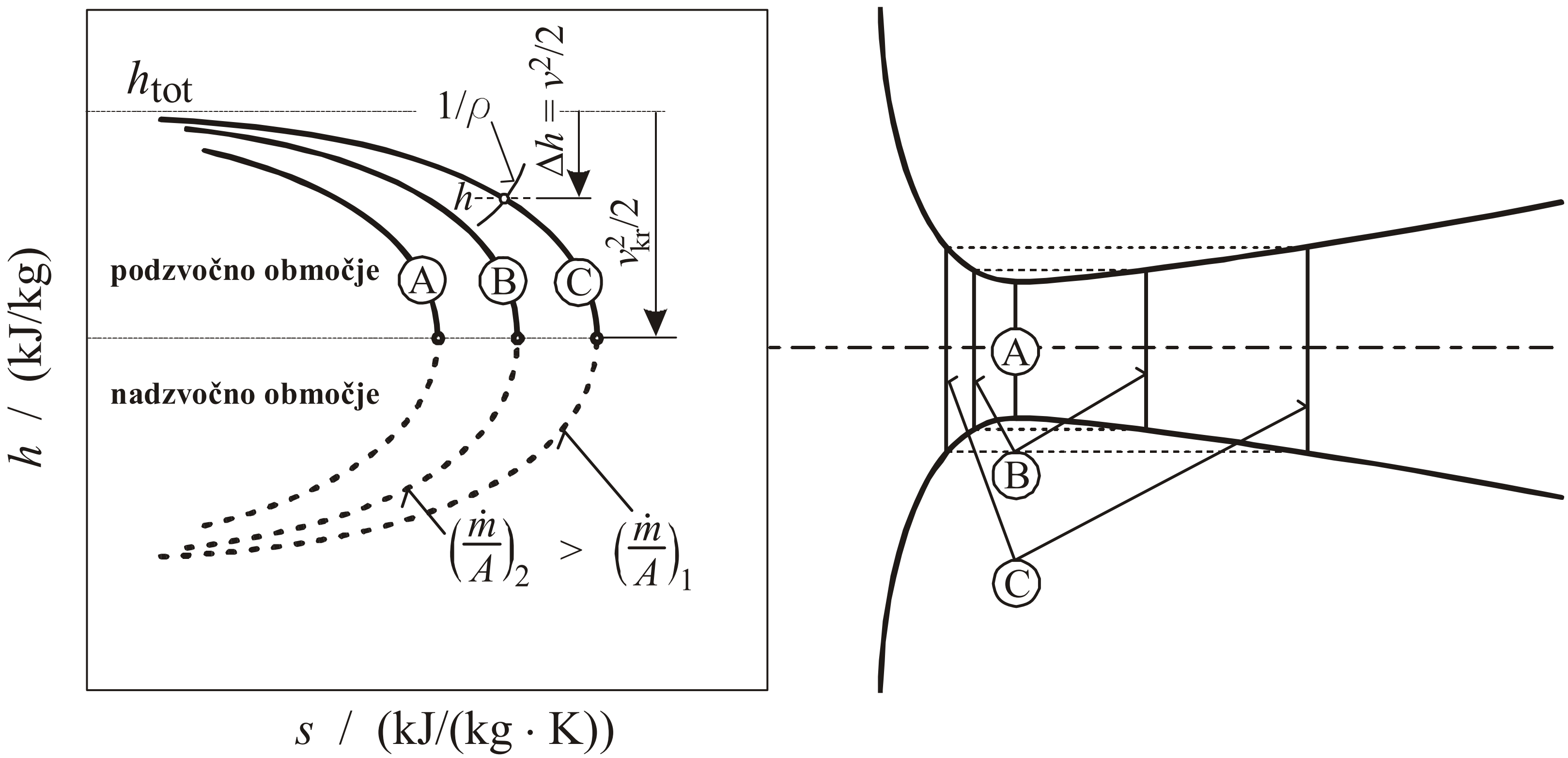


Tlačne razmere v Lavalovi šobi



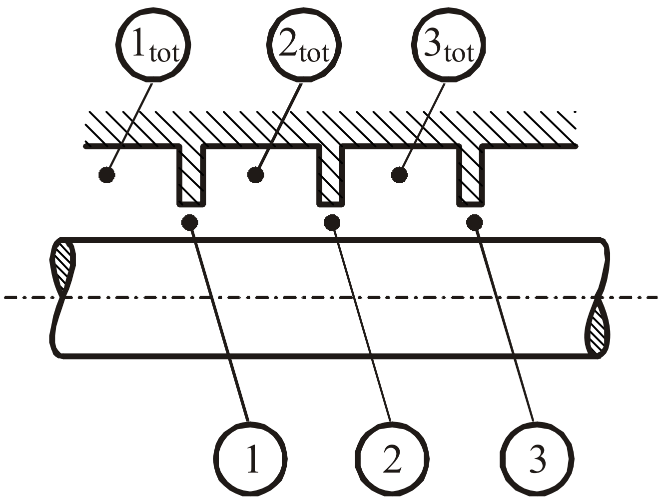
Krivulje Fanno

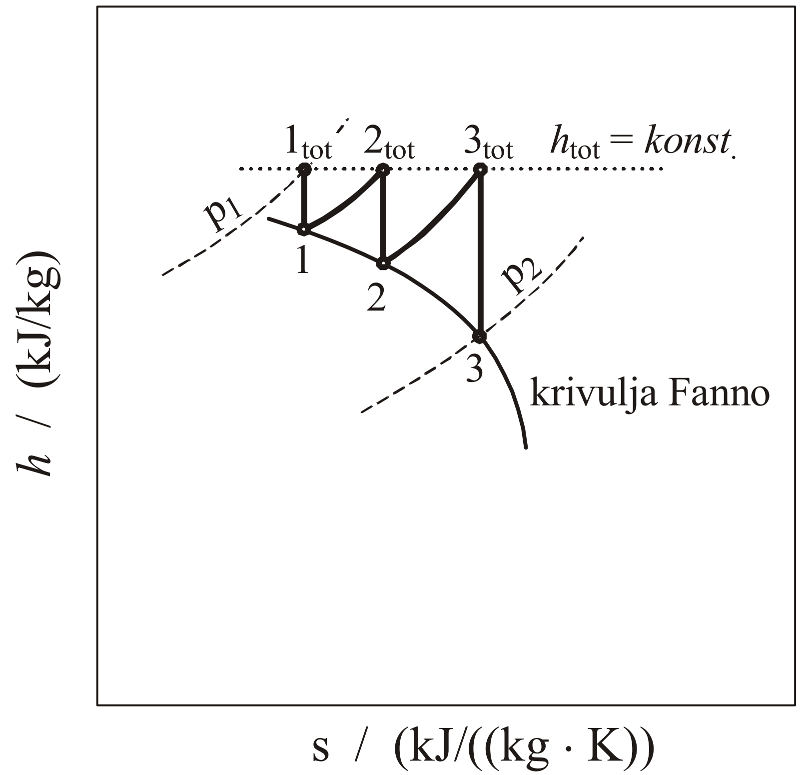
$$h_{tot} = h + \frac{v^2}{2} = h + \frac{1}{2 \cdot \rho^2} \cdot \left(\frac{\dot{m}}{A}\right)^2$$



Labirintno tesnenje

$$h_{\text{tot}} = h + \frac{v^2}{2} = h + \frac{1}{2 \cdot \rho^2} \cdot \left(\frac{\dot{m}}{A} \right)^2$$





Prenos toplote

- Prevod toplote : Fourierjev zakon
- Konvekcija in konvektivni prestop toplote
- Sevanje
- Prehod toplote