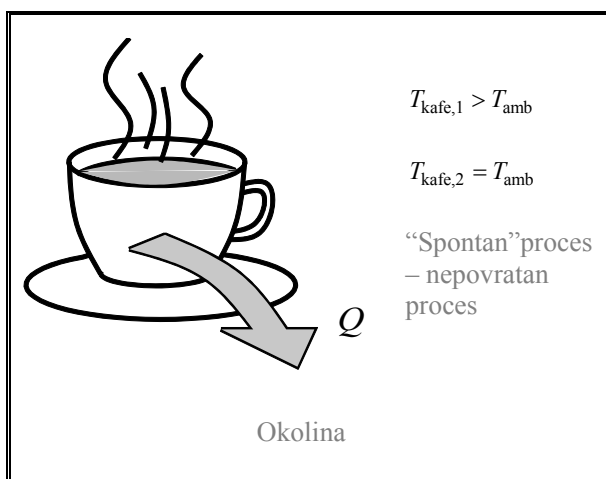


## 2. DRUGI PRINCIP TERMODINAMIKE ZA KONTROLNU ZAPREMINU - PROTOČNI TERMODIMANIČKI SISTEM

### 2.1 Povratni i nepovratni procesi u termodinamici

Primer 1 – Šoljica sa vrelom vodom i okolni vazduh (okolina)



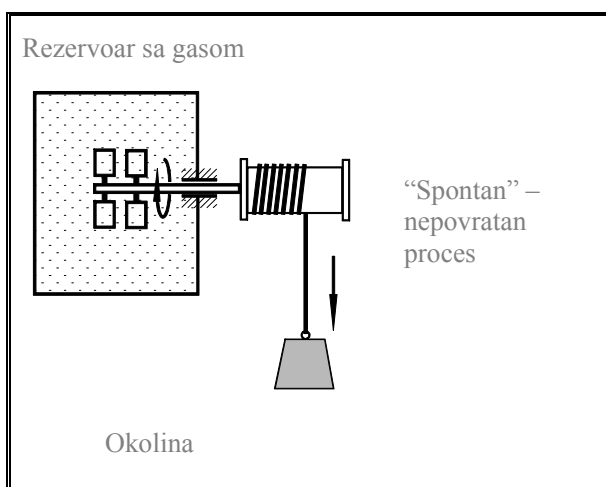
1-početno, polazno stanje

2-stanje na kraju procesa

Prvi princip TD ne govori opravcu odvijanja procesa



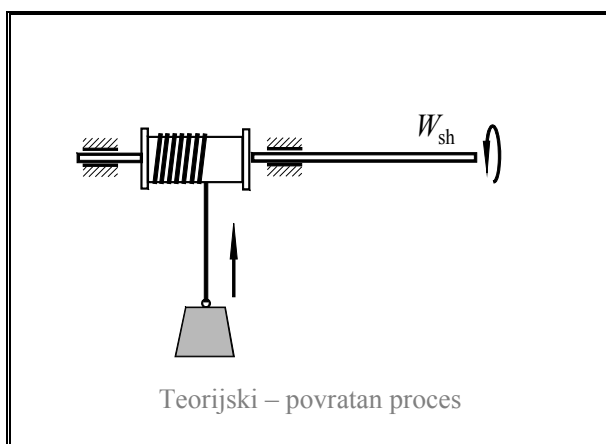
Primer 2 – Mešanje vazduha ventilatorom



Spontano, teg se može samo spuštati naniže, što za posledicu ima mešanje vazduha. Usled viskoznog trenja, mehanička energija pretvara se u unutrašnju energiju gasa u rezervoaru.

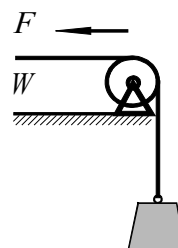
Obrnut proces, “samoorganizovanja” molekula gasa, koje će smanjujući svoju unutrašnju energiju zavrteti lopatice turbine je nemoguć.

### Primer 3 – Podizanje tereta bez disipativnih efekata – teorijski slučaj

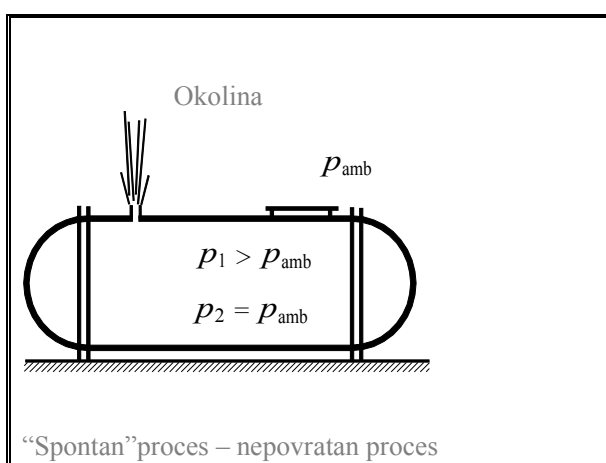


Teorijski, podizanje tereta, vršenjem mehaničkog rada ( $W_{sh}$ ) moguće je ostvariti bez prisustva disipativnih efekata (nema ni suvog ni viskoznog u osloncima, nema viskoznog trenja između pokretnih delova i okolnog vazduha, ne postoji rad deformacije konopca....itd.).

Jedan oblik mehaničke energije (mehaničkog energetskeg dejstva) prelazi u drugi oblik mehaničke energije



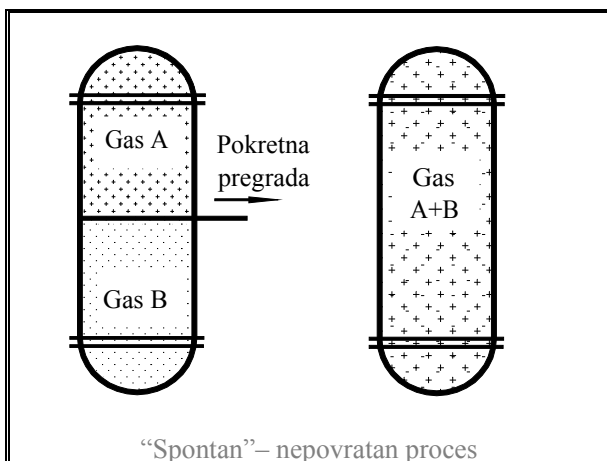
### Primer 4- Isticanje gasa iz rezervoara u okolinu nižeg pritiska



Komprimovani vazduh (pritiska većeg od pritiska vazduha u okolini), koji se nalazi u rezervoaru, po otvaranju ventila, spontano će izaći iz rezervoara.

Obrnut proces, “samoorganizovanja” molekula vazduha, njihovog prikupljanja u rezervoaru i postizanja lokalno veće vrednosti pritiska spontano se nikada neće ostvariti.

### Primer 5 – Mešanje dva gasa



Dva gasa razdvojena pregradom nalaze se u rezervoaru. Uklanjanjem pregrade, dolazi do procesa (nepovratnog) mešanja ovih gasova

Obrnut proces, spontano razdvajanje gasova, nikada se neće ostvariti.

*def.* Povratni procesi su oni procesi kod kojih se termodinamički (termomehanički) sistem posle izvršenog procesa može vratiti u polazno stanje, a da pri tom ne izazove nikakve promene u okolini sistema.

- Idealizovani procesi
- Između ostalog ovi procesi se moraju odvijati u termodinamičkoj ravnoteži (ravnotežni procesi) i bez prisustva bilo kakvih disipativnih efekata

*def.* Nepovratni procesi su oni procesi kod kojih se sistem i okolina ne mogu vratiti u njihova polazna stanja bez dodatnog (spoljašnjeg) utroška energije

## 2.2 Uzroci nepovratnosti procesa

Delimo ih na;

- Mehaničke:
  - procesi koji se odvijaju u mehaničkoj neravnoteži (neuniformnost polja pritisaka)
    - nervnotežno sabijanje ili širenje gasa u cilindru
    - ekspanzija gasa u vakuumu
    - procesi prigušivanja (npr. u ventili)
  - procesi pri kojima se javljaju disipativni efekti
    - suvo trenje
    - viskozno trenje
    - neelastične deformacije
- Termičke:
  - procesi koji se odvijaju u temperaturnoj neravnoteži
  - prelaženje toplote pri konačnim temperaturnim razlikama
- Hemijske
  - mešanje dva ili više gasova
  - hemijske reakcije
  - osmoza – transport materije između dveju faza u kontaktu
- Povratni i nepovratni procesi karakterišu ukupne promene u celom termodinamičkom sistemu
- Ravnotežni i neravnotežni procesi karakterišu promenu pojedine radne supstancije tokom procesa
- Šta je to čime bi matematički mogli da se opišu ovi problemi, da bi se moglo analitički predvideti u kom smeru će se odvijati procesi?

## 2.3 Promena entropije radne supstancije koja se nalazi u zatvorenom termodinamičkom sistemu?

- Principijelno, postoje dva moguća slučaja:
  1. Radna supstancija se nalazi u stanju termodinamičke neravnoteže (bilo koje od neravnoteža – mehaničkoj, termičkoj ili hemijskoj). U tom slučaju, ako se radna supstanca izoluje od spoljnih uticaja, te prepusti sama sebi, ona spontano prelazi iz tog

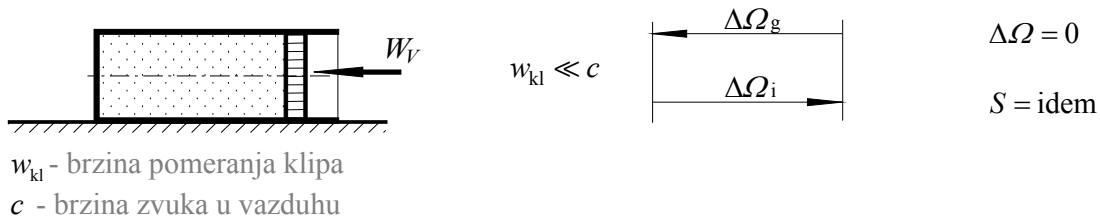
termodinamički manje verovatnog stanja u stanje veće termodinamičke verovatnoće. Na taj način, entropija radne supstancije raste, sve dok ne dostigne svoj maksimum.

Kad entropija radne supstancije jednom dostigne svoj maksimum (kada se ostvari termodinamička ravnoteža), entropija radne supstancije se više neće menjati (sve dok se na nju ne deluje nekim od spoljnih energetskih uticaja).

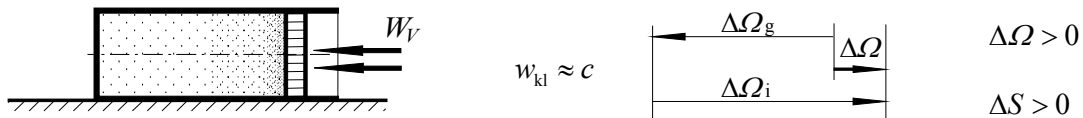
2. Ako se radna supstancija, koja se nalazi u zatvorenom termodinamičkom sistemu, nalazi u stanju termodinamičke ravnoteže (maksimalne statističke težine) njena entropija, može se promeniti (promena geometrijskog i impulsnog prostora), energetskim dejstvima sa okolinom:
  - Mehaničkim energetskim dejstvom (u nekim slučajevima)
  - Toplotnim energetskim dejstvom (uvek!)

### A) Zapreminski rad

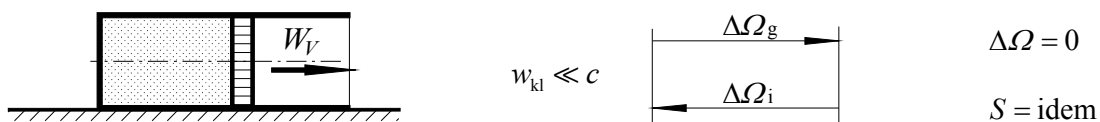
#### A.1) Ravnomerno (kvazistatičko) sabijanje



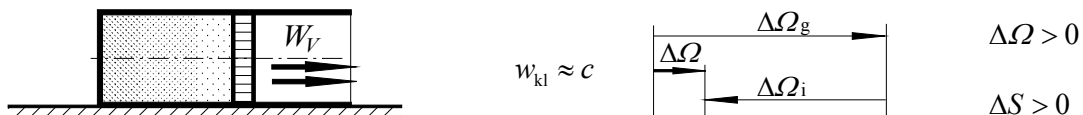
#### A.2) Neravnotežno (nekvazistatično) sabijanje gasa



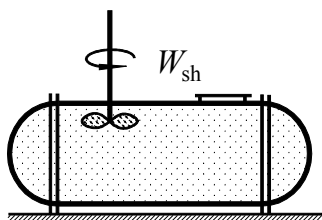
#### A.3) Ravnotežno (kvazistatično) širenje gasa



#### A.4) Neravnotežno (nekvazistatično) širenje gasa



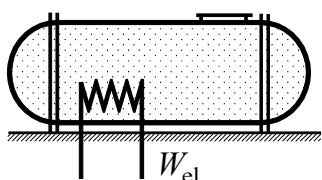
B) **Rad vratila** (bez predaje toplote; nepokretne granice sistema)



$\Delta Q_g = 0$	$\Delta Q > 0$
$\Delta Q_i$	$\Delta S > 0$
$\Delta Q$	

Povećanje entropije izazvano je disipativnim efektima (viskozno trenje). Mehanička energija prelazi u unutrašnju energiju gasa.

C) „Električni“ rad (bez predaje toplote; nepokretne granice sistema)

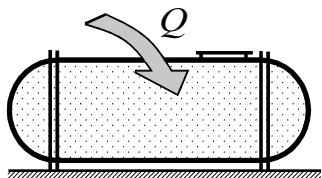


$\Delta Q_g = 0$	$\Delta Q > 0$
$\Delta Q_i$	$\Delta S > 0$
$\Delta Q$	

Električna energija prelazi u unutrašnju energiju gasa.

D) **Predaja toplote**

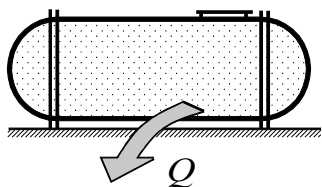
D.1) Predajom toplote radnoj supstanci, granice sistema nepokretne



$\Delta Q_g = 0$	$\Delta Q > 0$
$\Delta Q_i$	$\Delta S > 0$
$\Delta Q$	

Predajom toplote gasu povećava mu se i unutrašnja energija i rase entropija.

D.2) Radna supstancija predaje toplotu, granice sistema nepokretne



$\Delta Q_g = 0$	$\Delta Q > 0$
$\Delta Q_i$	$\Delta S > 0$
$\Delta Q$	

Predajom toplote okolini, gas smanjuje svoju unutrašnju energiju, kao i entropiju.

**Važno!** Između količine toplote predate radnoj supstanci i promene entropije radne supstance postoji direktna zavisnost. Predajom toplote radnoj supstanci uvećava se njena entropija i obrnuto, ukoliko radna supstancija predaje toplotu njena entropija se smanjuje!!

## 2.4 Količina toplote i promena entropije

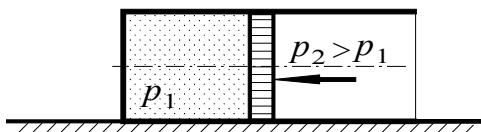
- Analogija sa izrazom za zapreminski rad pri ravnotežnoj promeni stanja

$$\delta w_V = -p dV$$

3. Da bi se ostvario zapreminski rad mora postojati promena zapremine radne supstance – tzv. koordinate

$$\delta w_V \propto dV$$

4. Da bi se obavio zapreminski rad mora da postoji razlika pritisa, ili bar potencijalna razlika pritisa  $\rightarrow$  pritisak je tzv. potencijal za vršenje zapreminskog rada



- Toplota – izraz za izračunavanje predate količine toplote

1. Već je konstatovana direktna povezanost između predate količine toplote i promene entropije radne supstance

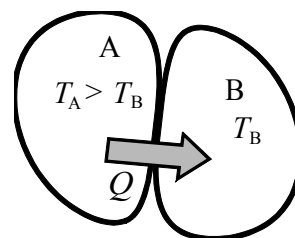
$$\delta Q \propto dS$$

1. Da bi se ostvarila pojava prenošenja energije toplotom mora postojati ili razlika temperatura u jednom telu (tremička neravnoteža) ili da postoje dva tela sa različitim temperaturama  
Temperatura, analogno pritisku kod zapreminskog rada, je „potencijal” za redaju toplote

iz (1) i (2)  $\Rightarrow$  Za RAVNOTEŽNE PROMENE

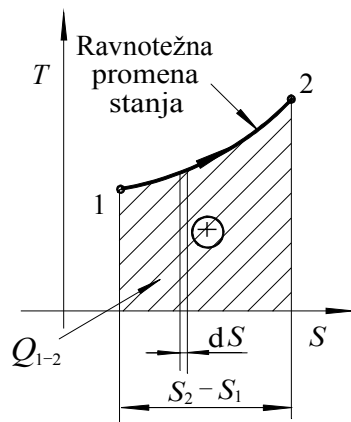
$$\delta Q = T dS$$

$$Q_{1-2} = \int_1^2 \delta Q = \int_1^2 T ds$$



- **Toplotni dijagram - Belper-ova (Belpaire) ravan**

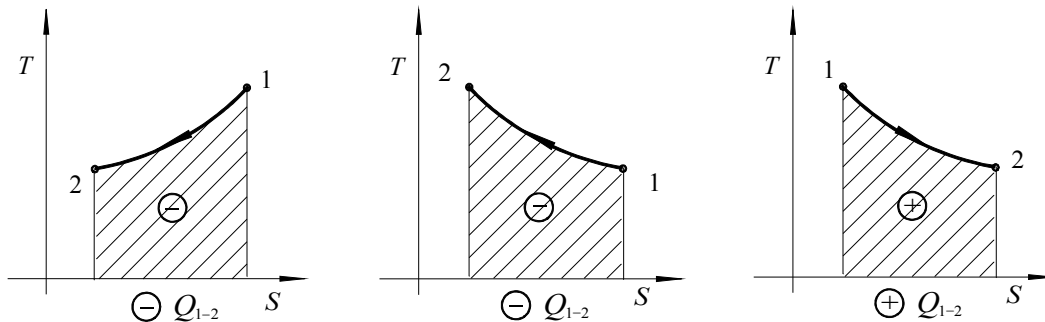
Za ravnotežne promene



$$Q_{1-2} = \int_1^2 T dS$$

- Površina ispod linije koja predstavlja ravnotežnu promenu stanja u  $T-S$  koordinatnom sistemu, „predstavlja” predatu količinu toplote  $Q_{1-2}$  tokom procesa 1-2.

- Promena temperature radne supstancije i predata količina toplote



- Za ravnotežnu promenu stanja, na osnovu promene temperature radne supstancije ne može se zaključiti da li se toplota predaje radnoj supstanciji ili radna supstancija predaje toplotu. Do ispravnog zaključka moguće je doći samo na osnovu promene entropije radne supstancije ( $ds$ )!
- Očigledno postoji i neka promena – izentropa (ili izentropska promena stanja), pri kojoj je nema promene entropije ( $ds = 0$ ,  $s = \text{idem}$ )
- Ako se ta promena odvija (prividno) ravnotežno

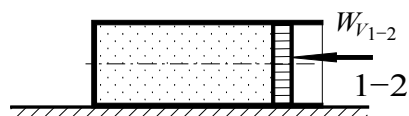
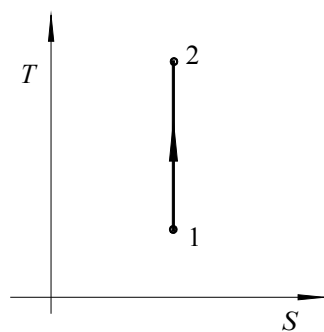
$$\delta Q = mTds \text{ i } ds = 0 \Rightarrow \delta Q = 0 \Rightarrow Q_{1-2} = 0$$

$\Rightarrow$  ta promena stanja je istovremeno adijabatska promena stanja ili adijabata

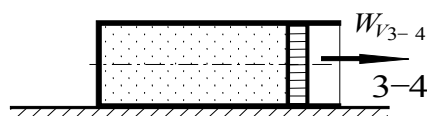
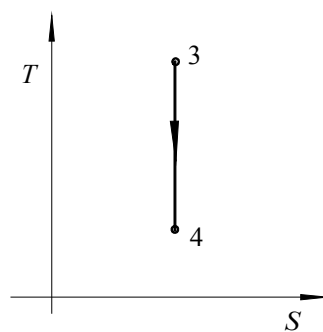
- Kako ova promena izgleda i gde se ostvaruje?
  - Gas smešten u toplotno izolovan cilindar, zatvoren klipom, (toplotno izolovan termomehanički sistem)
  - Proces ravnotežnog adijabatskog sabijanja 1-2 (kompresije), odnosno ravnotežnog adijabatskog širenja 3-4 (ekspanzije) gasa



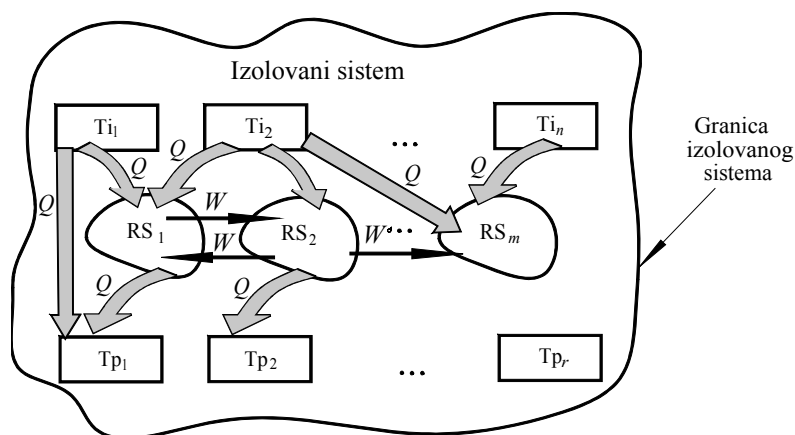
Ravnotežno adijabatsko sabijanje



Ravnotežno adijabatsko širenje



## 2.5 Analitička formulacija Drugog principa termodinamike za zatvoreni (izolovani) termodinamički sistem

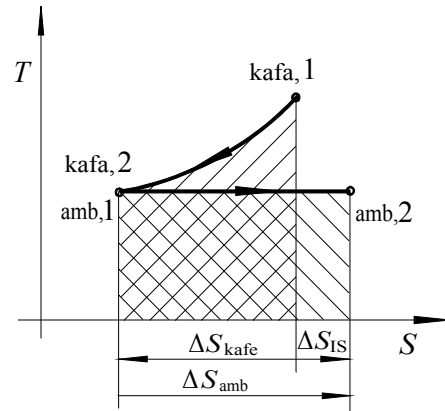
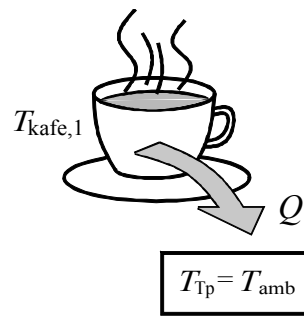


$$\Delta S_{IS} = \sum_1^n \Delta S_{Ti,i} + \sum_1^m \Delta S_{RS,j} + \sum_1^r \Delta S_{Tp,k} \geq 0$$

$\Delta S_{IS} > 0$  realni - nepovratni procesi

$\Delta S_{IS} = 0$  teorijski - povratni procesi

$\Delta S_{IS} < 0$  NEMOGUĆI procesi!!



- Da li postoji povratni proces predaje toplote?

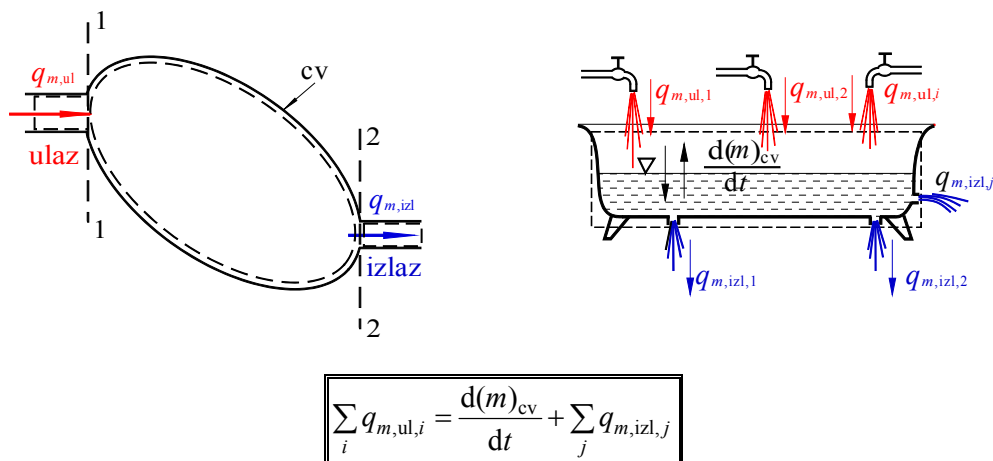
Teorijski da - ako bi se predaja toplote odvijala pri beskonačno malim temperaturnim razlikama ( $dT$ )

- Kada je to moguće ?

Ili kada bi ipostojalo beskonačno mnogo toplotnih izvora (ponora) stalne temperature, a proces se odvijao (beskonačno ) sporo ili jedan izvor toplote promennljive temperature

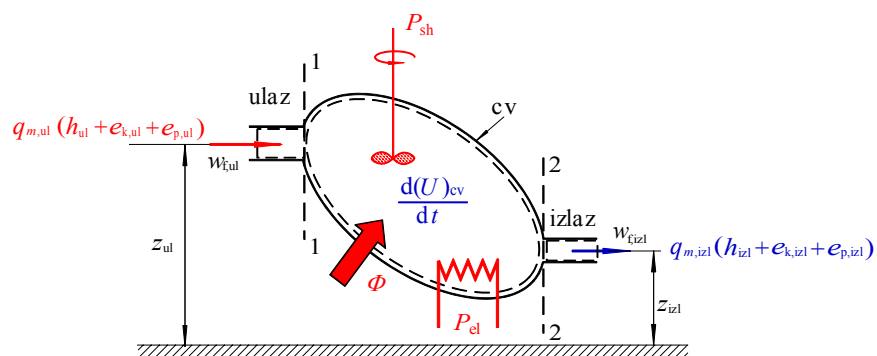
## 2.6 Bilansi

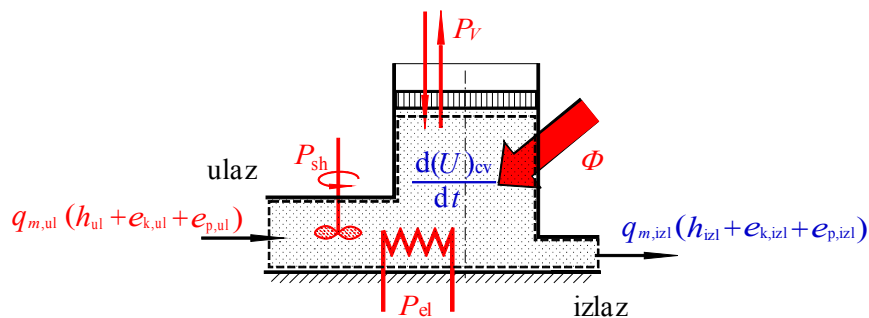
### 1. Bilans supstancije za protočni termodinamički sistem (PTMS)



### 2. Bilans energije za PTMS – Prvi princip termodinamike za PTMS

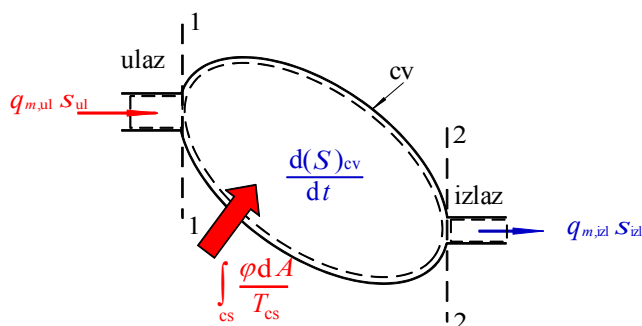
$$\Phi + P_{teh} + \sum_i q_{m,ul,i} \left( h_{ul} + \frac{w_{f,ul}^2}{2} + gz_{ul} \right)_i = \frac{d(U)_{cv}}{dt} + \sum_j q_{m,izl,j} \left( h_{izl} + \frac{w_{f,izl}^2}{2} + gz_{izl} \right)_j$$





### 3. Formalni bilans entropije – Drugi princip termodinamike za PTMS

$$\dot{S}_{\text{gen}} + \int_{\text{cs}} \frac{\varphi dA}{T_{\text{cs}}} + \sum_i q_{m,\text{ul},i} s_{\text{ul},i} = \frac{d(S)_{\text{cv}}}{dt} + \sum_j q_{m,\text{izl},j} s_{\text{ul},j}$$



gde je:

$\dot{S}_{\text{gen}}$  [W/K] – brzina nastajanja entropije (disipativni efekti, odvijanje procesa u mehaničkoj i termičkoj neravnoteži, ...,

$\int_{\text{cs}} \frac{\varphi dA}{T_{\text{cs}}}$  [W/K] – promena entropije radnog fluida nastala predajom topote

$\varphi = \delta \Phi / dA$  [W/m<sup>2</sup>] - površinski toplotni protok,

$T_{\text{cs}}$  [K] - temperatura granice (površi) kontrolne zapremine – kontrolne površi (*control surface*)

$s_{\text{ul},i}$  – specifična entropija radnog fluida na ulazu u protočni sistem (kontrolnu zapreminu)

$s_{\text{ul},i}$  – specifična entropija radnog fluida na izlazu iz protočnog sistema (kontrolne zapremine)

$\frac{d(S)_{\text{cv}}}{dt}$  – promena entropije radnog fluida u kontrolnoj zapremini u vremenu – „neustaljeni“ član