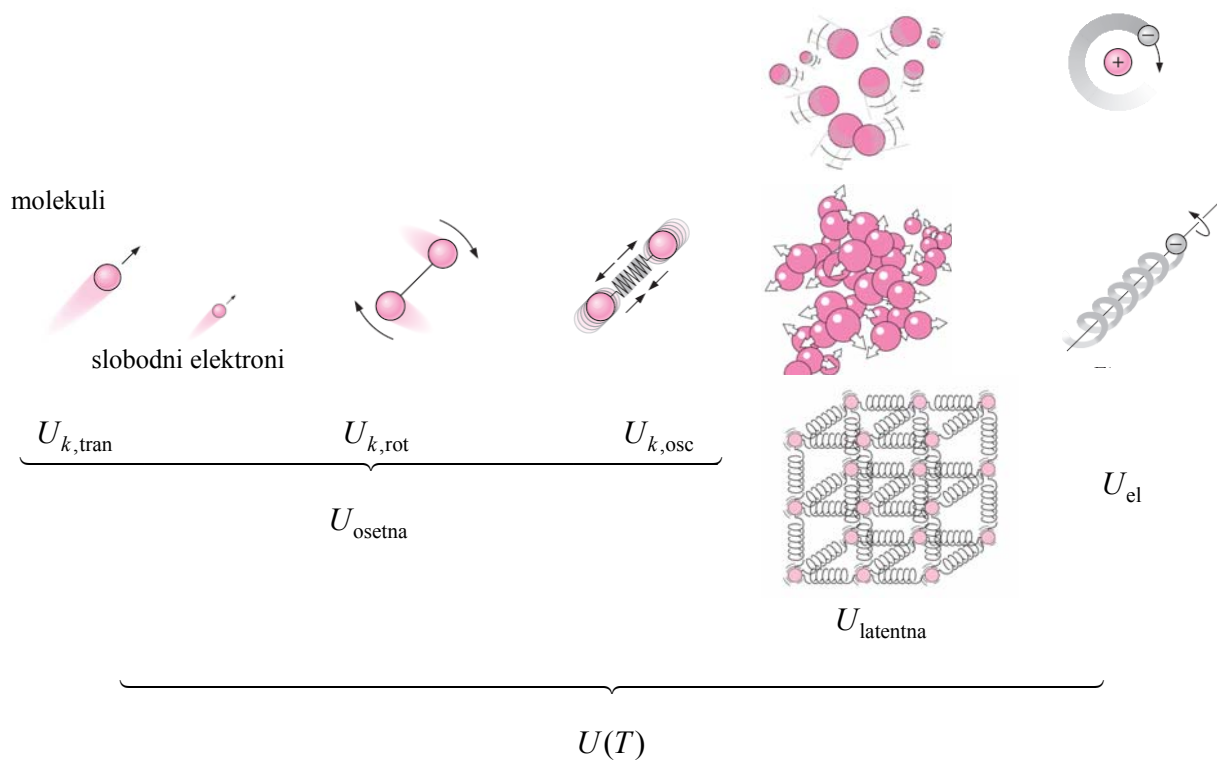


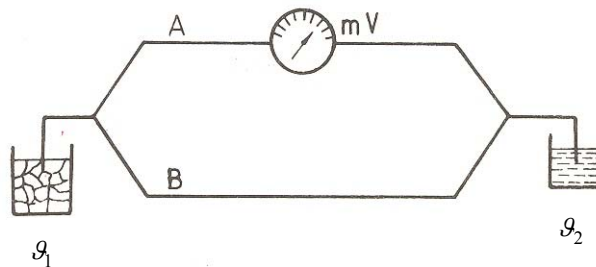
## 2. TERMODINAMIČKE VELIČINE STANJA

### 3.1 Temperatura

- Intenzivna veličina stanja
- Izražava (meri) se u stepenima Celzijusa  $\vartheta [^{\circ}\text{C}]$  ili Kelvinima  $T [\text{K}]$
- Izražena u kelvinima naziva se i termodinamička temperatura
- Mera “zagrejanosti” ili “ohladaenosti” neke supstancije
- Kolokvijalno koristimo termine: topao, vreo, vruć, hladan, leden, ...
- Čulo dodira – vrlo nepouzđano i subjektivno,
- Temperatura neke supstancije ustvari predstavlja meru intenzivnosti mikroskopskog kretanja, tj. aktivnosti mikroskopskih čestica (molekula, atoma, slobodnih elektrona, ...).
- Mikroskopska kretanja – direktno povezana sa unutrašnjom energijom
- Unutrašnja energija neke supstancije obuhvata sve oblike mikroskopskih energija te supstance i povezana je sa molekularnom strukturom i stepenom aktivnosti svih mikroskopskih čestica (molekula, atoma, elektrona, ...) te supstancije



- Temperatura se lako meri – II postulat termodinamike
- Promenom temperature menjaju se neke termo-fizičke karakteristike supstancije, kao i druge veličine stanja, npr. gustina supstancije, električna otpornost, ili se čak javljaju različiti fizički fenomeni, npr. pojava termo-elektro-motorne sile.



Slika 3.1 Šema električnog kola termoelementa (termopara) sa „toplim“ i „hladnim“ krajem

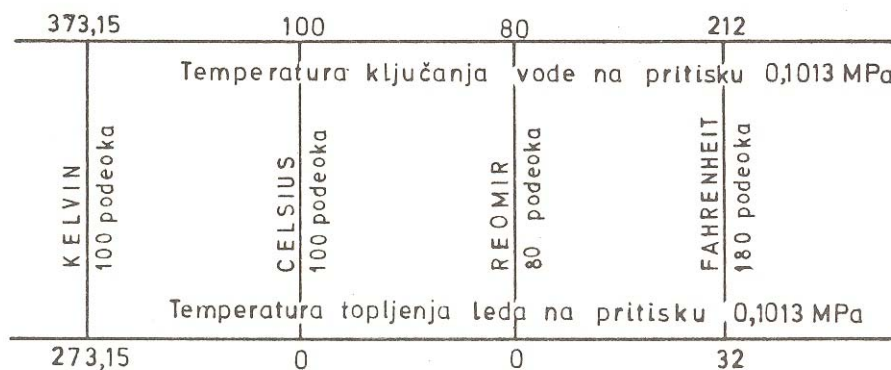
- U nekom intervalu temperatura, kod tečnosti, promena temperature tečnosti izaziva upravo proporcionalno povećanje zapremine tečnosti – termometri sa živom alkoholom.

$$\Delta T \propto \Delta V$$

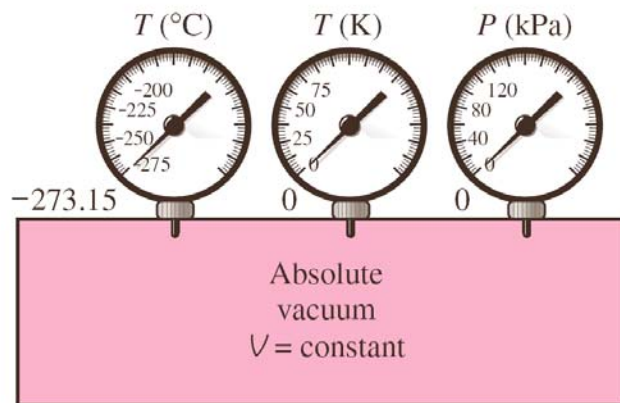
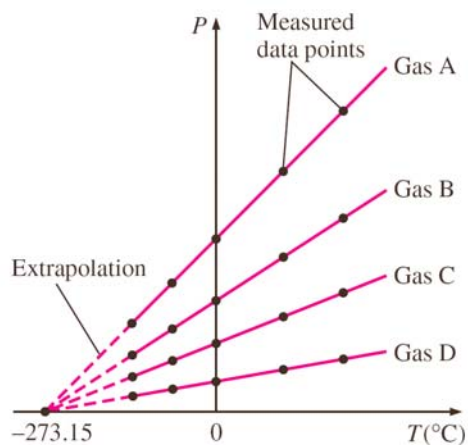
- Kod razređenih gasova postoji ista proporcionalnost, odnosno proporcionalnost između promene temperature i promene pritiska, pri konstantnoj zapremini

$$\Delta T \propto \Delta p \text{ pri } V = \text{idem}$$

- Temperaturske skale



Slika 3.2 Medusobni odnosi raznih temperaturskih skala

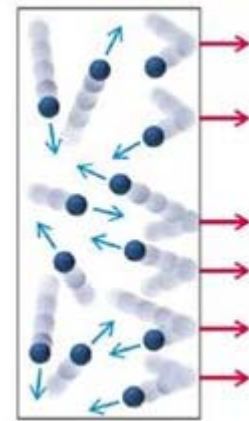


### 3.2 Pritisak fluida

- Intenzivna veličina stanja
- Izražava (meri) se u Paskalima

$$p = \frac{F}{A} \left[ 1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2} \right]$$

- Razmatra se samo kada su radne supstancije fluidi
- Opisuje mehanički deo termodinamičke ravnoteže
- Drugi Newton-ov zakon



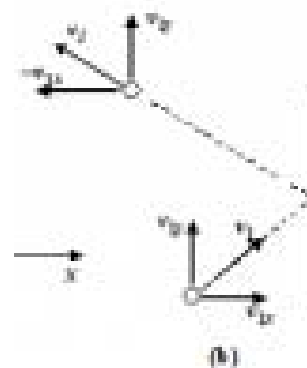
$$F_{n,i} = \frac{d(m_i \cdot w_{n,i})}{dt}$$

- Gasovi – ravnomerna raspodela pritiska

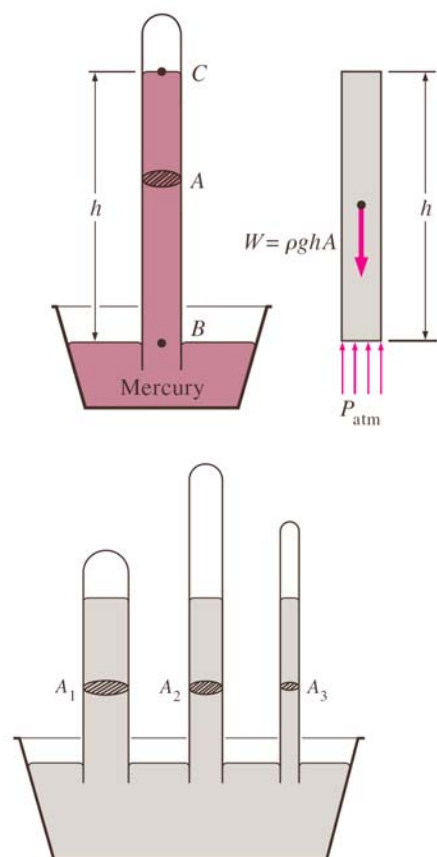
$$p = \frac{\sum F_{n,i}}{A}$$

- Tečnost – neravnomerna raspodela pritiska

$$p = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{\sum F_{n,i}}{A}$$



- Lako se meri
  - instrument – barometar – meri
  - ambijentalni
  - okolni
  - atmosferski pritisak
  - barometarski



- Torricelli (1608-1647) – živa

barometar

$$p = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{\Delta x \cdot A \cdot g \cdot \rho}{A}$$

$$p = \rho \cdot g \cdot \Delta x$$

- Manometar – meri manometarsku razliku pritisaka  
 $p_e > 0$  excess

( $p_m$ )

Apsolutni pritisak ili pritisak

$$p = p_{\text{amb}} + p_e$$

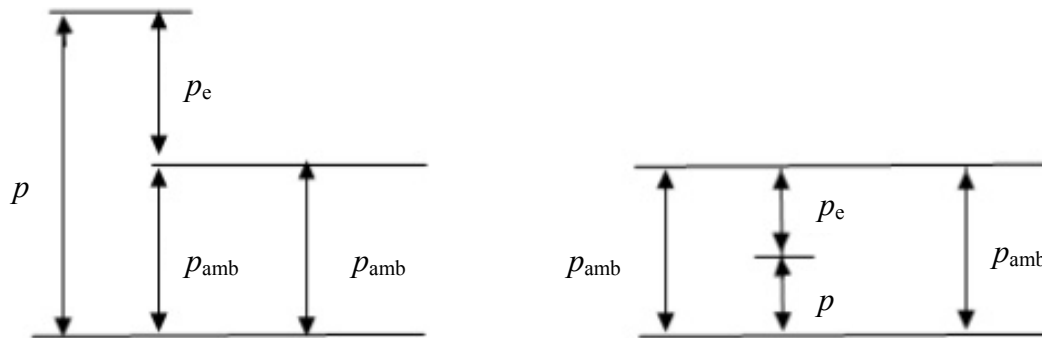
Npr. manometar sa membranom

- Manometar – vakuumetar – vakuumetarsku razliku pritisaka -  $p_e < 0$  ( $p_v > 0$ )

apsolutni pritisak

$$p = p_{\text{amb}} + p_e < p_{\text{amb}}$$

$$(p = p_b - p_v)$$



- Jedinice za merenje pritiska

1 Pa - vrlo mala jedinica pa se obično koristi:

$$10^3 \text{ Pa} = 1 \text{ kPa}$$

$$10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ MPa}$$

istorijski su se zadržale,

1 atm - fizička (standardna) atmosfera

$$1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa} \quad (760 \text{ mm Hg})$$

1 at - tehnička atmosfera

$$1 \text{ at} = 98066,5 \text{ Pa}$$

1 bar - bar

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1000 \text{ mbar} = 1 \text{ bar} \quad (750 \text{ mm Hg})$$

1 Torr - Toričeli (*Torricelli*)

$$1 \text{ torr} = 1 \text{ mm Hg (na } 0^\circ\text{C)} = 133,3224 \text{ Pa}$$

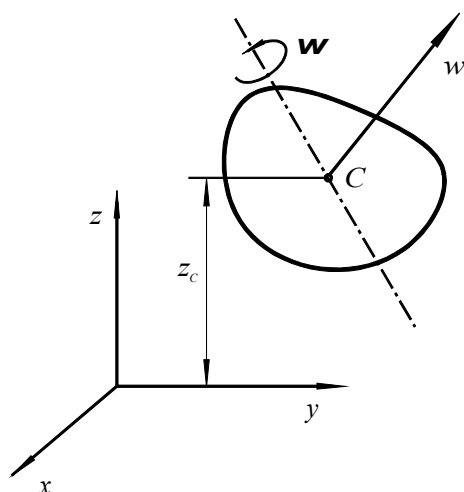
### 3.3. Unutrašnja energija – termički potencijal

- Energetska, ekstenzivna veličina stanja

$$U \text{ [J]}, u \text{ [J/kg]}, U_m \text{ [J/mol]},$$

- Unutrašnja energija neke supstance obuhvata sve oblike mikroskopskih energija supstance i povezana je sa molekularnom strukturom i stepenom aktivnosti mikroskopskih čestica (molekula, atoma, elektrona...) koje čine tu supstanciju.
- Ukupna energija termo-mehaničkog sistema tela predstavlja zbir makroskopskih mehaničkih i mikroskopskih energija tog tela.

$$E_{uk} = \underbrace{E_{k,tran} + E_{k,rot} + E_{pot}}_{\text{Makroskopske mehaničke energije}} + \underbrace{U + \dots (U_{mg} + \dots)}_{\text{Mikroskopske energije}}$$



$E_{k,tran} = m w^2 / 2$  - makroskopska kinetička energija translacionog kretanja tela [J]

$E_{k,rot} = J \omega^2 / 2$  - makroskopska kinetička energija rotacionog kretanja tela [J]

$E_{pot} = g m z_c$  - makroskopska potencijalna energija tela (energija položaja tela u polju spoljašnjih potencijalnih sila) [J]

$U$  - unutrašnja termodinamička energija

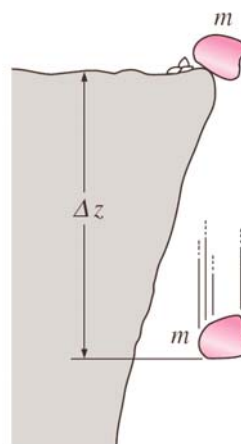
( $U_{mg}$  - unutrašnja magnetna energija ...)

- I makroskopske energije predstavljaju veličine stanja i zato poseduju tzv. osobinu totalnog diferencijala:

$$\int_1^2 d E_{k,tran} = E_{k,tran_2} - E_{k,tran_1}$$

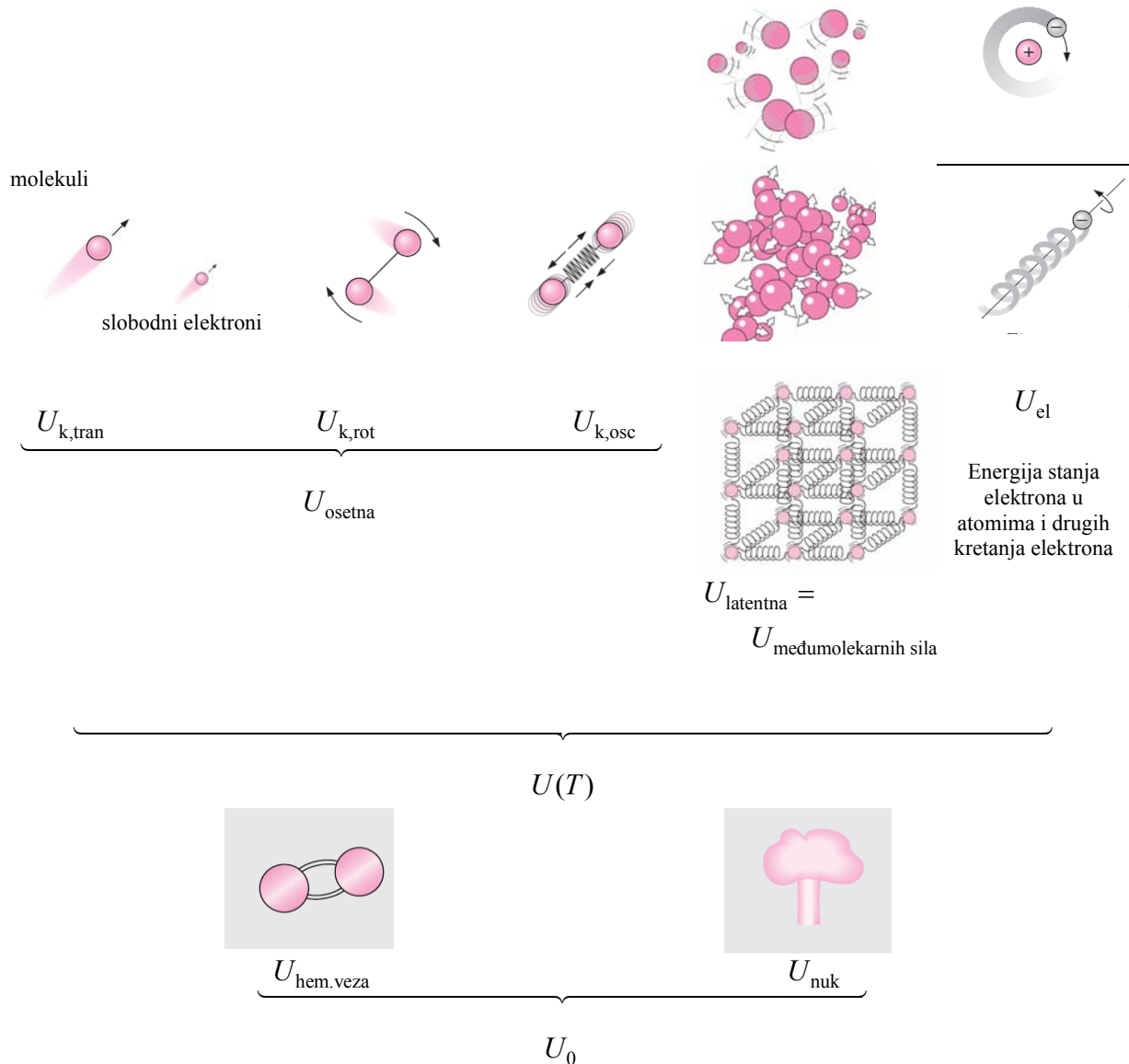
$$\int_1^2 d E_{k,rot} = E_{k,rot_2} - E_{k,rot_1}$$

$$\int_1^2 d E_{pot} = E_{pot_2} - E_{pot_1}$$

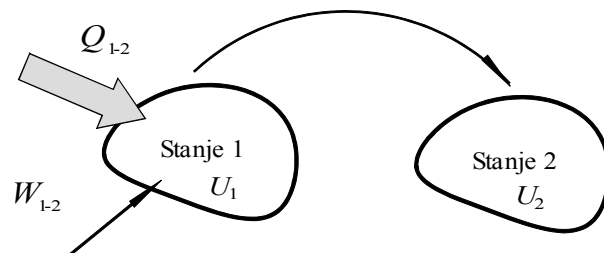


- Unutrašnja energija supstancije se sastoji iz dela koji se menja sa promenom temperature supstancije  $U(T)$  i tzv. “nulte” unutrašnje energije  $U_0$ , dela koji se ne menja sa promenom temperature.

$$U = U(T) + U_0$$



- “Nulta” unutrašnja energija  $U_0$  obuhvata energiju svih oblika kretanja svih čestica koje čine supstanciju a koja postoje i temperaturi apsolutne nule – (prema kvantno-mehaničkoj teoriji postoje ovakva kretanja) – (ne tako važno za klasičnu termodinamiku)
- Obično se u termodinamičkim analizama koristi samo onaj deo unutrašnje energije koji se menja sa promenom temperature supstancije  $U(T)$ .
- Pri analizi ponašanja termodinamičkih sistema, uvek je od interesa da se odredi samo promena unutrašnje energije odgovarajuće supstancije nastala tokom nekog termodinamičkog procesa ( $U_2 - U_1 = ?$ ).

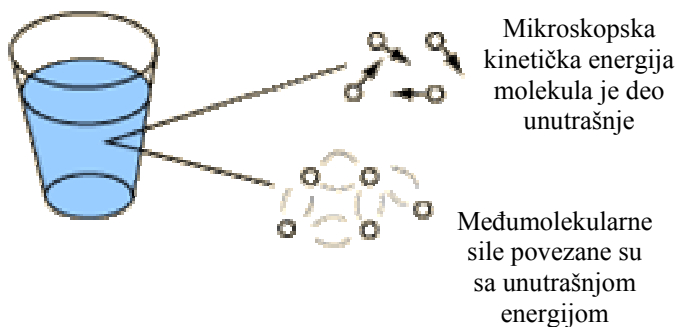


$$U_2 - U_1 = [U_0 + U(T_2)] - [U_0 + U(T_1)] = U(T_2) - U(T_1)$$

- Kao i sve druge veličine stanja i unutrašnja energija poseduje tzv. osobinu totalnog diferencijala

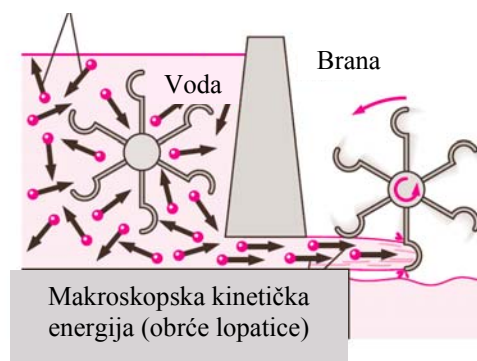
$$\int_1^2 dU = U_2 - U_1$$

Na makroskopskom nivou se ne vidi da voda ne ima neku energiju



**Slika 3.5** Da li voda u čaši koja stoji na stolu poseduje energiju?

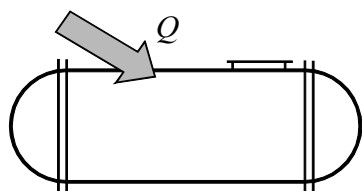
Mikroskopska kinetička energija molekula (ne obrće lopatice)



**Slika 3.6** Makroskopska kinetička energija je organizovaniji oblik energije i mnogo više je upotrebljiva nego neorganizovana mikroskopska kinetička energija molekula

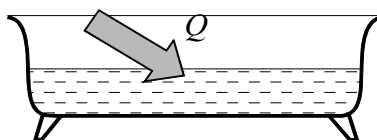
- Unutrašnja energija ili termička energija
- U termodinamici se najčešće koristi da opiše energetsko stanje supstance koja miruje (stanje mikroskopskih energija makroskopski nepokretnog sistema) – zatvoren i nepokretan termo-mehanički sistem.
- Prema Prvom principu termodinamike (Zakonu održanja energije), svako termomehaničko energetsko dejstvo termomehaničkog sistema i njegove okoline mora se manifestovati sa promenom njegove unutrašnje energije ( $U$ ).
- “Predaja” energije zatvorenom termodinamičkom sistemu od strane okoline, mora se direktno odraziti u povećanju unutrašnje energije sistema  $U_2 - U_1 > 0$ .





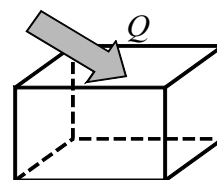
Gas

$$U_1 \rightarrow U_2; U_2 > U_1$$



Tečnost

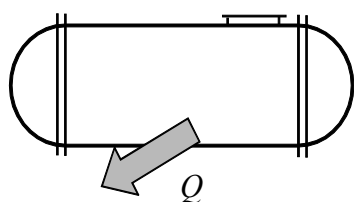
$$U_1 \rightarrow U_2; U_2 > U_1$$



Čvrsto telo

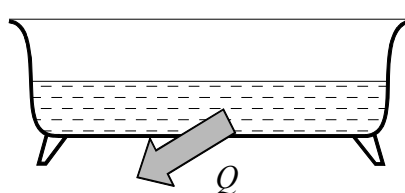
$$U_1 \rightarrow U_2; U_2 > U_1$$

- “Predaja” energije okolini od strane zatvorenog termodinamičkog sistema, mora se odraziti u smanjenju unutrašnje energije sistema  $U_2 - U_1 < 0$ .



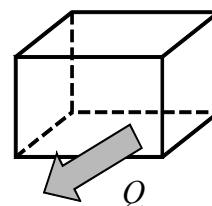
Gas

$$U_1 \rightarrow U_2; U_2 < U_1$$



Tečnost

$$U_1 \rightarrow U_2; U_2 < U_1$$



Čvrsto telo

$$U_1 \rightarrow U_2; U_2 < U_1$$



**Slika 3.7** Specifična unutrašnja energija (termički potencijal) ključale vode veća je nego specifična energija nezagrejane vode

### 3.4. Entalpija

- Energetska, ekstenzivna veličina stanja

$$H \text{ [ J ]}, h \text{ [ J/kg ]}, H_m \text{ [ J/mol ]},$$

- Najčešće se koristi da opiše energetska stanje supstance pri njenom strujanju, dakle kod protočnih termodinamičkih sistema
- Ponekad ju je zgodno koristiti i kod zatvorenih termodinamičkih sistema
- Po definiciji

$$\boxed{H = U + pV} \quad [\text{ J }]$$

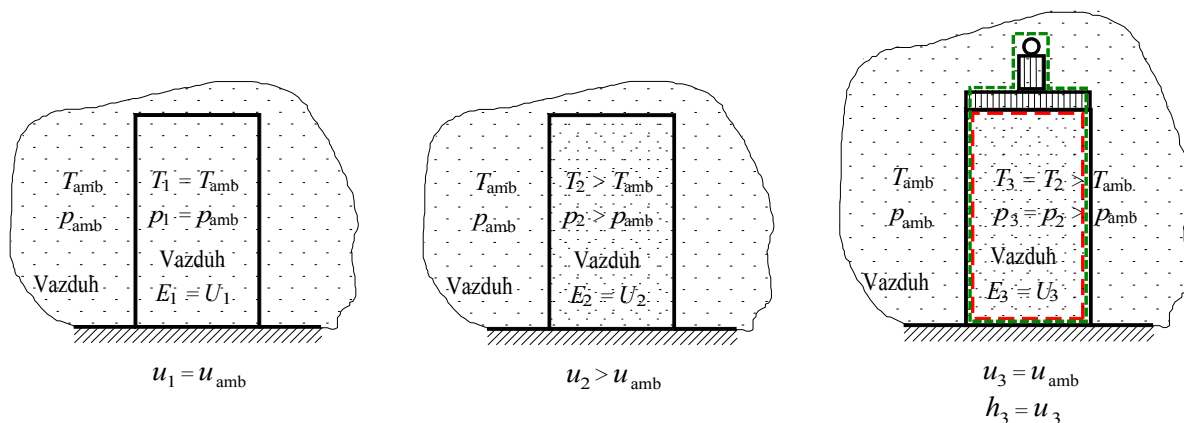
$$h = u + pv \quad [\text{ J/kg }]$$

$$H_m = U_m + p \cdot V_m \quad [\text{ J/mol }]$$

- Pri tome je

$$H = \underbrace{U}_{\text{Termički potencijal}} + \underbrace{pV}_{\text{Spoljašnji mehanički potencijal (sveden na veličine stanja)}} \\ \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Termomehanički potencijal}}$$

- Potencijal – sposobnost vršenja rada



Sistem nema sposobnost da izvrši rad nad okolinom

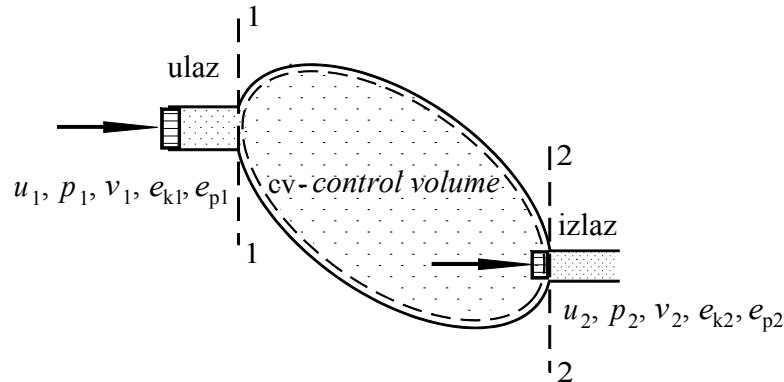
Sistem ima sposobnost da izvrši rad nad okolinom

Sistem ima još veću sposobnost da izvrši rad nad okolinom

- Prošireni sistem ima veću sposobnost (potencijal) za vršenje rada ( $e_3 > e_2$ )

$$E_3 = U_3 + F \cdot \Delta x = U_3 + p_3 \cdot A \cdot \Delta x = U_3 + p_3 V_3 = H_3$$

- Kod protočnih sistema



$p_1 v_1$  - pritisna energija ili potencijal transporta fluida na ulazu u sistem

$p_2 v_2$  - pritisna energija ili potencijal transporta fluida na izlazu iz sistema

- Entalpija predstavlja termo-mehaničku energiju fluida pri njegovom strujanju.

$h_1 = u_1 + p_1 v_1$  - entalpija ili termomehanički (energetski) potencijal fluida na ulazu u sistem

$h_2 = u_2 + p_2 v_2$  - entalpija ili termomehanički (energetski) potencijal fluida na izlazu iz sistema

- U mehanici fluida

*Navier-Stokes* → *Bernoulli* (energetska jednačina)

$$\underbrace{\frac{p_1}{\rho_1}}_{\text{pritisna energija}} + \underbrace{\frac{w_1^2}{2}}_{\text{kinetička energija}} + \underbrace{gz_1}_{\text{položajna energija}} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{w_2^2}{2} + gz_2 + \underbrace{Y_{\text{gub},1-2}}_{\text{gubitak mehaničke energije}}$$

- Izotemska, izentropska strujanja

$$pv + \frac{w^2}{2} + gz = \text{const}$$

- Osobina totalnog diferencijala (kao i sve veličine stanja)

$$\int_1^2 dH = H_2 - H_1$$