

# ТЕРМОЕНЕРГЕТИКА

## Prvi zakon termodinamike

# Energija radnog tela

Kretanje materije u prirodi je neprekidno. Ono može biti vidljivo:

- kretanje vode u rekama,
- kretanje vazdušnih masa,
- kretanje automobila, ...

Ili može biti nevidljivo:

- kretanje molekula,
- kretanje elektrona,
- kretanje elektromagnetnih talasa, ...

Univerzalna mera kretanja materije naziva se **energija**.

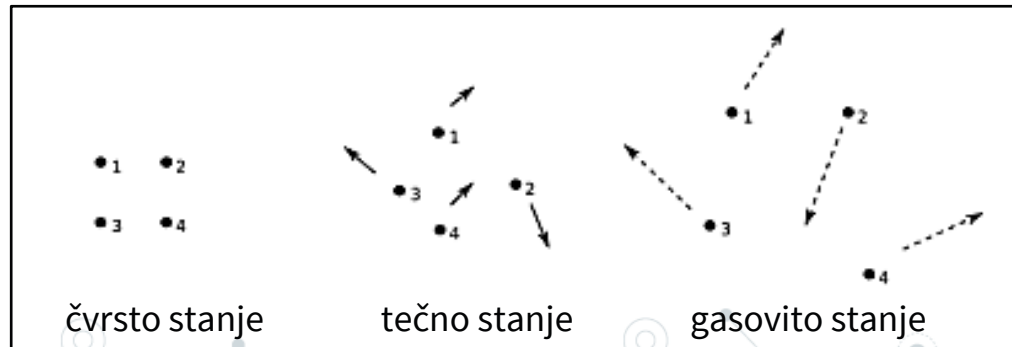


# Energija radnog tela

Da bi se objasnilo toplotno kretanje, potrebno je objasniti ponašanje mikročestica.

Materija se može nalaziti u čvrstom, tečnom i gasovitom stanju. Razlika među ovim agregatnim stanjima je u međusobnom kretanju njihovih mikročestica.

Gasovito stanje je primer potpunog nereda, kad je kretanje njegovih čestica u pitanju.



# Unutrašnja energija

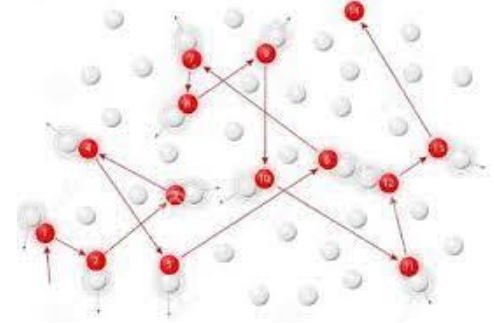
Kretanje mikročestica radnog gasovitog tela sastoji iz:

- Translatorskog kretanja molekula,
- Obrtanja molekula (usled njihovih sudara) i
- Unutarmolekulskog oscilovanja atoma.

Rezultat ovih kretanja je **kinetička energija** molekula i atoma.

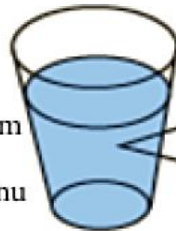
Potencijalna energija, koja je rezultat dejstva međumolekulskih privlačnih sila, se kod idealnog gasa zanemaruje.

Zbir energija mikročestica tela čini **unutrašnju energiju (U)** radnog tela.



Da li voda u čaši na stolu ima neku energiju?

Na makroskopskom nivou voda u čaši nema neku značajnu energiju.



Mikroskopska kinetička energija je deo unutrašnje energije.

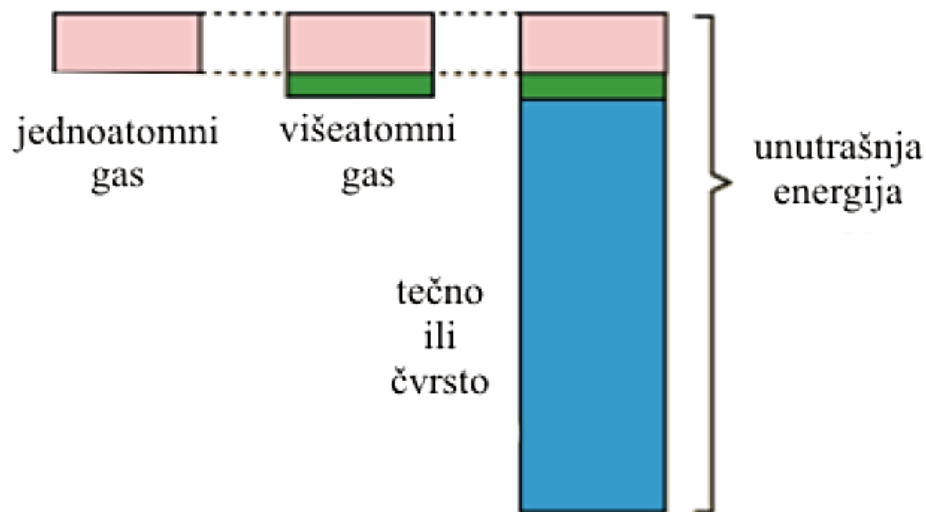


Molekularne privlačne sile povezane su sa potencijalnom energijom.

# Unutrašnja energija

- Translatorska kinetička energija
- Vibraciona i rotaciona kinetička energija
- Potencijalna energija međumolekularnih privlačnih sila

Sistemi sa istom temperaturom



# Unutrašnja energija

Pod **unutrašnjom (toplotnom) energijom** radnog tela treba shvatiti sumu kinetičke i potencijalne energije molekula i atoma, od kojih je prva zavisna od mase i brzine kretanja tih čestica, a druga od njihovog međusobnog položaja, odnosno od privlačnih sila između njih.

Svako radno telo (sistem) ima određenu unutrašnju energiju koja je određena veličinama tog stanja ( $p, v$  i  $t$ ), pa zbog toga i **unutrašnja energija je veličina stanja**.

$u$  – unutrašnja energija jedinice mase (za 1 kg) radnog tela (J/kg)

$$u = f_1(v, t)$$

$$u = f_2(p, t)$$

$$u = f_3(p, v)$$

$U$  – unutrašnja energija (za  $m$  kg radnog tela) (J)

$$U = m \cdot u$$

Posebno za idealan gas, kod koga se zanemaruju međumolekulske privlačne sile, unutrašnja energija je funkcija samo temperature:

$$u = f(t)$$

# Količina toplote

Od pojma unutrašnja energija treba razlikovati pojam **količina toplote**, jer vrlo često pri makroskopskom posmatranju i analiziranju stanja i promene stanja nekog radnog tela (sistema) može da dođe do neshvatanja razlike između ova dva pojma.

Određena količina toplote dovodi se radnom telu (sistemu), ili se od njega odvodi, da bi se, na primer, radno telo prevelo iz jednog energetskog (toplotnog) stanja ( $u_1$ ) u neko drugo energetsko stanje ( $u_2$ ) i da bi se pri tome izvršio, odnosno utrošio, neki spoljašnji mehanički rad.

U slučaju da se ne vrši nikakav spoljašnji mehanički rad, tada je količina toplote upravo jednaka promeni unutrašnje energije:

$$\Delta u = u_2 - u_1$$

odnosno ***ako se promena stanja odvija bez promene unutrašnje energije, količina toplote jednaka je spoljašnjem mehaničkom radu.***

# Količina toplote

Unutrašnja energija, kao veličina stanja, odnosi se na određeno stanje radnog tela (sistema), dok se **količina toplote** odnosi na promenu kojoj se radno telo (sistem) izlaže pri prelazu iz jednog stanja ( $u_1$ ) u neko drugo stanje ( $u_2$ ).

Znači, da količina toplote nije jednoznačno određena osnovnim veličinama stanja, već pored njih zavisi i od načina obavljanja procesa, a to znači da količina toplote, kao termodinamička veličina, nema osobinu veličine stanja, tj. ***količina toplote nije veličina stanja.***

Količina toplote se označava:

$q$  – količina toplote za 1 kg radnog tela (J/kg),

$Q$  – količina toplote za  $m$  kg radnog tela (J).

$$q = \frac{Q}{m}$$



# Specifična toplota

Da bi se ista količina različitih supstanci zagrijala ili ohladila za određenu temperaturnu razliku, potrebna je različita količina toplote.

**Specifična toplota** je fizički parametar radnog tela (kao i gustina) i predstavlja količinu toplote koja je potrebna da se jedinica količine nekog radnog tela zagrije za  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ili  $1\text{ K}$ ).

Toplotni kapacitet zavisi, opšte gledano, od vrste, temperature i pritiska radnog tela. Ako je jedinica količine tela:

$c$  – masena specifična toplota ( $\text{J/kgK}$ ) za  $1\text{ kg}$ ,

$c'$  – zapreminska specifična toplota ( $\text{J/m}^3\text{K}$ ) za  $1\text{ m}^3$ ,

$C$  – molska specifična toplota ( $\text{J/molK}$ ) za  $1\text{ mol}$ .

# Specifična toplota

Na osnovu sledećih izraza moguć je prelaz od masene na zapreminsku i molsku specifičnu toplotu (i obrnuto):

$$c' = c \cdot \rho \qquad c = \frac{C}{M} \qquad c' = \rho \cdot \frac{C}{M} = \frac{C}{M \cdot v}$$

Za normalne uslove  $M \cdot v = 22,4$  pa sledi:

$$c' = \frac{C}{22,4} = \frac{M \cdot c}{22,4}$$

Specifična toplota za gasovita tela (masena, zapreminska ili molska) može da se meri:

- pri stalnoj zapremini:  $c_v, c_v', C_v$
- pri stalnom pritisku:  $c_p, c_p', C_p$

# Specifična toplota

GAS	M	R	$c_p$	$c_v$
	$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$	$\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	
Acetilen ( $\text{C}_2\text{H}_2$ )	26	320	1.44	1.12
Amonijak ( $\text{NH}_3$ )	17	489	2.20	1.71
Argon (Ar)	40	208	0.52	0.31
Azot ( $\text{N}_2$ )	28	297	1.04	0.74
Benzol ( $\text{C}_6\text{H}_6$ )	78	107	0.48	0.37
Butan ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )	58	143	0.64	0.50
Etan ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )	30	277	1.25	0.97
Etilen ( $\text{C}_2\text{H}_4$ )	28	297	1.34	1.04
Helijum (He)	4	2078	5.20	3.12
Kiseonik ( $\text{O}_2$ )	32	260	0.91	0.65
Metan ( $\text{CH}_4$ )	16	520	2.34	1.82
Neon (Ne)	20	416	1.04	0.62
Ozon ( $\text{O}_3$ )	48	173	0.78	0.61
Pentan ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ )	72	115	0.52	0.40
Propan ( $\text{C}_3\text{H}_8$ )	44	189	0.85	0.66
Sumpordioksid ( $\text{SO}_2$ )	64	130	0.58	0.45
Sumporvodonik ( $\text{H}_2\text{S}$ )	34	244	1.10	0.86
Ugljendioksid ( $\text{CO}_2$ )	44	189	0.85	0.66
Ugljenmonoksid (CO)	28	297	1.04	0.74
Vazduh -	29	287	1.00	0.72
Vodonik ( $\text{H}_2$ )	2	4157	14.55	10.40

# Majerova jednačina

Za određivanje veze između specifične toplote pri konstantnoj zapremini i pri konstantnom pritisku razmatra se cilindar ispunjen idealnim gasom.

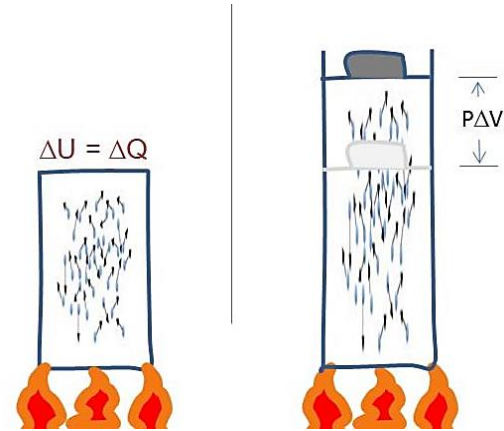
Cilindar je sa jedne strane zatvoren, a sa druge je zatvoren lakim pokretnim klipom.

Ako se specifična toplota meri pri stalnoj zapremini, klip je zakočen.

Ako se specifična toplota meri pri stalnom pritisku, klip se kreće duž neke putanje i prelazi put  $h$ .

U prvom slučaju se toplota dovodi pri konstantnoj zapremini i cela količina toplote odlazi na povećanje unutrašnje energije, odnosno:

$$\Delta Q = \Delta U = m \cdot c_v \cdot T,$$



# Majerova jednačina

Na osnovu definicije za izvršeni mehanički rad, izvršeni rad  $W$  u drugom slučaju je:

$$W = F \cdot h,$$

odnosno ako je pređeni put klipa čija je površina poprečnog preseka  $S$  jednak  $h$ ,

$$W = F \cdot h = p \cdot S \cdot h = p \cdot \Delta V = m \cdot R \cdot \Delta T.$$

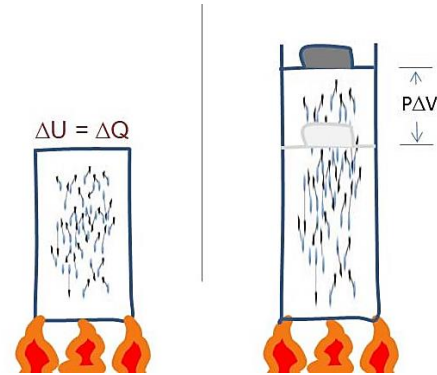
Ukoliko imamo unutar cilindra  $m = 1$  kg materije i porast temperature tokom procesa od 1 K sledi da je izvršeni rad jednak

$$W = m \cdot R \cdot \Delta T = R.$$

Iz ovoga sledi da je specifična toplota pri stalnom pritisku za  $R$  veća od specifične toplote pri stalnoj zapremini, što predstavlja

**Majerovu jednačinu:**

$$c_p = R + c_v,$$



# Prvi zakon termodinamike

Kada energija (u vidu toplote ili rada) prolazi kroz granične površine nekog od termodinamičkih sistema potrebno je da se zna šta se dešava sa materijom u tom sistemu.

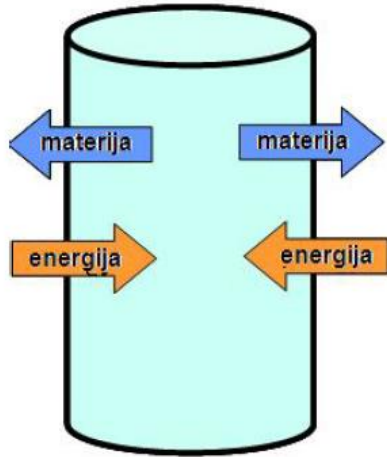
Npr. potrebno je da se zna šta se dešava sa vazduhom u balonu (njegovim pritiskom i temperaturom) kada se balon zagreva tj. kada kroz gumu balona prolazi toplota.

Potrebno je da se zna šta se dešava sa gasovima unutar nekog cilindra motora kada se pokreće njegov klip tj. kada (drugim rečima) kroz površinu klipa zapreminski rad „prolazi i ulazi“ u cilindar motora.

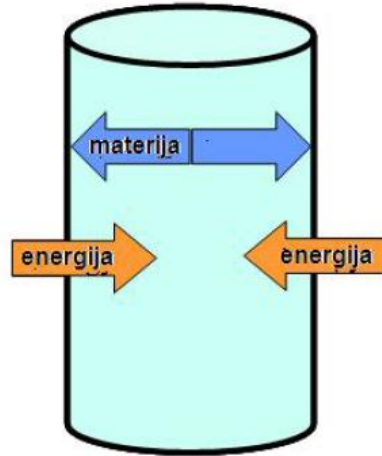
Da bi smo ovo saznali potrebno se upoznati sa **prvim zakonom termodinamike** za zatvorene sisteme i otvorene sisteme, entalpijom i tehničkim radom.

Opšti fizički princip koji važi je da **ukupna količina energije ostaje nepromenjena bez obzira kakvi se procesi događaju.**

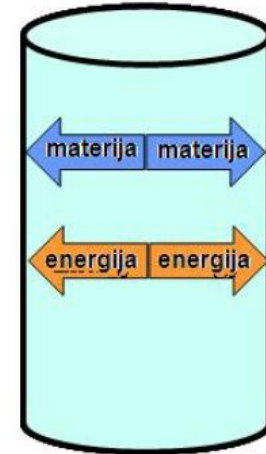
# Otvoreni i zatvoreni sistemi



**OTVORENI**



**ZATVORENI**



**IZOLOVANI**

# Prvi zakon termodinamike

Prvi zakon termodinamike definiše energetska interakciju sistema sa njegovom okolinom, odnosno forme pretvaranja jednog oblika energije u drugi.

***Energija se ne može stvoriti ni iz čega niti uništiti, već može samo preći iz jednog oblika u drugi.***

***Nemoguće je ostvariti perpetuum mobile I vrste, tj. motor kao napravu koja bi sama od sebe večito functionisala i trajno proizvodila rad, bez ikakvih energijskih međudejstava sa okolinom.***

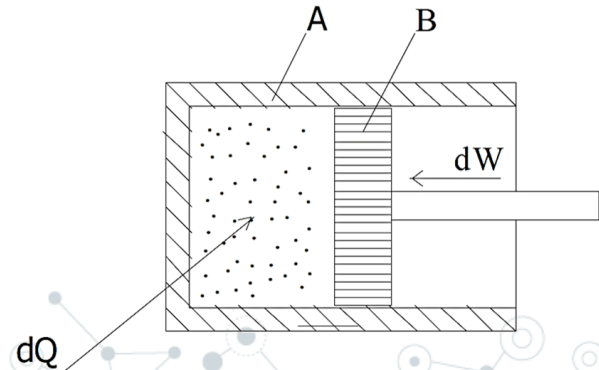


# Prvi zakon termodinamike za zatvorene sisteme

Da bi objasnili ovaj zakon posmatramo jedan sud A kod koga se usled spoljnih uticaja menja unutrašnja energija, a to je energija radnog gasa koji se nalazi u sudu A.

Postoje samo dve mogućnosti promene energije ovakvog sistema:

- da se gasu dovodi, ili da se od gasa odvodi određena količina toplote  $Q$
- da se nad gasom vrši rad (odnosno da mu se dovodi rad), ili da sam gas vrši rad, tj. da se od gasa odvodi rad  $W$ .



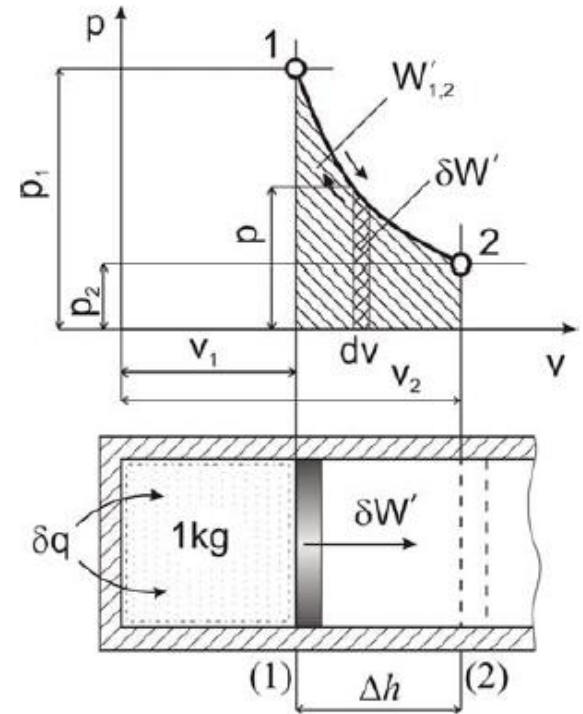
# Prvi zakon termodinamike za zatvorene sisteme

Pretpostavimo da je u početnom stanju gasa pritisak  $p_1$ , specifična zapremina  $v_1$  i shodno tome temperatura gasa  $T_1$ .

Ako gasu dovedemo količina toplote  $\delta q$  tada će se klip pomeriti udesno i uspostaviće se novo stanje gasa 1'( $p_1'$ ,  $v_1'$ ).

Pomeranjem klipa izvršiće se zapreminski (apsolutni) rad:

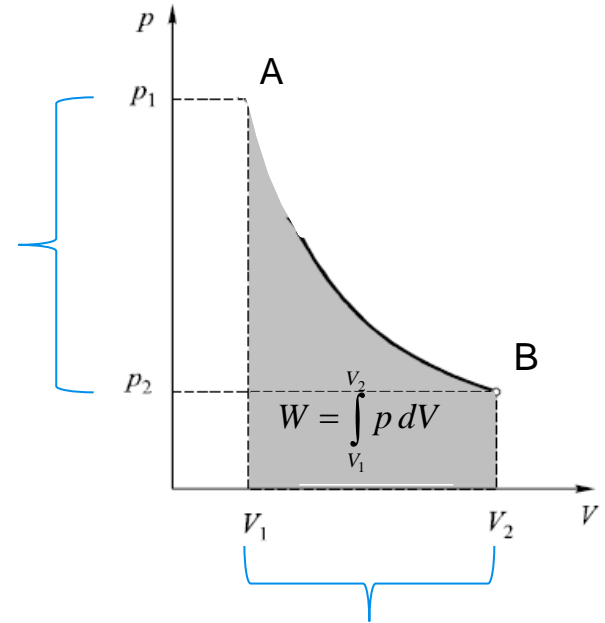
$$\delta w = p \cdot dv.$$



# Prvi zakon termodinamike za zatvorene sisteme

Geometrijska interpretacija u p-V dijagramu:  
rad je površina krivolinijskog trapeza  
omeđenog sa  $p = p(V)$

Promena (smanjenje)  
pritiska gasa u cilindru  
zbog ekspanzije

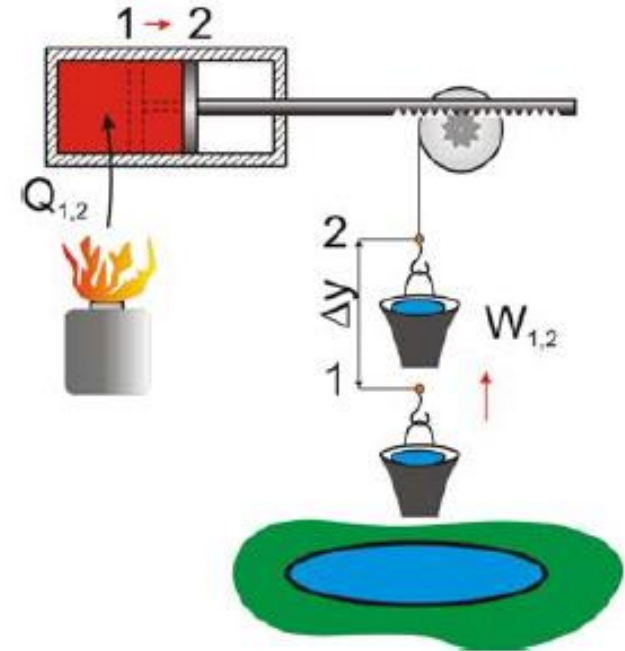


Promena zapremine  
(povećanje) gasa u  
cilindru zbog ekspanzije

# Prvi zakon termodinamike za zatvorene sisteme

Kad god imamo na raspolaganju određenu količinu toplote, moguće je dobiti određeni mehanički rad i obrnuto.

Deo energije produkata sagorevanja predaje se u obliku toplote gasu u cilindru, koji u ovom slučaju kao termodinamički sistem ima ulogu posrednika pri razmatranoj transformaciji.



# Prvi zakon termodinamike za zatvorene sisteme

Dovođenjem količine toplote  $Q_{1,2}$  gas se širi, menja mu se unutrašnja energija (i temperatura) od  $U_1$  na  $U_2$ , i pri tome se obavlja mehanički rad  $W_{1,2}$ .

$$U_2 - U_1 = Q_{1,2} - W_{1,2}$$

Ovaj izraz govori da se unutrašnja energija zatvorenog termodinamičkog sistema menja od stanja 1 do stanja 2 ( $U_1 - U_2$ ) tako što se pri ovoj promeni stanja ovom sistemu dovodi određena količina toplote  $Q_{1,2}$  i/ili određena količina rada  $W_{1,2}$ .

# Matematički izraz Prvog zakona termodinamike za zatvorene sisteme

*Kada se obavlja neki mehanički rad uvek se dobija određena količina toplote, odnosno kada god se ima na raspolaganju neka količina toplote može se dobiti i određena količina mehaničke energije (u vidu obavljenog rada).*

Matematički izraz I zakona termodinamike:

za 1 kg gasa:  $\delta q = du + \delta w.$

za m kg gasa:  $\delta Q = dU + \delta W.$

$$du = c_v \cdot dT$$

Na osnovu izraza za unutrašnju energiju idealnog gasa

$$\delta q = c_v \cdot dT + p \cdot dv$$

# Pojam entalpije

**Entalpija (H)** predstavlja toplotnu energija koja se razmenjuje između sistema i okoline pri konstantnom pritisku.

$$H = U + p \cdot V$$

Entalpija je funkcija stanja sistema!!!

Nemoguće je meriti aposolutnu vrednost entalpije nego samo njenu promenu

$$\Delta H = \Delta(U + p \cdot V)$$

Ako je pritisak konstantan sledi:

$$\Delta H = \Delta U + p \cdot \Delta V$$

# Matematički izraz Prvog zakona termodinamike za otvorene sisteme

Prvi zakon termodinamike za otvorene sisteme u diferencijalnom obliku dat je izrazom:

$$dH = \delta Q - \delta W_t$$

Relacija za prvi zakon termodinamike u integralnom obliku za otvorene sisteme:

$$H_2 - H_1 = Q_{1,2} - W_{t1,2}$$

Ovaj izraz govori da razlika entalpija radne materije koja izlazi iz otvorenog termodinamičkog sistema  $H_2$  i radne materije koja ulazi u otvoreni termodinamički sistem  $H_1$  nastaje usled dovođenja količine toplote  $Q_{1,2}$  i/ili dovođenja količine tehničkog rada  $W_{t1,2}$  u otvoreni termodinamički sistem.

Veličina  $W_{t1,2}$  je rad koji se može iskoristiti. On se dobija kada se apsolutnom radu  $W_{1,2}$  doda rad potreban za potiskivanje radne materije u sistem ( $p_1V_1$ ) i oduzme rad potreban za njeno istiskivanje ( $p_2V_2$ ) iz otvorenog termodinamičkog sistema po završenom procesu.



# Prvi zakon termodinamike za otvorene sisteme

U praksi najčešće će se izučavati termodinamika otvorenih sistema.

Otvoreni termodinamički sistem koji često koristimo jeste fen za kosu. Ventilator u fenu za kosu usisava vazduh iz prostorije, zagreva ga na grejaču fena i tako zagrejanog ga ubacuje natrag u prostoriju.

Znači u otvoreni sistem (fen za kosu) dolazi fluid (vazduh) stanja 1 ( $p_1, T_1$ ) a fluid (vazduh) napušta je u stanju 2 ( $p_2, T_2$ ). U fenu za kosu dolazi do razmene energije. Fluid (vazduh) u mašini pored unutrašnje poseduje još i kinetičku i potencijalnu energiju. Ako su brzine strujanja male i strujanje ekvipotencijalno, kinetička i potencijalna energija se mogu zanemariti u odnosu na količinu ostale razmenjene energije u procesu.

