

# Upotreba tablica s termodinamičkim podacima

---

Nije moguće znati apsolutnu vrijednost specifične unutarnje energije  $u$  procesnog materijala, ali je moguće odrediti promjenu ove veličine, koja odgovara promjenama veličina stanja (temperature, tlaka i faza).

Kada je jedan puta određena promjena specifične termodinamičke (unutarnje) energije  $\Delta u = \Delta U / m$  može se izračunati promjena specifične entalpije za istu promjenu stanja prema relaciji

$$\Delta h = \Delta u + \Delta(p \cdot v)$$

Dogovoreni način da se izmjerene promjene  $\Delta u$  i  $\Delta h$  prikažu tablično je biranje temperature, tlaka i agregatnog stanja kao referentnog stanja i zatim navođenja  $\Delta u$  ili  $\Delta h$  za promjene od ovog stanja do serije drugih stanja.

# Primjer 5

---

**Primjer 5:** U tablici za zasićenu paru metil klorida ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ), koji je rashladna tvar (K. Ražnjević: Termodinamičke tablice, Školska knjiga, Zagreb, 1975, str. 109) mogu se pronaći slijedeće vrijednosti

---

T [K]	p [bar]	v [m <sup>3</sup> /kg]		h [kJ/kg]		h <sub>v</sub> [kJ/kg]
		kapljevina	para	kapljevina	para	
213,15	0,156	0,000936	2,235	328,538	789,044	460,560
243,15	0,768	0,000986	0,508	372,751	807,341	434,690
273,15	2,559	0,001042	0,1648	418,680	823,753	405,073
303,15	6,529	0,001110	0,0675	466,326	836,606	370,281
333,15	13,76	0,001196	0,0324	515,688	845,441	329,752

---

**Treba izračunati  $\Delta h$  i  $\Delta u$  kada se zasićena para metil-klorida hladi s 333,15 K na 273,15 K.**

## Primjer 5

---

$$\Delta h = h_{273,15 \text{ K}} - h_{333,15 \text{ K}} = 823,753 - 845,441 = -21,688 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta u = \Delta h - \Delta(p \cdot v)$$

$$= -21,688 - (2,56 \cdot 10^5 \cdot 0,1648 - 13,76 \cdot 10^5 \cdot 0,0324)$$

$$= -19,253 \text{ kJ/kg}$$

# Tablica vodene pare\*

---

Voda je radni medij pri operacijama koje se često upotrebljavaju u kemijskoj i srodnim industrijama. Ona se upotrebljava kao rashladni medij kada se procesna jedinica treba hladiti da se odvede određena količina topline koju generira sustav ili se upotrebljava za proizvodnju pare koja se koristi kao medij za zagrijavanje procesne jedinice ako je u sustav potrebno dovesti određenu količinu topline iz okoline.

Osobine vode i vodene pare su vrijednosti fizičkih veličina koje označuju svojstva vode. Posebno su prilagođene za praktičnu primjenu i složene su u termodinamičkim tablicama koje su standardne za strojarske i kemijske inženjere.

\*K.Ražnjević, Termodinamičke tablice, Školska knjiga, Zagreb, 1975.

# Tablica vodene pare\*

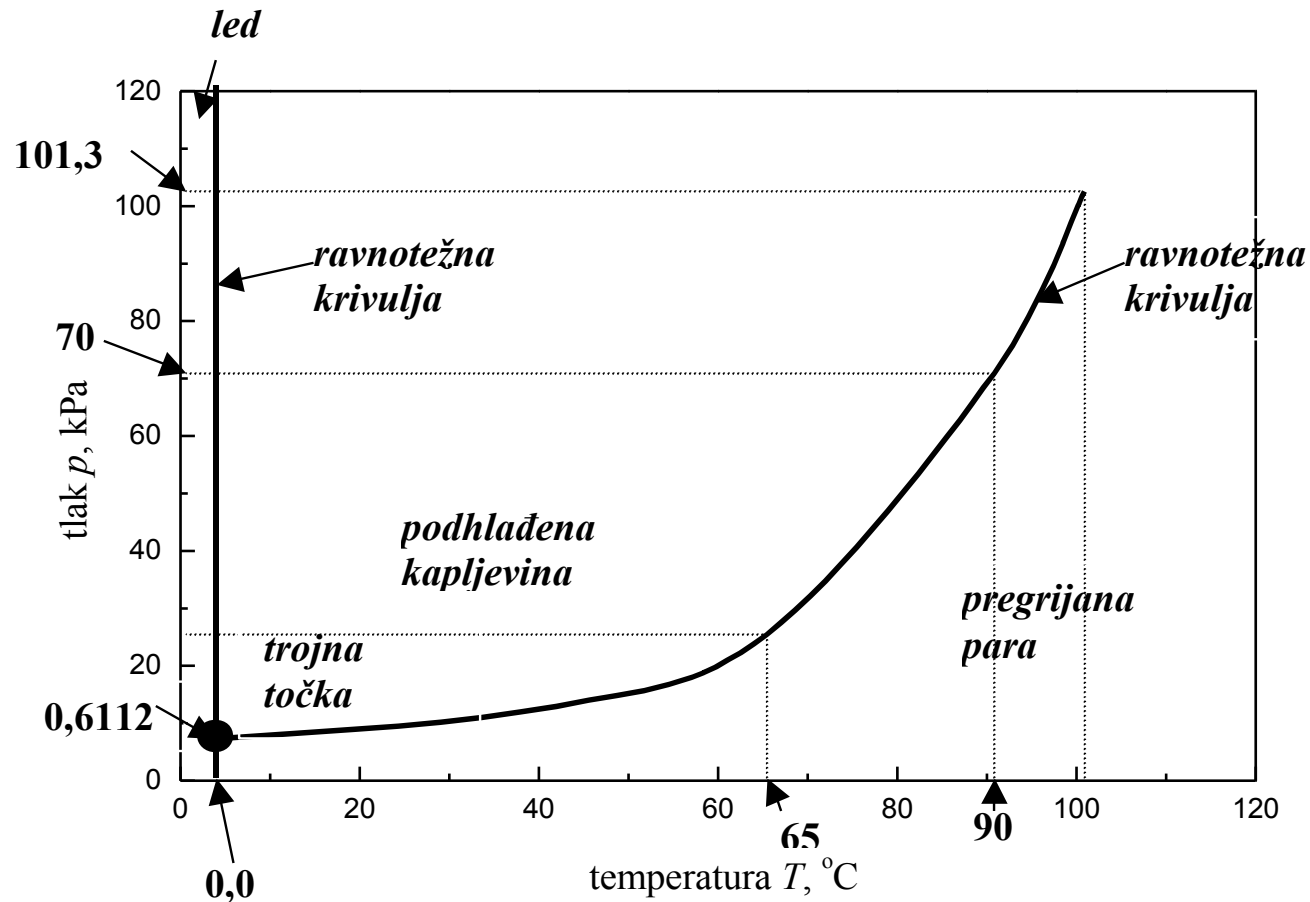
---

Prema međunarodnom dogovoru kao referentna (temeljna) vrijednost u tablicama pare je uzeta unutarnja energija zasićene kapljevite faze vodene pare pri trojnoj točki vode ( $p = 0,6112$  kPa,  $T = 0,01$  °C) koja je jednaka nuli  $u = h = 0$  kJ/kg.

Referentno stanje u tablicama pare je trojna točka kapljevite vode. Ostale vrijednosti koje se nalaze u tablicama pare su izračunate pomoću jednadžbe stanja.

\*K.Ražnjević, Termodinamičke tablice, Školska knjiga, Zagreb, 1975.

# Tablica vodene pare\*

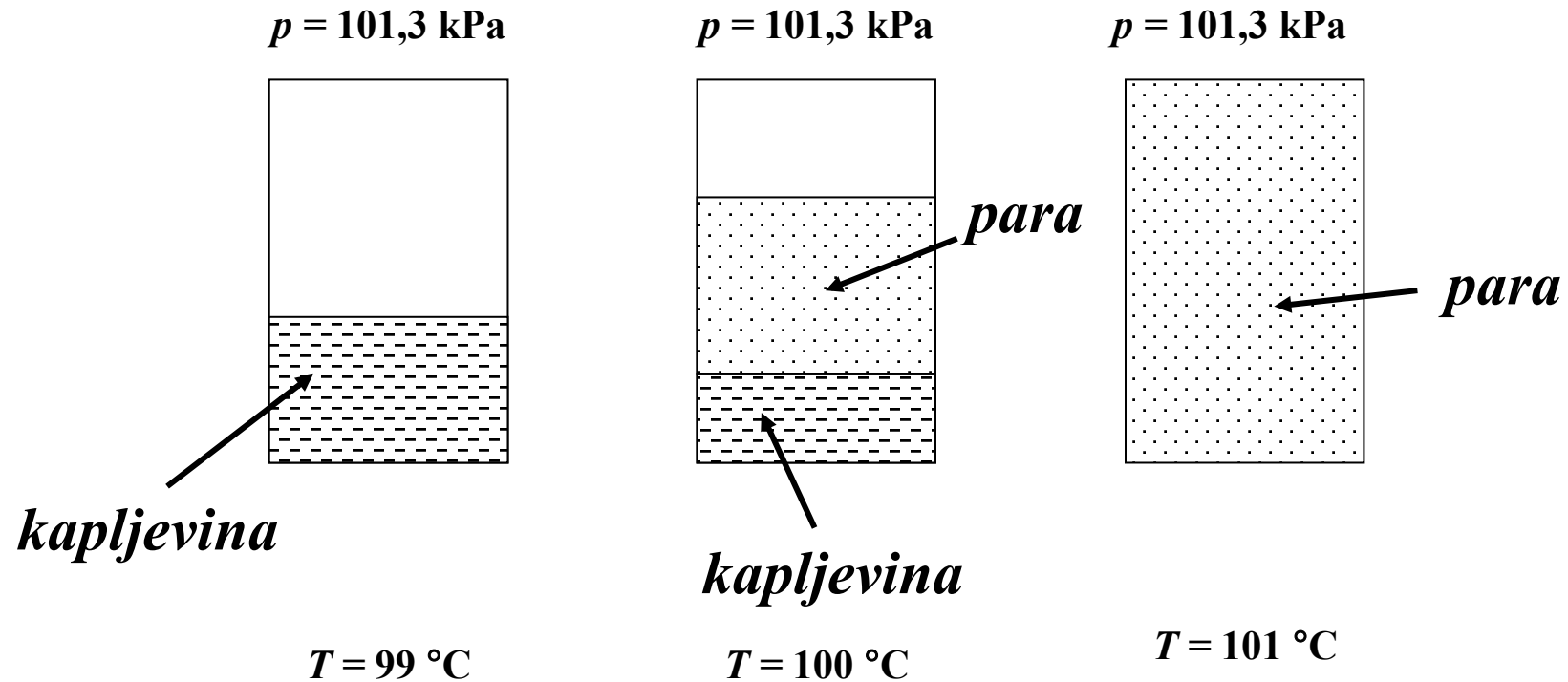


$p - T$  dijagrama za čistu vode i trojna točka vode

\*K.Ražnjević, Termodinamičke tablice, Školska knjiga, Zagreb, 1975.

# Tablica vodene pare\*

---

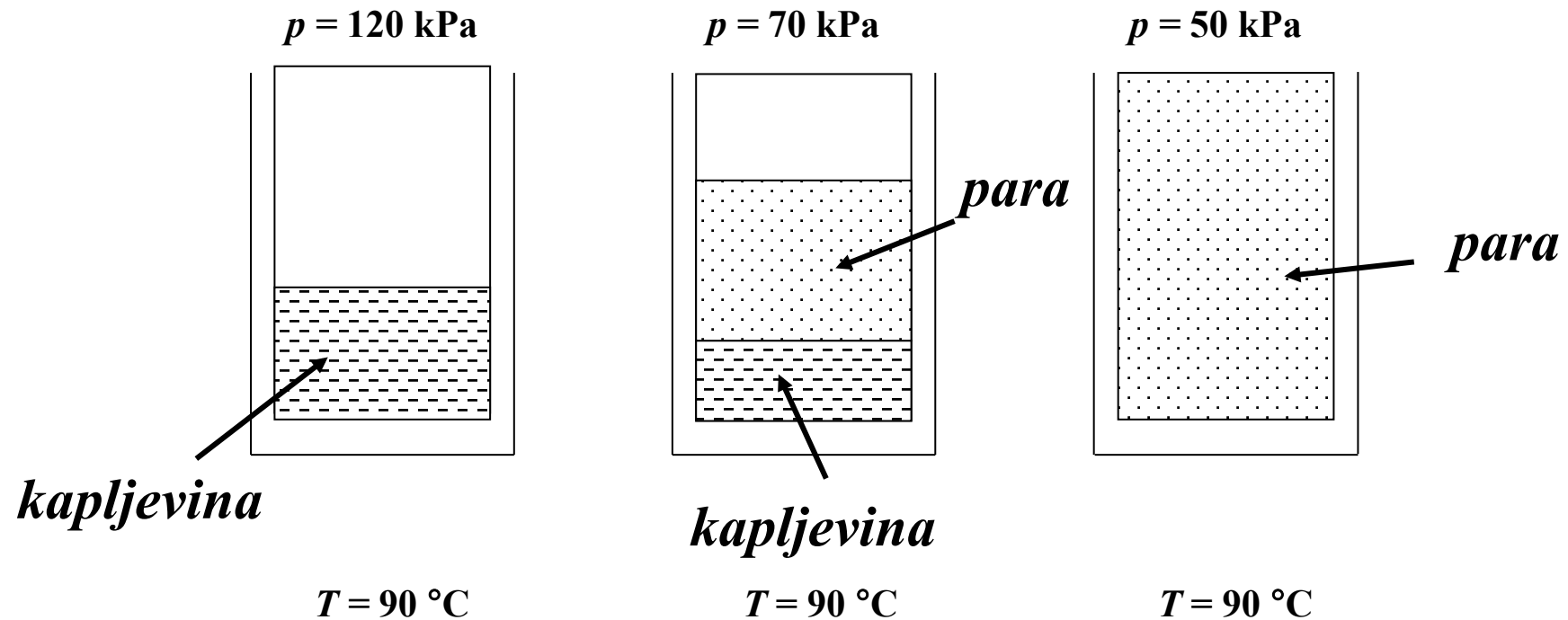


**Prijelaz vode (kapljevita faza) u paru (plinovita faza) pri stalnom tlaku.**

\*K.Ražnjević, Termodinamičke tablice, Školska knjiga, Zagreb, 1975.

# Tablica vodene pare\*

---



Prijelaz vode ( kapljevita faza) u paru (plinovita faza) pri stalnoj temperaturi.

\*K.Ražnjević, Termodinamičke tablice, Školska knjiga, Zagreb, 1975.



# Osobine zasićene vodene pare pri danoj temperaturi

$T$ [K]	$p$ [kPa]	$v$ [m <sup>3</sup> /kg]		$h$ [kJ/kg]		$h_v$ [kJ/kg]
		kapljevina	para	kapljevina	para	
495	2410,3	0,001194	0,08288	952,9	2802	1849
500	2647,3	0,001203	0,07552	976,3	2803	1826
505	2901,9	0,001213	0,06891	999,8	2804	1804
510	3174,9	0,001223	0,06296	1023,3	2804	1781
515	3467,3	0,001233	0,05759	1047,1	2803	1756
520	3779,9	0,001244	0,05274	1071,3	2802	1731
525	4114	0,001256	0,04835	1095,5	2801	1705
530	4470	0,001268	0,04436	1120,1	2798	1678
535	4848	0,001281	0,04074	1145,1	2795	1650
540	5251	0,001294	0,03744	1170,2	2792	1622
545	5679	0,001308	0,03443	1195,4	2788	1592,7
550	6134	0,001323	0,03167	1221,1	2783	1561,7
555	6616	0,001339	0,02915	1247,3	2777	1530,0
560	7125	0,001355	0,02684	1273,7	2771	1496,8
565	7664	0,001373	0,02471	1300,9	2763	1462,4
570	8235	0,001392	0,02275	1328,3	2755	1426,6
575	8837	0,001412	0,02094	1356,2	2745	1389,0
580	9472	0,001434	0,01926	1384,5	2734	1349,6
585	10142	0,001457	0,01771	1413,9	2722	1308,2
590	10848	0,001483	0,01627	1443,8	2709	1264,6
595	11592	0,001511	0,01493	1474,6	2694	1219,4
600	12375	0,001542	0,01368	1506,4	2676	1170,2
605	13199	0,001577	0,01251	1539,5	2658	1118,6
610	14066	0,001615	0,01141	1573,4	2626	1062,7
615	14978	0,001658	0,01037	1609,0	2612	1002,4
620	15938	0,001707	0,009379	1647	2584	936,6
625	16947	0,001764	0,008425	1688	2551	863,0
630	18009	0,001840	0,007499	1732	2509	776,7
635	19129	0,001943	0,00656	1783	2460	677,1
640	20311	0,00208	0,00559	1844	2390	546,2
645	21563,0	0,00238	0,00440	1937	2273	336,2
647	22129,7	0,00326	0,00326	2100	2100	0

## Primjer 6

---

**Primjer 6:** Izračunati masu zasićene vodene pare pri temperaturi 600 K, koja prolazom kroz izmjenjivač topline kondenzira, potrebnu da bi se izmjenjivaču topline dovelo  $6 \cdot 10^6$  kJ/h topline.

$$Q = E = q \cdot h_v$$

$$h_v (T = 600 \text{ K}) = 1170,2 \text{ kJ/kg}$$

$$q = \frac{E}{h_v} = \frac{6 \cdot 10^6}{1170,2} = 5127 \text{ kg/h}$$

# Osobine zasićene vodene pare pri danom tlaku

$p$ [kPa]	$T$ [K]	$v$ [m <sup>3</sup> /kg]		$h$ [kJ/kg]		$h_v$ [kJ/kg]
		kapljevina	para	kapljevina	para	
1,0	280,07	0,0010001	129,9	29,32	2513	2484
1,5	286,19	0,0010007	87,9	54,79	2515	2470
2,0	290,66	0,0010014	66,97	73,52	2533	2459
2,5	294,24	0,0010021	54,24	88,50	2539	2451
3,0	297,25	0,0010028	45,66	101,04	2545	2444
3,5	299,84	0,0010035	39,48	111,86	2550	2438
4,0	302,13	0,0010041	34,81	121,42	2554	2433
4,5	304,18	0,0010047	31,13	130,00	2557	2427
5,0	306,03	0,0010053	28,19	137,83	2561	2423
5,5	307,74	0,0010059	25,77	144,95	2564	2419
6,0	309,33	0,0010064	23,74	151,50	2567	2415
6,5	310,80	0,0010070	22,02	157,68	2570	2412
7,0	312,18	0,0010075	20,53	163,43	2572	2409
7,5	313,47	0,0010080	19,23	168,8	2574	2405
8,0	314,69	0,0010085	18,10	173,9	2576	2402
10	318,99	0,0010103	14,68	191,9	2584	2392
12	322,60	0,0010119	12,35	207,0	2591	2384
14	325,73	0,0010133	10,69	220,1	2596	2376
16	328,49	0,0010147	9,43	231,7	2601	2369
18	330,97	0,0010159	8,44	241,9	2605	2363
30	342,27	0,0010222	5,226	289,3	2625	2336
40	349,03	0,0010264	3,994	317,7	2636	2318
50	354,50	0,0010299	3,239	340,6	2645	2304
60	359,10	0,0010385	2,087	391,8	2665	2273
80	366,67	0,0010385	2,087	391,8	2665	2273
100	372,79	0,0010432	1,694	417,4	2675	2258
101,325	373,14	0,001043	1,673	419,5	2676	2256
120	377,96	0,0010472	1,429	439,4	2683	2244
140	382,48	0,0010510	1,236	458,5	2690	2232
200	393,38	0,0010605	0,8854	504,8	2707	2202
250	400,59	0,0010672	0,7185	535,4	2717	2182
300	406,69	0,0010733	0,6057	561,4	2732	2148
350	412,03	0,0010786	0,5241	584,5	2738	2133
400	415,77	0,0010836	0,4624	604,7	2738	2133
500	424,99	0,0011092	0,3747	640,1	2749	2109
600	431,99	0,0011007	0,3156	670,5	2757	2086
800	443,57	0,0011149	0,2403	720,9	2769	2048
1000	453,03	0,0011273	0,1946	762,7	2778	2015
1200	461,10	0,0011385	0,1633	798,3	2785	1987

## Primjer 7

---

**Primjer 7:** Izračunati količinu topline koju 25 t zasićene vodene pare pri tlaku od 450 kPa predaje izmjenjivaču topline. Vodena para prolazom kroz izmjenjivač topline kondenzira.

$$Q = E = m \cdot h_V$$

$$h_V(p = 400 \text{ kPa}) = 2133 \text{ kJ/kg}$$

$$h_V(p = 500 \text{ kPa}) = 2109 \text{ kJ/kg}$$

$$h_V(p = 450 \text{ kPa}) = h_V(p = 400 \text{ kPa}) - \frac{h_V(p = 400 \text{ kPa}) - h_V(p = 500 \text{ kPa})}{\Delta p_{500-400}} \cdot \Delta p_{450-400} = 2121 \text{ kJ/kg}$$

$$Q = E = 25 \cdot 10^3 \cdot 2121 = 5,3 \cdot 10^7 \text{ kJ}$$

# BILANCA ENERGIJE

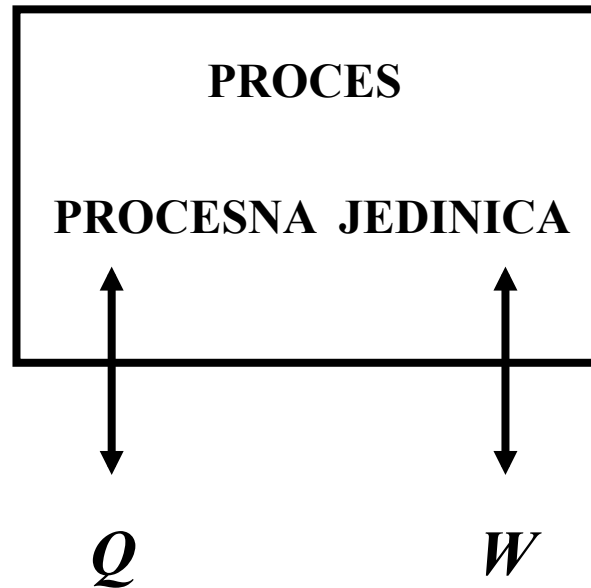
---

## OPĆA BILANCA ENERGIJE ZA BILO KOJI SUSTAV:

$$\begin{array}{c} \boxed{\text{Akumulacija}} \\ \boxed{\text{energije}} \\ \\ = \\ \boxed{\text{Ulaz}} \quad - \quad \boxed{\text{Izlaz}} \quad + \quad \boxed{\text{Energija koju sustav}} \\ \boxed{\text{energije}} \quad \quad \quad \boxed{\text{energije}} \quad \quad \quad \boxed{\text{izmjeni s okolinom}} \end{array}$$

# BILANCA ENERGIJE

---



**OPĆA BILANCA ENERGIJE ZA ZATVOREN SUSTAV:**

$$\boxed{\text{Konačna energija u sustavu}} - \boxed{\text{Početna energija u sustavu}} = \boxed{\text{Energija akumulirana u sustavu}}$$

# Bilanca energije za zatvoreni sustav

---

$$\text{Početna energija u sustavu} = U_0 + E_{k,0} + E_{p,0}$$

$$\text{Konačna energija u sustavu} = U_f + E_{k,f} + E_{p,f}$$

$$\text{Energija izmijenjena s okolinom} = \text{Energija akumulirana u sustavu} = Q + W$$

# Bilanca energije za zatvoreni sustav

---

$$(U_f - U_o) + (E_{k,f} - E_{k,o}) + (E_{p,f} - E_{p,o}) = Q + W$$

$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q + W$$

$$\Delta E = Q + W$$



# Bilanca energije za zatvoreni sustav

---

- 1. Termodinamička (unutarnja) energija sustava gotovo potpuno ovisi o kemijskom sastavu, agregatnom stanju i temperaturi materijala u sustavu. Ona je nezavisna o tlaku idealnog plina i gotovo nezavisna o tlaku u kapljevina i krutinama. Zbog toga je  $\Delta U \cong 0$ , ako nema promjene temperature, faza i kemijskog sastava u procesu i ako je procesni materijal krutina, kapljevina ili idealni plin.**
- 2. Ako su sustav i njegova okolina na istoj temperaturi (ili ako je sustav idealno izoliran) tada je  $Q = 0$ , a sustav se naziva adiabatски.**

# Bilanca energije za zatvoreni sustav

---

- 3. Rad koji se vrši na sustav ili koji zatvoreni sustav vrši na okolinu je povezan s kretanjem granica sustava u odnosu na neku silu koja pruža otpor (Primjer je kretanje klipa ili rotacija osovine) ili s nastajanjem električne struje ili radijacije koja prolazi granice sustava. Ako nema kretanja ili električne struje u zatvorenom sustavu rad je jednak nuli  $W = 0$ .**
- 4. Ako su u proces uključene drugačije promjene potencijalne energije od onih koje su posljedice promjene visine (npr. kretanje u električnom ili magnetskom polju) u bilancu energije mora biti uključen član za potencijalnu energiju.**

## Primjer 8

---

**Primjer 8:** Plin se nalazi u cilindru koji ima pokretan klip. Početna temperatura plina je  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Cilindar se stavlja u vodenu kupelj, a klip se nalazi u fiksnom položaju. Plin apsorbira toplinu od  $2\text{ kcal}$ , koja se uravnotežuje na temperaturi  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (i kod višeg tlaka). U tom momentu se oslobađa klip, a plin vrši rad od  $100\text{ J}$  na okolinu pokrećući klip do novog ravnotežnog položaja. Konačna temperatura plina je  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Treba napisati bilancu energije za oba slučaja ovog procesa i za svaki slučaj izračunati energiju.

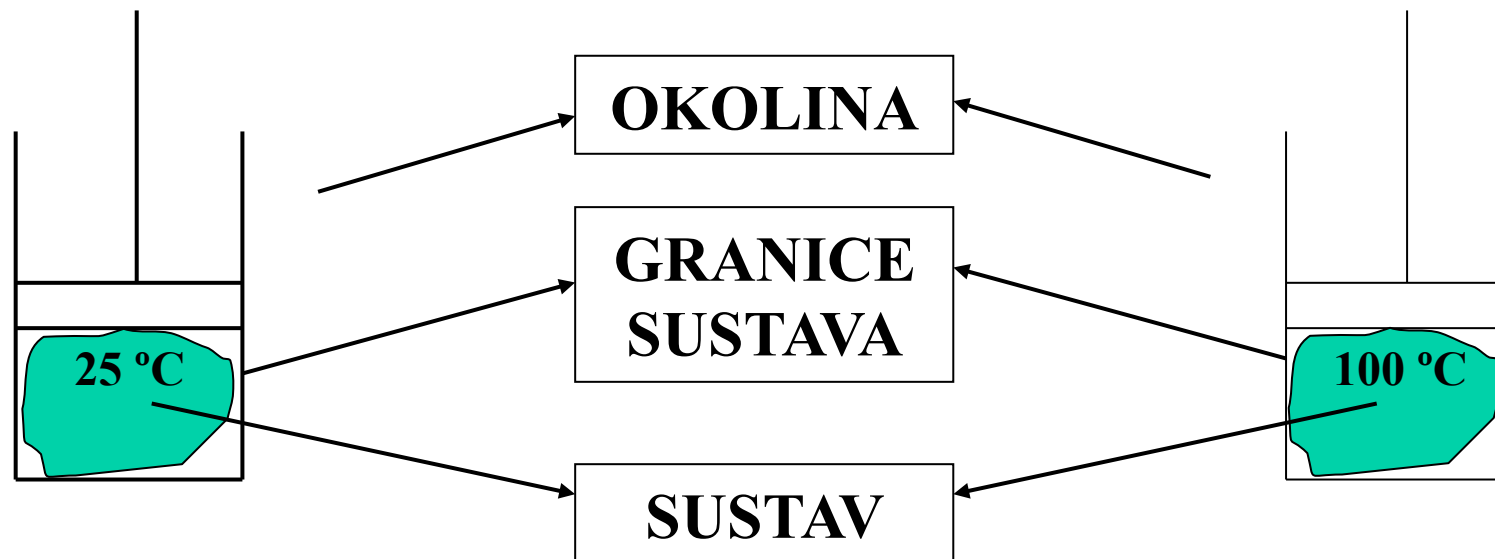
Pri rješavanju ovog problema treba uzeti u obzir da se plin u cilindru ponaša kao idealan i da su promjene potencijalne energije, kada se klip kreće vertikalno zanemarive. Energiju treba izraziti u jedinci J.

# Primjer 8

---

## 1. Stupanj

Procesna shema

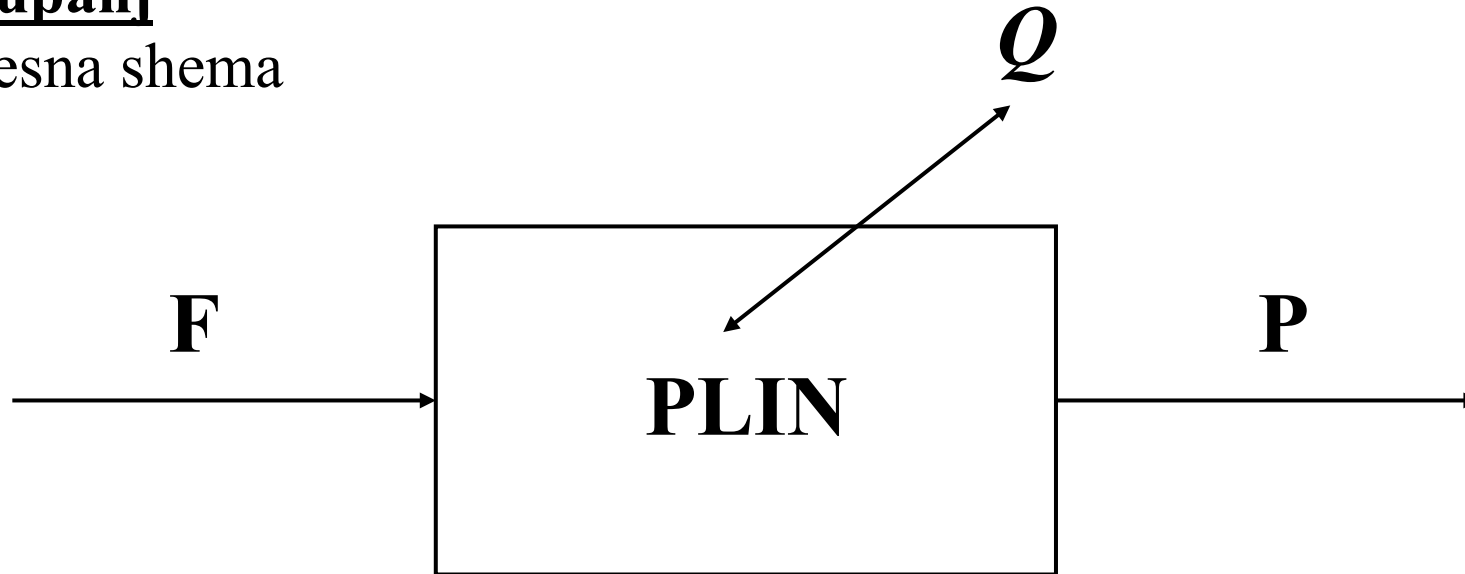


# Primjer 8

---

## 1. Stupanj

Procesna shema



**Bilanca energije:**

$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q + W$$

## Primjer 8

---

$$\Delta E_k = 0 \text{ (sustav miruje)}$$

$$\Delta E_p = 0 \text{ (nema promjene potencijalne energije)}$$

$$W = 0 \text{ (nema kretanja granica sustava)}$$

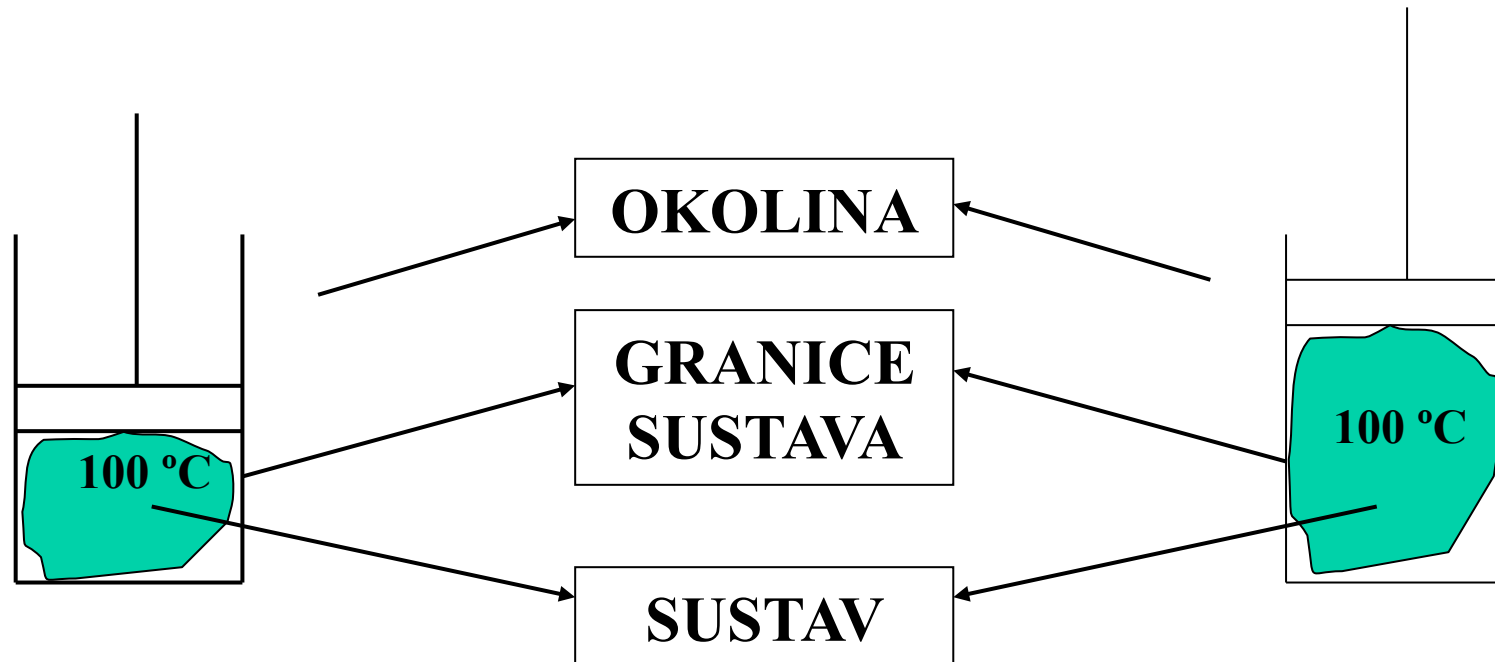
$$\Delta U = Q = 2 \text{ kcal} \cdot \frac{10^3 \text{ cal}}{1 \text{ kcal}} \cdot \frac{1 \text{ J}}{0,2391 \text{ cal}} = 8368 \text{ J}$$

# Primjer 8

---

## 2. Stupanj

Procesna shema

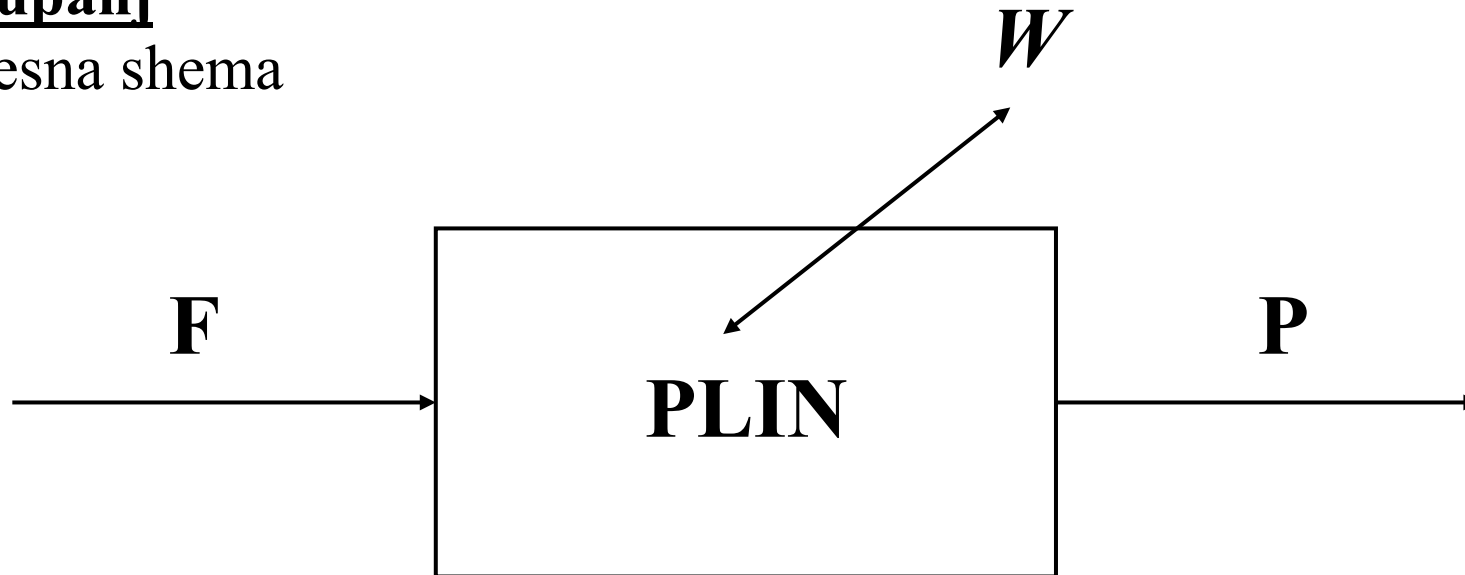


# Primjer 8

---

## 2. Stupanj

Procesna shema



**Bilanca energije:**

$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q + W$$



# Primjer 8

---

$$\Delta E_k = 0 \text{ (sustav miruje)}$$

$$\Delta E_p = 0 \text{ (nema promjene potencijalne energije, pretpostavka)}$$

$$\Delta U = 0 \text{ (idealni plin)}$$

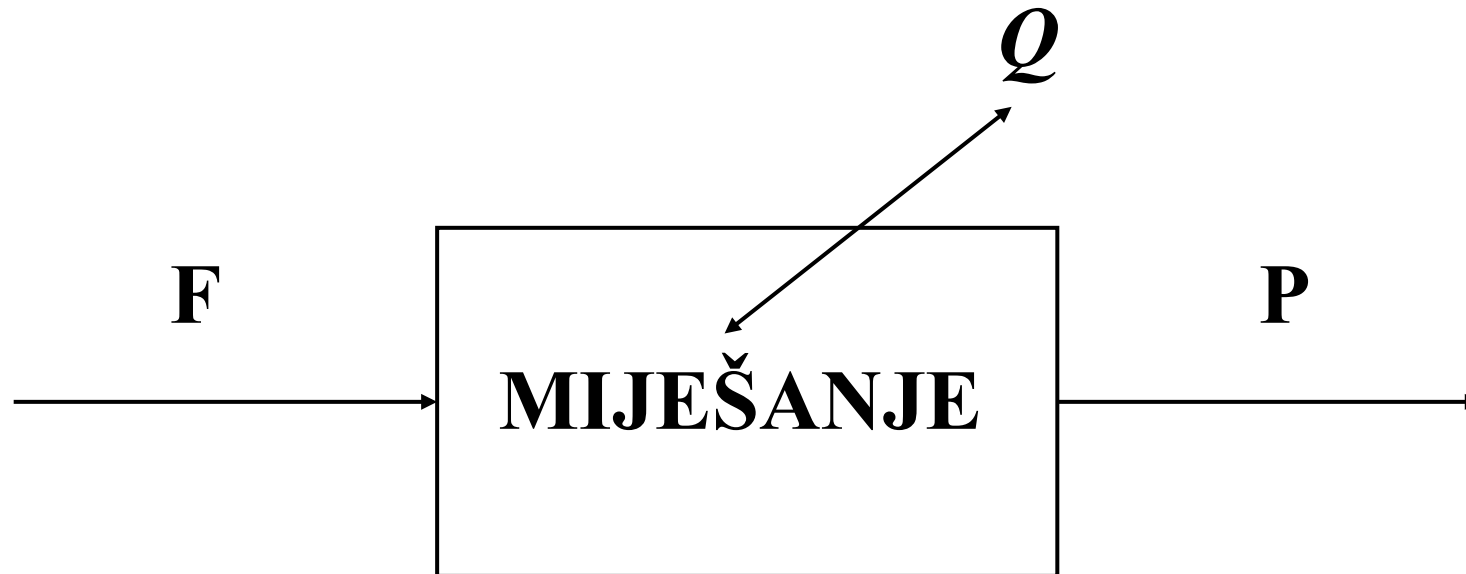
$$Q + W = 0$$

$$Q = -W = 100 \text{ J}$$

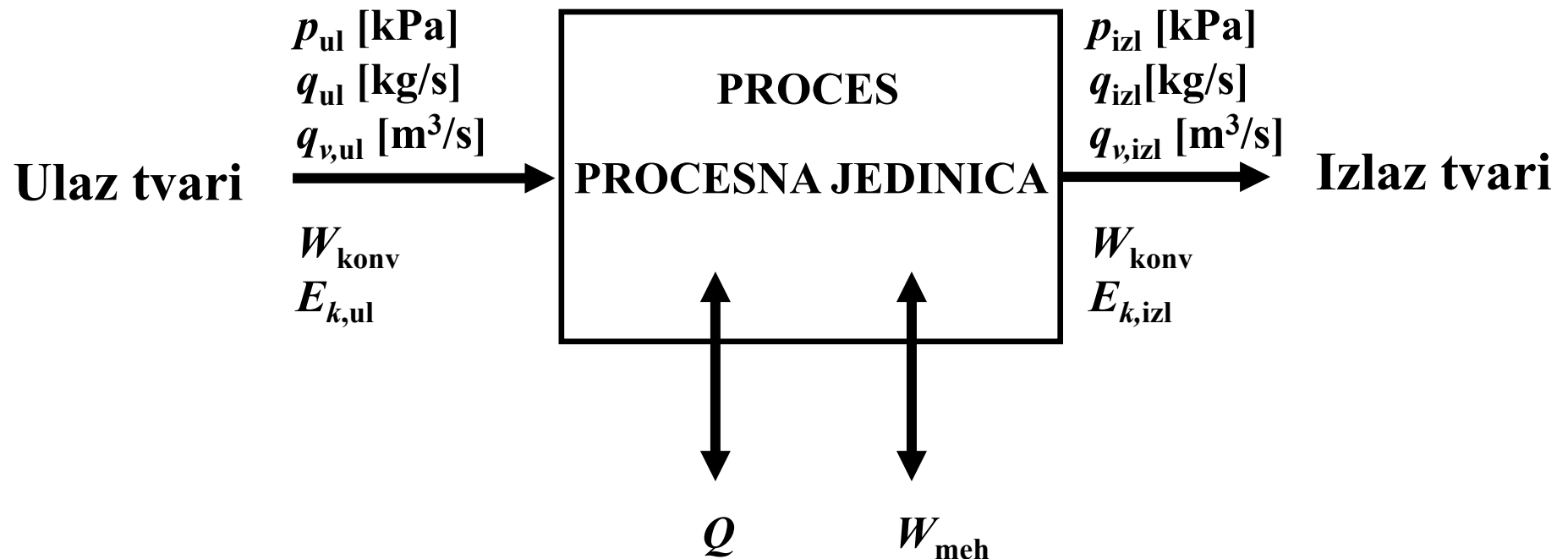
## Primjer 9

---

**Primjer 9:** 5 kg vode pri temperaturi 2 °C, 2 kg leda pri temperaturi 0 °C i 3 kg pare pri 120 °C i tlaku 101 kPa se zajedno miješaju. Proces je adijabatski. Koja je konačna temperatura smjese? Koliko pare kondenzira?



# Bilanca energije za otvoreni sustav



## OPĆA BILANCA ENERGIJE ZA OTVORENI SUSTAV U STACIONARNOM STANJU:

$$\boxed{\text{Ulaz energije}} - \boxed{\text{Izlaz energije}} \pm \boxed{\text{Energija koju sustav izmjeni s okolinom}} = 0$$

# Bilanca energije za otvoreni sustav

---

**"ulaz" predstavlja ukupan prijenos kinetičke, potencijalne i unutarnje energije koji se ostvaruje preko svih ulaznih procesnih tokova a "izlaz" predstavlja ukupan prijenos energije koji se ostvaruje preko izlaznih tokova.**

# Bilanca energije za otvoreni sustav

---

$$\sum_{\text{izlazni tokovi}} E_i - \sum_{\text{ulazni tokovi}} E_i = Q + W$$

$E_i$  - označava ukupnu energiju koju prenosi  $i$ -ti ulazni ili izlazni procesni tok,

# Bilanca energije za otvoreni sustav

---

$$E_i = U_i + E_{k,i} + E_{p,i}$$

$$U_i = q_i \cdot u_i$$

$$E_{k,i} = q_i \cdot \frac{v_i^2}{2} \qquad E_{p,i} = q_i \cdot g \cdot h$$

# Bilanca energije za otvoreni sustav

---

$$E_i = q_i \cdot \left( u_i + \frac{v_i^2}{2} + g \cdot h \right)$$

# Bilanca energije za otvoreni sustav

---

## Konvekcijski i mehanički rad

Ukupni rad koji okolina vrši na otvoreni sustav je zbroj mehaničkog rada koji se unutar sustava vrši na fluid (npr. rotor miješalice) i konvekcijskog rada koji se vrši na fluid pri ulazu tvari minus rad koji se vrši na fluid pri izlazu tvari:

$$W = W_{\text{meh}} + W_{\text{konv}}$$



# Bilanca energije za otvoreni sustav

---

Fluid utječe u proces pri tlaku  $p_{ul}$  volumnim protokom  $q_{v,ul}$ , a istječe pri tlaku  $p_{izl}$  volumnim protokom  $q_{v,izl}$ .

Na fluid koji utječe u proces, vrši rad fluid koji je neposredno iza njega:

$$W_{ul} = p_{ul} \cdot q_{v,ul}$$

Fluid koji istječe iz procesa vrši rad na okolinu:

$$W_{izl} = p_{izl} \cdot q_{v,izl}$$

# Bilanca energije za otvoreni sustav

---

Ukupan konvekcijski rad koji se vrši pri ulazu i izlazu iz procesa (sustava) je:

$$W_{\text{konv}} = p_{\text{ul}} \cdot q_{v,\text{ul}} - p_{\text{izl}} \cdot q_{v,\text{izl}}$$

Ako u proces ulazi i izlazi više procesnih tokova, za svaki od njih se mora pribrojiti produkt ( $p \cdot q_v$ ) sumi koja predstavlja ukupni rad.

# Bilanca energije za otvoreni sustav

---

**Konvekcijski rad je:**

$$W_{\text{konv}} = \sum_{\substack{\text{ulazni} \\ \text{tokovi}}} p_i \cdot q_{v,i} - \sum_{\substack{\text{izlazni} \\ \text{tokovi}}} p_i \cdot q_{v,i}$$

**Volumni protok  $q_{v,i}$  je jednak umnošku masenog protoka  $q$  i specifičnog volumena  $v$ :**

$$q_{v,i} = q_i \cdot v_i$$

**Ukupni rad :**

$$W = W_{\text{meh}} + \sum_{\substack{\text{ulazni} \\ \text{tokovi}}} q_i \cdot p_i \cdot v_i - \sum_{\substack{\text{izlazni} \\ \text{tokovi}}} q_i \cdot p_i \cdot v_i$$

# Bilanca energije za otvoreni sustav

---

$$\sum_{\substack{\text{izlazni} \\ \text{tokovi}}} E_i - \sum_{\substack{\text{ulazni} \\ \text{tokovi}}} E_i = Q + W$$

$$E_i = q_i \cdot \left( u_i + \frac{v_i^2}{2} + g \cdot h \right)$$

$$W = W_{\text{meh}} + \sum_{\substack{\text{ulazni} \\ \text{tokovi}}} q_i \cdot p_i \cdot v_i - \sum_{\substack{\text{izlazni} \\ \text{tokovi}}} q_i \cdot p_i \cdot V_i$$

# Bilanca energije za otvoreni sustav

---

$$\sum_{\text{izlazni tokovi}} q_i \cdot (u_i + p_i \cdot v_i + v_i^2 / 2 + g \cdot h) -$$

$$\sum_{\text{ulazni tokovi}} q_i \cdot (u_i + p_i \cdot v_i + v_i^2 / 2 + g \cdot h) =$$

$$Q + W_{\text{meh}}$$

# Bilanca energije za otvoreni sustav

---

$$h_i = u_i + p_i \cdot v_i$$

$$\sum_{\text{izlazni tokovi}} q_i \cdot (h_i + v_i^2 / 2 + g \cdot h) -$$

$$\sum_{\text{ulazni tokovi}} q_i \cdot (h_i + v_i^2 / 2 + g \cdot h) =$$

$$Q + W_{\text{meh}}$$

# Bilanca energije za otvoreni sustav

---

$$\sum_{\substack{\text{izlazni} \\ \text{tokovi}}} q_i \cdot h_i - \sum_{\substack{\text{ulazni} \\ \text{tokovi}}} q_i \cdot h_i = \Delta H$$

$$\sum_{\substack{\text{izlazni} \\ \text{tokovi}}} q_i \cdot v_i^2 / 2 - \sum_{\substack{\text{ulazni} \\ \text{tokovi}}} q_j \cdot v_i^2 / 2 = \Delta E_k$$

$$\sum_{\substack{\text{izlazni} \\ \text{tokovi}}} q_i \cdot g \cdot h - \sum_{\substack{\text{ulazni} \\ \text{tokovi}}} q_i \cdot g \cdot h = \Delta E_p$$

$$\Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p = Q + W_{\text{meh}}$$

# BILANCA ENERGIJE

---

## Bilanca energije za zatvoreni sustav

$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q + W$$

## Bilanca energije za otvoreni sustav

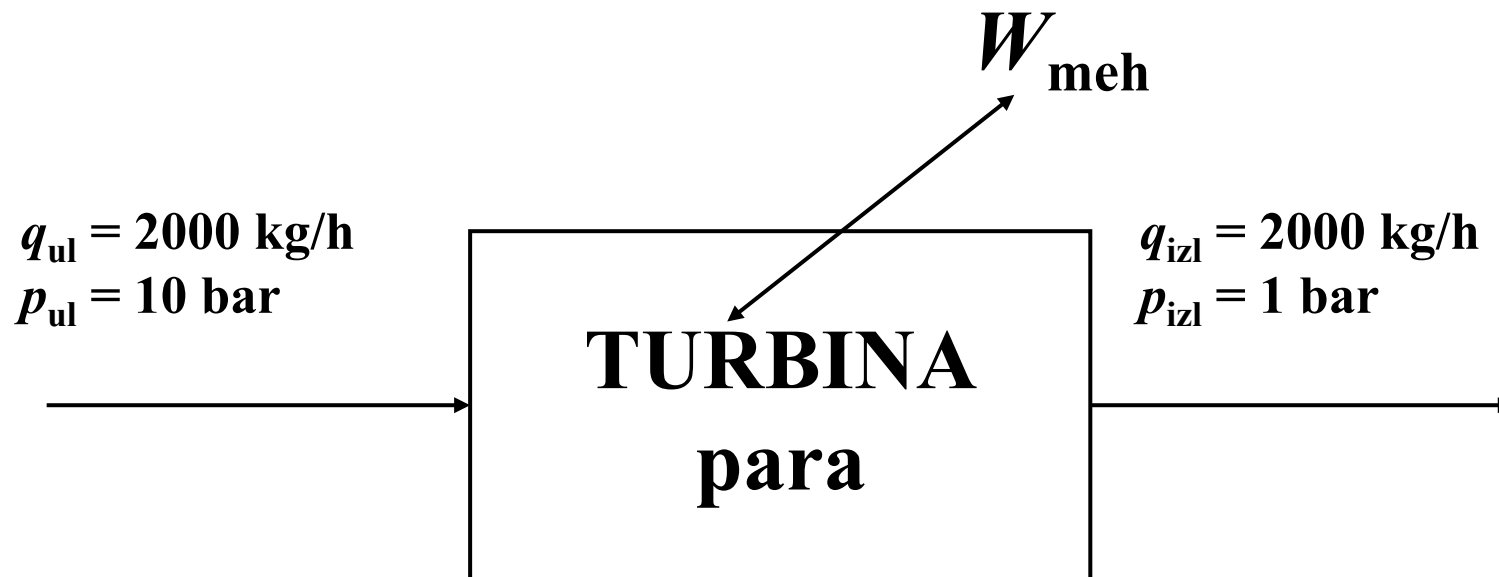
$$\Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p = Q + W$$



## 7. Domaća zadaća

---

a) Zasićena para koja ima tlak 10 bara, uvodi se u turbinu masenim protokom  $q = 2000$  kg/h. Turbina radi adijabatski, a izlazni tok je zasićena para koja ima tlak 1 bar. Treba izračunati rad turbine u kilovatima (kW) zanemarujući promjene kinetičke i potencijalne energije.



## 7. Domaća zadaća

---

b) Zrak pri tlaku 100 kPa i temperaturi 255 K (specifična entalpija zraka koja se nalazi u termodinamičkim tablicama za zrak je pri tim uvjetima  $h = 489$  kJ/kg) se komprimira na tlak 1000 kPa i temperaturu 278 K (specifična entalpija zraka je pri tim uvjetima  $h = 509$  kJ/kg). Brzina zraka na izlazu iz kompresora je  $v = 60$  m/s. Koja je snaga potrebna za rad kompresora u kW, ako se kompresor puni s 100 kg/h zraka?

