

Energija in energijske bilance

Kemijsko inženirstvo 2



Energijske bilance uporabljamo, da odgovorimo...

- Koliko moči potrebujemo, da črpamo $1250 \text{ m}^3/\text{h}$ vode iz posode za shranjevanje do procesne enote?
- Koliko energije potrebujemo, da pretvorimo 2000 kg vode pri 30° C v paro pri 180° C ?
- Kako hitro moramo dovajati paro v destilacijsko kolono za ločitev 2000 mol/h napajalne zmesi?
- Koliko premoga moramo sežgati, da bomo vsak dan proizvedli dovolj energije za tvorbo dovolj pare za pogon turbin, ki proizvajajo elektriko za mesto s 500000 prebivalci?



Oblike energije

- *Kinetična energija* je posledica translacijskega gibanja sistema kot celote glede na neko referenčno točko (površina Zemlje) ali kroženje sistema okrog določene osi.
- *Potencialna energija* je posledica položaja sistema v potencialnem polju (npr. težnostno, elektromagnetno...).
- *Notranja energija* je vsa energija, ki jo sistem ima in ne predstavlja kinetične ali potencialne energije.
 - Ta energija je posledica gibanja molekul glede na težišče sistema, krožnega in vibracijskega gibanja in elektromagnetnih interakcij med molekulami ter gibanja in vzajemnega delovanja atomskih in pod-atomskih gradnikov molekul.



Prvi zakon termodinamike

- Prvi zakon termodinamike pravi, da *energije ne moremo ustvariti ali izničiti.*
- Ta zakonitost je podlaga vsem energijskim bilancam in jo prav tako imenujemo *zakon o ohranitvi energije.*



Prenos energije v zaprtem sistemu

- Predstavljajmo si *zaprt sistem* (npr. tak, ki nima *prenosa* snovi preko njegovih meja); energija se lahko prenaša kot toplota ali delo. Toplota in delo sta nosilca prenosa.
- *Toplota* je energija, ki se prenaša kot posledica temperaturnega gradienta med sistemom in okolico. Smer toka je vedno od višje proti nižji temperaturi.
- *Delo* je prenos energije, ki je posledica katere koli druge gonilne sile poleg temperaturnega gradienta. Delo je pozitivno, če ga vrši sistem na okolico.
 - Npr., če se plin v posodi razširi in potisne bat proti sili, ki to zavira, plin opravi delo na batu in energija se prenese kot delo s plina na okolico.



Kinetična in potencialna energija

- Kinetična energija (E_k) $E_k = \frac{1}{2}mu^2$ $\dot{E}_k = \frac{1}{2}\dot{m}u^2$
 - kjer pike predstavljajo vrednost na enoto časa (tok)
 - $u \equiv$ hitrost
 - $m \equiv$ masa
$$\Delta\dot{E}_k = \frac{1}{2}\dot{m}(u_2^2 - u_1^2)$$
- Potencialna energija (E_p) $E_p = mgz$ $\dot{E}_p = \dot{m}gz$
 - $g \equiv$ težnostna konstanta
 - $z \equiv$ višina nad referenčno točko
$$\Delta\dot{E}_p = \dot{m}g(z_2 - z_1)$$



Energijske bilance za zaprt sistem

- Integralno energijsko bilanco lahko izpeljemo za zaprt sistem med dvema trenutkoma v času.
- Energijo lahko prenesemo preko meja sistema, če je le-ta zaprt, mase pa ne moremo.

$$\left[\begin{array}{c} \text{končna energija} \\ \text{sistema} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{zacetna energija} \\ \text{sistema} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{celokupni prenos} \\ \text{enegije v sistem} \end{array} \right]$$

$$(U_f + E_{kf} + E_{pf}) - (U_i + E_{ki} + E_{pi}) = Q - W$$

$$(U_f - U_i) + (E_{kf} - E_{ki}) + (E_{pf} - E_{pi}) = Q - W$$

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



Energijske bilance za zaprt sistem

- Ko uporabljamo energijske bilance za zaprt sistem:
 - Če v zaprtem sistemu ni temperaturnih sprememb, faznih sprememb ali kemijske reakcije ter če so spremembe tlaka manj kot nekaj atmosfer, potem velja $\Delta U = 0$.
 - Če sistem ne pospešuje, potem velja $\Delta E_k = 0$.
 - Če se sistem ne dviga ali pada, potem velja $\Delta E_p = 0$.
 - Če imata sistem in okolica enako temperaturo ali pa je sistem popolnoma izoliran, potem velja $Q = 0$.
 - Če na mejah sistema ni premičnih delov, električnih tokov ali sevanja, potem velja $W = 0$.

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

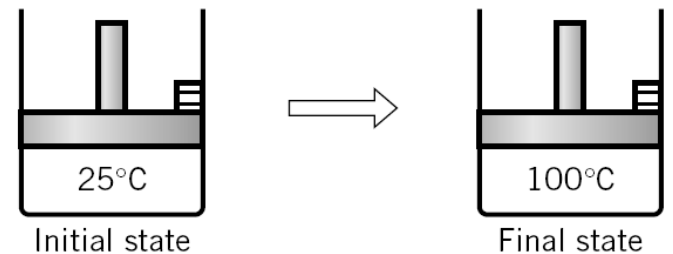


Energijske bilance za zaprt sistem

- Vzemimo plin pri 25 ° C v posodi s pomičnim batom.
- Posodo postavimo v vrelo vodo, bat imamo zaskočen na mestu, na plin pa prenesemo 2.00 kcal toplote, s čemer dvignemo temperaturo na 100 ° C, kar prav tako poviša tlak.

$$\Delta U + \cancel{\Delta E_k} + \cancel{\Delta E_p} = Q - \cancel{W}$$

$\Delta U = Q$
 $= ?$



$\Delta E_k = 0$ sistem je stacionaren
 $\Delta E_p = 0$ ni navpicnega premika
 $W = 0$ ni gibljevih delov



Energijske bilance za zaprt sistem

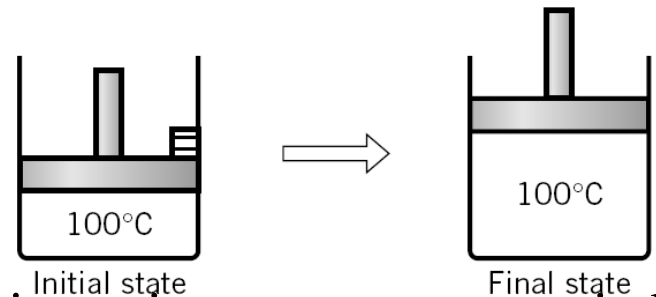
- Bat sprostimo in plin opravi 100 J dela pri pomikanju bata v nov ravnotežni položaj.

$$\cancel{\Delta U} + \cancel{\Delta E_k} + \cancel{\Delta E_p} = Q - W$$

$$0 = Q - W$$

$$0 = Q - 100 \text{ J}$$

$$Q = ?$$



$\Delta E_k = 0$ sistem je stacionaren v začetnem in končnem stanju

$\Delta E_p = 0$ predpostavimo kot zanemarljivo

$\Delta U = 0$ T idealnega plina se ne spremeni



Energijske bilance za odprt sistem v stacionarnem stanju

- *V odprtem sistemu se snov premika preko meja.*
- Delo se opravlja na sistem z vstopanjem snovi, delo na okolico pa za z izstopanjem snovi.
- Delo je v tem primeru hitrost prenosa energije in mora biti tako opredeljeno tudi v energijski bilanci.



Delo – pretok in gred

- *Delo na gred* je hitrost dela, ki ga opravlja tekočina v procesu na gibljiv del znotraj sistema (kot na primer vrtljiv del črpalke).
- *Delo pretoka* je hitrost dela, ki ga opravlja tekočina na iztoku iz sistema z odšteto hitrostjo dela, ki ga opravlja tekočina na vstopu v sistem.
- Celokupna hitrost dela, ki ga opravlja odprt sistem na okolico, je vsota dela na gred in dela pretoka:

$$\dot{W} = \dot{W}_s + \dot{W}_{fl}$$



Delo pretoka



- V sistemu z enim vstopom in izstopom tekočina s tlakom P_{in} vstopa z volumskim pretokom \dot{V}_{in} in izstopa pri P_{out} ter z \dot{V}_{out} .
- Na vstopajočo tekočino delo vrši tekočina pred njo s hitrostjo $W_{in} = P_{in} \dot{V}_{in}$; na izstopajočo tekočino delo vrši tekočina pred njo z $W_{out} = P_{out} \dot{V}_{out}$.
- Celokupna hitrost opravljenega dela je tako $W_{fl} = P_{out} \dot{V}_{out} - P_{in} \dot{V}_{in}$.
- Za več tokov velja $W_{fl} = \Sigma(P_{out} \dot{V}_{out}) - \Sigma(P_{in} \dot{V}_{in})$



Specifične količine

- *Specifična količina* je intenzivna količina, dobljena pri deljenju z ekstenzivno značilnostjo snovi v procesu.
- Specifične količine označujemo s strešico (^) nad zapisom spremenljivke.
 - Celokupna notranja energija mase snovi

$$U = m \times \hat{U}$$

- Hitrost prenosa notranje energije z masnim pretokom

$$\dot{U} = \dot{m} \times \hat{U}$$



Specifična entalpija

- Specifična entalpija je količina, ki nastopa v energijskih bilancah za odprt sistem (izračunajmo primer za standardne pogoje):

$$\hat{H} = \hat{U} + p\hat{V}$$

$$\hat{U} = 3800 \frac{J}{mol}$$

$$\hat{H} = ?$$



Energijske bilance za odprt sistem v stacionarnem stanju

- vstop = izstop (reakcij ni; stacionarno obratovanje)
- vstop
 - celotna E_k , E_p in U , ki vstopa v sistem s procesnimi tokovi
 - celotna energija, ki je v sistem prenesena kot toplota
- izstop
 - celotna E_k , E_p in U , ki izstopa iz sistema s procesnimi tokovi
 - celotna energija, ki je iz sistema prenesena kot delo

$$\dot{Q} + \sum_{vstop} \dot{E}_j = \sum_{izstop} \dot{E}_j + \dot{W} \rightarrow \sum_{izstop} \dot{E}_j - \sum_{vstop} \dot{E}_j = \dot{Q} - \dot{W}$$



Energijske bilance za odprt sistem v stacionarnem stanju

- Določitev vsote energij:

$$\dot{E}_j = \dot{U}_j + \dot{E}_{kj} + \dot{E}_{pj}$$

$$\dot{E}_j = \dot{m}_j \hat{U}_j + \dot{m}_j u_j^2 / 2 + \dot{m}_j g z_j$$

$$\dot{E}_j = \dot{m}_j \left(\hat{U}_j + u_j^2 / 2 + g z_j \right) \quad \sum_{izstop} \dot{E}_j - \sum_{vstop} \dot{E}_j = \dot{Q} - \dot{W}$$



Energijske bilance za odprt sistem v stacionarnem stanju

- Določitev člena za delo:

$$\dot{W} = \dot{W}_{fl} + \dot{W}_s$$

$$\dot{W} = \dot{W}_s + \sum_{izstop} \dot{m}_j P_j \hat{V}_j - \sum_{vstop} \dot{m}_j P_j \hat{V}_j$$

$$\dot{E}_j = \dot{m}_j \left(\hat{U}_j + u_j^2 / 2 + gz_j \right) \quad \sum_{izstop} \dot{E}_j - \sum_{vstop} \dot{E}_j = \dot{Q} - \dot{W}$$



Energijske bilance za odprt sistem v stacionarnem stanju

- Vstavimo:

$$\dot{W} = \dot{W}_s + \sum_{\text{izstop}} \dot{m}_j P_j \hat{V}_j - \sum_{\text{vstop}} \dot{m}_j P_j \hat{V}_j$$

$$\dot{E}_j = \dot{m}_j \left(\hat{U}_j + u_j^2 / 2 + gz_j \right) \quad \sum_{\text{izstop}} \dot{E}_j - \sum_{\text{vstop}} \dot{E}_j = \dot{Q} - \dot{W}$$



Energijske bilance za odprt sistem v stacionarnem stanju

- Združimo člene, zamenjamo z entalpijami in določimo razlike med vstopnimi in izstopnimi tokovi z Δ :

$$\sum_{izstop} \dot{m}_j \left(\hat{U}_j + \frac{u_j^2}{2} + gz_j \right) - \sum_{vstop} \dot{m}_j \left(\hat{U}_j + \frac{u_j^2}{2} + gz_j \right) = \dot{Q} - \left(\dot{W}_s + \sum_{izstop} \dot{m}_j P_j \hat{V}_j - \sum_{vstop} \dot{m}_j P_j \hat{V}_j \right)$$

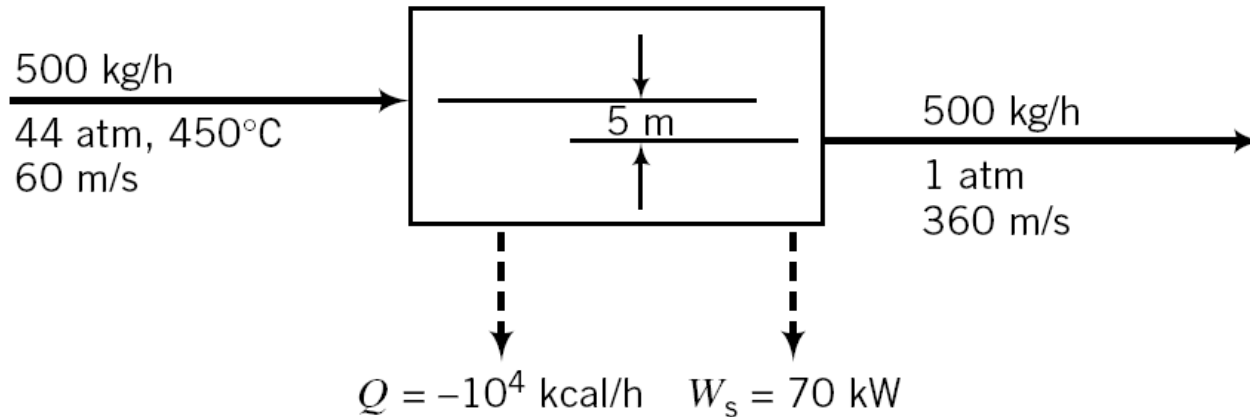
$$\sum_{izstop} \dot{m}_j \left(\hat{U}_j + P_j \hat{V}_j + \frac{u_j^2}{2} + gz_j \right) - \sum_{vstop} \dot{m}_j \left(\hat{U}_j + P_j \hat{V}_j + \frac{u_j^2}{2} + gz_j \right) = \dot{Q} - \dot{W}_s$$

$$\sum_{izstop} \dot{m}_j \left(\hat{H}_j + \frac{u_j^2}{2} + gz_j \right) - \sum_{vstop} \dot{m}_j \left(\hat{H}_j + \frac{u_j^2}{2} + gz_j \right) = \dot{Q} - \dot{W}_s$$

$$\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_k + \Delta \dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W}_s$$



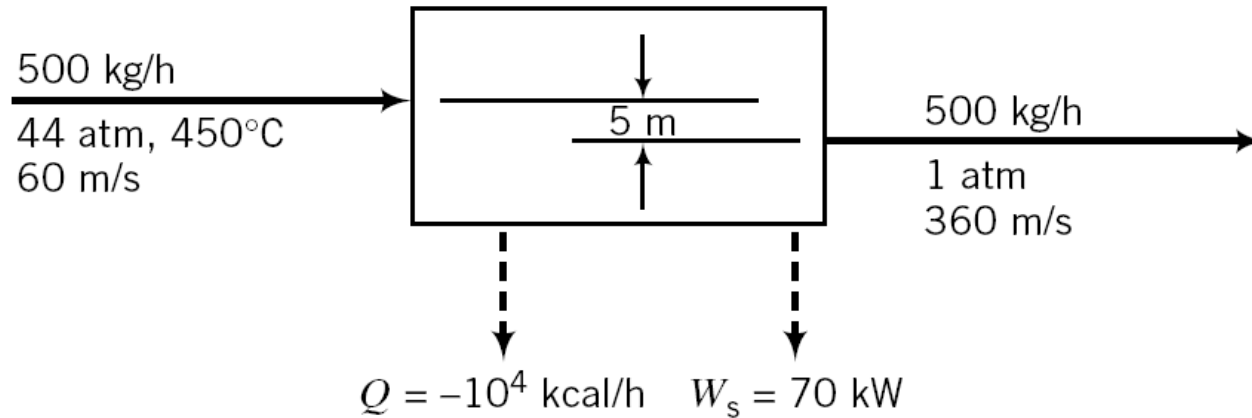
Energijska bilanca za turbino



- 500 kg/h pare poganja turbino. Para vstopa pri 44 atm, 450 ° C in z 60 m/s ter izstopa v točki, 5 m pod vstopov v turbino pri zunanjem zračnem s hitrostjo 360 m/s.
- Turbina zagotavlja 70 kW dela na gred, toplotne izgube pa so ocenjene kot 10000 kcal/h.
- Izračunajte razliko specifičnih entalpij.



Energijska bilanca za turbino



$$\Delta \dot{H} = \dot{Q} - \dot{W}_s - \Delta \dot{E}_k - \Delta \dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W}_s - \frac{\dot{m}}{2} (u_2^2 - u_1^2) - \dot{m}g(z_2 - z_1)$$

$$\Delta \dot{H} = -10^4 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}} - 70 \text{ kW} - \frac{1}{2} \left(500 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right) \left[\left(360 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 - \left(60 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \right] - \left(500 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (-5 \text{ m})$$

$$\Delta \dot{H} = ?$$

pozornost je potrebna pri pretvorbi enot



Referenčna stanja in lastnosti stanj

- Absolutnih vrednosti specifične notranje energije ali specifične entalpije ni moč poznati.
- Spremembo (Δ) specifične lastnosti pa lahko določimo.
- Da bi lahko ovrednotili razliko med različnimi stanji, je prikladno določiti *referenčno stanje* in nanizati spremembe glede na slednjega za vrsto drugih stanj.
- *Lastnosti stanja* so odvisne zgolj od stanja sistema, ne pa od tega, kako je bilo to stanje doseženo.

<i>CO</i>	$T(^{\circ}\text{C})$	$\hat{H}(\text{J/mol})$
<i>1 atm</i>	0	0
	100	2919
	500	15,060



Tabelarični podatki za entalpijo

- Katero referenčno stanje smo uporabili za pridobitev teh vrednosti?
- Izračunajte $\Delta\hat{H}$ in $\Delta\hat{U}$ za prehod nasičenih hlapov metil klorida od 50°F do 0°F . Katera predpostavka je nujna?

State	$T(^{\circ}\text{F})$	$P(\text{psia})$	$\hat{V}(\text{ft}^3/\text{lb}_m)$	$\hat{H}(\text{Btu}/\text{lb}_m)$
Liquid	-40	6.878	0.01553	0.000
Vapor	0	18.90	4.969	196.23
Vapor	50	51.99	1.920	202.28



Tabelarični podatki za entalpijo

$$\Delta \hat{H} = \hat{H}(0^\circ F) - \hat{H}(50^\circ F) = 196,23 - 202,28 = ?$$

predpostavimo, da je entalpija neodvisna od tlaka

$$\Delta \hat{U} = \Delta \hat{H} - \Delta(P\hat{V}) = \Delta \hat{H} - (P_2\hat{V}_2 - P_1\hat{V}_1)$$

$$\Delta \hat{U} = ?$$

$$\text{lb} = 0,454 \text{ kg}$$

$$\text{psi} = 6,89 \text{ kPa}$$

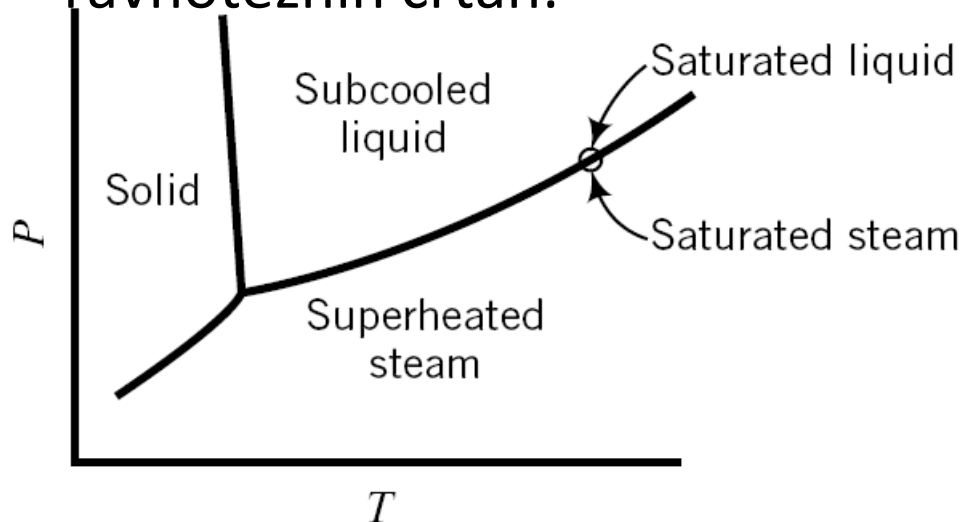
$$\text{BTU} = 1,06 \text{ kJ}$$

State	$T(^{\circ}F)$	$P(\text{psia})$	$\hat{V}(\text{ft}^3/\text{lb}_m)$	$\hat{H}(\text{Btu}/\text{lb}_m)$
Liquid	-40	6.878	0.01553	0.000
Vapor	0	18.90	4.969	196.23
Vapor	50	51.99	1.920	202.28



Parne tabele

- *Parne tabele* navajajo specifične količine \hat{H} , \hat{U} in \hat{V} za H_2O .
- Obstajajo ločena tabele za nasičeno zmes kapljevina/para in pregreto paro.
- Tabela za nasičene zmesi podaja specifične lastnosti na ravnotežnih črtah.



- Tabele za pregreto paro so namenjene specifičnim lastnostim v enofaznem območju.



<u>Absolute pressure</u> (kPa, kN/m ²)	<u>Temperature</u> (°C)	<u>Specific Volume</u> (m ³ /kg)	<u>Density</u> - ρ - (kg/m ³)	<u>Specific Enthalpy of</u>			<u>Specific Entropy of Steam</u> - s - (kJ/kgK)
				<u>Liquid</u> - h_l - (kJ/kg)	<u>Evaporation</u> - h_e - (kJ/kg)	<u>Steam</u> - h_s - (kJ/kg)	
0.8	3.8	160	0.00626	15.8	2493	2509	9.058
2.0	17.5	67.0	0.0149	73.5	2460	2534	8.725
5.0	32.9	28.2	0.0354	137.8	2424	2562	8.396
10.0	45.8	14.7	0.0682	191.8	2393	2585	8.151
20.0	60.1	7.65	0.131	251.5	2358	2610	7.909
28	67.5	5.58	0.179	282.7	2340	2623	7.793
35	72.7	4.53	0.221	304.3	2327	2632	7.717
45	78.7	3.58	0.279	329.6	2312	2642	7.631
55	83.7	2.96	0.338	350.6	2299	2650	7.562
65	88.0	2.53	0.395	368.6	2288	2657	7.506
75	91.8	2.22	0.450	384.5	2279	2663	7.457
85	95.2	1.97	0.507	398.6	2270	2668	7.415
95	98.2	1.78	0.563	411.5	2262	2673	7.377
100	99.6	1.69	0.590	417.5	2258	2675	7.360
101.33¹⁾	100	1.67	0.598	419.1	2257	2676	7.355
110	102.3	1.55	0.646	428.8	2251	2680	7.328
130	107.1	1.33	0.755	449.2	2238	2687	7.271
150	111.4	1.16	0.863	467.1	2226	2698	7.223
170	115.2	1.03	0.970	483.2	2216	2699	7.181
190	118.6	0.929	1.08	497.8	2206	2704	7.144
220	123.3	0.810	1.23	517.6	2193	2711	7.095
260	128.7	0.693	1.44	540.9	2177	2718	7.039
280	131.2	0.646	1.55	551.4	2170	2722	7.014
320	135.8	0.570	1.75	570.9	2157	2728	6.969
360	139.9	0.510	1.96	588.5	2144	2733	6.930
400	143.1	0.462	2.16	604.7	2133	2738	6.894
440	147.1	0.423	2.36	619.6	2122	2742	6.862
480	150.3	0.389	2.57	633.5	2112	2746	6.833
500	151.8	0.375	2.67	640.1	2107	2748	6.819
550	155.5	0.342	2.92	655.8	2096	2752	6.787
600	158.8	0.315	3.175	670.4	2085	2756	6.758
650	162.0	0.292	3.425	684.1	2075	2759	6.730



Uporaba parnih tabel

- Določite p^* , \hat{H} , \hat{U} in \hat{V} nasičene pare pri $133,5^\circ \text{ C}$.

Tabela na prejšnji prosojnici pri $133,5^\circ \text{ C}$

$$p^* = ?$$

$$\hat{U} = ?$$

$$\hat{H} = ?$$

$$\hat{V} = ?$$



SATURATED STEAM - TEMPERATURE TABLE (Continued)

T °C	P bar	Spec. vol. m ³ =kg		Int. Ener. kJ/kg		Enthalpy kJ/kg		Entropy kJ=(kg°K)	
		Sat. liq. v _f X1000	Sat. vap. v _g	Sat. liq. u _f	Sat. vap. u _g	Sat. liq. h _f	Sat. vap. h _g	Sat. liq. s _f	Sat. vap. s _g
85	0.5783	1.033	2.828	355.8	2488	355.9	2652	1.134	7.544
90	0.7013	1.036	2.361	376.8	2494	376.9	2660	1.193	7.479
95	0.8455	1.039	1.982	397.9	2501	398.0	2668	1.250	7.416
100	1.013	1.044	1.673	418.9	2507	419.0	2676	1.307	7.355
110	1.433	1.052	1.21	461.1	2518	461.3	2691	1.418	7.239
120	1.985	1.060	0.892	503.5	2529	503.7	2706	1.528	7.130
130	2.701	1.069	0.669	546.0	2540	546.3	2720	1.634	7.027
140	3.613	1.080	0.509	588.7	2550	589.1	2734	1.739	6.930
150	4.758	1.091	0.393	631.7	2559	632.2	2746	1.842	6.838
160	6.178	1.102	0.307	674.9	2568	675.5	2758	1.943	6.750
170	7.916	1.114	0.243	718.3	2576	719.2	2769	2.042	6.666
180	10.02	1.127	0.194	762.1	2584	763.2	2778	2.140	6.586
190	12.54	1.141	0.157	806.2	2589	807.6	2786	2.236	6.508
200	15.54	1.156	0.127	850.6	2596	852.4	2793	2.331	6.432
210	19.06	1.172	0.104	895.5	2600	897.8	2798	2.425	6.358
220	23.18	1.190	0.086	940.8	2603	943.6	2802	2.518	6.286
230	27.95	1.209	0.072	986.7	2603	990.1	2804	2.610	6.215
240	33.44	1.229	0.06	1033	2603	1037.3	2804	2.702	6.144
250	39.73	1.251	0.05	1080	2603	1			
260	46.88	1.275	0.042	1128	2600	1			
270	54.98	1.302	0.036	1177	2592	1			
280	64.11	1.332	0.03	1227	2587	1			
290	74.36	1.365	0.026	1279	2573	1			
300	85.81	1.403	0.022	1332	2560	1			

SUPERHEATED STEAM

v in m³=kg, u in kJ/kg, h in kJ/kg, s in kJ=(kg°K)

P= 10 bar

P= 15 bar

T	P= 10 bar					P= 15 bar			
	v	u	h	s	v	u	h	s	
200	0.2059	2622	2828	6.694	0.1325	2598	2797	6.455	
240	0.2275	2693	2920	6.882	0.1482	2677	2899	6.663	
280	0.248	2760	3008	7.046	0.1627	2749	2993	6.838	
320	0.2678	2826	3094	7.196	0.1765	2817	3082	6.994	
360	0.2873	2892	3179	7.335	0.1899	2884	3169	7.136	
400	0.3066	2957	3264	7.465	0.203	2951	3256	7.269	
450	0.3304	3040	3371	7.618	0.2192	3035	3364	7.424	
500	0.3541	3124	3478	7.762	0.2352	3120	3473	7.570	
550	0.3776	3210	3587	7.899	0.251	3206	3583	7.707	
600	0.4011	3297	3698	8.029	0.2668	3294	3694	7.838	
650	0.4245	3385	3810	8.153	0.2825	3383	3806	7.964	
700	0.4478	3475	3923	8.273	0.2981	3473	3920	8.084	

Uporaba parnih tabel

- Pokažite, da je voda pri $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ in 10 bar pregreta para ter določite njene specifične lastnosti z ozirom na trojno točko vode.
- Poleg tega določite temperaturo rosišča, T_{dp} .

Tabela na prejšnji prosojnici pri $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ in 10.0 bar

$$\hat{U} = ?$$

$$\hat{H} = ?$$

$$\hat{V} = ?$$

$$T_{dp} = ?$$



Energijska bilanca za parno turbino

- Paro pri 10 bar absolutnega tlaka s 190°C pregretja napajamo na turbino s 2000 kg/h. Obratovanje turbine je *adiabatno* in *izstopni tok* je nasičena para pri 1 bar. Izračunajte dobljeno delo turbine v kW.

$$\Delta\dot{H} + \cancel{\Delta\dot{E}_k} + \cancel{\Delta\dot{E}_p} = \cancel{\dot{Q}} - \dot{W}_s \quad (\text{zanemarite } \Delta E_k \text{ in } \Delta E_p).$$

$$-\Delta\dot{H} = \dot{W}_s$$

$$\dot{m}(\hat{H}_v - \hat{H}_{iz}) = \dot{W}_s$$

$$2000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} (\hat{H}_v - \hat{H}_{iz}) \left(\frac{1\text{h}}{3600\text{s}} \right) = ?$$

$$\dot{W}_s = ? \quad \text{na okolico}$$

iz parnih tabel

$$\hat{H}_v(10 \text{ bar, pregreta}) = ?$$

$$\hat{H}_{iz}(1 \text{ bar, nasicena}) = ?$$



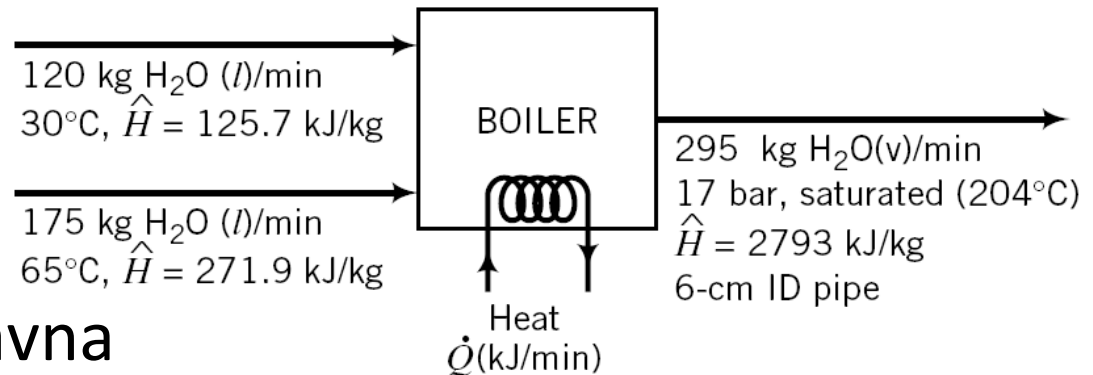
Postopki energijskih bilanc

- Ustrezno narišite in označite tokovno shemo.
- Vključite vse potrebne podatke za določitev specifične entalpije vsake snovi v toku, vključujoč vse znane vrednosti T in P.
- Prikažite “agregatna stanja” snovi v procesu (t.j. faz), kadar to ni očitno ($\text{H}_2\text{O}_{(s)}$, $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$, $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$, ...).



Energijska bilanca; proces z eno komponento

- Določite \dot{Q}
- Opazimo, da je snovna bilanca enostavna (izstopni tok je dobljen kot vsota vstopnih tokov)
- Določite specifične entalpije za vse tokove.
 - za sisteme s pretežno vodo se lahko uporabljajo parne tabele
 - predpostavka neodvisnosti entalpij vode (kot kapljevine) od P
 - podatek o nasičenem izstopnem toku prav tako priskrbi T
- Poenostavite energijsko bilanco

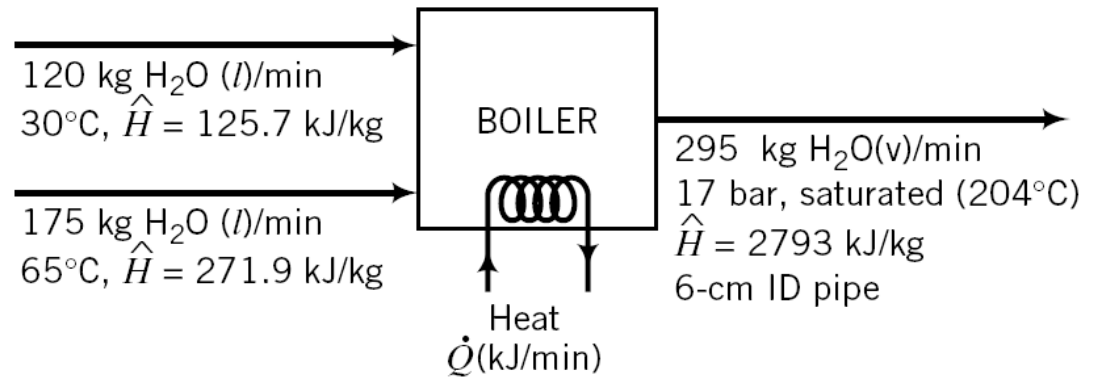


$$\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_k + \Delta \dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W}_s$$



Energijska bilanca; proces z eno komponento

- določite spremembe entalpij



$$\Delta \dot{H} = \sum_{iz} \dot{m}_i \hat{H}_i - \sum_v \dot{m}_i \hat{H}_i$$

$$\Delta \dot{H} = 295 \frac{kg}{min} \left(2793 \frac{kJ}{kg} \right) - \left[120 \frac{kg}{min} \left(125.7 \frac{kJ}{kg} \right) + 175 \frac{kg}{min} \left(271.9 \frac{kJ}{kg} \right) \right]$$

$$\Delta \dot{H} = ?$$

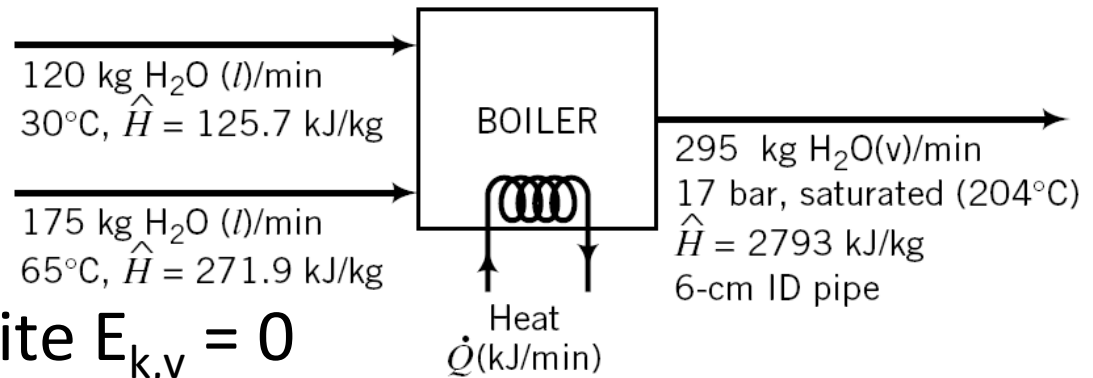
$$\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_k + \cancel{\Delta \dot{E}_p} = \dot{Q} - \cancel{\dot{W}_s}$$

\downarrow
 \downarrow
 0
 0



Energijska bilanca; proces z eno komponento

- določite spremembo kinetične energije – predpostavite $E_{k,v} = 0$



$$\Delta E_k \approx \frac{\dot{m}u^2}{2} = \frac{\dot{m}}{2} \left[\frac{\dot{V}}{A} \right]^2 = \frac{\dot{m}}{2} \left[\frac{\dot{m}\hat{V}}{\pi R^2} \right]^2$$

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \left(295 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \right) \left[\frac{\left(295 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) \hat{V}}{\pi (3 \text{ cm})^2 \left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right)^2} \right]^2 \frac{N}{\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2} \frac{\text{kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}}$$

$$\Delta E_k = ?$$

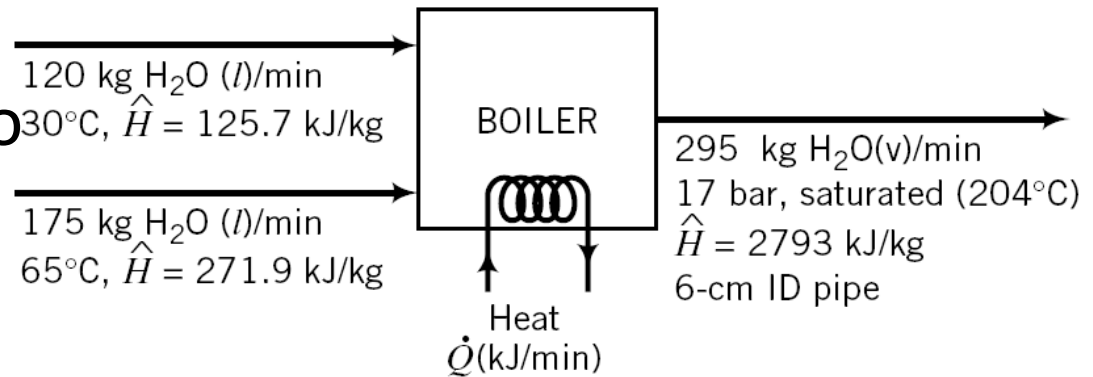
$$\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_k + \cancel{\Delta \dot{E}_p} = \dot{Q} - \cancel{\dot{W}_s}$$

$$\Delta \dot{H} = ? (\text{od prej})$$



Energijska bilanca; proces z eno komponento

- vstavite v energijsko bilanco



$$\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_k = \dot{Q}$$

$$\dot{Q} = ?$$

Opazimo sorazmerno večji prispevek entalpijskega člena v primerjavi z energijskim prispevkom.

Pogosto je varno zanemariti prispevka E_k in E_p kot prvo predpostavko.

$$\Delta E_k = ? (\text{od prej})$$

$$\Delta \dot{H} = ? (\text{od prej})$$

$$\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_k + \cancel{\Delta \dot{E}_p} = \dot{Q} - \cancel{\dot{W}_s}$$

0 0

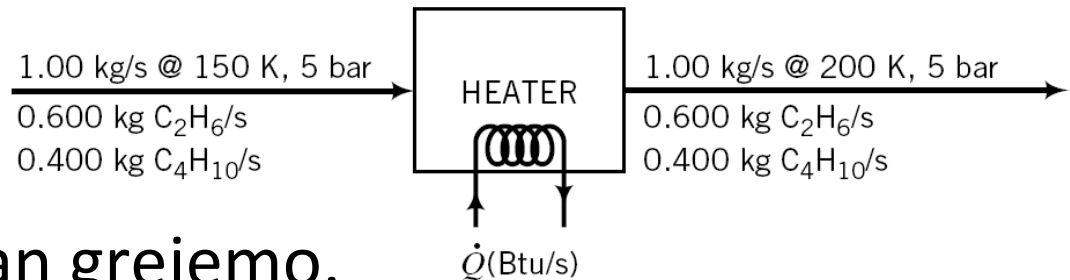


Energijska bilanca; proces z dvema komponentama

- Kapljevino, ki vsebuje etan in *n*-butan grejemo.

Določite toplotni tok.

- Za snovno bilanco ni potrebe (1 tok noter in ven).



$$\Delta \dot{H} + \cancel{\Delta \dot{E}_k} + \cancel{\Delta \dot{E}_p} = \dot{Q} - \cancel{\dot{W}_s}$$

0 0 0

$$\dot{Q} = \Delta \dot{H} = \sum_{iz} \dot{m}_i \hat{H}_i - \sum_v \dot{m}_i \hat{H}_i$$



Energijska bilanca; proces z dvema komponentama

- Entalpije pridobimo

Iz Perry's Chemical Engineers'

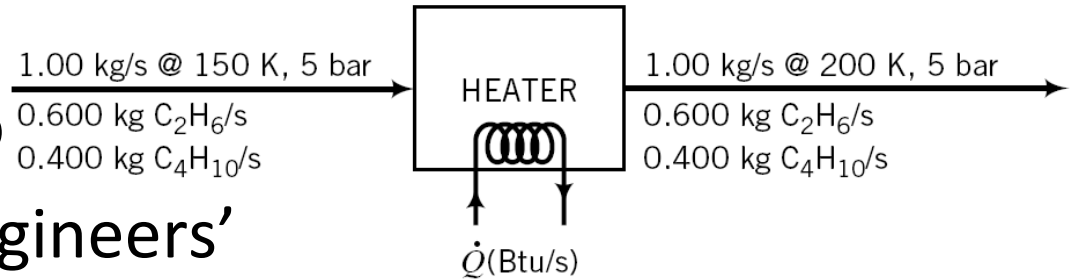
Handbook.

$$\dot{Q} = \Delta \dot{H} = \sum_{iz} \dot{m}_i \hat{H}_i - \sum_v \dot{m}_i \hat{H}_i$$

$$\hat{H}_{C_2H_6, iz} = 434.5 \frac{kJ}{kg}; \hat{H}_{C_4H_{10}, iz} = 130.2 \frac{kJ}{kg};$$

$$\hat{H}_{C_2H_6, v} = 314.3 \frac{kJ}{kg}; \hat{H}_{C_4H_{10}, v} = 30.0 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q} = ? \Rightarrow \frac{\dot{Q}}{1.0 \text{ kg/s}} = \hat{H}_{povp}$$



Hkratne snovne/energijske bilance

- Nasičeno paro z 1 atm spuščamo s turbine z 1150 kg/h.

Turbine discharge
1150 kg H₂O(v)/h

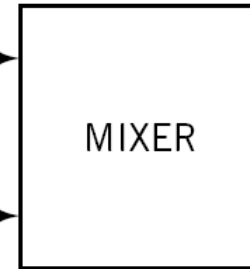
1 atm, saturated (100°C)

$\hat{H} = 2676$ kJ/kg

\dot{m}_1 [kg H₂O(v)/h]

400°C, 1 atm

$\hat{H} = 3278$ kJ/kg



- Pregreto paro s 300 ° C pa potrebujemo na izstopu. Da bi jo proizvedli, izpust s turbine mešamo s pregreto paro s 400 ° C, dostopno iz drugega vira. Mešalnik obratuje adiabatno.

- Izračunajte pripravljeno količino pregrete pare s 300 ° C in zahtevan volumski pretok pare s 400 ° C.
- Specifične entalpije lahko pridobimo iz parnih tabel (kot prikazuje tokovna shema).



Hkratne snovne/energijske bilance

- 2 neznanki in 1 neodvisna bilanca.

Turbine discharge
1150 kg H₂O(v)/h

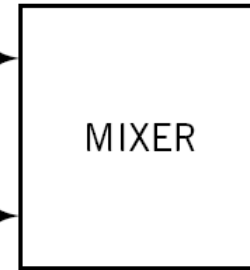
1 atm, saturated (100°C)

$\hat{H} = 2676$ kJ/kg

\dot{m}_1 [kg H₂O(v)/h]

400°C, 1 atm

$\hat{H} = 3278$ kJ/kg



\dot{m}_2 [kg H₂O(v)/h]

300°C, 1 atm

$\hat{H} = 3074$ kJ/kg

- Snovne/energijske bilance je treba tako rešiti hkrati.

$$\Delta \dot{H} + \cancel{\Delta \dot{E}_k} + \cancel{\Delta \dot{E}_p} = \cancel{\dot{Q}} - \cancel{\dot{W}_s}$$

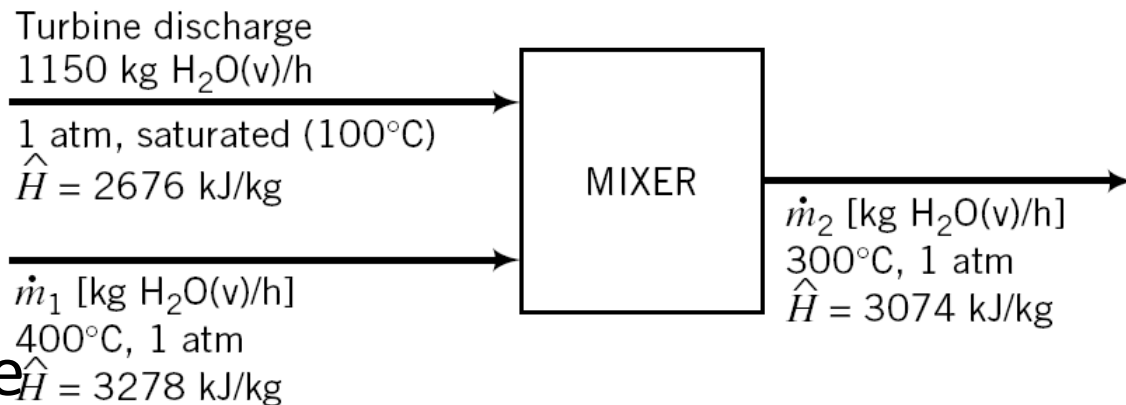
$$1150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + \dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\Delta \dot{H} = 0 \Rightarrow \sum_{iz} \dot{m}_i \hat{H}_i = \sum_v \dot{m}_i \hat{H}_i$$



Hkratne snovne/energijske bilance

- 2 neznanki in 1 neodvisna bilanca.



- Snovne/energijske bilance je treba tako rešiti hkrati.

$$\sum_{iz} \dot{m}_i \hat{H}_i = \sum_v \dot{m}_i \hat{H}_i \qquad 1150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + \dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\dot{m}_2 \left(3074 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 1150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \left(2676 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + \dot{m}_1 \left(3278 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$\dot{m}_1 = ?, \quad \dot{m}_2 = ?$$



Hkratne snovne/energijske bilance

- 2 neznanki in 1 neodvisna bilanca.
- Specifična prostornina pare s 400°C in 1 atm je potreben podatek.

SUPERHEATED STEAM								
v in m ³ -kg, u in kJ/kg, h in kJ/kg, s in kJ=(kg ^o K)								
P= 0.7 bar					P= 1 bar			
T	v	u	h	s	v	u	h	s
100	2.434	2510	2680	7.534	1.695	2506	2676	7.361
120	2.571	2540	2720	7.637	1.793	2537	2717	7.467
160	2.841	2599	2798	7.828	1.984	2598	2796	7.660
200	3.108	2659	2877	8.001	2.172	2658	2875	7.834
240	3.374	2719	2956	8.161	2.359	2719	2954	7.995
280	3.639	2780	3035	8.310	2.545	2780	3034	8.144
320	3.904	2842	3115	8.450	2.730	2842	3115	8.285
360	4.170	2905	3196	8.583	2.917	2904	3196	8.417
400	4.434	2968	3279	8.708	3.102	2968	3278	8.543
450	4.764	3049	3383	8.858	3.334	3049	3382	8.693
500	5.094	3132	3488	8.999	3.565	3132	3488	8.834
550	5.423	3213	3593	9.129	3.796	3216	3596	8.969
600	5.753	3298	3701	9.257	4.027	3302	3705	9.097

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_1 \hat{V}_1 = ?$$

- V odsotnosti podatkov moramo za približek specifičnih prostornin uporabiti enačbo stanja za idealen plin.

$$\dot{m}_1 = ?, \quad \dot{m}_2 = ?$$



Bilance mehanske energije

- Do te točke so bili v žarišču toplotni tokovi in spremembe notranje energije ter entalpije (členi za kinetično in potencialno energijo ter delo so bili pogosto zanemarljivi).
 - Značilno za kemijske postopke, ki se vodijo v reaktorjih, destilacijskih kolonah, toplotnih izmenjevalcih in uparjalnikih
- Drugi pomemben razred operacij pa teče ob odsotnosti toplotnih tokov in so tako pglavitni členi za kinetično in potencialno energijo ter delo .
 - Tok tekočin skozi ventile in črpalke med posodami, rezervoarji, shranjevalniki in procesnimi enotami
- Razčlenitev energijskih tokov v takih sistemih pa prikladno izvedemo z *bilanco mehanske energije*.



Bilance mehanske energije

- Združimo energijsko bilanco za odprt sistem z izrazom za *zakon o ohranitvi gibalne količine* da dobimo:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} + g\Delta z + \left(\Delta \hat{U} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} \right) = -\frac{\dot{W}_s}{\dot{m}}$$

- kjer je ρ gostota tekočine



Bilance mehanske energije

- V številnih primerih se v/iz okolice prenese zgolj majhna količina toplote, od vstopa do izstopa pa je sprememba temperature zanemarljiva.

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} + g\Delta z + \left(\Delta \hat{U} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} \right) = -\frac{\dot{W}_s}{\dot{m}}$$

- V teh primerih ostane od člena v oklepaju samo pozitivni prispevek, imenovan *izgube zaradi trenja*.

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} + g\Delta z + \hat{F} = -\frac{\dot{W}_s}{\dot{m}}$$



Bilance mehanske energije

- To je *bilanca mehanske energije*, veljavna za stacionaren tok nestisljive tekočine.

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} + g\Delta z + \hat{F} = -\frac{\dot{W}_s}{\dot{m}}$$

- Obstajajo načini za ocenitev izgub zaradi trenja pri toku skozi cevi, zaslonke, šobe, komolce, itd.
- Za postopke brez trenja, kjer se ne vrši nobeno delo na gred, se bilanca mehanske energije okrajša na:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} + g\Delta z = 0 \quad \text{Bernoullijeva enačba}$$



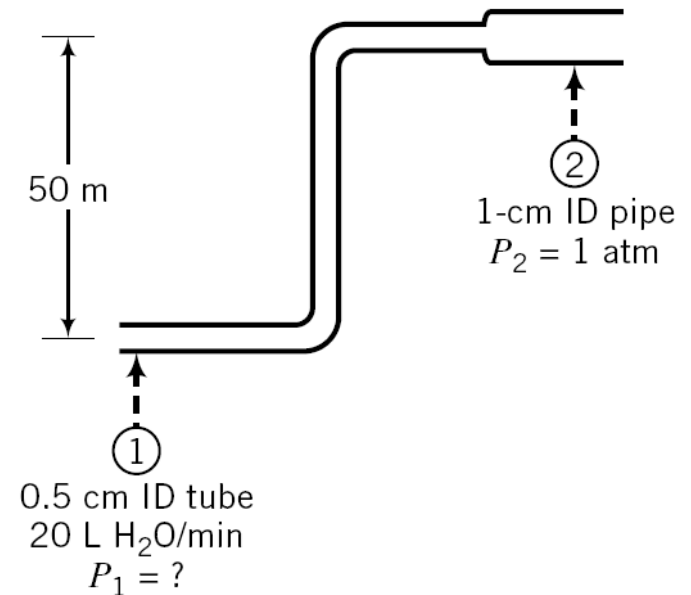
Uporaba Bernoullijeve enačbe

- Voda teče skozi prikazani sistem. Ocenite tlak, potreben v točki 1, ob zanemarljivih izgubah zaradi trenja.

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} + g\Delta z = 0$$

$$u_1 = \frac{V}{A} = \frac{20 \frac{L}{\min} \left(\frac{\min}{60s} \right) \left(\frac{m^3}{10^3 L} \right)}{\pi \left(\frac{0.5cm}{2} \right)^2 \left(\frac{m}{100cm} \right)^2} = ?$$

$$u_2 = ?$$



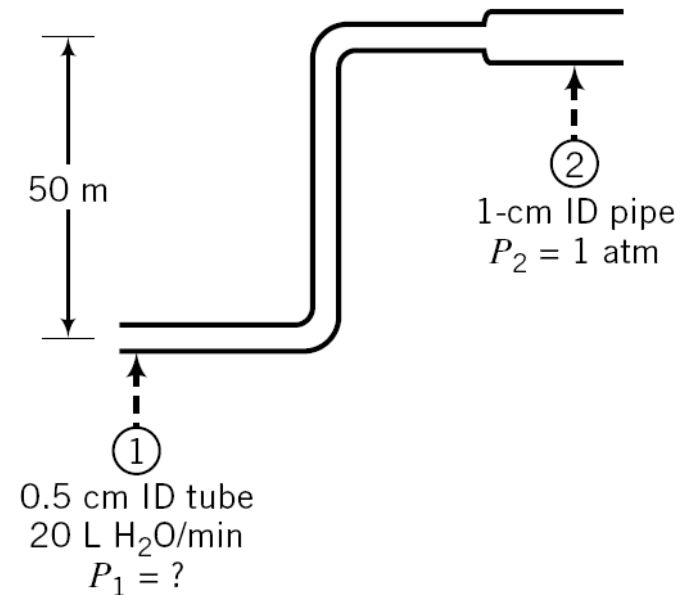
Uporaba Bernoullijeve enačbe

- Voda teče skozi prikazani sistem. Ocenite tlak, potreben v točki 1, ob zanemarljivih izgubah zaradi trenja.

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} + g\Delta z = 0$$

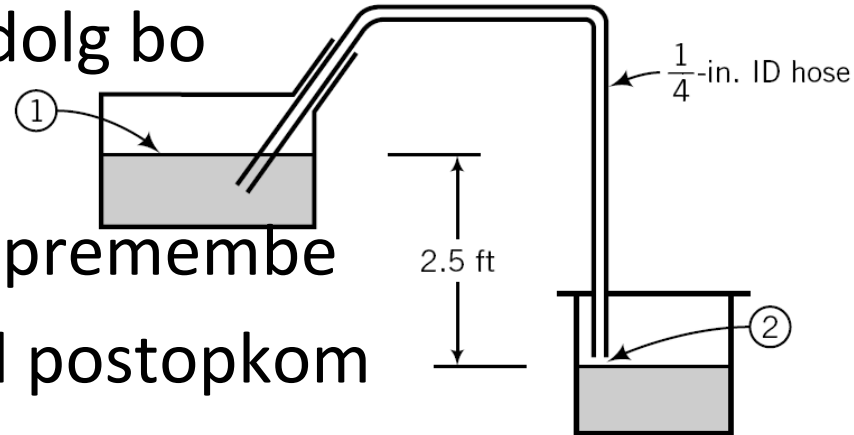
$$\frac{P_1 - 1 \text{ atm}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = -\frac{(u_1)^2 - (u_2)^2}{2} - \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)(0 - 50 \text{ m})$$

$$P_1 = ?$$



Pretakanje

• Bencin pretakamo iz posode. Izgube zaradi trenja so $0.8 \text{ ft}\cdot\text{lb}_f/\text{lb}$ ($\text{lb}_f = \text{lb} \times g$). Kako dolg bo trajalo, da pretočimo 5.00 gal ($\text{gal} = 4,55 \text{ L}$), če zanemarimo spremembe v nivoju tekočine v posodi med postopkom in predpostavimo, da sta tako točka 1 kot 2 pri 1 atm .



$$t = \frac{V}{\dot{V}}$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} + g\Delta z + \hat{F} = -\frac{\dot{W}}{\dot{m}}$$

- ① 1 atm , $z = 2,5 \text{ ft}$, $u = 0 \text{ ft/s}$
- ② 1 atm , $z = 0,0 \text{ ft}$, $u = ?$



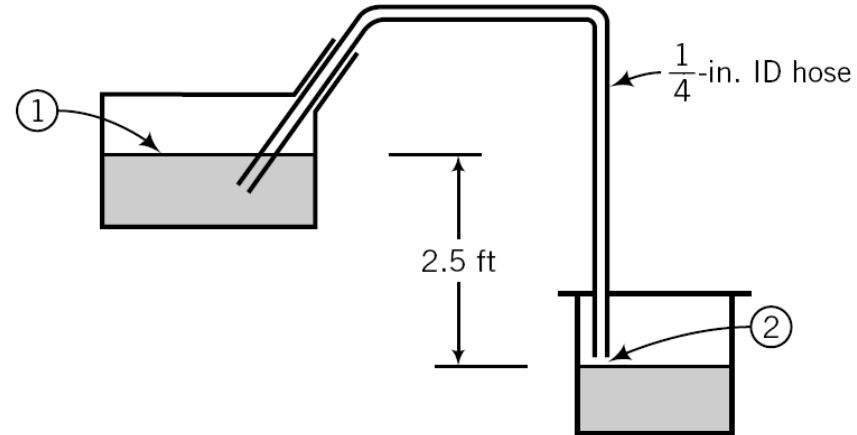
Pretakanje

$$\left[\frac{1}{2} (u_2^2) - g(2.5 \text{ ft}) \right] + \left(0.8 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}_f}{\text{lb}} \right) = 0 \Rightarrow u_2 = ?$$

$$\dot{V} = u_2 A$$

$$\dot{V} = ?$$

$$t = \frac{V}{\dot{V}} = \left(\frac{5 \text{ gal}}{\dot{V}} \right) = ?$$



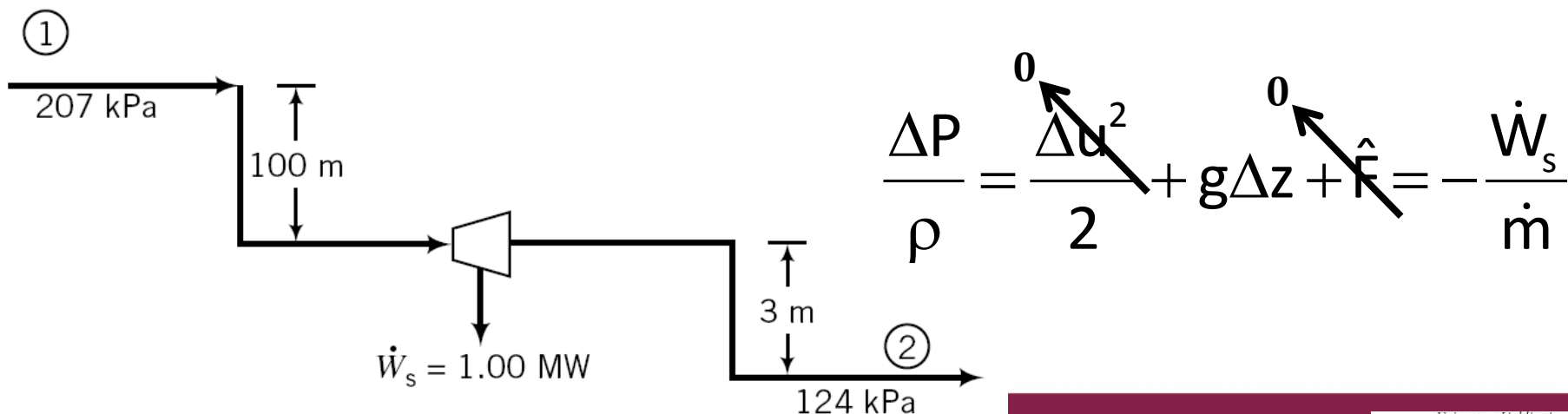
$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} + g\Delta z + \hat{F} = -\frac{\dot{W}}{\dot{m}}$$

- ① 1 atm, $z = 2,5 \text{ ft}$, $u = 0 \text{ ft/s}$
- ② 1 atm, $z = 0,0 \text{ ft}$, $u = ?$



Hidravlično pridobivanje energije

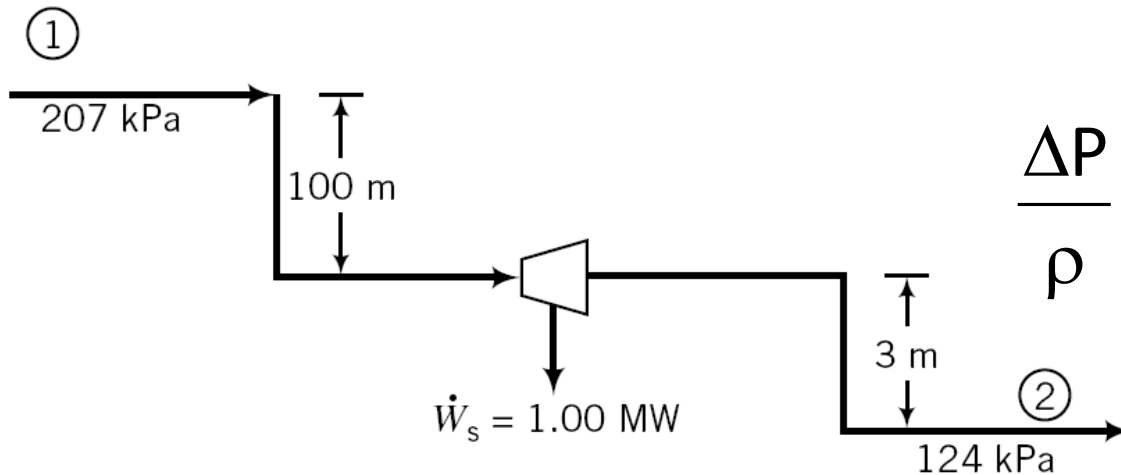
- Voda teče iz dvignjene posode skozi omrežje do turbine na nižjem nivoju in ven iz turbine skozi podobno omrežje. V ① je tlak 207 kPa, v ② pa 124 kPa. Kolikšen mora biti pretok vode, če je moč turbine 1.00 MW?



Hidravlično pridobivanje energije

$$\dot{m} = \frac{-\dot{W}_s}{\Delta P/\rho + g\Delta z} = \frac{-1.00 \text{ MW}}{(124 - 207) \text{ kPa} / \left(10^3 \text{ kg/m}^3\right) + 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (0 - 103 \text{ m})}$$

$$\dot{m} = \frac{-1.00 \text{ MW} \left(\frac{10^6 \text{ N}\cdot\text{m}}{\text{MW}\cdot\text{s}}\right)}{(-83) \text{ kPa} \left(\frac{10^3 \text{ N/m}^2}{\text{kPa}}\right) \left(\frac{\text{m}^3}{10^3 \text{ kg}}\right) + 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (-103 \text{ m})} = ?$$



$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{\Delta u^2}{2} + g\Delta z + \hat{F} = -\frac{\dot{W}_s}{\dot{m}}$$

