

Tehnička termodinamika

Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama

1. Izgaranjem u kotlu oslobađa se toplota 40000 kJ/kg pri temperaturi $1800 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a pritom dobivena vodena para ima temperaturu $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperatura okolice je $17 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Kolika je eksergija topline produkata izgaranja i pare u kJ/kg ? Koliki je gubitak eksergije (kJ/kg) pri prijelazu topline s plinova izgaranja na vodu?
2. Koliki bi se mogao dobiti maksimalan rad u kJ/kg u zatvorenom sustavu ako se zrak stanja 20 bar i temperature $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dovodi povratljivim procesom u ravnotežu s okolicom stanja $17 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i 1 bar ? Razlika entropije je $s_1 - s_0 = -0,09 \text{ kJ/kgK}$.
3. U komori izgaranja plinsko-turbinskog postrojenja zagrijava se 1100 kg/h zraka pri tlaku 7 bar . Početna je temperatura $520 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a konačna $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Koliko iznose promjena entropije i promjena unutrašnje kaloričke energije? Kolika se toplinska snaga dovodi u komoru izgaranja? Pretpostavite da ispušni plinovi imaju svojstva zraka i računajte s $c_p = 1005 \text{ J/kgK}$ i $c_v = 718 \text{ J/kgK}$. Koliko je kg/h mazuta potrebno osigurati za ovaj proces? Ogrjevna moć mazuta je $q_m = 40683 \text{ kJ/kg}$ i radi se o zatvorenom plinskom procesu.
4. Vrela voda ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) masenog protoka 150 t/h isparava i pregrijava se u kotlu do $540 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pri tlaku 80 bar . Koliko iznose: dovedena toplota, promjena unutrašnje kaloričke energije, te jedinični rad promjene volumena i tehnički rad? U donjem postupku rješavanja navedeni su slijedno podaci očitani iz parnih : $h_2 = 3498 \text{ kJ/kg}$, $v_2 = 0,04450 \text{ m}^3/\text{kg}$, $h_1 = 1317 \text{ kJ/kg}$, $v_1 = 0,001385 \text{ m}^3/\text{kg}$.
5. Kondenzacijska termoelektrana daje električnu snagu 285 MW_e . Kotao proizvodi pregrijanu paru početnog stanja 150 bar i $560 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Tlak u kondenzatoru je $0,04 \text{ bar}$. Para u turbini ekspandira do linije zasićenja, kvaliteta pare $x = 1$. Koliko t/h pare proizvodi kotao? Koliko se snage troši za pogon pojne pumpe? Koliko iznosi termički stupanj djelovanja? Poznati su još: entalpija na izlazu iz kotla 3477 kJ/kg , entalpija na izlazu iz turbine 2554 kJ/kg , entalpija na izlazu iz kondenzatora $121,4 \text{ kJ/kg}$, specifični volumen na izlazu iz kondenzatora $v_3 = 0,001004 \text{ m}^3/\text{kg}$.
6. Termoelektrana s kružnim procesom s vodom / vodenom parom (prema T -s dijagramu na slici) projektirana je za pogon između tlakova 10 kPa i 2 MPa i najvećom temperaturom u kružnom procesu od $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Koliko iznosi stupanj energetskog djelovanja ovog kružnog procesa? Iz parnih tablica očitani su: $h_1 = 191,8 \text{ kJ/kg}$, $v_1 = 0,001010 \text{ m}^3/\text{kg}$, $h_3 = 3248 \text{ kJ/kg}$, $s_3 = 7,129 \text{ kJ/kgK}$, $h_4 =$
7. U kotlu (generator pare, 1) ulazi voda pod tlakom 10 MPa i temperature $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($h_1 = 134,2 \text{ kJ/kg}$, $v_1 = 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$) kroz cijev promjera 30 mm pri protoku 3 l/s . Para napušta generator pare (2) s tlakom 9 MPa i $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($h_2 = 3118 \text{ kJ/kg}$, $v_2 = 0,02995 \text{ m}^3/\text{kg}$). Odredite toplinsku snagu generatora pare.
8. Pregrijana para ulazi u turbinu s tlakom 15 MPa , $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($h_1 = 3583 \text{ kJ/kg}$) i masenim protokom 100 kg/s . U srednjoj sekciji turbine odvodi se 20 kg/s pare pri 2 MPa i $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($h_2 = 3137 \text{ kJ/kg}$), a ostatak pare ekspandira do stanja kvalitete pare 95% na izlazu iz turbine (75 kPa , $h_3 = 2548 \text{ kJ/kg}$). Odredite snagu turbine ako nema prijelaza topline (adijabatski proces) i nema promjene kinetičke energije.
9. U kondenzator termoelektrane ulazi mokra para kvalitete 90% s masenim protokom 5 kg/s te predaje toplinu pri konstantnom tlaku 15 kPa rashladnoj vodi iz rijeke koja je na srednjoj temperaturi $17 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Izračunajte toplinsku snagu koja se prenosi na okoliš (rijeku) i brzinu promjene ukupne entropije. Iz parnih tablica poznato je još: $h_1 = 2361 \text{ kJ/kg}$, $s_1 = 7,282 \text{ kJ/kgK}$, $h_2 = 225,9 \text{ kJ/kg}$, $s_2 = 0,7549 \text{ kJ/kgK}$.

10. Srednji godišnji protok rijeke se povećava prema $Q_{sr} = 2(1300 - H)/3$ [visina u m , protok u m^3/s]. Odredite:

- bruto energiju vodotoka,
- snagu pribranske hidroelektrane s branom visine 100 m na 400 m n.v. i stupnjem iskorištenja 90% ,
- snagu derivacijske hidroelektrane sa zahvatom na 400 m n. v., pregradom visine 100 m , postrojenjem na 200 m n. v. i stupnjem iskorištenja 85% , i
- kao pod c), ali se na mjestu zahvata u osnovni vodotok propušta biološki minimum od $50 \text{ m}^3/s$.
- godišnju proizvedenu električnu energiju u elektranama pod b), c) i d) kada bi se raspoloživi protok za proizvodnju električne energije prikazao kao srednji protok dostupan 70% vremena.

Tehnička termodinamika

Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama

1. Izgaranjem u kotlu oslobađa se toplina 40000 kJ/kg pri temperaturi 1800°C , a pritom dobivena vodena para ima temperaturu 600°C . Temperatura okolice je 17°C . Kolika je eksergija topline produkata izgaranja i pare u kJ/kg ? Koliki je gubitak eksergije (kJ/kg) pri prijelazu topline s plinova izgaranja na vodu?

$$q_{dov} = 40000 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{pi} = 1800^\circ\text{C} \rightarrow T_{pi} = 2073,15 \text{ K}$$

$$T_{vp} = 600^\circ\text{C} \rightarrow T_{vp} = 873,15 \text{ K}$$

$$T_{ok} = 17^\circ\text{C} \rightarrow T_{ok} = 290,15 \text{ K}$$

Eksergija toplinske energije je:

$$eks = q \cdot \left(1 - \frac{T_{ok}}{T}\right)$$

$$eks_{pi}, eks_p, ane = ?$$

Primijenjeno za produkte izgaranja:
$$eks_{pi} = q \cdot \left(1 - \frac{T_{ok}}{T}\right) = 40000 \cdot \left(1 - \frac{290,15}{2073,15}\right) = 34402 \text{ kJ/kg}$$

Primijenjeno za vodenu paru:
$$eks_{vp} = q \cdot \left(1 - \frac{T_{ok}}{T}\right) = 40000 \cdot \left(1 - \frac{290,15}{873,15}\right) = 26708 \text{ kJ/kg}$$

Gubici eksergije iznose: $ane = eks_{pi} - eks_{vp} = 34402 - 26708 = 7694 \text{ kJ/kg}$.

2. Koliki bi se mogao dobiti maksimalan rad u kJ/kg u zatvorenom sustavu ako se zrak stanja 20 bar i temperature 350°C dovodi povratljivim procesom u ravnotežu s okolicom stanja 17°C i 1 bar ? Razlika entropije je $s_1 - s_0 = -0,09 \text{ kJ/kgK}$.

$$p_1 = 20 \text{ bar} = 20 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_1 = 350^\circ\text{C} \rightarrow T_1 = 623,15 \text{ K}$$

$$T_{ok} = 17^\circ\text{C} \rightarrow T_{ok} = 290,15 \text{ K}$$

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

$$s_1 - s_0 = -0,09 \text{ kJ/kgK}$$

Maksimalno iskoristivi rad (povratljivi rad) odnosno eksergija jednaka je:

$$w_{max} = w_{pov} = u_1 - u_{ok} + p_{ok} \cdot (v_1 - v_{ok}) - T_{ok} \cdot (s_1 - s_{ok})$$

$$w_{max} = ?$$

Specifični volumeni stanja 1 i stanja okolice su:

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 623,15}{20 \cdot 10^5} = 0,089 \text{ m}^3$$

$$v_{ok} = \frac{R \cdot T_{ok}}{p_{ok}} = \frac{287 \cdot 290,15}{10^5} = 0,833 \text{ m}^3$$

Promjena unutrašnje energije je:

$$u_1 - u_{ok} = c_v \cdot (T_1 - T_{ok}) = 0,718 \cdot (350 - 17) = 0,718 \cdot 333 = 239,1 \text{ kJ/kg}$$

Maksimalno iskoristivi rad tada je:

$$\begin{aligned} w_{max} &= u_1 - u_{ok} + p_{ok} \cdot (v_1 - v_{ok}) - T_{ok} \cdot (s_1 - s_{ok}) = \\ &= 239,1 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^5 \cdot (0,089 - 0,833) - 290,15 \cdot (-0,09 \cdot 10^3) = 190,8 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

3. U komori izgaranja plinsko-turbinskog postrojenja zagrijava se 1100 kg/h zraka pri tlaku 7 bar. Početna je temperatura 520 °C, a konačna 1200 °C. Koliko iznose promjena entropije i promjena unutrašnje kaloričke energije? Kolika se toplinska snaga dovodi u komoru izgaranja? Pretpostavite da ispušni plinovi imaju svojstva zraka i računajte s $c_p = 1005 \text{ J/kgK}$ i $c_v = 718 \text{ J/kgK}$. Koliko je kg/h mazuta potrebno osigurati za ovaj proces? Ogrjevna moć mazuta je $q_m = 40683 \text{ kJ/kg}$ i radi se o zatvorenom plinskom procesu.

$$\dot{m}_z = 1100 \text{ kg/h}$$

$$p_1 = 7 \text{ bar} = 7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$g_1 = 520 \text{ °C} \rightarrow T_1 = 793,15 \text{ K}$$

$$g_2 = 1200 \text{ °C} \rightarrow T_2 = 1473,15 \text{ K}$$

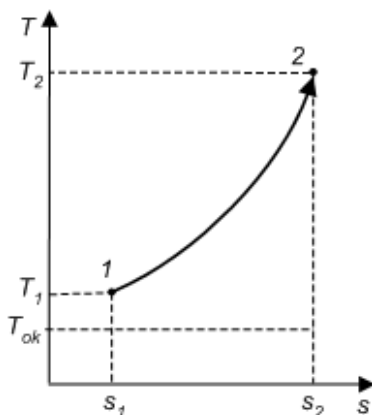
$$g_{ok} = 17 \text{ °C} \rightarrow T_{ok} = 290,15 \text{ K}$$

$$c_p = 1005 \text{ J/kgK}$$

$$c_v = 718 \text{ J/kgK}$$

$$q_m = 40683 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{dov}, \dot{m}_m = ?$$



Promjena entropije je:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 ds = \int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} - \int_{p_1}^{p_2} R \frac{dp}{p} = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$$

U procesu je tlak konstantan te je promjena entropije:

$$\Delta s = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 1005 \cdot \ln \frac{1473,15}{793,15} = 622 \text{ J/kgK}$$

Promjena unutrašnje kaloričke energije je:

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 718 \cdot (1473,15 - 793,15) = 488,2 \text{ kJ/kgK}$$

Jedinična (specifična) dovedena toplina iznosi:

$$q = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 1005 \cdot (1473,15 - 793,15) = 683,4 \text{ kJ/kgK}$$

Toplinska snaga koja se dovodi u komoru izgaranja:

$$\dot{Q} = \dot{m}_z \cdot q = 1100 \cdot 683,4 = 751740 \text{ kJ/h}$$

Maseni protok mazuta koji je potrebno osigurati:

$$\dot{m}_m = \frac{\dot{Q}}{q_m} = \frac{751740}{40683} = 18,48 \text{ kg/h}$$

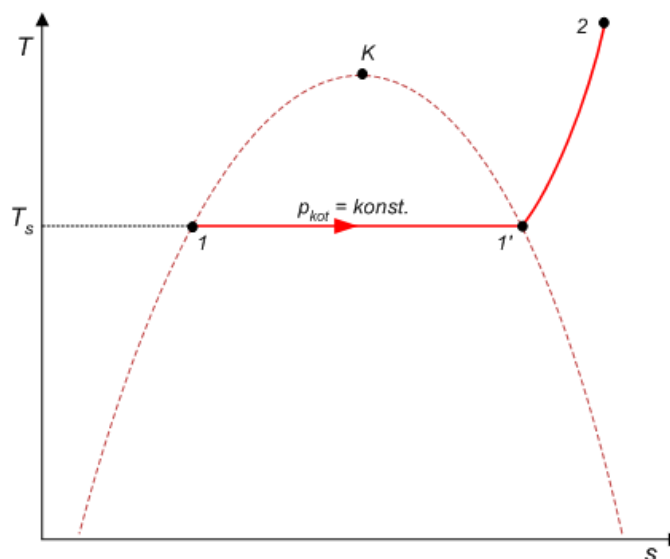
4. Vrela voda ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) masenog protoka 150 t/h isparava i pregrijava se u kotlu do $540 \text{ }^\circ\text{C}$ pri tlaku 80 bar . Koliko iznose: dovedena toplina, promjena unutrašnje kaloričke energije, te jedinični rad promjene volumena i tehnički rad? U donjem postupku rješavanja navedeni su slijedno podaci očitani iz parnih : $h_2 = 3498 \text{ kJ/kg}$, $v_2 = 0,04450 \text{ m}^3/\text{kg}$, $h_1 = 1317 \text{ kJ/kg}$, $v_1 = 0,001385 \text{ m}^3/\text{kg}$.

$$\dot{V}_1 = \dot{m} \cdot \rho_1 = 150 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$p_{\text{kot}} = p_1 = p_{1'} = p_2 = \\ = 80 \text{ bar} = 80 \cdot 10^5 \text{ Pa} = \text{konst.}$$

$$t_2 = 540 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow T_2 = 813,15 \text{ K}$$

$$\Delta u, w = ?$$



✿ DIGRESIJA (Očitavanje veličina iz parnih tablica)

Prikazani proces dovođenja topline u kotlu sastoji se od dva dijela prikazana slikom. Prvi dio, proces $1-1'$, odvija se pri konstantnom tlaku i konstantnoj temperaturi isparivanja u području mokre pare. Mokra para smjesa je vrele tekućine i zasićene pare.

Temperatura isparivanja $T_i = f(p)$, naziva se još temperaturom vrelišta odnosno u anglosaksonskoj literaturi naziva se i temperaturom zasićenja T_s (eng. *saturation*). Drugi dio, proces $1'-2$, proces je pregrijavanja pare pri stalnom (istom) tlaku u području pregrijane pare.

Početno stanje (1) stanje je vrele vode. Još se naziva i stanje zasićene vode, nalazi se na donjoj graničnoj krivulji te je kvaliteta pare x jednaka nuli.

Za tlak 8 MPa iz parnih tablica očitana je temperatura isparivanja od $568,2 \text{ K}$.

Za $p = 8 \text{ MPa}$ i $x = 0$ iz parnih tablica očitani su: $h_1 = 1317 \text{ kJ/kg}$, $v_1 = 0,001385 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Međustanje ($1'$) stanje je suhe pare. Ono se još naziva stanje zasićene pare, nalazi se na gornjoj graničnoj krivulji te je kvaliteta pare x jednaka 1 .

Konačno stanje (2) stanje je pregrijane vodene pare koje se nalazi desno od gornje granične krivulje.

Za $p = 8 \text{ MPa}$ i $T_2 = 813,15 \text{ K}$ očitani su: $h_2 = 3498 \text{ kJ/kg}$, $v_2 = 0,04450 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Dovedena jedinična toplina odnosno toplinska snaga iznose:

$$q_{\text{dov}} = h_2 - h_1 = 3498 - 1317 = 2181 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot q_{\text{dov}} = 150 \cdot 10^3 \cdot 2181 = 327,15 \text{ GJ/h}$$

Promjena unutrašnje kaloričke energije iznosi:

$$\Delta u = h_2 - h_1 - p_{\text{kot}} \cdot (v_2 - v_1) = 2181 \cdot 10^3 - 8 \cdot 10^5 \cdot (0,0445 - 0,001385) = 1836,08 \text{ kJ/kg}$$

Jedinični rad promjene volumena: $w_{\text{pv}} = p \cdot (v_2 - v_1) = 80 \cdot 10^5 \cdot (0,0445 - 0,001385) = 344,92 \text{ kJ/kg}$

Jedinični tehnički rad : $w_{\text{pt}} = v \cdot (p_2 - p_1) = 0 \quad (p = \text{konst.})$

5. Kondenzacijska termoelektrana daje električnu snagu 285 MW_e . Kotao proizvodi pregrijanu paru početnog stanja 150 bar i 560 °C . Tlak u kondenzatoru je $0,04 \text{ bar}$. Para u turbini ekspandira do linije zasićenja, kvaliteta pare $x = 1$. Koliko t/h pare proizvodi kotao? Koliko se snage troši za pogon pojne pumpe? Koliko iznosi termički stupanj djelovanja? Poznati su još: entalpija na izlazu iz kotla 3477 kJ/kg , entalpija na izlazu iz turbine 2554 kJ/kg , entalpija na izlazu iz kondenzatora $121,4 \text{ kJ/kg}$, specifični volumen na izlazu iz kondenzatora $v_3 = 0,001004 \text{ m}^3/\text{kg}$.

$$P = 285 \text{ MW}_e$$

$$p_{\text{kot}} = p_4 = p_1 = 150 \text{ bar} = 15 \text{ MPa}$$

$$g_1 = 560 \text{ °C} \rightarrow T_1 = 833,15 \text{ K}$$

$$p_{\text{kon}} = p_2 = p_3 = 0,04 \text{ bar} = 0,004 \text{ MPa}$$

$$\eta_{t,RKP} = ?$$

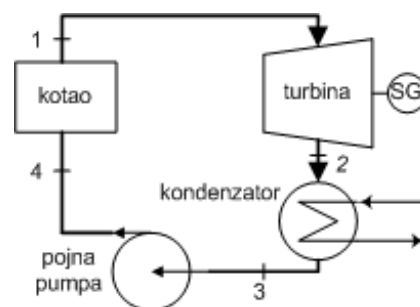
iz parnih tablica:

$$h_1 = 3477 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 2554 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = 121,4 \text{ kJ/kg}$$

$$v_3 = 0,001004 \text{ m}^3/\text{kg}$$



✱ Očitavanje veličina iz parnih tablica

Stanje 1: za $p = 15 \text{ MPa}$ i $T_1 = 833 \text{ K}$ iz parnih tablica očitano je: $h_1 = 3477 \text{ kJ/kg}$.

Stanje 2: za $p = 0,004 \text{ MPa}$ i $x = 1$ iz parnih tablica očitano je: $h_2 = 2554 \text{ kJ/kg}$.

Stanje 3: za $p = 0,004 \text{ MPa}$ i $x = 0$ iz parnih tablica očitano je: $h_3 = 121,4 \text{ kJ/kg}$, $v_3 = 0,001004 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Pod pretpostavkom idealnog procesa pumpanja ($q_{34} = 0$) i nestlačivosti vode ($v_3 = 1 / \rho(T_3) = v_4$) entalpija na izlazu iz pojne pumpe je:

$$h_4 = h_3 + v_3 \cdot (p_1 - p_3) = 121,4 \cdot 10^3 + 0,001004 \cdot (15 \cdot 10^6 - 0,004 \cdot 10^6) = 136,5 \text{ kJ/kg}$$

Jedinični rad turbine je:

$$w_T = h_1 - h_2 = 3477 - 2554 = 923 \text{ kJ/kg}$$

Snaga elektrane približno je jednaka mehaničkoj snazi turbine:

$$P_{el} \approx P_{meh} = \dot{m} \cdot w_T \rightarrow \dot{m} = \frac{P}{w_T} = \frac{285 \cdot 10^6}{923 \cdot 10^3} = 308,8 \text{ kg/s} = 1111,6 \text{ t/h}$$

Toplina koja se dovodi u kotlu je:

$$q_{dov} = h_1 - h_4 = 3477 - 136,5 = 3310,5 \text{ kJ/kg}$$

Toplina koja se odvodi u kondenzatoru je:

$$q_{odv} = h_3 - h_2 = 121,4 - 2554 = -2432,6 \text{ kJ/kg}$$

Utrošeni jedinični rad pojne pumpe je:

$$w_p = v_3 \cdot (p_3 - p_1) = 0,001004 \cdot (0,004 \cdot 10^6 - 15 \cdot 10^6) = -15,1 \text{ kJ/kg}$$

Snaga pumpanja je:

$$|P_p| = \dot{m}_p \cdot |w_p| = 308,8 \cdot 15,1 \cdot 10^3 = 4,66 \text{ MW}$$

Termički stupanj djelovanja Rankineovog kružnog procesa tada iznosi:

$$\eta_{t,RKP} = \frac{w_T - |w_p|}{q_{dov}} = \frac{923,0 - 15,1}{3310,5} = 0,27$$

6. Termoelektrana s kružnim procesom s vodom / vodenom parom (prema T - s dijagramu na slici) projektirana je za pogon između tlakova 10 kPa i 2 MPa i najvećom temperaturom u kružnom procesu od 400 °C. Koliko iznosi stupanj energetskog djelovanja ovog kružnog procesa? Iz parnih tablica očitani su: $h_1 = 191,8 \text{ kJ/kg}$, $v_1 = 0,001010 \text{ m}^3/\text{kg}$, $h_3 = 3248 \text{ kJ/kg}$, $s_3 = 7,129 \text{ kJ/kgK}$, $h_4 = 2259 \text{ kJ/kg}$.

$$\vartheta_{\max, RKP} = \vartheta_3 = 400 \text{ °C} \rightarrow T_3 = 673,15 \text{ K}$$

$$p_{\min, RKP} = p_4 = p_1 = 10 \text{ kPa} = 0,01 \text{ MPa}$$

$$p_{\max, RKP} = p_2 = p_3 = 2 \text{ MPa}$$

iz parnih tablica:

$$h_1 = 191,8 \text{ kJ/kg}$$

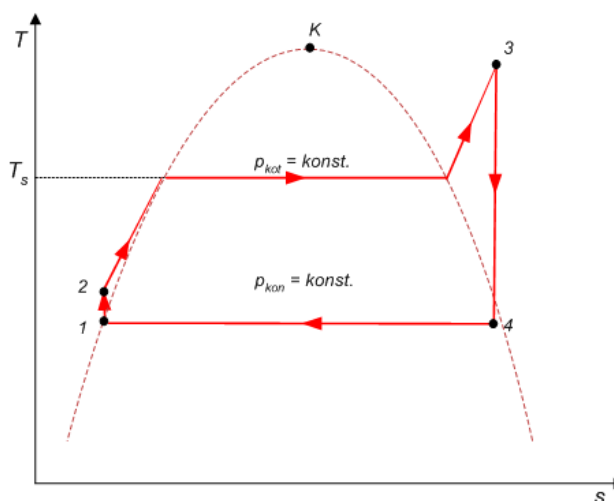
$$v_1 = 0,001010 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_3 = 3248 \text{ kJ/kg}$$

$$s_3 = 7,129 \text{ kJ/kgK}$$

$$h_4 = 2259 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{t, RKP} = ?$$



❖ Očitavanje veličina iz parnih tablica

Stanje 1 (zasićena tekućina): za $p_1 = 0,01 \text{ MPa}$ i $x = 0$ iz parnih tablica očitano je. $h_1 = 191,8 \text{ kJ/kg}$, $v_1 = 0,001010 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Stanje 3 (pregrijana para): za $p = 2 \text{ MPa}$ i $T_3 = 673,15 \text{ K}$ iz parnih tablica očitano je. $h_3 = 3248 \text{ kJ/kg}$, $s_3 = 7,129 \text{ kJ/kgK}$.

Stanje 4 (mokra para): za $p_4 = 0,01 \text{ MPa}$ i $s_4 = s_3 = 7,129 \text{ kJ/kgK}$ (izentropska ekspanzija) iz parnih tablica očitano je. $h_4 = 2259 \text{ kJ/kg}$.

Za ilustraciju, pokazat ćemo kako se može izračunati entalpija h_4 . Općenito, za mokru paru vrijedi:

$m \cdot v = m' \cdot v' + m'' \cdot v''$, pri čemu je sa indeksom ' f ili t označeno stanje na donjoj graničnoj krivulji (vrela tekućina), a sa indeksom '' g ili p označeno stanje na gornjoj graničnoj krivulji (suha para).

Uzimajući u obzir prethodno uvedenu veličinu sadržaj pare $x = m'' / (m' + m'')$ tada vrijede izrazi za:

- specifični volumen: $v = (1 - x) \cdot v' + x \cdot v'' = v' + x \cdot (v'' - v')$
- specifičnu entalpiju: $h = (1 - x) \cdot h' + x \cdot h'' = h' + x \cdot (h'' - h')$
- specifičnu entropiju: $s = (1 - x) \cdot s' + x \cdot s'' = s' + x \cdot (s'' - s')$

Za p_4 i s_4 iz tablica se mogu očitati: $s' = 0,6792 \text{ kJ/kgK}$, $s'' = 8,149 \text{ kJ/kgK}$, $h' = 191,8 \text{ kJ/kg}$, $h'' = 2584 \text{ kJ/kg}$.

Iz izraza $s_4 = s' + x \cdot (s'' - s')$ može se izračunati $x = 0,864$, a potom i $h_4 = h' + x \cdot (h'' - h') = 2259 \text{ kJ/kg}$.

Jedinični rad pumpanja je:

$$w_P = v_1 \cdot (p_1 - p_2) = 0,001010 \cdot (10 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^6) = -2,001 \text{ kJ/kg}$$

Entalpija na izlazu iz pumpe je:

$$h_2 = h_1 - w_P = 191,8 + 2,01 = 193,81 \text{ kJ/kg}$$

Toplina koja se dovodi u kotlu je:

$$q_{dov} = h_3 - h_2 = 3248 - 193,81 = 3054,2 \text{ kJ/kg}$$

Jedinični rad turbine je:

$$w_T = h_3 - h_4 = 3248 - 2259 = 989 \text{ kJ/kg}$$

Energetski stupanj djelovanja Rankineovog kružnog procesa je:

$$\eta_{t, RKP} = \frac{w_T - |w_P|}{q_{dov}} = \frac{989 - 2}{3054} = 0,32$$

7. U kotlu (generator pare, 1) ulazi voda pod tlakom 10 MPa i temperature 30 °C ($h_1 = 134,2 \text{ kJ/kg}$, $v_1 = 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$) kroz cijev promjera 30 mm pri protoku 3 l/s. Para napušta generator pare (2) s tlakom 9 MPa i 400 °C ($h_2 = 3118 \text{ kJ/kg}$, $v_2 = 0,02995 \text{ m}^3/\text{kg}$). Odredite toplinsku snagu generatora pare.

$$p_1 = 10 \text{ MPa}$$

$$g_1 = 30 \text{ °C} \rightarrow T_1 = 303 \text{ K}$$

$$D_1 = D_2 = 30 \text{ mm} = 0,03 \text{ m}$$

$$\dot{V} = 3 \text{ l/s} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$p_2 = 9 \text{ MPa}$$

$$g_2 = 400 \text{ °C} \rightarrow T_2 = 673 \text{ K}$$

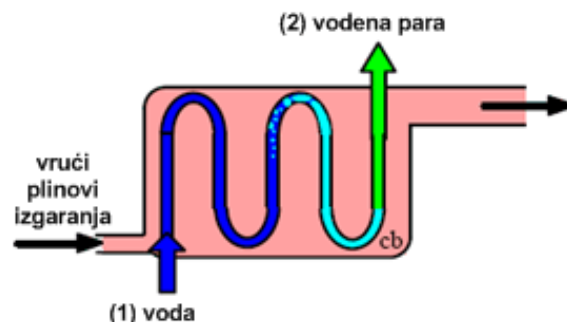
iz parnih tablica:

$$h_1 = 134,2 \text{ kJ/kg}$$

$$v_1 = 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_2 = 3118 \text{ kJ/kg}$$

$$v_2 = 0,02995 \text{ m}^3/\text{kg}$$



$$\dot{Q} = ?$$

✱ Očitavanje veličina iz parnih tablica

Stanje 1: za p_1 i T_1 iz parnih tablica očitano je. $h_1 = 134,2 \text{ kJ/kg}$, $v_1 = 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Stanje 2: za p_2 i T_2 iz parnih tablica očitano je. $h_2 = 3118 \text{ kJ/kg}$, $v_2 = 0,02995 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Primjena 1. GST za kotao (otvoreni sustav) dovodi do izraza:

$$q_{12} + h_1 + 1/2 c_1^2 + gz_1 = w_{12} + h_2 + 1/2 c_2^2 + gz_2 \quad (w_{12} = 0, q_{12} = q_{kot})$$

Množenjem s masenim protokom za toplinsku snagu generatora pare dobiva se izraz:

$$\dot{Q}_{kot} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) + 0,5 \cdot \dot{m} \cdot (c_2^2 - c_1^2)$$

Ploština presjeka cijevi iznosi: $A_1 = A_2 = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} = 0,00071 \text{ m}^2$

Maseni protok vode / vodene pare je:

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{0,001} = 3,0 \text{ kg/s}$$

Za maseni protok fluida koji struji u cijevi vrijedi jednačba kontinuiteta:

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = \rho \cdot \vec{A} \cdot \vec{c} = \frac{1}{v} \cdot |A| \cdot |c| \cdot \cos \varphi(\vec{A}, \vec{c}) = konst$$

Za ovaj primjer u kojem fluid mijenja agregatno stanje onda vrijedi:

$$\dot{m} = \frac{1}{v_1} \cdot A \cdot c_1 = \frac{1}{v_2} \cdot A \cdot c_2$$

Brzina strujanja vode (tekućina) na ulazu je: $c_1 = \frac{\dot{V}_t}{A} = 4,25 \text{ m/s}$

Brzina strujanja vodene pare na izlazu je: $c_2 = c_1 \cdot \frac{v_2}{v_1} = 127,29 \text{ m/s}$

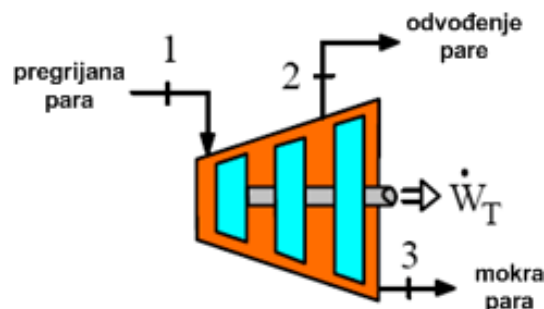
Konačno za toplinsku snagu generatora pare dobiva se:

$$\dot{Q}_{kot} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) + 0,5 \cdot \dot{m} \cdot (c_2^2 - c_1^2) = 8951,4 + 24,3 = 8975,7 \text{ kW}$$

8. Pregrijana para ulazi u turbinu s tlakom 15 MPa, 600 °C ($h_1 = 3583 \text{ kJ/kg}$) i masenim protokom 100 kg/s. U srednjoj sekciji turbine odvodi se 20 kg/s pare pri 2 MPa i 350 °C ($h_2 = 3137 \text{ kJ/kg}$), a ostatak pare ekspanzira do stanja kvalitete pare 95% na izlazu iz turbine (75 kPa, $h_3 = 2548 \text{ kJ/kg}$). Odredite snagu turbine ako nema prijelaza topline (adijabatski proces) i nema promjene kinetičke energije.

$p_1 = 15 \text{ MPa}$	iz parnih tablica:
$\vartheta_1 = 600 \text{ °C} \rightarrow T_1 = 873 \text{ K}$	
$\dot{m}_1 = 100 \text{ kg/s}$	$h_1 = 3583 \text{ kJ/kg}$
$p_2 = 2 \text{ MPa}$	$h_2 = 3137 \text{ kJ/kg}$
$\vartheta_2 = 350 \text{ °C} \rightarrow T_2 = 623 \text{ K}$	$h_3 = 2548 \text{ kJ/kg}$
$\dot{m}_2 = 20 \text{ kg/s}$	
$p_3 = 75 \text{ kPa}$	
$x = 0,95$	
$q_{12} = 0$	

 $P_T = ?$



Maseni protok na izlazu iz turbine je: $\dot{m}_3 = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 = 100 - 20 = 80 \text{ kg/s}$

1.GST za kontrolni volumen KV (turbina je otvoreni sustav): $\dot{Q}_{KV} + \sum \dot{m}_u h_u = \sum \dot{m}_i h_i + \dot{W}_{KV}$, gdje su u označene ulazne veličine, a i izlazne veličine. S obzirom na sliku sustava (turbine) i promatrano u jedinici vremena jednadžba prelazi u oblik:

$$\dot{m}_1 \cdot h_1 = \dot{W}_T + \dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_3 \cdot h_3$$

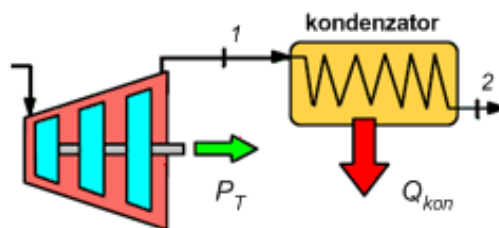
Za mehaničku snagu turbine slijedi:

$$\dot{W}_T = \dot{m}_1 \cdot h_1 - \dot{m}_2 \cdot h_2 - \dot{m}_3 \cdot h_3 = 91,8 \text{ MW}$$

9. U kondenzator termoelektrane ulazi mokra para kvalitete 90% s masenim protokom 5 kg/s te predaje toplinu pri konstantnom tlaku 15 kPa rashladnoj vodi iz rijeke koja je na srednjoj temperaturi 17 °C. Izračunajte toplinsku snagu koja se prenosi na okoliš (rijeku) i brzinu promjene ukupne entropije. Iz parnih tablica poznato je još: $h_1 = 2361 \text{ kJ/kg}$, $s_1 = 7,282 \text{ kJ/kgK}$, $h_2 = 225,9 \text{ kJ/kg}$, $s_2 = 0,7549 \text{ kJ/kgK}$.

$\dot{m} = 5 \text{ kg/s}$	iz parnih tablica:
$p_1 = 15 \text{ kPa}$	
$x_1 = 90\%$	$h_1 = 2361 \text{ kJ/kg}$
$\vartheta_{sr} = 17 \text{ °C} \rightarrow T_{sr} = 290 \text{ K}$	$s_1 = 7,282 \text{ kJ/kgK}$
-----	$h_2 = 225,9 \text{ kJ/kg}$
	$s_2 = 0,7549 \text{ kJ/kgK}$

$\dot{Q}_{kon}, \Delta \dot{S}_{uk} = ?$



S obzirom na sliku sustava (kondenzator) 1.GST za kontrolni volumen KV u jedinici vremena:

$$\dot{m} \cdot h_1 = \dot{Q}_K + \dot{m} \cdot h_2$$

Za toplinsku snagu koja se prenosi na okoliš slijedi:

$$\dot{Q}_K = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) = 5 \cdot (2361 - 225,9) = 10,68 \text{ MW}_t$$

Brzina promjene ukupne entropije je:

$$\dot{S}_{uk} = \dot{S}_{KV} + \dot{S}_{ok} = \dot{m} \cdot (s_2 - s_1) + \frac{\dot{Q}_{kon}}{T_{ok}} = 5 \cdot (0,7549 - 7,282) + \frac{10676}{290} = -32,6 + 36,8 = 4,2 \text{ kW/K}$$

10. Srednji godišnji protok rijeke se povećava prema $Q_{sr} = 2(1300 - H)/3$ [visina u m , protok u m^3/s]. Odredite:

- bruto energiju vodotoka,
- snagu pribranske hidroelektrane s branom visine 100 m na 400 m n.v. i stupnjem iskorištenja 90% ,
- snagu derivacijske hidroelektrane sa zahvatom na 400 m n. v. , pregradom visine 100 m , postrojenjem na 200 m n. v. i stupnjem iskorištenja 85% , i
- kao pod c), ali se na mjestu zahvata u osnovni vodotok propušta biološki minimum od $50\text{ m}^3/s$.
- godišnju proizvedenu električnu energiju u elektranama pod b), c) i d) kada bi se raspoloživi protok za proizvodnju električne energije prikazao kao srednji protok dostupan 70% vremena.

Q - H dijagram:

$$Q_{sr} = 2 \cdot (1300 - H)/3$$

$$H_{zah} = 400\text{ m n. v.}$$

$$H_{B,p} = 100\text{ m}$$

$$\eta_p = 0,90$$

$$H_{B,d} = 100\text{ m}$$

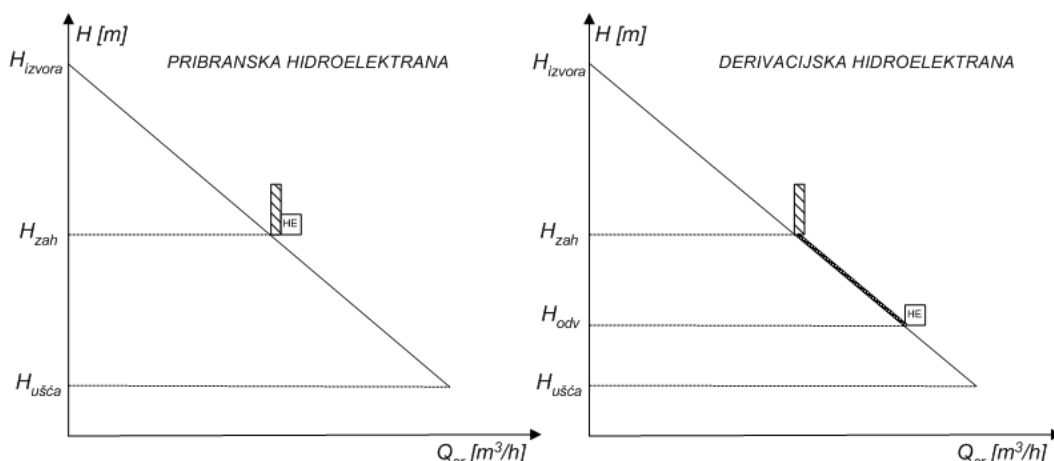
$$H_d = 200\text{ m n. v.}$$

$$\eta_d = 0,85$$

$$Q_{BM} = 50\text{ m}^3/s$$

$$W_{brutto} = ?$$

$$P_p, P_{d,c}, P_{d,d} = ?$$



a) Bruto energija vodotoka je:

$$W_{brutto} = 8760 \cdot P = 8760 \cdot 9,81 \cdot 10^3 \cdot \int_{H_u}^{H_i} Q_{sr}(H) dH = 8760 \cdot 9,81 \cdot 10^3 \cdot \int_{100}^{700} \frac{2}{3} \cdot (1300 - H) dH =$$

$$= 8760 \cdot 9,81 \cdot 10^3 \cdot 0,667 \cdot [1300 \cdot (700 - 100) - 0,5 \cdot (700^2 - 100^2)] = 30,92\text{ TWh}$$

b) pribranska hidroelektrana

$$H_n \equiv H_{B,p} = 100\text{ m}$$

$$Q_{sr,p}(H_{zah} = 400\text{ m}) = 0,667 \cdot (1300 - 400) = 600\text{ m}^3/s$$

$$P_p = 9,81 \cdot Q_{sr,p} \cdot H_n \cdot \eta_p = 9,81 \cdot 600 \cdot 100 \cdot 0,90 = 529740\text{ kW} = 530\text{ MW}$$

c) derivacijska hidroelektrana

$$H_n \equiv H_{B,d} + (H_{zah} - H_d) = 100 + (400 - 200) = 300\text{ m}$$

$$Q_{sr,d}(H_{zah} = 400\text{ m}) = 0,667 \cdot (1300 - 400) = 600\text{ m}^3/s$$

$$P_{d,c} = 9,81 \cdot Q_{sr,d} \cdot H_n \cdot \eta_d = 9,81 \cdot 600 \cdot 300 \cdot 0,85 = 1500930\text{ kW} = 1501\text{ MW}$$

d) derivacijska hidroelektrana uz propuštanje biološkog minimuma protoka

$$H_n \equiv H_B + (H_{zah} - H_d) = 100 + (400 - 200) = 300\text{ m}$$

$$Q_{sr,d-BM} = Q_{sr,d}(H_{zah} = 400\text{ m}) - Q_{BM} = 600 - 50 = 550\text{ m}^3/s$$

$$P_{d,d} = 9,81 \cdot Q_{sr,d-BM} \cdot H_n \cdot \eta_d = 9,81 \cdot 550 \cdot 300 \cdot 0,85 = 1375385\text{ kW} = 1375\text{ MW}$$

e) Pribranska HE: $W = 8760 \cdot 0,7 \cdot P_p = 8760 \cdot 0,7 \cdot 530 = 3,250 \cdot 10^6\text{ MWh} = 3250\text{ GWh}$

$$\text{Derivacijska HE: } W = 8760 \cdot 0,7 \cdot P_{d,c} = 8760 \cdot 0,7 \cdot 1501 = 9,204 \cdot 10^6\text{ MWh} = 9204\text{ GWh}$$

$$\text{Derivacijska HE s b. m.: } W = 8760 \cdot 0,7 \cdot P_{d,d} = 8760 \cdot 0,7 \cdot 1375 = 8,432 \cdot 10^6\text{ MWh} = 8432\text{ GWh}$$