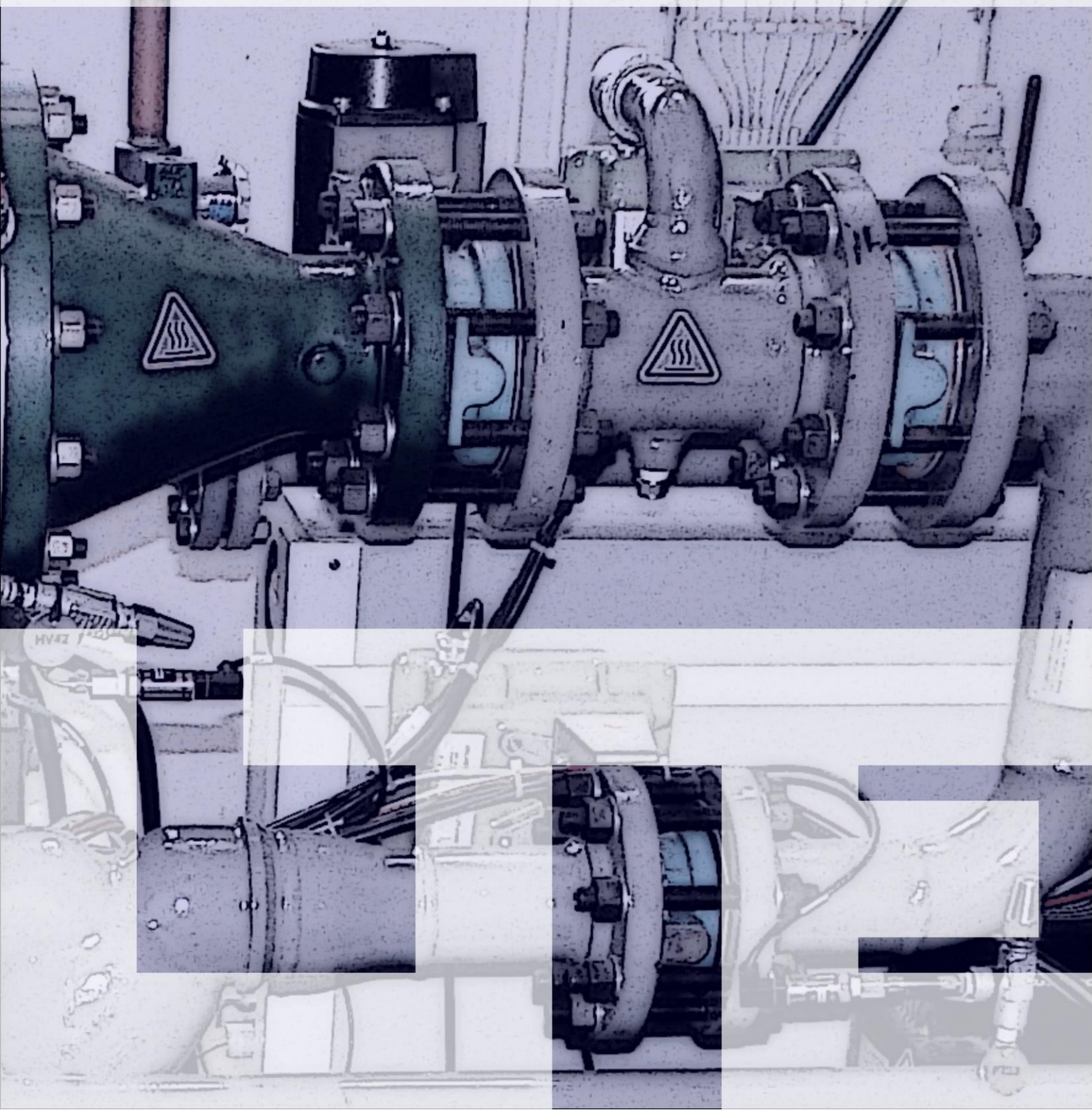


Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za strojništvo



Boštjan Drobnič, Andrej Senegačnik  
**Industrijska energetika**  
Zbirka rešenih nalog s kratkimi teoretičnimi osnovami





Naslov dela: Industrijska energetika, Zbirka rešenih nalog s kratkimi teoretičnimi osnovami  
Avtorja: dr. Boštjan Drobnič, dr. Andrej Senegačnik  
Recenzenta: dr. Uroš Stritih, dr. Mihael Sekavčnik  
Lektor: Urška Lavrič  
Založba: Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana  
Izdaja: 1. elektronska izdaja  
Leto izida: 2020  
Naklada: spletna izdaja  
Cena: prosto dostopno na repozitoriju Univerze v Ljubljani

URN: URN:SI:UL:RUL:doc-J72QLJE2  
Naslov: Industrijska energetika : zbirka rešenih nalog s kratkimi teoretičnimi osnovami  
URI: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=122248>

© Fakulteta za strojništvo

Avtorske pravice so pridržane. Gradiva iz publikacije ni dovoljeno kopirati, objavljati ali prevajati v druge jezike brez pisnega dovoljenja založbe.

ISBN 978-961-6980-72-2



Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

COBISS.SI-ID=41357827

ISBN 978-961-6980-72-2 (pdf)



## **Predgovor**

Pojem industrijska energetika obsega razmeroma široko področje tehnike, s katero se inženir pogosto srečuje v različnih proizvodnih procesih, zato je prav, da je seznanjen vsaj z osnovami teh področij. V kratkem času, ki ga študijski program Lesarsko inženirstvo na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani odmerja tej temi, jo je nemogoče poglobljeno predstaviti. Po drugi strani pa je obilica domače in tuje literature, ki je na voljo, preveč obsežna za potrebe študija. Zbirka rešenih nalog s kratkimi teoretičnimi osnovami je zato zasnovana kot pregled osnov različnih področij, ki jih obravnavava predmet Industrijska energetika (študijski program Lesarsko inženirstvo na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani), in praktičnih primerov, ki prikažejo uporabo teorije v inženirski praksi. Naj bo študentom v pomoč na poti k novemu znanju.

Ljubljana, oktober 2020

Boštjan Drobnič  
Andrej Senegačnik



|   |  |     |
|---|--|-----|
| 0 | OZNAKE, SIMBOLI IN SCHEME                          | 1   |
|   | 0.1 Oznake fizikalnih veličin                      | 1   |
|   | 0.2 Zapis fizikalnih veličin                       | 2   |
|   | 0.3 Postopek reševanja                             | 4   |
|   | 0.4 Shematski prikaz energetskih sistemov          | 4   |
| 1 | IDEALNI PLINI                                      | 9   |
|   | 1.1 Preobrazbe idealnega plina                     | 9   |
|   | 1.2 Diagrami stanja in preobrazb                   | 13  |
|   | 1.3 Krožni proces                                  | 16  |
|   | 1.4 Naloge   | 19  |
| 2 | VODNA PARA   | 29  |
|   | 2.1 Termodinamske lastnosti vode in vodne pare     | 29  |
|   | 2.2 Primeri določanja lastnosti vode in vodne pare | 36  |
|   | 2.3 Parni krožni proces                            | 40  |
|   | 2.4 Naloge   | 42  |
| 3 | PRENOS TOPLOTE                                     | 51  |
|   | 3.1 Toplotni tokovi in temperaturne razmere        | 51  |
|   | 3.2 Prestop, prevod in prehod toplote              | 52  |
|   | 3.3 Naloge   | 54  |
| 4 | ČRPALKE  | 65  |
|   | 4.1 Bernoullijeva enačba                           | 65  |
|   | 4.2 Dobavna višina črpalke                         | 65  |
|   | 4.3 Dopustna sesalna višina                        | 67  |
|   | 4.4 Izgube energije v cevovodu                     | 68  |
|   | 4.5 Karakteristika črpalke in cevovoda             | 69  |
|   | 4.6 Naloge   | 72  |
| 5 | ZGOREVANJE   | 83  |
|   | 5.1 Kemijske reakcije pri zgorevanju               | 86  |
|   | 5.2 Kisik in zgorevalni zrak                       | 88  |
|   | 5.3 Produkti zgorevanja                            | 88  |
|   | 5.4 Kurilnost in zgorevalna toplota goriva         | 89  |
|   | 5.5 Ogljikov dioksid                               | 90  |
|   | 5.6 Energija dimnih plinov in izgube toplote       | 90  |
|   | 5.7 Naloge   | 93  |
| 6 | DODATNA NALOGA                                     | 103 |
| 7 | VIRI   | 109 |





## **Tabele**

Pri reševanju nalog so določeni podatki pridobljeni iz ustrezne literature, kar je označeno z oznako 'Tabele'. Viri podatkov so:

- Kuštrin, I., Senegačnik, A. *Tabele termodinamičnih lastnosti vode in vodne pare: Po modelu IAPWS-IF97*. V Ljubljani: Fakulteta za strojništvo. 2001
- Senegačnik, A., Oman, J. *Lastnosti zraka, goriv in dimnih plinov*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo. 2004
- *Krautov strojniški priročnik, 17. slovenska popravljena izd., predelana, 1. natis*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo. 2019



## 0 Oznake, simboli in sheme

### 0.1 Oznake fizikalnih veličin

Fizikalne veličine v enačbah označujemo s črkami latinske in grške abecede, dodatno jih označimo še z različnimi indeksi ali drugimi oznakami. Različni viri lahko uporabljajo različno nomenklaturu za označevanje, prav tako zaradi velikega števila fizikalnih veličin in omejenega nabora črk ista črka lahko označuje različne veličine. Pri uporabi matematičnih izrazov je pomembno poznati pomen samih fizikalnih veličin v enačbi, ne pa samo oznake, s katero so zapisane. V nadaljevanju je označevanje fizikalnih veličin poenoteno z naslednjimi oznakami:

| oznaka    | enote             | veličina                            |
|-----------|-------------------|-------------------------------------|
| $A$       | $m^2$             | površina                            |
| $a, b$    | $m$               | višina, širina                      |
| $c$       | $J/(kg \cdot K)$  | specifična toplota                  |
| $c$       | $m/s$             | hitrost                             |
| $d$       | $m$               | premer, debelina                    |
| $g$       | $m/s^2$           | težnostni pospešek ( $9,81 m/s^2$ ) |
| $H$       | $J$               | entalpija                           |
| $H$       | $J/kg$            | kurilnost goriva                    |
| $H$       | $m$               | višinska razlika                    |
| $h$       | $W/(m^2 \cdot K)$ | toplotna prestopnost                |
| $h$       | $J/kg$            | specifična entalpija                |
| $k$       | $W/(m \cdot K)$   | toplotna prevodnost                 |
| $L$       | $m$               | dolžina                             |
| $m$       | $kg$              | masa                                |
| $\dot{m}$ | $kg/s$            | masni tok                           |
| $P$       | $W$               | moč                                 |
| $p$       | $Pa$              | tlak                                |
| $Q$       | $J$               | toplota                             |
| $\dot{Q}$ | $W$               | toplotni tok                        |
| $q$       | $W/m^2$           | gostota toplotnega toka             |
| $R$       | $J/(kg \cdot K)$  | plinska konstanta                   |
| $r$       | $m$               | polmer                              |
| $Re$      |                   | Reynoldsovo število                 |
| $S$       | $J/K$             | entropija                           |
| $s$       | $J/(kg \cdot K)$  | specifična entropija                |

| oznaka    | enote                 | veličina                                 |
|-----------|-----------------------|--|
| $T$       | K                     | temperatura                              |
| $t$       | s                     | čas                                      |
| $U$       | W/(m <sup>2</sup> ·K) | toplotna prehodnost                      |
| $U$       | J                     | notranja energija                        |
| $u$       | J/kg                  | specifična notranja energija             |
| $V$       | m <sup>3</sup>        | prostornina                              |
| $v$       | m <sup>3</sup> /kg    | specifična prostornina                   |
| $\dot{V}$ | m <sup>3</sup> /s     | prostorninski (volumski) tok             |
| $W$       | J                     | delo, energija                           |
| $w$       |                       | masni delež                              |
| $x$       |                       | suhost pare                              |
| $z$       | m                     | višina                                   |
| $\zeta$   |                       | koeficient lokalnih pretočnih izgub      |
| $\eta$    |                       | izkoristek                               |
| $\kappa$  |                       | eksponent izentropne                     |
| $\lambda$ |                       | koeficient trenja v cevovodu             |
| $\lambda$ |                       | razmernik zraka                          |
| $\nu$     | m <sup>2</sup> /s     | kinematična viskoznost (grška črka 'ni') |
| $\rho$    | kg/m <sup>3</sup>     | gostota                                  |
| $\varphi$ |                       | kot                                      |
| $\varphi$ |                       | prostorninski delež                      |

## 0.2 Zapis fizikalnih veličin

**1. Enote:** V seznamu simbolov so navedene samo osnovne merske enote za posamezne fizikalne veličine, v praksi pa uporabljamo tudi razne druge enote, npr.:

tlak:  $p = 2 \text{ bar} = 1500 \text{ mmHg} = 0,2 \text{ MPa} = 200\,000 \text{ Pa}$

temperatura:  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 77 \text{ }^\circ\text{F} = 298,15 \text{ K}$

toplota:  $Q = 5 \text{ kWh} = 17\,061 \text{ BTU} = 18 \text{ MJ} = 18\,000\,000 \text{ J} = 4299 \text{ kcal}$

volumski tok:  $\dot{V} = 300 \text{ L/min} = 635,7 \text{ ft}^3/\text{h} = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$

Pri vnašanju fizikalnih veličin v enačbe je treba biti pozoren na to, da se morajo enote posameznih veličin medsebojno ujemati, da se v izračunu ustrezno okrajšajo ali sestavijo v druge enote.

**Primer iz naloge 1-5:**

$$\text{pravilno: } m = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{2\,020\,000 \text{ Pa} \cdot 0,15 \text{ m}^3}{259,8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 298,15 \text{ K}} = 3,91 \text{ kg}$$

$$\text{napačno: } m = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{20,20 \text{ bar} \cdot 150 \text{ L}}{259,8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 25 \text{ }^\circ\text{C}} = 0,466 \text{ kg}$$

V nekaterih primerih smemo v enačbah uporabiti tudi enote, ki niso osnovne.

**Primer iz naloge 2-7:**

$$\text{pravilno: } \dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) = 44 \text{ kg/s} \cdot 1160 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot (853,15 \text{ K} - 693,15 \text{ K}) = 8\,166\,000 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} \text{pravilno: } \dot{Q} &= \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) = 44 \text{ kg/s} \cdot 1,16 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot (580 \text{ }^\circ\text{C} - 420 \text{ }^\circ\text{C}) \\ &= 8\,166 \text{ kW} = 8\,166\,000 \text{ W} \end{aligned}$$

Posebno pozornost je treba posvetiti temperaturam, ki jih smemo v enačbe vstaviti v  $^\circ\text{C}$  samo v primerih, kjer računamo s temperaturnimi razlikami (spremembami). Temperaturno razliko v vsakem primeru izrazimo v K.

**Primer iz naloge 3-2:**

$$\begin{aligned} \text{pravilno: } \Delta T_{\ln} &= \frac{(T_{\text{tv}} - T_{\text{hi}}) - (T_{\text{ti}} - T_{\text{hv}})}{\ln \frac{T_{\text{tv}} - T_{\text{hi}}}{T_{\text{ti}} - T_{\text{hv}}}} = \\ &= \frac{(361,15 \text{ K} - 315,15 \text{ K}) - (326,15 \text{ K} - 285,15 \text{ K})}{\ln \frac{361,15 \text{ K} - 315,15 \text{ K}}{326,15 \text{ K} - 285,15 \text{ K}}} = 43,5 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\text{pravilno: } \Delta T_{\ln} = \frac{(T_{\text{tv}} - T_{\text{hi}}) - (T_{\text{ti}} - T_{\text{hv}})}{\ln \frac{T_{\text{tv}} - T_{\text{hi}}}{T_{\text{ti}} - T_{\text{hv}}}} = \frac{(88 \text{ }^\circ\text{C} - 42 \text{ }^\circ\text{C}) - (53 \text{ }^\circ\text{C} - 12 \text{ }^\circ\text{C})}{\ln \frac{88 \text{ }^\circ\text{C} - 42 \text{ }^\circ\text{C}}{53 \text{ }^\circ\text{C} - 12 \text{ }^\circ\text{C}}} = 43,5 \text{ K}$$

Prav tako veličine, izražene v neosnovnih enotah, pogosto najdemo v tabelah, kjer je zato treba biti pozoren na to, kakšne enote so navedene ob vrednostih, in jih po potrebi pretvoriti in prilagoditi drugim veličinam, ki jih uporabimo v izračunih.

**2. Uporaba predpon:** Večje vrednosti lahko izrazimo tudi s predponami (deka-, hekto-, kilo-, mega- itd.), da skrajšamo zapis. Pri zelo majhnih vrednostih pa podobno uporabimo predpone kot so centi-, deci-, mili-, mikro- itd.

**Primer iz naloge 1-7:**

$$\dot{Q} = 17\,914\,377 \text{ J} = 17\,914 \text{ kJ} = 17,9 \text{ MJ}$$

**3. Zaokroževanje:** V tehniški praksi so podatki, s katerimi računamo, znani/podani z določeno točnostjo, ki pa ni vedno eksplicitno podana. V splošnem dejanska vrednost ni natančno taka kot numerično zapisana oz. podana vrednost. Ker sami podatki niso zanesljivi, rezultatov izračuna prav tako ni smiselno podajati s pretirano natančnostjo, temveč jih zaokrožimo na primerno število polnih decimalnih mest.

**Primer iz naloge 1-7:**

Masni tok  $\dot{m} = 22 \text{ kg/s}$  po vsej verjetnosti ni natančno  $22 \text{ kg/s}$ , lahko gre za zaokroženo vrednost, ki ima dejansko vrednost med  $21,5 \text{ kg/s}$  in  $22,5 \text{ kg/s}$ . Podobno velja za vse podatke. Zato zaokrožimo npr. na tri polna decimalna mesta.

$$\dot{Q} = 17\,914\,377 \text{ J} = 17\,900\,000 \text{ J} = 17\,900 \text{ kJ} = 17,9 \text{ MJ}$$

Če rezultat uporabljamo v nadaljnjih izračunih, ga ne zaokrožujemo, saj s tem povečujemo napako v nadaljnjih izračunih. Vrednosti zaokrožimo na koncu, samo za zapis rezultatov.

### 0.3 Postopek reševanja

Pri postopkih reševanja nalog so najprej vedno iz besedila naloge izpisani dani podatki, kjer jim je določena oznaka (simbol z ustreznim indeksom) ter vrednost in enota. Po potrebi so vrednosti pretvorjene v ustrezne enote, ki so v nadaljevanju uporabljene v izračunu. Enako so tudi vrednosti, ki so odčitane iz tabel, v izračunu uporabljene v obliki, v kakršni so navedene v seznamu odčitkov. Nekateri rezultati so zaradi jasnosti ali primerljivosti naknadno pretvorjeni v druge enote, vendar so v osnovi vedno izračunani z vrednostmi in enotami, ki so navedene v seznamu.

### 0.4 Shematski prikaz energetskega sistema

V tehniki je za ustrezno razumevanje treba primere predstaviti jasno in pregledno, zato so tudi v energetiki določena pravila in standardi,\* s katerimi različne energetske procese, stroje, naprave in sisteme predstavimo grafično. Za splošne sheme enostavnih energetskega sistema uporabljamo naslednje simbole energetskega strojev in naprav:

- prenosniki toplote

splošen površinski prenosnik toplote


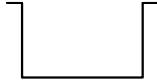
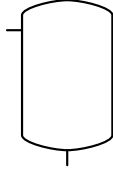




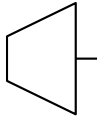

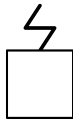


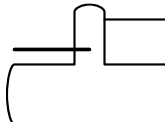


mešalni prenosnik toplote



---

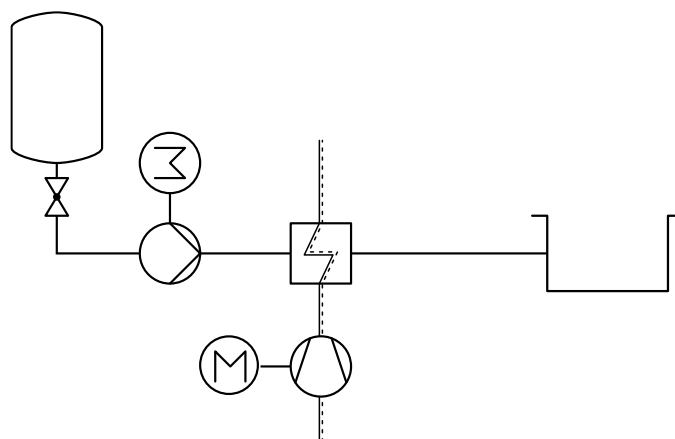
\* Černigoj B. *Grafični simboli za toplotna energetska postrojenja po DIN 2481*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo. 1985

|   |  |
|---|--|
| kondenzator                             |     |
| - sestavni deli cevovodov               |  |
| odprta posoda                           |     |
| zaprta posoda                           |     |
| ventil                                  |     |
| - delovni stroji                        |  |
| črpalka                                 |     |
| kompresor                               |    |
| generator                               |   |
| - pogonski stroji                       |  |
| turbina                                 |   |
| elektromotor                            |   |
| - drugo                                 |  |
| parni kotel s pregrevalnikom            |   |
| gorilnik                                |   |
| porabnik toplote                        |   |
| napajalni rezervoar z razplinjevalnikom |  |

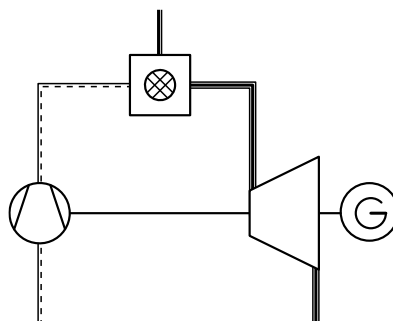
Povezave med posameznimi elementi predstavljajo cevovodi, po katerih se pretakajo različne delovne snovi, ki jih v splošnem rišemo z neprekinjeno tanko črto. Če pa želimo poudariti, katera snov se pretaka po cevovodu, uporabimo naslednje oblike črt:

|                  |                         |
|------------------|-------------------------|
| voda             | —————                   |
| para             | —————                   |
| zrak             | - - - - -               |
| gorljivi plini   | =====<br>=====<br>===== |
| negorljivi plini | =====<br>=====<br>===== |
| trdna goriva     | —————<br>—————<br>————— |
| olje             | =====<br>=====<br>===== |

Prikazane energetske stroje in naprave lahko sestavimo v različne energetske sisteme, v nadaljevanju je prikazanih nekaj preprostih primerov.

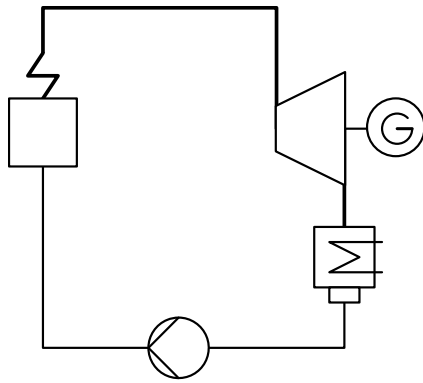


**Sistem hlajenja vode z zrakom**

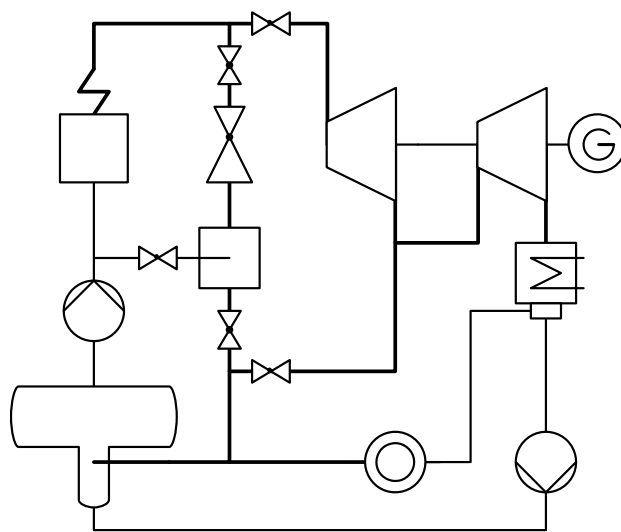


**Energetski sistem s plinsko turbino**





***Parni energetska sistem***



***Industrijska toplarna***



# 1 Idealni plini

## 1.1 Preobrazbe idealnega plina

Različna področja energetike se ukvarjajo s procesi, v katerih potekajo pretvorbe energije. S tehničnega stališča nas zanimata predvsem dve obliki energije: **toplota** in **mehansko delo**. Pri tem je toploto relativno enostavno pridobiti, npr. s sončnim sevanjem, z zgorevanjem, z razpadom radioaktivnih elementov. Na drugi strani je mehansko delo bolj vsestransko uporabna oblika energije, predvsem zaradi učinkovitih možnosti za pretvorbo v druge oblike energije, tudi v električno energijo. Zato je pomemben del energetike pretvorba toplote v mehansko delo, s čimer se med drugim ukvarja termodinamika.

V praksi pretvorbe energije potekajo v t. i. odprtih sistemih, ki z okolico in drugimi sistemi izmenjujejo snovi in energijo v različnih oblikah. Ob tem vedno velja **prvi glavni zakon termodinamike**, ki pravi, da energije ni mogoče ustvariti ali uničiti, lahko pa jo prenašamo in pretvarjamo v druge oblike. Za energetske stroje in naprave zapišemo prvi glavni zakon termodinamike (zakon o ohranitvi energije, energijsko bilanco) z enačbo, pri kateri upoštevamo notranjo ( $U$ ), kinetično ( $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ ) in potencialno ( $m \cdot g \cdot z$ ) energijo, volumsko delo, ( $p \cdot V$ ) ter toploto ( $Q$ ) in delo, ki ga v tem primeru imenujemo tehnično delo ( $W_t$ ).

$$U_1 + p_1 \cdot V_1 + m \cdot \frac{v_1^2}{2} + m \cdot g \cdot z_1 + Q_{12} = U_2 + p_2 \cdot V_2 + m \cdot \frac{v_2^2}{2} + m \cdot g \cdot z_2 + W_{t12}$$

Za prenos in pretvorbe energije uporabljamo **delovne snovi** (voda, zrak ...). Te v stroje in naprave, kjer pretvorbe energije potekajo, prinašajo energijo v različnih oblikah in jo iz njih tudi odnašajo. Pri tem se delovnim snovem spreminjajo njihove termodinamske lastnosti. Te lastnosti opisujejo t. i. **veličine stanja** snovi. Osnovne veličine stanja so tlak ( $p$ ), temperatura ( $T$ ) in gostota ( $\rho$ ) oziroma prostornina ( $V$ ), ki jo snov zavzema. V energetskih procesih se stanje delovne snovi in s tem tudi veličine stanja spreminjajo, kar je posledica dovajanja ali odvzemanja energije v obliki toplote ( $Q$ ) ali mehanskega dela ( $W$ ). Pri tem lahko opazimo medsebojno odvisnost veličin stanja:

1. pri segrevanju (dovod toplote) se plinu poleg temperature ( $T$ ) povečuje tudi prostornina ( $V$ ), če je to mogoče, sicer se poveča tlak ( $p$ );
2. pri stiskanju plina (dovod mehanskega dela) se plinu zmanjša prostornina ( $V$ ) in hkrati poveča tlak ( $p$ ), če ni odvoda toplote, pa se poveča tudi temperatura ( $T$ ).

Pri idealnih plinih je zveza med osnovnimi veličinami stanja relativno enostavna, popisuje pa jo **plinska enačba**:

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T$$

Poleg treh veličin stanja v enačbi nastopata še masa plina ( $m$ ) in plinska konstanta ( $R$ ). Slednja ima enoto  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ , ima različne vrednosti za posamezne pline in je ne smemo zamenjevati s splošno plinsko konstanto ( $R_m$ ), ki ima za vse pline enako vrednost  $8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ . Pri računanju s plinsko enačbo je vedno treba biti pozoren na uporabo ustreznih merskih enot, še najbolje je, da so vse veličine izražene z osnovnimi enotami – tlak ( $p$ ) v Pa, prostornina ( $V$ ) v  $\text{m}^3$ , masa ( $m$ ) v kg, plinska konstanta ( $R$ ) v  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  in temperatura ( $T$ ) v K.

Plinsko enačbo lahko zapišemo tudi v drugačni obliki, pomen pa ostaja nespremenjen:

$$p \cdot v = R \cdot T$$

$$p \cdot \dot{V} = \dot{m} \cdot R \cdot T$$

$$p \cdot V = n \cdot R_m \cdot T$$

Zadnji zapis je uporaben predvsem v kemiji, v njem nastopa splošna plinska konstanta ( $R_m$ ) in namesto mase množina snovi ( $n$ ) izražena v molih.

Spreminjanje stanja delovne snovi imenujemo **preobrazba** in jo običajno opišemo z začetnim stanjem (točko) in končnim stanjem, pomemben pa je tudi potek spremembe med začetno in končno točko. V idealnih, teoretičnih razmerah lahko definiramo štiri posebne preobrazbe:

| <i>značilnost</i>                                    | <i>naziv preobrazbe*</i> | <i>primer</i>  |
|--|--------------------------|--|
| nespremenjen tlak,<br>$p = \text{konst.}$            | izobara                  | segrevanje/ohlajanje snovi pri stalnem tlaku   |
| nespremenjena prostornina,<br>$V = \text{konst.}$    | izohora                  | segrevanje/ohlajanje snovi pri stalni prostornini  |
| nespremenjena temperatura,<br>$T = \text{konst.}$    | izoterma                 | stiskanje/raztezanje snovi z ohranjanjem stalne temperature  |
| brez prenosa toplote<br>(idealno), $Q = 0 \text{ J}$ | izentropa                | hitro (brez prenosa toplote in brez notranjega trenja) stiskanje/raztezanje snovi, spremenijo se vse veličine stanja |

Med poljubno preobrazbo idealnega plina mora ves čas veljati plinska enačba, torej lahko za začetno (označimo jo z 1) in končno točko preobrazbe (označimo jo z 2) zapišemo

$$p_1 \cdot V_1 = m \cdot R \cdot T_1$$

$$p_2 \cdot V_2 = m \cdot R \cdot T_2$$

\* grško: ἴσος (isos) - enak; βάρος (baros) - teža; χώρος (horos) - prostor; θερμη (terme) - toplota; ἐν (en) - znotraj + τροπή (tropi) - pretvorba

Ko prvo enačbo delimo z drugo, dobimo splošen izraz za določanje stanja idealnega plina med poljubno preobrazbo:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{p_2 \cdot V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Iz te enačbe in nekaterih dodatnih izrazov, ki veljajo za posamezne teoretične preobrazbe, lahko izpeljemo enačbe, s katerimi opišemo spremembe veličin stanja ter dovedeno ali odvedeno energijo v obliki dela in toplote pri teoretičnih preobrazbah.

Količino toplote, ki je potrebna, da 1 kg snovi spremenimo temperaturo za 1 K, imenujemo specifična toplotna kapaciteta, krajše **specifična toplota**. Njena vrednost je odvisna od vrste snovi in tudi od načina (preobrazbe), s katero dosežemo spremembo temperature. V praksi se kot najbolj uporabni izkažeta preobrazbi, pri katerih ostaja nespremenjen tlak ali nespremenjena prostornina. Glede na to definiramo dve specifični toploti: izobarno  $c_p$  in izohorno  $c_v$ . Z njima lahko izrazimo izmenjano toploto in tudi mehansko delo (tehnično) pri nekaterih vrstah preobrazb.

| <i>preobrazba</i> | <i>nespremenjena veličina</i> | <i>povezava med veličinami</i>   | <i>izmenjana toplota</i>                      | <i>izmenjano tehnično delo</i>                |
|-------------------|-------------------------------|--|---|---|
| izobara           | $p$                           | $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$  | $Q = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$           | $W = 0$                                       |
| izohora           | $V$                           | $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$  | $Q = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$           | $W = (p_1 - p_2) \cdot V$                     |
| izoterma          | $T$                           | $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$  | $Q = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$ | $W = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}$ |
| izentropa         | $S$                           | $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\kappa$<br>$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\kappa-1}$<br>$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$ | $Q = 0$                                       | $W = m \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2)$           |

V realnih primerih so preobrazbe vedno politropne, kar pomeni, da se hkrati spreminjajo vse tri veličine stanja, njihove medsebojne odvisnosti pa so bolj kompleksne kot v primeru idealnih teoretičnih preobrazb.

Poleg osnovnih treh veličin stanja (tlak, temperatura, prostornina) sta za obravnavo energijskih pretvorb v energetskih sistemih pomembni še dve veličini stanja – entalpija in entropija. **Entalpija\*** je vsota notranje energije in volumnskega dela ( $H = U + p \cdot V$  ali  $h = u + p \cdot v$ ) in predstavlja količino energije, ki jo vsebuje delovna snov zaradi svojega termodinamskega stanja (temperature, od katere je odvisna notranja energija, in tlaka). Če upoštevamo samo spremembe stanja snovi, zapišemo zakon o ohranitvi energije kot

$$U_1 + p_1 \cdot V_1 + Q = U_2 + p_2 \cdot V_2 + W$$

V primeru izobarne preobrazbe ( $p_1 = p_2 = p$ ,  $W = 0$ ) velja

$$U_1 + p \cdot V_1 + Q = U_2 + p \cdot V_2$$

$$Q = (U_2 + p \cdot V_2) - (U_1 + p \cdot V_1) = H_2 - H_1 = m \cdot (h_2 - h_1)$$

V primeru izentropne preobrazbe ( $Q = 0$ ) pa velja

$$U_1 + p_1 \cdot V_1 = U_2 + p_2 \cdot V_2 + W$$

$$W = (U_1 + p_1 \cdot V_1) - (U_2 + p_2 \cdot V_2) = H_1 - H_2 = m \cdot (h_1 - h_2)$$

S primerjavo z izrazi, ki smo jih zapisali za izobarno in izentropno preobrazbo v preglednici preobrazb, lahko torej ugotovimo, da za idealne pline velja

$$h_1 - h_2 = c_p (T_1 - T_2)$$

Pri realnih snoveh je specifična toplota odvisna od temperature, zato zapišemo

$$h_1 - h_2 = \int_1^2 c_p \cdot dT$$

**Entropija†** je definirana kot razmerje med prenešeno toploto in temperaturo, pri kateri poteka prenos toplote ( $dS = dQ/T$ ), ter je neke vrste merilo delazmožnosti toplote, povračljivosti procesov ... Ker smo izentropno preobrazbo definirali s tem, da ni prenesene toplote, pomeni, da ostaja entropija pri taki preobrazbi konstantna. Pojem entropije je povezan z **drugim glavnim zakonom termodinamike**, ki sicer nima enoznačne definicije, kakršno ima prvi glavni zakon, temveč temelji na spoznanjih o tem, kako v naravi potekajo različni procesi. Osnovna ugotovitev je, da večina procesov v eno smer poteka spontano (sama od sebe), v drugo pa ne. To imenujemo nepovračljivost procesov. Značilni nepovračljivi procesi so:

---

\* grško: ἐν (en) + θάλπος (thalpos) - vsebovana toplota

† grško: ἐν (en) + τροπή (tropi) - pretvorba

- padanje ali tok tekočin – proces sam od sebe poteka samo v smeri gravitacije;
- prenos toplote – toplota sama od sebe prehaja samo od višje proti nižji temperaturi;
- mešanje – pri mešanju tople in hladne vode nastane homogena zmes s povprečno temperaturo, nemogoče pa je, da bi se nastala zmes sama od sebe razdelila nazaj na topli in hladni del;
- raztapljanje – topljive snovi se v primernem topilu raztopijo same od sebe, nemogoče pa je, da bi se raztopina sama od sebe ponovno ločila na topljenec in topilo;
- trenje – zaradi trenja se pri vsakem gibanju del mehanskega dela pretvarja v toploto, medtem ko se toplota sama od sebe ne more spremeniti v mehansko delo.

Vsi ti in drugi procesi lahko potekajo tudi v obratni smeri, vendar je za to potrebno vložiti dodatno energijo. Stanje sistema, kjer poteka nepovračljiv proces, pred in po procesu torej očitno ni enako in veličina, ki opisuje to spremembo stanja, je entropija.

Vse veličine stanja, ki jih bomo uporabljali pri obravnavi termodinamskih procesov, povezanih s pridobivanjem (uporabnih oblik) energije, so:

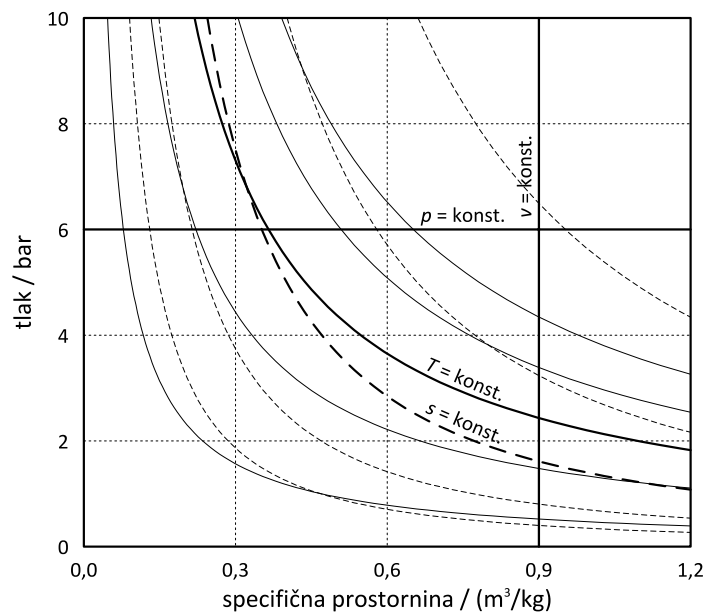
| <i>veličina</i>         | <i>oznaka</i> | <i>enota</i>           |
|-------------------------|---------------|------------------------|
| tlak                    | $p$           | Pa, bar, mmHg ...      |
| temperatura             | $T$           | K, °C, °F ...          |
| specifična* prostornina | $v$           | m <sup>3</sup> /kg ... |
| specifična entalpija    | $h$           | kJ/kg ...              |
| specifična entropija    | $s$           | kJ/(kg·K) ...          |

## 1.2 Diagrami stanja in preobrazb

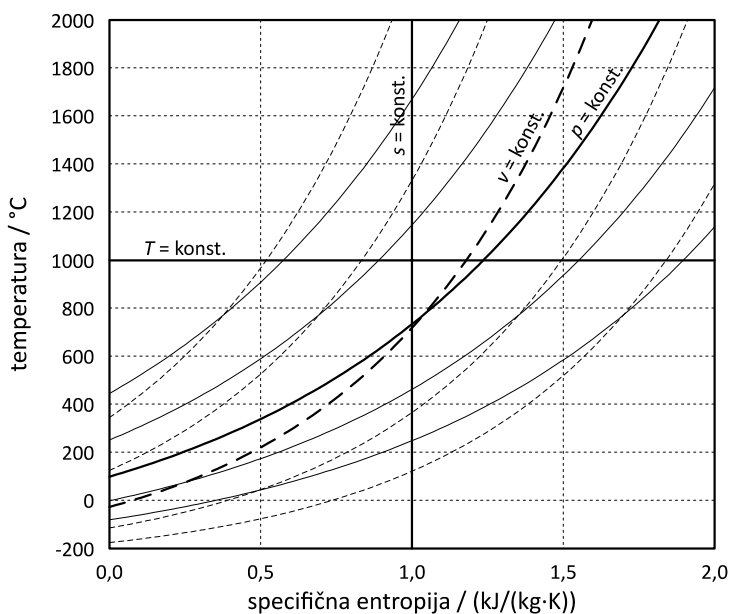
V tehniki stanja in preobrazbe delovnih snovi pogosto prikazujemo grafično v ustreznih diagramih, v katerih lahko pregledno in nazorno prikažemo, kaj se v določenem procesu dogaja z delovno snovjo in tudi kako to vpliva na sam proces. Iz diagramov lahko razberemo, kako se spreminjajo veličine stanja pri določenih preobrazbah delovne snovi. Glede na veliko število veličin stanja, ki jih lahko prikažemo, je mogoče uporabiti vrsto različnih diagramov, od katerih pa je v tehniški praksi razširjenih le nekaj najbolj uporabnih. Za idealne pline sta to predvsem diagrama  $p$ - $v$  in  $T$ - $s$ :

---

\* izraz 'specifičen' pomeni, da se veličina nanaša na enoto mase snovi (npr. na 1 kg) in ne na celotno količino snovi, kot velja za absolutne veličine, ki jih običajno označujemo z velikimi črkami



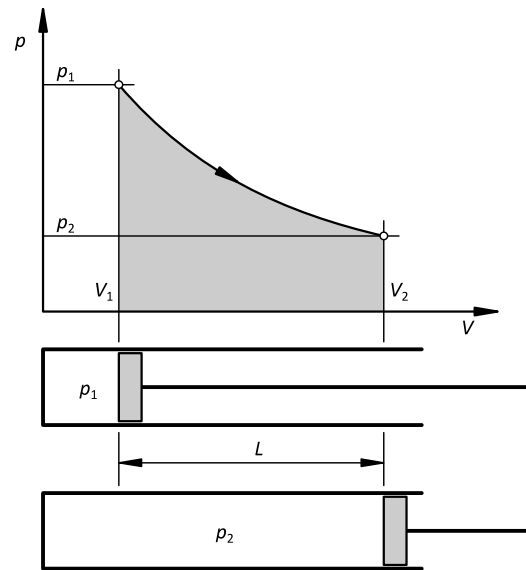
**Diagram p-v za zrak (idealni plin)**



**Diagram T-s za zrak (idealni plin)**

Mehansko delo si najlažje predstavljamo kot delo, ki ga opravi sila  $F$ , ki premakne breme za razdaljo  $L$ . Primer je delovna snov (plin) v valju s tlakom (sila na enoto površine), višjim od zunanjega, ki odriva bat, s katerim je plin zaprt v valju.





**Opravljanje dela pri ekspanziji v valju**

Zaradi povečevanja prostornine plina tlak v valju pada, s tem pa se spreminja tudi sila, s katero delovna snov potiska bat. V vsakem trenutku deluje na bat sila  $p \cdot A$ , ki ob premiku za  $dL$  opravi delo  $dW_a$ , na celotni poti pa  $W_{a,12}$ , kar imenujemo absolutno delo ali delo enkratne ekspanzije.

$$dW_a = p \cdot A \cdot dL = p \cdot dV$$

$$W_{a,12} = \int_1^2 p \cdot dV$$

V diagramu  $p$ - $v$  torej površina pod krivuljami preobrazb, ki povezujejo posamezne točke na poti od začetka do konca preobrazbe, predstavlja delo, ki ga dovedemo ali pridobimo pri preobrazbi.

Podobno velja tudi za diagram  $T$ - $s$ , kjer upoštevamo definicijo entropije in izrazimo celotno prenešeno toploto med začetno in končno točko 1 in 2.

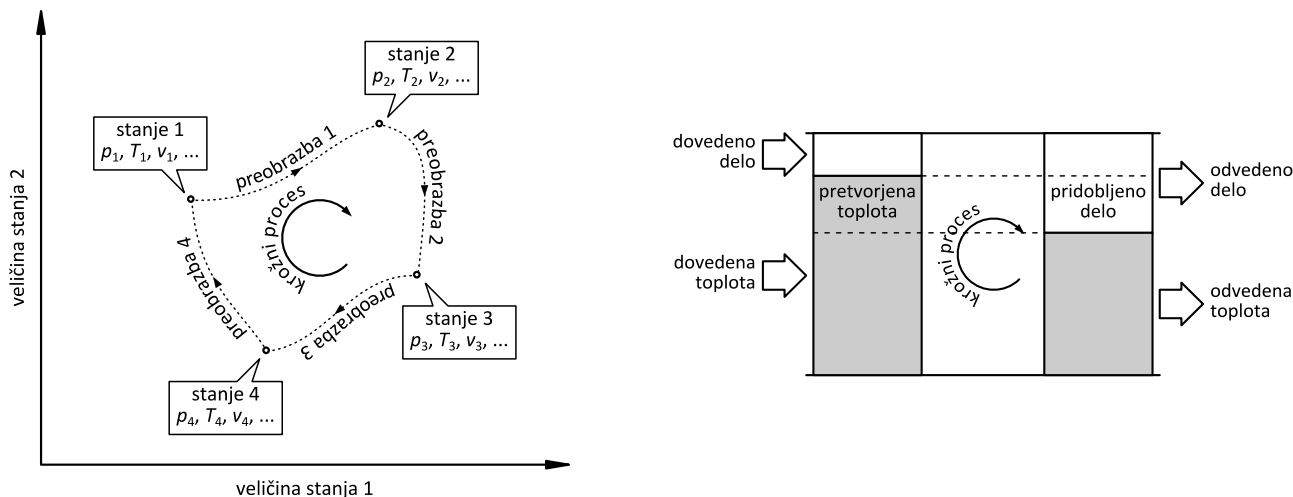
$$dS = \frac{dQ}{T}$$

$$Q_{12} = \int_1^2 T \cdot dS$$

Površina pod krivuljo v diagramu  $T$ - $s$  torej predstavlja toploto, ki jo med preobrazbo dovedemo ali odvedemo delovni snovi.

### 1.3 Krožni proces

Zaporedje različnih preobrazb, ki pripelje stanje delovne snovi nazaj v izhodiščno stanje, imenujemo **krožni proces** in je osnova za večino tehničnih procesov, s katerimi pretvarjamo različne oblike energije preko toplote v mehansko delo. Primeri so pridobivanje mehanskega dela (ki ga pogosto pretvorimo še naprej v električno energijo) v termoelektrarnah, jedrskih elektrarnah, motorjih z notranjim zgorevanjem, turbinskih letalskih motorjih ...



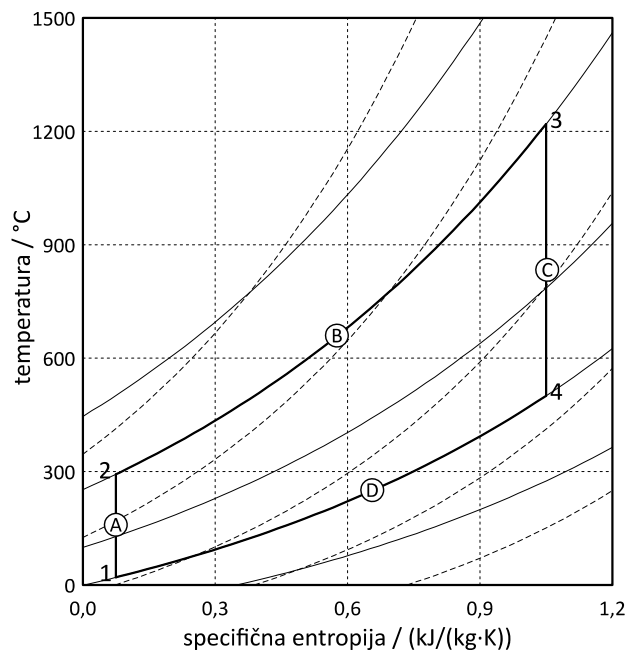
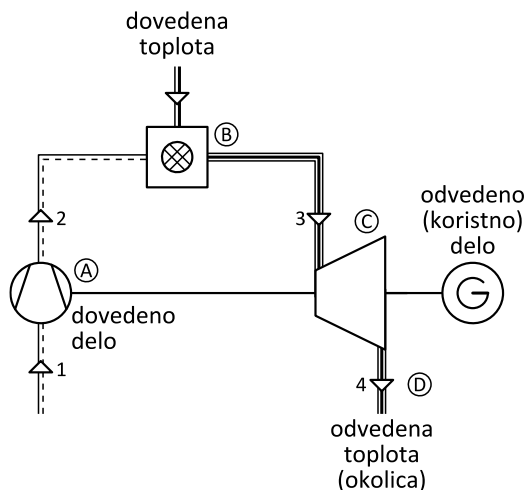
*Stanja delovne snovi, preobrazbe, krožni proces (levo)  
in pretvorba energij v krožnem procesu (desno)*

Osnovni namen krožnih procesov je pretvorba toplote, ki jo je relativno enostavno pridobiti iz primarnih virov energije, v mehansko delo oz. električno energijo, ki je v praksi bolj uporabna oblika energije. V splošnem v krožni proces dovajamo energijo v obliki toplote (z visoko temperaturo) in mehanskega dela, iz procesa pa prav tako odvedemo toploto (z nizko temperaturo) in mehansko delo. Pri tem je odvedenega mehanskega dela več kot dovedenega, hkrati pa je odvedene toplote manj kot dovedene. Za celoten krožni proces, kot tudi za posamezne dele procesa, velja 1. glavni zakon termodinamike ali zakon o ohranitvi energije.

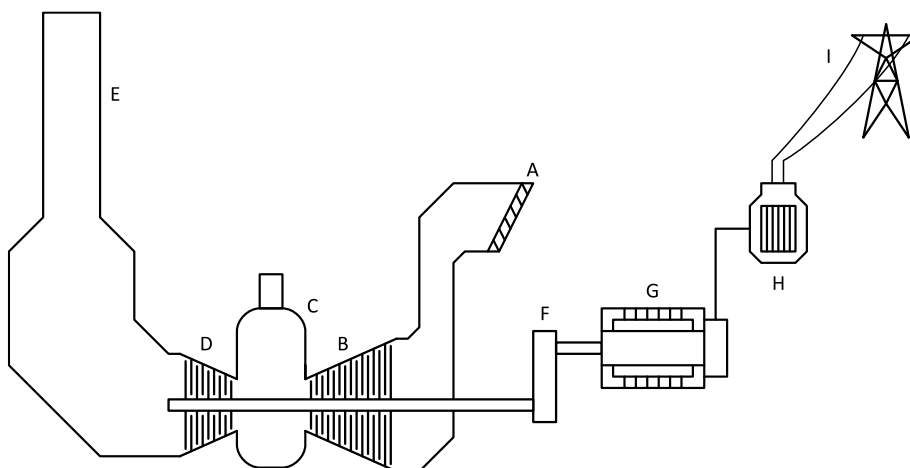
V praksi uporabljamo različne krožne procese, v katerih kot delovna snov nastopajo plini. Dejansko ti plini niso idealni, poleg tega tudi preobrazbe v procesih ne potekajo po idealnih 'izo' linijah. Teoretičen potek procesov pa lahko predstavimo na način, ki je prikazan na naslednjih slikah. V plinskem energetskem postrojenju so posamezne faze procesa jasno ločene:

- A. dovod mehanskega dela poteka v kompresorju, vir energije je običajno delo, ki ga v nadaljevanju procesa pridobiva turbina;
- B. dovod toplote poteka v zgorevalni komori, kjer zgoreva gorivo, sprošča kemično vezano energijo in jo oddaja delovni snovi (zrak);

- C. pridobivanje mehanskega dela poteka v plinski turbini, ki s pridobljeno energijo poganja kompresor in generator, iz katerega dobimo koristno (električno) energijo iz postrojenja;
- D. odvod toplote poteka v primeru odprtega sistema v okolici, kamor spustimo izrabljeno delovno snov.

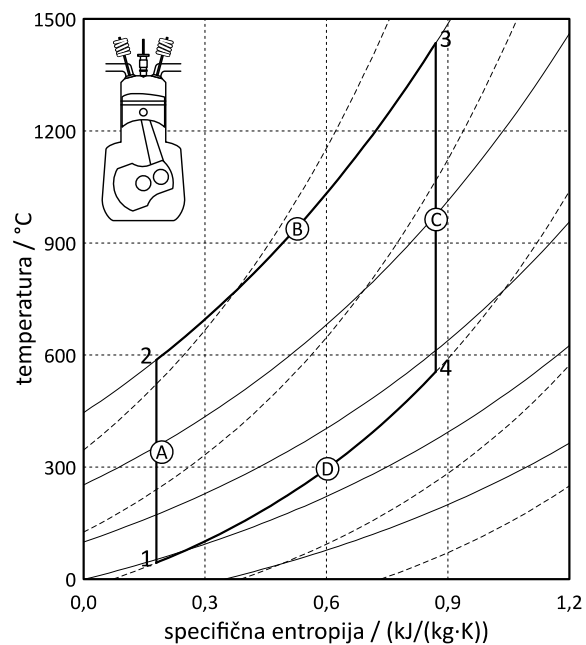
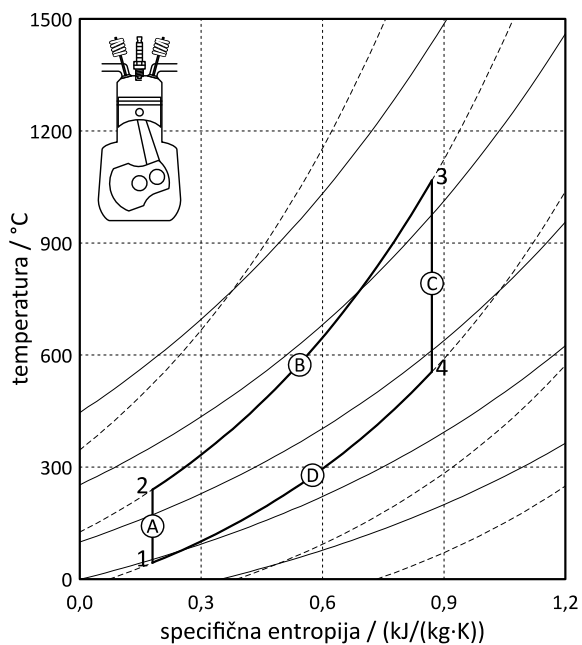


**Joulov plinski proces: levo - shema postrojenja, desno - diagram T-s za plinski proces**  
**A: kompresija - dovedeno mehanskega dela, B: zgorevanje - dovedena toplota,**  
**C: ekspanzija - pridobivanje mehanskega dela, D: izpuh v okolico - odvod toplote**



- |                            |                    |                             |
|----------------------------|--------------------|-----------------------------|
| A: zajem in filter za zrak | D: plinska turbina | G: električni generator     |
| B: aksialni kompresor      | E: dimnik          | H: električni transformator |
| C: zgorevalna komora       | F: reduktor        | I: električno omrežje       |

**Tehnološka shema plinske elektrarne**



**Plinski proces v motorju z notranjim zgorevanjem: levo - Otto, desno - Diesel**  
**A: kompresija - dovod mehanskega dela,**  
**B: zgorevanje - dovod toplote (Otto - izohorno, Diesel - izobarno),**  
**C: ekspanzija - pridobivanje mehanskega dela, D: ohlajanje - odvod toplote**

## 1.4 Naloge

### 1-1

Metan ( $\text{CH}_4$ ) želimo shraniti v 155-litrski jeklenki pri tlaku največ 20 bar. Od začetnega tlaka 1 bar in temperature  $16\text{ }^\circ\text{C}$  ga izentropno komprimiramo do končnega tlaka. Po kompresiji in pred shranjevanjem v jeklenki lahko metan še izobarno ohladimo.

- a) Kolikšna je masa metana v jeklenki, če ga po kompresiji ne hladimo?  
 b) Za koliko moramo metan izobarno ohladiti, da bo šlo v jeklenko 2 kg metana?

---

podano

$$\begin{aligned} V &= 155\text{ L} = 0,155\text{ m}^3 \\ p_2 &= 20\text{ bar} = 20 \cdot 10^5\text{ Pa} \\ p_1 &= 1\text{ bar} = 10^5\text{ Pa} \\ T_1 &= 16\text{ }^\circ\text{C} = 289,15\text{ K} \\ m_3 &= 2\text{ kg} \end{aligned}$$

iskano

$$m, \Delta T$$

tabele

$$\kappa = 1,32$$

$$R = 518,7\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$


---

a)

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 597,8\text{ K} = 324,6\text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_2 \cdot V = m \cdot R \cdot T_2 \rightarrow m = \frac{p_2 \cdot V}{R \cdot T_2} = 1\text{ kg}$$

b)

$$T_3 = \frac{p_2 \cdot V}{m_3 \cdot R} = 298,8\text{ K} = 25,7\text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = T_2 - T_3 = 298,91\text{ K}$$

**1-2**

V tehnološkem procesu izentropno komprimiramo 1,7 kg/s amonijaka ( $\text{NH}_3$ ) s temperaturo  $22\text{ }^\circ\text{C}$  in tlakom 1 bar do tlaka 3,5 bar. Nato mu odvajamo 258 kW toplotnega toka pri konstantnem tlaku.

- a) Kolikšna je končna temperatura?  
b) Kolikšen je končni volumski pretok?

---

podano

$$\dot{m} = 1,7 \text{ kg/s}$$

$$T_1 = 22\text{ }^\circ\text{C} = 295,15 \text{ K}$$

$$p_1 = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_2 = 3,5 \text{ bar} = 3,5 \cdot 10^5 \text{ Pa} = p_3$$

$$\dot{Q}_{\text{od}} = 258 \text{ kW} = 258\,000 \text{ W}$$

iskano

$$T_3, \dot{V}_3$$

tabele

$$\kappa = 1,31$$

$$c_p = 2055 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$R = 488,2 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$


---

a)

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 397,0 \text{ K} = 123,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_{\text{od}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2) \rightarrow T_3 = \frac{\dot{Q}_{\text{od}}}{\dot{m} \cdot c_p} + T_2 = 323,15 \text{ K} = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$$

b)

$$p_2 \cdot \dot{V}_3 = \dot{m} \cdot R \cdot T_3 \rightarrow \dot{V}_3 = \frac{\dot{m} \cdot R \cdot T_3}{p_2} = 0,766 \text{ m}^3/\text{s}$$

**1-3**

V jeklenki s prostornino 75 L je dušik ( $N_2$ ) s tlakom 20 bar in temperaturo 15 °C. Jeklenka je konstruirana tako, da zdrži tlak največ 30 bar. Dušik spustimo v plinovod, v katerem je tlak 990 mbar, temperatura 15 °C, premer cevi pa je 12 mm. Pretok dušika je 1 g/s.

- Kolikšna je masa dušika v jeklenki?
- Do katere temperature se sme segreti jeklenka (in plin v njej), da tlak v njej ne preseže dovoljenega?
- Kolikšen je volumski tok dušika v cevovodu?
- Kolikšna je hitrost dušika v cevovodu?

podano

$$V_1 = 75 \text{ L} = 0,075 \text{ m}^3$$

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

$$T_1 = 15 \text{ °C} = 288,15 \text{ K}$$

$$p_{\max} = 30 \text{ bar} = 30 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_2 = 990 \text{ mbar} = 0,99 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$d_c = 12 \text{ mm} = 0,012 \text{ m}$$

$$\dot{m} = 1 \text{ g/s} = 0,001 \text{ kg/s}$$

iskano

$$m, T_{\max}, \dot{V}, c$$

tabele

$$R = 296,7 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$\text{a) } p \cdot V = m \cdot R \cdot T \rightarrow m = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = 1,755 \text{ kg}$$

$$\text{b) } T_{\max} = \frac{p_{\max} \cdot V_1}{m \cdot R} = 432,2 \text{ K} = 159,1 \text{ °C}$$

$$\text{c) } \dot{V} = \frac{\dot{m} \cdot R \cdot T_2}{p_2} = 0,00086 \text{ m}^3/\text{s} = 51,8 \text{ L}/\text{min}$$

$$\text{d) } c = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot d_c^2} = 7,64 \text{ m/s}$$

**1-4**

Balon napolnimo s helijem pri okoliški temperaturi 22 °C in tlaku 1 bar. Prostornina balona je pri tem 450 m<sup>3</sup>. Na višini 5000 m je okoliški tlak samo še 540 mbar, temperatura pa -18 °C. Helij je bil shranjen v 2500-litrski cisterni, v kateri je bila temperatura enaka okoliški, po praznjenju pa je v cisterni še vedno tlak 1,5 bar.

- Kolikšna je prostornina balona v zraku?
- Kolikšna masa helija je ostala v cisterni po polnjenju balona?
- Kolikšen je bil tlak v cisterni, preden smo napolnili balon?

podano

$$T_1 = 22 \text{ °C} = 295,15 \text{ K}$$

$$p_1 = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$V_{\text{bal1}} = 450 \text{ m}^3$$

$$h_2 = 5000 \text{ m}$$

$$p_2 = 540 \text{ mbar} = 540 \cdot 10^2 \text{ Pa}$$

$$T_2 = -18 \text{ °C} = 255,15 \text{ K}$$

$$V_{\text{cis}} = 2500 \text{ l} = 2,5 \text{ m}^3$$

$$T_{\text{cis1}} = T_1$$

$$p_{\text{cis2}} = 1,5 \text{ bar} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

iskano

$$V_{\text{bal2}}, m_{\text{cis2}}, p_{\text{cis1}}$$

tabele

$$R = 2078 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$\text{a) } \frac{p_1 \cdot V_{\text{bal1}}}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_{\text{bal2}}}{T_2} \rightarrow V_{\text{bal2}} = \frac{p_1 \cdot V_{\text{bal1}} \cdot T_2}{T_1 \cdot p_2} = 720,4 \text{ m}^3$$

$$\text{b) } m_{\text{cis2}} = \frac{p_{\text{cis2}} \cdot V_{\text{cis}}}{R \cdot T_{\text{cis1}}} = 0,611 \text{ kg}$$

$$\text{c) } p_{\text{cis1}} \cdot V_{\text{cis}} = (m_{\text{bal}} + m_{\text{cis2}}) \cdot R \cdot T_{\text{cis1}}$$

$$m_{\text{bal}} = \frac{p_1 \cdot V_{\text{bal1}}}{R \cdot T_1} = 73,37 \text{ kg}$$

$$p_{\text{cis1}} = \frac{(m_{\text{bal}} + m_{\text{cis1}}) \cdot R \cdot T_{\text{cis1}}}{V_{\text{cis}}} = 18\,150\,000 \text{ Pa} = 181,5 \text{ bar}$$



**1-5**

Kisik z začetnim stanjem 1 bar in 18 °C izentropno komprimiramo do tlaka 65 bar in ga shranjujemo v jeklenko. Kisik se v jeklenki sčasoma ohladi na temperaturo okolice 25 °C. Prostornina jeklenke je 150 L.

- Kolikšna je temperatura kisika, ko ga polnimo v jeklenko (takoj po kompresiji)?
- Kolikšen je končni tlak kisika v jeklenki?
- Kolikšna je masa kisika v jeklenki?
- Kolikšen bi moral biti tlak polnjenja, da bi bila masa kisika v jeklenki po ohladitvi 4 kg?

---

podano

$$p_1 = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_1 = 18 \text{ °C} = 291,15 \text{ K}$$

$$p_2 = 65 \text{ bar} = 65 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_3 = 25 \text{ °C} = 298,15 \text{ K}$$

$$V = 150 \text{ L} = 0,15 \text{ m}^3$$

$$m_{3d} = 4 \text{ kg}$$

iskano

$$T_2, p_3, m_3, p_{2d}$$

tabele

$$R = 259,8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$\kappa = 1,4$$


---

a)

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 959,6 \text{ K} = 686,5 \text{ °C}$$

b)

$$\frac{p_2}{p_3} = \frac{T_2}{T_3} \rightarrow p_3 = \frac{p_2 \cdot T_3}{T_2} = 2\,019\,557 \text{ Pa} = 20,20 \text{ bar}$$

c)

$$m_3 = \frac{p_3 \cdot V_3}{R \cdot T_3} = 3,91 \text{ kg}$$

d)

$$p_{2d} = p_1 \cdot \left( \frac{m_{3d} \cdot R \cdot T_1}{p_1 \cdot V_3} \right)^{\kappa} = 6\,708\,332 \text{ Pa} = 67,08 \text{ bar}$$

## 1-6

Zrak z začetnim tlakom 1 bar in temperaturo 20 °C izentropno komprimiramo do tlaka 2,7 bar, nato pa ga izohorno segrejemo do 160 °C. Masa zraka je 0,4 kg.

- Kolikšen je končni tlak zraka?
- Koliko dela porabimo za kompresijo?
- Koliko toplote potrebujemo za segrevanje?
- Nariši proces v diagramu  $p$ - $v$ !

podano

$$p_1 = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_1 = 20 \text{ °C} = 293,15 \text{ K}$$

$$p_2 = 2,7 \text{ bar} = 2,7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_3 = 160 \text{ °C} = 433,15 \text{ K}$$

$$m = 0,4 \text{ kg}$$

iskano

$$p_3, W_k, Q_s$$

tabele

$$\kappa = 1,4$$

$$c_p = 1005 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

- a) 1 → 2: izentropna kompresija

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 389,3 \text{ K} = 116,2 \text{ °C}$$

- 2 → 3: izohorno segrevanje

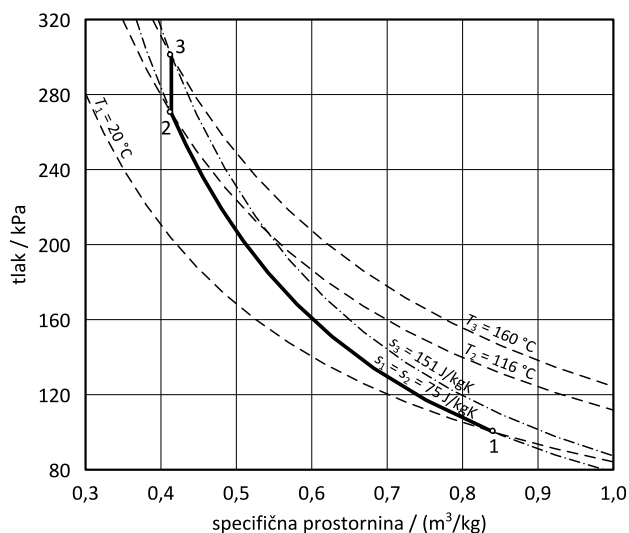
$$\frac{p_2}{p_3} = \frac{T_2}{T_3} \rightarrow p_3 = \frac{p_2 \cdot T_3}{T_2} = 300\,376 \text{ Pa}$$

- b)
- $W_k = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = 38\,671 \text{ J}$

- c)
- $Q_s = m \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) =$

$$= m \cdot \frac{c_p}{\kappa} \cdot (T_3 - T_2) = 12\,578 \text{ J}$$

- d)



**1-7**

V Joulov plinski proces vstopa zrak s tlakom 1 bar in temperaturo 10 °C, nato ga izentropno komprimiramo na tlak 8 bar. Komprimirani zrak v zgorevalni komori segrejemo na končno temperaturo 1050 °C. Masni tok zraka je 22 kg/s.

- Kolikšna je temperatura zraka po kompresiji?
- Kolikšna moč je potrebna za kompresijo?
- Kolikšen toplotni tok za segrevanje?

---

podano

$$p_1 = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_1 = 10 \text{ °C} = 283,15 \text{ K}$$

$$p_2 = 8 \text{ bar} = 8 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_3 = 1050 \text{ °C} = 1323,15 \text{ K}$$

$$\dot{m} = 22 \text{ kg/s}$$

iskano

$$T_2, P_k, \dot{Q}_s$$

tabele

$$\kappa = 1,4$$

$$c_p = 1005 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$$


---

a)

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 512,9 \text{ K} = 239,8 \text{ °C}$$

b)

$$P_k = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = 5\,080\,023 \text{ W} = 5,08 \text{ MW}$$

c)

$$\dot{Q}_s = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2) = 17\,914\,377 \text{ W} = 17,9 \text{ MW}$$

**1-8**

V dizelskem motorju (idealiziran proces) okoliški zrak s tlakom 1 bar in temperaturo 23 °C izentropno komprimiramo do tlaka 42 bar. Nato se med zgorevanjem goriva zrak izobarno segreje, pri čemer se mu prostornina poveča na 2-kratno vrednost glede na prostornino po kompresiji. Po segrevanju zrak izentropno ekspandira do začetne prostornine. Motor je štiritakten in ima en valj, v katerem je 0,6 g zraka, vrti pa se s 750 vrtljaji v minuti.

- Kolikšna je končna temperatura zraka po zgorevanju?
- Koliko dela porabimo za komprimiranje?
- Koliko toplote za segrevanje se mora sprostiti pri zgorevanju?
- Koliko dela pridobimo pri ekspanziji?
- Kolikšna je moč motorja?
- Kolikšen je energijski izkoristek motorja?

podano

$$p_1 = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_1 = 23 \text{ °C} = 296,15 \text{ K}$$

$$p_2 = 42 \text{ bar} = 42 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$V_3 = 2 \cdot V_2$$

$$z = 4$$

$$m = 0,6 \text{ g} = 0,0006 \text{ kg}$$

$$n = 750 \text{ min}^{-1} = 12,5 \text{ s}^{-1}$$

iskano

$$T_3, W_k, Q_s, W_e, P_m, \eta$$

tabele

$$\kappa = 1,4$$

$$c_p = 1005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

- a) 1 → 2: izentropna kompresija

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 861,6 \text{ K} = 588,4 \text{ °C}$$

- 2 → 3: izobarno segrevanje

$$\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3} \rightarrow T_3 = T_2 \cdot \frac{V_3}{V_2} = 1723,2 \text{ K} = 1450,0 \text{ °C}$$

- b)  $W_k = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = 341,0 \text{ J}$

- c)  $Q_s = m \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2) = 519,5 \text{ J}$

d) 3 → 4: izentropna ekspanzija

$$T_4 = T_3 \cdot \left( \frac{V_3}{V_4} \right)^{\kappa-1}$$

$$V_3 = 2 \cdot V_2 = 2 \cdot \frac{m \cdot R \cdot T_2}{p_2}$$

$$V_4 = V_1 = \frac{m \cdot R \cdot T_1}{p_1}$$

$$T_4 = T_3 \cdot \left( \frac{2 \cdot T_2 \cdot p_1}{p_2 \cdot T_1} \right)^{\kappa-1} = 781,5 \text{ K} = 508,4 \text{ °C}$$

$$W_e = m \cdot c_p \cdot (T_3 - T_4) = 567,8 \text{ J}$$

e)

$$P_m = \frac{(W_e - W_k) \cdot n}{\frac{z}{2}} = 1418 \text{ W}^*$$

f)

$$\eta = \frac{W_e - W_k}{Q_s} = 43,7 \%$$

---

\* takt pri motorjih z notranjim zgorevanjem je gib bata med skrajnima legama (pol vrtljaja pogonske gredi), štiritakten motor pridobi delo v dveh polnih vrtljajih pogonske gredi



## 2 Vodna para

### 2.1 Termodinamske lastnosti vode in vodne pare

Idealni plin je teoretična snov s poenostavljenimi lastnostmi, pri katerih veljajo relativno enostavne zveze med veličinami stanja. Kot idealne lahko v določenih razmerah obravnavamo realne pline, če je njihovo stanje dovolj oddaljeno od stanj, pri katerih potekajo fazne spremembe. Sicer je snov potrebno obravnavati kot realno. Tudi v tem primeru obstajajo medsebojne povezave med veličinami stanja in večinoma tudi enake splošne zakonitosti kot pri idealnih plinih. Vendar povezav med veličinami stanja običajno ni mogoče izraziti z enostavnimi izrazi, kot je to primer pri idealnih plinih. Namesto tega so veličine stanja lahko podane tabelarično ali grafično. Za vodo in vodno paro je tako na voljo več virov, v katerih so bolj ali manj podrobno zbrane njune termodinamične lastnosti, npr. Strojniški priročnik\* in Tabele termodinamičnih lastnosti vode in vodne pare†.

Poleg veličin stanja, ki smo jih uporabljali pri obravnavi idealnih plinov, se pri realnih snoveh kot uporabna veličina pokaže tudi entalpija ( $H$ ), ki jo običajno izražamo na maso snovi kot specifično entalpijo ( $h$ ). Ta je definirana kot vsota notranje energije in volumskega dela.

$$h = u + p \cdot v$$

Entalpija na ta način združuje dve obliki energije, ki se navadno spreminjata pri termodinamskih procesih. V primeru, da delovni snovi dovajamo energijo v obliki toplote ali dela, se entalpija delovne snovi povečuje, če pa energijo odvajamo, se entalpija zmanjšuje. Sprememba entalpije je neposredno povezana z dovedeno ali odvedeno količino energije. V tehniški praksi tako uporabljamo preprosta izraza za

- dovod (segrevanje) ali odvod toplote (hlajenje) brez izmenjave dela z drugimi sistemi (poteka v prenosnikih toplote ...):

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h$$

- dovod (poraba) ali odvod (pridobivanje) mehanske moči brez izmenjave toplote z drugimi sistemi (poteka v motorjih, turbinah, črpalkah, kompresorjih ...):

$$P = \dot{m} \cdot \Delta h$$

---

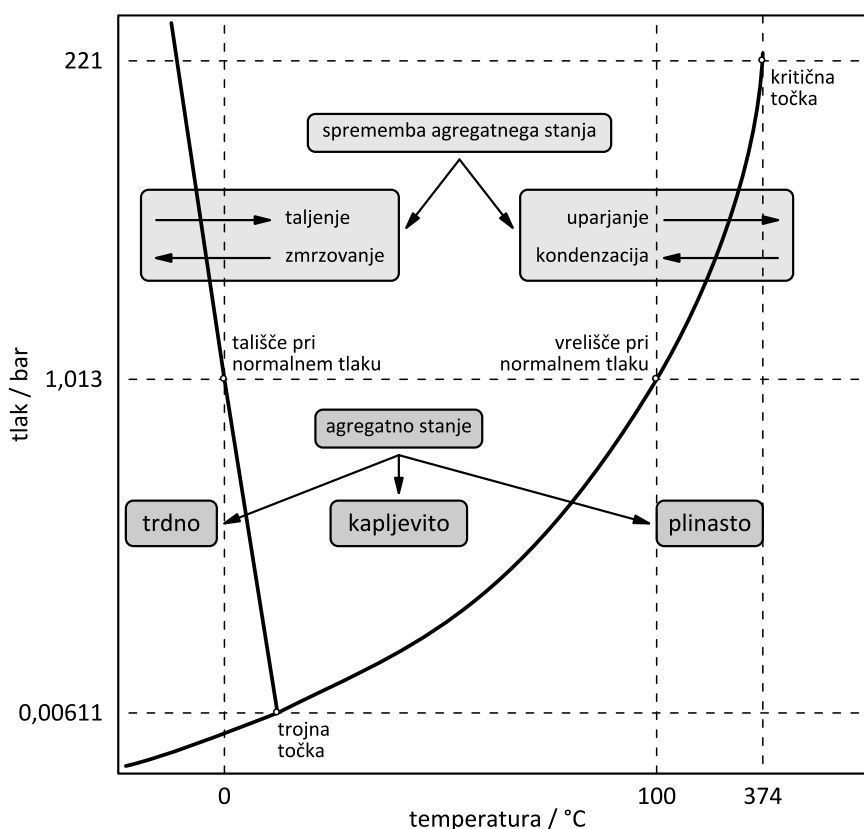
\* *Krautov strojniški priročnik, 17. slovenska popravljena izd., predelana, 1. natis.* Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo. 2019

† *Kuštrin, I., Senegačnik, A. Tabele termodinamičnih lastnosti vode in vodne pare: Po modelu IAPWS-IF97.* V Ljubljani: Fakulteta za strojništvo. 2001

Pri obravnavanju vode kot delovne snovi je potrebno upoštevati njena različna agregatna stanja, pri čemer bosta za obravnavane primere pomembna le kapljevito in plinasto stanje. Kljub temu da obravnavamo le dve agregatni stanji, ločimo tri značilna področja, v katerih se delovna snov različno odziva na vplive iz okolice, temu primerno pa se tudi spreminjajo njene lastnosti. Vsako izmed treh področij, oziroma stanj vode, lahko dosežemo samo pri ustreznih pogojih (tlaku in temperaturi). Ta področja so:

### 1. kapljevita voda

Obstaja pri temperaturah, ki so nižje od temperature vrelišča (nasičenja) pri danem tlaku, oziroma pri tlakih, ki so višji od tlaka nasičenja pri dani temperaturi.



*Odvisnost agregatnega stanja vode od tlaka in temperature*

### 2. plinasta (pregreta) para

Obstaja pri temperaturah, ki so višje od temperature vrelišča (nasičenja) pri danem tlaku, oziroma pri tlakih, ki so nižji od tlaka nasičenja pri dani temperaturi.

### 3. mokra para (zmes vrele vode in nasičene pare).



Obstaja lahko samo pri točno določenih pogojih, imenovanih stanje nasičenja. Pri določeni temperaturi obstaja točno določen tlak (tlak nasičenja), pri katerem lahko poteka fazna sprememba. Enako pri določenem tlaku obstaja točno določena temperatura nasičenja, pri kateri poteka fazna sprememba. Ta poteka preko področja mokre pare. Skrajni točki tega področja sta vreła voda in nasičena para, vsa vmesna stanja pa opišemo z dodatno lastnostjo snovi – suhostjo pare ( $x$ ). Ta je definirana kot delež pare v celotni masi zmesi vode in pare, njena vrednost pa je lahko od 0 do 1.

$$x = \frac{m_{\text{para}}}{m_{\text{voda}} + m_{\text{para}}}$$

Veličine stanja (specifično prostornino, entalpijo in entropijo) mokre pare določimo z izrazi

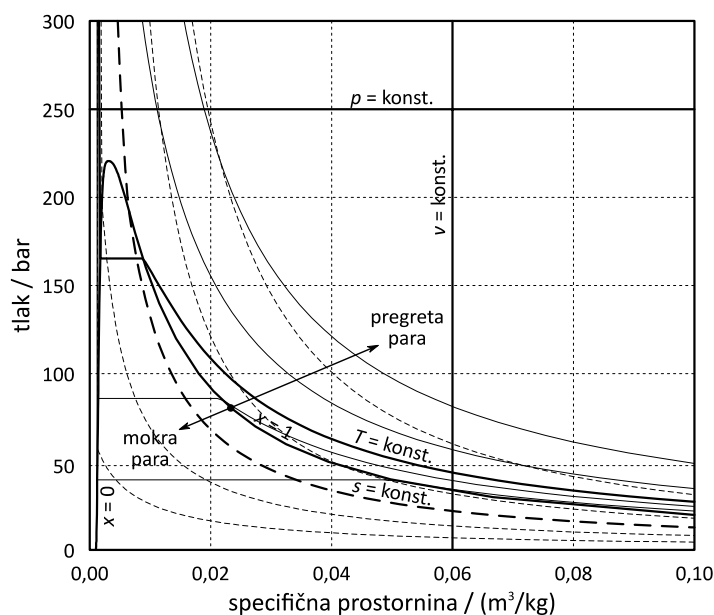
$$v = v' + x \cdot (v'' - v')$$

$$h = h' + x \cdot (h'' - h')$$

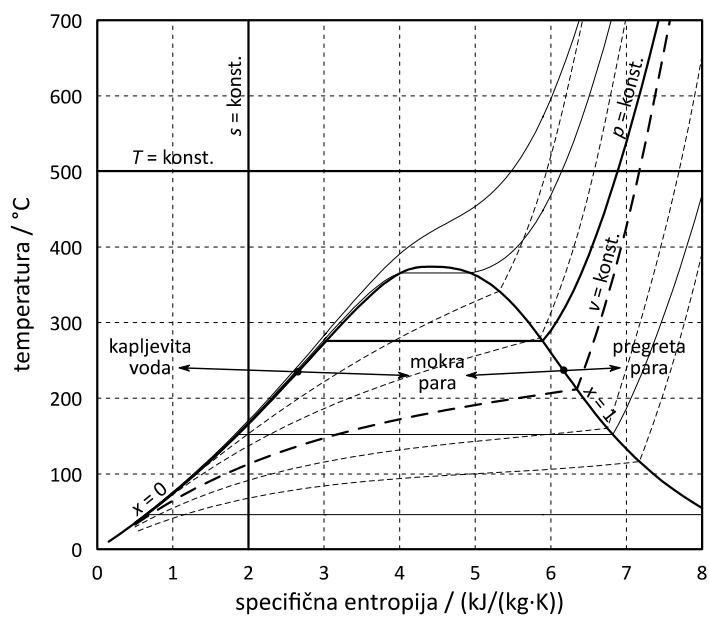
$$s = s' + x \cdot (s'' - s')$$

Pri tem veljajo vrednosti  $v'$ ,  $h'$  in  $s'$  za vrelo vodo (stanja na vrelni krivulji),  $v''$ ,  $h''$  in  $s''$  pa za nasičeno paro (stanja na rosilni krivulji) pri danem tlaku ali temperaturi.

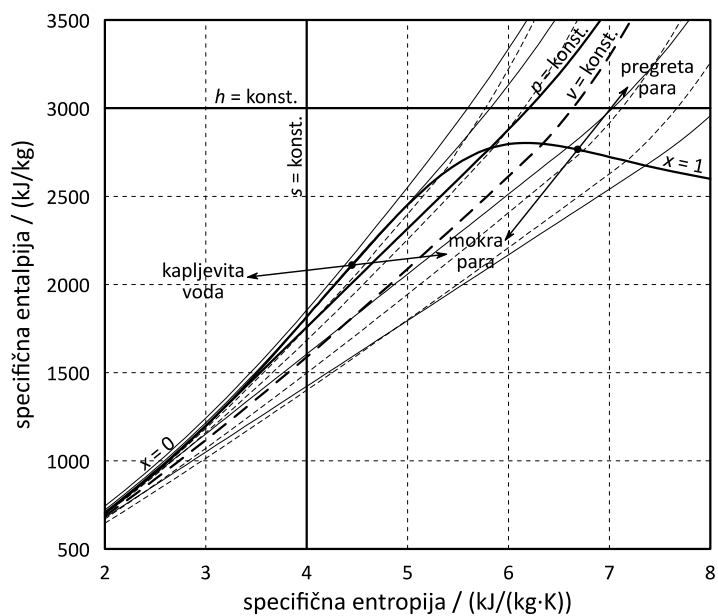
Povezave med osnovnimi veličinami stanja lahko podobno kot v primeru idealnih plinov prikažemo grafično z ustreznimi diagrami, ki so zaradi posebnosti spremembe agregatnega stanja drugačni kot pri idealnih plinih. Dodatno je označena meja fazne spremembe ( $x = 0$  in  $x = 1$ ), ter področja vode, pregrete pare in mokre pare. Poleg diagramov  $p$ - $v$  in  $T$ - $s$  je pri vodi pogosto uporabljen tudi diagram  $h$ - $s$ .



**Diagram  $p$ - $v$  za vodo in vodno paro**



**Diagram  $T$ - $s$  za vodo in vodno paro**



**Diagram  $h$ - $s$  za vodo in vodno paro**

### 2.1.1 Tabelarično določanje termodinamskih lastnosti vode in vodne pare

Ker lastnosti realnih snovi ni mogoče popisati z enostavnim izrazom, kot je plinska enačba, so pogosto podane tabelarično. Pri tem so tabele razdeljene glede na področje, v katerem se nahaja stanje snovi (voda, para, mokra para). Lastnosti za kapljevito vodo in vodno paro so podane v več ločenih tabelah za različne tlake delovne snovi. Pri znanem tlaku (tabela) in temperaturi (vrstica v tabeli) lahko torej odčitamo vrednosti za specifično prostornino ( $v$ ), specifično entalpijo ( $h$ ) in specifično entropijo ( $s$ ) vode ali pare. Ponekod je posebej označeno tudi področje, kjer pride do spremembe agregatnega stanja, torej temperatura nasičenja in ustrezne veličine stanja za vrelo kapljevino in nasičeno paro.

| $T$<br>°C | $v$<br>m <sup>3</sup> /kg | $h$<br>kJ/kg        | $s$<br>kJ/(kg·K) |
|-----------|---------------------------|---------------------|------------------|
|           |                           | $p = 1 \text{ bar}$ |                  |
| 0         | 0,0010002                 | 00,06               | -0,0001          |
| 10        | 0,0010003                 | 42,12               | 0,1511           |
| 20        | 0,001002                  | 84,01               | 0,2965           |
| 30        | 0,001004                  | 125,8               | 0,4368           |
| 40        | 0,001008                  | 167,6               | 0,5724           |
| 50        | 0,001012                  | 209,4               | 0,7038           |
| 60        | 0,001017                  | 251,2               | 0,8312           |
| 70        | 0,001023                  | 293,1               | 0,9550           |
| 80        | 0,001029                  | 335,0               | 1,075            |
| 90        | 0,001036                  | 377,0               | 1,193            |
| 99,61     | 0,001043                  | 417,4               | 1,303            |
|           | 1,694                     | 2675                | 7,359            |
| 100       | 1,696                     | 2676                | 7,361            |
| 120       | 1,793                     | 2717                | 7,468            |
| 140       | 1,889                     | 2757                | 7,567            |
| 160       | 1,984                     | 2796                | 7,661            |
| 180       | 2,079                     | 2836                | 7,750            |
| 200       | 2,172                     | 2875                | 7,836            |
| 220       | 2,266                     | 2915                | 7,917            |
| 240       | 2,360                     | 2955                | 7,996            |
| 260       | 2,453                     | 2994                | 8,072            |

**Tabele termodinamskih lastnosti vode in vodne pare**

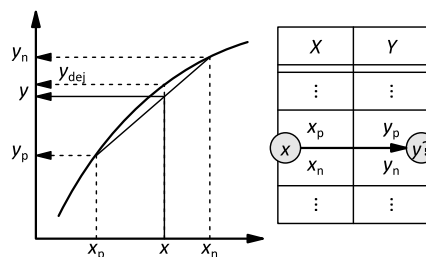
Za področje mokre pare veljata ločeni tabeli, ki sicer vsebujeta enake podatke, ti pa so v eni tabeli urejeni po enakomerno naraščajočih temperaturah, v drugi pa po tlakih. Veličine, označene z eno črtico ( $v'$ ,  $h'$  in  $s'$ ), veljajo za vrelo vodo, veličine, označene z dvema črticama ( $v''$ ,  $h''$  in  $s''$ ), pa za nasičeno paro.

| $p$<br>bar | $T$<br>°C | $v'$<br>m <sup>3</sup> /kg | $v''$<br>m <sup>3</sup> /kg | $h'$<br>kJ/kg | $h''$<br>kJ/kg | $s'$<br>kJ/(kg·K) | $s''$<br>kJ/(kg·K) |
|------------|-----------|----------------------------|-----------------------------|---------------|----------------|-------------------|--------------------|
| 3,5        | 138,9     | 0,001079                   | 0,524200                    | 584,3         | 2732           | 1,727             | 6,940              |
| 4,0        | 143,6     | 0,001084                   | 0,462400                    | 604,7         | 2738           | 1,777             | 6,895              |
| 4,5        | 147,9     | 0,001088                   | 0,413900                    | 623,2         | 2743           | 1,821             | 6,856              |
| 5,0        | 151,8     | 0,001093                   | 0,374800                    | 640,2         | 2748           | 1,861             | 6,821              |
| 6,00       | 158,8     | 0,001101                   | 0,315600                    | 670,5         | 2756           | 1,931             | 6,759              |
| 7,00       | 165,0     | 0,001108                   | 0,272800                    | 697,1         | 2763           | 1,992             | 6,707              |
| 8,00       | 170,4     | 0,001115                   | 0,240300                    | 721,0         | 2768           | 2,046             | 6,662              |
| 9,00       | 175,4     | 0,001121                   | 0,214900                    | 742,7         | 2773           | 2,094             | 6,621              |
| 10         | 179,9     | 0,001127                   | 0,194300                    | 762,7         | 2777           | 2,138             | 6,585              |
| 12         | 188,0     | 0,001139                   | 0,163200                    | 798,5         | 2784           | 2,216             | 6,522              |
| 14         | 195,0     | 0,001149                   | 0,140800                    | 830,1         | 2789           | 2,284             | 6,468              |

Tabele termodinamskih lastnosti vrele vode in nasičene vodne pare

V primeru, da v tabeli ni podatka za podani tlak ali temperaturo, si pri določevanju lastnosti vode ali pare pomagamo z **linearno interpolacijo** – predpostavimo, da med dvema znanima točkama iz tabele poteka odvisnost med obravnavanima parametroma linearno, torej po premici. Upoštevamo splošni izraz za enačbo premice skozi dve znani točki:

$$y = y_p + \frac{X - X_p}{X_n - X_p} \cdot (y_n - y_p)$$

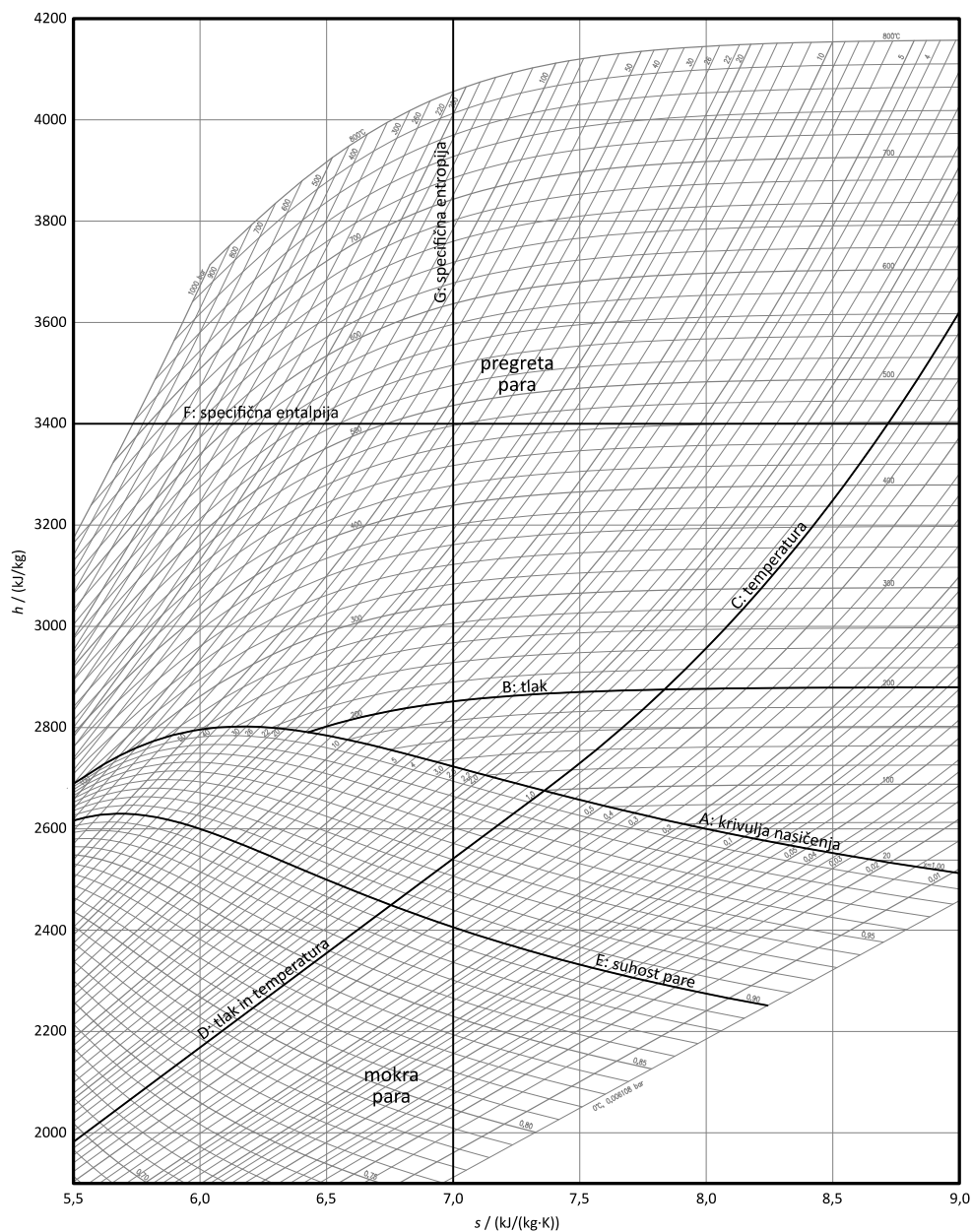


Parameter  $y$  nadomestimo z iskano veličino,  $x$  pa z znano veličino, katere vrednosti ni v tabelah, sta pa v tabelah podatka za predhodno ( $x_p$ ) in naslednjo ( $x_n$ ) vrednost znane veličine in njima ustrezni vrednosti  $y_p$  in  $y_n$  iskane veličine.

Pri interpolaciji je treba paziti, da nikoli (!) ne poteka preko področja fazne spremembe, torej morata tako predhodna ( $p$ ) kot naslednja ( $n$ ) točka ležati v področju istega agregatnega stanja.

### 2.1.2 Določanje lastnosti vodne pare z diagramom

Drugi način za določanje termodinamskih lastnosti vodne pare pa je uporaba Mollierovega diagrama, imenovanega tudi diagram  $h$ - $s$ . V tem diagramu je prikazana povezava med tlakom, temperaturo, entalpijo, entropijo in suhostjo pare (v področju mokre pare). Običajno Molliero diagram prikazuje samo področje pregrete pare in del področja mokre pare.



- A: krivulja nasičenja ( $x = 1$ ) – je meja med področjem pregrete pare in mokre pare in določa točke, kjer se začne ali konča fazna sprememba
- B: izobare ( $p = \text{konst.}$ ) – krivulje, ki označujejo stanja z enakim tlakom
- C: izoterme ( $T = \text{konst.}$ ) – krivulje, ki označujejo stanja z enako temperaturo
- D: izobare in izoterme v področju mokre pare sovpadajo, ker sta tlak in temperatura pri fazni spremembi medsebojno odvisna
- E: krivulje konstantne suhosti pare ( $x = \text{konst.}$ ) – v področju mokre pare poleg tlaka (in pripadajoče temperature nasičenja) točno definirajo stanje snovi
- F: izentalpe ( $h = \text{konst.}$ ) – krivulje, ki označujejo stanja z enako entalpijo
- G: izentrope ( $s = \text{konst.}$ ) – krivulje, ki označujejo stanja z enako entropijo

**Diagram  $h$ - $s$  za vodno paro**

V področju pregrete pare (nad krivuljo nasičenja) lahko stanje pare določimo s poljubnima dvema parametroma, npr. tlak-temperatura, tlak-entropija, temperatura-entalpija ... Pri mokri pari (pod krivuljo nasičenja) pa kombinacija tlak-temperatura ne zadošča, temveč je potreben še dodaten parameter – suhost pare. Na podlagi znanih parametrov lahko iz diagrama enostavno odčitamo tudi neznane vrednosti, točnost odčitkov pa je običajno manjša kot pri uporabi tabel.

## 2.2 Primeri določanja lastnosti vode in vodne pare

Pri odčitavanju parametrov vode in vodne pare iz tabel je treba najprej ugotoviti, v katerem od treh področij (voda, mokra para, pregreta para) se nahaja dano stanje vode/pare. V tabeli za vrelo vodo in nasičeno paro (vrelišče in rosišče) poiščemo meje med posameznimi področji. Pri znanem tlaku ali temperaturi odčitamo parametre za vrelo vodo  $v'$ ,  $h'$  in  $s'$  ter za nasičeno paro  $v''$ ,  $h''$  in  $s''$ . Poleg tega za znani tlak  $p$  odčitamo še temperaturo nasičenja  $T_s(p)^*$  ali pri znani temperaturi  $T$  tlak nasičenja  $p_s(T)$ .

Če sta znana tlak in temperatura, velja:

- pri  $T < T_s(p)$  ali  $p > p_s(T)$  leži dana točka v področju vode
- pri  $T > T_s(p)$  ali  $p < p_s(T)$  leži dana točka v področju (pregrete) pare

V primeru, da poznamo poleg tlaka ali temperature še katerega od drugih treh parametrov ( $v$ ,  $h$ ,  $s$ ), ki ga označimo s splošno oznako  $z$ , pa velja

- pri  $z < z'$  leži dana točka v področju vode
- pri  $z' < z < z''$  leži dana točka v področju mokre pare
- pri  $z > z''$  leži dana točka v področju pregrete pare

Ko ugotovimo področje, v katerem se nahaja dano stanje vode/pare, lahko na ustrezen način določimo tudi manjkajoče lastnosti snovi.

|  |   |
|--|---|
| podano:<br>$p = 20 \text{ bar}$<br>$T = 180 \text{ °C}$  | področje stanja:<br>$p > p_s(T) = 10,026 \text{ bar}$ → voda<br>$T < T_s(p) = 212,38 \text{ °C}$ → voda |
| tabela $p = 20 \text{ bar}$ , vrstica $T = 180 \text{ °C}$ :<br>$v = 0,001127 \text{ m}^3/\text{kg}$<br>$h = 763,69 \text{ kJ/kg}$<br>$s = 2,1382 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ |   |

\* oznaka 's' pomeni nasičenje, ang. saturation

|  |   |
|--|---|
| podano:<br>$p = 5 \text{ bar}$<br>$T = 306 \text{ °C}$   | področje stanja:<br>$p < p_s(T) = 93,375 \text{ bar} \quad \rightarrow \text{para}$<br>$T > T_s(p) = 151,84 \text{ °C} \quad \rightarrow \text{para}$   |
| Tabela z danim tlakom obstaja, ni pa vrstice z dano temperaturo, zato je potrebna interpolacija po temperaturi. Odčitamo vrednosti iz predhodne in naslednje vrstice in izračunamo iskane vrednosti.<br><br>tabela $p = 5 \text{ bar}$ , vrstica $T_p = 300 \text{ °C}$ :<br>$v_p = 0,5226 \text{ m}^3/\text{kg}$<br>$h_p = 3064,60 \text{ kJ/kg}$<br>$s_p = 7,4614 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$<br>tabela $p = 5 \text{ bar}$ , vrstica $T_n = 310 \text{ °C}$ :<br>$v_n = 0,5321 \text{ m}^3/\text{kg}$<br>$h_n = 3085,26 \text{ kJ/kg}$<br>$s_n = 7,4972 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$             | izračun:<br>$v = 0,5226 + \frac{306-300}{310-300} \cdot (0,5321 - 0,5226) =$ $= 0,5283 \text{ m}^3/\text{kg}$ $h = 3064,60 + \frac{306-300}{310-300} \cdot (3085,26 - 3064,60) =$ $= 3077 \text{ kJ/kg}$ $s = 7,4614 + \frac{306-300}{310-300} \cdot (7,4972 - 7,4614) =$ $= 7,483 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$                           |
| podano:<br>$p = 8 \text{ bar}$<br>$h = 3000 \text{ kJ/kg}$   | področje stanja:<br>$h > h''(p) = 2768,30 \text{ kJ/kg} \quad \rightarrow \text{para}$  |
| Tabela z danim tlakom obstaja, v stolpcu z entalpijami pa ni iskane vrednosti, zato je potrebna interpolacija po entalpiji. Odčitamo vrednosti iz predhodne in naslednje vrstice in izračunamo iskane vrednosti.<br><br>tabela $p = 8 \text{ bar}$ , vrstica $T_p = 270 \text{ °C}$ :<br>$v_p = 0,3057 \text{ m}^3/\text{kg}$<br>$h_p = 2993,37 \text{ kJ/kg}$<br>$s_p = 7,1206 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$<br>tabela $p = 8 \text{ bar}$ , vrstica $T_n = 280 \text{ °C}$ :<br>$v_n = 0,3119 \text{ m}^3/\text{kg}$<br>$h_n = 3014,63 \text{ kJ/kg}$<br>$s_n = 7,1594 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ | izračun:<br>$v = 0,3057 + \frac{3000-2993,37}{3014,63-2993,37} \cdot (0,3119 - 0,3057) =$ $= 0,3076 \text{ m}^3/\text{kg}$ $s = 7,1206 + \frac{3000-2993,37}{3014,63-2993,37} \cdot (7,1594 - 7,1206) =$ $= 7,1327 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ $T = 270 + \frac{3000-2993,37}{3014,63-2993,37} \cdot (280 - 270) =$ $= 273,1 \text{ °C}$ |

|   |  |
|---|--|
| <p>podano:</p> $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ $s = 6,75 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$   | <p>področje stanja:</p> $s > s'(T) = 0,7038 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \text{ in}$ $s < s''(T) = 8,0749 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \quad \rightarrow \text{ mokra para}$   |
| <p>V področju mokre pare je tlak zagotovo enak tlaku nasičenja pri dani temperaturi. Druge veličine določimo preko suhosti pare (<math>x</math>).</p> <p>tabela nasičenja, vrstica <math>T = 50 \text{ }^\circ\text{C}</math>:</p> $p_s = 0,12351 \text{ bar}$ $v' = 0,001012 \text{ m}^3/\text{kg}$ $v'' = 12,028 \text{ m}^3/\text{kg}$ $h' = 209,336 \text{ kJ}/\text{kg}$ $h'' = 2591,31 \text{ kJ}/\text{kg}$ $s' = 0,7038 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ $s'' = 8,0749 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$   | <p>izračun:</p> $p = p_s = 0,12351 \text{ bar}$ $x = \frac{s - s'}{s'' - s'} = \frac{6,75 - 0,7038}{8,0749 - 0,7038} = 0,820$ $v = 0,001012 + 0,820 \cdot (12,028 - 0,001012) =$ $= 9,866 \text{ m}^3/\text{kg}$ $h = 209,336 + 0,820 \cdot (2591,31 - 209,336) =$ $= 2163,15 \text{ kJ}/\text{kg}$  |
| <p>podano:</p> $p = 1,9 \text{ bar}$ $T = 120 \text{ }^\circ\text{C}$   | <p>področje stanja:</p> $p < p_s(T) = 1,98665 \text{ bar} \quad \rightarrow \text{ para}$ $T > T_s(p) = 118,60 \text{ }^\circ\text{C} \quad \rightarrow \text{ para}$  |
| <p>Tabele za dani tlak ni, obstaja pa vrstica z dano temperaturo pri različnih tlakih, zato je potrebna interpolacija po tlaku.</p> <p>tabela <math>p_p = 1,75 \text{ bar}</math>, vrstica <math>T = 120 \text{ }^\circ\text{C}</math>:</p> $v_p = 1,0150 \text{ m}^3/\text{kg}$ $h_p = 2708,60 \text{ kJ}/\text{kg}$ $s_p = 7,1931 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ <p>tabela <math>p_n = 2 \text{ bar}</math>, vrstica <math>T = 120 \text{ }^\circ\text{C}</math>:</p> <del> <math display="block">v_n = 0,001050 \text{ m}^3/\text{kg}</math> <math display="block">h_n = 503,70 \text{ kJ}/\text{kg}</math> <math display="block">s_n = 1,5778 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})</math> </del> <p>Točka 'p' leži v področju pare, 'n' pa v področju vode, zaradi česar interpolacija ni možna. Tudi točka 'n' mora biti v področju pare, oz. pri stanju nasičene pare pri temperaturi <math>T</math> (označeno z ").</p> <p>tabela nasičenja, vrstica <math>T = 120 \text{ }^\circ\text{C}</math></p> $p_n = p_s = 1,98665 \text{ bar:}$ $v_n = v'' = 0,8913 \text{ m}^3/\text{kg}$ $h_n = h'' = 2705,93 \text{ kJ}/\text{kg}$ | <p>izračun:</p> $v = 1,0150 + \frac{1,9 - 1,75}{1,98665 - 1,75} \cdot (0,8913 - 1,0150) =$ $= 0,9366 \text{ m}^3/\text{kg}$ $h = 2708,60 + \frac{1,9 - 1,75}{1,98665 - 1,75} \cdot (2705,93 - 2708,60) =$ $= 2706,91 \text{ kJ}/\text{kg}$ $s = 7,1931 + \frac{1,9 - 1,75}{1,98665 - 1,75} \cdot (7,1291 - 7,1931) =$ $= 7,1525 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ |



|   |   |
|---|---|
| $s_n = s'' = 7,1291 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  |   |
| podano:<br>$p = 105,3 \text{ bar}$<br>$v = 0,02 \text{ m}^3/\text{kg}$  | področje stanja:<br>Za dani tlak ni podatkov, zato preverimo stanje pri predhodnem in naslednjem tlaku v tabeli (105 bar in 106 bar).<br>$v > v''(p_p) = 0,016969 \text{ m}^3/\text{kg} \rightarrow \text{para}$<br>$v > v''(p_n) = 0,016767 \text{ m}^3/\text{kg} \rightarrow \text{para}$ |
| Tabela z danim tlakom ne obstaja zato je potrebna interpolacija po tlaku. V stolpcu s prostorninami ni iskane vrednosti, zato je potrebna tudi interpolacija po prostornini.  |   |
| tabela $p_p = 100 \text{ bar}$ , vrstica $T_a = 320 \text{ }^\circ\text{C}$ :<br>$v_a = 0,0193 \text{ m}^3/\text{kg}$<br>$h_a = 2782,66 \text{ kJ}/\text{kg}$<br>$s_a = 5,7131 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ | tabela $p_n = 110 \text{ bar}$ , vrstica $T_c = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ :<br>$v_c = 0,0196 \text{ m}^3/\text{kg}$<br>$h_c = 2887,79 \text{ kJ}/\text{kg}$<br>$s_c = 5,8541 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$   |
| tabela $p_p = 100 \text{ bar}$ , vrstica $T_b = 330 \text{ }^\circ\text{C}$ :<br>$v_b = 0,0204 \text{ m}^3/\text{kg}$<br>$h_b = 2835,67 \text{ kJ}/\text{kg}$<br>$s_b = 5,8017 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ | tabela $p_n = 110 \text{ bar}$ , vrstica $T_d = 360 \text{ }^\circ\text{C}$ :<br>$v_d = 0,0205 \text{ m}^3/\text{kg}$<br>$h_d = 2930,53 \text{ kJ}/\text{kg}$<br>$s_d = 5,9221 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$   |

izračun:

$$T_p = T_a + \frac{v - v_a}{v_b - v_a} \cdot (T_b - T_a) = 326,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_n = T_c + \frac{v - v_c}{v_d - v_c} \cdot (T_d - T_c) = 354,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_p = h_a + \frac{v - v_a}{v_b - v_a} \cdot (h_b - h_a) = 2815,5 \text{ kJ}/\text{kg}$$

$$h_n = h_c + \frac{v - v_c}{v_d - v_c} \cdot (h_d - h_c) = 2905,8 \text{ kJ}/\text{kg}$$

$$s_p = s_a + \frac{v - v_a}{v_b - v_a} \cdot (s_b - s_a) = 5,7680 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$s_n = s_c + \frac{v - v_c}{v_d - v_c} \cdot (s_d - s_c) = 5,8827 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$T = T_p + \frac{p - p_p}{p_n - p_p} \cdot (T_n - T_p) = 341,0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h = h_p + \frac{p - p_p}{p_n - p_p} \cdot (h_n - h_p) = 2863,4 \text{ kJ}/\text{kg}$$

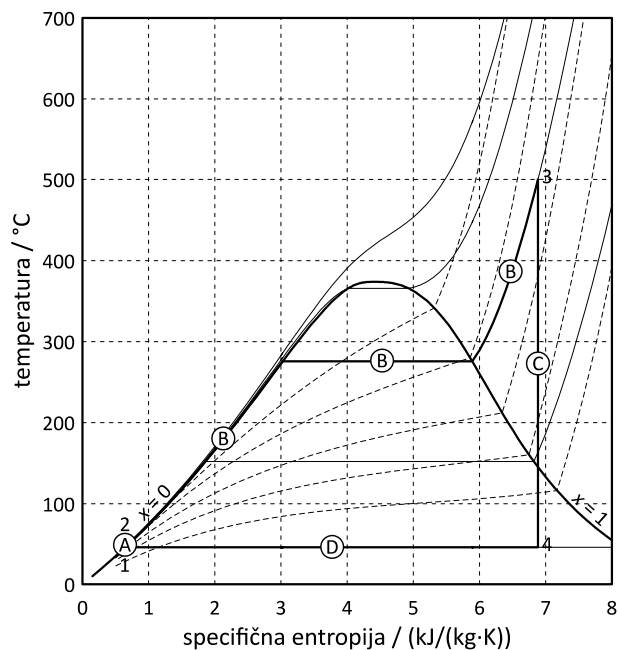
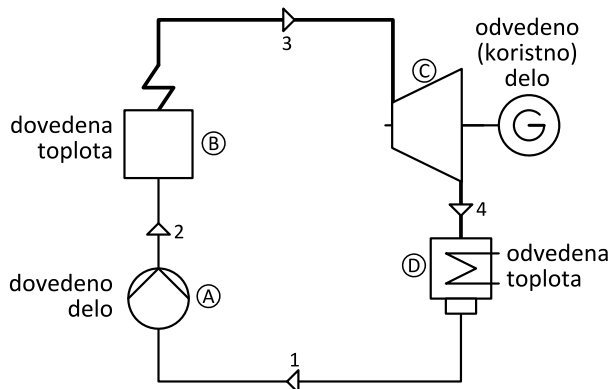
$$s = s_p + \frac{p - p_p}{p_n - p_p} \cdot (s_n - s_p) = 5,829 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

|   |  |
|---|--|
| <p>podano:</p> $p = 7 \text{ bar}$<br>$x = 0,813$   | <p>področje stanja:</p> <p>Kadar je znana suhost in ima vrednost <math>0 \leq x \leq 1</math>, imamo opravka z mokro paro.</p>   |
| <p>V področju mokre pare je tlak zagotovo enak tlaku nasičenja pri dani temperaturi. Druge veličine pa določimo preko suhosti pare (<math>x</math>).</p> <p>tabela nasičenja, vrstica <math>p = 7 \text{ bar}</math>:</p> $T_s = 164,95 \text{ °C}$<br>$v' = 0,001108 \text{ m}^3/\text{kg}$<br>$v'' = 0,272764 \text{ m}^3/\text{kg}$<br>$h' = 697,14 \text{ kJ/kg}$<br>$h'' = 2762,75 \text{ kJ/kg}$<br>$s' = 1,9921 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$<br>$s'' = 6,7070 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ | <p>izračun:</p> $T = T_s = 164,95 \text{ °C}$<br>$v = 0,001108 + 0,813 \cdot (0,272764 - 0,001108) =$<br>$= 0,2220 \text{ m}^3/\text{kg}$<br>$h = 697,14 + 0,813 \cdot (2762,75 - 697,14) =$<br>$= 2376,5 \text{ kJ/kg}$<br>$s = 1,9921 + 0,813 \cdot (6,7070 - 1,9921) =$<br>$= 5,8253 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ |

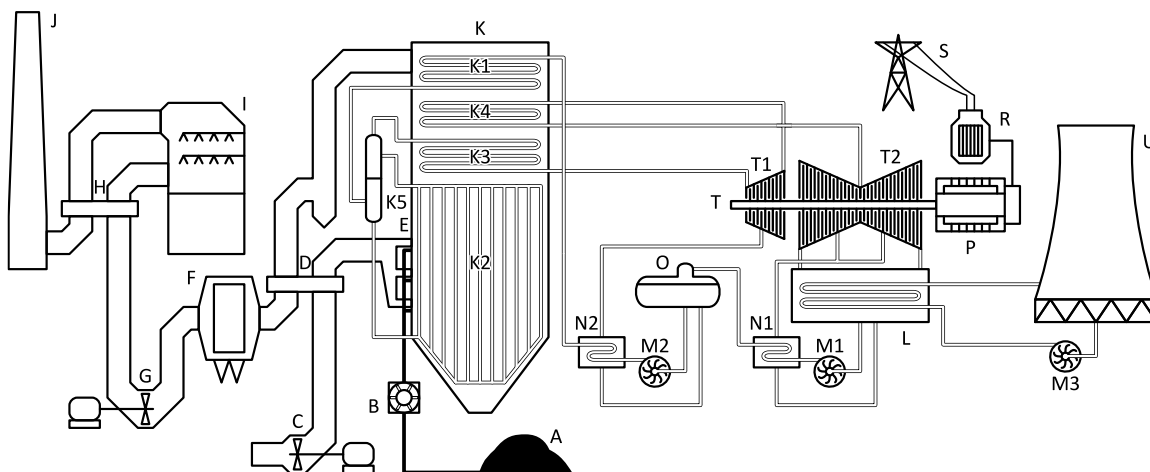
### 2.3 Parni krožni proces

Podobno kot v primeru plinskih krožnih procesov lahko kot delovno snov v delovnem krožnem procesu uporabimo tudi vodo in vodno paro, pri čemer izkoristimo tudi posebne značilnosti spremembe agregatnega stanja delovne snovi. Osnovne preobrazbe procesa ostajajo enake kot pri Jouloovem procesu:

- dovod mehanskega dela poteka v napajalni črpalki, vir energije je običajno električna energija, ki jo pridobimo v samem postrojenju;
- dovod toplote poteka v parnem kotlu, kjer gorivo zgoreva, sprošča kemično vezano energijo in jo oddaja delovni snovi (voda, para), ki se segreva in tudi spreminja agregatno stanje;
- pridobivanje mehanskega dela poteka v parni turbini, ki s pridobljeno energijo poganja električni generator, iz katerega dobimo koristno (električno) energijo iz postrojenja in tudi energijo za delovanje nekaterih elementov sistema (npr. napajalna črpalka);
- odvod toplote poteka v kondenzatorju, kjer poteka sprememba agregatnega stanja, (neizkoriščeno) energijo kondenzacije pa nato odvedemo v okolico.



**Parni krožni proces: levo - shema postrojenja, desno - diagram T-s za parni proces**



- |  |                          |  |
|--|--------------------------|--|
| A: zaloga goriva                               | K: parni kotel           | N1: nizekotlačni grelnik vode            |
| B: mlin za premog                              | K1: grelnik vode         | N2: visokotlačni grelnik vode            |
| C: ventilator za zgovalni zrak                 | K2: uparjalnik           | O: napajalni rezervoar / razplinjevalnik |
| D: grelnik zraka                               | K3: pregrevalnik pare    | P: električni generator                  |
| E: gorilniki (dovod zraka in goriva v kurišče) | K4: ponovni pregrevalnik | R: električni transformator              |
| F: filter za dimne pline                       | K5: boben                | S: električno omrežje                    |
| G: ventilator vleka                            | L: kondenzator pare      | T: parna turbina                         |
| H: regenerators toplote dimnih plinov          | M1: kondenzatna črpalka  | T1: visokotlačni del                     |
| I: čistilna naprava za dimne pline             | M2: napajalna črpalka    | T2: dvojni nizekotlačni del              |
| J: dimnik                                      | M3: hladilna črpalka     | U: hladilni stolp                        |

### **Tehnološka shema termoelektrarne na premog**

## 2.4 Naloge

### 2-1

7,5 kg vode tlaka 40 bar segrevamo od 20 °C do 500 °C.

- Pri kateri temperaturi začne voda vreti?
- Določi, koliko toplote porabimo za segrevanje vode do vrelišča, koliko za uparjanje in koliko za pregrevanje pare?
- Kolikšen je volumen pregrete pare pri 500 °C in 40 bar?

---

podano

$$m = 7,5 \text{ kg}$$

$$p_1 = 40 \text{ bar}$$

$$T_1 = 20 \text{ °C}$$

$$T_4 = 500 \text{ °C}$$

iskano

$$T_s, Q_{\text{seg}}, Q_{\text{up}}, Q_{\text{pre}}, V_4$$

tabele

$$T_s = T_s(40 \text{ bar}) = 250,4 \text{ °C}$$

$$h_1 = h(20 \text{ °C}, 40 \text{ bar}) = 87,7 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h'(40 \text{ bar}) = 1087,4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = h''(40 \text{ bar}) = 2800,9 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = h(500 \text{ °C}, 40 \text{ bar}) = 3445,8 \text{ kJ/kg}$$

$$v_4 = v(500 \text{ °C}, 40 \text{ bar}) = 0,08644 \text{ m}^3/\text{kg}$$

---

a)  $T_s = T_s(40 \text{ bar}) = 250,4 \text{ °C}$

b)  $Q_{\text{seg}} = m \cdot (h_2 - h_1) = 7498 \text{ kJ}$

$$Q_{\text{up}} = m \cdot (h_3 - h_2) = 12851 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{pre}} = m \cdot (h_4 - h_3) = 4837 \text{ kJ}$$

c)  $V_4 = m \cdot v_4 = 0,648 \text{ m}^3$

**2-2**

Pri uparjanju 5 kg vrele vode nastane 1,3 m<sup>3</sup> nasičene pare.

- a) Kolikšna sta tlak in temperatura pare?  
b) Koliko toplote je bilo treba dovesti za uparjanje?

---

podano

$$m = 5 \text{ kg}$$

$$V = 1,3 \text{ m}^3$$

iskano

$$p, T, Q_{\text{do}}$$

---

a) 
$$v = \frac{V}{m} = 0,2600 \text{ m}^3/\text{kg}$$

tabele

$$v = v''(T) \rightarrow T = T(0,2600 \text{ m}^3/\text{kg}) \approx 167 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p = p(0,2600 \text{ m}^3/\text{kg}) \approx p(167 \text{ }^\circ\text{C}) = 7,36 \text{ bar}$$

b) 
$$h'(167 \text{ }^\circ\text{C}) = 706,1 \text{ kJ/kg}$$

$$h''(167 \text{ }^\circ\text{C}) = 2764,9 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{\text{do}} = m \cdot (h'' - h') = 10294 \text{ kJ}$$

**2-3**

Električni grelnik z močjo 880 W segreva 2,3 kg vode pri tlaku 1 bar od 20 °C do vrelišča, nato pa 0,5 kg vode uparimo. Izgube toplote v okolico zanemarimo.

a) Koliko časa je potrebnega, da vodo segrejemo do vrelišča?

b) Koliko časa je nato še potrebnega za uparjanje vode?

---

podano

$$m = 2,3 \text{ kg}$$

$$p = 1 \text{ bar}$$

$$T_1 = 20 \text{ °C}$$

$$x_2 = 0 \text{ (vrelišče)}$$

$$x_3 = 1 \text{ (nasičena para)}$$

$$P = 880 \text{ W} = 0,88 \text{ kW}$$

$$m_{\text{up}} = 0,5 \text{ kg}$$


---

iskano

$$t_{\text{seg}}, t_{\text{up}}$$

tabele

$$h_1 (1 \text{ bar}, 20 \text{ °C}) = 84,0 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h'(1 \text{ bar}) = 417,4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = h''(1 \text{ bar}) = 2674,9 \text{ kJ/kg}$$


---

a)  $Q = P \cdot t$

$$P \cdot t_{\text{seg}} = m \cdot (h_2 - h_1) \rightarrow t_{\text{seg}} = \frac{m \cdot (h_2 - h_1)}{P} = 871 \text{ s} = 14 \text{ min } 31 \text{ s}$$

b)

$$P \cdot t_{\text{up}} = m_{\text{up}} \cdot (h_3 - h_2) \rightarrow t_{\text{up}} = \frac{m_{\text{up}} \cdot (h_3 - h_2)}{P} = 1283 \text{ s} = 21 \text{ min } 22 \text{ s}$$

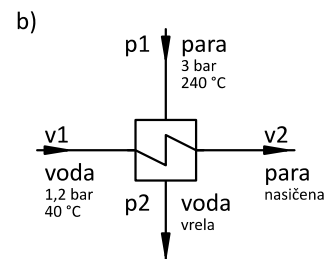
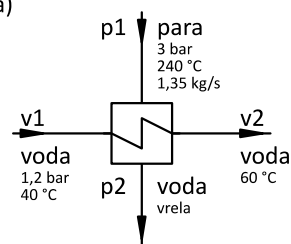
## 2-4

Vodo segrevamo s paro, ki ima tlak 3 bar in temperaturo 240 °C. a)

Para pri tem kondenzira do stanja vrele vode ( $x = 0$ ). Tlak vode je 1,2 bar, segreje pa se od 40 °C do 60 °C. Masni tok grelne pare je 1,35 kg/s.

a) Izračunaj masni tok segrevane vode.

b) Koliko pare bi potrebovali, da bi segreli in uparili isto količino vode?



podano

iskano

$$p_p = 3 \text{ bar}$$

$$\dot{m}_v, \dot{m}_{pb}$$

$$T_{p1} = 240 \text{ °C}$$

$$x_{p2} = 0$$

tabele

$$p_v = 1,2 \text{ bar}$$

$$h_{p1} = h(3 \text{ bar}, 240 \text{ °C}) = 2947,6 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{v1} = 40 \text{ °C}$$

$$h_{p2} = h'(3 \text{ bar}) = 561,5 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{v2a} = 60 \text{ °C}$$

$$h_{v1} = h(1,2 \text{ bar}, 40 \text{ °C}) = 167,6 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m}_{pa} = 1,35 \text{ kg/s}$$

$$h_{v2a} = h(1,2 \text{ bar}, 60 \text{ °C}) = 251,2 \text{ kJ/kg}$$

$$x_{v2b} = 1$$

$$h_{v2b} = h''(1,2 \text{ bar}) = 2683,1 \text{ kJ/kg}$$

a)

$$\dot{m}_v \cdot (h_{v2a} - h_{v1}) = \dot{m}_{pa} \cdot (h_{p1} - h_{p2}) \rightarrow \dot{m}_v = \frac{\dot{m}_{pa} \cdot (h_{p1} - h_{p2})}{h_{v2a} - h_{v1}} = 38,53 \text{ kg/s}$$

b)

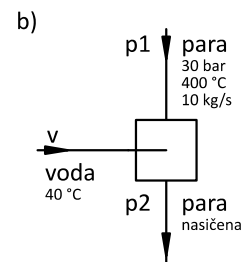
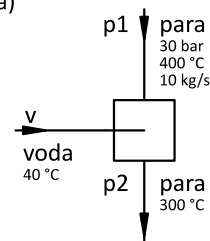
$$\dot{m}_v \cdot (h_{v2b} - h_{v1}) = \dot{m}_{pb} \cdot (h_{p1} - h_{p2}) \rightarrow \dot{m}_{pb} = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_{v2b} - h_{v1})}{h_{p1} - h_{p2}} = 40,62 \text{ kg/s}$$

## 2-5

V mešalnem prenosniku toplote hladimo paro s tlakom 30 bar in a) temperaturo 400 °C z vodo s temperaturo 40 °C.

a) Koliko hladne vode je treba primešati, da ohladimo 10 kg pare do temperature 300 °C?

b) Koliko hladilne vode je potrebne, da dobimo na izstopu nasičeno paro?



podano

$$p = 30 \text{ bar}$$

$$T_{p1} = 400 \text{ °C}$$

$$T_v = 40 \text{ °C}$$

$$m_p = 10 \text{ kg}$$

$$T_{p2a} = 300 \text{ °C}$$

$$x_{p2b} = 1$$

iskano

$$m_{va}, m_{vb}$$

tabele

$$h_{p1} = h(30 \text{ bar}, 400 \text{ °C}) = 3233 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{p2a} = h(30 \text{ bar}, 300 \text{ °C}) = 2995 \text{ kJ/kg}$$

$$h_v = h(30 \text{ bar}, 40 \text{ °C}) = 170,1 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{p2b} = h''(30 \text{ bar}) = 2802 \text{ kJ/kg}$$

a)

$$m_{va} \cdot (h_{p2a} - h_v) = m_p \cdot (h_{p1} - h_{p2a}) \rightarrow m_{va} = \frac{m_p \cdot (h_{p1} - h_{p2a})}{h_{p2a} - h_v} = 0,84 \text{ kg}$$

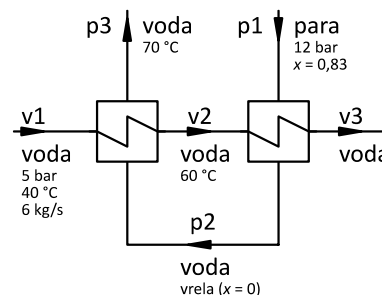
b)

$$m_{vb} \cdot (h_{p2b} - h_v) = m_p \cdot (h_{p1} - h_{p2b}) \rightarrow m_{vb} = \frac{m_p \cdot (h_{p1} - h_{p2b})}{h_{p2b} - h_v} = 1,63 \text{ kg}$$



## 2-6

Skozi dva zaporedna prenosnika toplote teče 6 kg/s hladne vode s tlakom 5 bar, ki se v prvem prenosniku segreje od  $T_{v1} = 40\text{ °C}$  do  $T_{v2} = 60\text{ °C}$ . Vodo grejemo s paro, ki ima tlak 12 bar in začetno suhost  $x_{p1} = 0,83$ . V prvem prenosniku kondenzira do stanja vrele vode ( $x_{p2} = 0$ ), nato pa se v drugem prenosniku ohladi do  $T_{p3} = 70\text{ °C}$ .



a) Kolikšen je masni tok pare?

b) Kolikšna je končna temperatura vode?

podano

$$\dot{m}_v = 6\text{ kg/s}$$

$$p_v = 5\text{ bar}$$

$$T_{v1} = 40\text{ °C}$$

$$T_{v2} = 60\text{ °C}$$

$$p_p = 12\text{ bar}$$

$$x_{p1} = 0,83$$

$$x_{p2} = 0$$

$$T_{p3} = 70\text{ °C}$$

iskano

$$\dot{m}_p, T_{v3}$$

tabele

$$h_{v1} = h(5\text{ bar}, 40\text{ °C}) = 168,0\text{ kJ/kg}$$

$$h_{v2} = h(5\text{ bar}, 60\text{ °C}) = 251,6\text{ kJ/kg}$$

$$h_{p2} = h'_p(12\text{ bar}) = 798,5\text{ kJ/kg}$$

$$h''_p(12\text{ bar}) = 2783,8\text{ kJ/kg}$$

$$h_{p3} = h(12\text{ bar}, 70\text{ °C}) = 294,0\text{ kJ/kg}$$

$$a) \quad h_{p1} = h'_p + x_{p1} \cdot (h''_p - h'_p) = 2446,3\text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_v \cdot (h_{v2} - h_{v1}) = 501,5\text{ kW}$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_p \cdot (h_{p2} - h_{p3}) \rightarrow \dot{m}_p = \frac{\dot{Q}_1}{h_{p2} - h_{p3}} = 0,99\text{ kg/s}$$

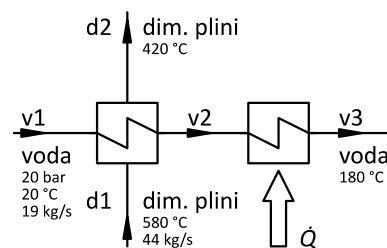
$$b) \quad \dot{Q}_2 = \dot{m}_p \cdot (h_{p1} - h_{p2}) = 1637,8\text{ kW}$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_v \cdot (h_{v3} - h_{v2}) \rightarrow h_{v3} = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{m}_v} + h_{v2} = 524,5\text{ kJ/kg}$$

$$T_{v3} = T(5\text{ bar}, 524,5\text{ kJ/kg}) = 124,8\text{ °C}$$

## 2-7

Vodo segrevamo od začetne temperature 20 °C do končne 180 °C v dveh prenosnikih toplote. V prvem jo segrevamo z dimnimi plini, ki se pri tem ohladijo s 580 °C na 420 °C. Njihova specifična toplota je 1,16 kJ/(kg·K), masni tok pa 44 kg/s. Voda ima na začetku tlak 20 bar, v vsakem od prenosnikov pa se ji tlak zaradi uporov zniža za 4 bar. Njen masni tok je 19 kg/s.



Kolikšen toplotni tok je treba dovajati v drugem prenosniku toplote, da bomo dosegli zahtevano temperaturo vode?

podano

$$T_{v1} = 20 \text{ °C}$$

$$T_{v3} = 180 \text{ °C}$$

$$T_{d1} = 580 \text{ °C}$$

$$T_{d2} = 420 \text{ °C}$$

$$c_{p,d} = 1,16 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$\dot{m}_d = 44 \text{ kg/s}$$

$$p_{v1} = 20 \text{ bar}$$

$$p_{v2} = 16 \text{ bar}$$

$$p_{v3} = 12 \text{ bar}$$

$$\dot{m}_v = 19 \text{ kg/s}$$

iskano

$$\dot{Q}$$

tabele

$$h_{v1} = h(20 \text{ bar}, 20 \text{ °C}) = 85,8 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{v3} = h(12 \text{ bar}, 180 \text{ °C}) = 763,3 \text{ kJ/kg}$$

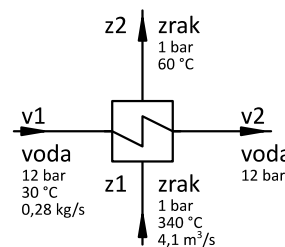
$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_d \cdot c_{p,d} \cdot (T_{d1} - T_{d2}) = 8166 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_v \cdot (h_{v2} - h_{v1}) \rightarrow h_{v2} = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{m}_v} + h_{v1} = 515,6 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_v \cdot (h_{v3} - h_{v2}) = 4706 \text{ kW}$$

## 2-8

Z vročim zrakom, ki ima začetno temperaturo 340 °C, tlak 1 bar, njegov volumenski tok pa je 4,1 m<sup>3</sup>/s, segrevamo in uparjamo vodo. Tlak vode je 12 bar, njena začetna temperatura je 30 °C, masni pretok pa 0,28 kg/s. Zrak ima na izstopu iz prenosnika toplote temperaturo 60 °C.



a) Ugotovi, v kakšnem agregatnem stanju je voda na izstopu iz prenosnika.

b) Določi parametre vode/pare na izstopu iz prenosnika (temperatura, suhost itd.).

podano

$$T_{z1} = 340 \text{ °C} = 613,15 \text{ K}$$

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

$$\dot{V}_{z1} = 4,1 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$p_v = 12 \text{ bar}$$

$$T_{v1} = 30 \text{ °C}$$

$$\dot{m}_v = 0,28 \text{ kg/s}$$

$$T_{z2} = 60 \text{ °C} = 333,15 \text{ K}$$

iskano

$$T_{v2}, x_{v2}$$

tabele

$$R_z = 287 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$c_{p,z} = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$h_{v1} = h(12 \text{ bar}, 30 \text{ °C}) = 126,8 \text{ kJ/kg}$$

$$T_s(12 \text{ bar}) = 188,0 \text{ °C}$$

$$h'(12 \text{ bar}) = 798,5 \text{ kJ/kg}$$

$$h''(12 \text{ bar}) = 2783,8 \text{ kJ/kg}$$

a)

$$p_z \cdot \dot{V}_{z1} = \dot{m}_z \cdot R \cdot T_{z1} \rightarrow \dot{m}_z = \frac{p_z \cdot \dot{V}_{z1}}{R \cdot T_{z1}} = 2,33 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_z \cdot c_{p,z} \cdot (T_{z1} - T_{z2}) = 655,6 \text{ kW}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_v \cdot (h_{v2} - h_{v1}) \rightarrow h_{v2} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_v} + h_{v1} = 2468,4 \text{ kJ/kg}$$

$h' < h_{v2} < h'' \rightarrow$  na izstopu iz prenosnika je mokra para

b)

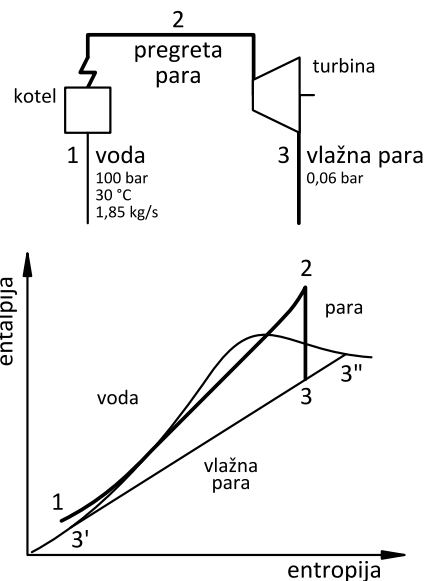
$$T_{v2} = T_s = 188,0 \text{ °C}$$

$$h_{v2} = h' + x \cdot (h'' - h') \rightarrow x = \frac{h_{v2} - h'}{h'' - h'} = 0,841$$

## 2-9

V parni kotel vstopa 6,66 t/h napajalne vode s temperaturo 30 °C in tlakom 100 bar. V kotlu vodi izobarno dovajamo toplotni tok 5,9 MW. Nastala para nato v turbini izentropno ekspandira do tlaka 0,06 bar.

- a) Določi temperaturo pare na izstopu iz kotla.  
b) Kolikšna je moč turbine?



podano

$$\dot{m} = 6,66 \text{ t/h} = 1,85 \text{ kg/s}$$

$$T_1 = 30 \text{ °C}$$

$$p_1 = 100 \text{ bar}$$

$$\dot{Q}_{\text{do}} = 5,9 \text{ MW} = 5900 \text{ kW}$$

$$p_3 = 0,06 \text{ bar}$$

iskano

$$T_2, P_t$$

tabele

$$h_1 = h(30 \text{ °C}, 100 \text{ bar}) = 134,75 \text{ kJ/kg}$$

$$s'_3(0,06 \text{ bar}) = 0,5209 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$s''_3(0,06 \text{ bar}) = 8,331 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$h'_3(0,06 \text{ bar}) = 151,5 \text{ kJ/kg}$$

$$h''_3(0,06 \text{ bar}) = 2568 \text{ kJ/kg}$$

a)

$$\dot{Q}_{\text{do}} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \rightarrow h_2 = \frac{\dot{Q}_{\text{do}}}{\dot{m}} + h_1 = 3324,0 \text{ kJ/kg}$$

$$T_2 = T(100 \text{ bar}, 3324,0 \text{ kJ/kg}) = 480,4 \text{ °C}$$

b)

$$s_2 = s(100 \text{ bar}, 480,4 \text{ °C}) = s_3 = 6,532 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$s_3 = s'_3 + x_3 \cdot (s''_3 - s'_3) \rightarrow x_3 = \frac{s_3 - s'_3}{s''_3 - s'_3} = 0,770$$

$$h_3 = h'_3 + x_3 \cdot (h''_3 - h'_3) = 2010,9 \text{ kJ/kg}$$

$$P_t = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) = 2426,7 \text{ kW}$$

### 3 Prenos toplote

#### 3.1 Toplotni tokovi in temperaturne razmere

Prevod in prestop toplote sta v energetiki pogosto uporabljena procesa za prenos energije v obliki toplote z enega nosilca na drugega. Proces poteka v energetskih napravah, ki jih imenujemo prenosniki toplote. V industriji večinoma uporabljamo t. i. površinske prenosnike toplote, pri katerih sta topla in hladna snov (plin ali kapljevina) ločena s trdno steno (prenosno površino) in se ne mešata. Za preračun prenosnikov toplote velja nekaj osnovnih enačb (izrazi v oklepaju veljajo samo v primeru, ko lahko predpostavimo konstantno specifično toploto snovi, torej pri idealnih plinih in nekaterih drugih posebnih primerih):

- toplotni tok, ki ga **odda** topla snov:  $\dot{Q}_{\text{odd}} = \dot{m}_t \cdot \Delta h_t$  ( $\dot{Q}_{\text{odd}} = \dot{m}_t \cdot c_{p,t} \cdot \Delta T_t$ )
- toplotni tok, ki ga **sprejme** hladna snov:  $\dot{Q}_{\text{spr}} = \dot{m}_h \cdot \Delta h_h$  ( $\dot{Q}_{\text{spr}} = \dot{m}_h \cdot c_{p,h} \cdot \Delta T_h$ )
- toplotni tok, **prenešen** iz tople v hladno snov:  $\dot{Q}_{\text{pre}} = U \cdot A \cdot \Delta T$

Če zanemarimo izgube toplote v okolico, velja **energijska bilanca**

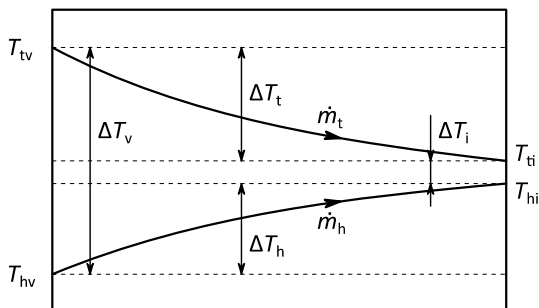
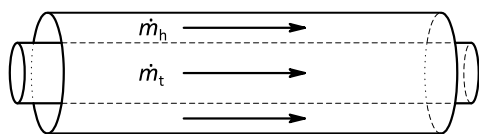
$$\dot{Q}_{\text{odd}} = \dot{Q}_{\text{spr}} = \dot{Q}_{\text{pre}}$$

Temperaturi tople in hladne snovi se v splošnem skozi prenosnik toplote spreminjata od vstopne ( $T_{tv}$  in  $T_{hv}$ ) do izstopne ( $T_{ti}$  in  $T_{hi}$ ). Pri izračunu oddanega in sprejetega toplotnega toka upoštevamo **spremembo temperature** (ali s tem povezano spremembo entalpije) tople ali hladne snovi. Pri izračunu prenešenega toplotnega toka upoštevamo **temperaturno razliko** med toplo in hladno snovjo. S štirimi vrednostmi za temperaturo izračunamo eno samo temperaturno razliko z izrazom za srednjo logaritemsko temperaturno razliko.

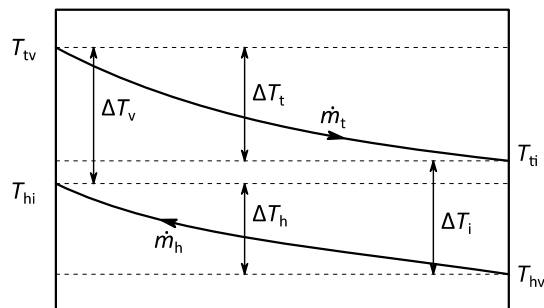
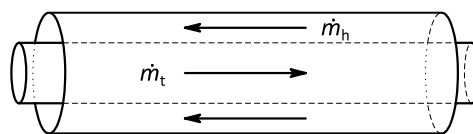
$$\Delta T_{\text{ln}} = \frac{\Delta T_v - \Delta T_i}{\ln \frac{\Delta T_v}{\Delta T_i}}$$

Temperaturni razliki na vstopu v prenosnik toplote ( $\Delta T_v$ ) in izstopu iz njega ( $\Delta T_i$ ) sta odvisni od smeri toka tople in hladne snovi skozi prenosnik. Poenostavljeno lahko obravnavamo dva primera, pri tem sta vstop in izstop iz prenosnika definirana glede na smer toka tople snovi:

**sotočni prenosnik toplote** – topla in hladna snov tečeta skozi prenosnik v isto smer



**protitočni prenosnik toplote** – topla in hladna snov tečeta skozi prenosnik v nasprotni smeri

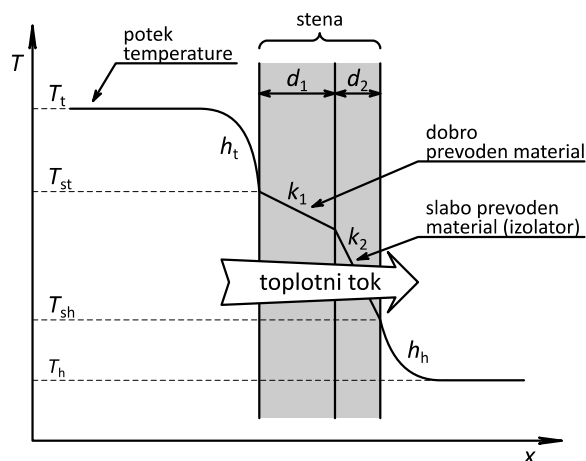


*Smer tokov in potek temperatur v sotočnem in protitočnem prenosniku toplote*

### 3.2 Prestop, prevod in prehod toplote

**Prehod toplote** skozi steno med toplo in hladno snovjo je odvisen od lastnosti stene in tudi od lastnosti obeh snovi, med katerima teče toplotni tok. V splošnem prehod toplote razdelimo na več faz, v katerih poteka

- **prevod toplote** skozi trdno plast stene ali
- **prestop toplote** s stene na hladno snov ali s tople snovi na steno.



*Prenos toplote s toplejše na hladnejšo tekočino skozi večplastno steno*

Prehod toplote opisuje **toplotna prehodnost** ( $U$ ), ki je sestavljena iz **toplotnih prestopnosti** ( $h$ ) in **toplotnih prevodnosti** ( $k$ ).

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_t} + \sum_i \frac{d_i}{k_i} + \frac{1}{h_h}}$$

Toplotni prestopnosti za toplo in hladno snov ( $h_t$ ,  $h_h$ ) sta odvisni od delovne snovi, njene hitrosti, temperature, konstrukcije prenosnika itd. in ju je v praksi računsko težko natančno določiti. Podatki o toplotnih prevodnostih različnih materialov so znani, ker jih je možno dovolj natančno eksperimentalno določiti in so odvisni od vrste materiala, deloma pa tudi od temperature. Za skupno toplotno prehodnost velja

$$U < \min\left(h_t, \frac{k}{d}, h_h\right)$$

Toplotni tok je konstanten skozi celoten sistem, torej od tople snovi skozi steno do hladne snovi, zato ga lahko izrazimo med poljubnima točkama sistema. Pri tem je treba v izrazu za toplotno prehodnost upoštevati ustrezne člene, npr.:

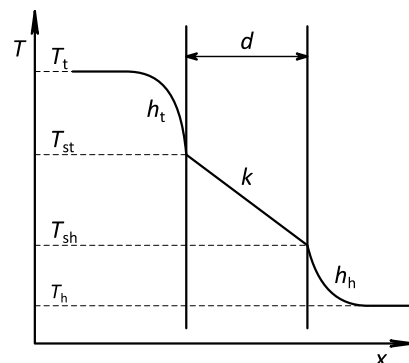
|             |  |  |   |   |
|-------------|--|--|---|---|
| od          | tople tekočine   | tople tekočine                             | tople tekočine  | stene na topli strani                               |
| do          | hladne tekočine  | stene na topli strani                      | stene na hladni strani  | stene na hladni strani                              |
| $\dot{Q} =$ | $U_{t-h} \cdot A \cdot (T_t - T_h) =$  | $U_{t-st} \cdot A \cdot (T_t - T_{st}) =$  | $U_{t-sh} \cdot A \cdot (T_t - T_{sh}) =$                     | $U_{st-sh} \cdot A \cdot (T_{st} - T_{sh}) = \dots$ |
|             | $U_{t-h} = \frac{1}{\frac{1}{h_t} + \sum_i \frac{d_i}{k_i} + \frac{1}{h_h}}$ | $U_{t-st} = \frac{1}{\frac{1}{h_t}} = h_t$ | $U_{t-sh} = \frac{1}{\frac{1}{h_t} + \sum_i \frac{d_i}{k_i}}$ | $U_{st-sh} = \frac{1}{\sum_i \frac{d_i}{k_i}}$      |

### 3.3 Naloge

#### 3-1

V prenosniku toplote merimo temperaturo hladne tekočine, ki je  $44\text{ °C}$ , in stene na hladnejši strani, ki je  $62\text{ °C}$ . Poznamo še toplotno prestopnost na hladni strani  $h_h = 2460\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ , na topli strani  $h_t = 230\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ , prevodnost stene  $k = 81\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  in debelino stene  $d = 10\text{ mm}$ . Izračunaj:

- toplotno prehodnost celotne stene,
- gostoto toplotnega toka skozi steno,
- temperaturo vroče tekočine.



podano

$$T_h = 44\text{ °C}$$

$$T_{sh} = 62\text{ °C}$$

$$h_h = 2460\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

$$h_t = 230\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

$$k = 81\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$d = 10\text{ mm}$$

iskano

$$U, q, T_t$$

$$\text{a) } U = U_{t-h} = \frac{1}{\frac{1}{h_t} + \frac{d}{k} + \frac{1}{h_h}} = 205\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

$$\text{b) } \dot{Q} = U_{t-h} \cdot A \cdot (T_t - T_h) = U_{sh-h} \cdot A \cdot (T_{sh} - T_h)$$

$$q = U_{t-h} \cdot (T_t - T_h) = U_{sh-h} \cdot (T_{sh} - T_h)$$

$$U_{sh-h} = \frac{1}{\frac{1}{h_h}} = h_h = 2460\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

$$q = h_h \cdot (T_{sh} - T_h) = 44280\text{ W/m}^2$$

$$\text{c) } q = U_{t-h} \cdot (T_t - T_h) \rightarrow T_t = \frac{q}{U_{t-h}} + T_h = 260\text{ °C}$$



## 3-2

Izračunaj površino prenosnika toplote s koeficientom prehoda toplote  $3500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , v katerem z vroče na hladno vodo teče toplotni tok  $530 \text{ kW}$ , za

- a) protitočni prenosnik in  
b) sotočni prenosnik toplote.

Vroči vodi se v obeh primerih zniža temperatura z  $88 \text{ }^\circ\text{C}$  na  $53 \text{ }^\circ\text{C}$ , hladna pa se segreje od  $12 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $42 \text{ }^\circ\text{C}$ .

podano

$$U = 3500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\dot{Q} = 530 \text{ kW} = 5,3 \cdot 10^5 \text{ W}$$

$$T_{\text{tv}} = 88 \text{ }^\circ\text{C}$$

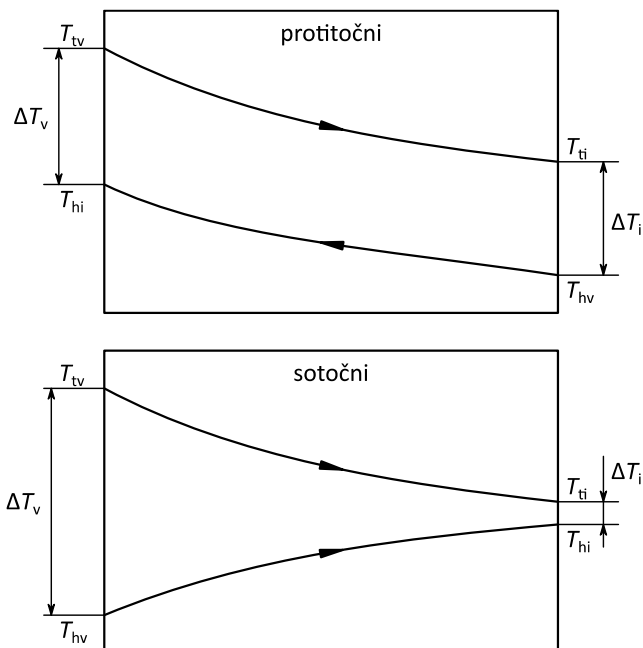
$$T_{\text{ti}} = 53 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{hv}} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{hi}} = 42 \text{ }^\circ\text{C}$$

iskano

$$A_{\text{pt}}, A_{\text{st}}$$



- a) protitočni prenosnik:

$$\Delta T_v = T_{\text{tv}} - T_{\text{hi}} = 46 \text{ K}$$

$$\Delta T_i = T_{\text{ti}} - T_{\text{hv}} = 41 \text{ K}$$

$$\Delta T_{\text{ln}} = \frac{\Delta T_v - \Delta T_i}{\ln \frac{\Delta T_v}{\Delta T_i}} = 43,45 \text{ K}$$

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_{\text{ln}}} = 3,48 \text{ m}^2$$

- b) sotočni prenosnik:

$$\Delta T_v = T_{\text{tv}} - T_{\text{hv}} = 76 \text{ K}$$

$$\Delta T_i = T_{\text{ti}} - T_{\text{hi}} = 11 \text{ K}$$

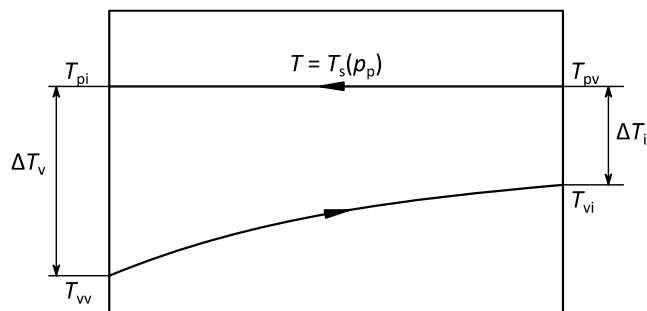
$$\Delta T_{\text{ln}} = \frac{\Delta T_v - \Delta T_i}{\ln \frac{\Delta T_v}{\Delta T_i}} = 33,63 \text{ K}$$

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_{\text{ln}}} = 4,5 \text{ m}^2$$

## 3-3

V kondenzator priteka 20 t/h pare s tlakom 0,06 bar in suhostjo 0,89. Para se kondenzira do stanja nasičenja, hladilna voda pa se segreje s 14 °C na 21 °C. Kondenzator ima skupen koeficient prehoda toplote 3620 W/(m<sup>2</sup>·K).

- Kolikšen toplotni tok je potrebno odvajati pri kondenzaciji pare?
- Izračunaj površino kondenzatorja.



podano

$$\dot{m}_p = 20 \text{ t/h} = 5,56 \text{ kg/s}$$

$$p_p = 0,06 \text{ bar}$$

$$x_{pv} = 0,89$$

$$x_{pi} = 0$$

$$T_{vv} = 14 \text{ °C}$$

$$T_{vi} = 21 \text{ °C}$$

$$U = 3620 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)} = 3,62 \text{ kW/(m}^2\cdot\text{K)}$$

iskano

$$\dot{Q}_{od}, A_k$$

tabele

$$h'(0,06 \text{ bar}) = 151,5 \text{ kJ/kg}$$

$$h''(0,06 \text{ bar}) = 2566,7 \text{ kJ/kg}$$

$$T_s(0,06 \text{ bar}) = 36,2 \text{ °C}$$

$$a) \quad h_{pv} = h' + x_{pv} \cdot (h'' - h') = 2301,0 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q}_{od} = \dot{m}_p \cdot (h_{pv} - h_{pi}) = \dot{m}_p \cdot (h_{pv} - h') = 11 \text{ 942 kW}$$

- b) para je v dvofaznem področju  $\rightarrow T = \text{konst.}$ ,  $T_{pv} = T_{pi} = T_s \rightarrow$  vseeno je, ali je prenosnik sotočen ali protitočen

$$\Delta T_A = T_{pv} - T_{vi} = 15,2 \text{ K}$$

$$\Delta T_B = T_{pi} - T_{vv} = 22,2 \text{ K}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln \frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}} = 18,44 \text{ K}$$

$$A_k = \frac{\dot{Q}_{od}}{U \cdot \Delta T_{ln}} = 178,8 \text{ m}^2$$

**3-4**

Skozi betonsko steno debeline 20 cm s površino 39 m<sup>2</sup> in toplotno prevodnostjo 1,05 W/(m·K) naj odteka največ 0,8 kW toplotnega toka. Temperatura na notranji strani stene je 24 °C, na zunanji pa -12 °C. Toplotna prestopnost med zrakom in steno na notranji strani je 8 W/(m<sup>2</sup>·K), na zunanji pa 25 W/(m<sup>2</sup>·K).

- Kolikšen toplotni tok odteka skozi steno brez izolacije?
- Kako debela mora biti plast izolacije s toplotno prevodnostjo 0,035 W/(m·K)?
- Kakšna je razlika v toplotnih izgubah, če izolacijo postavimo na notranjo (toplo) ali na zunanjo (hladno) stran stene?

---

podano

$$d_s = 20 \text{ cm}$$

$$A_s = 39 \text{ m}^2$$

$$k_s = 1,05 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$\dot{Q} = 0,8 \text{ kW}$$

$$T_n = 24 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_z = -12 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_n = 8 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

$$h_z = 25 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

$$k_i = 0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$


---

iskano

$$\dot{Q}_0, d_i$$

$$\text{a) } U_0 = \frac{1}{\frac{1}{h_n} + \frac{d_s}{k_s} + \frac{1}{h_z}} = 2,81 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

$$\dot{Q}_0 = U_0 \cdot A \cdot (T_n - T_z) = 3950 \text{ W}$$

$$\text{b) } \dot{Q} = U \cdot A \cdot (T_n - T_z) \rightarrow U = \frac{\dot{Q}}{A \cdot (T_n - T_z)} = 0,570 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_n} + \frac{d_s}{k_s} + \frac{d_i}{k_i} + \frac{1}{h_z}} \rightarrow d_i = k_i \cdot \left( \frac{1}{U} - \frac{1}{h_n} - \frac{d_s}{k_s} - \frac{1}{h_z} \right) = 0,049 \text{ m} = 4,9 \text{ cm}$$

- V izračunu vrednosti  $U$  člene, ki predstavljajo posamezne plasti stene, med seboj enostavno seštevamo, zato vrstni red plasti (izolacija na zunanji ali notranji strani) ne vpliva na toplotno prehodnost in toplotni tok. Zaradi večje toplotne akumulacije in manjše možnosti kondenzacije vlage pa je bolje, da je izolacija na zunanji strani stene.

## 3-5

Skozi prenosnik toplote teče 0,26 kg/s vode, ki se pri tem segreje s 15 °C na 40 °C. Na drugi strani se ogrevalna voda ohladi s 75 °C na 60 °C. Površina prenosnika toplote je 1,1 m<sup>2</sup>. Stena je iz 2 mm aluminija s toplotno prevodnostjo 160 W/(m·K), ki je na vsaki strani prevlečen z 0,2 mm debelo zaščitno plastjo s toplotno prevodnostjo 0,45 W/(m·K). Toplotna prestopnost z vode na steno je 3500 W/(m<sup>2</sup>·K). Ugotovite, ali je prenosnik protitočni ali sotočni.

podano

$$\dot{m}_h = 0,26 \text{ kg/s}$$

$$T_{hv} = 15 \text{ °C}$$

$$T_{hi} = 40 \text{ °C}$$

$$T_{vv} = 75 \text{ °C}$$

$$T_{vi} = 60 \text{ °C}$$

$$A = 1,1 \text{ m}^2$$

$$d_1 = 2 \text{ mm}$$

$$k_1 = 160 \text{ W/(m·K)}$$

$$d_2 = 0,2 \text{ mm}$$

$$k_2 = 0,45 \text{ W/(m·K)}$$

$$h = 3500 \text{ W/(m}^2\text{·K)}$$

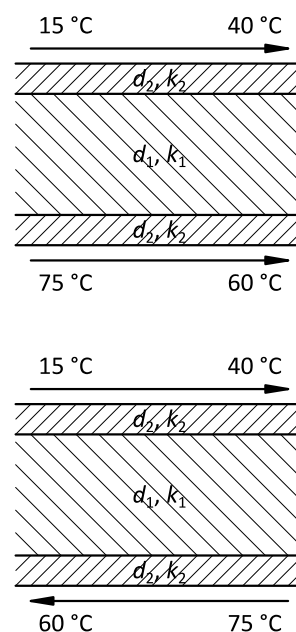
iskano

tip prenosnika

tabele

$$h_{hv} = h(15 \text{ °C}, 1 \text{ bar}) = 63,1 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{hi} = h(40 \text{ °C}, 1 \text{ bar}) = 167,6 \text{ kJ/kg}$$



$$\dot{Q} = \dot{m}_h \cdot (h_{hi} - h_{hv}) = 27,18 \text{ kW} = 27\,180 \text{ W}^*$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h} + 2 \cdot \frac{d_2}{k_2} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{1}{h}} = 679,0 \text{ W/(m}^2\text{·K)}$$

protitočni:

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(T_{vv} - T_{hi}) - (T_{vi} - T_{hv})}{\ln \frac{(T_{vv} - T_{hi})}{(T_{vi} - T_{hv})}} = 39,79 \text{ K}$$

$$A_{pt} = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_{\ln}} = 1,01 \text{ m}^2$$

sotočni:

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(T_{vv} - T_{hv}) - (T_{vi} - T_{hi})}{\ln \frac{(T_{vv} - T_{hv})}{(T_{vi} - T_{hi})}} = 36,41 \text{ K}$$

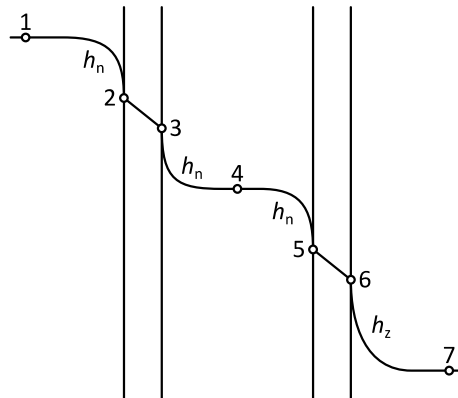
$$A_{st} = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_{\ln}} = 1,10 \text{ m}^2$$

\* v nadaljnjih izračunih je uporabljena vrednost v W, da ustreza enotam drugih veličin v enačbah

$A = A_{st} \rightarrow$  prenosnik je sotočen

### 3-6

Okno je sestavljeno iz dveh plasti stekla debeline 4 mm in vmesne plasti zraka. Toplotna prevodnost stekla je  $0,76 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , prevod toplote v plasti zraka med stekloma pa zanemarimo. Toplotna prestopnost med zrakom in steklom naj bo enaka  $8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  na notranji strani okna in med steklenima ploskvama, na zunanji strani okna pa  $23 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Zasteklitev je široka 1,5 m in visoka 1,2 m. V prostoru (točka 1) je temperatura  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , zrak med stekloma (točka 4) pa ima  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ .



a) Kolikšna je zunanja temperatura zraka (točka 7)?

b) Za koliko se bodo povečale izgube toplote skozi okno, če povišamo temperaturo v prostoru (točka 1) na  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  pri enaki zunanji temperaturi?

podano

$$d_s = 4 \text{ mm} = 0,004 \text{ m}$$

$$k_s = 0,76 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

$$h_n = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$$

$$h_z = 23 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$$

$$a = 1,5 \text{ m}$$

$$b = 1,2 \text{ m}$$

$$T_{1a} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_4 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{1b} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$$

iskano

$$T_7, \Delta \dot{Q}$$

$$\text{a) } U_{1-4} = \frac{1}{\frac{1}{h_n} + \frac{d_s}{k_s} + \frac{1}{h_n}} = 3,92 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$$

$$U_{4-7} = \frac{1}{\frac{1}{h_n} + \frac{d_s}{k_s} + \frac{1}{h_z}} = 5,76 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$$

$$A = a \cdot b = 1,8 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}_a = U_{1-4} \cdot A \cdot (T_{1a} - T_4) = U_{4-7} \cdot A \cdot (T_4 - T_7) = 105,8 \text{ W}$$

$$T_7 = T_4 - \frac{\dot{Q}_a}{U_{4-7} \cdot A} = -5,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

b)

$$U_{1-7} = \frac{1}{\frac{1}{U_{1-4}} + \frac{1}{U_{4-7}}} = 2,33 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\dot{Q}_b = U_{1-7} \cdot A \cdot (T_{1b} - T_7) = 118,4 \text{ W}$$

$$\Delta \dot{Q} = \dot{Q}_a - \dot{Q}_b = 12,6 \text{ W}$$

$$\Delta \dot{Q} = \frac{12,6}{105,77} \cdot 100 = 11,9 \%$$

## 3-7

Skozi ogrevalo, ki ima površino  $1,5 \text{ m}^2$ , teče  $0,5 \text{ kg/min}$  vode. Voda vstopa s temperaturo  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  in izstopa s  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , zrak pa se pri prehodu skozi radiator segreje z  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  na  $29 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tlak vode in zraka naj bo  $1 \text{ bar}$ . Upoštevaj, da je ogrevalo protitočni prenosnik toplote. Izračunaj:

- toplotni tok, ki se prenaša z vode na zrak ( $\dot{Q}$ ),
- masni tok zraka ( $\dot{m}_z$ ),
- skupni koeficient prehoda toplote ( $k$ ) za ogrevalo.

podano

$$A = 1,5 \text{ m}^2$$

$$\dot{m}_v = 0,5 \text{ kg/min} = 0,00833 \text{ kg/s}$$

$$T_{v1} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{v2} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{z1} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{z2} = 29 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p = 1 \text{ bar}$$

iskano

$$\dot{Q}, \dot{m}_z, U$$

tabele

$$h_{v1} = h(1 \text{ bar}, 80 \text{ }^\circ\text{C}) = 335 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{v2} = h(1 \text{ bar}, 60 \text{ }^\circ\text{C}) = 251,2 \text{ kJ/kg}$$

$$c_{p,z} = 1005 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\text{a) } \dot{Q} = \dot{m}_v \cdot (h_{v1} - h_{v2}) = 698 \text{ W}$$

$$\text{b) } \dot{Q} = \dot{m}_z \cdot c_{p,z} \cdot (T_{z2} - T_{z1}) \rightarrow \dot{m}_z = \frac{\dot{Q}}{c_{p,z} \cdot (T_{z2} - T_{z1})} = 0,0772 \text{ kg/s}$$

$$\text{c) } \Delta T_{\ln} = \frac{(T_{v1} - T_{z2}) - (T_{v2} - T_{z1})}{\ln \frac{T_{v1} - T_{z2}}{T_{v2} - T_{z1}}} = 45,28 \text{ K}$$

$$U = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta T_{\ln}} = 10,3 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

**3-8**

V tehnološkem procesu nastaja 1,7 kg/s CO<sub>2</sub> s temperaturo 120 °C. Hladimo ga v protitočnem prenosniku toplote z 1,3 kg/s vode, ki se segreje z 10 °C na 35 °C.

a) Na katero temperaturo se ohladi CO<sub>2</sub>?

b) Kolikšna mora biti površina prenosnika toplote, v katerem je skupni koeficient prehoda toplote 72 W/(m<sup>2</sup>·K)?

podano

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = 1,7 \text{ kg/s}$$

$$T_{\text{p1}} = 120 \text{ °C}$$

$$\dot{m}_{\text{v}} = 1,3 \text{ kg/s}$$

$$T_{\text{v1}} = 10 \text{ °C}$$

$$T_{\text{v2}} = 35 \text{ °C}$$

$$U = 72 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

iskano

$$T_{\text{p2}}, A$$

tabele

$$h_{\text{v1}} = h(1 \text{ bar}, 10 \text{ °C}) = 42,1 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{\text{v2}}(1 \text{ bar}, 35 \text{ °C}) = 146,7 \text{ kJ/kg}$$

$$c_p = 820 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\text{a) } \dot{Q} = \dot{m}_{\text{v}} (h_{\text{v2}} - h_{\text{v1}}) = 177,8 \text{ kW} = 177\,800 \text{ W}^*$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{CO}_2} \cdot c_p \cdot (T_{\text{p1}} - T_{\text{p2}}) \rightarrow T_{\text{p2}} = T_{\text{p1}} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{\text{CO}_2} \cdot c_p} = 22,4 \text{ °C}$$

$$\text{b) } \Delta T_{\text{ln}} = \frac{(T_{\text{p1}} - T_{\text{v2}}) - (T_{\text{p2}} - T_{\text{v1}})}{\ln \frac{T_{\text{p1}} - T_{\text{v2}}}{T_{\text{p2}} - T_{\text{v1}}}} = 37,8 \text{ K}$$

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{\text{ln}} \rightarrow A = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_{\text{ln}}} = 50,0 \text{ m}^2$$

\* v nadaljnjih izračunih je uporabljena vrednost v W, da ustreza enotam drugih veličin v enačbah



## 3-9

V protitočnem prenosniku toplote s površino  $120 \text{ m}^2$  hladimo vodo z zrakom. Voda ima tlak 2 bar in se ohladi s  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  na  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , zrak pa se pri tem segreje z  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  na  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Toplotna prestopnost na strani zraka je  $77 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , na strani vode pa  $5200 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Toplotna prevodnost stene je  $52 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , njena debelina pa  $2 \text{ mm}$ . Določi:

- logaritemsko temperaturno razliko,
- koeficient prehoda toplote,
- prenešeni toplotni tok in
- masni tok vode.

---

podano

$$A = 120 \text{ m}^2$$

$$p_v = 2 \text{ bar}$$

$$T_{v1} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{v2} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{z1} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{z2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_z = 77 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$$

$$h_v = 5200 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$$

$$k = 52 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

$$d = 2 \text{ mm} = 0,002 \text{ m}$$


---

iskano

$$\Delta T_{\text{ln}}, U, \dot{Q}, \dot{m}_v$$

tabele

$$h_{v1} = h(2 \text{ bar}, 110 \text{ }^\circ\text{C}) = 461,4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{v2} = h(2 \text{ bar}, 40 \text{ }^\circ\text{C}) = 167,6 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{a) } \Delta T_{\text{ln}} = \frac{(T_{v1} - T_{z2}) - (T_{v2} - T_{z1})}{\ln \frac{T_{v1} - T_{z2}}{T_{v2} - T_{z1}}} = 32,46 \text{ K}$$

$$\text{b) } \frac{1}{U} = \frac{1}{h_z} + \frac{d}{k} + \frac{1}{h_v} \rightarrow U = 75,66 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$$

$$\text{c) } \dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{\text{ln}} = 294\,700 \text{ W} = 294,7 \text{ kW}^*$$

$$\text{d) } \dot{Q} = \dot{m}_v \cdot (h_{v1} - h_{v2}) \rightarrow \dot{m}_v = \frac{\dot{Q}}{h_{v1} - h_{v2}} = 1 \text{ kg/s}$$

---

\* v nadaljnem izračunu je uporabljen vrednost v kW, da ustreza enotam drugih veličin v enačbi



## 4 Črpalke

### 4.1 Bernoullijeva enačba

Črpalke so delovni stroji, ki v eni ali več stopnjah povečujejo energijo nestisljivih tekočin, npr. vode. Stroju je za to potrebno dovajati energijo v obliki mehanskega dela. Ločimo volumetrične (izrivne) in turbinske (pretočne) črpalke. Osnova za obravnavo pretoka nestisljivih tekočin po cevovodih je enačba o ohranitvi energije, v kateri upoštevamo samo relevantne člene:

tlačna energija

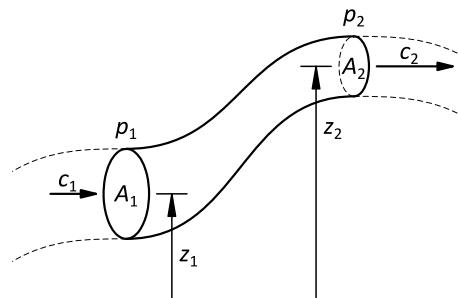
$$W_p = m \frac{p}{\rho}$$

potencialna energija

$$W_z = m g z$$

kinetična energija

$$W_c = m \frac{c^2}{2}$$



Skupna količina energije (vsota vseh treh členov), ki jo nosi tekočina, se ne spreminja sama od sebe, lahko pa prehaja iz ene oblike v drugo. Če vse tri člene delimo z maso ( $m$ ) in težnostnim pospeškom ( $g$ ), ki sta konstantna, dobimo posebno obliko enačbe o ohranitvi energije, ki jo imenujemo **Bernoullijeva enačba**.

$$\frac{p}{\rho g} + z + \frac{c^2}{2g} = \text{konst.}$$

### 4.2 Dobavna višina črpalke

Z zunanjimi vplivi lahko količino energije v tekočini tudi spremenimo, zmanjša se zaradi pretočnih uporov (izgube) ali odvajanja energije (npr. v vodni turbini), povečamo pa jo lahko z dovajanjem energije (npr. s črpalko). Črpalka tekočini dodaja energijo, zato se v splošnem vse tri obravnavane oblike energije (tlačna, potencialna in kinetična) spremenijo. Hkrati mora dovedena energija premagovati tudi trenje tekočine po cevovodu, ki ga običajno izrazimo kot zmanjšanje tlaka tekočine ( $\Delta p_{up}$ ). Moč, ki je potrebna za črpanje tekočine, določata sprememba energije same tekočine in izguba energije zaradi pretočnih uporov.

$$P_t = \dot{m} g \left( \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + (z_2 - z_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} + \frac{\Delta p_{up}}{\rho g} \right) = \dot{m} g H$$

Veličino  $H$  (izraz v oklepaju) imenujemo **dobavna višina črpalke** in predstavlja energijo, ki je potrebna za črpanje tekočine. Ta je dejansko odvisna od izvedbe cevovoda, medtem ko je od lastnosti črpalke odvisno, ali in pri kakšnih pogojih je sposobna tako dobavno višino zagotoviti.

Posamezni členi v enačbi za dobavno višino opisujejo:

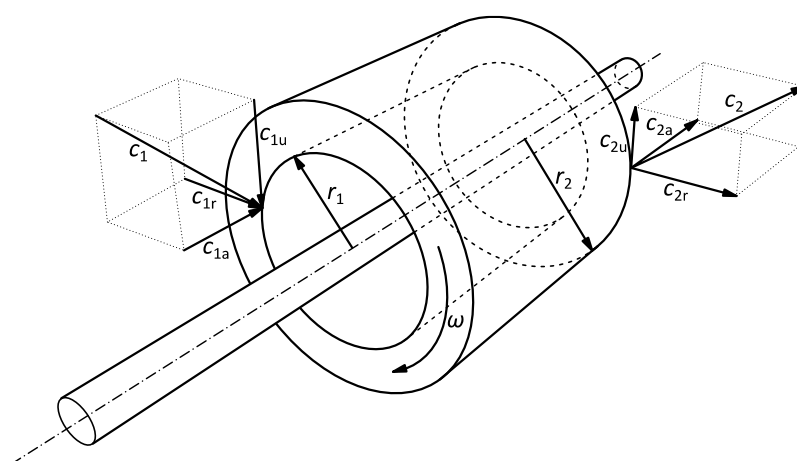
$$H = \underbrace{\frac{p_2 - p_1}{\rho g}}_I + \underbrace{(z_2 - z_1)}_{II} + \underbrace{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2g}}_{III} + \underbrace{\frac{\Delta p_{up}}{\rho g}}_{IV}$$

- I sprememba tlačne energije
- II sprememba potencialne energije (višine\*)
- III sprememba kinetične energije (hitrosti)
- IV izguba energije zaradi pretočnih uporov

Dobavna višina obenem določa, ali je črpalka v sistemu sploh potrebna. Če je v danem primeru dobavna višina večja od 0, potem je v sistemu potrebna črpalka, sicer se bo tekočina pretakala od začetne proti končni točki tudi brez črpalke, vendar ne nujno z želeno hitrostjo.

Tekočinam lahko dovajamo mehansko energijo na različne načine, najbolj razširjene so turbinske črpalke, pri katerih energijo dovajamo z vrtenjem rotorja. V rotirajočih sistemih velja impulzni izrek, ki pravi, da je sprememba vrtilne količine enaka vsoti navorov. Ti so vektorske veličine, torej imajo tri prostorske komponente, zato za stacionarni, osnosimetrični tok zapišemo impulzni izrek v vektorski obliki

$$\vec{M} = \vec{r} \times m \cdot \frac{d\vec{c}}{dt}$$



**Hitrostne razmere v rotorju turbinskega stroja**

\* Pazi! V primeru proste gladine kapljevine višinsko razliko vedno merimo do gladine, ne do roba posode, vstopne ali izstopne odprtine itd.

Ker se rotor vrti samo okrog ene osi v prostoru, je pomembna samo obodna komponenta, saj zgolj ta vpliva na vrtenje okrog osi rotacije, medtem ko se radialne komponente zaradi osne simetrije izničijo, aksialne pa prevzamejo aksialni ležaji. S tem lahko zapišemo impulzni izrek v skalarni obliki

$$M = m \cdot r \cdot \frac{dc_u}{dt} = \dot{m} \cdot \int_1^2 r \cdot dc_u$$

Upoštevamo, da je moč pri rotirajočem stroju enaka produktu navora in kotne hitrosti.

$$P = M \cdot \omega = M \cdot \frac{u}{r} = \dot{m} \cdot \int_1^2 u \cdot dc_u = \dot{m} \cdot (u_2 \cdot c_{u2} - u_1 \cdot c_{u1})$$

To je ena od oblik t. i. **Eulerjeve turbinske enačbe**, ki je osnova za izračun turbinskih strojev. Razvidno je, da je moč stroja odvisna samo od obodnih komponent vstopne in izstopne hitrosti, ni pa pomembno, kaj se dogaja v samem stroju.

### 4.3 Dopustna sesalna višina

Črpalka deli cevovodni sistem na dva dela – sesalni in tlačni. Glede na smer toka je sesalni del pred črpalko, tlačni pa za črpalko. Sama črpalka mora ustvariti potencialno razliko, ki povzroči gibanje tekočine po sistemu. Potrebno potencialno razliko ponovno določimo z upoštevanjem ohranitve energije, Bernoullijeve enačbe. V sesalnem delu cevovoda, od začetne točke 0 do vstopa v črpalko, točka 1, velja:

$$\frac{p_0}{\rho g} + z_0 + \frac{c_0^2}{2g} = \frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{c_1^2}{2g} + \frac{\Delta p_{\text{up,ses}}}{\rho g}$$

Tlak  $p_1$  mora vzpostaviti črpalka na svojem vstopu, če želimo, da bo pretok tekočine po sistemu tak, kot je zahtevan. Zaradi lastnosti snovi, ki se pretaka, tlak ne sme biti poljubno nizek. Treba je zagotoviti, da tekočina vedno ostane v kapljevitem stanju, kar pomeni, da mora biti tlak vedno višji od tlaka nasičenja (uparjanja). Tlak in temperatura uparjanja sta medsebojno povezana, kar pomeni, da je pri dani temperaturi fazna sprememba možna samo pri točno določenem tlaku, ki ga imenujemo tlak nasičenja. Tlak na vstopu v črpalko mora biti zato vedno višji od tlaka nasičenja pri dani temperaturi tekočine.

$$p_1 > p_s(T)$$

Z upoštevanjem te omejitve lahko ugotovimo, kolikšna sme biti največja višinska razlika med začetnim nivojem ( $z_0$ ) in črpalko ( $z_1$ ), ki jo imenujemo sesalna višina.

$$z_1 - z_0 = H_{s,\text{dop}} < \frac{p_0 - p_s(T) - \Delta p_{\text{up,ses}}}{\rho g} - \frac{c_1^2 - c_0^2}{2g}$$

Dejanska sesalna višina mora biti vedno manjša od dopustne sesalne višine, sicer bi se tekočina pred črpalko začela uparjati, kar pa se v sistemu ne sme zgoditi.

Dopustna sesalna višina ima lahko pozitivne in negativne vrednosti. Slednje pomenijo, da je treba črpalko namestiti nižje od začetnega nivoja vode. Na sesalno višino je še posebej treba paziti v primerih črpanja tekočine s temperaturo blizu vrelišča ali celo vrele tekočine.

#### 4.4 Izgube energije v cevovodu

Izgube energije v cevovodu, ki jih mora premagovati črpalka, delimo na dve vrsti:

1. **linijske izgube** se pojavljajo zaradi toka tekočine v ravnih delih cevovoda in so posledica trenja tekočine ob stene cevi

$$\frac{\Delta p_{\text{lin}}}{\rho g} = \frac{L}{d} \lambda \frac{c^2}{2g}$$

$L$  dolžina ravnih delov cevovoda, m  
 $d$  notranji premer cevovoda, m  
 $c$  hitrost tekočine v cevovodu, m/s  
 $\lambda$  koeficient trenja v cevovodu, /

Koeficient trenja v cevovodu določimo glede na Reynoldsovo število, ki določa tip toka tekočine glede na razmerje vztrajnostnih in viskoznih sil na tekočino.

$$Re = \frac{c d}{\nu}$$

$\nu$  kinematična viskoznost tekočine, m<sup>2</sup>/s

laminarni tok  
 $Re < 2300$

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

turbulentni tok  
 $Re > 2300$

$$\lambda = \frac{0,31}{(\log(0,143 Re))^2}$$

Če je cevovod sestavljen iz odsekov z različnimi notranjimi premeri cevi, je treba linijske izgube izračunati za vsak del posebej in jih na koncu sešteti.

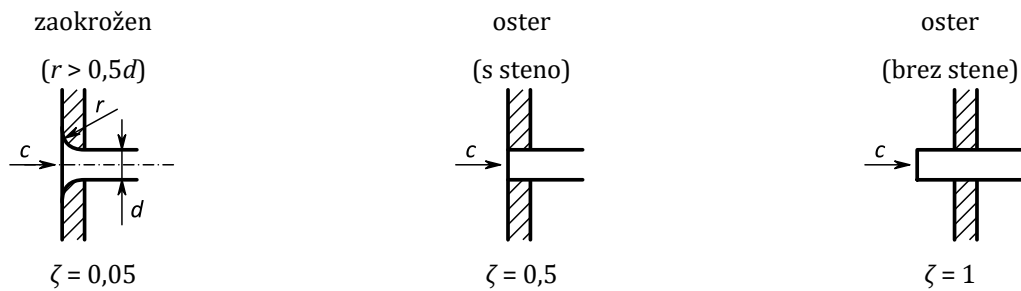
2. **lokalne izgube** se pojavljajo zaradi toka tekočine preko različnih ovir v cevovodu, kot so vstop v cevovod, izstop iz cevovoda, kolena, ventili, zožitve, razširitve, razcepi ... opišemo jih z eksperimentalno določenimi koeficienti lokalnih uporov

$$\frac{\Delta p_{\text{lok}}}{\rho g} = \frac{c^2}{2g} \sum_i \zeta_i$$

Vrednosti koeficientov lokalnih izgub\*:

**Vstop iz posode v cevovod**

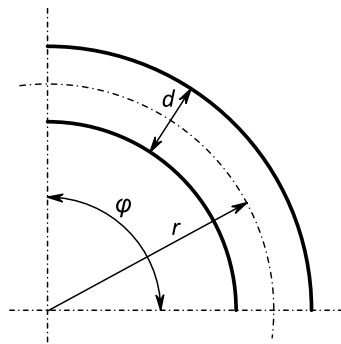
\* *Krautov strojniški priročnik, 17. slovenska popravljena izd., predelana, 1. natis.* Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo. 2019



**Krožni lok** (koti od 0° do 180°, okrogel ali kvadraten presek)

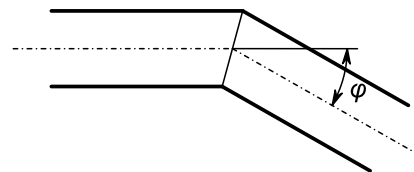
$$\zeta = n_z n_k$$

| faktor zakrivljenosti |       | faktor kota |       |
|-----------------------|-------|-------------|-------|
| $r/d$                 | $n_z$ | $\varphi$   | $n_k$ |
| 1,0                   | 0,27  | 30°         | 0,4   |
| 1,5                   | 0,20  | 60°         | 0,7   |
| 2                     | 0,15  | 90°         | 1,0   |
| 3                     | 0,13  | 120°        | 1,3   |
| 4                     | 0,10  | 150°        | 1,5   |
| 5                     | 0,10  |             |       |
| 6                     | 0,10  |             |       |
| 10                    | 0,11  | 180         | 1,7   |

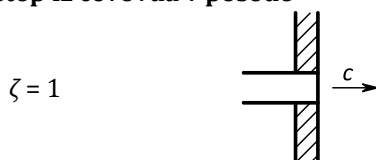


**Koleno**

|           |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\varphi$ | 15°  | 30°  | 45°  | 60°  | 90°  | 105° | 120° |
| $\zeta$   | 0,04 | 0,13 | 0,24 | 0,47 | 1,13 | 1,80 | 2,26 |



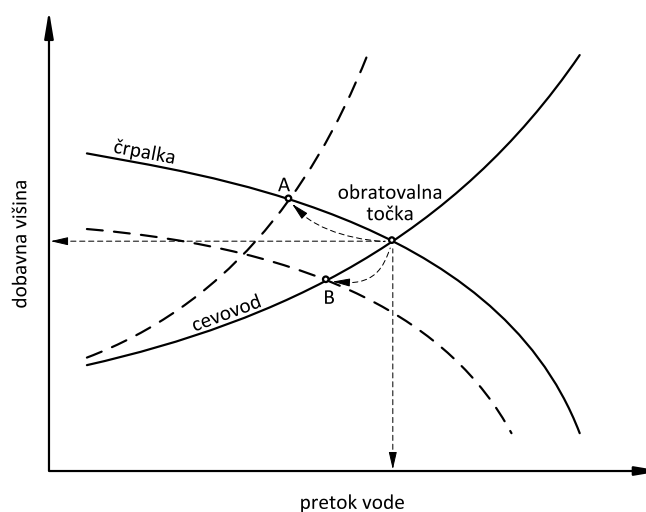
**Izstop iz cevovoda v posodo**



## 4.5 Karakteristika črpalke in cevovoda

**Karakteristika črpalke** je grafična predstavitev obratovalnih parametrov turbinske črpalke v različnih obratovalnih pogojih. V odvisnosti od pretoka tekočine skozi črpalke je običajno podana dobavna višina črpalke (energija, ki jo črpalke dovaja tekočini), lahko pa tudi izkoristek in moč črpalke. Dobavna višina, ki jo je črpalke sposobna dovajati tekočini, se s povečevanjem pretoka vedno zmanjšuje, zato je karakteristika črpalke vedno padajoča krivulja. Karakteristične krivulje za določen model črpalke je treba določiti eksperimentalno, z njimi pa je nato možno izbrati ustrezno črpalke glede na tehnične zahteve in lastnosti cevovoda v konkretnem primeru.

**Karakteristika cevovoda** pove, kolikšno dobavno višino (prirast tlaka) mora tekočini dovajati črpalka za premagovanje tlačnih padcev pri različnih pretokih. Določimo jo tako, da izračunamo potrebne dobavne višine črpalke pri različnih pretokih tekočine (od 0 do največjega pretoka, ki nas zanima). Pri spreminjanju pretoka ostajata konstantna člena I (tlak) in II (višina). Če se cevovod začne in konča s posodo, tudi člen III (hitrost) ostaja enak 0. S pretokom se vedno spreminja člen IV – pretočni upori v cevovodu. Z naraščanjem pretoka se upori povečujejo približno s kvadratom hitrosti (pretoka), zato je karakteristika cevovoda vedno naraščajoča krivulja.



**Karakteristika črpalke in cevovoda ter obratovalna točka**

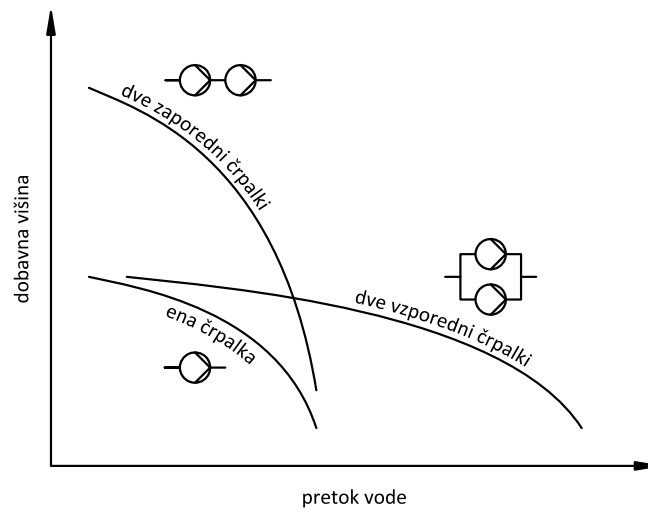
**Obratovalna točka** je sečišče krivulj karakteristike črpalke in karakteristike cevovoda ter kaže, kolikšen pretok tekočine bo zagotavljala dana črpalka v danem cevovodu. Če želimo pretok spremeniti, moramo spremeniti lastnosti (karakteristiko) bodisi cevovoda bodisi črpalke.

Lastnosti cevovoda običajno spreminjamo s spreminjanjem pretočnih uporov v regulacijskem ventilu. S pripiranjem ventila upori naraščajo, karakteristična krivulja cevovoda postaja vse bolj strma, obratovalna točka se po karakteristični krivulji črpalke pomika proti manjšim pretokom (A). Z zmanjševanjem hitrosti vrtenja turbinske črpalke spreminjamo karakteristiko črpalke, ki se pomika proti koordinatnemu izhodišču. Obratovalna točka se ob tem po karakteristični krivulji cevovoda pomika proti manjšim pretokom (B).

Kadar posamezna črpalka ne zmore zagotavljati zadostne dobavne višine ali pretoka, lahko v sistem vključimo več črpalk. Te so lahko v sistem postavljene zaporedno ali vzporedno. Sistem črpalk se obnaša kot samostojna črpalka s karakteristiko (odvisnostjo dobavne višine od pretoka), ki je kombinacija karakteristik posameznih črpalk v sistemu. Pri **zaporedni** vezavi



dveh enakih črpalk se pri enakem pretoku podvoji dobavna višina, pri **vzporedni** vezavi pa se ob enaki dobavni višini podvoji pretok.



**Karakteristika črpalke in sistema črpalk**

## 4.6 Naloge

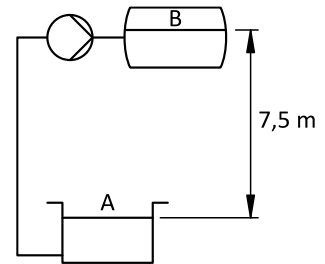
### 4-1

Vodo s tlakom 1 bar in temperaturo 70 °C želimo črpati v 7,5 m višjo posodo z 0,4 bar višjim tlakom. Upori v cevovodu s premerom 25 mm so 0,35 bar. Kolikšni sta

a) dobavna višina in

b) dopustna sesalna višina

črpalke pri pretoku vode 0,75 L/s? Upoštevaj, da je črpalka nameščena tik ob zgornji posodi.



podano

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

$$T_A = 70 \text{ °C}$$

$$\Delta z = 7,5 \text{ m}$$

$$p_B = 1,4 \text{ bar} = 1,4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$d = 25 \text{ mm} = 0,025 \text{ m}$$

$$\Delta p_{\text{up}} = 0,35 \text{ bar} = 0,35 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\dot{V} = 0,75 \text{ L/s} = 0,00075 \text{ m}^3/\text{s}$$

iskano

$$H, H_{s,\text{dop}}$$

tabele

$$\rho (70 \text{ °C}) = 977,8 \text{ kg/m}^3$$

$$p_s (70 \text{ °C}) = 0,312 \text{ bar} = 31\,200 \text{ Pa}$$

$$\text{a) } H = \frac{p_B - p_A}{\rho \cdot g} + \Delta z + \frac{\Delta p_{\text{up}}}{\rho \cdot g} = 15,3 \text{ m}$$

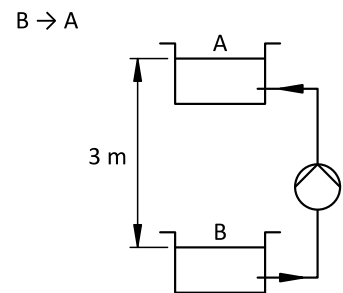
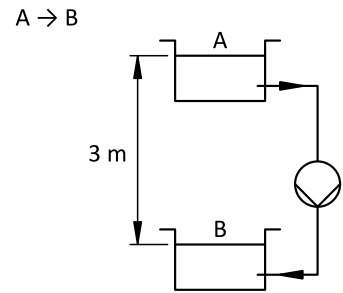
$$\text{b) } \dot{V} = A \cdot c \rightarrow c = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dot{V} \cdot 4}{\pi \cdot d^2} = 1,53 \text{ m/s}$$

$$H_{s,\text{dop}} < \frac{p_A - p_s - \Delta p_{\text{up}}}{\rho \cdot g} - \frac{c^2}{2 \cdot g} = 3,4 \text{ m}$$

4-2

Po cevovodu na shemi želimo pretakati 15 kg/s vode z gostoto 996 kg/m<sup>3</sup> iz posode A v posodo B in obratno. Skupni upori v cevovodu znašajo 0,32 bar, notranji izkoristek črpalke pa je 83 %.

- Ugotovi, v katerem primeru potrebujemo črpalke.
- Kolikšna je notranja moč črpalke?
- Kako se razmere spremenijo, če zmanjšamo upore v cevovodu na 0,28 bar?



| podano   | iskano |
|--|--------|
| $\dot{m} = 15 \text{ kg/s}$                              | $P_n$  |
| $\rho = 996 \text{ kg/m}^3$                              |        |
| $\Delta p_{up1} = 0,32 \text{ bar} = 32\,000 \text{ Pa}$ |        |
| $\eta_n = 0,83$  |        |
| $\Delta p_{up2} = 0,28 \text{ bar} = 28\,000 \text{ Pa}$ |        |
| $\Delta z_{AB} = -3 \text{ m}$                           |        |
| $\Delta z_{BA} = 3 \text{ m}$                            |        |

A → B

B → A

$$a) \quad H = \frac{p_B - p_A}{\rho \cdot g} + \Delta z_{AB} + \frac{\Delta p_{up1}}{\rho \cdot g} = 0,275 \text{ m}$$

$$H = \frac{p_A - p_B}{\rho \cdot g} + \Delta z_{BA} + \frac{\Delta p_{up1}}{\rho \cdot g} = 6,275 \text{ m}$$

$H > 0 \rightarrow$  črpalke je potrebna

$H > 0 \rightarrow$  črpalke je potrebna

$$b) \quad P_n = \frac{P_t}{\eta_n} = \frac{\dot{m} \cdot g \cdot H}{\eta_n} = 48,77 \text{ W}$$

$$P_n = \frac{P_t}{\eta_n} = \frac{\dot{m} \cdot g \cdot H}{\eta_n} = 1112,5 \text{ W}$$

$$c) \quad H = \frac{p_B - p_A}{\rho \cdot g} + \Delta z_{AB} + \frac{\Delta p_{up1}}{\rho \cdot g} = -0,133 \text{ m}$$

$$H = \frac{p_A - p_B}{\rho \cdot g} + \Delta z_{BA} + \frac{\Delta p_{up1}}{\rho \cdot g} = 5,867 \text{ m}$$

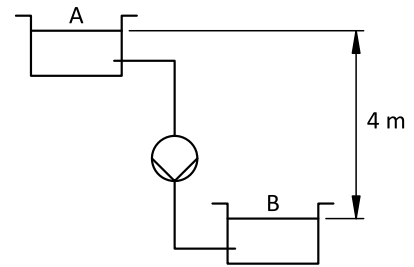
$H < 0 \rightarrow$  črpalke ni potrebna

$H > 0 \rightarrow$  črpalke je potrebna

$$P_n = \frac{P_t}{\eta_n} = \frac{\dot{m} \cdot g \cdot H}{\eta_n} = 1039,7 \text{ W}$$

### 4-3

Vodo želimo pretakati iz zgornjega rezervoarja v 4 m nižje ležeči rezervoar po cevovodu s premerom 120 mm. Linijske in lokalne upore v ceveh ocenimo z enačbo  $\Delta p_{up} = 17500 \cdot c^2$  (v Pa, če je hitrost v m/s).



- Kolikšna je potrebna moč črpalke, da bo pretok 24 kg/s?
- Kolikšen je skupni izkoristek črpalke, če porablja 1 kW električne moči?
- Kolikšen je masni pretok vode po cevovodu, če v sistemu ni črpalke? Gostota vode je 1000 kg/m<sup>3</sup>, okoliški tlak pa 1 bar.

podano

$$\Delta z = -4 \text{ m}$$

$$d = 125 \text{ mm} = 0,125 \text{ m}$$

$$\Delta p_{up} = 17500 \cdot c^2$$

$$\dot{m} = 24 \text{ kg/s}$$

$$P_{el} = 1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

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

iskano

$$P_t, \eta, \dot{m}_0$$

$$a) \quad c = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\rho \cdot \pi \cdot d^2} = 1,96 \text{ m/s}$$

$$\Delta p_{up} = 17500 \cdot c^2 = 66\,933 \text{ Pa}$$

$$H = \Delta z + \frac{\Delta p_{up}}{\rho \cdot g} = 2,83 \text{ m}$$

$$P_t = \dot{m} \cdot g \cdot H = 665 \text{ W}$$

$$b) \quad \eta = \frac{P_t}{P_{el}} = 66,5 \%$$

c) sistem brez črpalke  $\rightarrow H = 0$

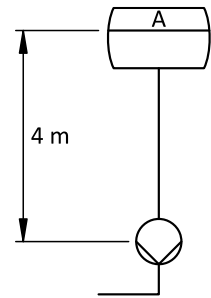
$$H = \Delta z + \frac{17500 \cdot c_0^2}{\rho \cdot g} = 0 \rightarrow c_0 = \sqrt{\frac{-\Delta z \cdot \rho \cdot g}{17500}} = 1,5 \text{ m/s}$$

$$\dot{m}_0 = A \cdot c_0 \cdot \rho = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot c_0 \cdot \rho = 16,96 \text{ kg/s}$$

**4-4**

V napajalnem rezervoarju je vrela voda s tlakom 2 bar. Črpalčka je postavljena 4 m pod nivojem vode v rezervoarju. Upore v cevovodu lahko izrazimo z enačbo  $\Delta p_{up} = 3300 \cdot c^2$  (v Pa, če je hitrost v m/s).

Kolikšen mora biti premer cevovoda, da bo po njem lahko teklo 12 kg/s vode?



| podano  | iskano                                      |
|---|---|
| $p_A = 2 \text{ bar} = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ | $d$   |
| $\Delta p_{up} = 3300 \cdot c^2$                |   |
| $\dot{m} = 12 \text{ kg/s}$                     | tabele                                      |
| $H_s = -4 \text{ m}$                            | $p_s = p_A = 2 \text{ bar}$                 |
|   | $\rho'(2 \text{ bar}) = 943 \text{ kg/m}^3$ |

$$H_{s,dop} < \frac{p_A}{\rho \cdot g} - \frac{p_s}{\rho \cdot g} - \frac{c^2}{2 \cdot g} - \frac{3300 \cdot c^2}{\rho \cdot g} = H_s \rightarrow c_{dop} < \sqrt{\frac{p_A - p_s - \rho \cdot g \cdot H_s}{\frac{\rho}{2} + 3300}} = 3,13 \text{ m/s}$$

$$\dot{m} = A \cdot c \cdot \rho = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot c \cdot \rho \rightarrow d > \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot c_{dop} \cdot \rho}} = 0,072 \text{ m} = 72 \text{ mm}$$

#### 4-5

Določi dobavno višino črpalke za sistem na shemi. Premer cevovoda je 65 mm, hitrost vode je 1,5 m/s, njena temperatura pa 20 °C. Koefficienti lokalnih uporov so:

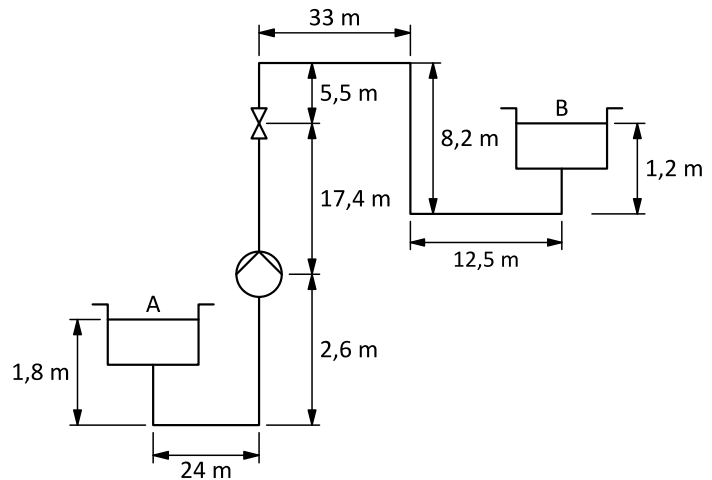
vstop: 0,5

izstop: 1

koleno: 1,13

ventil: 2,6

Torni koefficient je  $\lambda = 0,018$ .



podano

$$d = 65 \text{ mm} = 0,065 \text{ m}$$

$$c = 1,5 \text{ m/s}$$

$$T = 20 \text{ °C}$$

$$\zeta_v = 0,5$$

$$\zeta_i = 1$$

$$\zeta_k = 1,13$$

$$\zeta_v = 2,6$$

$$\lambda = 0,018$$

iskano

$H$

tabele

$$\rho (20 \text{ °C}) = 998,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta z = 17,4 + 5,5 - 8,2 + (2,6 - 1,8) + 1,2 = 16,7 \text{ m}$$

$$L = 1,8 + 24 + 2,6 + 17,4 + 5,5 + 3,3 + 8,2 + 12,5 + 1,2 = 106,2 \text{ m}$$

$$\Delta p_{\text{lin}} = \frac{L}{d} \cdot \lambda \cdot \frac{\rho \cdot c^2}{2} = 33\,026 \text{ Pa}$$

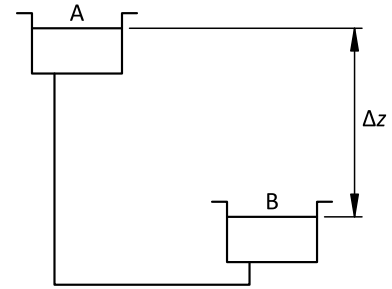
$$\Delta p_{\text{lok}} = (\zeta_v + \zeta_i + 6\zeta_k + \zeta_v) \cdot \frac{\rho \cdot c^2}{2} = 12\,218 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{\text{up}} = \Delta p_{\text{lok}} + \Delta p_{\text{lin}} = 45\,244 \text{ Pa}$$

$$H = \Delta z + \frac{\Delta p_{\text{up}}}{\rho \cdot g} = 21,3 \text{ m}$$

4-6

Cevovod na shemi je dolg 50 m, notranji premer cevi pa je 5 cm. Koeficient lokalnega upora za vstopno ustje cevi je 0,5, za izstopno ustje 1 in za vsako pravokotno koleno 1,13. Gostota vode je  $997 \text{ kg/m}^3$ , njena viskoznost pa  $8,93 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . Kolikšna je višinska razlika nivojev vode v obeh bazenih, če je masni tok skozi cevovod brez črpalke enak  $3,2 \text{ kg/s}$ ?



podano

$$L = 50 \text{ m}$$

$$d = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$$

$$\zeta_v = 0,5$$

$$\zeta_i = 1$$

$$\zeta_k = 1,13$$

$$\rho = 997 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu = 8,93 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\dot{m} = 3,2 \text{ kg/s}$$

iskano

$$\Delta z$$

$$c = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\rho \cdot \pi \cdot d^2} = 1,63 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu} = 91\,526$$

$$\lambda = \frac{0,31}{(\log(0,143 \cdot Re))^2} = 0,0183$$

$$\Delta p_{\text{lin}} = \frac{L}{d} \cdot \lambda \cdot \frac{\rho \cdot c^2}{2} = 24\,364 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{\text{lok}} = (\zeta_v + \zeta_i + 2 \cdot \zeta_k) \cdot \frac{\rho \cdot c^2}{2} = 5008 \text{ Pa}$$

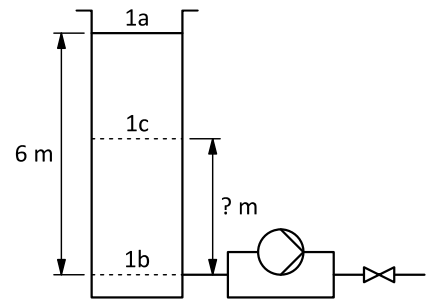
$$\Delta p_{\text{up}} = \Delta p_{\text{lok}} + \Delta p_{\text{lin}} = 29\,372 \text{ Pa}$$

sistem brez črpalke  $\rightarrow H = 0$

$$H = \Delta z + \frac{\Delta p_{\text{up}}}{\rho \cdot g} = 0 \rightarrow \Delta z = -\frac{\Delta p_{\text{up}}}{\rho \cdot g} = -3,00 \text{ m}$$

4-7

Iz rezervoarja na shemi naj voda izteka v okolico s konstantno hitrostjo 0,6 m/s. Skupni upori v tlačnem delu cevovoda so 0,23 bar, v tlačnem brez upoštevanja ventila pa 0,17 bar. Temperatura vode je 40 °C, tlak okolice pa 970 mbar.



- Kolikšen dodatni upor mora povzročati ventil, da voda ne izteka prehitro, kadar je v rezervoarju gladina vode najvišja?
- Kolikšna bo moč črpalke pri najnižji gladini vode, če je pretok vode 0,75 kg/s, ventil pa povsem odprt?
- Pri kateri gladini vode ne bo treba niti zavirati z ventilom niti poganjati s črpalko, da bo voda iztekala z zahtevano hitrostjo?
- Ali smemo tudi vodo s temperaturo 80 °C črpati z nivoja b)?

| podano  | iskano   |
|---|--|
| $c_2 = 0,6 \text{ m/s}$                                   | $\Delta p_v, P, \Delta z$                                      |
| $\Delta p_{up,s} = 0,23 \text{ bar} = 23\,000 \text{ Pa}$ |  |
| $\Delta p_{up,t} = 0,17 \text{ bar} = 17\,000 \text{ Pa}$ | tabele   |
| $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$                              | $\rho_{40} = 992,2 \text{ kg/m}^3$                             |
| $\Delta z_a = -6 \text{ m}$                               | $\rho_{80} = 971,8 \text{ kg/m}^3$                             |
| $\Delta z_b = 0 \text{ m}$                                | $p_s(80 \text{ °C}) = 0,4741 \text{ bar} = 47\,410 \text{ Pa}$ |
| $\dot{m} = 0,75 \text{ kg/s}$                             |  |

a) sistem brez črpalke:  $H = 0$

$$H_a = 0 = \frac{p_2 - p_1}{\rho_{40} \cdot g} + \Delta z_a + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2 \cdot g} + \frac{\Delta p_{up,s} + \Delta p_{up,t} + \Delta p_v}{\rho_{40} \cdot g}$$

$$\Delta p_v = - \left( \Delta z \cdot \rho_{40} \cdot g + \frac{\rho \cdot c_2^2}{2} + \Delta p_{up,s} + \Delta p_{up,t} \right) = 18\,204 \text{ Pa} = 0,182 \text{ bar}$$

b)

$$H_b = \frac{p_2 - p_1}{\rho_{40} \cdot g} + \Delta z_b + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2 \cdot g} + \frac{\Delta p_{up,s} + \Delta p_{up,t}}{\rho_{40} \cdot g} = \frac{c_2^2}{2 \cdot g} + \frac{\Delta p_{up,s} + \Delta p_{up,t}}{\rho_{40} \cdot g} = 4,13 \text{ m}$$

$$P_b = \dot{m} \cdot g \cdot H_b = 30,4 \text{ W}$$



$$c) \quad H_c = 0 = \frac{p_2 - p_1}{\rho_{40} \cdot g} + \Delta z_c + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2 \cdot g} + \frac{\Delta p_{up,s} + \Delta p_{up,t}}{\rho_{40} \cdot g}$$

$$\Delta z_c = - \left( \frac{c_2^2}{2 \cdot g} + \frac{\Delta p_{up,s} + \Delta p_{up,t}}{\rho_{40} \cdot g} \right) = 4,13 \text{ m } (= H_b)$$

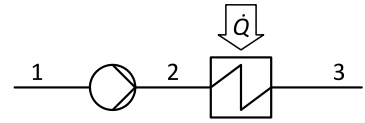
$$d) \quad H_{s,dop} < \frac{p_1 - p_s - \Delta p_{up,s}}{\rho_{80} \cdot g} - \frac{c_2^2}{2 \cdot g} = 2,77 \text{ m}$$

Ker je  $\Delta z_b = 0 \text{ m} < H_{s,dop}$ , lahko tudi vročo vodo izčrpamo vse do spodnjega nivoja.

### 4-8

Črpalčka potiska vodo skozi prenosnik toplote, kot prikazuje skica.

V prenosniku dovedemo vodi, ki se segreje z 20 °C na 60 °C, 83,7 kW toplotnega toka. Tlak pred črpalčko je 2 bar, za prenosnikom toplote pa 4,5 bar. Tlačne izgube zaradi uporov v prenosniku toplote so  $\Delta p_{up} = 1200 \cdot \dot{m}$  (v mbar, če je masni tok v kg/s).



a) Kolikšen je masni pretok vode?

b) Kolikšno dobavno višino mora zagotoviti črpalčka za zahtevani pretok vode?

c) Kolikšno moč porablja črpalčka s skupnim izkoristkom 91 %?

podano

$$T_2 = 20 \text{ °C}$$

$$T_3 = 60 \text{ °C}$$

$$\dot{Q} = 83,7 \text{ kW}$$

$$p_1 = 2 \text{ bar} = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_3 = 4,5 \text{ bar} = 4,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{up} = 1200 \cdot \dot{m}$$

$$\eta = 0,91$$

iskano

$$\dot{m}, H, P$$

tabele

$$h_2 = h(4,5 \text{ bar}, 20 \text{ °C}) = 84,3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = h(4,5 \text{ bar}, 60 \text{ °C}) = 251,5 \text{ kJ/kg}$$

$$\rho = h(3 \text{ bar}, 40 \text{ °C}) = 992,3 \text{ kg/m}^3$$

(pri srednji temperaturi in pribl. srednjem tlaku)

$$a) \quad \dot{Q} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2) \rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{Q}}{h_3 - h_2} = 0,5 \text{ kg/s}$$

$$b) \quad \Delta p_{up} = K_{up} \cdot \dot{m} = 601 \text{ mbar} = 60 \text{ 100 Pa}^*$$

$$H = \frac{p_3 - p_1}{\rho \cdot g} + 0 + 0 + \frac{\Delta p_{up}}{\rho \cdot g} = 31,86 \text{ m}$$

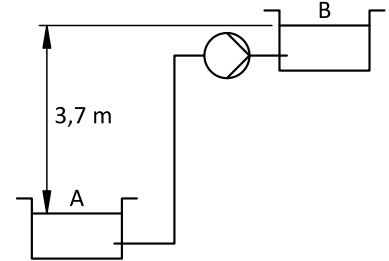
$$c) \quad P_t = \dot{m} \cdot g \cdot H = 156,5 \text{ W}$$

$$P = \frac{P_t}{\eta} = 171,9 \text{ W}$$

\* v nadaljnem izračunu je uporabljena vrednost v Pa, da ustreza enotam drugih veličin v enačbi

4-9

Vodo s tlakom 1 bar in temperaturo 80 °C želimo črpati v višje ležečo posodo z enakim tlakom. Cevovod ima konstanten premer 25 mm, skupna dolžina cevovoda je 53 m, koeficient upora za vstop v cevovod je 0,5, za izstop 1, za vsakega izmed zavojev pa 0,25. Pretok vode je 0,75 L/s, njena viskoznost pa  $3,65 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .



- Kolikšen je skupni padec tlaka zaradi uporov v cevovodu?
- Kolikšna je dobavna višina črpalke?
- Ali sme biti črpalka nameščena ob zgornji posodi?

podano

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

$$T = 80 \text{ °C}$$

$$d = 25 \text{ mm} = 0,025 \text{ m}$$

$$L = 53 \text{ m}$$

$$\zeta_{\text{vst}} = 0,5$$

$$\zeta_{\text{izst}} = 1$$

$$\zeta_{\text{zav}} = 0,25$$

$$\dot{V} = 0,75 \text{ L/s} = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\nu = 3,65 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

iskano

$$\Delta p_{\text{up}}, H, H_{\text{s,dop}}$$

tabele

$$\rho = h(1 \text{ bar}, 80 \text{ °C}) = 9 \text{ kg/m}^3$$

$$p_{\text{s}}(80 \text{ °C}) = 0,474 \text{ bar} = 47\,400 \text{ Pa}$$

$$\text{a) } c = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot d^2} = 1,53 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu} = 104\,754$$

$$\lambda = \frac{0,31}{(\log(0,143 \cdot Re))^2} = 0,0178$$

$$\Delta p_{\text{up}} = \Delta p_{\text{lin}} + \Delta p_{\text{lok}} = \frac{L}{d} \cdot \lambda \cdot \frac{\rho \cdot c^2}{2} + \sum \zeta_i \cdot \frac{\rho \cdot c^2}{2} = \left( \frac{L}{d} \cdot \lambda + \sum \zeta_i \right) \cdot \frac{\rho \cdot c^2}{2} = 24\,857 \text{ Pa}$$

$$\text{b) } H = \Delta z + \frac{\Delta p_{\text{up}}}{\rho \cdot g} = 6,31 \text{ m}$$

$$\text{c) } H_{\text{s,dop}} = \frac{p_1}{\rho \cdot g} - \frac{p_s}{\rho \cdot g} - \frac{c^2}{2 \cdot g} - \frac{\Delta p_{\text{up}}}{\rho \cdot g} = 2,79 \text{ m}$$

Ker je črpalka nameščena tik ob zgornji posodi, zanemarimo razliko med  $\Delta p_{\text{up}}$  in  $\Delta p_{\text{up,s}}$ . Dejanska sesalna višina je večja od dopustne, zato je postavitve črpalke neustrezna.



## 5 Zgorevanje

Energije, ki jih potrebujemo za življenje in delo, črpamo iz naravnih energijskih virov in jih imenujemo primarne energije. Po podatkih Mednarodne agencije za energijo (IEA) je bila svetovna poraba primarnih virov v letu 2015 enaka ekvivalentu 13 647 milijonom ton nafte, pri čemer so bili deleži naslednji: premog 28,1 %, nafta 31,7 %, zemeljski plin 21,6 %, jedrska energija 4,9 %, hidroenergija 2,5 %, biomasa in odpadki 9,7 %, ostali novi obnovljivi viri (veter, fotovoltaika, geotermalna itd.) 1,5 %. To pomeni, da se človeštvo oskrbuje s prek 90 % vse energije iz procesa **zgorevanja**. Pri tem procesu se sprošča kemična notranja energija goriv in večina se prenese na produkte zgorevanja, s čimer povečuje kalorični del njihove notranje energije in hkrati tudi njihovo temperaturo. Tako dobimo vir toplote, ki ga uporabljamo za delovne in ogrevalne procese.

Intenzivna uporaba fosilnih goriv, ki je značilnost naše civilizacije, v bližnji prihodnosti razmer v svetu ne bo zaznamovala s problemi pomanjkanja goriv, temveč s problemi, ki nastajajo zaradi uporabe goriv. Ti problemi so posledica škodljivih vplivov uporabe goriv na okolje, ki povzročajo spreminjanje ekoloških dejavnikov. Zmanjševanje rabe energije in omejitev povpraševanja po energiji pomenita tudi zmanjšanje emisij in odpadkov in s tem zmanjšanje onesnaževanja okolja.

**Emisija** je izpuščanje oziroma oddajanje snovi iz posameznega vira onesnaževanja (navadno v zrak). Koncentracija snovi v izpustu, npr. v odpadnih plinih, je masa izpuščene snovi na enoto prostornine odpadnih plinov pri normalnih pogojih. Količina snovi iz vira onesnaževanja je masa izpuščene snovi na časovno enoto.

**Imisija** je koncentracija snovi (v zraku). Koncentracija snovi v zraku se izraža v masnih enotah na enoto prostornine pri normalnih pogojih.

**Goriva** so snovi, ki jih uporabljamo za pridobivanje toplote. Vsebujejo kemično notranjo energijo in so naravnega ali umetnega izvora. Delimo jih na trdna, tekoča (kapljevita) in plinasta. Goriva umetnega izvora imenujemo tudi sintetična goriva.

### *Naravna goriva*

- Trdna: les, premog, šota, odpadki biološkega izvora itn.
  - *Premog* je nastal iz lesa pod vplivom delovanja bakterij v anaerobnih razmerah s počasnim procesom karbonizacije. Stopnja (dokončanje) karbonizacije premoga je odvisna od njegove starosti. Najvišja je pri antracitu in se znižuje od črnega do rjavega premoga in lignita.
  - *Biomasa* so ostanki lesa v lesni industriji, organski odpadki kmetijske proizvodnje, organski komunalni odpadki itd. Kurilnost različnih vrst biomase je 14–20 MJ/kg.

- Tekoča: nafta.
  - *Nafta* sestoji iz nasičenih in nearomatskih, večinoma cikličnih ogljikovodikov ter njihovih spojin. Vrste nafte: parafinska, naftenska in mešana nafta. S kemijsko predelavo nafte se ukvarja petrokemija. Bistveni postopek predelave je frakcionirana destilacija, ki omogoča separacijo komponent nafte.
- Plinasta: zemeljski plin.
  - *Zemeljski (naravni) plin* vsebuje več kot 90 % metana, nekaj višjih ogljikovodikov in inertne pline.

#### *Umetna goriva*

- Trdna: koks, lesno oglje, briketi itn.
  - *Koks* in *lesno oglje* sta trdna ostanka suhe destilacije premoga oziroma lesa, glavni sestavini sta ogljik in pepel.
  - *Brikete* iz premoga dobimo s stiskanjem premogovega prahu, ki se mu primeša vezivo. Podoben postopek je briketiranje (peletiranje) lesa.
- Tekoča: pogonska olja, alkoholi, sulfitna lužina itd. Tekoča goriva imajo prednost pred trdnimi zaradi lažjega transporta, skladiščenja, preprostejšega kurjenja, večje kurilnosti, manjših ekoloških vplivov itd.
  - *Pogonska olja*: bencini, kerozin, plinsko olje (dizelsko gorivo, kurilno olje), pridobivamo jih s frakcionirano destilacijo nafte in katrana. Delež lahkih olj povečujemo s cepljenjem velikih molekul (krekiranje).
  - *Alkoholi* vsebujejo hidroksilno skupino -OH, ki je vezana na ogljikov skelet (ostanek ogljikovodika). Metanol CH<sub>3</sub>OH (metil alkohol, karbinol), etanol C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH (etilni alkohol, špirit), propanol C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>OH, etilenglikol (CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub>.
- Plinasta: generatorski plin, vodni plin, koksarniški plin, utekočinjen naftni plin.
  - *Generatorski plin* pridobivamo iz trdnih goriv s procesom nepopolnega zgorevanja v generatorskih pečeh. Plin sestavljajo produkti nepopolnega zgorevanja in produkti termičnega razpada trdnih goriv. Če uplinjanje goriv izvajamo z zrakom dobimo t. i. *zračni plin*.
  - *Vodni plin* je zmes vodika in ogljikovega monoksida. Pridobivamo ga v kontinuirano delujočem reaktorju pri približno 1000 °C iz s kisikom obogatene vodne pare in žarečega premogovega prahu.
  - *Koksarniški plin* je zmes vodika H<sub>2</sub>, metana CH<sub>4</sub>, ogljikovega monoksida CO, benzena C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, amonijaka NH<sub>3</sub> ... in nastane pri razplinjevanju premoga. Suha destilacija ali razplinjenje je postopek segrevanja brez navzočnosti kisika. Trdni preostanek premoga je koks, preostanek lesa pa lesno oglje. Pri suhi destilaciji dobimo še tekoči destilat – katan.
  - *Utekočinjen naftni plin – UNP* je rafiniran destilat nafte – zmes propana C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> in butana C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>. Zmesi imajo različna komercialna poimenovanja, npr:
    - *UNP propan* je skoraj čisti propan, masni delež propana je vsaj 98 %. Zajema se ga iz zunanjih neogrevanih plinohramov.
    - *UNP butan-propan* je zmes butana in propana v širokem intervalu od 40–60 mas. % butana, ostalo propan. Zmes se navadno distribuira v jeklenkah z vsebnostjo UNP od 2 kg do 35 kg. Ker ima butan tlak nasičenja (kondenzacije) 0,1013 MPa (~tlak okolice) pri temperaturi -0,5 °C, se morajo jeklenke za nemoten odvzem plina ustrezne (polnitvene) sestave, praviloma nahajati v prostorih, kjer je temperatura višja od temperature nasičenja -0,5 °C.

Goriva so v splošnem sestavljena iz deležev ogljika  $w_C$ , vodika  $w_H$ , žvepla  $w_S$ , kisika  $w_O$ , dušika  $w_N$ , vlage  $w_{H_2O}$  in mineralnih snovi  $w_p$ . Masa goriva je:

$$w_C + w_H + w_S + w_O + w_N + w_{H_2O} + w_p = 1 \text{ kg/kg}$$

Pri uporabi in analizi trdnih goriv razlikujemo: delovno, suho, gorljivo in organsko maso goriva. Maso goriva, ki lahko izhlapi, imenujemo volatili. Koks vsebuje nehlapni ogljik in negorljive mineralne snovi.

*Ogljik* je osnovni element gorljive mase trdnih in tekočih goriv. V premogu je v elementarni obliki in vezan na druge elemente. Ogljik, ki pri gorenju ne izhlapi, imenujemo fiksni ogljik. Hlapljivi ogljik, npr. v obliki ogljikovodikov, se pri zgorevanju pojavlja v volatilnih – hlapni masi goriva.

*Vodik* je koristen del goriva, če se pojavlja v prosti obliki kot  $H_2$  ali v obliki ogljikovodikov. Vezan s kisikom v vodo  $H_2O$  pa je v gorivu balast in porabnik toplote.

*Žveplo* v gorivu je organsko in neorgansko. Neorgansko žveplo je v piritni ali sulfatni obliki. Vsebnost žvepla je v naravnih gorivih, razen v lesu, lahko precejšnja. Pri premogih do 10 %, nafti do 5 % in tudi zemeljskem plinu v obliki  $H_2S$  do 2 %. Žveplo se pri predelavi in rafinaciji goriv (razen pri trdnih) v komercialna goriva skoraj popolnoma odstrani. V rafiniranem zemeljskem plinu, ki ga zajemamo iz distribucijskega omrežja, praktično ni žvepla, v bencinih in dizelskem gorivu je dovoljena vsebnost žvepla le 10 mg/kg, v ELKO (ekstra lahko kurilno olje) 0,1 % in v težjih kurilnih oljih do 1 %.

*Kisik* v gorivu ni zaželen, ker je negorljiv in se v gorivu veže z vodikom in ogljikom, ter že pred zgorevanjem zmanjšuje razpoložljivo kurilnost goriva.

*Dušik* v vseh oblikah pri vseh vrstah goriv pomeni balast. Vezani dušik v gorivu je vzrok za nastanek več kot 50 % dušikovih oksidov.

*Vlaga* v gorivu ni zaželena, ker zmanjšuje gorljivo maso goriva in kurilnost goriv. Značilna je predvsem za trdna goriva.

Trdna goriva vsebujejo negorljive mineralne snovi, ki jih imenujemo *pepel*. Pepel zmanjšuje delež gorljive mase goriva in s tem njegovo kurilnost. Pepel v gorivu povzroča onesnaževanje okolja s trdnimi delci, lahko pa tudi zažlindranje in abrazijo površin v kurilnih napravah.

Pri plinastih gorivih je običajno sestava podana z volumskimi (molskimi) deleži posameznega plina ( $\varphi_i$ ) v zmesi plinov, ki sestavljajo gorivo. V splošnem so to:

- ogljikovodiki,  $C_xH_y$ ,
- vodik,  $H_2$ ,
- ogljikov monoksid, CO,
- kisik,  $O_2$ ,
- dušik,  $N_2$ , in
- ogljikov dioksid,  $CO_2$ .

Deleži so v tem primeru izraženi v  $\text{m}^3_{\text{sestavine}}/\text{m}^3_{\text{goriva}}$ . Ker se prostornina plinov spreminja s tlakom in temperaturo, so vrednosti vedno podane pri normalnem stanju ( $0\text{ }^\circ\text{C}$  in  $1,01325\text{ bar}$ ). Pri sestavi to sicer ni bistveno, ker se volumska razmerja pri spremembi temperature in/ali tlaka ne spremenijo, pomembno pa je pri nekaterih drugih veličinah, ki pridejo v poštev pri izračunih parametrov zgorevanja.

Maso plinov včasih izražamo tudi z enoto **normalni kubični meter**. Ta predstavlja maso plina, ki pri normalnih pogojih ( $0\text{ }^\circ\text{C}$  in  $1,01325\text{ bar}$ ) zavzema prostornino  $1\text{ m}^3$ . Masa je številčno enaka gostoti plina pri normalnih pogojih in ostaja enaka tudi pri vseh drugih pogojih, medtem ko se prostornina spreminja.

Poleg goriva je za zgorevanje potreben tudi kisik, ki ga večinoma pridobimo kar iz zraka. Pri poenostavljeni obravnavi zgorevanja lahko v procesu zgorevanja upoštevamo zrak kot mešanico kisika ( $\text{O}_2$ ) in dušika ( $\text{N}_2$ ), pri čemer lahko predpostavimo konstantno razmerje med obema sestavinama.

|                | kisik | dušik |
|----------------|-------|-------|
| masni delež    | 0,23  | 0,77  |
| volumski delež | 0,21  | 0,79  |

Produkta zgorevanja sta sproščena toplota, ki jo lahko koristno uporabimo za različne namene, in mešanica plinov (dimni plini), ki nosijo sproščeno toplota.

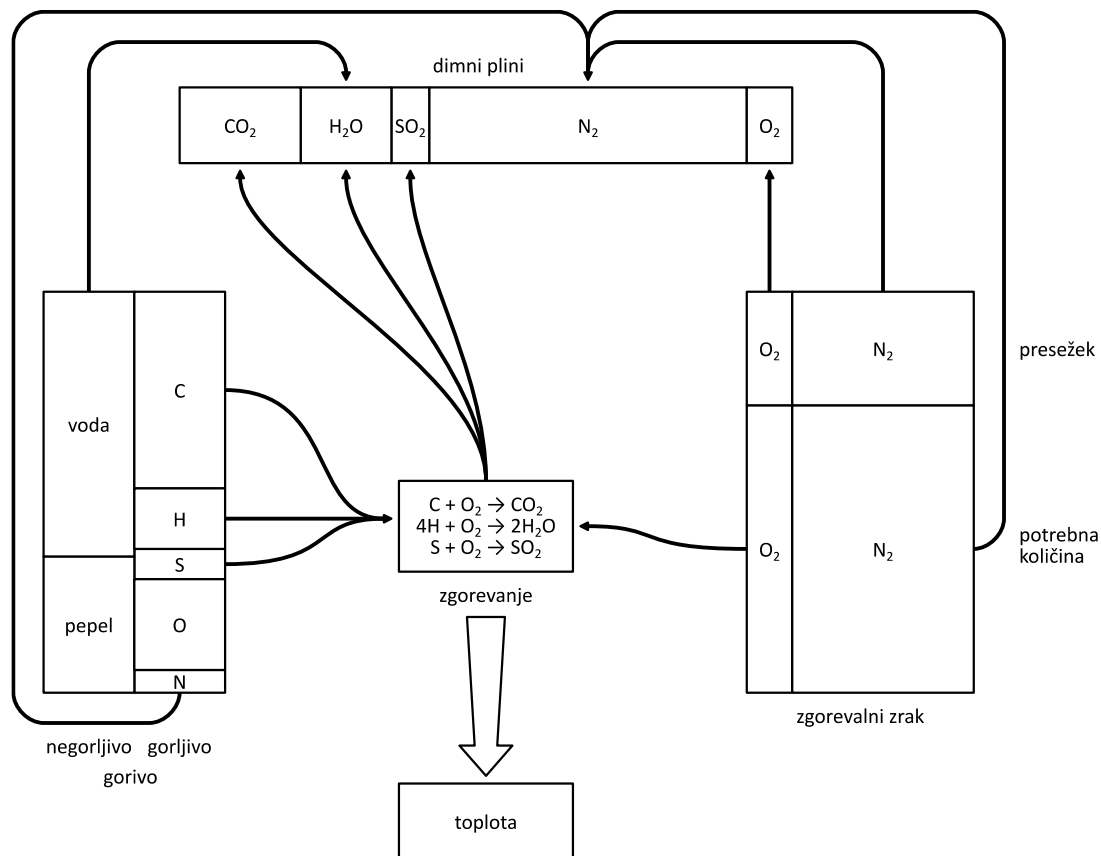
## 5.1 Kemijske reakcije pri zgorevanju

**Zgorevanje** ali gorenje je hitra oksidacija, pri kateri se sprošča toplota. Poteka lahko s čistim kisikom ali s kisikom iz zraka. Značilnost gorenja je plamen. Sproščena kemična notranja energija goriv se sproti prenaša na molekule kot njihova kinetična energija, poveča se kalorični del notranje energije in temperatura telesa, s tem nastane vir toplote.

Pri **popolnem zgorevanju** je oksidacija gorljivih snovi dokončana. To je mogoče le pri zadostni količini kisika, dovolj visoki temperaturi in pri zadostnem času trajanja ugodnih razmer za gorenje. Za popolno zgorevanje je značilen prozoren dim, ki postane bel, ko se iz njega izloči vodna para.

**Nepopolno zgorevanje** je proces, pri katerem oksidacija gorljivih snovi ni dokončana zaradi neugodnih razmer za gorenje (premalo kisika, slabo mešanje, močno hlajenje plamena itd.). Značilni so črn, sajast dim in produkti nepopolne oksidacije  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ , nezgoreli ogljik v obliki saj itd. Lahko nastane tudi bel dim, ki vsebuje velike količine nezgorelih hlapnih organskih snovi (kancerogenih) zaradi prenizke temperature, ki je lahko posledica prevelikega razmernika zraka, velike vlažnosti goriva (značilno pri požiganju ostankov poljščin na prostem, neustrezni kurjavi z drvmi itd.) in prevelikega kurišča.





### Razmerja med reaktanti in produkti reakcije pri zgorevanju

**Stehiometrija zgorevanja** so izračuni, narejeni po zakonu o ohranitvi mase in zakonu o stalnih masnih razmerjih. Uporabljamo jih za računanje potrebne količine kisika in zraka za zgorevanje, za izračune sestave in količine dimnih plinov, pri nadzoru procesov zgorevanja itd. Izračunavanje je izvedeno na enoto mase goriva. Za tri obravnavane reakcije zgorevanja veljajo točno določena razmerja med reaktanti in produkti ter znana količina energije, ki se pri tem sprosti\*.

|                    | A          | B                 | C   |
|--------------------|------------|-------------------|---|
| $C + O_2 = CO_2$   | 1 kg C     | + 2,6641 kg $O_2$ | $\rightarrow$ 3,6641 kg $CO_2$ + 33 915 kJ  |
| $4H + O_2 = 2H_2O$ | 1 kg $H_2$ | + 7,9370 kg $O_2$ | $\rightarrow$ 8,9370 kg $H_2O$ + 141 800 kJ |
| $S + O_2 = SO_2$   | 1 kg S     | + 0,9981 kg $O_2$ | $\rightarrow$ 1,9981 kg $SO_2$ + 10 467 kJ  |

\* Senegačnik, A., Oman, J. *Lastnosti zraka, goriv in dimnih plinov*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo. 2004

## 5.2 Kisik in zgorevalni zrak

Za potek vseh treh osnovnih reakcij zgorevanja je potreben kisik. Količino kisika, potrebno za popolno zgoretje vseh gorljivih elementov goriva ( $m_{O,\min}$  ali  $V_{O,\min}$ ), lahko določimo na podlagi zgornjih enačb (koeficienti v stolpcu A) in glede na znane količine gorljivih elementov v gorivu. Kisik za zgorevanje običajno dobimo v zraku, kjer je njegov delež konstanten, zato glede na to določimo tudi najmanjšo potrebno količino zgorevalnega zraka ( $m_{z,\min}$  ali  $V_{z,\min}$ ).

Zaradi zagotovitve večje verjetnosti popolnega zgorevanja dovedemo v proces zgorevanja določeno količino presežnega zraka. Razmerje med dejansko in najmanjšo potrebno količino zraka imenujemo **razmernik zraka** ( $\lambda$ ). Vrednosti razmernikov zraka so izkustvene in so od 1,02 (plinasta goriva) do 2 (trdna goriva), lahko pa tudi več. Razmernik zraka ne sme biti manjši od 1, sicer bo zgorevanje nepopolno.

najmanjša potrebna količina kisika ( $\text{kg}_{O_2}/\text{kg}_g$ ):

$$m_{O,\min} = 2,6641 \cdot w_C + 7,9370 \cdot w_H + 0,9981 \cdot w_S - 1,00 \cdot w_O$$

najmanjša potrebna količina zgorevalnega zraka ( $\text{kg}_{zr}/\text{kg}_g$ ):

$$m_{z,\min} = \frac{m_{O,\min}}{0,23}$$

dejanska količina zgorevalnega zraka ( $\text{kg}_{zr}/\text{kg}_g$ ):

$$m_z = \lambda m_{z,\min}$$

Razmernik zraka  $\lambda$  določamo neposredno kot razmerje med dejanskim masnim tokom zgorevalnega zraka  $\dot{m}_z$ , ki ga izmerimo, ter izračunanim minimalnim teoretičnim masnim tokom zraka  $\dot{m}_{z,\min}$ , ki je potreben za popolno zgoretje masnega toka goriva  $\dot{m}_g$ . Pomanjkljivost neposredne metode je, da navadno težko natančno izmerimo masne tokove zraka in goriva. Zato se je pri praktičnem delu skoraj izključno uveljavila posredna metoda določevanja razmernika zraka, ki temelji na poznavanju kemične sestave goriva in izmerjenem volumskem deležu ogljikovega dioksida ali kisika v (suhih ali vlažnih) dimnih plinih. Za meritve volumskih deležev  $\text{CO}_2$  in  $\text{O}_2$  v suhih dimnih plinih  $\varphi_{\text{CO}_2,s}$ ,  $\varphi_{\text{O}_2,s}$  je treba dimne pline predhodno osušiti. Analizatorji suhih plinov delujejo na principu spektrometrije, paramagnetizma ali galvanskega člana. Za meritev volumskega deleža  $\text{O}_2$  v vlažnih dimnih plinih  $\varphi_{\text{O}_2,v}$  se uporablja t. i. cirkonijeva lambda sonda (ki se vgrajuje v vse izpušne sisteme vozil).

## 5.3 Produkti zgorevanja

Produkti zgorevanja (dimni plini) so mešanica plinov, sestavljena iz produktov osnovnih treh reakcij zgorevanja ter dušika, ki ga v proces zgorevanja dovedemo večinoma z zrakom, deloma pa tudi z gorivom, in kisika, ki ostane od presežnega zgorevalnega zraka. Pri

poenostavljeni analizi so torej dimni plini sestavljeni iz petih plinov, katerih količine določimo glede na zgorevalne enačbe (koeficienti v stolpcu B) in sestavo goriva. Poleg celotne količine nastalih dimnih plinov pri določenih izračunih upoštevamo tudi drugače definirane količine dimnih plinov (vse v kg/kg<sub>g</sub>).

|                  |  |
|------------------|--|
| ogljikov dioksid | $m_{CO_2} = 3,6641 \cdot w_C$                        |
| voda             | $m_{H_2O} = 8,9370 \cdot w_H + w_{H_2O}$             |
| žveplov dioksid  | $m_{SO_2} = 1,9981 \cdot w_S$                        |
| dušik            | $m_{N_2} = w_N + 0,77 \cdot \lambda \cdot m_{z,min}$ |
| kisik            | $m_{O_2} = 0,23 \cdot (\lambda - 1) \cdot m_{z,min}$ |

### Suhi dimni plini

### Vlažni dimni plini

Teoretična količina\*

$$m_{d,0,s} = m_{CO_2} + m_{SO_2} + m_{N_2}$$

$$m_{d,0,v} = m_{CO_2} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{H_2O}$$

Dejanska količina

$$m_{d,s} = m_{CO_2} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2}$$

$$m_{d,v} = m_{CO_2} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2} + m_{H_2O}$$

Količine kisika, zgorevalnega zraka in produktov zgorevanja so izračunane v **kg/kg<sub>goriva</sub>**, torej gre za količine, ki so potrebne za zgorevanje 1 kg goriva, oziroma količine, ki nastanejo pri zgorevanju 1 kg goriva. Za izračun dejanskih mas ali masnih tokov moramo te vrednosti množiti še z maso ali masnim tokom goriva ( $\dot{m}_g$ ).

## 5.4 Kurilnost in zgorevalna toplota goriva

Zgorevalna toplota (tudi zgornja kurilnost,  $H_s$ ) goriva predstavlja vso toploto (MJ), ki se sprosti pri popolnem zgoretju 1 kg goriva. Kurilnost ali spodnja kurilnost goriv ( $H_i$ ) je zgorevalna toplota, zmanjšana za energijo, ki jo pri kondenzaciji ob ohlajanju dimnih plinov odda vodna para, ki je njihov sestavni del. Spodnjo kurilnost goriv z znano sestavo lahko tudi približno izračunamo z uporabo empiričnih enačb (koeficienti v stolpcu C), vendar lahko dejansko kurilnost goriva ugotovimo samo eksperimentalno z meritvijo v kalorimetru.

---

\* količino dušika računamo z upoštevanjem minimalne količine zgorevalnega zraka, torej  $\lambda = 1$

(spodnja) kurilnost goriva (MJ/kg):

$$H_i = 33,9 \cdot w_C + 121,4 \cdot \left( w_H - \frac{w_O}{8} \right) + 10,5 \cdot w_S - 2,5 \cdot w_{H_2O}$$

zgornja kurilnost (zgorevalna toplota) goriva (MJ/kg):

$$H_s = H_i + 2,5 \cdot m_{H_2O} = H_i + 22,34 \cdot w_H + 2,5 \cdot w_{H_2O}$$

## 5.5 Ogljikov dioksid

Zaradi velikih količin, ki nastajajo pri zgorevanju predvsem trdnih in kapljevityh fosilnih goriv, in zaradi vpliva na okolje, je količina ogljikovega dioksida (CO<sub>2</sub>) pomemben kriterij za primerjavo ogljičnega odtisa goriv in porabe energije iz fosilnih goriv, vendar je pri primerjavi tehnologij treba upoštevati tudi druge emisije, ki imajo lahko tudi bistveno večji vpliv na okolje.

Največji delež CO<sub>2</sub> v dimnih plinih ( $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$ ) je količina ogljikovega dioksida, ki nastane pri zgorevanju z najmanjšo potrebno količino zgorevalnega zraka ( $\lambda = 1$ ). Pri večjih razmernikih zraka se delež CO<sub>2</sub> zmanjša na račun presežnega zraka v dimnih plinih. Pri manjših razmernikih zraka prihaja do nepopolnega zgorevanja, v dimnih plinih se pojavijo strupeni ogljikov monoksid (CO) in nezgoreli ostanki goriva.

Količina CO<sub>2</sub> na enoto sproščene energije ( $\hat{m}_{\text{CO}_2}$ ) je parameter za primerjanje ogljičnega odtisa pridobivanja energije iz različnih goriv. Goriva z visoko vsebnostjo ogljika glede na vodik sproščajo večje količine CO<sub>2</sub> kot goriva z nižjo vsebnostjo ogljika glede na vodik pri enaki količini sproščene toplote.

največja količina CO<sub>2</sub> v dimnih plinih (volumski delež, popolno zgorevanje pri  $\lambda = 1$ ):

$$\varphi(\text{CO}_2)_{\max} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{d,0,s}} = \frac{1,8563 \cdot w_C}{8,8696 \cdot w_C + 20,8940 \cdot w_H + 3,3090 \cdot w_S + 0,7997 \cdot w_N - 2,6326 \cdot w_O}$$

masa CO<sub>2</sub> na enoto sproščene energije (kg<sub>CO2</sub>/MJ):

$$\hat{m}_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{H_i} = \frac{\rho_{\text{CO}_2} \cdot V_{\text{CO}_2}}{H_i}$$

Gostota CO<sub>2</sub> pri normalnih pogojih je  $\rho_{\text{CO}_2} = 1,9768 \text{ kg/m}^3$ .

## 5.6 Energija dimnih plinov in izgube toplote

Dimni plini so prvi nosilci energije, ki se sprošča pri zgorevanju, kasneje pa energijo z dimnih plinov prenašamo na druge snovi, pri čemer se temperatura in entalpija dimnih plinov zmanjšujeta. Ker sestava dimnih plinov iz različnih goriv ali pri različnih pogojih zgorevanja ni enaka, tudi odvisnost entalpije in temperature za vse dimne pline ni enotna. Računamo jo kot uteženo povprečje entalpij posameznih sestavin.

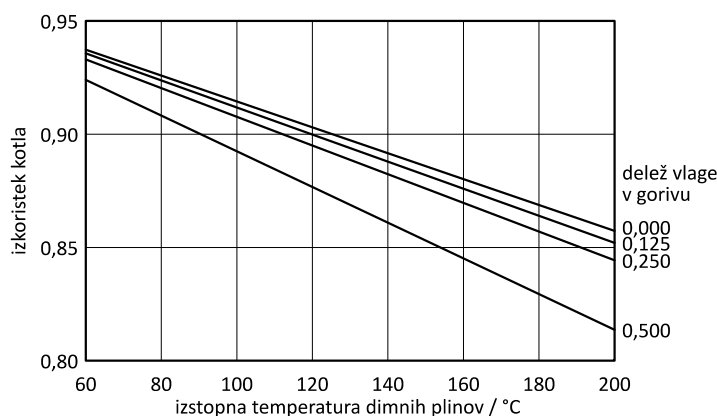
$$h_d = \sum_i w_i \cdot h_i$$

Pri tem je pomembno to, da ima vodna para bistveno večjo specifično toploto in s tem tudi entalpijo od drugih sestavin in tako pomembno prispeva k skupni entalpiji.

Na izstopu iz kurilne naprave imajo dimni plini temperaturo ( $T_{iz}$ ) višjo od okoliške ( $T_{ok}$ ), zaradi česar z njimi v okolico odvajamo tudi nekaj energije (toplote), t. i. izgube s toploto dimnih plinov, ali krajše izgube z dimnimi plini, ki so glavni del izgub kurilnih naprav.

$$\dot{Q}_{izg} = \dot{m}_d \cdot (h_d(T_{iz}) - h_d(T_{ok}))$$

Na izgube s toploto dimnih plinov vplivajo temperatura dimnih plinov ter njihova količina in sestava, ki določa povezavo med temperaturo in entalpijo. Vsebnost vlage v gorivu neposredno vpliva na količino dimnih plinov, saj se pri zgorevanju upari in kot vodna para postane sestavni del dimnih plinov. Zaradi večje specifične toplote imajo takšni dimni plini tudi večjo entalpijo in tako odnašajo v okolico večji toplotni tok. Izgube toplote so zato večje, izkoristek kurilne naprave pa nižji.



***Odvisnost izkoristka kotla od vlažnosti goriva in izstopne temperature dimnih plinov (gorivo je les (različne vlažnosti), razmernik zraka je 1,4, vsota vseh drugih izgub je 3 %)***

Izkoristek kurilne naprave je definiran kot delež energije porabljenega goriva, ki ga koristno prenesemo na delovno snov. Energijski tok, ki ga v napravo dovajamo z gorivom, imenujemo tudi toplotna moč goriva in jo po dogovoru izračunamo kot produkt masnega toka goriva in njegove spodnje kurilnosti. Čeprav se pri zgorevanju dejansko sprosti energija, ki ustreza zgornji kurilnosti, navadno ne izkoriščamo energije kondenzacije vodne pare v dimnih plinih, zato kot razpoložljivo energijo upoštevamo samo spodnjo kurilnost.

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_{\text{gorivo}} \cdot H_i$$

Uporabni toplotni tok je pri parnih in vročevodnih kotlih definiran kot toplotni tok, ki je potreben za segrevanje vode/pare.

$$\dot{Q}_k = \dot{m}_{\text{voda}} \cdot (h_{\text{izstop}} - h_{\text{vstop}})$$

S tem izkoristek kurilne naprave zapišemo kot

$$\eta_k = \frac{\dot{Q}_k}{\dot{Q}_g}$$

Izgube, ki nastajajo pri delovanju kurilne naprave, se pojavijo zaradi različnih vzrokov:

- del goriva zaradi različnih vzrokov (neprimerni pogoji za zgorevanje) ne zgore do konca – izgube z nezgorelim gorivom;
- zaradi višjih temperatur zunanjih površin naprave toplota odteka v hladnejšo okolico s toplotnim sevanjem – izgube s sevanjem;
- pri zgorevanju trdnih goriv nastajata pepel in žindra, ki zaradi visoke temperature iz naprave odnašata del toplote – izgube s pepelom in žindro;
- glavni del izgub običajno predstavlja toplota, ki jo zaradi relativno visoke temperature v okolico odnašajo dimni plini na izstopu iz kurilne naprave – izgube z dimnimi plini.

## 5.7 Naloge

### 5-1

Tekoče gorivo sestave  $w_C = 84\%$ ,  $w_H = 15\%$  in  $w_S = 1\%$  zgoreva z razmernikom zraka  $\lambda = 1,5$ .

Za 1 kg goriva izračunaj:

- potrebno količino zgorevalnega zraka,
- količino dimnih plinov, ki nastanejo pri zgorevanju,
- količino sproščene toplote.

| podano               | gorivo       | iskano              |
|----------------------|--------------|---------------------|
| $\lambda = 1,5$      | $w_C = 0,84$ | $m_z, m_{d,v}, Q_g$ |
| $m_g = 1 \text{ kg}$ | $w_H = 0,15$ |                     |
|                      | $w_S = 0,01$ |                     |

$$\text{a) } w_C + w_H + w_S = 1 \rightarrow w_O = w_N = w_{H_2O} = w_{\text{pepel}} = 0$$

$$m_{O,\min} = 2,6641 \cdot w_C + 7,9370 \cdot w_H + 0,9981 \cdot w_S - w_O = 3,44 \text{ kg/kg}_g$$

$$m_{z,\min} = \frac{m_{O,\min}}{0,23} = 14,95 \text{ kg/kg}_g$$

$$m_z = \lambda \cdot m_{z,\min} = 22,42 \text{ kg/kg}_g$$

$$\text{b) } m_{CO_2} = 3,6641 \cdot w_C = 3,08 \text{ kg/kg}_g$$

$$m_{H_2O} = 8,9370 \cdot w_H = 1,34 \text{ kg/kg}_g$$

$$m_{SO_2} = 1,9981 \cdot w_S = 0,02 \text{ kg/kg}_g$$

$$m_{N_2} = w_N + 0,77 \cdot \lambda \cdot m_{z,\min} = 17,27 \text{ kg/kg}_g$$

$$m_{O_2} = 0,23 \cdot (\lambda - 1) \cdot m_{z,\min} = 1,72 \text{ kg/kg}_g$$

$$m_{d,v} = m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2} = 23,42 \text{ kg/kg}_g$$

$$\text{c) } H_i = 33,9 \cdot w_C + 121,4 \cdot \left( w_H - \frac{w_O}{8} \right) + 10,5 \cdot w_S - 2,5 \cdot w_{H_2O} = 46,79 \text{ MJ/kg}_g$$

$$Q_g = m_g \cdot H_i = 46,79 \text{ MJ}$$

## 5-2

V parnem kotlu z izkoristkom 87 % pridobivamo 14 kg/s pare s 40 bar in 460 °C, pri čemer ima napajalna voda temperaturo 120 °C. Gorivo (delno posušen les) vsebuje 39 % ogljika, 5 % vodika, 34 % kisika in 22 % vlage. Za zgorevanje porabljamo 25 kg/s zraka.

- Kolikšen toplotni tok moramo dovajati vodi?
- Kolikšen masni tok goriva porabimo, da dobimo potrebno količino toplote?
- Kolikšen je razmernik zraka?

| podano                        | gorivo            | iskano   |
|-------------------------------|-------------------|--|
| $\eta_k = 0,87$               | $w_C = 0,39$      | $\dot{Q}_k, \dot{m}_g, \lambda$                              |
| $\dot{m}_p = 14 \text{ kg/s}$ | $w_H = 0,05$      |  |
| $p = 40 \text{ bar}$          | $w_O = 0,34$      | tabele   |
| $T_2 = 460 \text{ °C}$        | $w_{H_2O} = 0,22$ | $h_1 (40 \text{ bar}, 120 \text{ °C}) = 506,4 \text{ kJ/kg}$ |
| $T_1 = 120 \text{ °C}$        |                   | $h_2 (40 \text{ bar}, 460 \text{ °C}) = 3354 \text{ kJ/kg}$  |
| $\dot{m}_z = 25 \text{ kg/s}$ |                   |  |

a)  $\dot{Q}_k = \dot{m}_p \cdot (h_2 - h_1) = 39866 \text{ kW}$

b) 
$$H_i = 33,9 \cdot w_C + 121,4 \cdot \left( w_H - \frac{w_O}{8} \right) + 10,5 \cdot w_S - 2,5 \cdot w_{H_2O} = 13,58 \text{ MJ/kg}_g$$

$$\dot{Q}_k = \dot{Q}_g \cdot \eta_k = \dot{m}_g \cdot H_i \cdot \eta_k \rightarrow \dot{m}_g = \frac{\dot{Q}_k}{H_i \cdot \eta_k} = 3,37 \text{ kg/s}$$

c) 
$$m_{z,\min} = \frac{2,6641 \cdot w_C + 7,9370 \cdot w_H + 0,9981 \cdot w_S - w_O}{0,23} = 4,76 \text{ kg/kg}_g$$

$$\dot{m}_{z,\min} = \dot{m}_g \cdot m_{z,\min} = 16,08 \text{ kg/s}$$

$$\lambda = \frac{\dot{m}_z}{\dot{m}_{z,\min}} = 1,56$$



## 5-3

1,5 kg/s čistega alkohola (52 % ogljika, 13 % vodika, 35 % kisika) zgoreva s 15 kg/s zraka.

a) Kolikšen je razmernik zraka?

b) Kolikšen toplotni tok pridobimo pri tej reakciji?

c) Koliko ogljikovega dioksida in vode nastaja pri gorenju?

| podano                         | gorivo       | iskano   |
|--------------------------------|--------------|--|
| $\dot{m}_g = 1,5 \text{ kg/s}$ | $w_C = 0,52$ | $\lambda, \dot{Q}, \dot{m}_{CO_2}, \dot{m}_{H_2O}$ |
| $\dot{m}_z = 15 \text{ kg/s}$  | $w_H = 0,13$ |  |
|                                | $w_O = 0,35$ |  |

$$a) \quad m_{z,\min} = \frac{2,6641 \cdot w_C + 7,9370 \cdot w_H + 0,9981 \cdot w_S - w_O}{0,23} = 8,988 \text{ kg/kg}_g$$

$$\dot{m}_{z,\min} = \dot{m}_g \cdot m_{z,\min} = 13,481 \text{ kg/s}$$

$$\lambda = \frac{\dot{m}_z}{\dot{m}_{z,\min}} = 1,11$$

$$b) \quad H_i = 33,9 \cdot w_C + 121,4 \cdot \left( w_H - \frac{w_O}{8} \right) + 10,5 \cdot w_S - 2,5 \cdot w_{H_2O} = 28,1 \text{ MJ/kg}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_g \cdot H_i = 42,15 \text{ MW}$$

$$c) \quad m_{CO_2} = 3,6641 \cdot w_C = 1,91 \text{ kg/kg}_g$$

$$m_{H_2O} = 8,9370 \cdot w_H = 1,16 \text{ kg/kg}_g$$

$$\dot{m}_{CO_2} = \dot{m}_g \cdot m_{CO_2} = 2,86 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_g \cdot m_{H_2O} = 1,74 \text{ kg/s}$$

## 5-4

V kotlu zgoreva mazut, ki vsebuje 86 % ogljika, 13,5 % vodika in 0,5 % žvepla, z razmernikom zraka 1,08.

- a) Kolikšen je masni tok dimnih plinov, če je masni tok goriva 0,15 kg/s?  
 b) Kolikšen je volumski pretok dimnih plinov v dimniku, kjer je temperatura 180 °C?  
 c) Kolikšen je izkoristek kotla, če proizvajajo 8 t/h nasičene pare pri tlaku 10 bar iz vode, ki ima temperaturo 10 °C?

Upoštevaj, da je plinska konstanta dimnih plinov 287 J/(kg·K), njihov tlak pa 1 bar.

| podano  | gorivo        | iskano  |
|---|---------------|---|
| $\lambda = 1,08$                                | $w_C = 0,86$  | $\dot{m}_d, \dot{V}_d, \eta_k$                            |
| $\dot{m}_g = 0,15 \text{ kg/s}$                 | $w_H = 0,135$ |   |
| $T_d = 180 \text{ °C} = 453 \text{ K}$          | $w_S = 0,005$ | tabele  |
| $p_d = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$         |               | $h_v(10 \text{ bar}, 10 \text{ °C}) = 43,0 \text{ kJ/kg}$ |
| $R = 287 \text{ J/(kg·K)}$                      |               | $h_p(10 \text{ bar}, x = 1) = 2777,1 \text{ kJ/kg}$       |
| $\dot{m}_p = 8 \text{ t/h} = 2,22 \text{ kg/s}$ |               |   |
| $p_p = 10 \text{ bar}$                          |               |   |
| $T_v = 10 \text{ °C}$                           |               |   |

a)  $m_{O,\min} = 2,6641 \cdot w_C + 7,9370 \cdot w_H + 0,9981 \cdot w_S - w_O = 3,368 \text{ kg/kg}_g$

$$m_{z,\min} = \frac{m_{O,\min}}{0,23} = 14,642 \text{ kg/kg}_g$$

$$m_d = m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2}$$

$$m_d = 3,6641 \cdot w_C + 8,9370 \cdot w_H + w_{H_2O} + 1,9981 \cdot w_S + w_N + 0,77 \cdot \lambda \cdot m_{z,\min} + 0,23 \cdot (\lambda - 1) \cdot m_{z,\min}$$

$$m_d = 15,64 \text{ kg/kg}_g$$

$$\dot{m}_d = \dot{m}_g \cdot m_d = 2,35 \text{ kg/s}$$

b)  $p_d \cdot \dot{V}_d = \dot{m}_d \cdot R \cdot T_d \rightarrow \dot{V}_d = \frac{\dot{m}_d \cdot R \cdot T_d}{p_d} = 3,05 \text{ m}^3/\text{s}$

c)  $\dot{Q}_k = \dot{m}_p \cdot (h_p - h_v) = 6076 \text{ kW} = 6,076 \text{ MW}$  (vrednost v MW je uporabljena v nadaljnjem izračunu)

$$H_i = 33,9 \cdot w_C + 121,4 \cdot \left( w_H - \frac{w_O}{8} \right) + 10,5 \cdot w_S - 2,5 \cdot w_{H_2O} = 45,6 \text{ MJ/kg}$$

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g \cdot H_i = 6,84 \text{ MW}$$

$$\eta_k = \frac{\dot{Q}_k}{\dot{Q}_g} = 0,89$$

## 5-5

1,7 kg/s goriva s 40 % ogljika, 25 % vodika in 35 % negorljivih snovi (pepela) zgoreva z okoliškim zrakom, ki ima 23 °C in 990 mbar. Razmernik zraka je 1,35.

- a) Kolikšen volumenski pretok zraka mora prečrpati ventilator za podpih?  
 b) Kolikšen toplotni tok oddaja gorivo pri zgorevanju?  
 c) Kolikšen je masni tok nastalega ogljikovega dioksida?

| podano  | gorivo       | iskano                                       |
|---|--------------|--|
| $\dot{m}_g = 1,7 \text{ kg/s}$                | $w_C = 0,4$  | $\dot{V}_z, \dot{Q}_g, \dot{m}_{CO_2}$       |
| $T_z = 23 \text{ °C} = 287,15 \text{ K}$      | $w_H = 0,25$ |  |
| $p_z = 990 \text{ mbar} = 99\,000 \text{ Pa}$ | $w_p = 0,35$ | tabele                                       |
| $\lambda = 1,35$                              |              | $R = 287 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ |

a)  $m_{0,\min} = 2,6641 \cdot w_C + 7,9370 \cdot w_H + 0,9981 \cdot w_S - w_O = 3,050 \text{ kg/kg}_g$

$$m_{z,\min} = \frac{m_{0,\min}}{0,23} = 13,260 \text{ kg/kg}_g$$

$$\dot{m}_z = \dot{m}_g \cdot \lambda \cdot m_{z,\min} = 30,43 \text{ kg/s}$$

$$\dot{V}_z = \frac{\dot{m}_z \cdot R \cdot T_z}{p_z} = 26,13 \text{ m}^3/\text{s}$$

b)  $H_i = 33,9 \cdot w_C + 121,4 \cdot \left( w_H - \frac{w_O}{8} \right) + 10,5 \cdot w_S - 2,5 \cdot w_{H_2O} = 43,91 \text{ MJ/kg}$

$$\dot{Q} = \dot{m}_g \cdot H_i = 74,65 \text{ MW}$$

c)  $m_{CO_2} = 3,6641 \cdot w_C = 1,466 \text{ kg/kg}_g$

$$\dot{m}_{CO_2} = \dot{m}_g \cdot m_{CO_2} = 2,49 \text{ kg/s}$$

## 5-6

Parni kotel proizvaja 180 t/h pare s tlakom 160 bar in temperaturo 520 °C. Napajalna voda ima temperaturo 220 °C. V kotlu zgoreva premog z 62,7 % ogljika, 3,9 % vodika, 0,5 % žvepla, 10,3 % kisika, 0,8 % dušika, 17,1 % vode in 4,7 % pepela. Izračunaj

- izkoristek kotla, če zgoreva 5,7 kg/s goriva,
- masni tok dimnih plinov, če zgorevanje poteka z razmernikom zraka 1,25,
- količino ogljikovega dioksida na enoto proizvedene toplote.

| podano  | gorivo             | iskano  |
|---|--------------------|---|
| $\dot{m}_p = 180 \text{ t/h} = 50 \text{ kg/s}$ | $w_C = 0,627$      | $\eta_k, \dot{m}_d, \dot{m}_{CO_2}$                               |
| $p_p = 160 \text{ bar}$                         | $w_H = 0,039$      |   |
| $T_{pp} = 520 \text{ °C}$                       | $w_S = 0,005$      | tabele  |
| $T_{nv} = 220 \text{ °C}$                       | $w_O = 0,103$      | $h_{pp} (160 \text{ bar}, 520 \text{ °C}) = 3355,6 \text{ kJ/kg}$ |
| $\dot{m}_g = 5,7$                               | $w_N = 0,008$      | $h_{nv} (160 \text{ bar}, 220 \text{ °C}) = 947,8 \text{ kJ/kg}$  |
| $\lambda = 1,25$                                | $w_p = 0,047$      |   |
|   | $w_{H_2O} = 0,171$ |   |

$$a) \quad \dot{Q}_k = \dot{m}_p \cdot (h_{pp} - h_{nv}) = 120\,389 \text{ kW}$$

$$H_i = 33,9 \cdot w_C + 121,4 \cdot \left( w_H - \frac{w_O}{8} \right) + 10,5 \cdot w_S - 2,5 \cdot w_{H_2O} = 24,05 \text{ MJ/kg}_g$$

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g \cdot H_i = 137,1 \text{ MW} = 137\,100 \text{ kW} \text{ (vrednost v MW je uporabljena v nadaljnjem izračunu)}$$

$$\eta_k = \frac{\dot{Q}_k}{\dot{Q}_g} = 0,878$$

$$b) \quad m_{O,\min} = 2,6641 \cdot w_C + 7,9370 \cdot w_H + 0,9981 \cdot w_S - w_O = 1,88 \text{ kg/kg}_g$$

$$m_{z,\min} = \frac{m_{O,\min}}{0,23} = 8,18 \text{ kg/kg}_g$$

$$m_d = 3,6641 \cdot w_C + 1,9981 \cdot w_S + w_N + 0,77 \cdot m_{z,\min} + 8,9370 \cdot w_H + w_{H_2O} + (\lambda - 1) \cdot m_{z,\min}$$

$$m_d = 11,18 \text{ kg/kg}_g$$

$$\dot{m}_d = \dot{m}_g \cdot m_d = 63,7 \text{ kg/s}$$

$$c) \quad m_{CO_2} = 3,6641 \cdot w_C = 2,30 \text{ kg/kg}_g$$

$$\dot{m}_{CO_2} = \dot{m}_g \cdot m_{CO_2} = 13,1 \text{ kg/s}$$

$$\hat{m}_{CO_2} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{\dot{Q}_k} = 0,000109 \text{ kg/kJ} = 0,109 \text{ kg/MJ}$$

## 5-7

V vročevodnem kotlu s toplotno močjo 4 MW zgoreva suh les z znano sestavo. Masni tok goriva je 0,35 kg/s, zgorevalnega zraka pa 2,5 kg/s. Izračunaj

- izkoristek kotla,
- razmernik zraka pri zgorevanju,
- kako se spremenita toplotna moč goriva in razmernik zraka, če uporabimo les s 30 % vsebnostjo vlage.

| sestavina       | C    | H   | O    | S   | N   | H <sub>2</sub> O | pepel |
|-----------------|------|-----|------|-----|-----|------------------|-------|
| masni delež v % | 43,5 | 5,2 | 37,9 | 0,0 | 0,4 | 12,5             | 0,5   |

| podano                          | gorivo             | iskano                                      |
|---------------------------------|--------------------|---|
| $\dot{Q}_k = 4 \text{ MW}$      | $w_C = 0,435$      | $\eta_k, \lambda, \dot{Q}_{g,b}, \lambda_c$ |
| $\dot{m}_g = 0,35 \text{ kg/s}$ | $w_H = 0,052$      |   |
| $\dot{m}_z = 2,5 \text{ kg/s}$  | $w_S = 0,000$      |   |
| $w_{H_2O,c} = 0,3$              | $w_O = 0,379$      |   |
|                                 | $w_N = 0,004$      |   |
|                                 | $w_P = 0,005$      |   |
|                                 | $w_{H_2O} = 0,125$ |   |

$$a) \quad H_i = 33,9 \cdot w_C + 121,4 \cdot \left( w_H - \frac{w_O}{8} \right) + 10,5 \cdot w_S - 2,5 \cdot w_{H_2O} = 15,0 \text{ MJ/kg}$$

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g \cdot H_i = 4,5 \text{ MW}$$

$$\eta_k = \frac{\dot{Q}_k}{\dot{Q}_g} = 0,889$$

$$b) \quad m_{O,\min} = 2,6641 \cdot w_C + 7,9370 \cdot w_H + 0,9981 \cdot w_S - w_O = 1,193 \text{ kg/kg}_g$$

$$m_{z,\min} = \frac{m_{O,\min}}{0,23} = 5,185 \text{ kg/kg}_g$$

$$\dot{m}_{z,\min} = \dot{m}_g \cdot m_{z,\min} = 1,56 \text{ kg/s}$$

$$\lambda = \frac{\dot{m}_z}{\dot{m}_{z,\min}} = 1,61$$

c) Pri spremenjeni vlažnosti velja povezava med prvotnimi ( $w_{i,a}$ ) in novimi ( $w_{i,b}$ ) masnimi deleži sestavin goriva (razen za vodo, za katero poznamo novi masni delež):

$$\frac{w_{i,b}}{w_{i,a}} = \frac{1 - w_{H_2O,c}}{1 - w_{H_2O,a}}$$

$$w_{C,c} = w_C \frac{1 - w_{H_2O,c}}{1 - w_{H_2O}} = 0,348$$

$$w_{H,c} = w_H \frac{1 - w_{H_2O,c}}{1 - w_{H_2O}} = 0,042$$

$$w_{S,c} = w_S = 0$$

$$w_{O,c} = w_O \frac{1 - w_{H_2O,c}}{1 - w_{H_2O}} = 0,303$$

$$w_{N,c} = w_N \frac{1 - w_{H_2O,c}}{1 - w_{H_2O}} = 0,003$$

$$w_{H_2O,c} = 0,3 \text{ (podano)}$$

$$w_{\text{pepel},c} = w_{\text{pepel}} \frac{1 - w_{H_2O,c}}{1 - w_{H_2O}} = 0,004$$

| sestavina       | C    | H   | O    | S   | N   | H <sub>2</sub> O | pepel |
|-----------------|------|-----|------|-----|-----|------------------|-------|
| masni delež v % | 34,8 | 4,2 | 30,3 | 0,0 | 0,3 | 30,0             | 0,4   |

$$H_{i,c} = 33,9 \cdot w_{C,c} + 121,4 \cdot \left( w_{H,c} - \frac{w_{O,c}}{8} \right) + 10,5 \cdot w_{S,c} - 2,5 \cdot w_{H_2O,c} = 11,50 \text{ MJ/kg} < H_i$$

$$\dot{Q}_{g,c} = \dot{m}_g \cdot H_{i,c} = 3,45 \text{ MW} < \dot{Q}_g$$

$$\dot{m}_{z,\min,c} = \dot{m}_g \cdot \frac{2,6641 \cdot w_{C,c} + 7,9370 \cdot w_{H,c} + 0,9981 \cdot w_{S,c} - w_{O,c}}{0,23} = 1,24 \text{ kg/kg}_g$$

$$\lambda_c = \frac{\dot{m}_z}{\dot{m}_{z,\min,c}} = 2,01 > \lambda$$

## 5-8

V kotlu za centralno kurjavo zgorevajo lesni sekanci s kurilnostjo 13,8 MJ/kg in segrevajo vodo s 55 °C na 80 °C. Toplotna moč kotla je 28 kW.

- a) Kolikšen je masni tok ogrevalne vode, ki ima tlak 2 bar?  
 b) Kolikšna je poraba goriva, če je izkoristek kotla 88 %?  
 c) Kolikšna je vsebnost vlage v gorivu, če upoštevamo, da je kurilnost povsem suhega lesa 18 MJ/kg?

podano

$$H_i = 13,8 \text{ MJ/kg}$$

$$T_1 = 55 \text{ °C}$$

$$T_2 = 80 \text{ °C}$$

$$\dot{Q}_k = 28 \text{ kW}$$

$$p = 2 \text{ bar}$$

$$\eta_k = 0,88$$

$$H_{i,s} = 18 \text{ MJ/kg}$$

iskano

$$\dot{m}_v \dot{m}_g, w_{H_2O}$$

tabele

$$h_1 (2 \text{ bar}, 55 \text{ °C}) = 230,4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 (2 \text{ bar}, 80 \text{ °C}) = 335,1 \text{ kJ/kg}$$

a) 
$$\dot{m}_v = \frac{\dot{Q}_k}{h_2 - h_1} = 0,268 \text{ kg/s}$$

b) 
$$\dot{Q}_g = \frac{\dot{Q}_k}{\eta_k} = 31,82 \text{ kW} = 0,03182 \text{ MW}$$
 (vrednost v MW je uporabljena v nadaljnjem izračunu)

$$\dot{m}_g = \frac{\dot{Q}_g}{H_i} = 2,31 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} = 8,30 \text{ kg/h}$$

- c) Upoštevamo povezavo med masnimi deleži v vlažnem in suhem gorivu ( $w_{C,s} = w_C / (1 - w_{H_2O})$ , ...) in izrazimo kurilnost suhega goriva ( $H_{i,s}$ ), pri čemer upoštevamo, da je  $w_{H_2O,s} = 0$ .

$$H_{i,s} = 33,9 \cdot w_{C,s} + 121,4 \cdot \left( w_{H,s} - \frac{w_{O,s}}{8} \right) + 10,5 \cdot w_{S,s}$$

$$H_{i,s} = 33,9 \cdot \frac{w_C}{1 - w_{H_2O}} + 121,4 \cdot \left( \frac{w_H}{1 - w_{H_2O}} - \frac{w_O}{8 \cdot (1 - w_{H_2O})} \right) + 10,5 \cdot \frac{w_S}{1 - w_{H_2O}}$$

$$H_{i,s} = \frac{1}{1 - w_{H_2O}} \cdot \left( 33,9 \cdot w_C + 121,4 \cdot \left( w_H - \frac{w_O}{8} \right) + 10,5 \cdot w_S \right) = \frac{1}{1 - w_{H_2O}} \cdot (H_i + 2,5 \cdot w_{H_2O})$$

$$w_{H_2O} = \frac{H_{i,s} - H_i}{H_{i,s} + 2,5} = 0,205$$

## 5-9

V zgorevalni komori plinske turbine zgoreva 10 t/h metana (75 % ogljika in 25 % vodika). V suhih dimnih plinih izmerimo 15,4 % kisika (volumski delež). Izračunaj:

a) razmernik zraka,

b) dejanski volumski tok zgorevalnega zraka pri normalnih pogojih.

| podano  | gorivo       | iskano                                       |
|---|--------------|--|
| $\dot{m}_g = 10 \text{ t/h} = 2,778 \text{ kg/s}$ | $w_C = 0,75$ | $\lambda, \dot{V}_{z,\min}$                  |
| $\varphi(\text{O}_2)_s = 15,4 \% = 0,154$         | $w_H = 0,25$ |  |
|   |              | tabele                                       |
|   |              | $\rho_{\text{CO}_2} = 1,9768 \text{ kg/m}^3$ |
|   |              | $\rho_{\text{N}_2} = 1,2505 \text{ kg/m}^3$  |
|   |              | $\rho_{\text{zrak}} = 1,2928 \text{ kg/m}^3$ |

a) Razmernik zraka izpeljemo iz izraza za volumski delež kisika v suhih dimnih plinih (sestavljene so samo iz  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  in  $\text{O}_2$ , ker gorivo ne vsebuje žvepla). Upoštevamo, da je pri  $\lambda = 1$  v dimnih plinih samo stehiometrična količina  $\text{N}_2$  in  $\text{CO}_2$ . Pri  $\lambda > 1$  se količina dimnih plinov poveča za presežek zraka, ki je  $(\lambda - 1) \cdot \dot{V}_{z,\min}$ , v katerem je 21 % (volumskih) kisika.

$$\varphi(\text{O}_2) = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{d,s}} = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2\text{teor}} + (\lambda - 1) \cdot \dot{V}_{z,\min}}$$

$$\varphi(\text{O}_2) = \frac{0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot \dot{V}_{z,\min}}{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2\text{teor}} + (\lambda - 1) \cdot \dot{V}_{z,\min}}$$

Vse prostornine izrazimo z maso in gostoto  $V = m/\rho$ .

$$m_{\text{O},\min} = 2,6641 \cdot w_C + 7,9370 \cdot w_H + 0,9981 \cdot w_S - w_O = 3,982 \text{ kg/kg}_g$$

$$m_{z,\min} = \frac{m_{\text{O},\min}}{0,23} = 17,314 \text{ kg/kg}_g$$

$$\dot{V}_{z,\min} = \frac{m_{z,\min}}{\rho_z} = 13,393 \text{ m}^3/\text{kg}_g$$

$$m_{\text{CO}_2} = 3,6641 \cdot w_C = 2,748 \text{ kg/kg}_g$$

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{CO}_2}} = 1,390 \text{ m}^3/\text{kg}_g$$

$$m_{\text{N}_2\text{teor}} = w_N + 0,77 \cdot m_{z,\min} = 13,332 \text{ kg/kg}_g$$

$$V_{\text{N}_2\text{teor}} = \frac{m_{\text{N}_2\text{teor}}}{\rho_{\text{N}_2}} = 10,661 \text{ m}^3/\text{kg}_g$$

$$\lambda = 1 + \frac{\varphi(\text{O}_2) \cdot (V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2\text{teor}})}{(0,21 - \varphi(\text{O}_2)) \cdot \dot{V}_{z,\min}} = 3,47$$

b)  $\dot{V}_z = \dot{m}_g \cdot \lambda \cdot \dot{V}_{z,\min} = 129,3 \text{ m}^3/\text{s}$



## 6 Dodatna naloga

V parnem kotlu industrijskega energetskega postrojenja uporabljamo kot gorivo zračno sušeno lesno biomaso z znano sestavo. Pri polni obremenitvi kotla porabljamo 1000 kg goriva na uro, njegov izkoristek pa je 87 %. V dimniku izmerimo masni delež kisika v dimnih plinih 4,8 %, temperatura dimnih plinov je 170 °C, njihova specifična toplota pa 1190 J/(kg·K). Notranji premer dimnika je 80 cm.

Napajalno vodo iz razplinjevalnika (napajalnega rezervoarja), v katerem je tlak 3 bar in temperatura 130 °C, potiska napajalna črpalka po cevovodu s premerom 4,2 cm v grelnik vode, ki ima 75 m<sup>2</sup> prenosne površine in koeficient lokalnih pretočnih izgub 300, geodetsko pa leži 2,6 m nad nivojem vode v posodi. Iz grelnika vode izteka vrela voda s tlakom 8 bar. Ta se v uparjalniku upari v nasičeno paro, pri čemer tlak ostane nespremenjen. Iz uparjalnika teče para v pregrevalnik, kjer se ji temperatura poviša še za 65 K. Pretočni upori v pregrevalniku pare so 1 bar. Upore v ravnih delih cevovoda zanemari.

Sestava goriva (lesna biomasa):

$$w_C = 43,5 \%$$

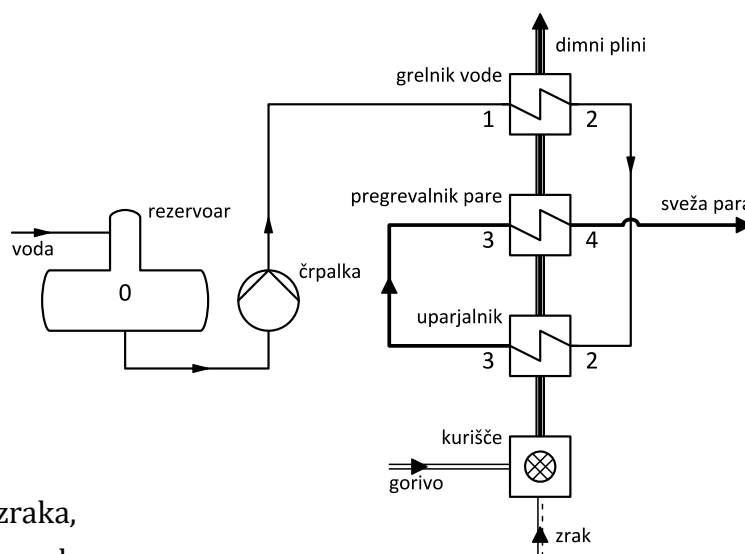
$$w_H = 5,2 \%$$

$$w_O = 37,9 \%$$

$$w_N = 0,4 \%$$

$$w_{H_2O} = 12,5 \%$$

$$w_P = 0,5 \%$$



Izračunaj:

- kurilnost uporabljenega goriva,
- potrebno količino zgorevalnega zraka,
- dejanski razmernik zgorevalnega zraka,
- sestavo (masne deleže sestavin) dimnih plinov,
- hitrost dimnih plinov v dimniku,
- masni tok pare,
- toplotne tokove za segrevanje vode, uparjanje in pregrevanje pare,
- toplotno prehodnost grelnika vode,
- tlak vode za napajalno črpalko (na vstopu v grelnik vode),
- dopustno sesalno in dobavno višino napajalne črpalke,
- teoretično moč napajalne črpalke.

$$a) \quad H_i = 33,9 \cdot w_C + 121,4 \cdot \left( w_H - \frac{w_O}{8} \right) + 10,5 \cdot w_S - 2,5 \cdot w_{H_2O} = 15,0 \text{ MJ/kg}$$

$$b) \quad m_{O,\min} = 2,6641 \cdot w_C + 7,9370 \cdot w_H + 0,9981 \cdot w_S - w_O = 1,193 \text{ kg/kg}$$

$$m_{z,\min} = \frac{m_{O,\min}}{0,23} = 5,185 \text{ kg/kg}$$

$$\dot{m}_{z,\min} = \dot{m}_g \cdot m_{z,\min} = 1,44 \text{ kg/s}$$

c) Dejanski razmernik zraka določimo glede na količino kisika v dimnih plinih. Pri popolnem zgorevanju se porabi ves kisik v minimalni količini zgorovalnega zraka ( $m_{z,\min}$ ), ostane pa ves kisik v presežku zraka ( $(\lambda - 1) \cdot m_{z,\min}$ ). Masni delež kisika v dimnih plinih je

$$w_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{m_d}$$

Pri tem sta masa kisika in skupna masa dimnih plinov (obe izraženi na 1 kg goriva)

$$m_{O_2} = 0,23 \cdot (\lambda - 1) \cdot m_{z,\min}$$

$$m_d = m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2}$$

Posamezne sestavine dimnih plinov (kisik je izražen že zgoraj) so

$$m_{CO_2} = 3,6641 w_C = 1,594 \text{ kg/kg}$$

$$m_{H_2O} = w_{H_2O} + 8,9370 w_H = 0,590 \text{ kg/kg}$$

$$m_{SO_2} = 1,9981 w_S = 0 \text{ kg/kg}$$

$$m_{N_2} = w_N + 0,77 \lambda m_{z,\min}$$

V zgornjih enačbah je edina neznanka razmernik zraka  $\lambda$ , ki ga iz sistema enačb izrazimo kot

$$\lambda = \frac{w_{O_2} \cdot (m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{SO_2} + w_N - 0,23 \cdot m_{z,\min})}{m_{z,\min} \cdot (0,23 - w_{O_2})} = 1,31$$

d) Z znanim razmernikom zraka lahko izračunamo

$$m_{O_2} = 0,375 \text{ kg/kg}$$

$$m_{N_2} = 5,252 \text{ kg/kg}$$

$$m_d = 7,810 \text{ kg/kg}$$

Masni deleži so

$$w_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{m_d} = 0,204$$

$$w_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{m_d} = 0,076$$

$$w_{SO_2} = \frac{m_{SO_2}}{m_d} = 0$$

$$w_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{m_d} = 0,672$$

$$w_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{m_d} = 0,048 \text{ (kar je enako podatku v opisu naloge)}$$

e) Hitrost plina v kanalu je odvisna od pretoka plina in preseka kanala.

$$c_d = \frac{\dot{V}_d}{A_d}$$

$$A_d = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,50 \text{ m}^2$$

$$\dot{V}_d = \frac{\dot{m}_d}{\rho} = \dot{m}_g \cdot m_d \frac{R \cdot T_d}{p_d} = 2,76 \text{ m}^3/\text{s}$$

Predpostavimo, da je plinska konstanta dimnih plinov enaka konstanti za zrak, za tlak dimnih plinov pa, ker nimamo nobenega podatka, upoštevamo 1 bar.

$$c_d = 5,49 \text{ m/s}$$

f) Masni tok pare v tem primeru lahko izračunamo iz toplotne moči kotla, ki jo lahko določimo glede na podan izkoristek kotla.

$$\dot{Q}_k = \eta_k \cdot \dot{Q}_g = \eta_k \cdot \dot{m}_g \cdot H_i = 3624 \text{ kW}$$

Ker velja tudi

$$\dot{Q}_k = \dot{m}_p \cdot (h_4 - h_1)$$

Izrazimo masni tok pare kot

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{Q}_k}{h_4 - h_1}$$

V točki 1 poznamo temperaturo, tlaka pa ne, vemo samo to, da mora biti nekoliko višji kot tlak za grelnikom vode (točka 2), ker se v grelniku zaradi pretočnih uporov tlak zniža. Tlak ne vpliva bistveno na entalpijo kapljevite vode, zato v tabelah poiščemo

$$h_1 = h(8 \text{ bar}, 130 \text{ °C}) = 546,7 \text{ kJ/kg}$$

V točki 4 določimo tlak glede na podatek, da uparjanje poteka pri konstantnem tlaku 8 bar (točki 2 in 3), nato pa se tlak v pregrevniku pare zniža za 1 bar. Temperatura v točki 4 je za 60 K višja kot v točki 3, kjer ima nasičena para pri tlaku 8 bar temperaturo nasičenja (vrelišča).

$$p_4 = 7,3 \text{ bar}$$

$$T_4 = T_s(8 \text{ bar}) + 65 \text{ K} = 235 \text{ °C}$$

$$h_4 = h_{7,3;235} = h_{7,3;230} + \frac{235 - 230}{240 - 230} (h_{7,3;240} - h_{7,3;230})$$

$$h_{7,3;230} = h_{7;230} + \frac{7,3 - 7}{8 - 7} (h_{8;230} - h_{7;230})$$

$$h_{7,3;240} = h_{7;240} + \frac{7,3 - 7}{8 - 7} (h_{8;240} - h_{7;240})$$

$$h_4 = 2920,8 \text{ kJ/kg}$$

Masni tok pare je

$$\dot{m}_p = 1,53 \text{ kg/s}$$

g) Za izračun posameznih toplotnih tokov na vodni strani znotraj kotla potrebujemo še entalpiji v točkah 2 (vrela voda) in 3 (nasičena para).

$$h_2 = h'(8 \text{ bar}) = 721,0 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = h''(8 \text{ bar}) = 2768,3 \text{ kJ/kg}$$

Toplotni tokovi za segrevanje, uparjanje in pregrevanje so

$$\dot{Q}_{\text{segr}} = \dot{m}_p \cdot (h_2 - h_1) = 266 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{upar}} = \dot{m}_p \cdot (h_3 - h_2) = 3125 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{pregr}} = \dot{m}_p \cdot (h_4 - h_3) = 233 \text{ kW}$$

h) Toplotno prehodnost ( $U$ ) določimo iz splošne enačbe za prenešen toplotni tok v površinskem prenosniku toplote.

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

Za grelnik vode je podana površina ( $A$ ), izračunali pa smo tudi prenešen toplotni tok ( $\dot{Q}_{\text{segr}}$ ). Temperaturno razliko določimo glede na temperature vode in dimnih plinov. Temperatura vode na vstopu je podana ( $130 \text{ }^\circ\text{C}$ ), na izstopu pa je vrela voda pri 8 bar ( $170,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Temperatura dimnih plinov na izstopu je podana ( $T_{d4} = 170 \text{ }^\circ\text{C}$ ), na vstopu v grelnik pa jo izračunamo z energijsko bilanco grelnika vode.

$$\dot{m}_d \cdot c_{p,d} \cdot (T_{d3} - T_{d4}) = \dot{m}_p \cdot (h_2 - h_1)$$

$$T_{d3} = T_{d4} + \frac{\dot{m}_p \cdot (h_2 - h_1)}{\dot{m}_g \cdot m_d \cdot c_{p,d}} = 273 \text{ }^\circ\text{C}$$

Logaritemska temperaturna razlika (upoštevamo, da je prenosnik protitočni) je

$$\Delta T_{\text{ln}} = \frac{(T_{d3} - T_2) - (T_{d4} - T_1)}{\ln \frac{T_{d3} - T_2}{T_{d4} - T_1}} = 66,5 \text{ K}$$

Toplotna prehodnost prenosnika pa je

$$U = \frac{\dot{Q}_{\text{segr}}}{A \cdot \Delta T_{\text{ln}}} = 53,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

- i) Tlak vode na vstopu v grelnik vode je za izgube tlaka zaradi pretočnih uporov v grelniku višji od znanega tlaka na izstopu. Ker za grelnik vode (ovira v cevovodu) poznamo koeficient lokalnih izgub, lahko določimo padec tlaka v grelniku.

$$\Delta p_{GV} = \zeta_{GV} \cdot \frac{\rho \cdot c^2}{2}$$

Gostota vode se v grelniku zaradi povišanja temperature precej spremeni, zato upoštevamo srednjo vrednost med gostotama vode pri 8 bar in 130 °C ( $\rho_{8;130}$ ) ter vrele vode pri 8 bar ( $\rho'_8$ ).

$$\rho = \frac{\rho_{8;130} + \rho'_8}{2} = 916 \text{ kg/m}^3$$

Hitrost vode je odvisna od pretoka in premera cevovoda.

$$c = \frac{4 \cdot \dot{m}_p}{\rho \cdot \pi \cdot d^2} = 1,2 \text{ m/s}$$

Padec tlaka in tlak pred grelnikom sta

$$\Delta p_{GV} = 198\,768 \text{ Pa}$$

$$p_1 = p_2 + \Delta p_{GV} = 10,0 \text{ bar}$$

- j) Pri dopustni sesalni višini upoštevamo tlak nasičenja ( $p_s$ ), pri temperaturi v rezervoarju 130 °C, tlačne izgube v sesalnem delu cevovoda ( $\Delta p_{izg,s}$ ) zanemarimo, hitrost vode v cevovodu pa je enaka kot v točki i).

$$H_{s,dop} < \frac{p_0 - p_s - \Delta p_{izg,s}}{\rho \cdot g} - \frac{c^2}{2 \cdot g} = 3,17 \text{ m}$$

Dobavno višino črpalke lahko izračunamo med točkama 0 in 2, ki sta znani iz podatkov, ali med 0 in 1, ki smo jo določili v točki i). V prvem primeru upoštevamo izgube v grelniku vode, v drugem primeru pa pretočnih izgub ne upoštevamo, zato je tlačna razlika večja, v obeh primerih pa dobimo enak rezultat

$$H = \frac{p_2 - p_0}{\rho \cdot g} + \Delta z + \frac{c_2^2 - c_0^2}{2 \cdot g} + \frac{\Delta p_{GV}}{\rho \cdot g} = 80,5 \text{ m}$$

$$H = \frac{p_1 - p_0}{\rho \cdot g} + \Delta z + \frac{c_1^2 - c_0^2}{2 \cdot g} = 80,5 \text{ m}$$

- k)  $P_t = \dot{m}_p \cdot g \cdot H = 1204 \text{ W}$

## 7 Viri

1. Rant, Z., Tuma, M. *Termodinamika: [knjiga za uk in prakso]*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo. 2001
2. Tuma, M., Sekavčnik, M. *Energetski stroji in naprave: Osnove in uporaba*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo. 2005
3. Tuma, M., Sekavčnik, M. *Energetski sistemi: Preskrba z električno energijo in toplote*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo. 2004
4. Oman, J. *Generatorji toplote*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo. 2005
5. Oprešnik, M. *Naloge in rešitve iz termodinamike*. Zagreb: Tehnička knjiga. 1967
6. Kuštrin, I., Senegačnik, A. *Tabele termodinamičnih lastnosti vode in vodne pare: Po modelu IAPWS-IF97*. V Ljubljani: Fakulteta za strojništvo. 2001
7. Senegačnik, A., Oman, J. *Lastnosti zraka, goriv in dimnih plinov*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo. 2004
8. *Krautov strojniški priročnik, 17. slovenska popravljena izd., predelana, 1. natis*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo. 2019