

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

KATEDRA ZA TEHNIČKU TERMODINAMIKU

NEKOLIKO RIJEŠENIH ZADATAKA

za vježbe iz

Osnova termodinamike A

Priredili: B. Halasz, S. Mudrinić

ZAGREB, šk. g. 2012/2013.

191. U pregrijaču pare parnog kotla pregrijava se 20 000 kg/h suhozasićene vodene pare tlaka 50 bar na temperaturu 480 °C. Potreban toplinski tok daju dimni plinovi svojim hlađenjem od 1050 °C na 600 °C.

Izmjenjivač topline je građen iz čeličnih cijevi promjera 32/38 mm. Poznat je koeficijent prijelaza topline unutar cijevi (na strani pare) $\alpha_u = 200 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ i s vanjske strane cijevi (na strani dimnih plinova) $\alpha_v = 100 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Treba izračunati potrebnu površinu izmjenjivača topline, iskoristivost topline i stupanj djelovanja izmjenjivača za:

- istosmjernu,
- protusmjernu izvedbu.

Kolika je temperatura *vanjske* površine cijevi na onom kraju izmjenjivača, na kojem ulaze dimni plinovi?

*** Rješenje:

(Svrha: Pokazati postupak proračuna izmjenjivača, računanja toplinskog kapaciteta struja, razliku u učinku dvaju tipova izmjenjivača te određivanja površinskih temperatura cijevi.)

Izmijenjeni toplinski tok može se odmah izračunati iz zadanih podataka:

$$\Phi = q_{m,p} (h_{pp} - h_{szp}) = \frac{20\,000}{3600} \cdot (3387,71 - 2794,23) = 3297 \text{ kW}$$

Za daljnji račun treba prvo ustanoviti koja je struja "1", a koja struja "2": budući da su ovdje poznate sve temperature, to je lako, jer slabija struja "1" više mijenja svoju temperaturu. To su očito dimni plinovi koji se hlade za 450 °C, dok se vodena para zagrijava od temperature zasićenja (263,94 °C za 50 bar, Toplinske tablice, str.6) na 480 °C, dakle, samo za 216 °C. Tako su dimni plinovi struja "1", a vodena para struja "2".

Isto tako, kad su poznate sve temperature, lako se izračunaju bezdimenzijske veličine:

$$\pi_3 = \frac{C_1}{C_2} = \frac{g_2'' - g_2'}{g_1' - g_1''} = \frac{480 - 264}{1050 - 600} = 0,48$$

$$\pi_1 = \frac{g_1' - g_1''}{g_1' - g_2'} = \frac{1050 - 600}{1050 - 264} = 0,5725$$

što znači da će se *treća* bezdimenzijska veličina $\pi_2 = (k A_0)/C_1$ očitati iz dijagrama za dotični tip izmjenjivača i u njoj će biti sadržana tražena veličina A_0 . Da bi se ta tražena veličina mogla izdvojiti iz bezdimenzijskog sklopa, treba poznavati vrijednosti k i C_1 .

Koeficijent prolaza topline određuje se iz poznatog izraza (odaberimo proizvoljno da bude sveden na *vanjsku* površinu cijevi):

$$k_v = \frac{1}{\frac{r_v}{r_u \alpha_u} + \frac{r_v}{\lambda_c} \ln \frac{r_v}{r_u} + \frac{1}{\alpha_v}} = \frac{1}{\frac{0,019}{0,016 \cdot 200} + \frac{0,019}{58} \ln \frac{38}{32} + \frac{1}{100}} = 62,52 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}),$$

Želimo li računati s k svedenim na *unutarnju* površinu, on bi iznosio:

$$k_u = \frac{r_v}{r_u} k_v = \frac{38}{32} \cdot 62,52 = 74,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}).$$

(Sam je izbor nevažan, jer ćemo kao rezultat dobiti onu površinu na koju je sveden k . Od ranije je poznato da je umnožak $(k A)$ po definiciji konstantan, pa ćemo tako s manjom vrijednošću k_v dobiti veću površinu $A_{0,v}$, a s većim k_u rezultat je manja površina $A_{0,u}$. No, kako je $A_{0,v} = n d_v \pi L$, a $A_{0,u} = n d_u \pi L$, na duljinu cijevi to očito neće imati utjecaja! (n je broj cijevi u snopu - u ovom primjeru nije zadan, pa je $(n L)$ ukupna duljina svih cijevi u snopu).

Druga potrebna veličina, C_1 , ne može se ovdje izračunati iz definicijskog izraza $C_1 = q_{m,1} c_{p,1}$, jer za struju "1" (dimne plinove) nije poznat niti zasebni iznos protočne mase dimnih plinova $q_{m,1}$, niti njihov specifični toplinski kapacitet $c_{p,1}$. No, kako vrijedi Prvi glavni stavak $\Phi = q_{m,1} c_{p,1} (\vartheta_1' - \vartheta_1'') = C_1 (\vartheta_1' - \vartheta_1'')$, toplinski se kapacitet dimnih plinova dobije iz izraza:

$$C_1 = \frac{\Phi}{(\vartheta_1' - \vartheta_1'')} = \frac{3297 \cdot 10^3}{(1050 - 600)} = 7327 \text{ W/K}$$

a) istosmjerni izmjenjivač

Iz dijagrama za istosmjerni izmjenjivač, za $\pi_3 = C_1/C_2 = 0,48$ i $\pi_1 = 0,5725$, očitana je vrijednost $\pi_2 = (k A_0)/C_1 = 1,27$. S tim se brojem dobije i potrebna površina istosmjernog izmjenjivača $A_{0,v}$:

$$A_{0,v} = \left(\frac{k A_0}{C_1} \right) \cdot \frac{C_1}{k_v} = 1,27 \cdot \frac{7327}{62,52} = 148,8 \text{ m}^2 \quad (\text{ili } A_{0,u} = 125,3 \text{ m}^2)$$

"Iskoristivost topline" ε za sve je tipove izmjenjivača jednaka π_1 :

$$\varepsilon = \pi_1 = 0,5725,$$

ali je "stupanj djelovanja izmjenjivača" η za istosmjerni tip drugačiji nego za ostale:

$$\eta_i = \left(1 + \frac{C_1}{C_2} \right) \cdot \pi_1 = (1 + 0,48) \cdot 0,5725 = 0,847 = 84,7\%$$

a) protusmjerni izmjenjivač

Iz dijagrama za protusmjerni izmjenjivač, za $\pi_3 = C_1/C_2 = 0,48$ i $\pi_1 = 0,5725$, očitana je vrijednost $\pi_2 = (k A_0)/C_1 = 1,02$. S tim se brojem dobije i potrebna površina protusmjernog izmjenjivača $A_{0,v}$:

$$A_{0,v} = \left(\frac{k A_0}{C_1} \right) \cdot \frac{C_1}{k_v} = 1,02 \cdot \frac{7327}{62,52} = 119,5 \text{ m}^2 \quad (\text{ili } A_{0,u} = 100,7 \text{ m}^2)$$

"Iskoristivost topline" ε opet je jednaka π_1 :

$$\varepsilon = \pi_1 = 0,5725,$$

ali je za protusmjerni tip i "stupanj djelovanja izmjenjivača" jednak π_1 :

$$\eta_i = \pi_1 = 0,5725 = 57,25\% .$$

Fizikalni je smisao tih dvaju pokazatelja, ε i η , sljedeći:

- "Iskoristivost topline" ε pokazuje koliko se toplinskog toka iskoristi od ukupno teoretski raspoloživog (onog koji je određen protočnim masama dviju struja, njihovim ulaznim temperaturama i drugim glavnim stavkom!). Kako je za oba tipa zadan isti toplinski tok (3263 kW), a i svi su ostali podaci isti, oba tipa izmjenjivača iskorištavaju 57,3% teoretski raspoloživog toplinskog toka;
- "Stupanj djelovanja izmjenjivača" pokazuje koliko dotični izmjenjivač topline izmijeni u odnosu na ono što bi isti tip izmjenjivača mogao izmijeniti kad bi imao beskonačno veliku površinu. To što istosmjerni tip ima stupanj djelovanja veći (84,7 %) od protusmjernoga (57,3 %) ne znači da je on bolji (suprotno tome, lošiji je!) od protusmjernoga. To se vidi već i po tome što za isti učinak traži veću površinu (148,8 m² prema 119,5 m²). Veći η ovdje znači samo to, da je istosmjerni tip za postavljeni zadatak (3297 kW) znatno bliže postizivoj granici koju taj tip izmjenjivača ne može premašiti! Naime, i s beskonačnom površinom istosmjerni bi izmjenjivač mogao paru pregrijati i dimne plinove ohladiti samo do zajedničke izlazne temperature ϑ :

$$g'' = \frac{C_1 g_1' + C_2 g_2'}{C_1 + C_2} = \frac{\frac{C_1}{C_2} g_1' + g_2'}{\frac{C_1}{C_2} + 1} = \frac{0,48 \cdot 1050 + 264}{0,48 + 1} = 518,9^\circ\text{C}$$

Kod protusmjernog su izmjenjivača te granice znatno više: dimni bi se plinovi kao "slabija" struja (teoretski) mogli ohladiti sve do 264°C , pregrijavajući pritom paru na $641,3^\circ\text{C}$.

Temperatura vanjske površine cijevi određena je, kao i ranije u poglavljima 3 i 4, odnosom pojedinih toplinskih otpora – većem otporu odgovara i veći pad temperature. Prema ideji prikazanoj u zadatku 47., diferencijalna jednadžba izmjenjivača kod kojega je, kao ovdje, slabija struja ("1") s vanjske strane cijevi, može se pisati u obliku:

$$d\Phi = k_v (g_1 - g_2) dA_v = \alpha_v (g_1 - g_{s,v}) dA_v$$

gdje su temperature g_1 i g_2 lokalne temperature struja "1" i "2" na promatranom mjestu površine. Iz gornjeg izraza slijedi temperatura stijenke $g_{s,v}$:

$$g_{s,v} = g_1 - \frac{k_v}{\alpha_v} (g_1 - g_2).$$

Kako se u obadva slučaja traži temperatura stijenke na onom kraju izmjenjivača na kojem ulaze dimni plinovi, temperatura g_1 uvijek će biti g_1' , dok će se temperatura struje "2" (g_2) razlikovati ovisno o smjeru strujanja.

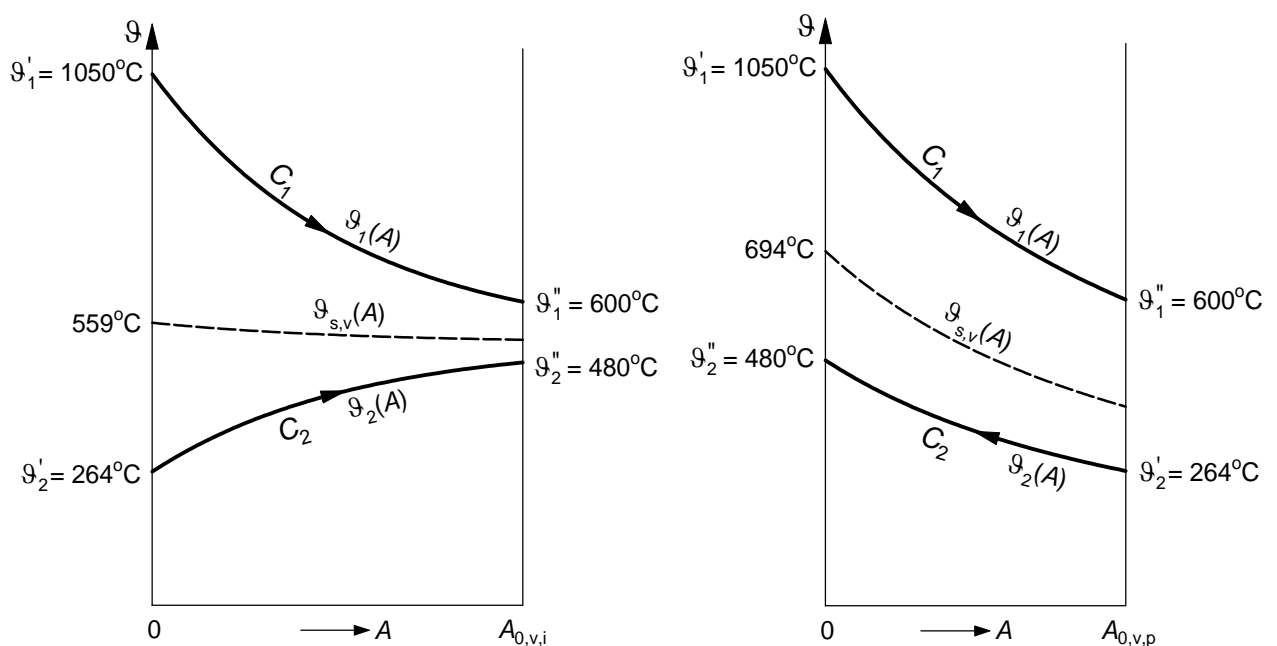
a) istosmjerni izmjenjivač – struja "2" ulazi tamo gdje ulazi i struja "1", pa je $g_2 = g_2'$:

$$g_{s,v,a} = g_1' - \frac{k_v}{\alpha_v} (g_1' - g_2') = 1050 - \frac{62,52}{100} \cdot (1050 - 264) = 558,6^\circ\text{C}.$$

b) protusmjerni izmjenjivač – struja "2" izlazi tamo gdje ulazi struja "1", pa je $g_2 = g_2''$:

$$g_{s,v,b} = g_1' - \frac{k_v}{\alpha_v} (g_1' - g_2'') = 1050 - \frac{62,52}{100} \cdot (1050 - 480) = 693,6^\circ\text{C}.$$

iz čega se jasno vidi da je kod *protusmjernog* izmjenjivača stijenka barem na nekim mjestima izložena znatno višim temperaturama, jer se tamo gdje je grijanje stijenke najjače, na ulaznom kraju dimnih plinova, ona slabije hladi već pregrijanom parom.



192. Izmjenjivač topline je napravljen kao snop od 20 čeličnih cijevi promjera 32/38 mm. S vanjske stane potpuno kondenzira 1300 kg/h pregrijane vodene pare stanja 2 bar i 140 °C, kojom se zagrijava voda od 25 °C na 95 °C.

- a) Odredite potrebnu površinu izmjenjivača topline i duljinu cijevnog snopa, ako je koeficijent prijelaza topline na strani pare $\alpha_p = 10\,000\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$!
- b) Kolika bi bila izlazna temperatura iste količine vode iz tako dimenzioniranog izmjenjivača, ako bi se tlak pare smanjio prigušenjem na 1,6 bar, a sve ostale veličine ostanu *nepromijenjene*! Koliki bi bio potrošak pare?

Raspored temperatura u jednom i drugom slučaju skicirati u istom \mathcal{Q},A -dijagramu!

*** Rješenje:

(Svrha zadatka: Pokazati proračun *kondenzatora*, upozoriti na to da i kod kondenzacije *pregrijane pare* na rad izmjenjivača utjecaj ima samo temperatura zasićenja pare, a ne njena stvarna ulazna temperatura! Pokazati da jedan uređaj može raditi u različitim uvjetima, dajući različiti učinak. Pokazati da su u ovom slučaju obadva režima rada (koji se stvarno razlikuju), promatrano bezdimenzijski, zapravo identični!)

- a) Izmijenjeni toplinski tok određen je protočnom masom i promjenom entalpije pare:

$$\Phi_a = q_{m,p} (h_{pp} - h_{vk}) = 1300 \cdot (2748,31 - 504,68) = 2,917 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} = 810,2 \text{ kW}$$

a s njime je onda određena i protočna masa vode koja se zagrijava:

$$q_{m,w} = \frac{\Phi_a}{c_w \Delta \mathcal{Q}_w} = \frac{810,2}{4,1828 \cdot 70} = 2,767 \text{ kg/s} = 9962 \text{ kg/h}$$

Prisilna konvekcija, strujanje kroz cijev

$$w = \frac{q_{m,w}}{\rho A} = \frac{4 q_m}{\rho n d_u^2 \pi} = \frac{4 \cdot 2,767}{983,21 \cdot 20 \cdot 0,032^2 \cdot \pi} = 0,175 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{w d_u}{\nu} = \frac{0,175 \cdot 0,032}{0,4744 \cdot 10^{-6}} = 11\,800 \gg 3000$$

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_u d_u}{\lambda} = \frac{0,0398 \text{ Pr Re}^{0,75}}{1 + 1,74 \text{ Re}^{-0,125} (\text{Pr} - 1)} = 64,98$$

$$\alpha_u = \frac{\text{Nu} \lambda}{d_u} = \frac{64,98 \cdot 0,65440}{0,032} = 1329 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

- voda
Topl. tablice, str.44
$\mathcal{Q}_{w,sr} = \frac{\mathcal{Q}'_w + \mathcal{Q}''_w}{2} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$
$\rho = 983,21 \text{ kg}/\text{m}^3$
$c = 4,1828 \text{ kJ}/(\text{kg K})$
$\lambda = 0,65440 \text{ W}/(\text{m K})$
$\eta = 466,4 \cdot 10^{-6} \text{ N s}/\text{m}^2$
$\nu = 0,4744 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
$\text{Pr} = 2,9811$

Koeficijent prolaza topline može se računati sveden na bilo koju površinu: ona na koju je sveden, ta se i dobije kao rezultat. Iako se vanjska i unutarnja površina cijevi razlikuju, duljina cijevi je ista! Odaberemo li k_u sveden na unutarnju površinu, dobije se:

$$k_u = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_u} + \frac{r_u}{\lambda_\xi} \ln \frac{r_v}{r_u} + \frac{r_u}{r_v \alpha_v}} = \frac{1}{\frac{1}{1329} + \frac{0,016}{58} \ln \frac{38}{32} + \frac{0,016}{0,019 \cdot 10\,000}} = 1131 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}),$$

a na vanjsku površinu: $k_v = 950 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Dalje ćemo računati s k_u .

U svakom je izmjenjivaču, u kojem para kondenzira, svakako $C_1/C_2 = 0$, pa je voda slabija struja ("1") s toplinskim kapacitetom

$$\dot{C}_1 = q_{m,w} c_w = 2,767 \cdot 4182,8 = 11\,575 \text{ W/K}$$

S poznatim vrijednostima:

$$\pi_3 = \frac{C_1}{C_2} = 0 \quad \text{i} \quad \pi_1 = \frac{\vartheta_1' - \vartheta_1''}{\vartheta_1' - \vartheta_2'} = \frac{25 - 95}{25 - 120,21} = 0,7352$$

iz **bilo kojeg dijagrama** može se očitati treća veličina: $\pi_2 = (k A_0)/C_1 = 1,33$. Ona se može za ovaj slučaj jednostavno i izračunati iz izraza:

$$\pi_2 = \frac{k A_0}{C_1} = -\ln(1 - \pi_1) = -\ln(1 - 0,7352) = 1,33 \quad (\text{samo za } C_1/C_2 = 0!).$$

Iz značajke π_2 može se izračunati površina $A_{0,u}$, ako znamo k_u i C_1 :

$$A_{0,u} = \left(\frac{k A_0}{\dot{C}_1} \right) \cdot \frac{\dot{C}_1}{k_u} = 1,33 \cdot \frac{11575}{1131} = 13,60 \text{ m}^2,$$

a iz nje i duljina cijevnog snopa $L = \frac{A_{0,u}}{n d_u \pi} = \frac{13,60}{20 \cdot 0,032 \cdot \pi} = 6,76 \text{ m}$

b) I u ovom slučaju para kondenzira ($C_1/C_2 = 0$), a iste su i vrijednosti k_u , $A_{0,u}$ i C_1 , dakle, i značajka $\pi_2 = 1,33$ ostaje ista. To znači, da je i temperaturna funkcija π_1 ista: $\pi_1 = 0,7352$! Kako su u njoj sadržane tri temperature: ϑ_1' , ϑ_1'' i ϑ_2' , njihovi iznosi ne moraju biti isti kao pod "a", ali moraju biti takvi da, uvršteni u jednadžbu za π_1 daju 0,7352!

$$\text{Iz jednadžbe } \pi_1 = \frac{\vartheta_1' - \vartheta_{1b}''}{\vartheta_1' - \vartheta_{2b}'} = 0,7352$$

slijedi $\vartheta_{1b}'' = \vartheta_1' - \pi_1 (\vartheta_1' - \vartheta_{2b}') = 25 - 0,7352 \cdot (25 - 113,30) = 89,92 \text{ }^\circ\text{C}$

Izmijenjeni se je toplinski tok smanjio, jer su se, sa sniženjem temperature ϑ_2' smanjile i sve lokalne razlike temperatura:

$$\Phi_b = \dot{C}_1 (\vartheta_{1b}'' - \vartheta_1') = 11575 \cdot (89,92 - 25) = 751\,400 \text{ W} = 751,4 \text{ kW}$$

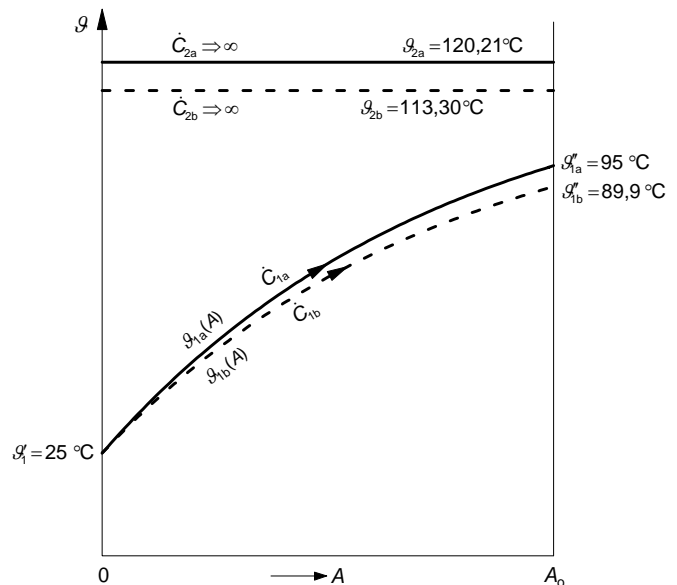
Potrošak pare je također manji:

$$q_{m,p,b} = \frac{\Phi_b}{(h_{pp} - h_{vk,b})} = \frac{751,4 \cdot 10^3}{(2748,31 - 475,34)} = 0,3306 \text{ kg/s} = 1190 \text{ kg/h}$$

Entalpija pare ostaje i nakon prigušivanja ista (osnovno obilježje prigušivanja!), ali se entalpija vrele kapljevine smanjila, jer joj se je i temperatura snizila sa 120,21°C na 113,30°C.

Iako je prigušenjem para (koja je već bila pregrijana) još više ušla u pregrijano područje, i dalje je temperatura zasićenja ona koja određuje intenzitet izmjene topline, što se vidi iz značajke π_1 . To što je para pregrijana ima odraza samo na potrošak pare!

Kako je pokazano na početku dijela "b", ta su dva režima rada, iako stvarno različiti, bezdimezijski isti, jer su opisani trima jednakim bezdimezijskim parametrima! ☺



201. Plinsko gorivo volumenskog sastava: 80 % metana, 15 % etana i 5 % propana potpuno izgara s 15 % pretička zraka.

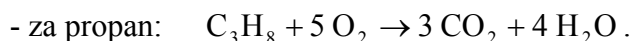
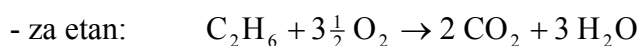
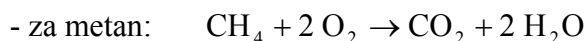
- Kolika bi se temperatura postigla u toplinski izoliranom ložištu, ako gorivo ulazi u ložište s 0 °C, a zrak za izgaranje s 250 °C? (Pretpostaviti 2000 °C!).
- Ako stijenke ložišta *nisu izolirane*, nego se za vrijeme izgaranja toplinski tok odvodi iz ložišta, koliko topline treba odvesti da bi temperatura dimnih plinova na izlazu iz ložišta bila 1300 °C?
- Dimni plinovi izlaze s temperaturom 200 °C u okoliš normalnog stanja. Koliki su gubici osjetne topline i koliki je protočni volumen dimnih plinova u dimnjaku, ako je protočna količina goriva 10 kmol/h?

Računati sa srednjim specifičnim (molarnim) toplinskim kapacitetima!

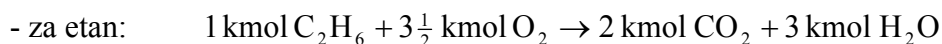
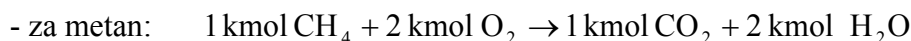
*** Rješenje:

(Svrha zadatka: Pokazati osnovne stehiometrijske jednadžbe izgaranja i kako se s pomoću njih mogu izračunati sve potrebne veličine. Pokazati računanje temperature u ložištu, kako izoliranom, tako i neizoliranom.)

Gorivo je plinska smjesa metana (CH₄), etana (C₂H₆) i propana (C₃H₈). Za svaki od ta tri plina, stehiometrijska jednadžba izgaranja glasi (broj atoma na lijevoj i desnoj strani jednadžbe mora biti jednak):



Kako je po definiciji 1 kmol = 6,023·10²⁶ elementarnih čestica (onakvih, u kakvom se obliku tvar pojavljuje), gornje se jednadžbe mogu pomnožiti s Loschmidtovim (Avogadrovim) brojem (6,023·10²⁶), tako da se, umjesto na pojedine čestice, odnose na kilomolove dotičnih sudionika:



a u tom obliku ove jednadžbe opisuju sve stehiometrijske odnose pri izgaranju. Primjerice, prva jednadžba za metan kaže da za izgaranje jednog kilomola metana trebaju dva kilomola kisika, da nastaje jedan kilomol ugljikovog dioksida i dva kilomola vodene pare.

U jednom kilomolu goriva sadržano je 0,8 kmol metana, 0,15 kmol etana i 0,05 kmol propana, pa je *minimalna (stehiometrijska, teoretska)* količina kisika za izgaranje jednoga kilomola goriva zbroj pojedinačnih potrebnih količina:

$$O_{\min} = 0,8 \cdot 2 + 0,15 \cdot 3,5 + 0,05 \cdot 5 = 2,375 \text{ kmol}_{\text{O}_2} / \text{kmol}_{\text{G}}$$

Ako se kisik za izgaranje dovodi u zraku (koji ga sadrži 21% - molni), količinski treba oko pet puta više zraka (točnije: 1/0,21):

$$Z_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,21} = \frac{2,375}{0,21} = 11,31 \text{ kmol}_z / \text{kmol}_{\text{G}}$$

Za svako izgaranje, želimo li da bude potpuno, treba dovesti više zraka od minimalne količine, i to λ - puta (λ je "faktor pretička zraka"):

$$Z_{\text{stv}} = \lambda \cdot Z_{\text{min}} = \lambda \cdot \frac{O_{\text{min}}}{0,21} = 1,15 \cdot \frac{2,375}{0,21} = 13,006 \text{ kmol}_z / \text{kmol}_G.$$

Količine dimnih plinova koje nastaju izgaranjem odabrane jedinice goriva (1 kmol) također slijede iz stehiometrijskih jednačbi:

- količina ugljikovog dioksida određena je količinom ugljika u gorivu:

$$n_{\text{CO}_2} = [\text{CO}_2] = 0,8 \cdot 1 + 0,15 \cdot 2 + 0,05 \cdot 3 = 1,25 \text{ kmol}_{\text{CO}_2} / \text{kmol}_G$$

gdje je n_{CO_2} novija, a $[\text{CO}_2]$ starija oznaka za količinu nastalog ugljikovog dioksida po odabranoj jedinici goriva.

- količina vodene pare određena je količinom vodika u gorivu (i vlage, kad bi je u gorivu bilo):

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = [\text{H}_2\text{O}] = 0,8 \cdot 2 + 0,15 \cdot 3 + 0,05 \cdot 4 = 2,25 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kmol}_G.$$

- količina slobodnoga kisika je zapravo višak dovedenoga kisika, tj. razlika između dovedenog kisika ($O_{\text{stv}} = \lambda O_{\text{min}}$) i onoga (O_{min}) koji se uopće može potrošiti, dakle, koji se ima s čime spojiti:

$$n_{\text{O}_2} = [\text{O}_2] = (\lambda - 1) O_{\text{min}} = (1,15 - 1) \cdot 2,375 = 0,3563 \text{ kmol}_{\text{O}_2} / \text{kmol}_G$$

- pojavljuje se još i dušik, jer se dovodi sa zrakom (koji ga sadrži 79% - molnih):

$$n_{\text{N}_2} = [\text{N}_2] = 0,79 \cdot Z_{\text{stv}} = 0,79 \cdot 13,006 = 10,2747 \text{ kmol}_{\text{N}_2} / \text{kmol}_G.$$

Svi oni zajedno čine "vlažne dimne plinove", tj. to su stvarni dimni plinovi koji nastaju izgaranjem:

$$n_{\text{vl}} = n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} = 14,131 \text{ kmol}_{\text{vdp}} / \text{kmol}_G,$$

a bez vodene pare to bi bili tzv. "suhi dimni plinovi", koji nisu stvarni. No, za potrebe mjerenja sastava dimnih plinova, uzorak bi se ohladio na okolišnu temperaturu, pri čemu bi vlaga kondenzirala (ili se uklonila apsorpcijom), tako da se mjerenjem obično dobije "sastav suhih dimnih plinova", primjerice Orsat-aparatom. Osim kad se u račun ulazi s mjerenim sastavom suhih dimnih plinova, ili se računa njihov sastav, u ostalim se situacijama redovito računa sa stvarnim, dakle, vlažnim dimnim plinovima!

Temperatura izgaranja (ili temperatura dimnih plinova na izlazu iz ložišta), bez obzira na to je li izgaranje potpuno ili nije, te je li ložište izolirano ili nije, određena je energijskom bilancom (Prvim glavnim stavkom) i može se računati s pomoću jednačbe:

$$q_{\text{izg}} = \frac{\Delta h_d + h_G + Z_{\text{stv}} h_z - |q_{\text{odv}}|}{\sum n_i [C_{\text{mp},i}]_0^{q_{\text{izg}}}}$$

u kojoj je Δh_d (J/jed.G) donja ogrjevna vrijednost goriva po odabranoj jedinici goriva (onoj, s kojom se računa cijeli zadatak) i odnosi se na potpuno izgaranje. Ovdje se računa s donjom ogrjevnom vrijednošću, jer je temperatura u ložištu vrlo visoka, pa se dio energije troši za prevođenje vlage (bilo nastale izgaranjem vodika, bilo isparivanjem - ishlapljivanjem već postojeće vlage u gorivu), a ne dobije se natrag, jer hlađenja dimnih plinova nema.

Član h_G (J/jed.G) je entalpija goriva koju ono unosi u ložište, ako ulazi s temperaturom većom od 0 °C.

Zrak, ako ulazi s temperaturom većom od 0 °C, unosi u ložište svoju entalpiju $Z_{\text{stv}} h_z$ (J/jed.G).

Zadnji član u brojniku $|q_{\text{odv}}|$ je toplina (J/jed.G) odvedena iz ložišta. Ona može biti jednaka nuli ako je ložište izolirano ("adijabatsko"), a ako je ložište neizolirano, uvijek je odvedena, zbog visoke temperature u ložištu.

Suma u nazivniku je toplinski kapacitet dimnih plinova, a pomnožena s temperaturom \mathcal{G}_{izg} postaje entalpija koju iznose dimni plinovi iz ložišta. Suma se sastoji od umnožaka količina pojedinih dimnih plinova (n_i) (kmol_i/jed.G) nastalih izgaranjem, s njihovim srednjim molnim toplinskim kapacitetom između temperatura 0°C i temperature izgaranja \mathcal{G}_{izg} : $[C_p]_0^{\mathcal{G}_{izg}}$. Gornja je jednadžba općenita, pa se pojedini članovi u gornjoj jednadžbi prilagođavaju promatranoj situaciji.

Ogrjevna je vrijednost goriva njegovo svojstvo i odnosi se na potpuno izgaranje. Određuje se mjenjenjem na uzorku, a u nedostatku pouzdanih mjerenih podataka kao i u ovakvim "školskim" primjerima može se koristiti i približna formula, koja za smjesu gorivih plinova glasi:

$$\Delta h_d = \sum y_i \Delta h_{d,i},$$

što, prevedeno u oznake ovog zadatka, daje:

$$\begin{aligned} \Delta h_d &= y_{CH_4} \Delta h_{d,CH_4} + y_{C_2H_6} \Delta h_{d,C_2H_6} + y_{C_3H_8} \Delta h_{d,C_3H_8} = \\ &= 0,8 \cdot 802,3 + 0,15 \cdot 1427,9 + 0,05 \cdot 2044 = 958,2 \text{ MJ/kmol} = 958\,200 \text{ kJ/kmol} \end{aligned}$$

(za pretvorbu mjernih jedinica iz normnoga kubnog metra u kilomol uzet je faktor 22,41 isti za sve plinove; može se računati i s "točnijom", zasebnom vrijednošću za svaki plin, navedenom u Toplinskim tablicama, str. 28., tamo gdje se nalaze i njihove ogrjevne vrijednosti)

- a) Temperatura koja se postiže pri potpunom izgaranju u izoliranom ložištu naziva se i "teorijska temperatura izgaranja". Poteškoća pri njenom računanju je ta, da se mora računati iteracijom, jer traženi rezultat utječe na nazivnik kao ulazna veličina pri određivanju srednjeg molnog toplinskog kapaciteta. U ovom zadatku, da bi se izbjegla iteracija, sugerirana je vrijednost 2000 °C za računanje (tako se obično i na ispitu zadaje) koja je već dovoljno blizu točne vrijednosti, pa se od prvog pokušaja dobije točan rezultat. Inače, kod nasumičnog pogađanja konvergencija je prilično brza i vrijedi približno pravilo da se pogreška u svakom koraku smanji za oko 10 puta (8 - 12 puta) i to na suprotnu stranu. Primjerice, ako pri prvom pokušaju pogriješimo za +200°C, rezultat će ispasti za oko 20 °C manji od točnoga. Ako s tim novim rezultatom (pogreška -20 °C) ponovimo račun, sljedeća pogreška će biti oko +2 °C itd.

Potrebni podaci za sljedeće formule računaju se s pomoću tablice:

PLIN	n_i	$[C_{p,i}]_0^{2000}$	$n_i [C_{p,i}]_0^{2000}$	$[C_{p,i}]_0^{1300}$	$n_i [C_{p,i}]_0^{1300}$	$[C_{p,i}]_0^{200}$	$n_i [C_{p,i}]_0^{200}$
CO ₂	1,250	54,290	67,863	51,322	64,153	40,059	50,074
O ₂	0,3563	35,169	12,531	33,863	12,065	29,931	10,664
N ₂	10,2747	33,373	342,898	32,067	329,479	29,228	300,309
H ₂ O	2,25	43,995	98,989	40,407	90,916	34,118	76,766
Σ=	14,131		522,280		496,612		437,813

Za zadane vrijednosti dobije se teorijska temperatura izgaranja:

$$\mathcal{G}_{teor} = \frac{\Delta h_d + Z_{stv} [C_{mp,z}]_0^{\mathcal{G}_z} \cdot \mathcal{G}_z}{\sum n_i [C_{mp,i}]_0^{\mathcal{G}_{izg}}} = \frac{958\,200 + 13,006 \cdot 29,41 \cdot 250}{522,28} = 2017,8 \text{ °C}$$

i to se može smatrati dovoljno točnim rezultatom, jer bi, prema gornjem približnom pravilu, rezultat sljedećega koraka iteracije bio oko 2015 °C!

- b) Odvedena toplina iz hlađenog ložišta može se računati kao toplina koju oslobađaju dimni plinovi pri hlađenju od teoretske do stvarne temperature:

$$|q_{\text{odv}}| = n_{\text{vdp}} [C_{\text{p,vdp}}]_{g_{\text{stv}}}^{g_{\text{teor}}} (g_{\text{teor}} - g_{\text{stv}})$$

ali je jednostavnije koristiti se već izračunatim podacima iz tablice:

$$|q_{\text{odv}}| = \sum n_i [C_{\text{mp},i}]_0^{g_{\text{teor}}} \cdot g_{\text{teor}} - \sum n_i [C_{\text{mp},i}]_0^{g_{\text{stv}}} \cdot g_{\text{stv}}$$

$$|q_{\text{odv}}| = 522,28 \cdot 2017,8 - 496,612 \cdot 1300 = 408\,300 \text{ kJ/kmol}_G,$$

što sa zadanom protočnom količinom goriva (10 kmol/h) daje odvedeni toplinski tok:

$$|\Phi_{\text{odv}}| = q_{\text{N,G}} \cdot |q_{\text{odv}}| = 10 \cdot 408\,300 = 4,083 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} = 1134 \text{ kW}.$$

(Pazi! Odvedena je toplina negativna, ali ovdje se računa njena apsolutna vrijednost!)

Isto tako mogla bi se koristiti i gornja formula za stvarnu temperaturu izgaranja:

$$g_{\text{stv}} = \frac{\Delta h_d + Z_{\text{stv}} h_z - |q_{\text{odv}}|}{\sum n_i [C_{\text{mp},i}]_0^{1300}} = 1300 \text{ }^\circ\text{C},$$

iz koje bi slijedilo:

$$|q_{\text{odv}}| = \Delta h_d + Z_{\text{stv}} [C_{\text{mp},z}]_0^{250} \cdot 250 - 1300 \cdot \sum n_i [C_{\text{mp},i}]_0^{1300},$$

$$|q_{\text{odv}}| = 958\,200 + 13,006 \cdot 29,410 \cdot 250 - 1300 \cdot 496,612 = 408\,300 \text{ kJ/kmol}_G.$$

Velika prednost ove potonje formule je ta, da se u njoj ne pojavljuje temperatura adijabatskog izgaranja. U ovom zadatku ta prednost nije izražena, jer je ta temperatura već poznata, ali bi je inače trebalo računati iteracijom!

- c) "Gubici osjetne topline" je naziv za onu toplinu koja bi se još dobila, kad bi se dimni plinovi hladili od zadanih 200 °C sve do okolišne temperature

$$|q_{\text{osj}}| = \sum n_i [C_{\text{mp},i}]_{g_{\text{ok}}}^{g_{\text{izl}}} \cdot (g_{\text{izl}} - g_{\text{ok}}) = \sum n_i [C_{\text{mp},i}]_0^{200} \cdot (200 - 0) = \\ = 437,813 \cdot 200 = 87\,560 \text{ kJ/kmol}_G;$$

$$|\Phi_{\text{osj}}| = q_{\text{n,G}} \cdot |q_{\text{osj}}| = 10 \cdot 87\,560 = 875\,600 \text{ kJ/h} = 243,2 \text{ kW}.$$

Protočna količina (pravih, tj. vlažnih) dimnih plinova je

$$q_{\text{n,vdp}} = q_{\text{n,G}} \cdot n_{\text{vdp}} = 10 \cdot 14,131 = 141,31 \text{ kmol}_{\text{vdp}} / \text{h},$$

a njihov je protočni volumen (u dimnjaku) određen tlakom (u dimnjaku - približno jednak okolišnom tlaku), izlaznom temperaturom i jednadžbom stanja idealnih plinova:

$$q_{V,\text{vdp}} = \frac{q_{\text{n,vdp}} R_m T_{\text{izl}}}{p} = \frac{141,31 \cdot 8314 \cdot 473,15}{1,013 \cdot 10^5} = 5486 \text{ m}^3 / \text{h} \cdot \odot$$

202. Ložište kotla za centralno grijanje predviđeno je za (potpuno) izgaranje 50 kg/h ugljena masenog sastava: $c = 0,56$; $h = 0,07$; $w = 0,20$ i $a = 0,17$ s pretičkom zraka $\lambda = 1,4$ i to tako, da zrak i ugljen ulaze u ložište s $0\text{ }^\circ\text{C}$, a dimni plinovi izlaze iz ložišta u dimnjak s $300\text{ }^\circ\text{C}$.

a) Koliki je toplinski tok odveden iz ložišta (učin kotla) i koliko m^3/h zraka ($0\text{ }^\circ\text{C}$, 1 bar) treba dovoditi u ložište?

b) Ako bi se u ložište, umjesto rešetke za ugljen, ugradio plamenik za ulje za loženje ($0\text{ }^\circ\text{C}$, $c = 0,85$; $h = 0,15$; $\lambda = 1,1$), koliko bi goriva (kg/h) i zraka (m^3/h) trebalo dovoditi u ložište, pa da učin kotla ostane isti, a da i izlazna temperatura tih dimnih plinova bude također $300\text{ }^\circ\text{C}$?

Računati sa srednjim specifičnim (molarnim) toplinskim kapacitetima!

*** Rješenje:

(Svrha zadatka: Pokazati kako se računaju potrebne veličine za gorivo zadano masenim sastavom.)

Za goriva zadana masenim sastavom kao jedinica goriva odabire se 1 kg goriva, pa se i svi rezultati iskazuju po toj jedinici. Za sve stehiometrijske račune treba zadane masene podatke preračunati u količinske (molne) podatke.

Primjerice, maseni udio ugljika u gorivu, c (kg_C/kg_G), iskazuje masu ugljika u jedinici goriva. Njegovim dijeljenjem s molnom masom ugljika ($M_C = 12\text{ kg}_C/\text{kmol}_C$) dobije se količina ugljika u jedinici (kilogramu) goriva: $c/12\text{ kmol}_C/\text{kg}_G$. S tom količinom ugljika onda je određena i potrebna količina kisika za izgaranje, i nastala količina ugljikovog dioksida u dimnim plinovima. Slično se postupa i s ostalim sudionicima goriva.

a) Izgaranje ugljena masenog sastava: $c = 0,56$; $h = 0,07$; $w = 0,20$ i $a = 0,17$:

Minimalna količina kisika i stvarno dovedena količina zraka za izgaranje:

$$O_{\min} = 1 \cdot \frac{c}{12} + \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2} + 1 \cdot \underbrace{\frac{s}{32}}_{=0} - \underbrace{\frac{o}{32}}_{=0} = \frac{0,56}{12} + \frac{0,07}{4} = 0,06417\text{ kmol}_{\text{O}_2}/\text{kg}_G$$

Broj "1" uz član $c/12$ potječe iz stehiometrijske jednadžbe



i govori koliko treba kisika za izgaranje jednoga kilomola ugljika, dakle, ima mjernu jedinicu "kilomola kisika po kilomolu ugljika", $\text{kmol}_{\text{O}_2}/\text{kmol}_C$. Dakle, $1\text{ kmol}_{\text{O}_2}/\text{kmol}_C$, pomnožen sa: $c/12\text{ kmol}_C/\text{kg}_G$ daje količinu kisika potrebnog za izgaranje ugljika sadržanog u jedinici goriva.

Slično i "1/2" uz član $h/2$ slijedi iz stehiometrijske jednadžbe za izgaranje vodika:



pa je i drugi član ($h/4$) $\text{kmol}_{\text{O}_2}/\text{kg}_G$ ona količina kisika koja je potrebna za izgaranje vodika sadržanog u jednom kilogramu goriva.

Ima li u gorivu sumpora, i za njegovo izgaranje treba dovesti kisik: $s/32\text{ kmol}_{\text{O}_2}/\text{kg}_G$.

Minimalna se količina kisika kojeg treba izvana dovesti u manjuje za onoliko, koliko ga već ima u samome gorivu: $o/32\text{ kmol}_{\text{O}_2}/\text{kg}_G$.

Stvarna se potrebna količina zraka opet računa po istoj formuli:

$$Z_{\text{stv}} = \lambda \frac{O_{\text{min}}}{0,21} = 1,4 \cdot \frac{0,06417}{0,21} = 0,42778 \text{ kmol}_z / \text{kg}_G.$$

Izgaranjem nastaju:

$$n_{\text{CO}_2} = 1 \cdot \frac{c}{12} = \frac{0,56}{12} = 0,04667 \text{ kmol}_{\text{CO}_2} / \text{kg}_G,$$

Broj "1" u ovoj jednadžbi također potječe iz stehiometrijske jednadžbe i on kaže da iz jednoga kilomola ugljika potpunim izgaranjem nastaje jedan kilomol ugljikovog dioksida.

Kao slobodan kisik ostaje ono što je u suvišku i dovedeno i što se uopće nema s čime spojiti:

$$n_{\text{O}_2} = (\lambda - 1) O_{\text{min}} = (1,4 - 1) \cdot 0,06417 = 0,02567 \text{ kmol}_{\text{O}_2} / \text{kg}_G,$$

Dušika ima molnih 79 % u dovedenom zraku (u gorivu ga ovdje nema) i on bez promjena izlazi kao dušik (u stvarnosti pri visokim temperaturama došlo bi do djelomične disocijacije i spajanja s kisikom u dušične okside, ali to mi uvijek zanemarujemo):

$$n_{\text{N}_2} = 0,79 Z_{\text{stv}} = 0,79 \cdot 0,42778 = 0,33794 \text{ kmol}_{\text{N}_2} / \text{kg}_G,$$

Vodena para nastaje izgaranjem vodika, ali se u dimu nađe i sva ona vlaga koja je kao vlaga u gorivu i ušla u ložište:

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{h}{2} + \frac{w}{18} = \frac{0,07}{2} + \frac{0,20}{18} = 0,04611 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_G.$$

Ogrjevna vrijednost se za goriva zadana masenim sastavom (dakle, nepoznate kemijske strukture) pouzdano može odrediti samo mjerenjem. U nedostatku mjerenih vrijednosti, ili za ovakve školske primjere, možemo se poslužiti približnom formulom:

$$\Delta h_d = 33900 c + 117000 \cdot \left(h - \frac{o}{8} \right) + 10500 s - 2500 w$$

$$\Delta h_d = 33900 \cdot 0,56 + 117000 \cdot 0,07 - 2500 \cdot 0,20 = 26674 \text{ kJ/kg}_G$$

Toplinski tok odveden iz ložišta može se izračunati na više načina (svi se zasnivaju na prvom glavnom stavku). Primjerice, mogli bismo izračunati teorijsku temperaturu izgaranja (kao da je ložište izolirano) i onda toplinski tok predan pri hlađenju od te temperature do izlazne temperature 300 °C. Ovaj način ima manu da se teorijska temperatura izgaranja mora tražiti iteracijom.

Drugi bi (i bolji) način bio da se poslužimo jednadžbom:

$$g_{\text{stv}} = \frac{\Delta h_d - |q_{\text{odv}}|}{\sum n_i [C_{\text{mp},i}]_0^{300}} = 300 \text{ } ^\circ\text{C},$$

koja je pojednostavljena s $g_G = g_z = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$, a da za temperaturu izgaranja u neizoliranom ložištu uvrstimo zadanih 300 °C. Iz nje onda slijedi toplina odvedena iz ložišta:

$$|q_{\text{odv}}| = \Delta h_d - 300 \cdot \sum n_i [C_{\text{mp},i}]_0^{300}.$$

PLIN	n_i	$[C_{mp,i}]_0^{300}$	$n_i [C_{mp,i}]_0^{300}$
CO ₂	0,04667	41,755	1,949
O ₂	0,02567	30,400	0,7803
N ₂	0,33794	29,383	9,930
H ₂ O	0,04611	34,575	1,594
Σ=			14,253

Drugi član na desnoj strani je entalpija izlaznih dimnih plinova, ali se, ako je temperatura okoliša u koji se oni izbacuju 0°C, može protumačiti i kao "gubitak osjetne topline"

$$|q_{osj}| = \sum n_i [C_{mp,i}]_{g_{ok}}^{g_{izl}} \cdot (g_{izl} - g_{ok}) = \sum n_i [C_{mp,i}]_0^{300} \cdot (300 - 0) = 14,253 \cdot 300 = 4276 \text{ kJ/kg}_G,$$

pa se tražena toplina odvedena iz ložišta može pisati i ovako:

$$|q_{odv}| = \Delta h_d - |q_{osj}|$$

i protumačiti na sljedeći način: u ložište kao energija ulazi samo ogrjevna vrijednost goriva (kemijska energija sadržana u gorivu), dok su (osjetne) entalpije i goriva i zraka jednake nuli (zbog $g_G = g_z = 0^\circ\text{C}$). Iz ložišta kao energija izlazi samo odvedena toplina q_{odv} i entalpija dimnih plinova (gubitak osjetne topline). Da je izgaranje bilo nepotpuno, iz ložišta bi izlazio još i dio kemijske energije u iznosu $|q_{neizg}|$, ali toga ovdje nema.

Uvrštavanjem brojeva dobije se odvedena toplina po kilogramu goriva:

$$|q_{odv}| = \Delta h_d - |q_{osj}| = 26\,674 - 4276 = 22\,398 \text{ kJ/kg}_G,$$

a onda i odvedeni toplinski tok (to je ustvari korisni učinak kotla):

$$|\Phi_{odv}| = q_{m,G} \cdot |q_{odv}| = 50 \cdot 22\,398 = 1,120 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} = 311 \text{ kW}.$$

Za izgaranje treba u ložište dovesti zrak u količini:

$$q_{n,z} = q_{m,G} \cdot Z_{stv} = 50 \cdot 0,42778 = 21,39 \text{ kmol}_z / \text{h} = 0,00594 \text{ kmol}_z / \text{s},$$

a ta protočna količina ima pri stanju 0°C i 1 bar protočni volumen:

$$q_{V,z} = \frac{q_{n,z} R_m T_z}{p_z} = \frac{21,39 \cdot 8314 \cdot 273,15}{1 \cdot 10^5} = 485,7 \text{ m}^3 / \text{h} = 0,1349 \text{ m}^3 / \text{s}.$$

b) Izgaranje ulja za loženje masenog sastava $c = 0,85$; $h = 0,15$:

Proračun je u osnovi isti kao i pod "a":

$$O_{\min} = \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{\underset{=0}{32}} - \frac{o}{\underset{=0}{32}} = \frac{0,85}{12} + \frac{0,15}{4} = 0,10833 \text{ kmol}_{\text{O}_2} / \text{kg}_G$$

$$Z_{stv} = \lambda \frac{O_{\min}}{0,21} = 1,1 \cdot \frac{0,10833}{0,21} = 0,56746 \text{ kmol}_z / \text{kg}_G.$$

Količina nastalih dimnih plinova:

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{c}{12} = \frac{0,85}{12} = 0,070833 \text{ kmol}_{\text{CO}_2} / \text{kg}_G,$$

$$n_{\text{O}_2} = (\lambda - 1) O_{\text{min}} = (1,1 - 1) \cdot 0,10833 = 0,010833 \text{ kmol}_{\text{O}_2} / \text{kg}_G,$$

$$n_{\text{N}_2} = 0,79 Z_{\text{stv}} = 0,79 \cdot 0,56746 = 0,44829 \text{ kmol}_{\text{N}_2} / \text{kg}_G,$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{h}{2} + \underbrace{\frac{w}{18}}_{=0!} = \frac{0,15}{2} = 0,075 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_G,$$

Donja ogrjevna vrijednost goriva

$$\Delta h_d = 33\,900 c + 117\,000 h = 33\,900 \cdot 0,85 + 117\,000 \cdot 0,15 = 46\,365 \text{ kJ/kg}_G.$$

Gubitak osjetne topline je

$$|q_{\text{osj}}| = \sum n_i [C_{\text{mp},i}]_0^{300} \cdot (300 - 0) = 19,052 \cdot 300 = 5716 \text{ kJ/kg}_G,$$

PLIN	n_i	$[C_{\text{mp},i}]_0^{300}$	$n_i [C_{\text{mp},i}]_0^{300}$
CO ₂	0,07083	41,755	2,9576
O ₂	0,01083	30,400	0,3293
N ₂	0,44829	29,383	13,1722
H ₂ O	0,075	34,575	2,5931
Σ=	0,60496		19,052

a i odvedena se toplina (po kilogramu goriva) opet računa kao i prije:

$$|q_{\text{odv}}| = \Delta h_d - |q_{\text{osj}}| = 46\,365 - 5716 = 40\,649 \text{ kJ/kg}_G.$$

Kako je odvedeni toplinski tok zadan, potrebna se protočna masa goriva dobije iz izraza:

$$q_{m,G} = \frac{|\Phi_{\text{odv}}|}{|q_{\text{odv}}|} = \frac{1,120 \cdot 10^6}{40\,649} = 27,55 \text{ kg/h} = 0,007654 \text{ kg/s}.$$

a s njom je onda određena i protočna količina zraka za izgaranje:

$$q_{n,z} = q_{m,G} \cdot Z_{\text{stv}} = 27,55 \cdot 0,56746 = 15,635 \text{ kmol}_z / \text{h} = 0,004343 \text{ kmol}_z / \text{s},$$

a ta protočna količina ima pri stanju 0 °C i 1 bar protočni volumen:

$$q_{V,z} = \frac{q_{n,z} R_m T_z}{p_z} = \frac{15,635 \cdot 8314 \cdot 273,15}{1 \cdot 10^5} = 355,1 \text{ m}^3 / \text{h} = 0,09863 \text{ m}^3 / \text{s}.$$

Iz rezultata se vidi da za isti učinak kotla treba manje ulja za loženje nego ugljena. To je i logično, jer ono ima veću ogrjevnu vrijednost od ugljena (zbog manje balasta - vlage i pepela). Treba uočiti da se ne iskoristi cijela ogrjevna vrijednost goriva, nego svakako manje. U ovom slučaju to je smanjenje samo zbog izlazne entalpije dimnih plinova, a kod nepotpunog izgaranja dodatno bi smanjenje bilo zbog gubitaka nepotpunog izgaranja. ☺

203. U plinsko-turbinsko postrojenje ulazi 200 000 kg/h zraka koji se u kompresoru tlači na viši tlak i na temperaturu 150 °C. Taj zrak ulazi u komoru za izgaranje, gdje se miješa s gorivom koje potom potpuno izgara. Maseni je sastav goriva: $c = 0,87$ i $h = 0,13$, a njegova je donja ogrjevna vrijednost $\Delta h_d = 41\ 850$ kJ/kg.

Koliko se (kg/h) goriva temperature 0 °C smije dovesti u komore za izgaranje, ako dimni plinovi na izlazu iz komora (ulaz u turbinu) ne smiju imati temperaturu višu od 1200 °C? (Pretpostaviti da su komore za izgaranje toplinski izolirane!).

Računati sa srednjim specifičnim (molarnim) toplinskim kapacitetima!

*** Rješenje:

(Svrha zadatka: Pokazati da je temperatura u ložištu ovisna o faktoru pretička zraka λ - što je on viši, to je temperatura u ložištu niža, jer se ista količina topline raspoređuje na veću količinu dimnih plinova. Temperatura u ložištu može se regulirati promjenom veličine λ)

U ovom slučaju je količina zraka zadana, a onda će se, s porastom količine goriva, λ smanjivati i temperatura izgaranja rasti. To, naravno, vrijedi samo tako dugo, dok je izgaranje potpuno. Traži se kod koje će vrijednosti λ ta temperatura biti baš 1200 °C. Visina temperature na izlazu iz komore za izgaranje važna je, jer s tom temperaturom dimni plinovi ulaze u turbinu i zbog izdržljivosti materijala lopatica turbine ona ne smije biti previsoka.

Minimalna količina kisika i zraka je:

$$O_{\min} = \frac{c}{12} + \frac{h}{4} = \frac{0,87}{12} + \frac{0,13}{4} = 0,105 \text{ kmol}_{\text{O}_2} / \text{kg}_G.$$

$$Z_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,21} = \frac{0,105}{0,21} = 0,5 \text{ kmol}_z / \text{kg}_G,$$

Količina ugljikovog dioksida i vodene pare određena je samo sadržajem ugljika i vodika u gorivu:

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{c}{12} = \frac{0,87}{12} = 0,0725 \text{ kmol}_{\text{CO}_2} / \text{kg}_G,$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{h}{2} = \frac{0,13}{2} = 0,065 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_G,$$

dok su količine dušika i slobodnog kisika ovisne o veličini λ :

$$n_{\text{O}_2} = (\lambda - 1)O_{\min} = (0,105 \cdot \lambda - 0,105) \text{ kmol}_{\text{O}_2} / \text{kg}_G,$$

$$n_{\text{N}_2} = 0,79 \lambda Z_{\min} = 0,79 \cdot 0,5 \cdot \lambda = 0,395 \cdot \lambda \text{ kmol}_{\text{N}_2} / \text{kg}_G,$$

Temperatura izgaranja u izoliranom ložištu određena je jednadžbom:

$$g_{\text{teor}} = \frac{\Delta h_d + [c_{p,G}]_0^{g_G} \cdot g_G + Z_{\text{stv}} [C_{mp,z}]_0^{g_z} \cdot g_z}{\sum n_i [C_{mp,i}]_0^{g_{\text{izg}}}} = \frac{\Delta h_d + 0 + \lambda Z_{\min} [C_{p,z}]_0^{150} \cdot 150}{\sum n_i [C_{mp,i}]_0^{g_{\text{izg}}}} = 1200 \text{ °C},$$

u kojoj se zbroj u nazivniku može riješiti tablično, iako neke stavke nisu obični brojevi, nego funkcije od λ :

PLIN	n_i	$[C_{mp,i}]_0^{1200}$	$n_i [C_{mp,i}]_0^{1200}$
CO ₂	0,0725	50,740	3,6787
O ₂	$0,105 \cdot \lambda - 0,105$	33,633	$3,5315 \cdot \lambda - 3,5315$
N ₂	$0,395 \cdot \lambda$	31,828	$12,5721 \cdot \lambda$
H ₂ O	0,065	39,825	2,5886
$\Sigma=$	0,72335		$16,1035 \cdot \lambda + 2,7358$

tako da se dobije izraz:

$$g_{\text{teor}} = \frac{\Delta h_d + \lambda Z_{\min} [C_{mp,z}]_0^{150} \cdot 150}{\sum n_i [C_{mp,i}]_0^{g_{\text{izg}}}} = \frac{41\,850 + \lambda \cdot 0,5 \cdot 29,226 \cdot 150}{16,1035 \cdot \lambda + 2,7358} = 1200 \text{ } ^\circ\text{C},$$

iz kojega se potreban (granični) faktor pretička zraka dobije eksplicitno:

$$\lambda = \frac{41\,850 - 1200 \cdot 2,7358}{1200 \cdot 16,1035 - 2191,95} = 2,2511 \cong 2,25.$$

S tim se podatkom lako izračuna tražena (maksimalna) protočna masa goriva. Iz jednadžbe

$$q_{m,z} = \underbrace{\lambda \cdot Z_{\min}}_{Z_{\text{stv}}} \cdot q_{m,G} \cdot 28,95 \text{ kg}_z / \text{h}$$

dobije se:

$$q_{m,G} = \frac{q_{m,z}}{\lambda \cdot Z_{\min} \cdot 28,95} = \frac{200\,000}{2,25 \cdot 0,5 \cdot 28,95} = 6138 \text{ kg}_G / \text{h} = 1,705 \text{ kg}_G / \text{s}.$$

Iz tablice se dobro vidi da su količine CO₂ i H₂O u dimnim plinovima određene samo sastavom goriva, dok su količine kisika i dušika ovisne o veličini λ . Osim banalnog i očiglednog fizikalnog razloga zašto temperatura izgaranja pada s porastom λ (istom toplinom Δh_d treba zagrijati sve veću količinu dimnih plinova), to se vidi i iz gornje jednadžbe

$$g_{\text{teor}} = \frac{\Delta h_d + \lambda Z_{\min} [C_{mp,z}]_0^{150} \cdot 150}{\sum n_i [C_{mp,i}]_0^{g_{\text{izg}}}} = \frac{41\,850 + \lambda \cdot 2191,95}{16,1035 \cdot \lambda + 2,7358}$$

u kojoj je drugi član u brojniku malen u usporedbi s prvim i s porastom λ brojnik malo raste. S druge strane, u nazivniku je član uz λ velik i nazivnik naglo raste s porastom λ , pa vrijednost cijelog razlomka pada! 😊

111. Struja zraka stanja 1 bar, 32 °C i $x = 8$ g/kg, protočne mase 2 kg/s, ulazi u prostoriju u kojoj se hladi na 22 °C i prima 20 kg/h vlage. S tim se postignutim stanjem zrak odsisava iz prostorije. Polovica se protočne mase zraka baca, a druga se polovica miješa sa zrakom (uzetim iz okoliša) stanja 0 °C i $\varphi = 0,8$, koji je prije ulaska u mješalište zagrijan na +8 °C. Nastala se mješavina ovlažuje vodom temperature 15 °C do konačnoga sadržaja vlage (8 g/kg) i zatim zagrijava prije ulaska u prostoriju.

Kakvo je stanje (h , x , φ) zraka u prostoriji? Koliko se zraka baca u okoliš i uzima iz okoliša? Koliko toplinskog toka treba dovoditi za zagrijavanje svježije struje zraka i za zagrijavanje nastale mješavine te koliko se vode troši za ovlaživanje mješavine?

Zadatak treba riješiti računski, bez uporabe h,x -dijagrama!

Skica procesa u h,x -dijagramu!

*** Rješenje:

(Svrha zadatka: Pokazati osnovne postupke računanja kako veličina stanja vlažnoga zraka, tako i procesa s vlažnim zrakom.)

Zadani podaci:

$p = 1$ bar

$\vartheta_1 = 32$ °C

$x_1 = 8$ g_w/kg_{sz}

$q_{m, sz} = 2$ kg/s

$\vartheta_2 = 22$ °C

$\Delta q_{m, w} = 20$ kg/h

$z_2 = z_4 = 0,5$

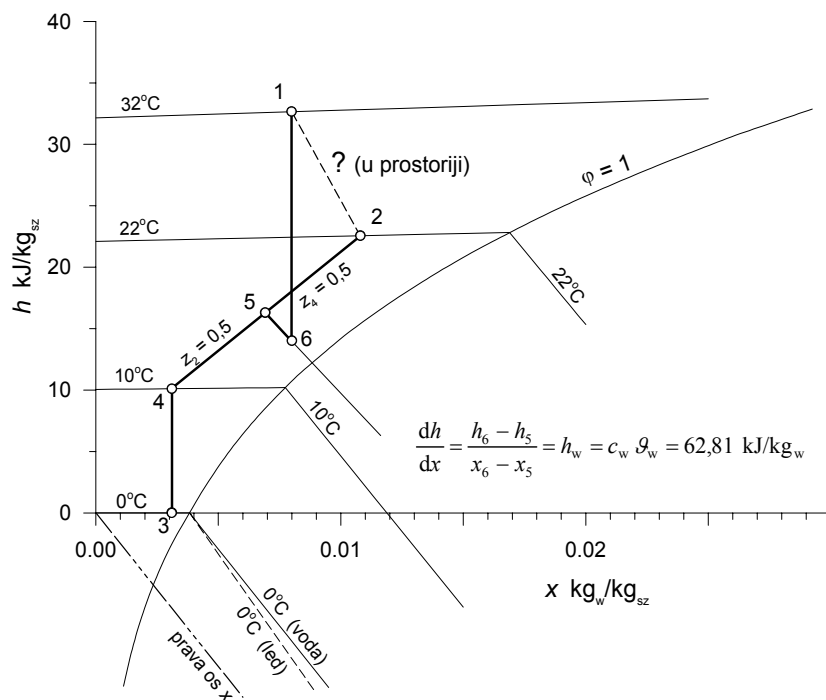
$\vartheta_3 = 0$ °C

$\varphi_3 = 0,8$

$\vartheta_4 = +8$ °C

$\vartheta_w = 15$ °C

$x_6 = x_1 = 8$ g/kg



Ovo je jedan od tipičnih mogućih procesa pripreme zraka za zimsku klimatizaciju neke prostorije. Da bi se održalo stalno stanje zraka u prostoriji (iz koje očigledno toplinski tok izlazi kroz zidove u okoliš niske temperature), zrak koji ulazi u prostoriju mora imati višu temperaturu nego masa zraka koja se nalazi u prostoriji, tako da on, miješajući se s tom masom zraka, njoj predaje toplinski tok, a ona opet, u dodiru s hladnijim zidovima, taj primljeni toplinski tok predaje dalje.

U svim našim zadacima pretpostavlja se da je zadano stanje stacionarno, a inače, za ozbiljne proračune klimatizacije postoje već računalni programi koji uzimaju u obzir realnije (promjenljive) uvjete. Zbog gornjih razloga, zrak koji ulazi u prostoriju mora zimi imati višu temperaturu od one koja se uzima kao stalna u prostoriji. Kako zrak ulazi u prostoriju upuhivanjem kroz nekakve istrujne otvore (rešetke), domet mlaza je razmjerno malen, ulazeći zrak se dosta brzo pomiješa s masom zraka u prostoriji, pa smatramo da najveći dio zraka u prostoriji ima ujednačeno stanje (“stanje u prostoriji”).

Većina klimatiziranih prostorija su one u kojima borave ljudi. Budući da čovjek odaje određenu količinu vlage disanjem i kroz kožu, tamo gdje je prisutan veći broj ljudi zrak će u prostoriji imati primjetno veći sadržaj vlage nego što ga je imao na ulazu u prostoriju. Ako zrak ulazi u prostoriju, po zakonu održanja mase, mora ista količina zraka i izaći (bilo da se odsisava ili sama izlazi kroz otvore – prozore). Mjesta gdje zrak izlazi udaljena su od ulaznih otvora, pa izlazi zrak sa “stanjem u prostoriji”, dakle s povećanim sadržajem vlage. Zato kažemo da “zrak odvodi vlagu iz prostorije”. Jednadžbe koje prikazuju bilanciranje energije i tvari u prostoriji prikazane su u kasnijim zadacima.

Sâm proces pripreme zraka teče na sljedeći način: zbog uštede energije ne koristi se samo (hladan) svježi zrak, nego se dio (toploga) zraka iz prostorije vraća i miješa sa svježim zrakom. Često se taj svježi zrak prije miješanja malo zagrije, prvenstveno da bi se izbjeglo stvaranje zamagljene mješavine pri miješanju toplog i vlažnog zraka s jako hladnim zrakom. Ako je omjer miješanja tako odabran (npr. zbog higijenskih razloga) da sadržaj vlage u nastaloj mješavini nije onakav kakav bi trebao biti za ulaz u prostoriju, može se vlaga dodati u samom procesu tako da se u struju zraka raspršuje ili kapljevita voda ili vodena para. U ovom je primjeru odabrano da to bude kapljevita voda. Tako pripremljen zrak još uvijek ima nižu temperaturu od onog u prostoriji (a treba imati višu), pa ga treba još zagrijati u izmjenjivaču topline. Tek sada je zrak spreman za ubacivanje u prostoriju.

U zadacima se rabi uvijek ista “šablona”:

- za izračunavanje veličina stanja vlažnoga zraka postoji nekoliko razmjerno jednostavnih analitičkih formula, kao npr.:

$$x = \frac{0,622 \cdot p_d}{p - p_d} \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz},$$

$$h = c_{p,sz} \vartheta + x (r_0 + c_{p,d} \vartheta) \text{ kJ/kg}_{sz},$$

a ako se dozvoljava očitavanje podataka iz Mollierovog h,x -dijagrama, te se veličine mogu i očitati. Čak ako se i traži računski postupak, preporuča se izračunate vrijednosti provjeriti s pomoću dijagrama (standardni h,x -dijagram je crtan za ukupni tlak 1 bar!);

- za pripremu zraka koristimo se sa svega nekoliko osnovnih procesa (zagrijavanje ili ohlađivanje zraka, miješanje, dodavanje kapljevite vode ili vodene pare) i za svaki od njih postoje također jednostavne analitičke veze između početnih i konačnih veličina stanja zraka (ili jednostavne konstrukcije u h,x -dijagramu);
- svaki se zadatak sastoji od slaganja “kockica” (procesu) prema opisu u tekstu.

*** TREBA PAZITI! Iako stalno imamo posla s vlažnim zrakom, sve gornje jednadžbe (i za veličine stanja i za procese) izražene su po kilogramu suhoga zraka!

Točka “1” - zadano je: $\vartheta_1 = 32 \text{ }^\circ\text{C}$; $x_1 = 0,008 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz}$, pa se entalpija može izravno računati:

$$h_1 = c_{p,sz} \vartheta_1 + x_1 (r_0 + c_{p,d} \vartheta_1) = 1,005 \cdot 32 + 0,008 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 32) = 52,654 \text{ kJ/kg}_{sz}$$

Točka “2” – stanje u prostoriji - zadano je: $\vartheta_2 = 22 \text{ }^\circ\text{C}$; ($p_{g,2} = 0,02642 \text{ bara}$).

Zadano je i to da se u prostoriji, kroz koju prolazi 2 kg/s zraka, “oslobađa” 20 kg/h vlage, što znači da se sadržaj vlage u zraku poveća na:

$$x_2 = x_1 + \frac{\Delta q_{m,w}}{q_{m,sz}} = 0,008 + \frac{20}{3600 \cdot 2} = 0,01078 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}.$$

Napomena: zadana protočna masa od 2 kg/s je protočna masa “suhoga” zraka i ona je ista na ulazu u prostoriju i na izlazu iz nje! Prava je protočna masa veća za iznos sadržane vlage, dakle, nije ista na ulazu u prostoriju i na izlazu iz nje! Prava je protočna masa (vlažnog zraka) na ulazu u prostoriju

$$2 \cdot (1+x_1) = 2 \cdot (1+0,008) = 2,016 \text{ kg/s} = 7257,6 \text{ kg}_{vz}/h,$$

a na izlazu iz nje

$$2 \cdot (1+x_2) = 2 \cdot (1+0,01078) = 2,0215 \text{ kg/s} = 7277,6 \text{ kg}_{vz}/h$$

i očigledno se razlikuju baš za masu vlage koja se oslobađa u prostoriji (20 kg/h)!

Baš zato što se prava protočna masa zraka mijenja, a protočna masa suhoga zraka ne mijenja, u svim se računima služimo protočnom masom suhoga zraka!

Sadržaju vlage x_2 odgovara parcijalni tlak pare u zraku

$$p_{d,2} = \frac{x_2 p}{0,622 + x_2} = \frac{0,01078 \cdot 1}{0,622 + 0,01078} = 0,01703 \text{ bar},$$

pa je relativna vlažnost zraka stanja “2”:

$$\varphi_2 = \frac{p_{d,2}}{p_{g,2}} = \frac{0,01703}{0,02642} = 0,6446 = 64,46 \%$$

i njegova entalpija:

$$h_2 = c_{p,sz} \mathcal{G}_2 + x_2 (r_0 + c_{p,d} \mathcal{G}_2) = 1,005 \cdot 22 + 0,01078 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 22) = 49,512 \text{ kJ/kg}_{sz};$$

Točka “3” - okolišno stanje – zadano je: $\mathcal{G}_3 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_3 = 0,8$;

$$p_{g,3} = 0,006108 \text{ bar}; \quad p_{d,3} = \varphi_3 p_{g,3} = 0,8 \cdot 0,006108 = 0,004886 \text{ bar};$$

$$x_3 = \frac{0,622 \cdot p_{d,3}}{p - p_{d,3}} = \frac{0,622 \cdot 0,004886}{1 - 0,004886} = 0,003054 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz};$$

$$h_3 = c_{p,sz} \mathcal{G}_3 + x_3 (r_0 + c_{p,d} \mathcal{G}_3) = 1,005 \cdot 0 + 0,003054 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 0) = 7,636 \text{ kJ/kg}_{sz};$$

Točka “4” – zadano je: $\mathcal{G}_4 = +8 \text{ }^\circ\text{C}$; za zagrijavanje vrijedi: $x_4 = x_3 = 0,003054 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}$, pa je:

$$h_4 = c_{p,sz} \mathcal{G}_4 + x_4 (r_0 + c_{p,d} \mathcal{G}_4) = 1,005 \cdot 8 + 0,003054 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 8) = 15,723 \text{ kJ/kg}_{sz};$$

Točka “5” – dobije se miješanjem stanja “2” i “4” u omjeru: $z_2 = z_4 = 0,5$:

$$x_5 = z_2 x_2 + z_4 x_4 = 0,5 \cdot 0,01078 + 0,5 \cdot 0,003054 = 0,006916 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz};$$

$$h_5 = z_2 h_2 + z_4 h_4 = 0,5 \cdot 49,512 + 0,5 \cdot 15,723 = 32,617 \text{ kJ/kg}_{sz};$$

$$\mathcal{G}_5 = \frac{h_5 - x_5 r_0}{c_{p,sz} + x_5 c_{p,d}} = \frac{32,617 - 0,006916 \cdot 2500}{1,005 + 0,006916 \cdot 1,93} = 15,05 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Kako je sadržaj vlage $x_5 = 0,006916 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}$ manji od traženog $x_1 = 0,008 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}$, nastalu mješavinu treba ovlažiti do tog sadržaja vlage.

Točka “6” – zahtjev je: $x_6 = x_1 = 0,008 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}$ i zadano je ovlaživanje vodom.

Entalpija vode za ovlaživanje određena je njenom zadanom temperaturom:

$$h_w = c_w \mathcal{G}_w = 4,187 \cdot 15 = 62,805 \text{ kJ/kg}_w.$$

Za ovlaživanje kapljevatom vodom vrijedi zakon:

$$\frac{h_6 - h_5}{x_6 - x_5} = h_w$$

iz čega se dobije entalpija točke "6":

$$h_6 = h_5 + h_w (x_6 - x_5) = 32,617 + 62,805 \cdot (0,008 - 0,006916) = 32,686 \text{ kJ/kg}_{sz}$$

Temperatura zraka stanja "6":

$$g_6 = \frac{h_6 - x_6 r_0}{c_{p,sz} + x_6 c_{p,d}} = \frac{32,686 - 0,008 \cdot 2500}{1,005 + 0,008 \cdot 1,93} = 12,43^\circ\text{C}$$

niža je od temperature zraka stanja "5", jer toplinu za ishlapljivanje vode daje zrak!

U okoliš se baca (i iz njega uzima): $q_{m,s} = q_{m,svježe} = q_{m,bačeno} = 1 \text{ kg/s}$ (suhoga!) zraka.

Izmijenjeni toplinski tokovi su:

- za zagrijavanje okolišnoga zraka od stanja "3" do "4":

$$\Phi_{3-4} = q_{m,s} (h_4 - h_3) = 1 \cdot (15,723 - 7,636) = 8,09 \text{ kW} = 29100 \text{ kJ/h};$$

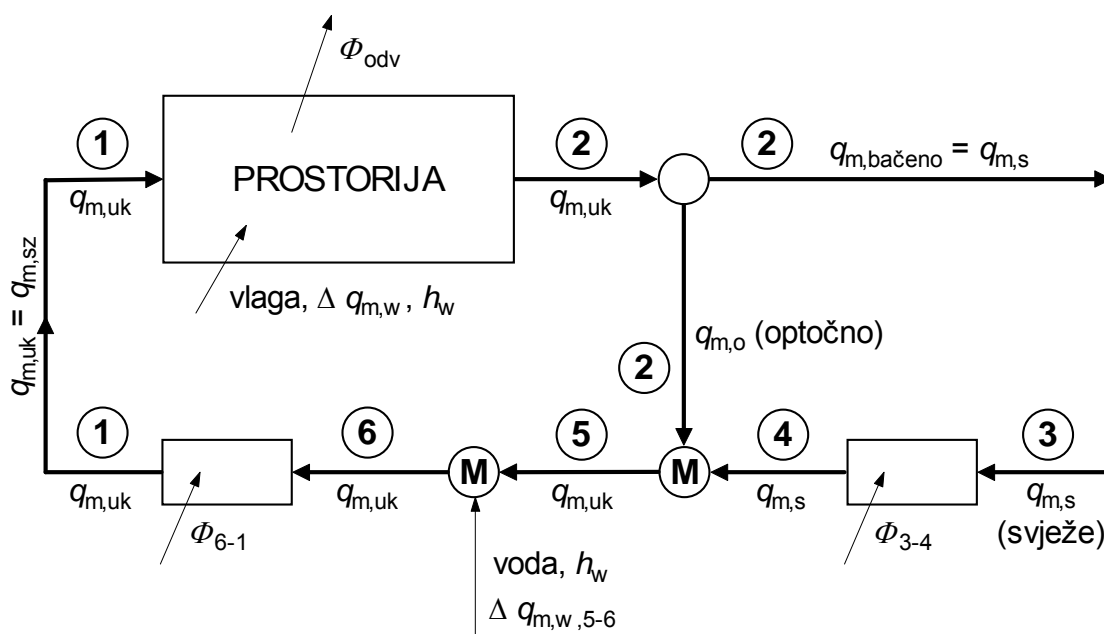
- za zagrijavanje mješavine od stanja "6" do "1":

$$\Phi_{6-1} = q_{m,uk} (h_1 - h_6) = 2 \cdot (52,654 - 32,686) = 39,94 \text{ kW} = 143800 \text{ kJ/h}.$$

Za ovlaživanje zraka od stanja "5" do "6" potrebna je protočna masa vode:

$$\Delta q_{m,w,5-6} = q_{m,uk} (x_6 - x_5) = 2 \cdot (0,008 - 0,006916) = 0,00217 \text{ kg}_w / \text{s} = 7,80 \text{ kg}_w / \text{h}.$$

Schema prostorije i postrojenja za pripremu zraka:



114. Za ljetnu klimatizaciju prostorije koristi se sljedeći postupak: iz prostorije se odsisava zrak stanja 24 °C i $\varphi = 50\%$ i miješa se s jednakom protočnom masom vanjskog zraka stanja 33 °C i $\varphi = 40\%$. Nastala se mješavina hladi da bi se izdvojila suvišna vlaga, tako da nakon hlađenja i odvajanja izlučene vlage preostane potpuno zasićen zrak temperature 10 °C. Nakon toga se zrak zagrijava na 20 °C i s postignutim stanjem ubacuje (upuhuje) u prostoriju.

Treba odrediti entalpiju i sadržaj vlage u istaknutim točkama procesa! Kolika je odvedena i dovedena toplina u procesu pripreme zraka, izražena po m³ zraka konačnoga stanja s kojim on ulazi u prostoriju?

Zadatak riješiti računski, bez uporabe h,x -dijagrama!

Skica procesa pripreme zraka u h,x -dijagramu!

*** Rješenje:

(Svrha zadatka: Pokazati jedan mogući proces pripreme zraka za ljetnu klimatizaciju. Pokazati kako se izmijenjena toplina izražena po kilogramu suhoga zraka može preračunati na m³ volumena vlažnoga zraka odabranog stanja - pogodno, npr. ako se želi daljnji račun provoditi s protočnim volumenima.)

Zadani podaci:

$$g_1 = 24\text{ °C}$$

$$\varphi_1 = 50\% = 0,5$$

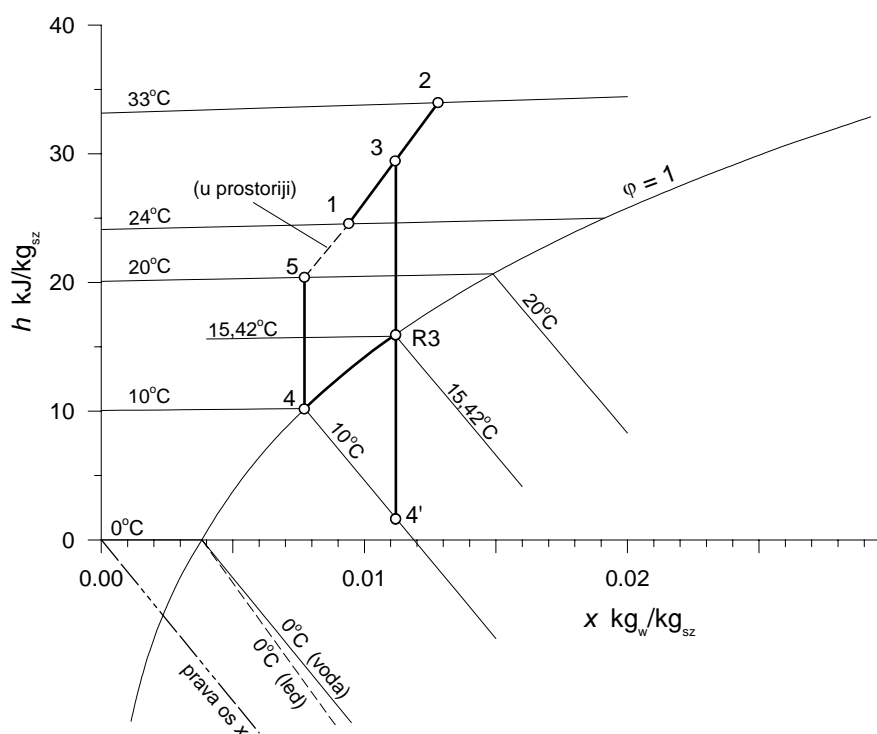
$$z_1 = z_2 = 0,5$$

$$g_2 = 33\text{ °C}$$

$$\varphi_2 = 40\% = 0,4$$

$$g_4 = +10\text{ °C}$$

$$g_5 = 20\text{ °C}$$



Točka "1": $g_1 = 24\text{ °C}$; $\varphi_1 = 50\%$; $p_{g,1} = 0,02982\text{ bar}$; $p_{d,1} = \varphi_1 \cdot p_{g,1} = 0,01491\text{ bar}$.

$$x_1 = \frac{0,622 \cdot p_{d,1}}{p - p_{d,1}} = \frac{0,622 \cdot 0,01491}{1 - 0,01491} = 0,009414\text{ kg}_w / \text{kg}_{sz};$$

$$h_1 = c_{p,sz} g_1 + x_1 (r_0 + c_{p,d} g_1) = 1,005 \cdot 24 + 0,009414 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 24) = 48,092\text{ kJ/kg}_{sz};$$

Točka "2": $g_2 = 33\text{ °C}$; $\varphi_2 = 40\%$; $p_{g,2} = 0,05029\text{ bar}$; $p_{d,2} = \varphi_2 \cdot p_{g,2} = 0,020116\text{ bar}$.

$$x_2 = \frac{0,622 \cdot p_{d,2}}{p - p_{d,2}} = \frac{0,622 \cdot 0,020116}{1 - 0,020116} = 0,01277\text{ kg}_w / \text{kg}_{sz};$$

$$h_2 = c_{p,sz} g_2 + x_2 (r_0 + c_{p,d} g_2) = 1,005 \cdot 33 + 0,01277 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 33) = 65,901\text{ kJ/kg}_{sz};$$

Točka "3": dobije se miješanjem struja "1" i "2" u masenom omjeru: $z_1 : z_2 = 1:1$, dakle je:

$$z_1 = z_2 = 0,5;$$

$$x_3 = z_1 x_1 + z_2 x_2 = 0,5 \cdot 0,009414 + 0,5 \cdot 0,01277 = 0,01109 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz};$$

$$h_3 = z_1 h_1 + z_2 h_2 = 0,5 \cdot 48,092 + 0,5 \cdot 65,901 = 56,996 \text{ kJ/kg}_{sz};$$

$$\vartheta_3 = \frac{h_3 - x_3 r_0}{c_{p,sz} + x_3 c_{p,d}} = \frac{56,996 - 0,01109 \cdot 2500}{1,005 + 0,01109 \cdot 1,93} = 28,51 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (ne traži se!)};$$

Točka "4": zadano $\vartheta_4 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $x_4 = x_{s4} = 0,007727 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}$.

$$h_4 = c_{p,sz} \vartheta_4 + x_4 (r_0 + c_{p,d} \vartheta_4) = 1,005 \cdot 10 + 0,007727 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 10) = 29,516 \text{ kJ/kg}_{sz};$$

Točka "4'": $x_{4'} = x_3 = 0,01109 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}$; $\vartheta_{4'} = \vartheta_4 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$;

Ta je točka u zamagljenu području, a poznate su i temperatura $\vartheta_{4'}$ i sadržaja vlage $x_{4'}$, pa se entalpija zamagljenoga zraka $h_{4'}$ može računati s pomoću formule:

$$h_{4'} = \underbrace{c_{p,sz} \vartheta_{4'} + x_{s,4} (r_0 + c_{p,d} \vartheta_{4'})}_{h_4!} + (x_{4'} - x_{s,4}) c_w \vartheta_{4'} =$$

$$= \underbrace{1,005 \cdot 10 + 0,007727 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 10)}_{29,516} + (0,01109 - 0,007727) \cdot 4,187 \cdot 10 = 29,657 \text{ kJ/kg}_{sz},$$

gdje je $x_{s,4} = 0,007727 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}$ sadržaj vlage zasićenoga zraka temperature $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

No, kako točke "4" i "4'" leže na istoj vlažnoj izotermi $\vartheta_4 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, čiji je nagib:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{\vartheta_4} = \frac{h_{4'} - h_4}{x_{4'} - x_4} = h_w = c_w \vartheta_4 = 4,187 \cdot 10 = 41,87 \text{ kJ/kg}_w,$$

entalpija $h_{4'}$ može se računati i s pomoću formule:

$$h_{4'} = h_4 + h_w (x_{4'} - x_4) = 29,516 + 41,87 \cdot (0,01109 - 0,007727) = 29,657 \text{ kJ/kg}_{sz}.$$

No, ako bolje zagledamo tu jednadžbu i usporedimo je s gornjom formulom za entalpiju zamagljenoga vlažnog zraka, vidjet ćemo da je to zapravo ista formula!

Točka "5": zadano $\vartheta_5 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $x_5 = x_4 = 0,007727 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}$.

$$h_5 = c_{p,sz} \vartheta_5 + x_5 (r_0 + c_{p,d} \vartheta_5) = 1,005 \cdot 20 + 0,007727 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 20) = 39,715 \text{ kJ/kg}_{sz}.$$

$$v_5 = 461,5 \frac{T_5}{p} (0,622 + x_5) = 461,5 \cdot \frac{293,15}{1 \cdot 10^5} \cdot (0,622 + 0,007727) = 0,8520 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Toplina odvedena pri hlađenju od "3" do "4" (svedena na 1 kg (suhoga zraka) mješavine):

$$q_{3-4} = h_4 - h_3 = 29,516 - 56,996 = -27,480 \text{ kJ/kg}_{sz}$$

može se preračunati na m^3 zraka stanja "5", dijeljenjem s v_5 :

$$q_{3-4}^* = \frac{q_{3-4}}{v_5} = \frac{-27,480}{0,8520} = -32,26 \text{ kJ/m}^3$$

Toplina dovedena za zagrijavanje od "4" do "5":

$$q_{4-5} = h_5 - h_4 = 39,715 - 29,516 = 10,199 \text{ kJ/kg}_{sz}$$

preračunato na m^3 stanja "5":

$$q_{4-5}^* = \frac{q_{4-5}}{v_5} = \frac{10,199}{0,8520} = 11,97 \text{ kJ/m}^3.$$

