

0. OSNOVNE DEFINICIJE

Termodinamicki sistem je deo prostora odvojen od okoline granicom sistema. Ako kroz granice sistema ne dolazi do toplotnih interakcija sistema i okoline takav sistem zove se izolovan sistem a ako kroz granice sistema dolazi do toplotnih interakcija sistema i okoline takav sistem zove se neizolovan sistem

Izolovan termodinamicki sistem sacinjavaju:

- radno telo (radna materija)
- toplotni rezervoar (toplotni izvor ili toplotni ponor)

Kod izolovanih termodinamickih sistema do promena velicina stanja radnog tela dolazi usled medjusobnih interakcija :

1. radnog tela i toplotnih rezervoara,
2. radnog tela i spoljnjih mehanickih sila
3. medjusobnih interakcija dva razlicita radna tela (adijabatsko mesanje, razmenjivaci toplote itd.)

Pri tom radno telo menja svoje mehanicke velicine stanja (pritisak, specifcna zapremina, i apsolutna temperatura) i toplotne velicine stanja (entalpija, untrasnja energija, entropija) na racun razmenjene toplote ili rada.

Neizolovan termodinamicki sistem sacinjavaju:

- radno telo (radna materija)
- toplotni rezervoar (toplotni izvor ili toplotni ponor)
- okolina

Kod ne izolovanih termodinamickih sistema do promena velicina stanja radnog tela dolazi usled medjusobnih interakcija :

1. radnog tela i okoline,
2. radnog tela, okoline i toplotnih rezervoara
3. medjusobnih interakcija dva razlicita radna tela (adijabatsko mesanje, razmenjivaci toplote itd.)
i okoline

Toplotni rezervoari su neizolovani termodinamicki sistemi koji sa radnim telom u tokou nekog procesa razmenjuju toplotu. Toplotni izvori radnom telu daju toplotu a toplotni pomori od radnog tela primaju toplotu. Zajednicke osobine toplotnih izvora i ponora su da imaju konstantnu temperaturu ($T=\text{const}$)

Kod neizolovanih termodinamickih sistema ulogu toplotnih rezervoara najcesce preuzima okolina.

Nas zadatak je da odredjujemo velicine stanja radnog tela (mehanicke i toplotne) i spoljne uticaje (toplota i rad). Nacini odredjivanja velicina stanja radnog tela zavise od samog radnog tela (da li je idealno, poluidealno ili realno). Na ovom kursu upoznacemo se sa nekoliko radnih tela:

1. idealan gas

2. vodena para (realan gas)
3. vlazan vazduh (realan gas)

Za svako od ovih radnih tela postoje razliciti matematicki modeli za odredjivanje velicina stanja (jednacine, tablice, dijagrami).

1. IDEALNI GASOVI

Mehanicke velicine stanja: pritisak, p [Pa], specificna zapremina, v [m^3/kg], apsolutna temperatura, T [K]

Mehanicke velicine stanja mogu se odrediti na dva nacina.

I - pomocu jednacine stanja idealnog gasa: $pv = R_g T$

$$\begin{array}{ll} R_g - \text{gasna konstanta, } (R_g=R_u/M) & (\text{J/kgK}) \\ R_u - \text{univerzalna konstanta, } 8.315 & (\text{kJ/kmolK}) \\ M - \text{molska masa gasa} & (\text{kg/kmol}) \end{array}$$

Koristi se onda kada su poznate dve velicine stanja, a potrebno je odrediti trecu.

II - pomocu jednacina koje predstavljaju zakone promena stanja od 1 do 2. Kada je zakon promene jednacina oblika $pv^n=\text{const}$ koriste se jednacine iz tabele 2.1. str.78

Koristi se onda kada je poznata jedna velicina stanja (druge dve nisu) i zakon po kojem se vrši promena stanja.

Toplotne velicine stanja : entalpija, h [J/kg], unutasnja energija, u [J/kg], entropija s [J/kgK]

Nacin odredjivanja toplotnih velicina stanja ne zavisi od tipa promene stanja vec samo od krajnjeg i pocetnog stanja. Koriste se jednacine:

$$\Delta h_{12} = c_p(T_2 - T_1)$$

$$\Delta u_{12} = c_v(T_2 - T_1)$$

$$\Delta s_{12} = f(T,p) = c_p \ln(T_2/T_1) - R_g \ln(p_2/p_1)$$

$$\Delta s_{12} = f(v,p) = c_p \ln(v_2/v_1) + c_v \ln(p_2/p_1)$$

$$\Delta s_{12} = f(T,v) = c_v \ln(T_2/T_1) + R_g \ln(v_2/v_1)$$

Konstante (c_p , c_v i κ) koje se pojavljuju u prethodnim izrazima imaju sledeca znacenja:

c_p - toplotni kapacitet (specificna toplota) pri stalnom pritisku (kJ/kgK)

c_v - toplotni kapacitet (specificna toplota) pri stalnoj zapremini (kJ/kgK)

κ - eksponent izentropske (kvazistaticke adijabatske) promene stanja, $\kappa = c_p/c_v$

Toplotni kapacitet pri stalnom pritisku (c_p) i toplotni kapacitet pri stalnoj zapremini (c_v) su u medjusobnoj vezi sa gasnom konstantom preko Majerove jednacine:

$$R_g = c_p - c_v$$

Vrednost ovih konstanti (c_p , c_v i κ) nalazi se na str 110, kao u sledecoj tabeli:

	c_v	c_p	κ
Jednoatomni gas	$\frac{3}{2} R_g$	$\frac{5}{2} R_g$	$\frac{5}{3}$
Dvoatomni gas	$\frac{5}{2} R_g$	$\frac{7}{2} R_g$	$\frac{7}{5}$
Tr(više) atomni gas	$\frac{7}{2} R_g$	$\frac{9}{2} R_g$	$\frac{9}{7}$

Spoljni uticaji na radno telo u zatvorenom termodinamickom sistemu su:

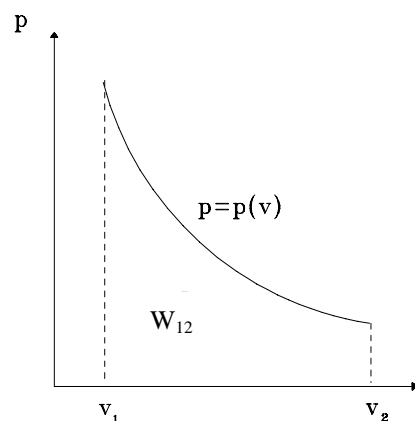
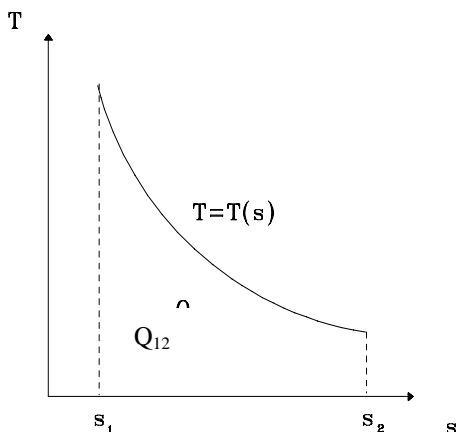
kolicina toplote, q_{12} [J/kg], $q_{12} = \int_{s_1}^{s_2} T(s) ds$, (uticaj toplotnih interakcija)

apsolutni (zapreminski) rad l (J/kg), $W_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p(v) dv$ (uticaj spoljasnjih mehanickih sila)

Ako je podintegralan funkcija linearna resavanje integrala oblika $I = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$ svodi se na

primeu trapezne formule: $I = \frac{x_2 - x_1}{2} [f(x_2) + f(x_1)]$,

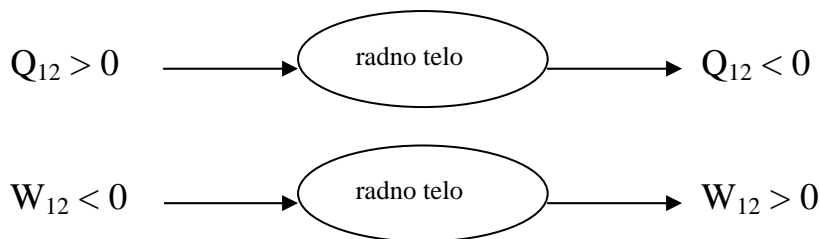
Graficka interpretacija resenje integrala predstavljaja povrsinu ispod odgovarajucih krivih na Ts (toplota) i pv dijagramu (zapreminski ili tehnicki rad)



Tabelarni prikaz određivanja mehanickih velicina stanja (II), toplotnih velicine stanja, kao i spoljnih uticaja (za povratne promene stanja oblika $p v^n = \text{const}$), dat je u tabeli na str.78 udzbenika. Toplotne velicine stanja i spoljni uticaji mogu se dovesti u medjusobnu vezu preko I zakona termodinamike:

$$q_{12} = \Delta u_{12} + W_{12}$$

Termodinamicki dogovor o znacima za spoljne uticaje (kolicinu toplote i rad)



$Q_{12} > 0$ u termodinamickom sistemu pored radnog tela postoji toplotni izvor

$Q_{12} < 0$ u termodinamickom sistemu pored radnog tela postoji toplotni ponor

$W_{12} < 0$ kompresija radnog tela

$W_{12} > 0$ ekspanzija radnog tela

Kvazistaticke politropske promene stanja idealnih gasova

Sve promene stanja ovog tipa pokoravaju se jednom od zakona (u zavisnosti od odabranog koordinatnog sistema) :

$p v^n = \text{const}$ (u $p v$ koordinatama)

$T v^{n-1} = \text{const}$ (u $T v$ koordinatama)

$T^n p^{1-n} = \text{const}$ (u $T p$ koordinatama)

Sve ove promene stanja predstavljamo graficki pomocu jednačina $p=f(v)$ u $p v$ dijagramu (dijagram rada) i $T=f(s)$ u $T s$ dijagramu (dijagram toplote). Ove jednačine se zovu zakoni promena. Sve te jednačine razlikuju se samo po eksponentu politropske promene u opstim politropskim jednačina za kvazistaticke promene stanja:

$p=\text{const}$ ($n=0$) izobara

$T=\text{const}$ ($n=1$) izoterma

$v=\text{const}$ ($n=\infty$) izohora

$s=\text{const}$ ($n=\kappa$) povratna izentropa (povratna adijabata)

Neke od navedeni kvazistatickih promene stanja generisu prirastaj promene entropije sistema a neke ne. One promene kod kojih nema promene entropije sistema ($\Delta S_{si}=0$) nazivaju se povratne promene. Takve promene su:

- povratna izentropa (povratna adijabata)
- izoterma (kada se razmena toplote vrsi na temperaturi okoline)

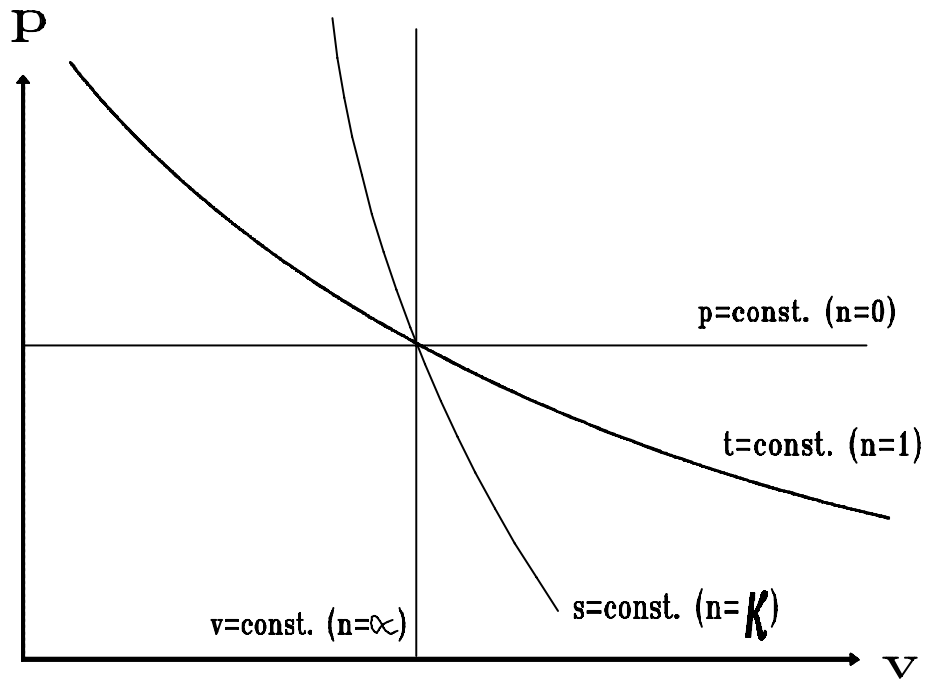
One promene koje generisu promenu entropije sistema ($\Delta S_{si}>0$) nazivaju se nepovratne promene.

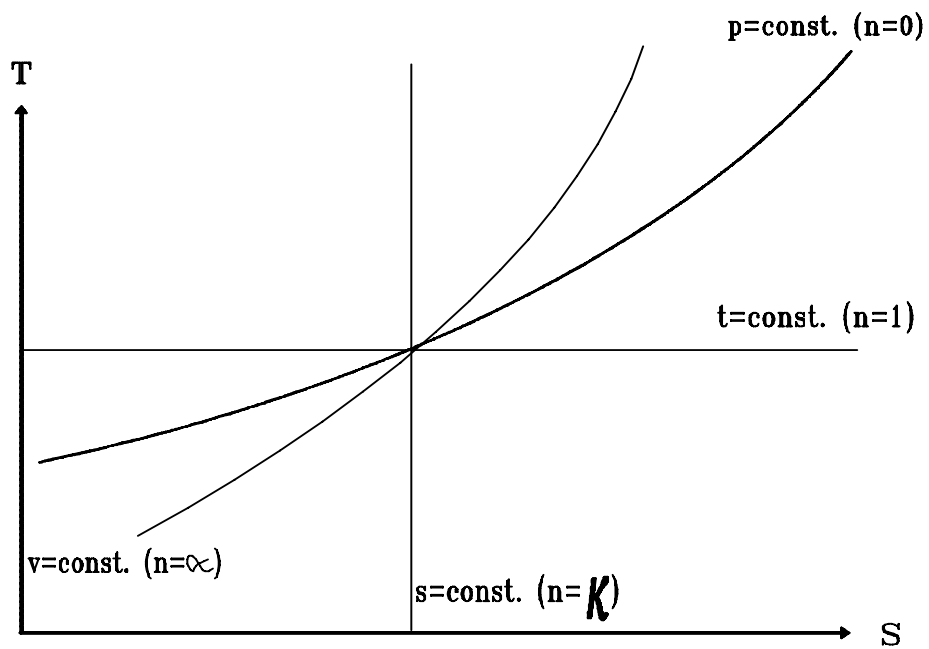
Takve promene su:

- izohora

- izobara
- politropa
- izoterma (kada se razmena toplote ne vrsi na temperaturi okoline)

Graficki prikaz promena stanja idealnih gasova na pv i Ts dijagramu:





napomena: Politropske promene stanja sa $n=?$ nalaze se izmedju odgovarajucih promena stanja sa poznatim eksponentom n (izobara, izohora, izoterma izentropa)

2. VODENA PARA

Vodena para je realan fluid. Za vodenu paru ne vazi jednacina stanja idealnog gasa niti jednacine za kvazistaticke promene stanja (str.118) idealnih gasova. Termodinamicke velicine stanja vodene pare nalaze se u termodinamickim tabelama (prirucnik za termodinamiku).

def.1. **Voda (pothladjena tecnost)** je tecnost cija je temperatura niza od temperature kljucanja za dati pritisak. Potpuno je odredjena sa dve velicine stanja

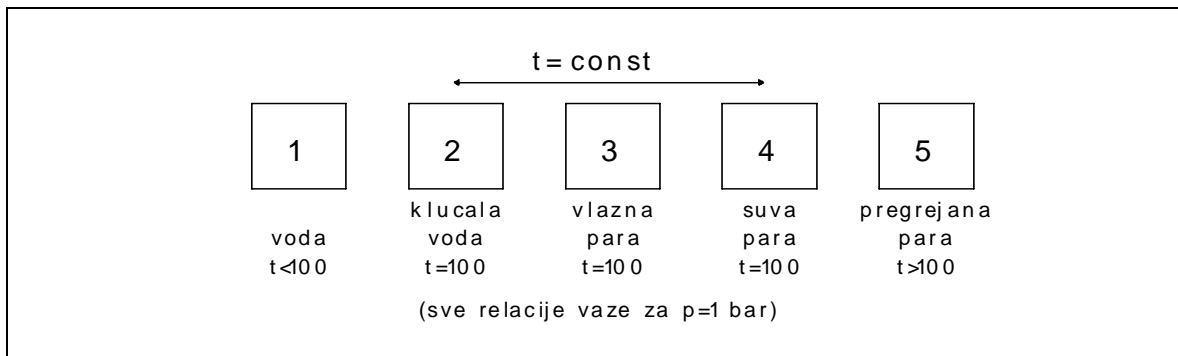
def.2. **Kljucala voda** je tecnost cija je temperatura jednaka temperaturi kljucanja za dati pritisak. Potpuno je odredjena sa jednom velicinom stanja.

def.3. **Vlazna para** je mesavina kljucale vode i suvozasicene vodene pare u stanju termodinamicke ravnoteze. Temperatura vlazne vodene pare jednaka je temperaturi kljucale vode (ili suve pare) za dati pritisak. Potpuno je odredjena jednom velicinom stanja i stepenom suvoce (x). Stepem suvoce (x) predstavlja maseni udeo suve pare u vlaznoj pari, tj.

$$x = \frac{m''}{m''+m'} = \frac{\text{suva para}}{\text{suva para} + \text{kljucala voda}}$$

def.4. **Suvozasicena (suva) vodena para** je para cija je temperatura jednaka temperaturi kljucanja vode za dati pritisak. Potpuno je odredjena sa jednom velicinom stanja.

def.5. **Pregrejana vodena para** je para cija je temperatura visa od temperature kljucanja vode za dati pritisak. Potpuno je odredjena sa dve velicine stanja.



	potreban broj velicina	velicine koje se zadaju	obelezavanje velicina	nacin odredjivanja
1	2	p $t/s/v/h$	$h_T, s_T,$ u_T, v_T	Tabela P.5. str.549-556
2	1	p ili t	h_L, s_L, u_L, v_L	Tabela P.3. i P.4. Str.545-548
3	2	p ili t x	h_x, s_x, u_x, v_x	$A = A_L + x(A_G - A_L)$

4	1	p ili t	h_G, s_G, u_G, v_G	Tabela P.3. i P.4. Str.545-548
5	2	p t/s/v/h	$h_{pp}, s_{pp},$ u_{pp}, v_{pp}	Tabela P.5. str.549-556

SPOLJNI UTICAJI (TOPLOTA I RAD)

Za izracunavanje spoljnih uticaja (q_{12} , W_{12} , W_{tCV12}) za razlicite promene stanja vodene pare ne moze se koristiti tabela sa strane 118 jer ona vazi samo za idealne gasove. Do izraza za izracunavanje spoljnih uticaja za pojedine promene stanja dolazise analizom I principa termodinamike. U tabeli koja sledi dat je prikaz tako dobijenih izraza¹

	$q_{12} =$	$W_{12} =$	$W_{tCV12} =$
$p = \text{const}$	$h_2 - h_1$	$p(v_2 - v_1)$	0
$v = \text{const}$	$u_2 - u_1$	0	$v(p_1 - p_2)$
$T = \text{const}$	$T(s_2 - s_1)$	$T(s_2 - s_1) - u_2 + u_1$	$T(s_2 - s_1) - h_2 + h_1$
$q_{12} = 0$	0	$u_1 - u_2$	$h_1 - h_2$

TOPLOTNE VELICINE STANJA (UNUTRASNJA ENERGIJA, ENTALPIJA, ENTROPIJA)

Izracunavanje promena toplotnih velicina stanja [h (entalpije), u (unutrasnje energije), s (entropije)] vrši se prostim oduzimanjem završne i početne vrednosti. tj:

$$\Delta h_{12} = h_2 - h_1$$

$$\Delta u_{12} = u_2 - u_1$$

$$\Delta s_{12} =$$

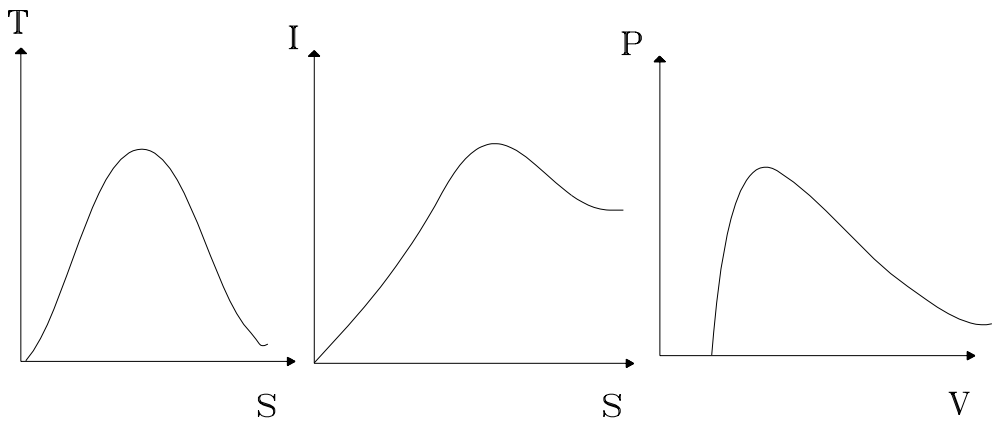
$$s_2 - s_1$$

jer promena toplotnih velicina stanja zavise samo od pocetnog i krajnjeg stanja tj. ne zavise od nacina izvodjenja promene stanja.

DIJAGRAMI VODENE PARE

Promene stanja vodene pare predstavljaju se na toplotnim dijagramima i to Ts, hs i pv dijagramu:

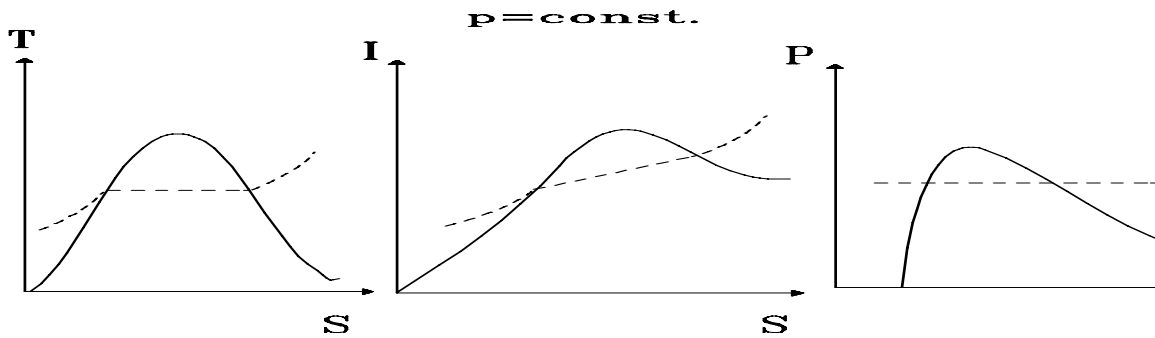
¹ Pri stavljanju u jednacine pritisak treba izrazavati u kPa, da bi rezultati za odgovarajuce spoljne uticaje bili u kJ



GRAFICKI PRIKAZA PROMENA STANJA VODENE PARE

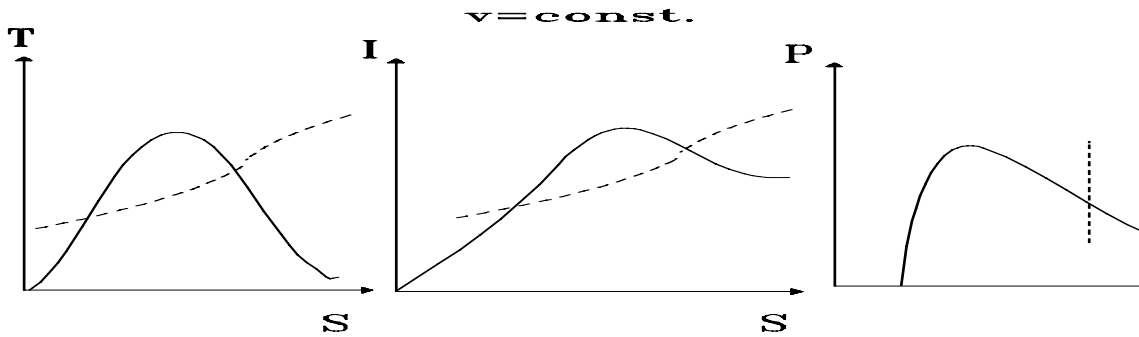
1. IZOBARSKA PROMENA STANJA ($P=CONST$)

Izobarska promena stanja vodene pare desava se u svim izmenjivcima toplote (kondenzatori,



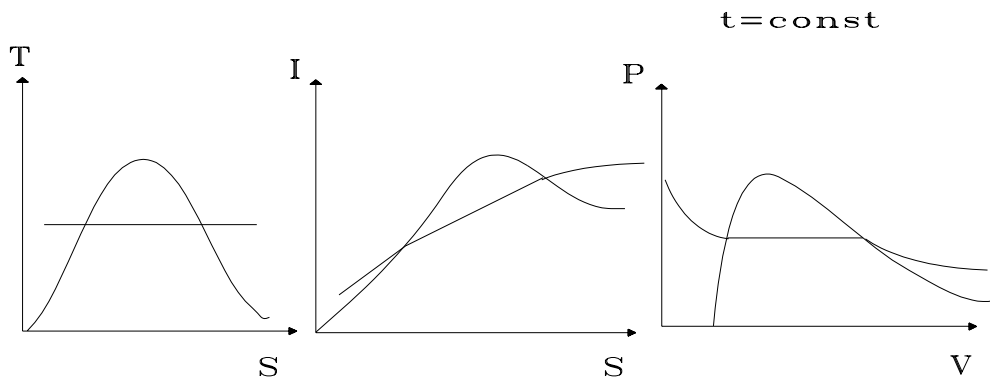
isparivaci ...)

2. IZOHORSKA PROMENA STANJA ($v=CONST$):

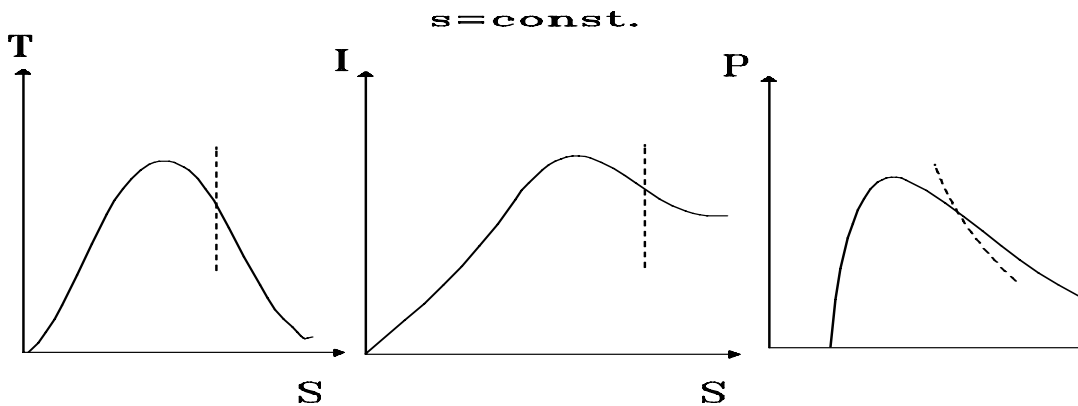


Izohorska promena stanja vodene pare desava se uvek u zatvorenim sudovima.

3. IZOTERMSKA PROMENA STANJA ($t=CONST$):

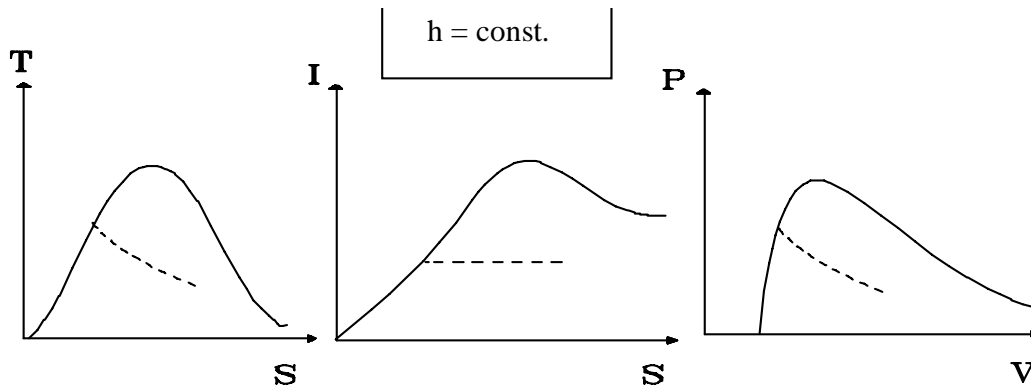


4. POVRATNA IZENTROPSKA (ADIJABATSKA) PROMENA STANJA ($s=CONST$)



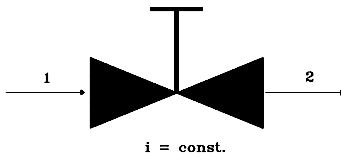
Povratna izentropska (povratna adijabatska) promena stanja vodene pare desava se uvek u turbinama (ekspanzija $p_1 > p_2$) i kompresorima (kompresija $p_1 < p_2$). U turbinama i kompresorima se takodje desavaju i nepovratne adijabatske promene koje se izvode iz povratne adijabatske promene i s njom su u vezi preko stepena izentropskog iskoriscenja dobrote η_{IZ} .

5. ADIJABATSKO PRIGUSIVANJE ($h=const$)



Adijabatsko prigusivanje je ne povratna promena stanja pri kojoj je $h_1=h_2$. Ova promena generise prirastaj entropije usled mehanicke neravnoteze (ΔS_{MEH}). Za vreme ove promene stanja vodenoj pari se obara pritisak ($p_1>p_2$), a pri tom se sa okolinom ne razmenjuje ni toplota ni rad ($q_{12}=0$, $W_{CV12}=0$). Adijabatsko prigusivanje se desava u tzv. **Prigusnm (ekspanzionim) ventilima.**

prigusni (ekspanzioni) ventil



RECNIK POJMOVA:

Promene stanja sa vodenom parom u tecnom stanju zovu se:

- Zagrevanje** dovodjenje toplote vodi u tecnom stanju pri $p=\text{const}$ ili $v=\text{const}$
Prehladjivanje odvodjenje toplote od kljucale vode pri $p=\text{const}$ ili $v=\text{const}$. Dobijena tecnost se obicno zove prehladjena tecnost ili prehladjen kondenzat

Promene stanja sa vodenom parom u parnom stanju zovu se:

- Pregrevanje** dovodjenje toplote suvozasicenoj vodenoj pari pri $p=\text{const}$ ili $v=\text{const}$. Ovako nastala para ima temperaturu visu od temperature kljucanja i zove se pregrejana para.
Hladjenje odvodjenje toplote od pregrejane pare pri $p=\text{const}$ ili $v=\text{const}$ Hladjenjem se para moze ohladiti najvisje do temperature kljucanja. Nakon toga pocinje kondenzacija pare.

Fazne promene stanja vodene pare zovu se:

- Isparavanje** dovodjenje toplote kljucaloj vodi kakao bi ona iz tecnog presla u gasovito agregatno stanje. Delimicnim isparavanjem kljucale vode nastaje vlazna vodena para, a potpunim isparavanjem kljucale vode nastaje suvozasicena vodena para. Isparavanje je izobarsko-izoterski proces. ($p=\text{const}$, $t=\text{const}$). Kolicina toplote koju je potrebno dovesti kljucaloj vodi da je prevedemo ustanje suvozasicene vodene pare naziva se *toplota isparavanja*.
Kondenzacija odvodjenje toplote od suvozasicene vodene pare. kakao bi ona iz tecnog presla u gasovito agregatno stanje. Delimicnom kondenzacijom suvozasicene vodene pare nastaje vlazna vodena para, a potpunom kondenzacijom suvozasicene vodene pare nastaje kljucala tecnost. Ovako nastala tecnost ponekad se naziva i neprehladjen kondenzat. Kondenzacija je eizobarsko-izoterski proces. ($p=\text{const}$, $t=\text{const}$). Kolicina toplote koju je potrebno odvesti od suvozasicene pare da bi se potpuno kondenzovala (presla u stanje kljucale vode) naziva se *toplota kondedzacije*.
Topljenje dovodjenje toplote ledu koji se nalazi na $t=0^{\circ}\text{C}$ da bi se preveo u tecno agregatno stanje. Delimicnim topljenjem leda na 0°C nastaje mesavina vode i leda na $t=0^{\circ}\text{C}$, a potpunim topljenjem leda nastaje voda na $t=0^{\circ}\text{C}$. Topljenje je izobarsko-izoterski proces. ($p=\text{const}$, $t=\text{const}$). Kolicina toplote koju je potrebno dovesti ledu na 0°C da ga potpuno prevedemo u vodu na 0°C naziva se *toplota topljenja*.
Smrzavanje odvodjenje toplote od vode na $t=0^{\circ}\text{C}$ da bi se prevela u cvrsto agregatno stanje. Delimicnim smrzavanjem vode na 0°C nastaje mesavina vode i leda na $t=0^{\circ}\text{C}$, a potpunim smrzavanjem vode nastaje led na $t=0^{\circ}\text{C}$. Smrzavanje je je izobarsko-izoterski proces. ($p=\text{const}$, $t=\text{const}$). Kolicina toplote koju je potrebno odvesti od vode na $t=0^{\circ}\text{C}$ da je potpuno prevedemo u led na 0°C naziva se *toplota smrzavanja*.

PRIMENE PRVOG PRINCIPA TERMODINAMIKE:

zatvoren termodinamicki sistem:

Zatvoren termodinamicki sistem je deo opsteg prostora od njega odvojen stvarnom granicom, kroz koju masa niti ulazi u sistem niti iz njega izlazi. Osnovna karakteristika ovakvog sistema je $m = \text{const}$. Karakteristicni primeri koji se javljaju u zadacima su:

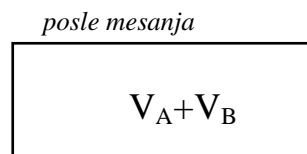
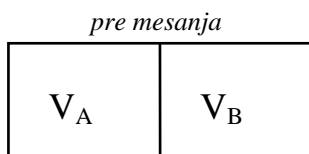
- zatvoreni sudovi (sa ili bez pregrada)
- cilindri (horizontalni ili vertikalni) sa klipovima ili mesalicama

Prvi zakon termodinamike za zatvoren termodinamicki sistem ima sledecu formulaciju:

$$Q_{12} = \Delta U_{12} + W'_{12}$$

primeri:

1. mesanje u zajednickom sudu



$$Q_{12} = U_{12} + W'_{12}$$

Q_{12} - toplota koju radno telo razmenjuje sa okolinom., U slucaju adijabatskog mesanja $Q_{12} = 0$

U_1 - untrasnja energija komponenata pre mesanja.

U_2 - untrasnja energija komponenata posle mesanja.

$$U_1 = m_A u_{A1} + m_B u_{B1}$$

$$U_2 = m_A u_{A2} + m_B u_{B2}$$

Mesanje u zajednickom sudu (kao i svako drugo mesanje) uvek dovodi do uspostavljanja toplotne ravnoteze tj. $T_{A2} = T_{B2} = T^*$ Ova temperatura predstavlja temperaturu dobijene mesavine.

2. kretanje klipa u cilindru



1

2 ← 1

$$Q_{12} = U_{12} + W_{12}$$

Q_{12} - toplota koju radno telo razmenjuje sa okolinom. U slucaju da je cilindar adijabatski izolovan od okoline $Q_{12}=0$

U_1 - unutrašnja energija radnog tela u cilindru pre kretanja klipa

U_2 - unutrašnja energija radnog tela u cilindru nakon kretanja klipa.

W'_{12} - zapreminski rad koji izvrši klip nad radnim telom (ili radno telo nad klipom)

napomena:

Ako se kretanje klipa kroz cilindra vrši bez trenja onda je promena stanja radnog tela u cilindru (ispred klipa u smeru kretanja) povratna, a ako se kretanje klipa vrši uz trenje smatra se da je promena stanja radnog dela (ispred klipa u smeru kretanja) nepovratna.

Ako je cilindar sa klipom postavljen vertikalno i ako se klip slobodno kreće onda je promena stanja radnog tela ispod cilindra izobarska.

RADNA SPOSOBNOST

Od neke određene količine materije, koja se nalazi u zatvorenom termodinamickom sistemu, može se nekim promenama stanja dobiti rad ako se ta materija u odnosu na okolinu nalazi u termodinamickoj neravnoteži tj. mora postojati bar jedna od tri neravnoteže : termicka, mehanicka ili koncentraciona. Pod RADNOM SPOSOBNOSCU podrazumeva se onaj rad koji se može dobiti vrsenjem procesa sa radnom materijom u cilju postizanja termodinamicke ravnoteže sa okolinom.

Ako se radna materija dovede u ravnotežu sa okolinom na povratan način (izentropa i/ili izoterma) zapreminski rad koji tom prilikom izvrši termodinamicki sistem (radna materija + okolina) naziva se Maksimalan koristan rad.

Algebarski zbir svih zapreminskih radova u zatvorenom termodinamickom sistemu (radna materija+okolina) naziva se maksimalan koristan rad. Izračunava se iz lednacije:

$$W'_{\max} = m \cdot (-\Delta u_{10} + T_o \Delta s_{10} - p_o \Delta v_{10})$$

Maksimalan koristan rad se može predstaviti graficki na pv i Ts dijagramu ucrtavanjem sledećih linija:

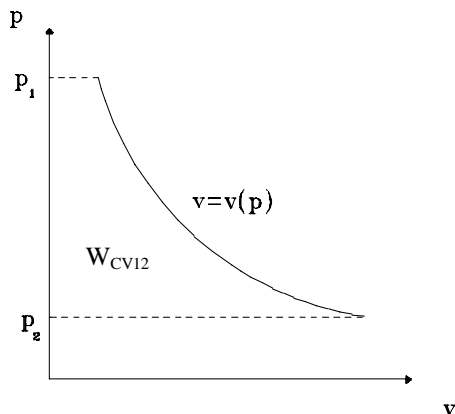
$W_{\max} = (W_{1A})_{s=\text{const}} + (W_{AO})_{T_o=\text{const}} + (W_{1B})_{V_1=\text{const}} + (W_{BO})_{P_o=\text{const}}$
i predstavlja zatvorenu površinu ograničenu navedenim linijama.

otvoren termodinamicki sistem:

Otvoren termodinamicki sistem_ je deo opsteg prostora odvojen od okoline granicom sistema (stvarnom ili fiktivnom). Kroz otvorene sisteme radno telo "protice" pa se ovi sistemi cesto zovu i protocni sistemi. Maseni protog radnog tela kroz otvoreni (protocni) termodinamicki sistem je konstantan. Mehancicke interakcije spoljnih sila i radnog tela generisu rad koji se zove tehnicki rad (osovinski rad)

Tehnicki rad W_{tCV12} za povratne promene stanja odredjuju se iz definicione jednacine:

$$W_{tCV12} = - \int_{p_1}^{p_2} v(p) dp$$



Graficka interpretacija resenje integrala predstavlja površinu levo od linije v(p) na pv dijagramu (slika)

Prvi zakon termodinamike za otvoren termodinamicki sistem ima sledecu formulaciju:

$$Q_{12} = \Delta H_{12} + W_{CV12} + \Delta E_{K12} + \Delta E_{P12}$$

ΔE_{K12} – promena kineticke energije radnog tela $\Delta E_{K12} = m \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$

w_1 - brzina radnog tela na ulazu u termodinamicki sistem
 w_2 - brzina radnog tela na izlazu iz termodinamicki sistema

ΔE_{P12} – promena potencijalne energije radnog tela $\Delta E_{P12} = mg(z_2 - z_1)$

$z_2 - z_1$ - visinska razlika mesta gde radno telo izlazi odnosno ulazi u otvoren termodinamicki sistem

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$, gravitaciono ubrzanje

Svi procesi koji se desavaju u otvorenim termodinamickim sistemima dele se na:

1. strujne procese
2. radne procese

Pod strujnim procesima podrazumevamo promene stanja radnog tela u otvorenim (protocnim) termodinamickim sistemima do kojih dolazi bez mehanickih interakcija radnog tela i okoline tj. $W_{CV12}=0$.

Strujni procesi se desavaju u nekom od sledecih termodinamickih aparta:

- 1.1. protocni grjaci (hladnjaci)
- 1.2. mesne komore (mesanje fluidnih struja)
- 1.3. razmenjivaci toplote

Radni procesi se desavaju u nekom od sledecih termodinamickih aparta:

- 2.1. turbina
- 2.2. kompresor (pumpa, ventilator)

Zajednicko za sve ove aprate je da pri promeni stanja radnog tela u njima ne dolazi do razmene toplote sa okolinom (adijabatski su izolovani od okoline) sve dok se u zadatku drugacije ne kaze.

RADNA SPOSOBNOST

Od neke odredjene kolicine materije, koja protice kroz otvorenom termodinamicki sistem, moze se nekim promenama stanja dobiti rad ako se ta materija u odnosu na okolinu nalazi u termodinamickoj neravnotezi tj. mora postojati bar jedna od tri neravnoteze : termicka, mehanicka ili koncentraciona. Pod RADNOM SPOSOBNOSCU podrazumeva se onaj tehnicki rad koji se moze dobiti vršenjem procesa sa radnom materijom u cilju postizanja termodinamicke ravnoteze sa okolinom.

Ako se radna materija dovede u ravnotezu sa okolinom na povratan nacin (izentropa i/ili izoterma) rad koji tom prilikom izvrši radna materija naziva se Eksergija.

Algebarski zbir svih tehnickih radova koje vrši radno telo u u otvorenom termodinamickom sistemu naziva se Eksergija. Izracunava se iz jednacine:

$$Ex_1 = m \cdot (-\Delta h_{10} + T_o \Delta s_{10})$$

Eksergija radnog tela se moze predstaviti graficki na pv dijagramu ucrtavanjem sledecih linija:

$$Ex_1 = (W_{CV1A})_{s=const} + (W_{CVA0})_{T_o=const}$$

Za vreme vršenja nepovratnih procesa u otvorenim (protocnim) termodinamickim sistemima dolazi do gubitka eksergije, koja se izracunava na nacin:

$$E_{xg} = T_o \cdot \Delta S_{sistema}$$

E_{xg} - gubitak eksergije, drugacije se naziva i termodinamicki gubitak rada. U uzbeniku se obelezava W_{RT}

$\Delta S_{\text{sistema}}$ promena entropije sistema
 T_0 temperatura okoline
napomena:

Razlika eksergija radnog tela na ulazu i izlazu iz termodinamickog sistema naziva se reverzibilni rad

$$W_{\text{REV}} = Ex_1 - Ex_2$$

DISKUSIJA I ZAKONA TERMODINAMIKE ZA NAVEDENE PRIMERE:

1.1. protocni zagrejaci (hladnjaci)

zagrejaci fluida: $Q_{12} > 0$

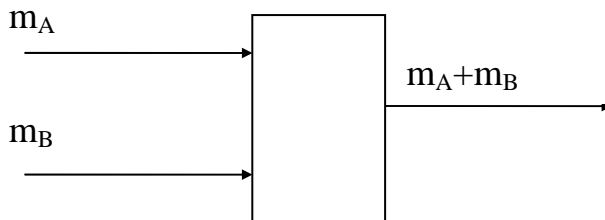
hladnjaci fluida: $Q_{12} < 0$

$p = \text{const}$, ako se drugacije u zadatku ne kaze

1.2. mesanje fluidnih struja

$Q_{12} = 0$ (za slucaj adijabatskog mesanja)

slucaj mesanja 2 fluidne struje (A i B)

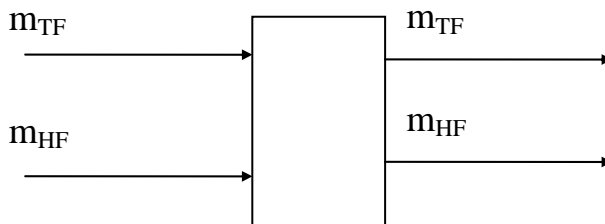


Mesanje gasnih struja uvek dovodi do uspostavljanja toplotne ravnoteze tj. $T_{Aizlaz} = T_{Bizlaz} = T^*$. Ova temperatura predstavlja temperaturu dobijene mesavine.

1.3. razmenjivaci toplote

$Q_{12} = 0$ (ako pri razmeni toplote izmedju dva fluida nema toplotnih gubitaka u okolinu sto je uglavnom i slucaj)

U razmeni toplote ucestvuju topliji (TF) i hladniji fluid (HF)

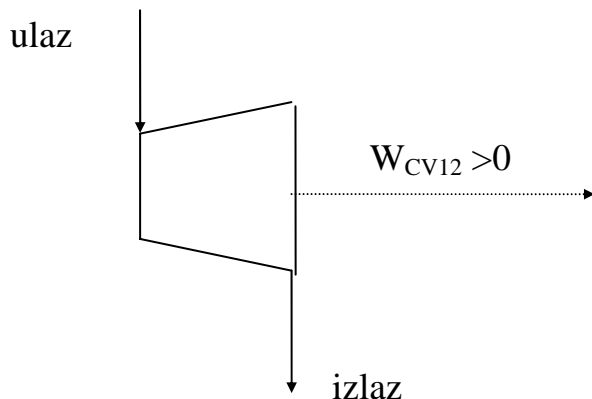


Za razliku od mesanja gasnih struja kod razmenjivaca toplote temperature fluida na kraju proces razmene toplote po pravilu nisu iste tj. $T_{TFizlaz} \neq T_{HFizlaz}$.

Razmenjena toplota izmedju toplijeg i hladnije fluida izracunava se iz jednacine:

$$Q_{RAZ} = -\Delta H_{TF} = \Delta H_{HF} - Q_{12}$$

2.1. turbina



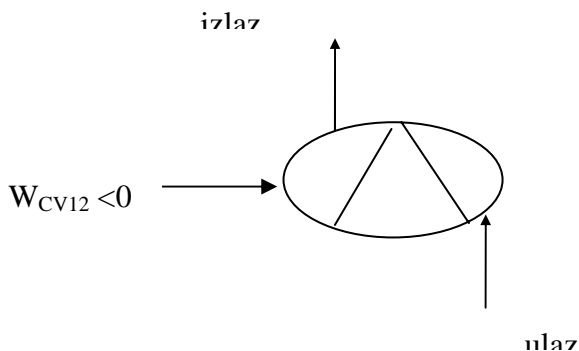
Za adijabatske ekspanzije u turbini (sto je i podrazumevani i slucaj) $Q_{12} = 0$, a ako je ekspanzija u turbini pri tom i povratna odna je i $s = \text{const}$.

Veza izmedju neizentropske (nepovratna adijabata) i izentropske (povratna adijabata) ekspanzije u turbini je stepen izentropskog iskoriscenja turbine koji se definise na nacin:

$$\eta_{IZ}^{EX} = \frac{W_{CV12}}{W_{XV12I}}$$

W_{CV12} se ponekad zove i snaga turbine

2.2. kompresor (pumpa, ventilator)



Za adijabatske kompresije u kompresoru (sto je i podrazumevani i slucaj) $Q_{12} = 0$, a ako je kompresija u kompresoru pri tom i povratna odna je i $s = \text{const}$.

Veza izmedju neizentropske (nepovratna adijabata) i izentropske (povratna adijabata) kompresije u kompresoru je stepen izentropskog iskoriscenja kompresora koji se definise na nacin:

$$\eta_{IZ}^{EX} = \frac{W_{CV12I}}{W_{XV12}}$$

5. NESTACIONARNI PROCESI (PUNJENJE I PRAZNJENJE REZERVOARA)

Opsti oblik prvog principa termodinamike za navedene slucajeve glasi:

$$Q_{12} - W_{12} = \Sigma m_{izlaz} h_{izlaz} - \Sigma m_{ulaz} h_{ulaz} + \Sigma m_{kraj} u_{kraj} - \Sigma m_{pocetak} u_{pocetak}$$

Q_{12} - kolicina toplote koju razmenjuje termodinamicki sistem sa okolinom,

W_{12} - rad koji razmenjuje termodinamicki sistem sa okolinom

$m_{pocetak}$ - masa radnog tela u kontrolisanoj zapremi na pocetku procesa

m_{kraj} - masa radnog tela u kontrolisanoj zapremi na kraju procesa

$u_{pocetak}$ - unutrašnja energija radnog tela u kontrolisanoj zapremi na pocetku procesa

u_{kraj} - unutrašnja energija radnog tela u kontrolisanoj zapremi na kraju procesa

m_{ulaz} - masa radnog tela koje ulazi u kontrolisanu zapreminu

m_{izlaz} - masa radnog tela koje izlazi iz kontrolisane zapremine

h_{ulaz} - entalpija radnog tela koje ulazi u kontrolisanu zapreminu

h_{izlaz} - entalpija radnog tela koje izlazi iz kontrolisane zapremine

kontrolna zapremina na pocetku procesa kontrolna zapremina na pocetku procesa;



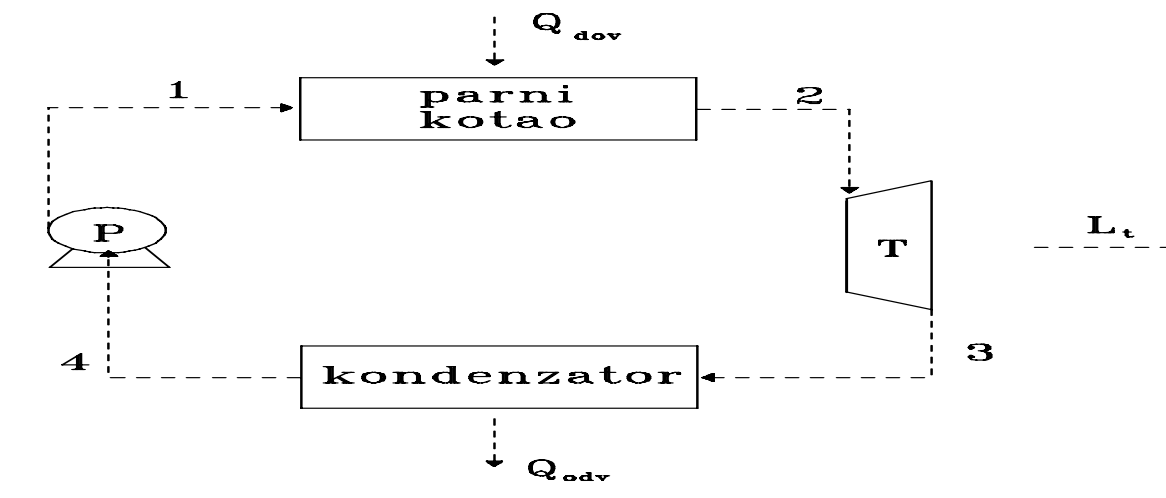
Opsti oblik zakona odrzanja mase za navedene slucajeve glasi:

$$m_{POCETAK} + m_{ULAZ} = m_{KRAJ} + m_{IZLAZ}$$

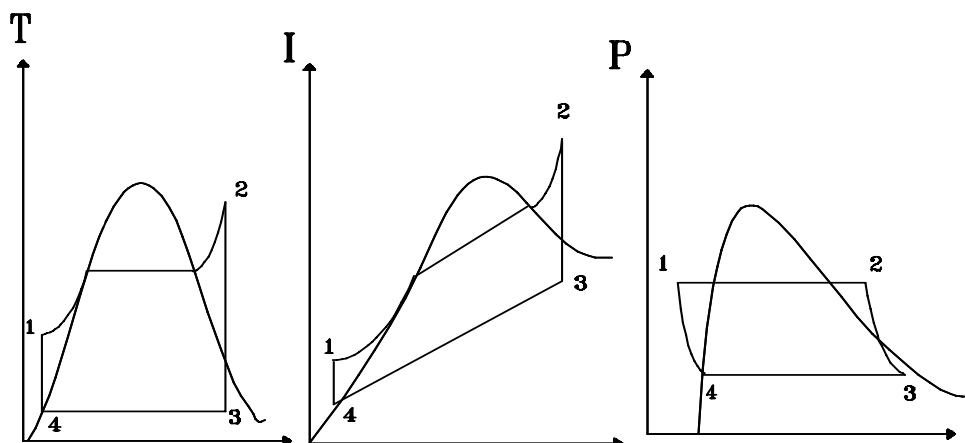
6. DESNOKRETNI KRUGNI PROCESI

6.1. RANKIN-KLAUZIJUSOV KRUGNI CIKLUS SA JEDNOSTEPENOM EKSPANZIJOM

Rankin-Klauzijusov krugni ciklus, sa jednostepenom ekspanzijom, sastoji se od naizmenicno dve izobare i dve izentrope (u idealnom slucaju). Procesi razmene toplote u Rankino-Klauzijusovom ciklusu su izobarski, a razmene rada izentropski. Sematski prikaz Rankin-Klauzijusovog ciklusa dat je na sledecoj slici:



Moguci izgled Rankin-Klauzijusovog krugnog ciklusa na Ts , is i pv dijagramu dat je na sledecoj slici:



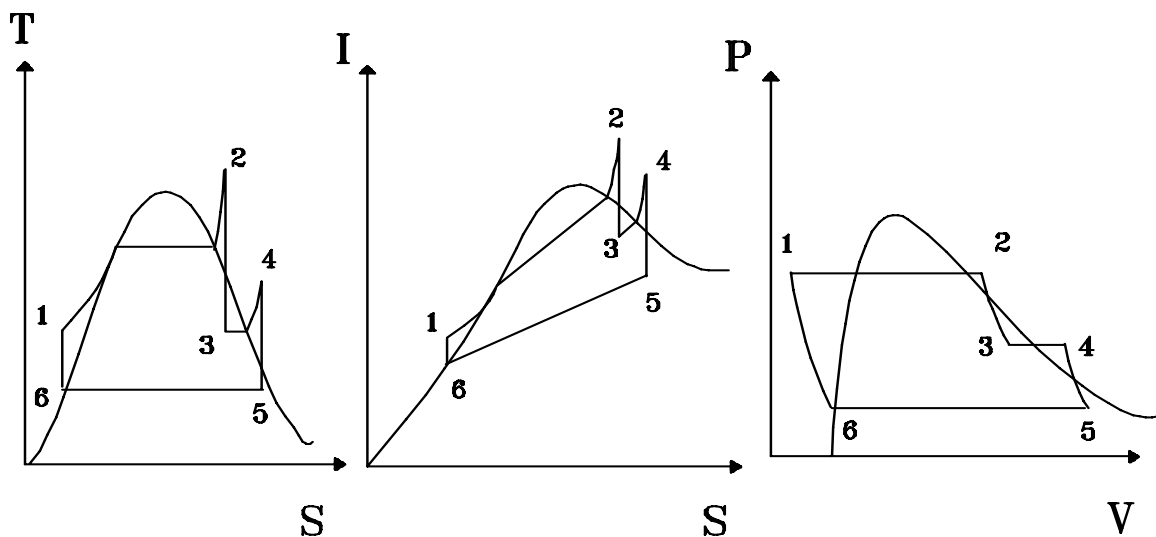
6.2. RANKIN-KLAUZIJUSOV KRIZNI CIKLUS SA DVOSTEPENOM EKSPANZIJOM

Rankin-Klauzijusov kružni ciklus, sa dvostepenom ekspanzijom, sastoji se od naizmenicno tri izobare i tri izentropne (u idealnom slučaju). Procesi razmene toplote u Rankin-Klauzijusovom ciklusu su **izobarski**, a razmene rada izentropski. Sematski prikaz Rankin-Klauzijusovog ciklusa sa dvostepenom ekspanzijom dat je na sledecoj slici:

promena stanja 3-4

- aparat se obicno zove dogrejac
- $p = \text{const}$

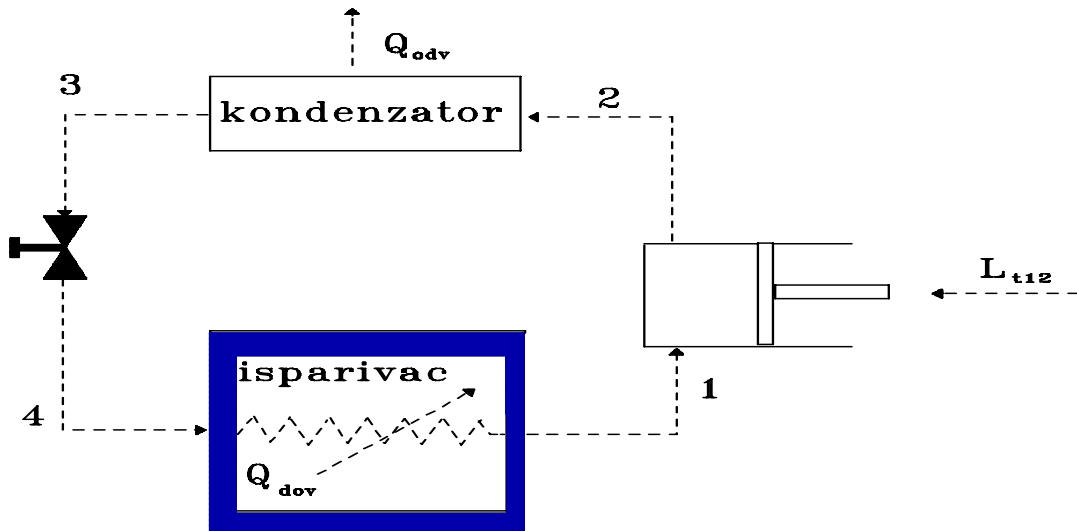
Moguci prikaz Rankin-Klauzijusovog kruznog ciklusa sa dvostepenom ekspanzijom na T_s , i_s i p_v dijagramu dat je na sledecoj slici:



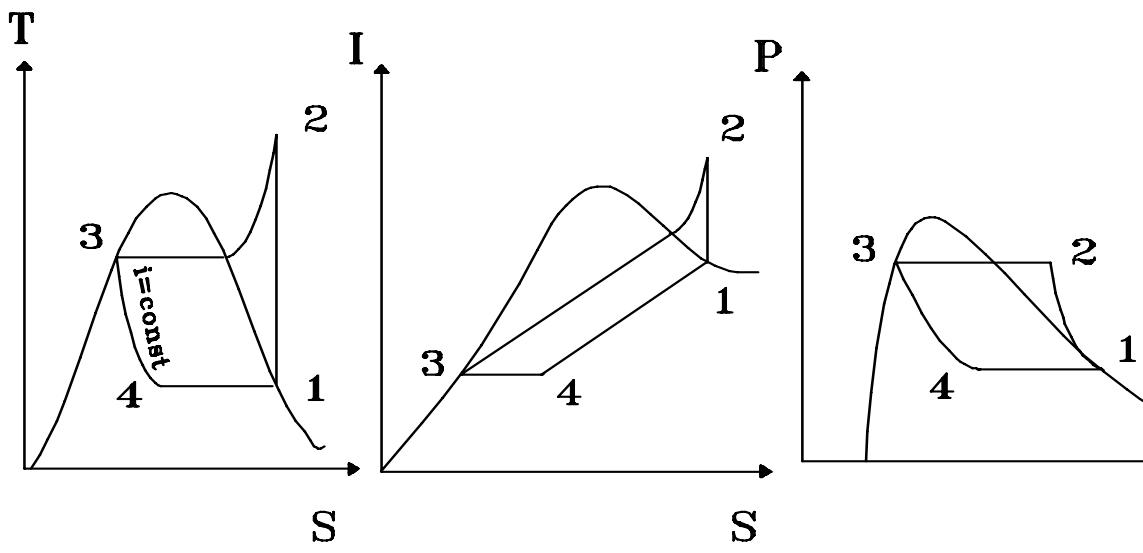
7. LEVOKRETNI KRUIZNI PROCESI

7.1. LEVOKRETNI RANKIN-KLAUZIJUSOV KRUIZNI CIKLUS

Levokretni Rankin-Klauzijusov kružni ciklus sastoji se od izentropske kompresije (1-2), izobarskog odvođenja toplote (2-3), adijabatskog prigusivanja (3-4), izobarskog dovodenja toplote (4-1). Sematski prikaz levokretnog Rankin-Klauzijusovog ciklusa dat je na sledecoj slici:

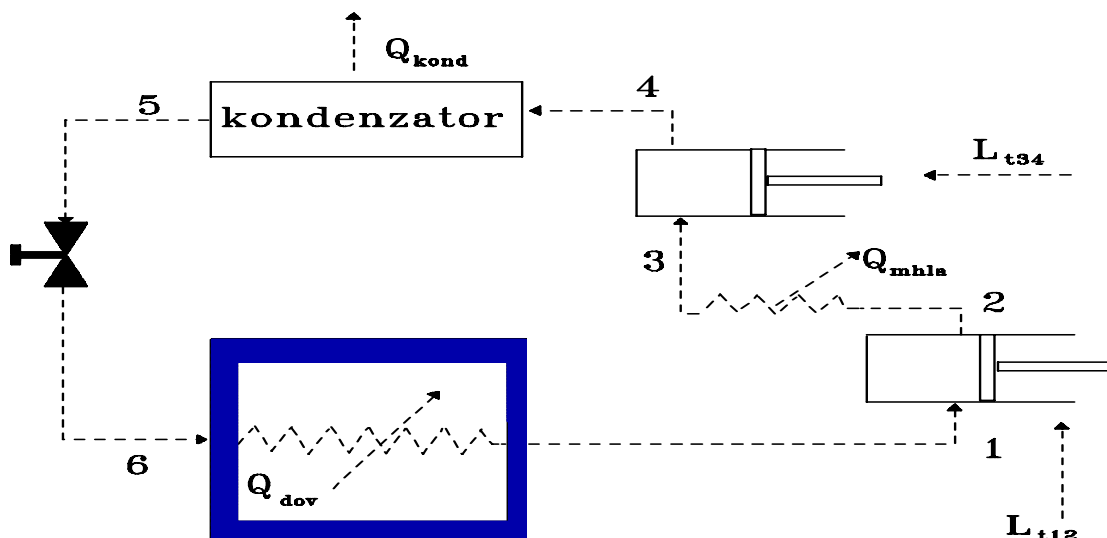


Moguci prikaz levokretnog Rankin-Klauzijusovog kružnog ciklusa na T_s , i i p_v dijagramu dat je na sledecoj slici:



7.2. LEVOKRETNI RANKIN-KLAUZIJUSOV KRIZNI CIKLUS SA DVOSTEPENOM KOMPRESIJOM

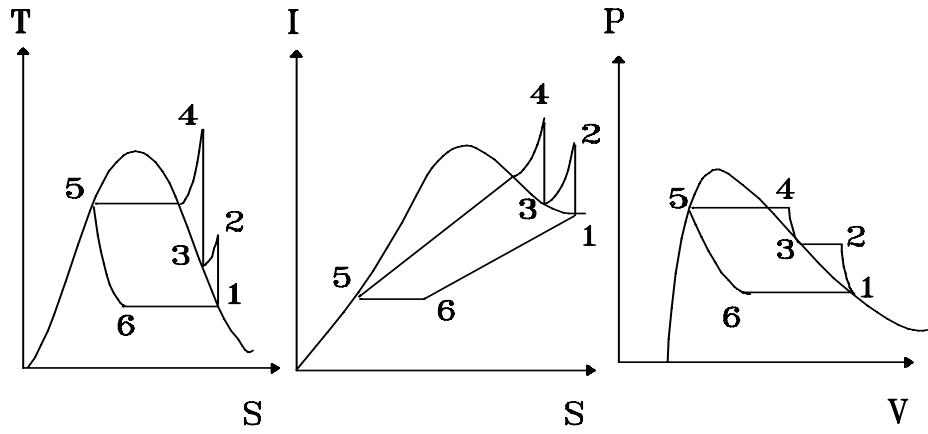
Levokretni Rankin-Klauzijusov kružni ciklus sastoji se od izentropske kompresije u kompresoru niskog pritiska (1-2), izobarskog odvođenja toplote u međjuhladnjaku (2-3), izentropske kompresije u kompresoru visokog pritiska (3-4), izobarskog odvođenja toplote u kondenzatoru (4-5), adijabatskog prigusivanja u prigusnom ventilu (5-6), izobarskog dovodenja toplote u isparivacu (4-1). Sematski prikaz levokretnog Rankin-Klauzijusovog ciklusa dat je na slici:



promena stanja 2-3

- aparat se obično zove međjuhladnjak
- $p_{\text{međjuhladnjak}} = \text{const}$

Mogući prikaz levokretnog Rankin-Klauzijusovog kružnog ciklusa sa dvostepenom kompresijom na T_s , i_s i p_v dijagramu dat je na sledećoj slici:



KRUZNI PROCESI (CIKLSUI)

Kružni procesi predstavljaju skup promena stanja takvih da se poslednja promena stanja završava tamo gde je počela prva promena stanja. Uloga ciklusa je da vrše transformaciju toplote u mehanicki rad i obrnuto. U zavisnosti od smera odvijanja (a i od toga da li transformisu toplotu u rad ili obrnuto) razlikujemo desnokretne i levokretne kružne cikluse.

1. Ako se smer ciklusa poklapa sa smerom kazaljke na satu takav ciklus je desnokretni. Mera efikasnosti ovakvih ciklusa je stepen korisnog dejstva (η).

$$\eta = \frac{Q_{DOV} + Q_{ODV}}{Q_{DZOV}} (\cdot 100\%)$$

Q_{DOV} - dovedena toplota u ciklusu (J/kg)

Q_{ODV} - odvedena toplota u ciklusu (J/kg)

Ovakvi ciklusi služe za dobijanje mehanickog rada na racun dovedene toplote (transformisu toplotu u mehanicki rad). Pojavljuju se u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem, parnim otorima itd.

2. Ako je smer ciklusa obrnut smeru kazaljke na satu takav ciklus je levokretni. Mera efikasnosti ovakvih ciklusa je koeficijent hladjenja (ε_H).

$$\varepsilon_H = \frac{Q_{DOV}}{|Q_{ODV}| - Q_{DOV}} \quad \varepsilon_H > 1$$

Ovakvi ciklusi služe za odvođenje toplote na racun dovedenog mehanickog rada (transformisu mehanicki rad u toplotu). Pojavljuju se u svim kompresorskim rashladnim postorjenjima ali i kod ciklusa toplotnih pumpi

Eksergija (Ex_Q) toplote (Q) koja se uzima od toplotnog izvora konstantne temperature ($T_i = \text{const}$), ako je temperatur okoline ($T_o = \text{const}$), data je izrazom:

$$Ex_Q = Q \left(1 - \frac{T_o}{T_i} \right)$$

Q - razmenjena toplota sa toplotnim izvorom

8. VLAZAN VAZDUH

Vlazan vazduh je dvo-komponentna mesavina, suvog vazduha i vodene pare. Za suv vazduh kao komponentu vlaznog vazduha vaze zakonitosti idealnog gasa. Za vodenu paru kao komponentu vlaznog vazduha vazse zakonitosti realnog gasa.

U zavisnosti u kojem obliku se vodena para nalazi u vlaznom vazduhu razlikujemo:

1. nezasicen vlasan vazduh (suv vazduh + pregrejana para)
2. zasicen vlasan vazduh (suv vazduh + suvozasicena vodena para)
3. presicen vlasan vazduh, magla (suv vazduh + suvozasicena vodena para + voda)

napomena:

Presicenost se moze postici i vodenom parom u tecnom i cvrtstom stanju (ledena magla), ali takva stanja su bez znacaja u ovom kursu.

nezasicen vlasan vazduh:

MEHANICKE VELICINE STANJA VLAZNOG VAZDUHA

Pritisak:

$$p = p_{sv} + p_{H_2O}$$

Ukupan pritisak vlaznog vazduha jednak je zbiru parcijalnih pritisaka suvog vazduha i vodene pare.

gustina:

$$\rho = \rho_{sv} + \rho_{H_2O}$$

Gustina vlaznog vazduha jednak je zbiru gustina suvog vazduha i vodene pare.

$$\rho_{sv} = \frac{p_{sv}}{R_{gsv}T} \quad \rho_{H_2O} = \frac{1}{(v_{ppp})_{p,p,t}} \cong \frac{p_{H_2O}}{R_{gH_2O}T}$$

temperatura:

$$t = t_{sv} = t_{H_2O}$$

Temperatura vlaznog vazuha jednaka je temperaturi suvog vazduha i temperaturi vodene pare u vlaznom vazduhu.

POKAZATELJI VLAZNOSTI VLAZNOG VAZDUHA

apsolutna vlaznost vlaznog vazduha, ω (kgH₂O/kgSV)

Apsolutna vlažnost vlažnog vazduha predstavlja odnos masa vodene pare i suvog vazduha u vlažnom vazduhu tj. $\omega = \frac{m_{H_2O}}{m_{sv}} = \frac{m_{sv} \cdot \omega}{m_{sv}}$. Apsolutna vlažnost vlažnog vazduha i parcijalni pritisak vodene pare mogu se preračunavati jedno u drugo na način

$$x=f(p_{H_2O})=\frac{M_{H_2O}}{M_{sv}} \frac{p_{H_2O}}{p - p_{H_2O}} .$$

relativna vlažnost vlažnog vazduha, φ

Relativna vlažnost vlažnog vazduha, φ , predstavlja odnos parcijalnog pritiska vodene pare u posmatranom vlažnom vazduhu (p_{H_2O}) i pritiska suvozasicene vodene pare iste temperature (p_Z). Ako se želi da se izrazi u % potrebno je pomnožiti ga sa 100.

$$\varphi = \frac{P_{H_2O}}{P_Z}$$

- p_Z , je tablicna velicina i cita se u udzbeniku za termodinamiku na str.545-546 (tabela P.3.) za temperaturu posmatranog vlažnog vazduha..

TOPLOTNE VELICINE STANJA VLAŽNOG VAZDUHA

entalpija:

$$h = h_{sv} + \omega (h_{pp}) = \dots = c_{pSV} t + \omega(1.86t + 2500)$$

$h_{pp} = f(p_{H_2O}, t)$ u opstem slucaju. Za vrednosti $p_{H_2O} < 0.1$ bar (sto je uglavnom slucaj u vlažnom vazduhu)

$$h_{pp} = f(t) = 1.86t + 2500 \quad t, [^{\circ}C]$$

Za odredjivanje bilo koje velicina stanja nezasicenog vlažnog vazduha (A) potrebno je znati neke druge dve velicine stanja (B, C) tj $A=f(B,C)$. Tabelarni prikaz svih ovakvih jednacina dat je u tabeli koja sledi.

Uociti da je u nekim situacijama neophodno koristiti Molijerov ix dijagram za odredjivanja velicina stanja. Takve situacije su:

1. $A=f(\varphi, h)$
2. $A=f(\varphi, \text{prava vlazenja})$

zasicen vlazan vazduh:

Mehanicke i toplotne velicine stanja zasicenog vlažnog vazduha mogu se odredjivati na isti nacin kao i mehanicke i toplotne velicine stanja nezasicenog vazduha. Za odredjivanje velicina stanja zasicenog vazduha potrebo je znati samo jednu (neku drugu) velicinu stanja, tj vazi jednacina tipa $A=f(B)$. Uociti da za zasicen vlazan vazduh vazi:

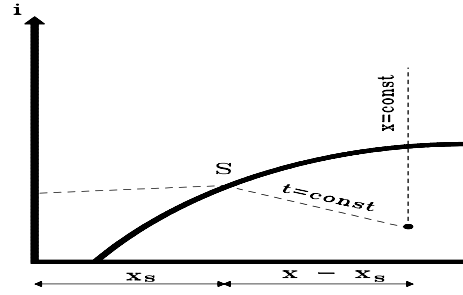
1. Relativna vlažnost zasicenog vlažnog vazduha, φ , iznosi 1.
2. Parcijalni pritisak pare u zasicenom vazduhu iznosi p_Z tj $p_{H_2O} = p_Z$

Uociti da je u situaciji tipa $A=f(\text{prava vlazenja})$ neophodno koristiti Molijerov ix dijagram za odredjivanja velicina stanja zasicenog vlažnog vazduha.

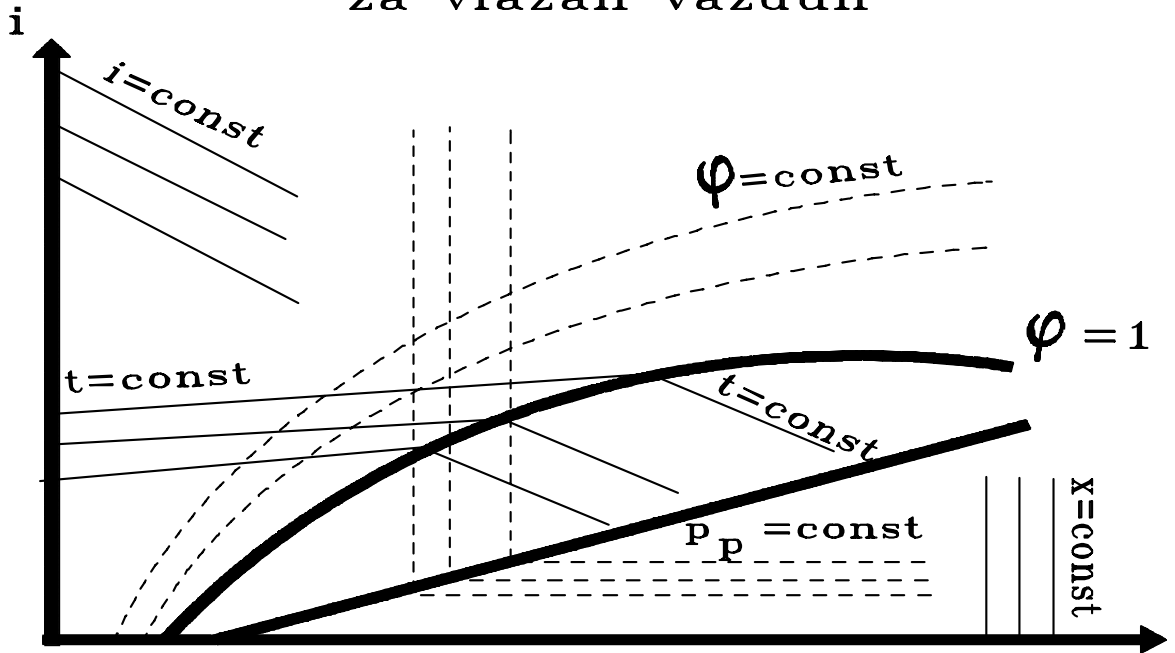
presicen vlazan vazduh

Kad govorimo o apsolutnoj vlaznosti presicenog vlnznog vazduha (ω) moramo znati da se jedan deo vodene pare nalazi u obliku suvozasicene vodene pare i ima vlaznost ω_s (vlaga u parnom stanju), a da se drugi deo vodene pare nalazi u obliku vode ($\omega - \omega_s$) (vlaga u tecnom stanju). Za odredjivanje velicina stanja presicenog vlnznog (h, ω, t) vazduha koristi se Molijerov ix dijagram, izuzetak je situacija $h=f(t, \omega)$ kada se moze se koristiti jednačina:

$$i = c_{psv}t + x_s(1.86t+2500) + (x-x_s)4.186t$$



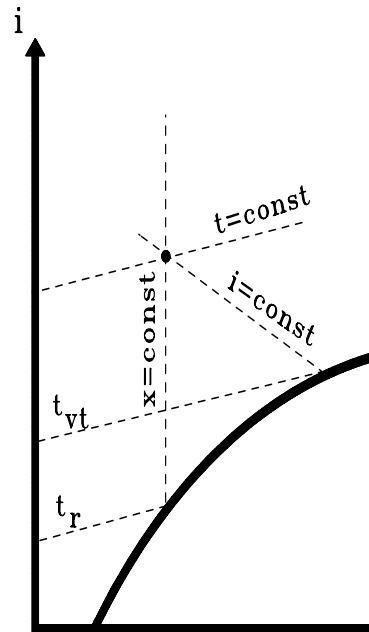
Molijer-ov ix dijagram za vlažan vazduh



Trikovi, tj "skrivalice" za pojedine velicine stanja vlažnog vazduha.

- Temperatura tacke rose predstavlja temperaturu do koje bi trebalo hladiti vlažan vazduh da bi doslo do kondenzacije pregrejane vodene pare koja se nalazi u njemu. Drugim recima to je temperatura zasicenog vlažnog vazduha koji ima istu apsolutnu vlažnost kao posmatrani vazduh. Temperatura tacke rose u zadacima služi da se pomoću nje sakrije apsolutna vlažnost vlažnog vazduha (ω).

- Temperatura adijabatskog zasicenja² predstavlja temperaturu do koje bi trebalo adijabatski vlažiti vlažan vazduh tako da on postane zasicen. Drugim recima to je temperatura zasicenog vlažnog vazduha koji ima istu entalpiju kao posmatrani vazduh. Temperatura adijabatskog zasicenja u zadacima služi da se preko nje sakrije entalpija vlažnog vazduha (h)



² U ovom kursu smatracemo da je temperatura adijabatskog zasicenja jednaka temperaturi vlažnog termometra, što je prihvatljiva aproksimacija u intervalu temperatura od 0-100°C

RACUNSKO ODREDJIVANJE PARAMETARA NEZASICENOG VLAZNOG VAZDUHA

$\omega=f(t,\varphi)$	$\frac{18}{29} \frac{\varphi \cdot p_Z}{p - \varphi \cdot p_Z}$
$\omega=f(t,t_{vt})$	I - $h=f(t_{vt})$ II - $\frac{h - c_{psv} t}{1.86t + 2500}$
$\omega=f(t,h)$	$\frac{h - c_{psv} t}{1.86t + 2500}$
$\omega=f(h,\varphi)$	samo upotrebom h- ω dijagrama
$\omega=f(p_{H_2O})$	$\frac{18}{29} \frac{p_{H_2O}}{p - p_{H_2O}}$
$h=f(t,\omega)$	$c_{psv} t + \omega(1.86 \cdot t + 2500)$
$h=f(\omega,\varphi)$	I - $t=f(\omega,\varphi)$ II - $h=f(t,\omega)$
$t=f(h,\omega)$	$t = \frac{i - \omega \cdot 2500}{1 + \omega \cdot 1.86}$
$t=f(\omega,\varphi)$	I - $p_{H_2O} = \frac{\omega \cdot p}{\frac{18}{29} + \omega}$ II - $p_Z = p_{H_2O} / \varphi$ III - udzbenik strana 547-548 tabela P.4. $t=(t)p_Z$
$t=f(t_r, t_{vt})$	I - $h=f(t_{vt})$ II - $\omega=f(t_r)$ III - $t=f(h,\omega)$
$t=f(h,\varphi)$	samo upotrebom h- ω dijagrama
$\varphi=f(t,\omega)$	$\frac{p}{p_Z} \frac{\omega}{\frac{M_{H_2O}}{M_{sv}} + \omega}$

PROMENE STANJA VLAZNOG VAZDUHA

1. Procesi razmene toplote sa okolinom,

U ovakvim procesima vlažnom vazduhu se dovodi ili odvodi toplota, pa tako razlikujemo procese zagrevanja i hlađenja. Procese razmene toplote sa okolinom vlažan vazduh obavlja izopletski ($\omega = \text{const}$).

Kolicina toplote koju vlažan vazduh razmeni sa okolinom, bilo da je rec o zagrevanju ili hlađenju, određuje se iz I zakona termodinamike:

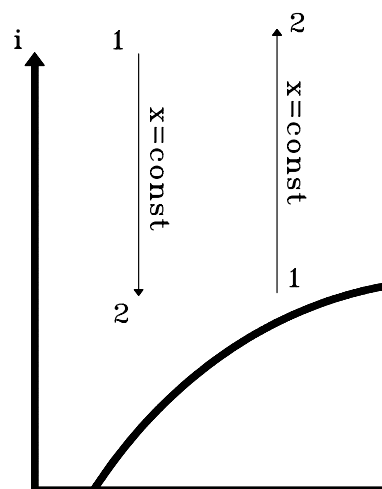
$$Q_{12} = m_{sv}(h_2 - h_1)$$

Q_{12} - kolicina toplote koju vazduh razmeni sa okolinom, kJ/s tj kW
 m_{sv} - maseni protok suvog vazduha, kg/s
 h_1, h_2 - entalpije vlažnog vazduha pre odnosno nakon razmene toplote sa okolinom, kJ/kgSV

Zagrevanje vlažnog vazduha obavlja se u uređjima koji se obično zovu zagrejac. Toplota koju je potrebno predati vlažnom vazduhu u zagrejacu obično se dobija odvođenjem toplote od nekog drugog fluida. U tom slučaju zagrejac je izveden kao razmenjivac toplote (

Hlađenje vlažnog vazduha obavlja se u uređjima koji se obično zovu hladnjaci. Toplota koja se odvodi od vlažnog vazduha u hladnjaku obično se predaje ili okolini ili nekom drugom fluidu. U ovom drugom slučaju hladnjak se izvodi kao razmenjivac toplote.

Ako se nezasićen vlažan vazduh ohladi do temperature koja je niža od tačke rose, dolazi do pojave izdvajanja kondenzata iz vlažnog vazduha. Kondenzat iz vlažnog vazduha zaostaje na zidovima hladnjaka i nakon toga se skuplja u risiveru, dok preostali vazduh napušta hladnjak kao zasićen vlažan vazduh iste temperature. Pri tome iz $m_{vv1} = m_{sv}(1 + \omega_1)$ kg nezasićenog vlažnog vazduha nastaje $W = m_{sv}(\omega_s - \omega_1)$ kondenzata i $m_{vvs} = m_{sv}(1 + \omega_s)$ kg zasićenog vlažnog vazduha.



2. Proces mesanja dva vlažnog vazduha

Procesi mesanja dva vlažna vazduha obavljaju se u komorama za mesanje. Mesanje vlažnih vazduha vrši se po sistemu mesanja gasnih struja. Ako pomesamo vlažan vazduh stanja 1 (m_{sv1} , ω_1 , h_1) sa vlažnim vazduhom stanja 2 (m_{sv2} , ω_2 , h_2) dobićemo mesavinu stanja M (m_{sv} , ω_m , h_m). Odredjivanje velicina stanja mesavine (m_{sv} , ω_m , h_m) vrsimo postavljanjem bilansnih jednacina:

1. materijalni bilans suvog vazduha:

$$m_{sv1} + m_{sv2} = m_{sv}$$

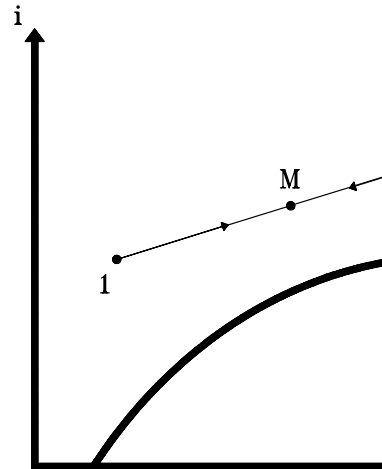
2. materijalni bilans vlage:

$$m_{sv1} \cdot \omega_1 + m_{sv2} \cdot \omega_2 = m_{sv} \cdot \omega_m$$

3. toplotni bilans

$$m_{sv1} \cdot h_1 + m_{sv2} \cdot h_2 = m_{sv} \cdot h_m$$

(toplotni bilans = I zakon termodinamike)



Pri odredjivanju stanja dobijene mesavine (tacka M) moze se koristiti i pravilo poluge za slucaj kada su poznati maseni oba vazduha koji formiraju mesavinu.

$$g_1 + g_2 = 1$$

$$g_1 \omega_1 + g_2 \omega_2 = \omega_m$$

$$g_1 h_1 + g_2 h_2 = h_m$$

g_1, g_2 - maseni udeli vazduha 1 i vazduha 2 u mesavini M

3. Procesi vlaženja vlažnog vazduha

Procesi vlaženja vlažnog vazduha vrse se u cilju povećanja apsolutne vlažnosti vlažnog vazduha (x). Vlaženje vlažnog vazduha vrši se dovodjenjem vodene pare, pa se vlaženje može u teorijskoj znanosti tretirati i kao mesanje vlažnog vazduha i vodene pare. Uređaji se obično konstruišu kao komore u koje se u fino raspršenom stanju uvodi vodena para.

Apsolutna vlažnost vlažnog vazduha i entalpija vlažnog vazduha nakon vlaženja određuju se postavljanjem materijalnog bilansa vlage i toplotnog bilansa za uređaj u kojem se vrši vlaženje.

- materijalni bilans vlage :

$$m_{sv}\omega_1 + W = m_{sv}\omega_2$$

W - protok dovedene vlage (kg/s)

m_v - protok suvog vazduha (kg/s)

ω_1 - apsolutna vlažnost vazduha pre vlaženja (kgH₂O/kgSV)

ω_2 - apsolutna vlažnost vazduha nakon vlaženja (kgH₂O/kgSV)

- toplotni bilans :

$$m_{sv}h_1 + W [h_w] = m_{sv} h_2$$

h_w - entalpija dovedene vodene pare (kJ/kg)

h_1 - entalpija vazduha pre vlaženja (kJ/kgSV)

h_2 - entalpija vazduha nakon zagrevanja (kJ/kgSV)

GRAFICKI PRIKAZ VLAZENJA VLAZNOG VAZDUHA

- ucrtta se tacka položaja vlažnog vazduha (pre ili
posle vlaženja)

- odredi se entalpija dovedene vodene pare

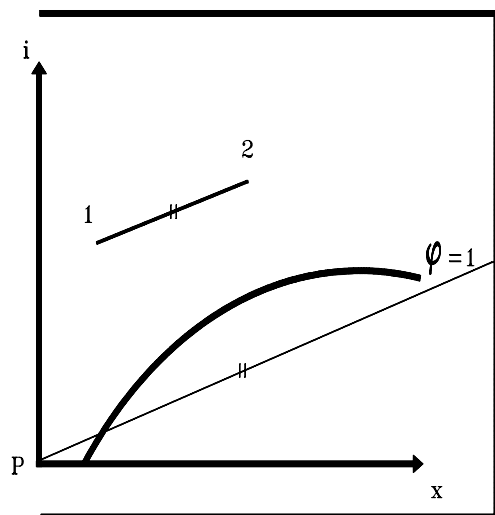
- uociti se ta vrednost na obodu ix dijagrama

- konstruise se pomocna prava kroz pol (P) ix
dijagrama i kroz tacku na obodu koja pokazuje

vrednost entalpije dovedene vodene pare

- konstruise se njoj paralelna prava kroz položaj

vlažnog vazduha (pre ili posle vlaženja)



SUSENJE VLAZNOG MATERIJALA

Susenje materijala je tehnoloska operacija koja se sprovodi u cilju odstranjivanje određene količine vlage iz vlažnog materijala. Kao agens susenja upotrebljava se vlažan vazduh, koji se prethodno pripremi (na razlicit nacin u razlicitim nacinima susenja) a zatim upotrebljava za susenje vlažnog materijala (sam vazduh se pri tome vlazi). Prema nacinu pripeme vazduha razlikujemo jednostepene, visestepene, recirkulacione i rekuperativne susare a prema nacinu vlazenja vlažnog vazduha razlikujemo idealne (teroijske, adijabatske) i realne susare.

Svaki materijal sa aspekta susenja sastoji se iz dve komponente: suve materije (SM) i vode. Nacin na koji razlikujemo dva (ili vise) materijala je kolicina vlage koju oni sadrze.

SM	H ₂ O
----	------------------

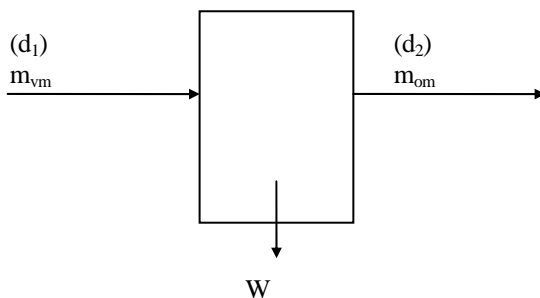
NACINI IZRAZAVANJA VLAZNOSTI MATERIJALA:

1. Vlažnost materijala, d (kg H₂O/kg(H₂O+SM)), predstavlja maseni udeo vlage u materijalu. Vrednosti za d se uvek nalaze u intervalu od 0 do 1 tj $0 < d < 1$.
2. Vlažnost materijala racunato na suhu materiju (SM), D (kg H₂O/kgSM), predstavlja maseni odnos vlage prema suvoj materiji u materijalu $D > 0$

Pri koriscenju materijalnih bilanasa moze se koristiti samo d (malo d). Ako je kojim slucajem u

zadatku zadato D (veliko D) ono se mora preracunati na malo d na nacin: $d = \frac{D}{1 + D}$

Prikaz komore za susenje u obliku blok dijagrama:



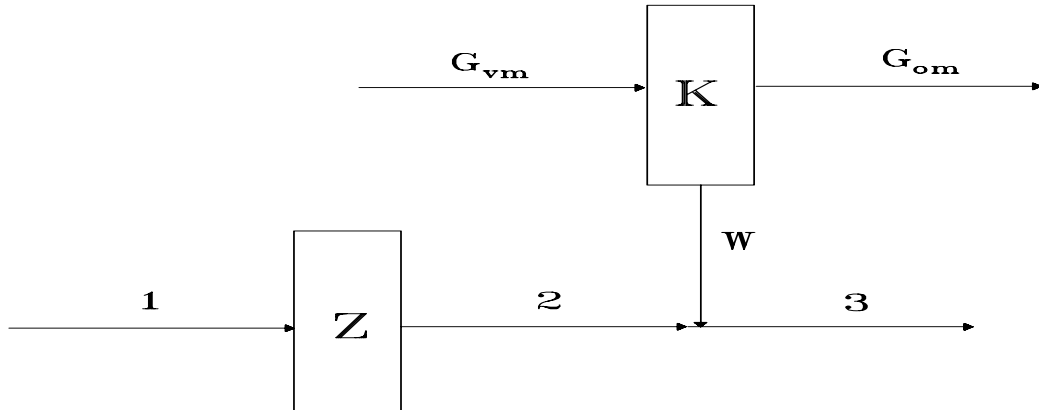
opsti materijalni bilans komore:

$$m_{vm} = m_{om} + W$$

materijalni bilans vlage:

$$m_{vm} \cdot d_1 = m_{om} \cdot d_2 + W$$

JEDNOSTEPENE TEORIJSKE SUSARE



1. MATERIJALNI BILANS VLAGE ZA KOMORU ZA SUSENJE VLAZNOG MATERIJALA

$$W = m_{sv} (\omega_3 - \omega_2) = m_{VM} \frac{d_1 - d_2}{1 - d_2} = m_{OM} \frac{d_1 - d_2}{1 - d_1}$$

W - odstranjena vlaga iz vlažnog materijala (kg/s)

m_{VM} - protok vlažnog materijala (kg/s)

m_{OM} - protok osušenog materijala (kg/s)

d_1 - početna vlažnost materijala (maseni udeo vlage)

d_2 - završna vlažnost materijala (maseni udeo vlage)

2. PROTOCI VLAZNOG VAZDUHA KROZ SUSARU

$$m_{vv1} = m_{sv}(1 + \omega_1)$$

m_{vv1} - protok vlažnog vazduha na ulazu u susaru (kg/s)

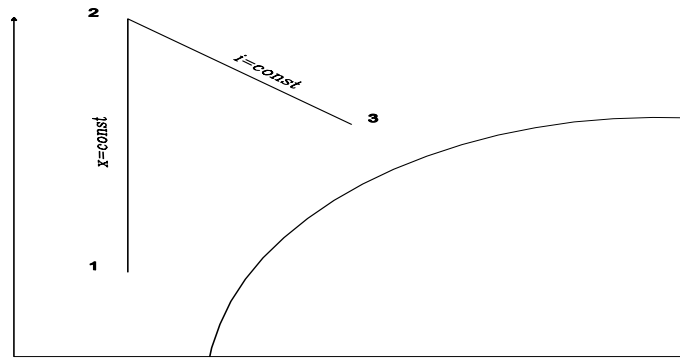
$$m_{vv3} = m_{sv}(1 + \omega_3)$$

m_{vv3} - protok vlažnog vazduha na izlazu iz susare (kg/s)

3. GRAFICKI PRIKAZ PROMENA STANJA VLAZNOG VAZDUHA

1-2: $\omega = \text{const}$

2-3: $h = \text{const}$



9. KRETANJE TOPLOTE

9.1. PROVODJENJE TOPLOTE (KONDUKCIJA)

9.1.1. Provodjenje toplote kroz viseslojan ravan zid

9.1.1.1. toplotni fluks, q (W/m^2)

$$q = \frac{t_{z1} - t_{z2}}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$$

- t_{z1} , temperatura toplije cvrste (ravne) površine (K , $^{\circ}\text{C}$)
- t_{z2} , temperatura hladnije cvrste (ravne) površine (K , $^{\circ}\text{C}$)
- δ_i , debljina i -tog cvrstog sloja (m)
- λ_i , koeficijent provodjenja i -tog cvrstog sloja (W/mK , $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)

9.1.1.2. toplotni protok, \dot{Q} (W)

$$\dot{Q} = q \cdot A$$

- A , površina razmene toplote (m^2)

9.1.1.3. kolicina toplote, Q (J)

$$Q = \dot{Q} \tau$$

- τ , vreme razmene toplote (s)

9.1.2. Provodjenje toplote kroz viseslojan cilindrican cid

9.1.2.1. toplotni fluks, q (W/m)

$$q = \frac{t_{z1} - t_{z2}}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\pi \lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}$$

- t_{z1} , temperatura toplije cilindricne površine (K , $^{\circ}\text{C}$)
- t_{z2} , temperatura hladnije cilindricne površine (K , $^{\circ}\text{C}$)
- d_{i+1} , spoljasnji precnik i -tog cilindricnog sloja (m)
- d_i , untrasnji precnik i -tog cilindricnog sloja (m)

9.1.2.2. toplotni protok, \dot{Q} (W)

$$\dot{Q} = q \cdot L$$

- L , duzina (visina) cilindra (m)

9.1.2.3. kolicina toplote, Q (J)

$$Q = \dot{Q} \tau$$

- τ , vreme razmene toplote (s)

9.2. PRELAZ TOPLOTE (KONVEKCIJA)

9.2.1. Prelaz toplote sa fluida na ravnu cvrstu povrstinu

tj. prelaz toplote sa ravne cvrste površine na fluid

9.2.1.1. toplotni fluks, q (W/m^2)
$$q = \frac{t_f - t_z}{\frac{1}{\alpha}}$$

- t_f , temperatura fluida (K, °C)
- t_z , temperatura ravne cvrste površine (K, °C)
- α , koeficijent prelaza toplote ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$)

9.2.1.2. toplotni protok, \dot{Q} (W)
$$\dot{Q} = q \cdot A$$

- A, površina razmene toplote (m^2)

9.2.1.3. kolicina toplote, Q (J)
$$Q = \dot{Q} \tau$$

- τ , vreme razmene toplote (s)

9.2.2. Prelaz toplote sa fluida na cilindricnu cvrstu povrstinu

tj. prelaz toplote sa cilindricne cvrste površine na fluid

9.2.2.1. toplotni fluks, q (W/m)
$$q = \frac{t_f - t_z}{\frac{1}{d\pi\alpha}}$$

- d, prečnik cilindricne površine (m)

9.2.2.2. toplotni protok, \dot{Q} (W)
$$\dot{Q} = q \cdot L$$

- L, dužina (visina) cilindra (m)

9.2.2.3. kolicina toplote, Q (J)
$$Q = \dot{Q} \tau$$

- τ , vreme razmene toplote (s)

9.3. ZRACENJE TOPLOTE (RADIJACIJA)³

9.3.1. Zracenje toplote izmedju površina 1 i 2

9.3.1.1. toplotni fluks, q_Z (W/m²) $q_Z = \frac{[(\frac{T_1}{100})^4 - (\frac{T_2}{100})^4]}{C_{1,2}}$

- T_1 , temperatura toplije cvrste površine (K)
- T_2 , temperatura hladnij cvrste površine (K)
- $C_{1,2}$ konstanta uzajamnog zracenja cvrstih površina (W/m²K⁴)

9.3.1.2. toplotni protok, $\dot{Q}_{1,2}$ (W) $\dot{Q}_Z = q_Z \cdot A_1$
- A_1 , površina toplije cvrste površine 1 (m²)

9.3.1.3. kolicina toplote, Q_{12} (J) $Q_Z = \dot{Q}_Z \cdot \tau$
- τ , vreme razmene toplote (s)

9.3.2. konstanta uzajamnog zracenja cvrstih površina, C_{12} (W/m²K⁴)
- $C_{12} = C_c \cdot \epsilon_{red}$

9.3.2.1. konstanta zracenja apsolutno crnog tela $C_c = 9.67$ (W/m²K)

9.3.2.2. redukovani koeficijen emisije pri uzajamnom zracenju površine 1 na površinu 2 ϵ_{red} :

$$\epsilon_{red} = \frac{1}{1 + (\frac{1}{\epsilon_1} - 1)\phi_{12} + (\frac{1}{\epsilon_2} - 1)\phi_{21}}$$

- ϵ_1, ϵ_2 koeficijenti emisije površina 1 i 2. Koeficijenti emisije predstavljaju karakteristiku materijala koji zraci i temperature materijala. Mogu se pročitati u priručniku na strani 143-146 ako nisu zadati u zadatku, u tom slučaju pročitati fusnotu na strani 146. Podrazumevani oblik cvrste površine je "hrapava".

- ϕ_{12}, ϕ_{21} , geometrijski faktori zracenja, citaju se u priručniku na strani 147. Za $A_1 \ll A_2$ $\phi_{21} = 0$ tj $\epsilon_{red} = \epsilon_1$

napomena:

- Za dva karakteristicna geometrijska slucaja
- površina 1 obuhvacena površinom 2
 - površina 1 paralelna površini 2
- moze se koristiti skraceni izraz za ϵ_{red}

³ samo za cvrsta tela

$$\varepsilon_{red} = \frac{I}{\frac{I}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{I}{\varepsilon_2} - I \right)}$$

pri čemu takodje vazi da je za $A_1 \ll A_2$, $\varepsilon_{red} = \varepsilon_1$

TABELARNI PRIKAZ ZAVISNOSTI POKRETACKIH SILA I TOPLLOTNIH OTPORA
PRI PROSTIRANJU TOPLOTE SA JEDNOG MESTA NA DRUGO

	provođenje toplote (kondukcija)	prelaz toplote (konvekcija)	zračenje toplote (radijacija)
q=	$\frac{\text{pokretacka sila}}{\text{otpor}}$		
pokr. Sila	$t_{z1} - t_{z2}$	$t_f - t_z$	$\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4$

	ravan zid	cilindar	r.zid	cilindar	r.zid	cilindar
otpor	$\frac{\delta}{\lambda}$	$\frac{l}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_s}{d_u}$	$\frac{l}{\alpha}$	$\frac{l}{d\pi\alpha}$	$\frac{l}{C_{12}}$	$\frac{l}{C_{12}}$

jedinice u SI sistemu za q, \dot{Q} i Q:

q	W/m ²	W/m	W/m ²	W/m	W/m ²
\dot{Q}	q·A [W]	qL [W]	qA [W]	qL [W]	q·A ₁ [W]
Q	$\dot{Q} \cdot \tau$ [J]	$\dot{Q} \cdot \tau$ [J]	$\dot{Q} \cdot \tau$ [J]	$\dot{Q} \cdot \tau$ [J]	$\dot{Q} \cdot \tau$ [J]

ODREDJIVANJE KOEFICIJENTA PRELAZA TOPLOTE (α)
POMOCU KRITERIJALNIH JEDNACINA $Nu=f(Re_f, Pr_f, Pr_A, Gr_f)$

Koeficijet provodjenja (λ) je karakteristika materijala, u opstem slucaju. Osim od vrste materijala zavisi i od strukture materijala, pravca provodjenja toplote u materijalu, vlažnosti materijala, pritiska i temperature materijala. Za vecinu homogenih materijala moze se sa dovoljnom tacnoscu smatrati da je koeficijent provodjenja konstantna velicina. Izuzetno, za vece temperaturske intervale i tacnije proracune potrebno je uzeti u obzir zavisnost koeficijenta provodjenja toplote od temperature. Takva zavisnost je obicno linearna. Za neke cvrste materijale date su vrednosti u udzbeniku strana 588-591 tabele P.26. i P.27.

Koeficijent emisije zracenja (ϵ) je u opstem slucaju karakteristika materijala koji zraci i stanja površine (hrapava, glatka, brusena...). Za vecinu homogenih materijala moze se sa dovoljnom tacnoscu moze se smatrati da je koeficijent emisije konstantna velicina. Izuzetno, za vece temperaturske intervale i tacnije proracune potrebno je uzeti u obzir zavisnost koeficijenta emisije od temperature. Za neke cvrste materijale date su vrednosti u udzbeniku strana 596-597 tabela P.34.

Koeficijent prelaza toplote (α) nije karakteristika materijala, jer njegova vrednost za tacno odredjeni fluid i tacno odredjenu granicnu površinu moze da bude sasvim razlicita, u zavisnosti od mnogif faktora (brzina fluida, temperatura fluida, temperatura granicne površine...). Upotrebom teroije slicnosti i kriterijum slicnosti koeficijent prelaza toplote (α) odredjuje se iz jednacine

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_f}{l_K} \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$$

Na narednim stranama bice opisan postupak odredjivanja Nuseltovog broja upotrebom kriterijalnih jednacina kao i odredjivanje potrebnih fizickih parametara za fluid (ρ , c_p , μ , λ) i karakteristicne geometrijske velicine (l_K) za potrebne slucajeve.

Slobodna (prirodna) konvekcija:

Ovaj slucaj se karakterise slobodnim strujanjem fluida (mirovanjem) duz cvrste površine. Kriterijalna jednačina za ovaj slucaj ima oblik:

$$Nu_f = A (Gr_f Pr_f)^m \left(\frac{Pr_f}{Pr_z} \right)^n$$

sa sledecim znacenjem i granicama primene

	A	m	n	l_K	granice primene
horizontalna cev, sfera	0.5	0.25	0.25	d	
Verikalne cevi (prenos toplote sa spoljasnje strane) i ploce	0.76	0.25	0.25	h	$10^3 < Gr_f Pr_f < 10^9$
	0.15	0.33	0.25	h	$10^9 < Gr_f Pr_f$
horizontalne ploce (razmena toplote sa gornje strane ploce)	0.14	0.33		l_{MIN}	$2 \cdot 10^7 < Gr_f Pr_f < 3 \cdot 10^{10}$
	0.54	0.25		l_{MIN}	$2 \cdot 10^7 < Gr_f Pr_f < 3 \cdot 10^{10}$
horizontalne ploce (razmena toplote sa donje strane ploce)	0.27	0.25		l_{MIN}	$1 \cdot 10^2 < Gr_f Pr_f < 1 \cdot 10^9$

$$Gr_f = \frac{\beta \cdot g \cdot l_K \cdot \Delta t \cdot \rho^2}{\mu^2}, \quad Pr_f = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}, \quad Re_f = \frac{\rho \cdot w \cdot l_K}{\mu}$$

Fizicki parametri fluida (ρ , μ , c_p , λ) citaju se iz odgovarajucih tabela za srednju temperaturu fluida

Pri izracunavanju Pr_z , fizicki parametri fluida (μ , c_p , λ) citaju se iz odgovarajucih tabela za srednju

temperaturu zida. Fizicki parametar β se za gasove izracunava iz izraza: $\beta = \frac{1}{T_f}$

ρ za tecnosti tablica P.18. , za gasove $\rho = \frac{P}{R_g T}$

c_p za tecnosti tablica P.20. za gasove tablica P.19.

μ za tecnosti tablica P.23. za gasove tablica P.22.

λ za tecnosti tablica P.25. za gasove tablica P.24.

Suv vazduh tablica P.14., osim ρ koje se izracunava kao $\rho = \frac{P}{R_g T}$

Vodena para tablice P.15, P.16 i P.17 osim ρ koje se izracunava kao $\rho = \frac{1}{v}$

Prinudna konvekcija:

Ovaj slucaj se karaktetise prinudnim strujanjem fluida (kretanje sa nekom brzinom) kroz cevi ili kanale proizvoljnog popreznog preseka površine. Kriterijalna jednačina za ovaj slucaj ima oblik:

$$Nu_f = C \cdot Re_f^m \cdot Pr_f^n \cdot Gr_f^p \left(\frac{Pr_f}{Pr_z} \right)^{0..25}$$

Vrednosti konstanti C, m,n,p zavise od rezima strujanja i imaju sledece vrednosti

	C	m	n	p	granica primene
laminarno strujanje					$Re_f < 2000$
viskozno gravitacioni rezim	0.15.	0.33	0.43	0.1	$8 \cdot 10^5 < Gr_f \cdot Pr_f$
viskozni rezim	0.15	0.33	0.43	0	$8 \cdot 10^5 > Gr_f \cdot Pr_f$
preobrazajno strujanje	K_O	0	0.43	0	$2 \cdot 10^3 < Re_f < 1 \cdot 10^4$
turbulentno strujanje	0.021	0.8	0.43	0	$1 \cdot 10^4 < Re_f < 5 \cdot 10^6$

preobrazajni rezim:

Re	2100	2300	2500	3000	3500	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
K_O	1.9	3.3	4.4	6	10	12.2	15.5	19.5	24	27	30	33

Dobijeni rezultat za koeficijent prelaza toplote (α) mora se kod kratkih cevi ($L/l_K < 50$) korigovati množenjem sa faktorom ε_L prema sledecoj tabeli:

L/l_K	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ε_L	1.9	1.7	1.44	1.28	1.18	1.13	1.05	1.02	1

turbulentni rezim:

Dobijeni rezultat za koeficijent prelaza toplote (α) mora se kod kratkih cevi ($L/l_K < 50$) korigovati množenjem sa faktorom ε_L prema sledecoj tabeli:

Re	ε_L								
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$1 \cdot 10^4$	1.65	1.50	1.34	1.23	1.17	1.13	1.07	1.03	1
$2 \cdot 10^4$	1.51	1.40	1.27	1.18	1.13	1.10	1.05	1.02	1
$5 \cdot 10^4$	1.34	1.27	1.18	1.13	1.10	1.08	1.04	1.02	1
$1 \cdot 10^5$	1.28	1.22	1.15	1.10	1.08	1.06	1.03	1.02	1
$1 \cdot 10^6$	1.14	1.11	1.08	1.05	1.04	1.03	1.02	1.01	1

Fizicki parametri fluida (ρ , μ , c_p , λ) citaju se iz odgovarajucih tabela za srednju temperaturu fluida

Pri izračunavanju Pr_Z , fizicki parametri fluida (μ , c_p , λ) citaju se iz odgovarajućih tabela za srednju temperaturu zida.

Karakteristična geometrijska veličina određuje se iz izraza:

$$l_K = 4 \cdot \frac{A}{O}$$

- A površina poprečnog preseka cevi ili kanala kroz koji fluid struji (m^2)
- O okvazeni obim cevi ili kanala kroz koji fluid struji nezavisno od površine na kojoj se vrši razmena toplote (m)

10. SAGOREVANJE

Sagorevanje je složen fizicko-hemijski proces pri kom se iz goriva oslobadja hemijski vezana toplota, i to kao rezultat vezivanja kiseonika (iz vazduha) sa sagorljivim sastojcima goriva.

Postoje cvrsta, tečna i gasovita goriva. U većini slučajeva goriva predstavljaju mesavine komponenata od kojih su sastavljenje. Jednacine koje opisuju sastav goriva, toplotnu moc, potrebnu kolicinu vazduha, produkte sagorevanja itd. razlikuju se s jedne strane za cvrsta i tečna, a sa druge strane za gasovita. Svi proracuni se obicno izvode za jedinicu kolicine goriva, i to kod cvrstih za 1 kg goriva, a kod gasovitih 1 Nm³ goriva.

A. CVRSTA I TECNA GORIVA:

Osnovne karakteristike svakog goriva su njegov sastav i njegova toplotna moc.

1. Sastav cvrstih i tecnih goriva obicno se zadaje preko masenih udela komponenata goriva. Maseni udeli komponenata goriva se obelezavaju malim slovima pripadajucih hemijskih simbola. Redje se koristi oznaka "g_i" za maseni udeo neke komponente u gorivu:

komponenta goriva	maseni udeo komponente		
ugljenik	c	=	(g _c)
vodonik	h	=	(g _h)
sumpor	s	=	(g _s)
kiseonik	o	=	(g _o)
azot	n	=	(g _n)
voda	w	=	(g _w)
mineralne materije (pepeo)	a	=	(g _a)

2. Toplotna moc goriva predstavlja kolicinu toplote (kJ) koju oslobodi jedinica kolicine goriva (kg) u procesu potpunog sagorevanja. Razlikujemo donju toplotnu moc goriva (H_d), kada je voda u produktima sagorevanja u gasovitom stanju i gornju toplotnu moc goriva (H_g), kada je voda u produktima sagorevanja u tecnom stanju. Precizno odredjivanje toplotne moci goriva vrsi se u uredjajima koji se nazivaju "kalorimetrijske bombe", dok se priblizna vrednost moze izracunati na osnovu sastava goriva i toplotnih efekata hemijskih reakcija na osnovu sledecih formula:

- donja toplotna moc goriva

$$H_d = 33.9c + 121.4\left(h - \frac{o}{8}\right) + 10.460s - 2.51w \quad (MJ / kg \quad goriva) \quad 3$$

- gornja toplotna moc goriva

$$H_g = 33.9c + 142.3\left(h - \frac{o}{8}\right) + 10.460s \quad (MJ / kg \quad goriva) \quad 4$$

Osnovna karakteristika svakog procesa sagorevanja je **kolicina upotrebljenog vazduha**, **kolicina dobijenih produkata sagorevanja** i **temperatura dobijenih produkata sagorevanja**.

A.1. **Kolicina upotrebljenog vazduha** (L^m, L^{Vn}) izracunava se iz izraza: $L =$

$\lambda \cdot L_{MIN}$ gde je:

- λ , koeficijent viska vazduha. U idealnom slucaju (stehiometrijsko sagorevanje) $\lambda=1$,
 - L_{MIN} , minimalna kolicina vazduha kojeg je potrebno dovesti (stehiometrijsko sagorevanje).
- Izracunava se iz izraza:

maseni proracun: $L^m_{MIN} \left(\frac{kg}{kg \text{ goriva}} \right)$	zapreminski proracun: $L^{Vn}_{MIN} \left(\frac{Nm^3}{kg \text{ goriva}} \right)$
$L_{MIN} = \frac{1}{0.23} \cdot 32 \cdot \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right)$	$L_{MIN} = \frac{1}{0.21} \cdot 22.4 \cdot \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right)$

A.2. **Kolicina dobijenih produkata sagorevanja** (m_{ps}, Vn_{ps}) izracunava se iz izraza:

maseni proracun: $m_{ps} \left(\frac{kg}{kg \text{ goriva}} \right)$	zapreminski proracun: $Vn_{ps} \left(\frac{Nm^3}{kg \text{ goriva}} \right)$
$m_{CO_2} = 3.667c$	$Vn_{CO_2} = 1.867c$
$m_{H_2O} = 9h + w$	$Vn_{H_2O} = 1.244(9h + w)$
$m_{SO_2} = 2s$	$Vn_{SO_2} = 0.7s$
$m_{N_2} = 0.77L + n$	$Vn_{N_2} = 0.79L + 0.8n$
$m_{O_2} = 0.23(\lambda - 1)L_{min}$	$Vn_{O_2} = 0.21(\lambda - 1)L_{min}$
----- \oplus	----- \oplus
$m_{ps} = m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2}$	$Vn_{ps} = Vn_{CO_2} + Vn_{H_2O} + Vn_{SO_2} + Vn_{N_2} + Vn_{O_2}$

Racunska veza izmedju kolicina nekog gasa u kg (m) i $Nm^3(Vn)$ je : $V_N = m \cdot \frac{22.4}{M}$

gde je M molekulska masa gasa (kg/kmol)

A.3. **Odredjivanje idealne (adijabatske) temperature dobijenih produkata sagorevanja** (t_s)

$$t_s = \frac{c_g \cdot t_g + H_D + L^m c_P \cdot L t_L}{m_{CO_2} \cdot c_{pCO_2} + m_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} + m_{SO_2} \cdot c_{pSO_2} + m_{N_2} \cdot c_{pN_2} + m_{O_2} \cdot c_{pO_2}}$$

c_g - specificna toplota goriva (kJ/kgK) (zadaje se u zadtku)

c_{pi} - specificna toplota vazduha (L) i produkata sagorevanja (CO_2 , H_2O , SO_2 , O_2 , H_2) (kJ/kgK)

JEDNOKOMPONENTNA GASOVITA GORIVA (UGLJOVODONICI, CO...):

Za jednokomponentna gasovita goriva mogu se koristiti iste zakonitosti kao za tečna i čvrsta goriva. Prethodno je međutim neophodno na osnovu hemijske formule izračunati masene udele komponentata. Takodje za jednokomponentna gasovita goriva ne treba računati toplotnu moc jer se ona već nalazi izračunata u udzbeniku za termodinamiku na str.595 i 596 u tabeli P.31 i P32.. Jedinica za toplotnu moc u ovi tabeli (kJ/kg) je pogresna (vrednosti iz tabele su zapravo kJ/m^3_N). Za

pravilno koriscenje neophodno je vrednost iz tabele pomnoziti sa $\frac{22.4}{M_{\text{goriva}}}$ i tada je rezultat za H_D u kJ/kg kako je i potrebno.

B. GASOVITA GORIVA(VISEKOMPONENTNA):

Osnovne karakteristike svakog goriva su njegov sastav i njegova toplotna moc.

1. Sastav gasovitih goriva obicno se zadaje preko zapreminskih udela komponentata goriva. Zapreminski udeli komponentata goriva se obelezavaju hemijskim formulama + eksponent '(prim), npr. zapreminski udeo kiseonika u gorivu obelezava se sa O_2' . Redje se koristi oznaka " r_i " za zapreminski udeo neke komponente u gorivu:

komponenta goriva	zapreminski udeo komponente
ugljenmonoksid	(r_{CO})
ugljendioksid	(r_{CO_2})
vodonik	(r_{H_2})
kiseonik	(r_{O_2})
azot	(r_{N_2})
vodonik sulfid	(r_{H_2S})
ugljovodonici	$(r_{C_xH_y})$

2. Toplotna moc gasovitog goriva predstavlja kolicinu toplote (kJ) koju oslobodi jedinica kolicine goriva (m^3_N) u procesu potpunog sagorevanja. Razlikujemo donju toplotnu moc goriva (H_d), kada je voda u produktima sagorevanja u gasovitom stanju i gornju toplotnu moc goriva (H_g), kada je voda u produktima sagorevanja u tecnom stanju. Precizno odredjivanje toplotne moci goriva vrsi se u uredjajima koji se nazivaju "kalorimetrijske bombe", dok se priblizna vrednost moze izračunati na osnovu sastava goriva i toplotnih moci komponentata goriva na osnovu sledecih formula:

$$\text{- donja toplotna moc goriva } (H_d) \quad H_d = \sum_{i=1}^{i=n} r_i H_{di}$$

H_{di} - donja toplotna moc komponentata goriva, kJ/Nm^3 goriva,
 r_i - zapreminski udeo komponente "i"

$$\text{- gornja toplotna moc goriva } (H_g) \quad H_g = \sum_{i=1}^{i=n} r_i H_{gi}$$

H_{gi} - gornja toplotna moc komponenata goriva, kJ/m^3_N goriva,
 r_i - zapreminski udeo komponente "i"

napomena:

Uociti da su u tabeli P.31. na str.594 toplotne moci čistih goriva (H_d i H_g) greskom izražene u kJ/kg .
Naime, brojne vrednosti u tabeli su tacne ali je njihova jedinica kJ/Nm^3 .

Osnovna karakteristika svakog procesa sagorevanja je **kolicina upotrebljenog vazduha**, **kolicina dobijenih produkata sagorevanja** i **temperatura dobijenih produkata sagorevanja**.

B.1. **Kolicina upotrebljenog vazduha (L^m, L^{Vn})** izracunava se iz izraza:

$$L = \lambda \cdot L_{\min} \left(\frac{Nm^3}{Nm^3 \text{ goriva}} \right)$$

gde je:

- λ , koeficijent viska vazduha. U idealnom slucaju (stehiometrijsko sagorevanje) $\lambda=1$,
- L_{\min} , minimalna kolicina vazduha kojeg je potrebno dovesti (stehiometrijsko sagorevanje).

Izracunava se iz izraza:

zapreminski proracun:

$$L_{\min}^{Vn} = \frac{1}{0.21} \cdot [0.5 \cdot (CO' + H_2') - O_2' + \sum (x + \frac{y}{4}) C_x H_y'] \left(\frac{Nm^3}{Nm^3 \text{ goriva}} \right)$$

maseni proracun:

$$L_{\min}^m = L_{\min}^{Vn} \cdot \frac{M_{VAZDUH}}{22.4} \left(\frac{kg}{Nm^3 \text{ goriva}} \right)$$

B.2. **Kolicina dobijenih produkata sagorevanja (Vn_{ps})** izracunava se iz izraza

zapreminski proracun: $Vn_{ps} \left(\frac{Nm^3}{Nm^3 \text{ goriva}} \right)$	maseni proracun: $m_{ps} \left(\frac{kg}{Nm^3 \text{ goriva}} \right)$
$Vn_{CO_2} = CO_2' + CO' + \sum x C_x H_y'$	$m_{CO_2} = Vn_{CO_2} \cdot \frac{M_{CO_2}}{22.4}$
$Vn_{H_2O} = H_2O' + H_2' + \sum 0.5y C_x H_y'$	$m_{H_2O} = Vn_{H_2O} \cdot \frac{M_{H_2O}}{22.4}$
$Vn_{N_2} = N_2' + 0.79 \lambda L_{\min}^{Vn}$	$m_{N_2} = Vn_{N_2} \cdot \frac{M_{N_2}}{22.4}$
$Vn_{O_2} = 0.21 (\lambda - 1) L_{\min}^{Vn}$	$m_{O_2} = Vn_{O_2} \cdot \frac{M_{O_2}}{22.4}$
----- \oplus	----- \oplus
$Vn_{ps} = Vn_{CO_2} + Vn_{H_2O} + Vn_{N_2} + Vn_{O_2}$	$m_{ps} = m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{N_2} + m_{O_2}$

B.3. Odredjivanje idealne (adijabatske) temperature dobijenih produkata sagorevanja (t_s)

$$t_s = \frac{22.4 \cdot H_d + M_g \cdot c_{pg} \cdot t_g + L^{Vn} \cdot M_L \cdot c_{pL} \cdot t_L}{V_{nCO_2} \cdot M_{CO_2} \cdot c_{pCO_2} + V_{nH_2O} \cdot M_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} + V_{nO_2} \cdot M_{O_2} \cdot c_{pO_2} + V_{nN_2} \cdot M_{N_2} \cdot c_{pN_2}} \quad 6$$