

VODENA PARA

PREDRAG KRALJ

Para i parni procesi

Toplinski dijagrami

Izvori

Bošnjaković, Nauka o toplini

Kostelić, A., Nauka o toplini

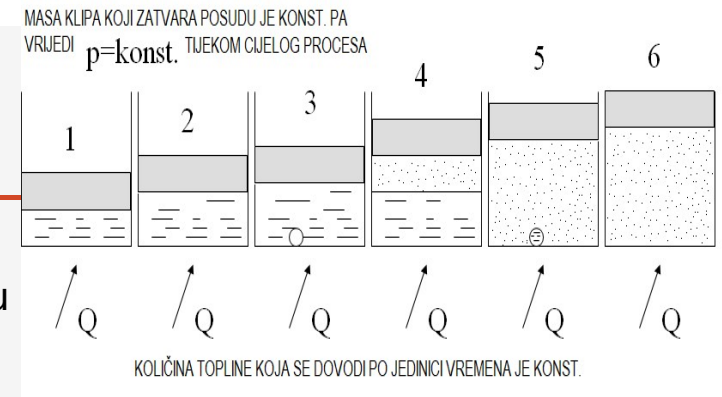
Rohsenow, W. M., Handbook of Heat Transfer Fundamentals

Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E., Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer

Gregorig

Isparivanje

Pogledajmo posudu sa slike. U posudi se nalazi određena masa tekuće vode hermetički zatvorena pomičnim klipom konstantne mase. U trenutku 1 posuda se počinje zagrijavati dovođenjem konstantne količine topline u jedinici vremena Q . Uslijed zagrijavanja voda se širi, što je prikazano podizanjem klipa u trenutku 2. Ukoliko se u posudi nalazi jedinična masa vode od 1 kg, količina topline se može izraziti kao $q = h_2 - h_1 = c_p(t_2 - t_1)$



Interesantna je situacija u trenutku 3 kada se može zamijetiti nastanak prvog mjehurića pare. To se stanje zove **vrela voda** ili općenito za neke druge tvari, **vrela tekućina**. Naravno, u odnosu na prethodni, i ovdje se može primijetiti podizanje klipa jer se voda proširila.

Od trenutka 3 do trenutka 5, u kojem nestaje zadnja kapljica tekućine, temperatura ostaje konstantna.

Temperatura kod koje pri zadanom tlaku počinje isparivanje zove se **temperatura zasićenja** (vrelište), a tlak koji joj odgovara **tlak zasićenja**. Toplina koja je dovođena posudi 'potrošila' se na isparivanje (povećanje unutarnje energije vode) i rad podizanja klipa pa nema porasta temperature. Takva se toplina naziva **latentna**, za razliku od **senzibilne** koju karakterizira promjena temperature. Sva stanja između trenutaka 3 i 5 nazivaju se **mokra para** i osim konstantnog tlaka i temperature, karakterizira ih veličina x [kg pare/kg vode] – sadržaj pare. Prema tome je $1 - x$ sadržaj vode. U trenutku 5 nestaje zadnja kapljica vode i to se stanje naziva **suhozasićena para**.

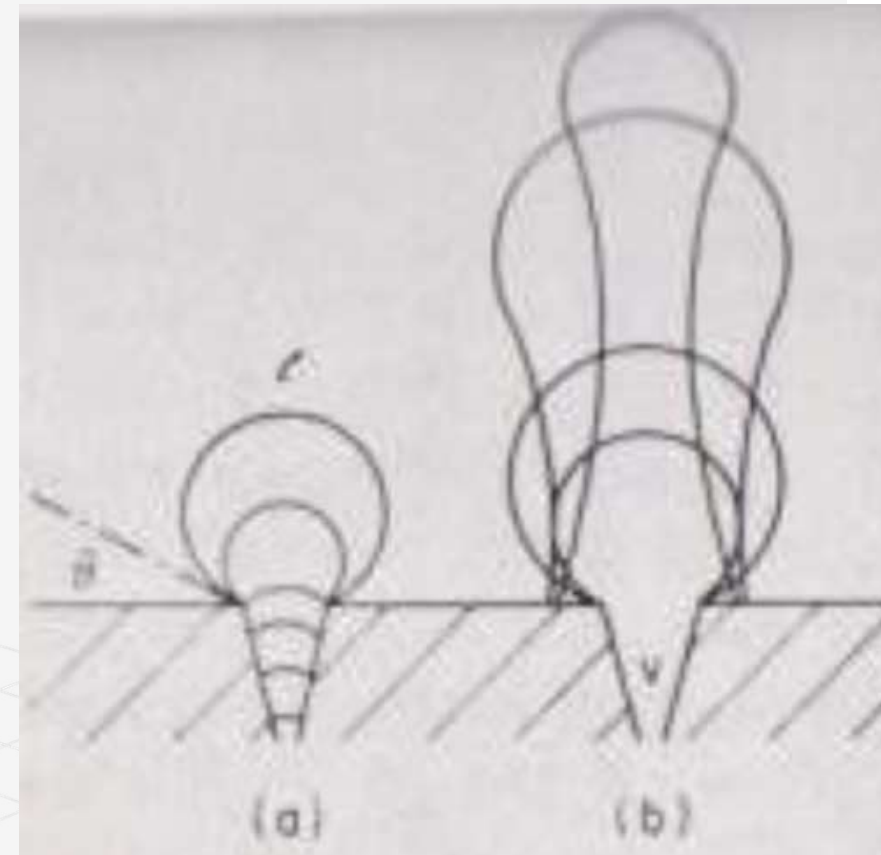
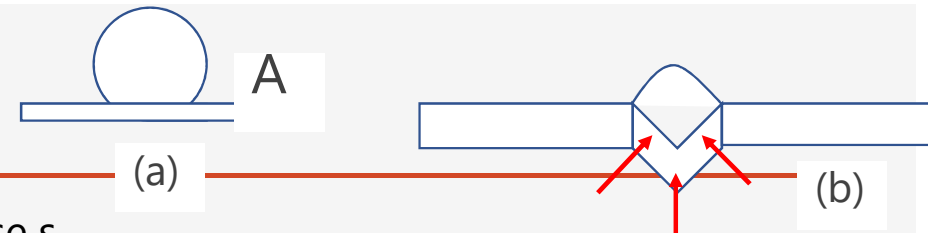
Ukoliko se pari stanja 5 i dalje dovodi toplina ona se ponaša poput plina i nazivamo ju **pregrijana para**.

Temperatura naglo raste, a raste i specifični volumen, što je prikazano daljnjim podizanjem klipa u trenutku 6.

(nastavak)

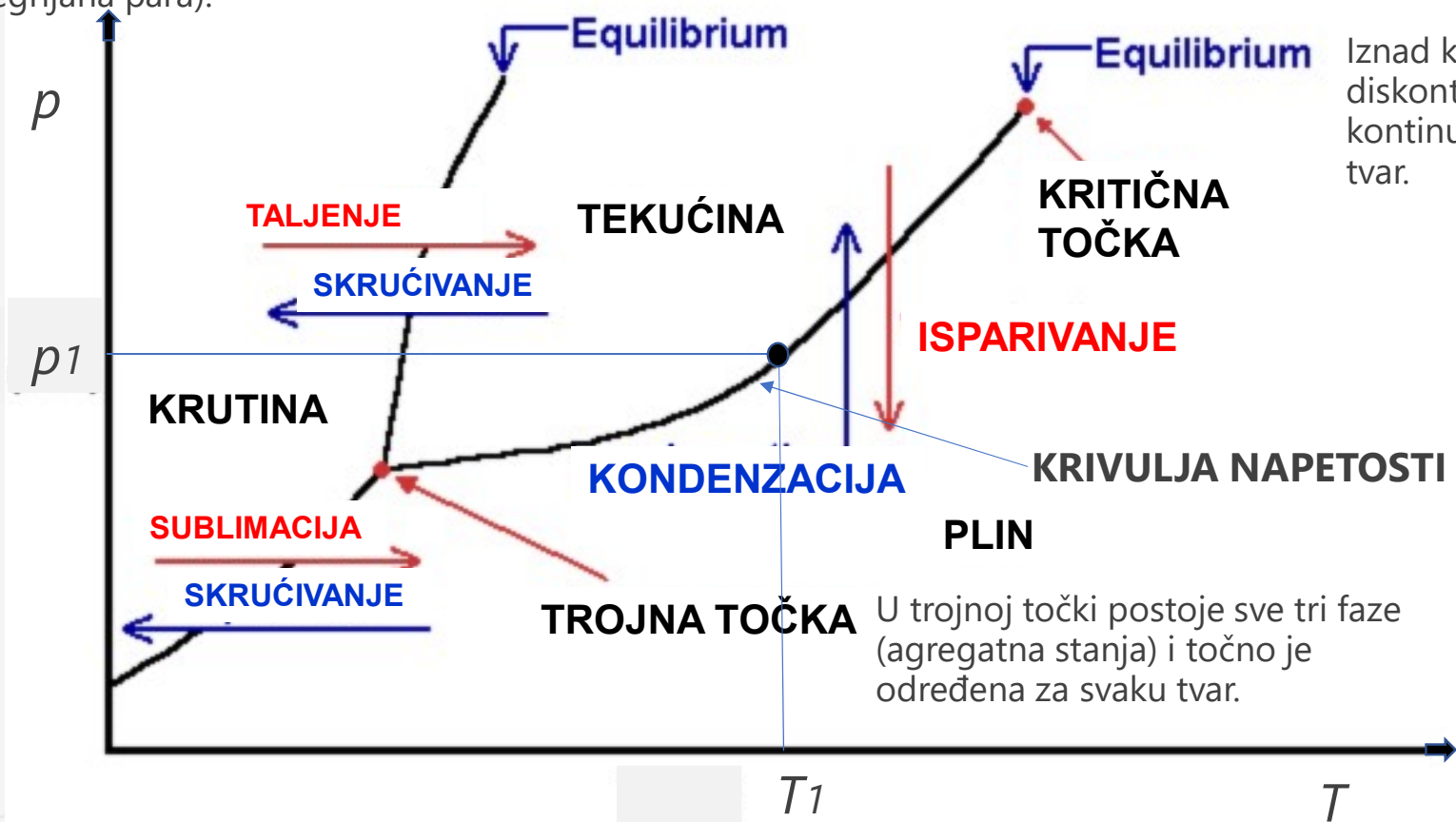
Sve (toplinske) veličine koje se odnose na trenutak 3 označavaju se s 'prim': v' , h' , s' . Kao što je utvrđeno, između trenutaka 3 i 5, dovedena toplina utrošila se je na isparivanje i mehanički rad.

Kako nastaje mjehurić na toploj površini A? Smatra se kako prvi mjehurići pare nastaju u mikroskopskim neravninama površine, kako to prikazuje slika (b). Kada se mjehurić pare dovoljno poveća, zbog uzgona se podiže sa zagrijane površine. Mjehurić pare mora imati nešto veći tlak, nego što je tlak okolne vode. Također, suprotno od prije navedenog, kako su tlak i temperatura konstantni dok sva tekućina ne ispari, budući se kroz opnu mjehurića događa izmjena mase (molekule vode prolaze kroz opnu), a ta je izmjena generirana temperaturnom razlikom, zaključujemo kako ipak mora postojati malo pregrijanje tekućine koje potiče prolaz molekula u unutrašnjost mjehurića. Za više tlakove vode morat će i pretlak mjehurića biti veći, no njegovo će širenje i time izvršen rad, biti manji pa će biti potrebno dovesti manje topline. Zaključak: **s porastom tlaka raste i toplina potrebna da se voda dovede do stanja zasićenja, ali pada toplina potrebna za isparivanje.**



Krivulja napetosti ili ravnotežna krivulja, trojna i kritična točka

Kod nekog tlaka p_1 temperatura će, uslijed dovođenja topline, rasti do krivulje napetosti i temperature T_1 , a nakon toga, temperatura ostaje konstantna dok sve ne ispari. Uslijed daljnjeg dovođenja topline, tvar prelazi u područje plinovite faze (pregrijana para).



Iznad kritične točke (K) nema diskontinuiteta, tj. faza – kontinuitet. Određena za svaku tvar.

U trojnoj točki postoje sve tri faze (agregatna stanja) i točno je određena za svaku tvar.

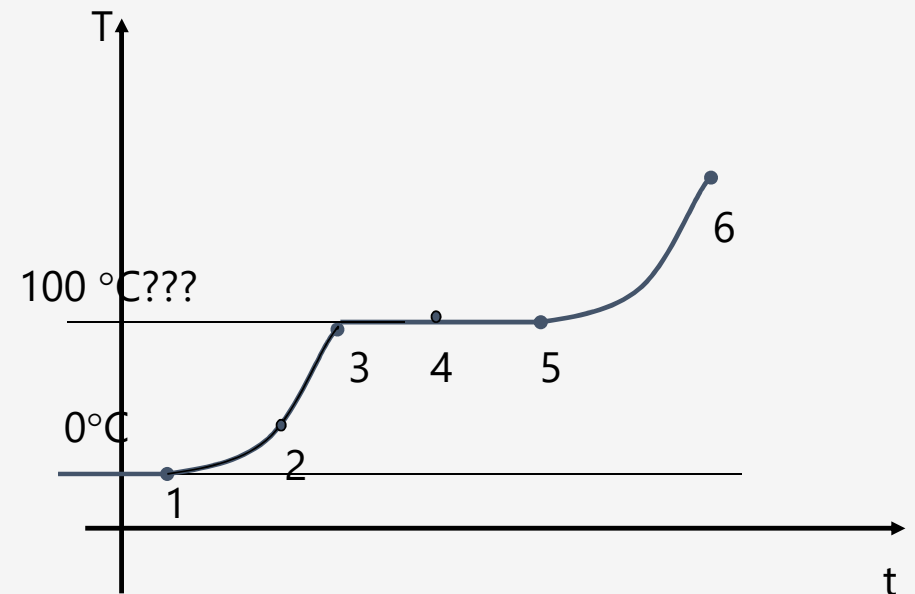
Plin	Kritične veličine stanja		
	t_k °C	P_k kg/cm ²	ρ_k kg/dm ³
Acetilen	35,7	64,7	0,231
Amonijak	132,4	115,2	0,235
Argon	-122,4	49,6	0,531
Difluor-diklor-metan	-111,5	40,9	0,555
Dušik	-147,1	34,6	0,311
Dušični oksid	-94,0	66,0	0,52
Etan	35	50,6	0,21
Helij	-267,9	2,33	0,069
Kisik	-118,8	51,4	0,43
Klor	144	78,5	0,573
Metan	-82,5	47,2	0,162
Ozon	-5,0	95,4	0,54
Sumporni dioksid	157,3	80,4	0,524
Ugljični dioksid	31,0	75,0	0,46
Ugljični monoksid	-140,2	35,6	0,301
Uzduh	-140,7	38,4	0,31
Vodik	-239,9	13,2	0,0310

Promjene stanja vode / pare – T-s dijagram

Promotrimo dijagram temperatura – vrijeme, pri čemu treba imati na umu da pretpostavljamo kontinuirano i jednoliko dovođenje topline u vremenu. Na njemu je krivulja koja reprezentira stanja prikazana slikom s početka teksta: 1 – voda, 2 – zagrijana voda, 3 – točka zasićenja, 4 – mokra para, 5 – suhozasićena para, 6 – pregrijana para. Temperature koje su navedene na ovoj slici odgovarale bi ukoliko bi masa pomičnog klipa bila jednaka nuli ili ukoliko bi s njegove gornje strane bio apsolutni vakuum. Tada bi tlak vode u posudi bio jednak atmosferskom, a tom tlaku odgovarale bi temperature ledišta i vrelišta vode koje su navedene.

Iz prijašnjih razmatranja jasno je da bi te vrijednosti bile više za više vrijednosti tlaka, a niže za niže vrijednosti tlaka.

Ukoliko bi se postupak snimanja karakterističnih točaka (3 i 5) ponavljao za različite tlakove, dobili bi točke (i krivulje) prikazane na sljedećoj slici.



Količina topline dovedena vodi/pari tijekom procesa od točke 2 do 6?

Razmjena topline kod isparivanja

Toplina zagrijavanja vode (1 do 2):

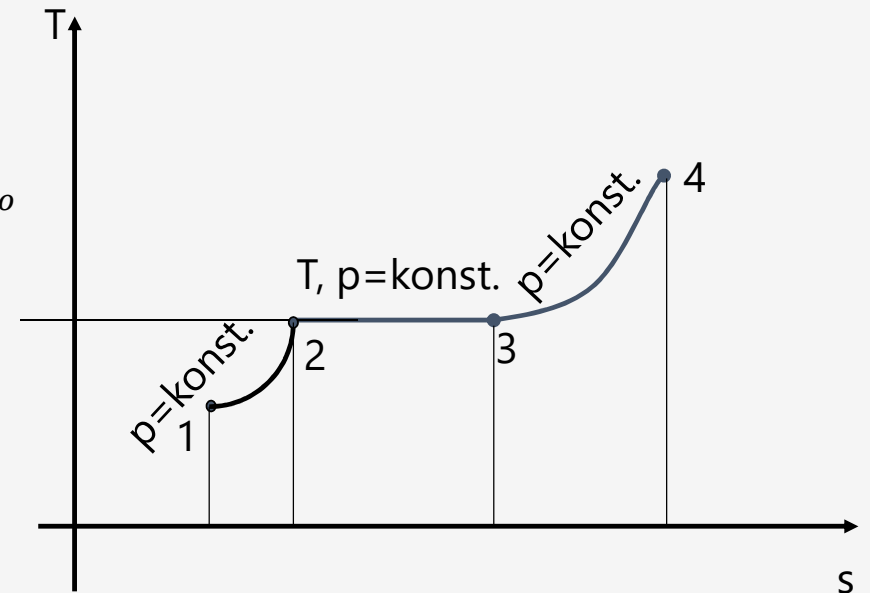
$$dq_v = c_v dT \Rightarrow q_v = \int_1^2 c_v dT$$

$$\text{Također, iz jednakosti } c_v dT = T ds \Rightarrow ds = c_v \ln \frac{dT}{T} \Rightarrow s_2 = c_v \ln \frac{T}{T_0} + s_0$$

Slično i za pregrijavanje $s_2 = c_v \ln \frac{T}{T_0} + s_0$. Linije zagrijavanja vode i pregrijavanja pare su logaritamske krivulje.

$$\text{Toplina isparivanja dana je izrazom } q_i = r = \int_2^3 T ds = T_s (s'' - s')$$

Toplina isparivanja se s porastom tlaka smanjuje te je u kritičnoj točki jednaka nuli jer je $s' = s''$.



T – s dijagram

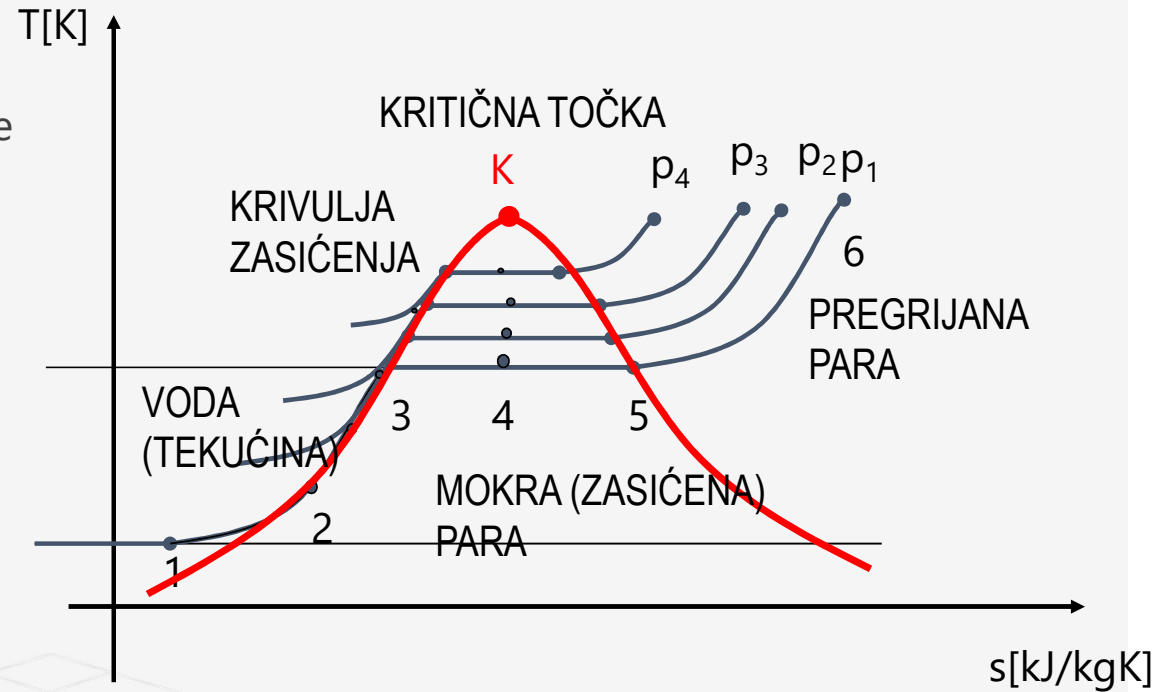
Ukoliko postupak ponovimo dovoljno precizno, povezivanjem točaka koje predstavljaju stanja vrele vode i točaka koje predstavljaju stanja pregrijane pare dobit ćemo krivulju zasićenja (crvena krivulja). Vrh krivulje je kritična točka o kojoj je već pisano.

Područje fluidnog stanja vode podijeljeno je na područje tekuće faze, mokre pare, pregrijane pare (plinovita faza) te nadkritično (superkritično) stanje.

S nadkritičnim stanjem rade neki rashladni procesi, poput onog s ugljičnim dioksidom kao radnom tvari, iako ima i brodskih generatora pare koji rade s nadkritičnim stanjima (npr. protočni Benson kotao).

Stanja tekućine i pregrijane pare jednoznačno su određena temperaturom i tlakom, no stanja mokre pare nisu. Zato je uveden, prije spomenuti pojam, sadržaj pare x (krivulje x nisu označene na dijagramu).

Sadržaj $x=0$ za stanje vrele vode, a $x=1$ za stanje suhozasićene pare. Stanja suhozasićene pare označavaju se s: v'' , h'' , s'' , i za sve važnije tehničke tvari dana su, uz stanja vrele vode, u toplinskim tablicama, pa se stanja mokre pare mogu odrediti poznavajući sadržaj pare x prema izrazima danim desno:



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

$$u = u' + x(u'' - u')$$

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

$$h = h' + x(h'' - h') \text{ ili } h = h' + xr, \text{ gdje je } r = h'' - h' \text{ toplina isparavanja}$$

Napetost površine

Napetost površine ima značajan utjecaj na neke (neželjene) pojave u uređajima koje koristimo na brodu.

Što se događa s mjehurićima pare koji se odvoje od površine na kojoj su nastali ili s onima koji su nastali u cijevi nekog isparivača (npr. ozračeni ili konvektivni isparivač generatora pare)? Zbog manje gustoće plinovite faze na mjehurić djeluje uzgon, podižući ga prema površini posude. Ukoliko se radi o strujanju u cijevi, mjehurić putuje brže u odnosu na okolnu tekućinu. Cijelim putem mjehurić raste jer se proces izmjene tvari kroz opnu nastavlja, a dolazi i do spajanja manjih mjehurića u veće.

Nakon što se podigne do razine tekućine u posudi (parnom bubnju, generatoru slatke vode), mjehurić i dalje raste, u jednom trenutku puca, te od opne nastaju male kapljice tekuće faze. U gore spomenutim uređajima koriste se različite metode kojima se nastoji spriječiti odvođenje tih kapljica s parom (separatori kapljica). Međutim, ukoliko dođe do porasta napetosti površine, može doći do pjenjenja, što dovodi do povećanog odvođenja tekućine (u generatorima pare to se zove odnošenje, engl. carry over). Do porasta spomenute fizikalne veličine kod generatora pare može doći zbog kontaminacije napojne vode teretom (ako se para koristi za grijanje tereta i cijevi propuštaju) ili porasta slanosti (kotlovske vode ili rasoline u generatoru slatke vode kod previše intenzivne destilacije).

Primjeri, korištenje toplinskih tablica za vodenu paru

1. Promotrite topline isparivanja – Što uočavate?
2. Promotrite specifične volumene v' i v'' , tj. obrnuto proporcionalne veličine – gustoće ρ' i ρ'' . Kako se odnose?
3. Koliko iznosi temperatura zasićenja za tlak (str. 95) od 5,1 bar?
4. Izračunajte specifični volumen pare sadržaja $x=0,9$ tlaka $p=8,1$ bar!
5. Očitajte sadržaj topline h (entalpiju) pregrijane pare 550°C i tlaka 14 bar!
6. Očitajte i izračunajte entropiju s pregrijane pare temperature 207°C i tlaka 8 bar!

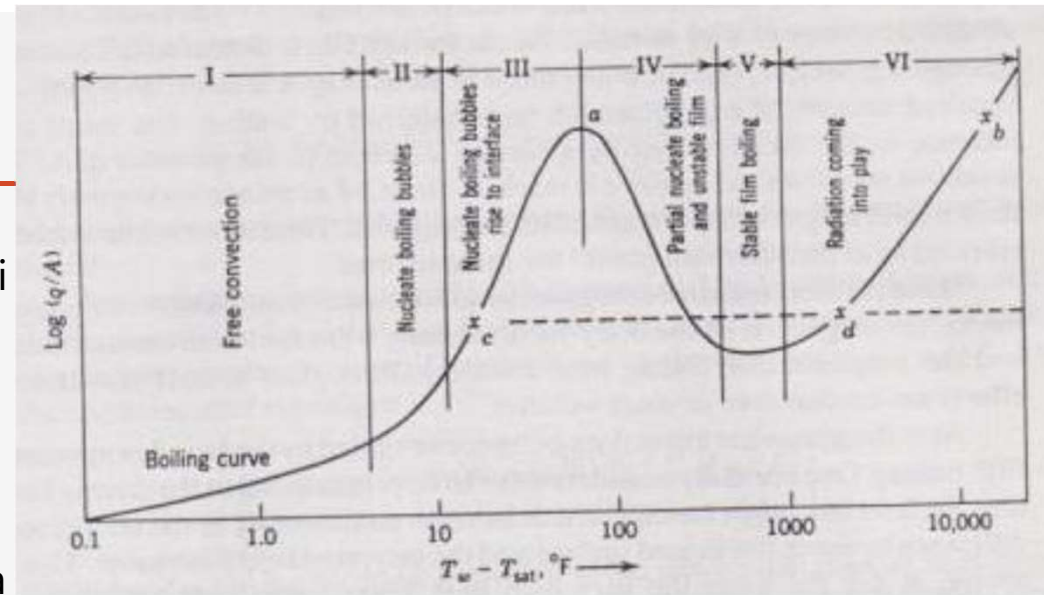
Izmjena topline kod isparivanja

Mogu se uočiti dva osnovna tipa isparivanja. Jedan se odnosi na protočni fluid (engl. flow boiling) i za se brodske strojare čini interesantnijim. Kod drugog se radi o isparivanju u posudi (bazen, engl. pool boiling).

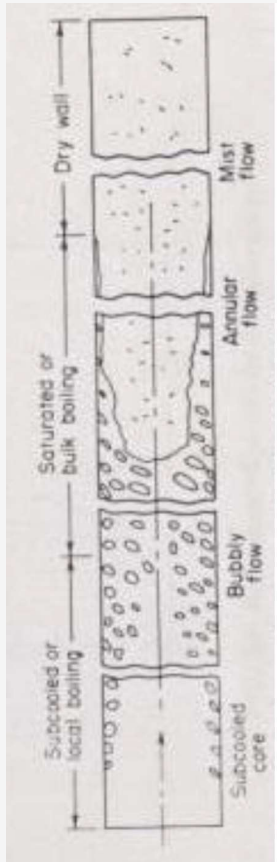
Dijagram na susjednoj slici prikazuje režime isparivanja u posudi u kojoj nema fluida, a zagrijavanje fluida ostvaruje se električnom žicom. Horizontalno postavljena žica je uronjena u fluid koji ima temperaturu zasićenja. Na apscisi je temperaturna razlika žice i temperature zasićenja fluida, dok je na ordinati prikazan toplinski tok (flux).

Postoji šest očitih područja isparivanja, no ovdje ih nećemo razmatrati.

Za pogonskog inženjera može biti značajan taj intenzitet prijelaza topline. Generatori pare s višim toplinskim opterećenjem mogu biti efikasniji, manji, ali zahtijevaju kvalitetniju napojnu vodu jer će 'nečistoće' dovesti do brzog nastanka kamenaca na stjenkama isparivačkih cijevi i više težih eksploatacijskih problema. Slično je i s generatorom slatke vode.



(nastavak)

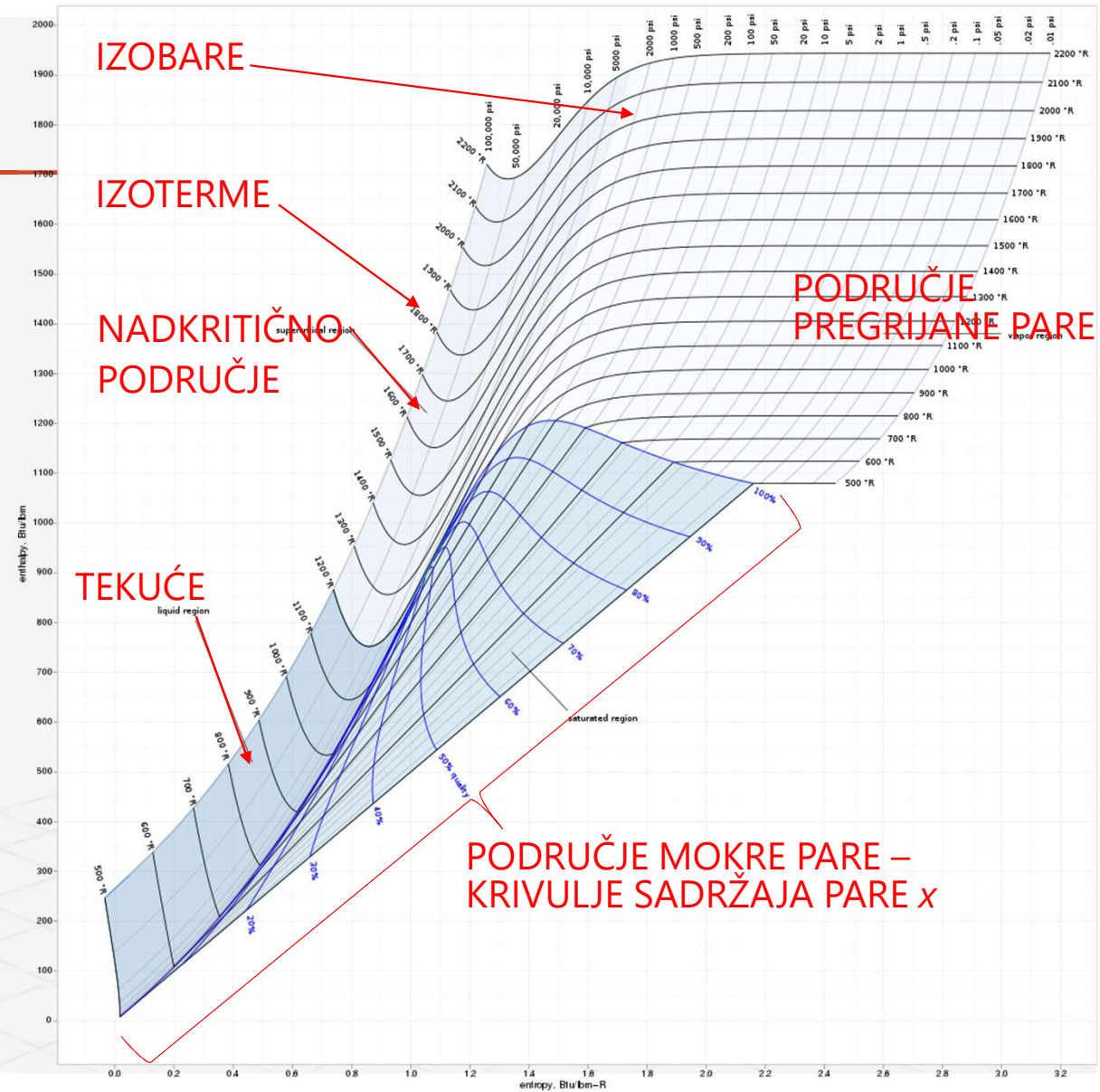


Režim strujanja u vertikalnoj zagrijavanoj cijevi uz promjenu faze kakav je prikazan na slici pored značajniji je za uređaje kakve imamo u brodskoj strojarnici: isparivačke cijevi generatora pare ili cijevi (kanali) generatora slatke vode.

$h - s$ dijagram

$h - s$ dijagram koristit će se kod parno-turbinskih procesa!

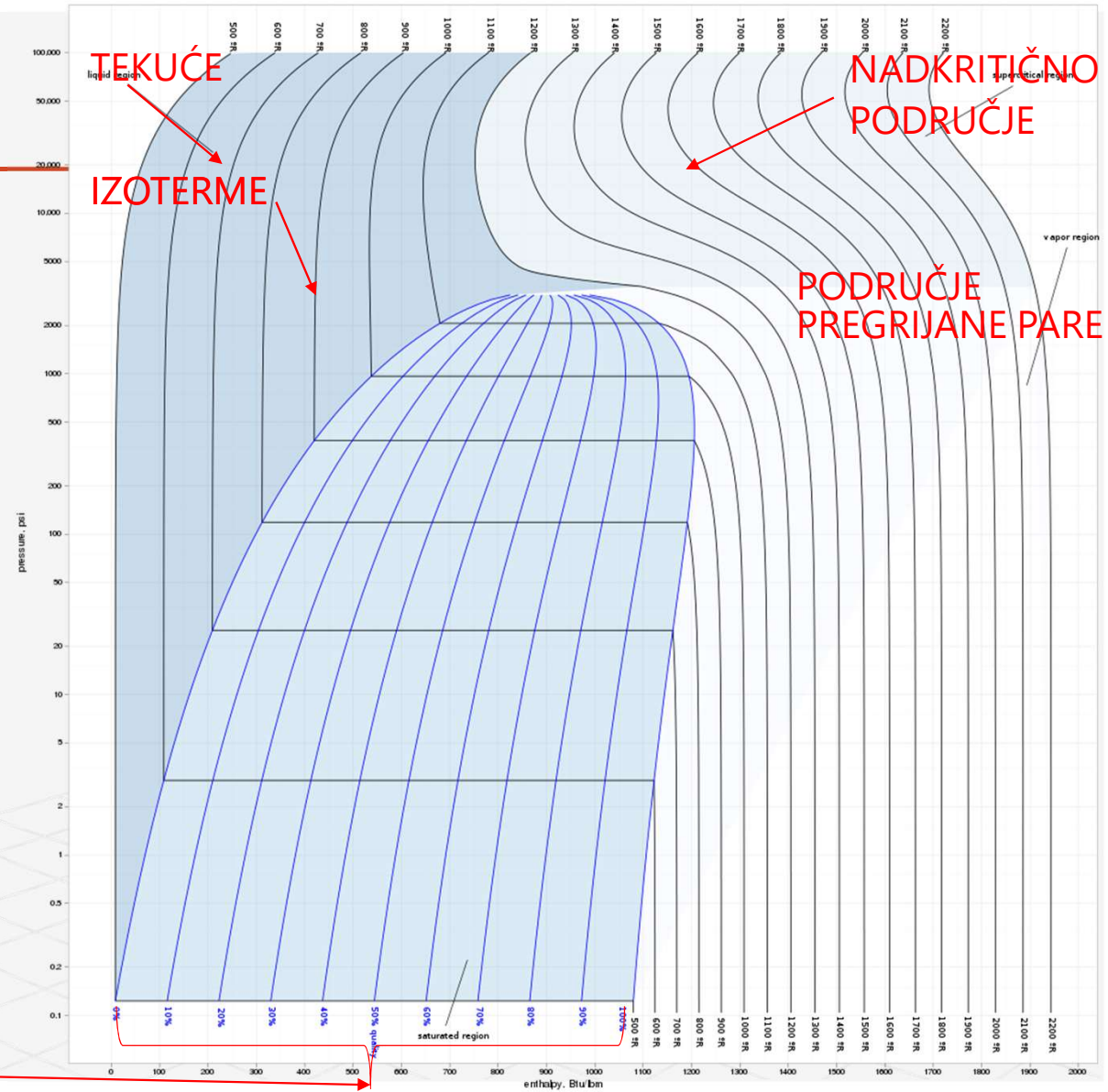
Zgodno je količinu topline koja se predaje vodi ili pari očitavati kao duljinu dužine, a ne kao površinu.



$p - h$ dijagram

$p - h$ dijagram koristit ćemo u drugom dijelu, u kojem će biti riječi o rashladnim procesima.

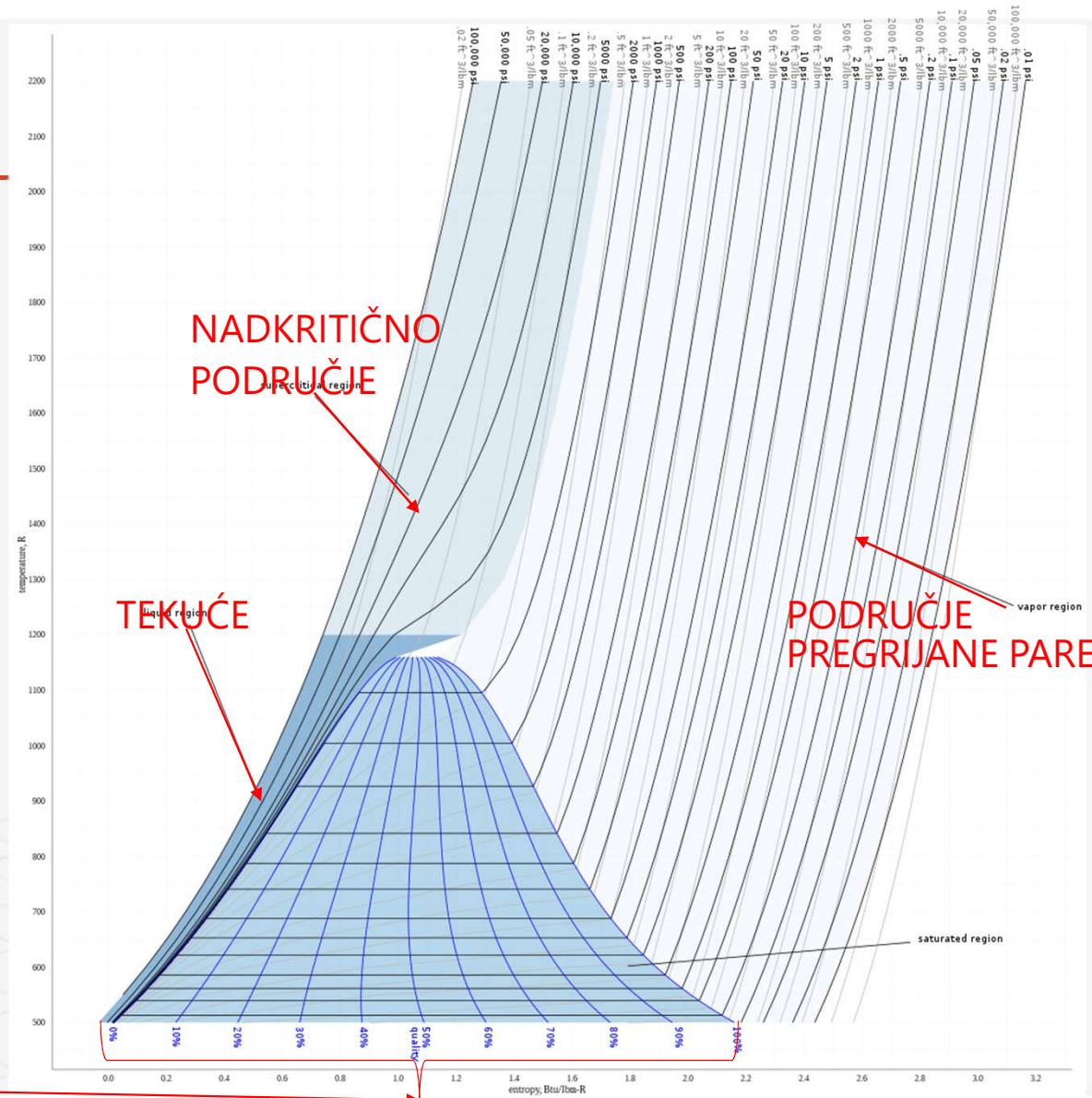
I ovdje je lako očitati razliku entalpija!



PODRUČJE MOKRE PARE -
KRIVULJE SADRŽAJA PARE x

T – s dijagram

T – s dijagram koristi ćemo kao osnovni alat za prikaz promjena stanja vode – pare, tj. desno-kretnih kružnih procesa s parom kao radnom tvari!



PODRUČJE MOKRE PARE –
KRIVULJE SADRŽAJA PARE x

Clapeyron-Clausius-ova jednačba

Pogledajmo u $T - s$ i $p - v$ dijagramima beskonačno mali kružni proces!

$dL = T(s'' - s')$ ili $dL = (v'' - v')dp$, a budući znamo kako je

$r = T(s'' - s')$ izjednačavanje i uvođenje prethodne supstitucije daje $r = T(v'' - v') \frac{dp}{dT}$

Gornji izraz predstavlja **drugi glavni stavak za vodenu paru**, a omjer dp/dT predstavlja nagib krivulje napetosti!

Promjene stanja

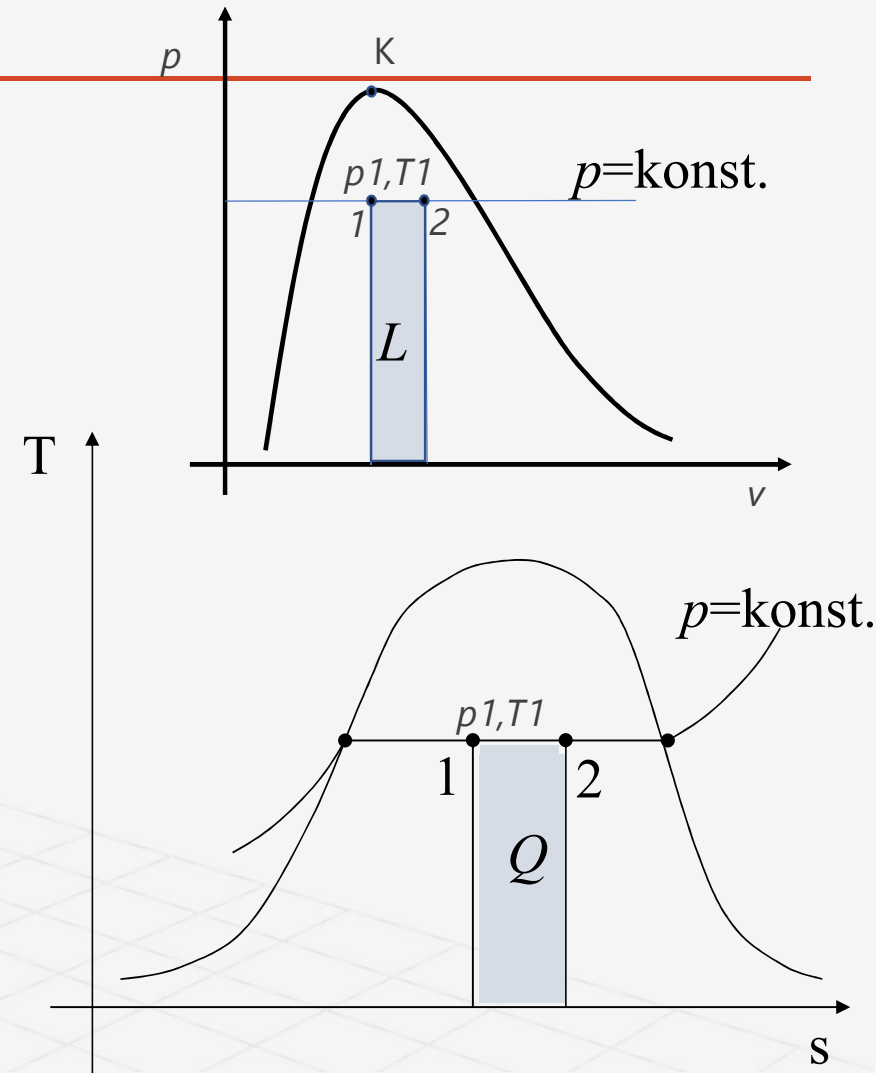
IZOBARNA PROMJENA STANJA

$$L = \int p dv = p(v_2 - v_1) = p(v'' - v')(x_2 - x_1)$$

$$Q = \int T ds = T(s_2 - s_1) = T(s'' - s')(x_2 - x_1)$$

Budući je $r = T(s'' - s')$ slijedi

$$Q = r \frac{(v_2 - v_1)}{(v'' - v')}$$



Promjene stanja

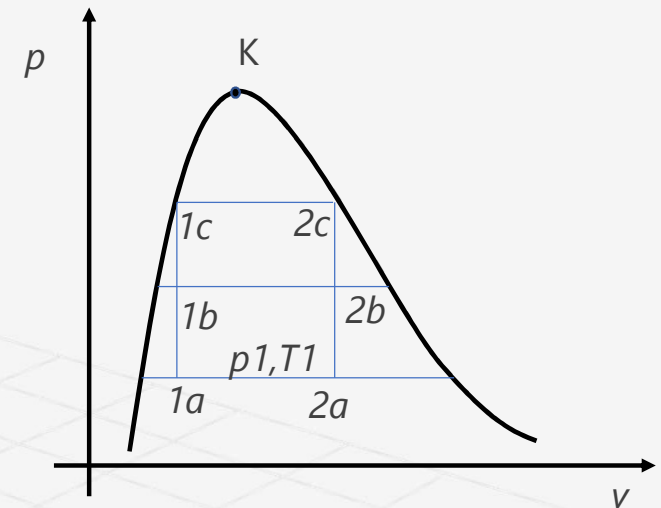


IZOHORNA PROMJENA STANJA

Posuda na slici pored sadrži mokru paru. Zbog veće gustoće $1-x$ [kg/kg] tekuće faze nalazi se u donjem dijelu, dok je vrh posude ispunjen s x [kg/kg] plinovite faze. Posudi dovodimo toplinu. Radi se o čeličnoj posudi pa je jasno da će se raditi o izohornoj promjeni stanja ($v=\text{konst.}$).

Ukoliko je stanje mokre pare u posudi (tlak p_1 i temperatura T_1) blizu donje (lijeve) granične krivulje, dovođenjem topline sadržaj pare se smanjuje ($1a \rightarrow 1b \rightarrow 1c$).

Međutim, ukoliko je stanje mokre pare na početku zagrijavanja blizu gornje granične krivulje, sadržaj pare raste ($2a \rightarrow 2b \rightarrow 2c$).

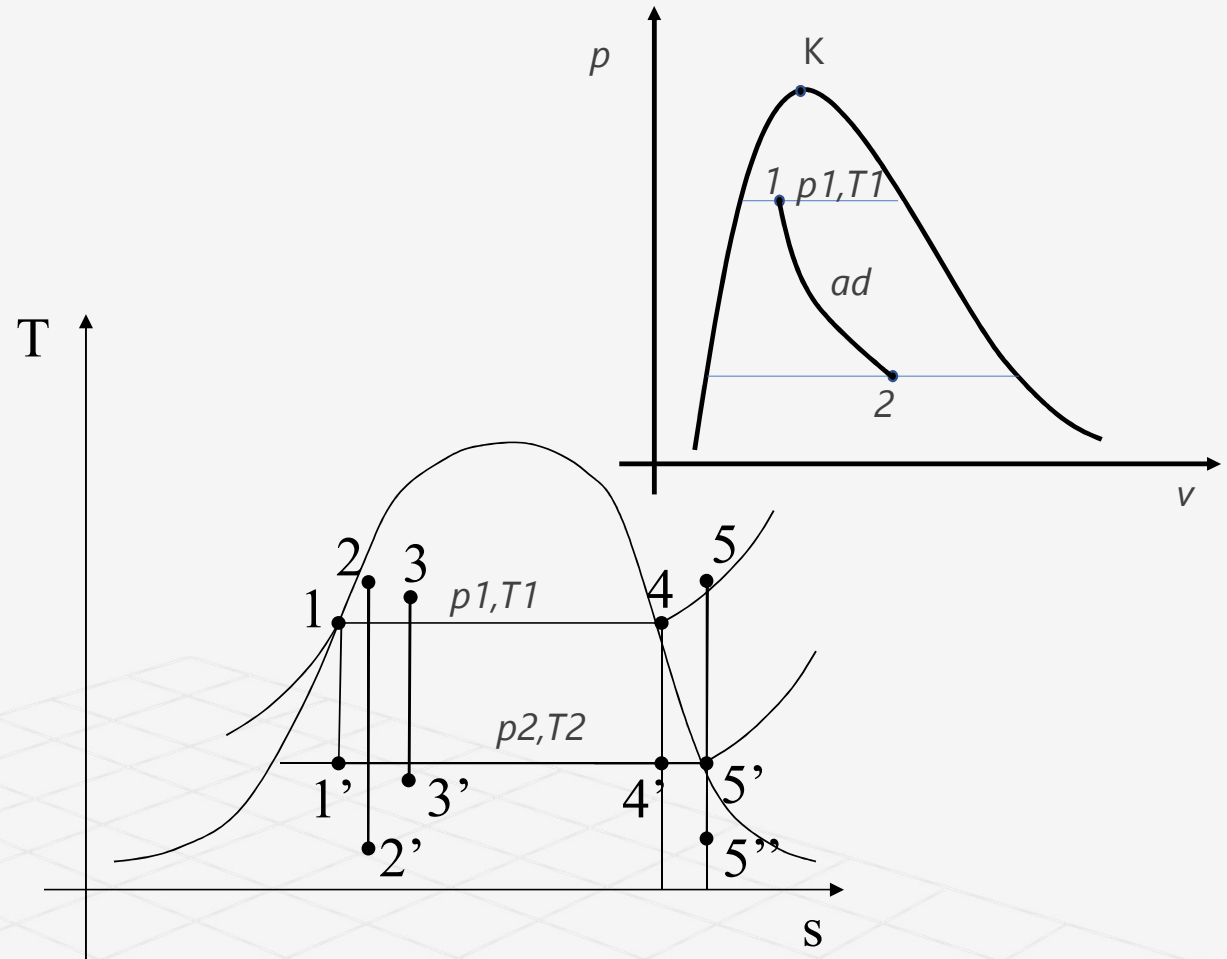


Promjene stanja

ADIJABATSKA PROMJENA STANJA ($Q=0$, $s=\text{konst.}$)

Ekspanzijom u niže tlakove stanja bliže donje granične krivulje prelaze u stanja s većim sadržajem pare (1 u 1', 2 u 2', 3 u 3'), dok se stanjima koja se na početku ekspanzije nalaze bliže gornjoj graničnoj krivulji sadržaj vrele vode, tj. smanjuje se sadržaj pare (4 u 4').

Pregrijana para ekspanzijom se pretvara u suhozasićenu paru (5 u 5'), a daljnjom ekspanzijom postaje mokra para (ima udio vode – 5'').



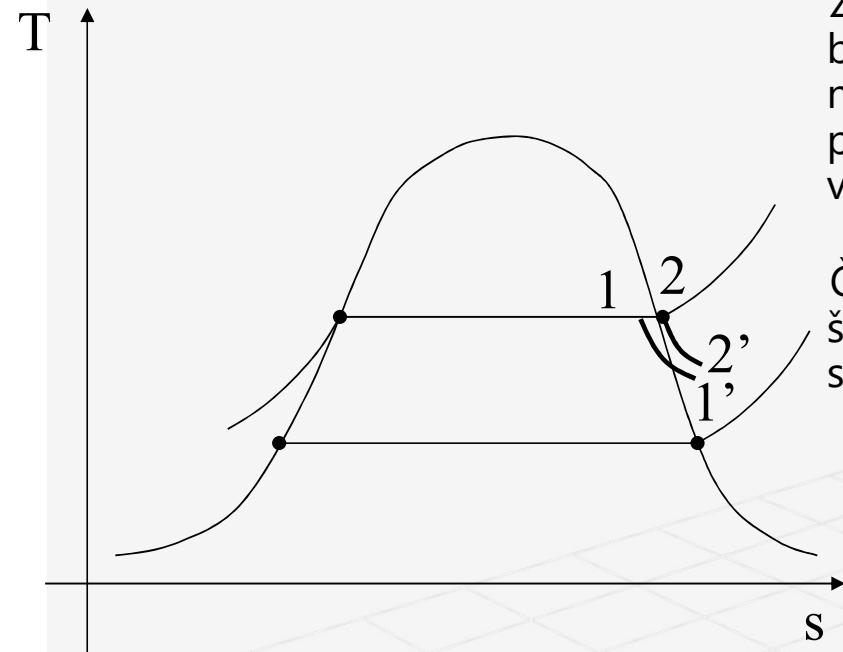
Promjene stanja

PRIGUŠIVANJE ($h = \text{konst.}$)

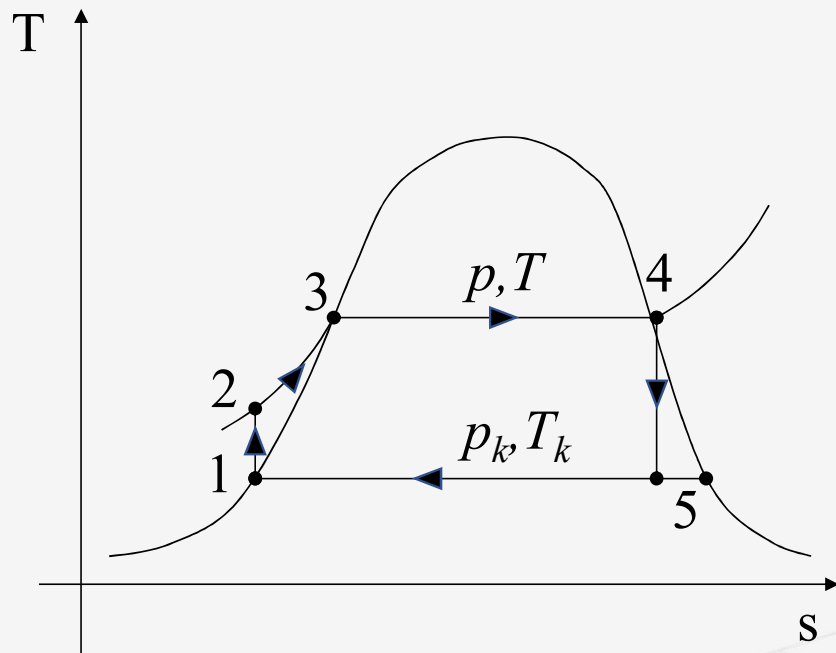
Proces koji se realno dešava u svim elementima cjevovoda.

Zamislamo stanje (2) koje se teoretski postiže na izlazu iz parnog bubnja generatora pare – stanje suhozasićene pare. Prolazeći kroz neke elemente cjevovoda dolazi do pada tlaka (prigušivanja), što je promjena stanja karakterizirana konstantnom entalpijom. Dakle, vrijedi $h_2 = h_{2'}$, no para stanja 2' je u pregrijanom području.

Čak kada uzmemo u obzir realno stanje na izlazu iz parnog bubnja, što znači da para nije suhozasićena već je vlažna ($x < 1$), prigušivanjem se može postići stanje pregrijane pare 1'.



Kružni procesi s parom



Suhozasićeno stanje na izlazu iz generatora pare!

Realno, ako se radi o manjim snagama.

1 – 2: rad pumpe; 2 – 3: zagrijavanje vode; 3 – 4: isparivanje; 4 – 5: parni stroj; 5 – 1: kondenzacija

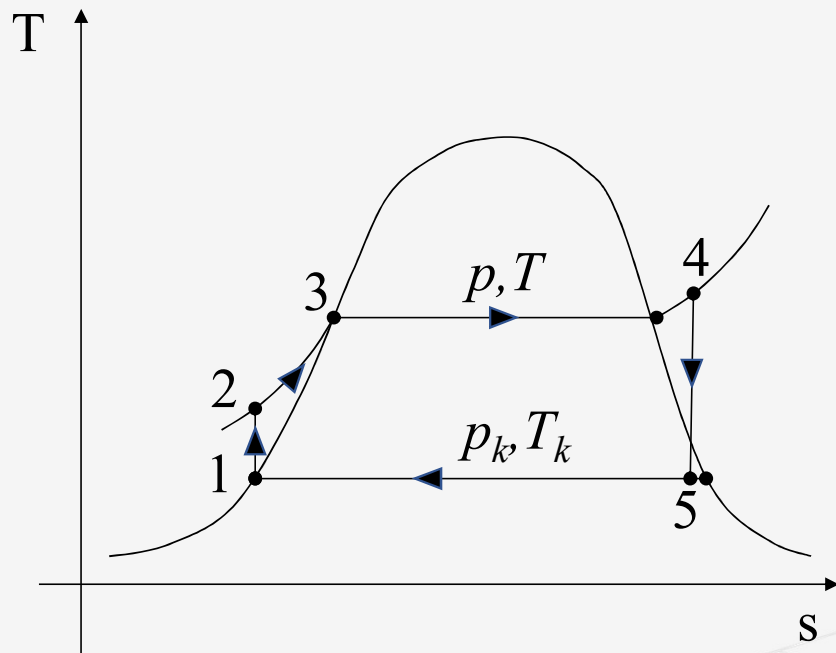
U odnosu na druge procese, rad pumpe je daleko manjeg reda veličine te se u proračunima može zanemariti pa bi takav pojednostavljeni kružni proces bio određen točkama 1-3-4-5-1.

Zadatak: Primjenom toplinskih tablica za vodenu paru, izračunajte jedinične topline zagrijavanja vode, isparivanja, rad te stupanj iskoristivosti za slučaj procesa koji radi između tlakova $p=10$ bar i $p_k=1$ bar!

Napomene: U zagrijaču vode rijetko se postiže zasićeno stanje (3). U tom se slučaju zove **predisparivač**. Najčešće se radi o stanju vode koje se na krivulji $p=\text{konst.}$ nalazi malo niže od točke 3. Također, iako postoje odjeljivači kapljica, na izlazu iz parnog bubnja para nije suhozasićena, već ima mali sadržaj tekućine (vode).

Rješenje

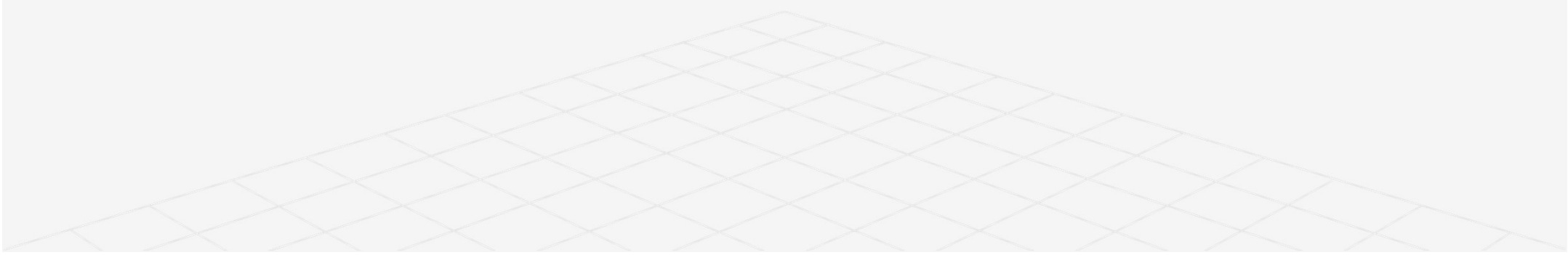
Proces s pregrijanom parom



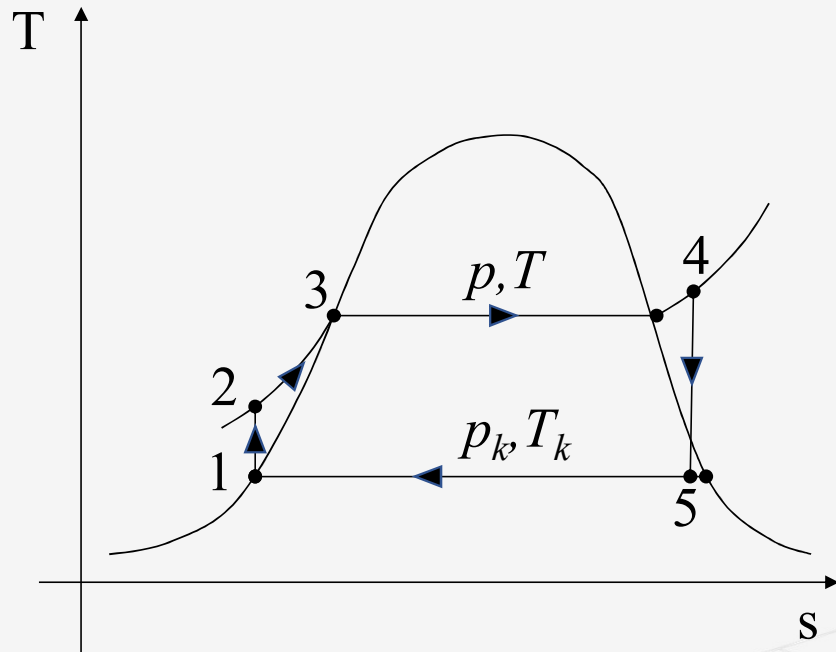
Kada je potrebno ostvariti veći toplinski pad (Δh), tj. snagu turbine, para se pregrijava u pregrijaču i ekspandira do vakuuma. Dakle, kondenzator nije atmosferski kao u prethodnom slučaju, već vakuumski. Pretpostavit ćemo jednak tlak $p=10$ bar i 80%-ni vakuum u kondenzatoru. S kojim ćemo vakuumom u stvarnosti moći raditi, ovisi o temperaturi morske vode kojom se para ukapljuje. Također, para se pregrijava na 260°C .

Rješenje

Moguća poboljšanja parno-turbinskog ciklusa

1. Povećanje tlaka generatora pare
 2. Povećanje temperature pregrijane pare
 3. Regenerativno predgrijavanje napojne vode
 4. Međupregrijavanje pare
 5. Sniženje tlaka kondenzacije
- 

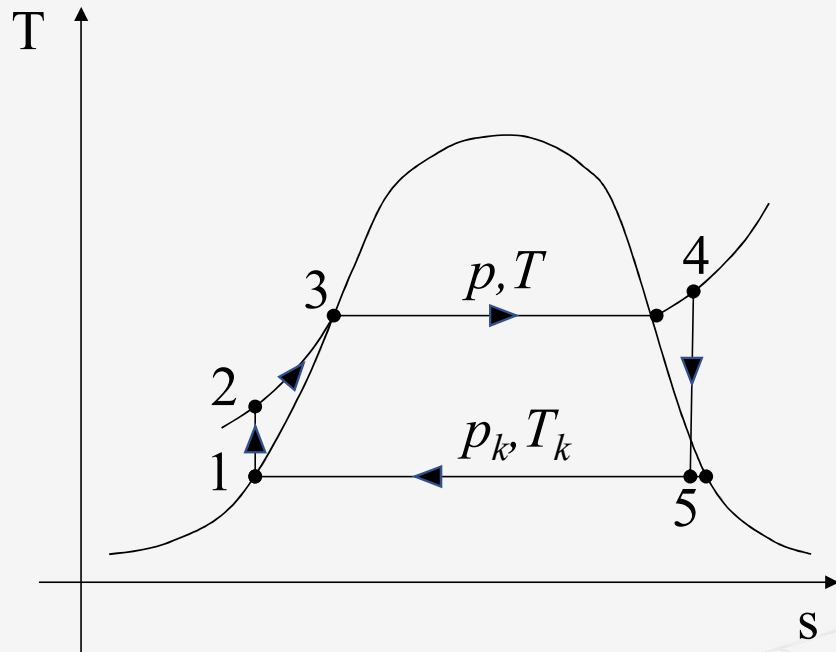
Proces s pregrijanom parom – poboljšanje višim tlakom



Kada je potrebno ostvariti veći toplinski pad (Δh), tj. snagu turbine, para se pregrijava u pregrijaču i ekspandira do vakuuma. Dakle, kondenzator nije atmosferski kao u prethodnom slučaju, već vakuumski. Pretpostavit ćemo tlak $p=20$ bar i 80%-ni vakuum u kondenzatoru. S kojim ćemo vakuumom u stvarnosti moći raditi, ovisi o temperaturi morske vode kojom se para ukapljuje. Također, para se pregrijava na 260°C . U odnosu na prethodni slučaj, sve su veličine iste, ali kotao radi s dvostruko višim tlakom.

Rješenje

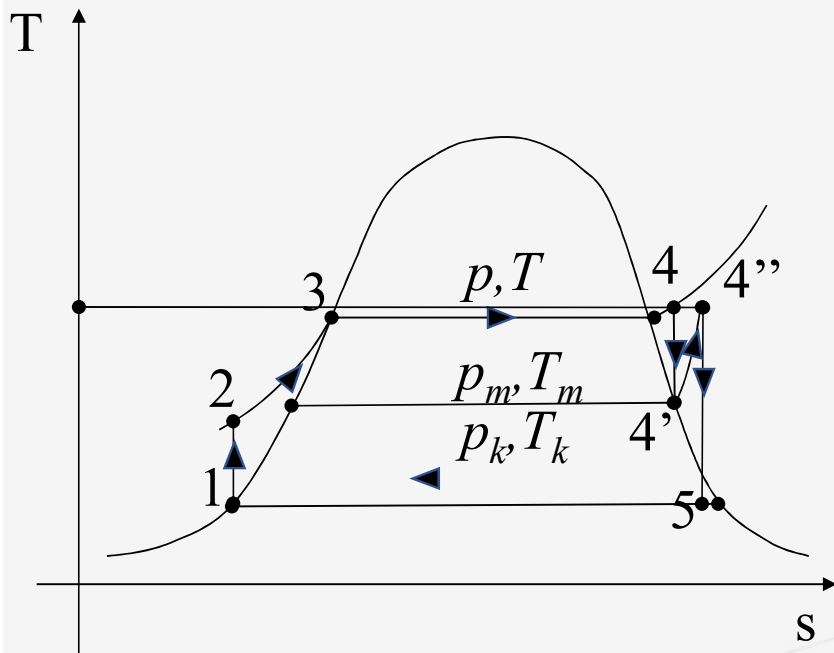
Proces s pregrijanom parom – poboljšanje višom temperaturom



Kada je potrebno ostvariti veći toplinski pad (Δh), tj. snagu turbine, para se pregrijava u pregrijaču i expandira do vakuuma. Dakle, kondenzator nije atmosferski kao u prethodnom slučaju, već vakuumski. Pretpostavit ćemo jednak tlak $p=20$ bar i 80%-ni vakuum u kondenzatoru. S kojim ćemo vakuumom u stvarnosti moći raditi, ovisi o temperaturi morske vode kojom se para ukapljuje. Međutim, para se pregrijava na 550°C . U odnosu na prethodni slučaj, sve su veličine iste, ali kotao radi sa znatno višom temperaturom.

Rješenje

Proces s pregrijanom parom – poboljšanje dvotlačnom (dvokučišnom) turbinom i međupregrijanjem



Kada je potrebno ostvariti veći toplinski pad (Δh), tj. snagu turbine, para se pregrijava u pregrijaču i ekspandira do vakuuma. Dakle, kondenzator nije atmosferski kao u prethodnom slučaju, već vakuumski. Pretpostavit ćemo jednak tlak $p=20$ bar i 80%-ni vakuum u kondenzatoru. S kojim ćemo vakuumom u stvarnosti moći raditi, ovisi o temperaturi morske vode kojom se para ukapljuje. Međutim, para se pregrijava na 550°C . U odnosu na prethodni slučaj, sve su veličine iste, ali para najprije ekspandira u visokotlačnom kućištu do međutlaka i stanja suhozasićene pare, zatim se dogrijava na početnu temperaturu ($T_4=T_{4''}$), a zatim ekspandira do istog vakuuma.

Rješenje

Povećanje rada (toplinskog pada) povećanjem potlaka



Primjeri pitanja na kolokviju

T↑