

Proces	Diagram p, V	Enačbe za izračun toplotnega izkoristka
Diesel	<p>17.16</p>	$\eta_{\text{topl}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{\kappa(T_3 - T_2)} \quad 17-10 = 17-7$ $\eta_{\text{topl}} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\kappa \cdot (\varphi - 1)} \quad 17-11$
Otto	<p>17.17</p>	$\eta_{\text{topl}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad 17-12$ $\eta_{\text{topl}} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \quad 17-13$
Seiliger	<p>17.18</p>	$\eta_{\text{topl}} = 1 - \frac{T_5 - T_1}{T_3 - T_2 + \kappa \cdot (T_4 - T_3)} \quad 17-14$
Joule	<p>17.19</p>	$\eta_{\text{topl}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad 17-15$ $\eta_{\text{topl}} = 1 - \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad 17-16$
Ackeret-Keller (Ericsson)	<p>17.20</p>	$\eta_{\text{topl}} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad 17-17$
Stirling	<p>17.21</p>	$\eta_{\text{topl}} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad 17-18$
Carnot	<p>17.22</p>	$\eta_{\text{topl}} = 1 - \frac{T_4}{T_2} \quad 17-19$



Na sliki 18.18 pomenijo:

ploskev 1 - 6 - 11 - 12 - 1 → toplotna energija  $Q_{6,1}$ , ki se odvzema hladilnemu prostoru (pri procesu hladilnih strojev) oz. okolici (pri procesu toplotnih črpalk).

ploskev 1 - 2 - 3 - 4 - 8 - 1 → kompresijsko (mehansko) delo  $W_p$ , ki ga porabi kompresor.

ploskev 12 - 2 - 3 - 4 - 5 - 10 - 12 → celotna energija, ki jo pravzama delovno sredstvo (hladilno sredstvo), okolici pa odbejajo hladilnik para, kondenzator in podhladilnik, tj.  $Q_{12} = Q_{6,1} + W_p$ .

Toplotna energija, ki se dovaja parnemu kotelu, je zgorovalna toplota (fosilna goriva), ki pa pridobiva tudi s pretvarjanjem elektronske ali atomske energije.

Na sliki 18.15 so koristno delo  $W_c$ , tor oz. odvedena toplotna energija prikazani kot ploskva. Slika 18.16 v mirilu še enkrat prikazuje koristnega dela v primerjavi s porabljenimi energijami. Po definiciji za  $\eta_{sp}$  obimo

$$\eta_{sp} = \frac{W_c}{Q_1} = \frac{W_c + W_{0,31}}{Q_1 + Q_{67}} < 1 \quad [18-21]$$

Če pri delovanju parnega stroja  $n$  a prigrato paro, so tudi pri delovanju parnega hladilnega stroja v napravi potrebni mnogi agregati. Prikazani so na sliki 18.17, na sliki 18.18 pa je prikazan ustrezen diagram  $T, s$ .



Na sliki 18.18 pomenijo:

ploskev 1 - 6 - 11 - 12 - 1 → toplotna energija  $Q_{6,1}$ , ki se odvzema hladilnemu prostoru (pri procesu hladilnih strojev) oz. okolici (pri procesu toplotnih črpalk).

ploskev 1 - 2 - 3 - 4 - 8 - 1 → kompresijsko (mehansko) delo  $W_p$ , ki ga porabi kompresor.

ploskev 12 - 2 - 3 - 4 - 5 - 10 - 12 → celotna energija, ki jo pravzama delovno sredstvo (hladilno sredstvo), okolici pa odbejajo hladilnik para, kondenzator in podhladilnik, tj.  $Q_{12} = Q_{6,1} + W_p$ .

Neposredno iz tega sledi, da sta ploskvi 5 - 8 - 7 - 5 in 6 - 7 - 10 - 11 - 6 enako veliki. Ustrežata dušilnim izgubam  $W_0$ . Ta vrednost energije se odvzema hladilnemu sredstvu pri sušenju. Del kapljevitega hladilnega sredstva pri tem izpari že pred izparilnikom, kar imenujemo nastajanje plina (flashgas). Vrednosti za to potrebne toplotne energije ne moramo več odtegniti hladilnemu prostoru, torej gre za izgubljeno energijo.

Po definiciji za hladilno oz. grelno število  $\varepsilon$  dobimo s slike 18.18

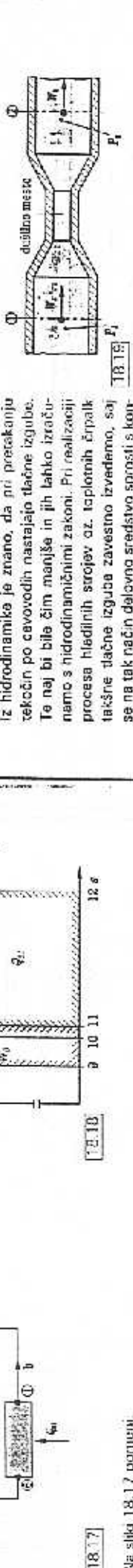
$$\varepsilon_k = \frac{Q_{6,1}}{W_p} \quad [18-22]$$

$$\varepsilon_w = \frac{Q_{12}}{W_p} \quad [18-23]$$

hladilno število za idealno hladilno strojo

grelno število za idealno toplotno črpalko

18.4.3.1.1 Dušenje



Z dušenjem dosežemo (določen) tlačni padec pretakajoča se tekočina.

Slika 18.19 kaže shematski prikaz dušilnega mesta, ki povzroči znižanje tlaka z mesta ① do mesta ②, to ja

$$p_1 < p_2$$

Kar se med mestoma ① in ② energija ne dovaja in ne odvaja, lahko predpostavljamo, da je na obeh mestih vsota vseh energij enaka. Tako (ob zanemarjanju tornih izgub) velja:

Kinetična energija + tlačna energija + notranja energija + potencialna energija = konst.

Opomba: Ko primerjamo sliki 18.17 in 18.18, ugotovimo malenkostne ploskovne razlike, ki jih po eni strani povzroča črpalka, po drugi pa dušilni organ. Če glade na to označujemo obe procesa kot Clausius-Rank

na sliki 18.17 pomenijo:

a: uparjalnik → toplotna energija  $Q_1$ , se odvzema iz prostora s  $T_w$

b: cevovod za hladno paro

c: kompresor → mehanska energija  $W_c$ , se dovaja

d: cevovod za prigrato paro

e: hladilnik para → toplotna energija  $Q_2$ , se oddaja

f: kondenzator (kapljevnik) → toplotna energija  $Q_{2,3}$ , se oddaja

g: podhladilnik → toplotna energija  $Q_{2,5}$ , se oddaja

h: kapljevinski cevovod visokotlačnega telesa

i: dušilni organ → tlak nek (glej slika 18.4.3.1.1)

j: kapljevinski cevovod nizkotlačnega telesa

Na sliki 18.17 pomenijo:

a: uparjalnik → toplotna energija  $Q_1$ , se odvzema iz prostora s  $T_w$

b: cevovod za hladno paro

c: kompresor → mehanska energija  $W_c$ , se dovaja

d: cevovod za prigrato paro

e: hladilnik para → toplotna energija  $Q_2$ , se oddaja

f: kondenzator (kapljevnik) → toplotna energija  $Q_{2,3}$ , se oddaja

g: podhladilnik → toplotna energija  $Q_{2,5}$ , se oddaja

h: kapljevinski cevovod visokotlačnega telesa

i: dušilni organ → tlak nek (glej slika 18.4.3.1.1)

j: kapljevinski cevovod nizkotlačnega telesa

TERMIČNI IZKORISTEK BRAYTONOVEGA PROCESA

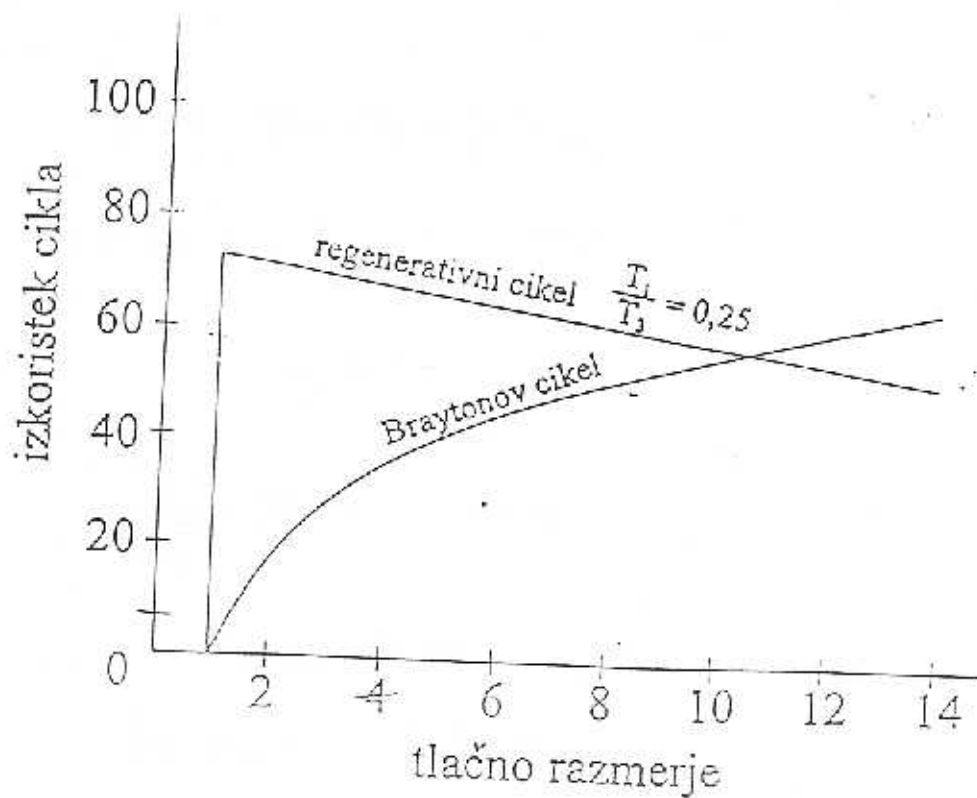
$$\eta = 1 - \frac{c_p \cdot (T_4 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1 \cdot \left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{T_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)}$$

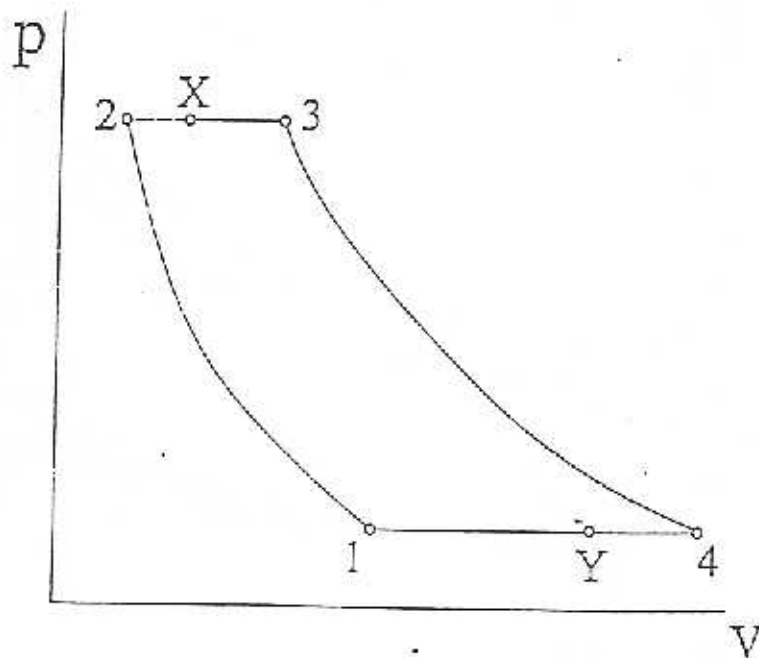
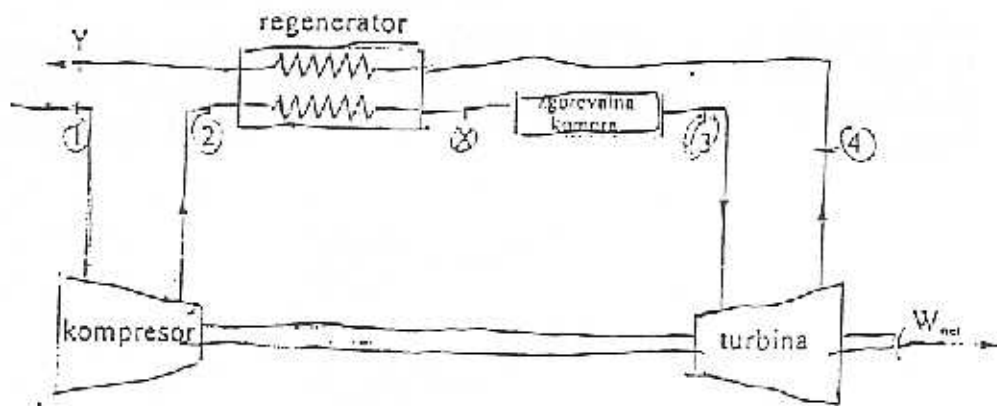
$$\frac{p_3}{p_4} = \frac{p_2}{p_1} \quad \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \frac{p_3}{p_4} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

$$\eta = 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}$$

Izkoristek Braytonovega cikla je funkcija izentropskega razmerja.



PREPOST CIKEL PLINSKE TURBINE Z REGENERATORJEM



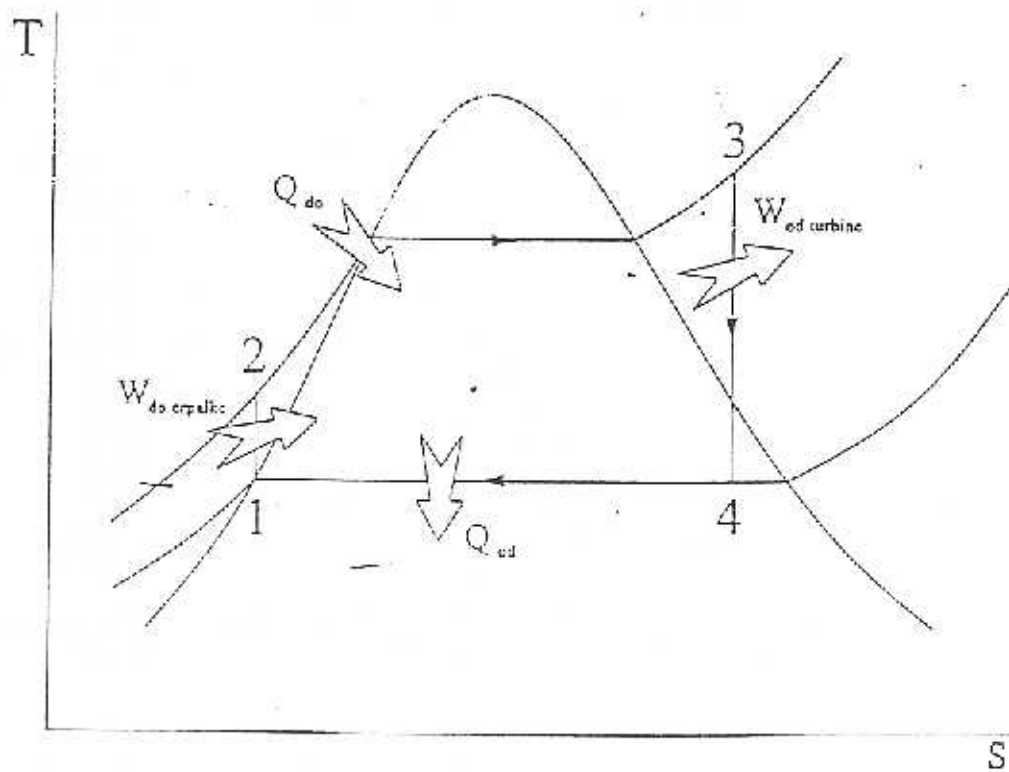
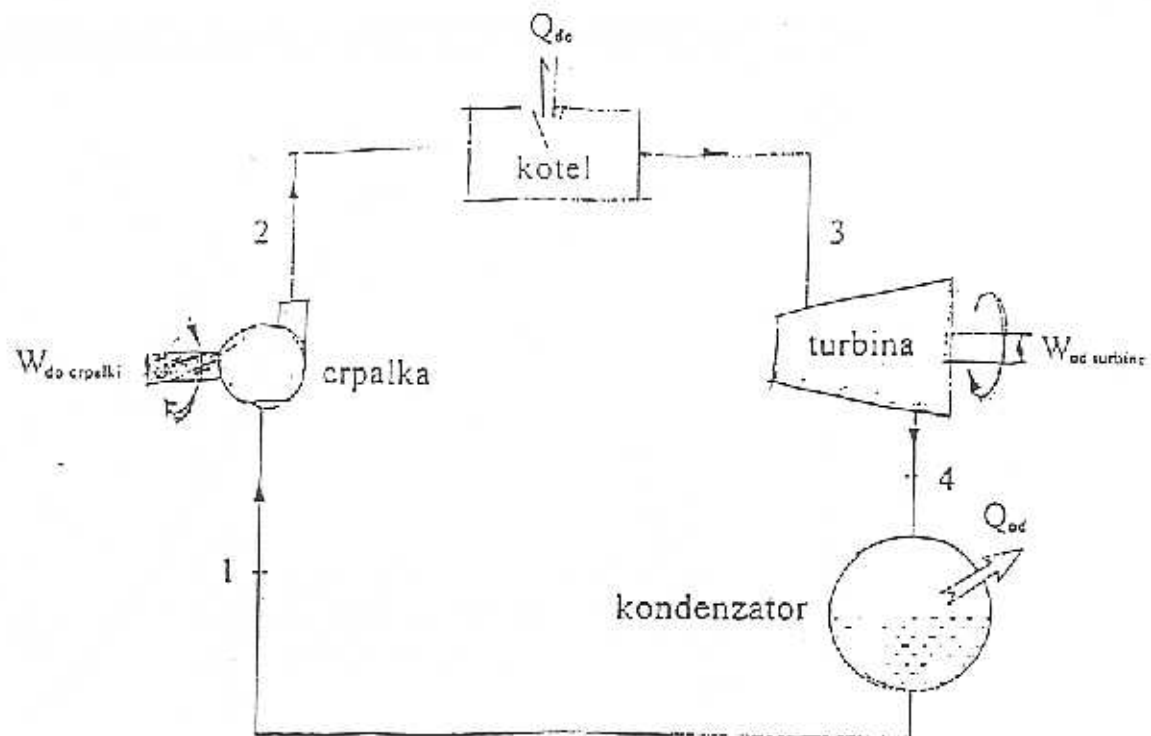
Če predpostavimo, da je  $c_p = \text{konst.}$ , lahko zapišemo izkoristek takega cikla kot:

$$\eta_{th} = \frac{c_p \cdot (T_3 - T_4) - c_p \cdot (T_2 - T_1)}{-c_p \cdot (T_3 - T_2)}$$

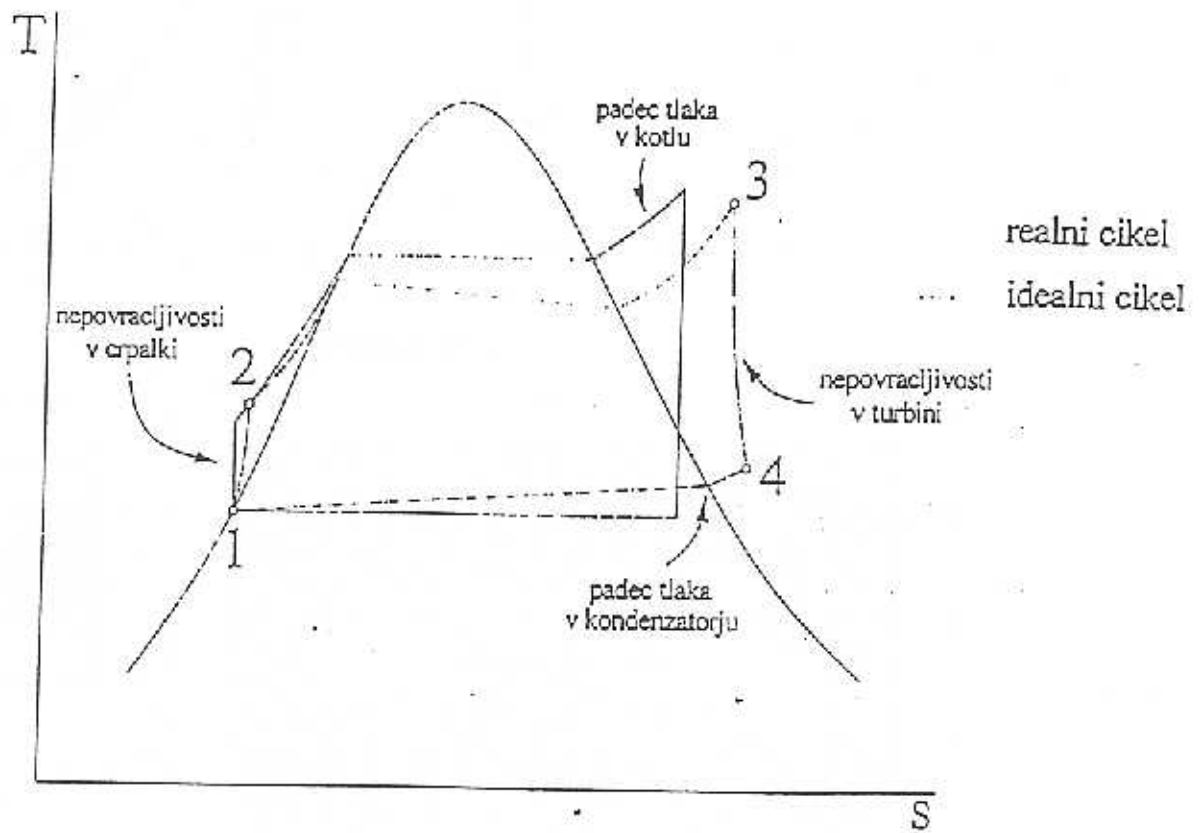
Za idealni regenerator bi bilo  $T_4 = T_x$  (i. e.,  $c_h = w_c$ ) in tako:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{c_p \cdot (T_2 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_4)} \quad \text{ali pa} \quad \eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

PREPROST RANKINOV CIKEL

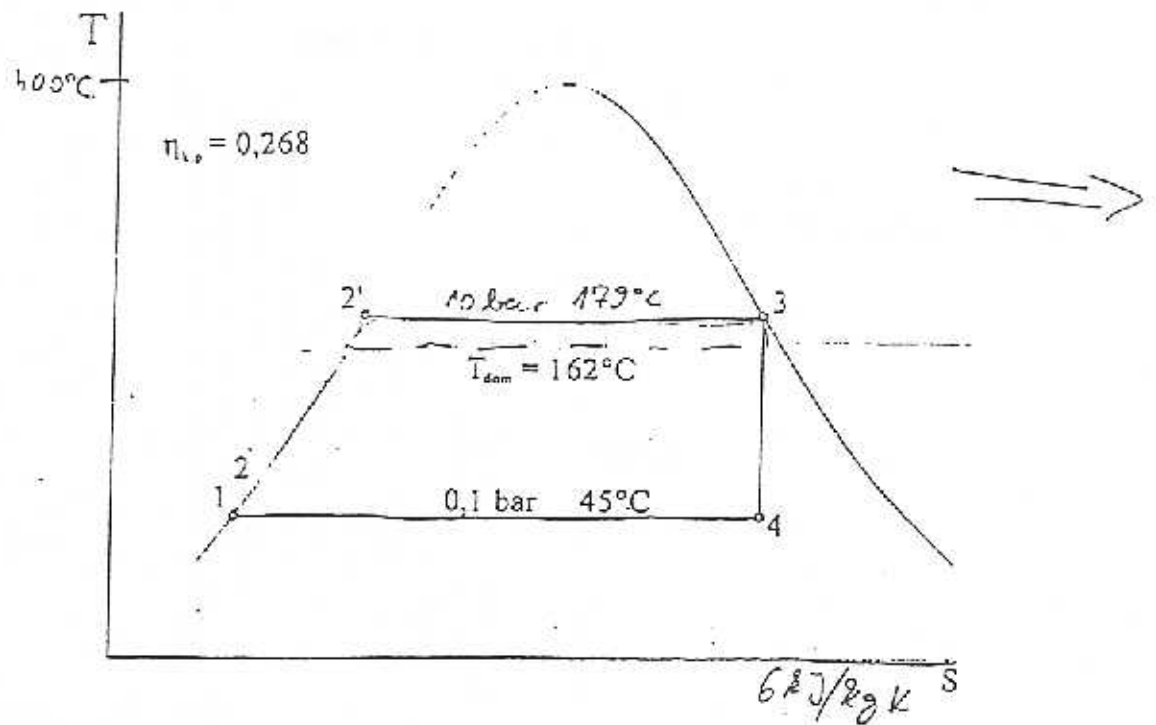


PRIMERJAVA REALNEGA IN IDEALNEGA PROCESA (RANKIN) V T, s  
DIAGRAMU

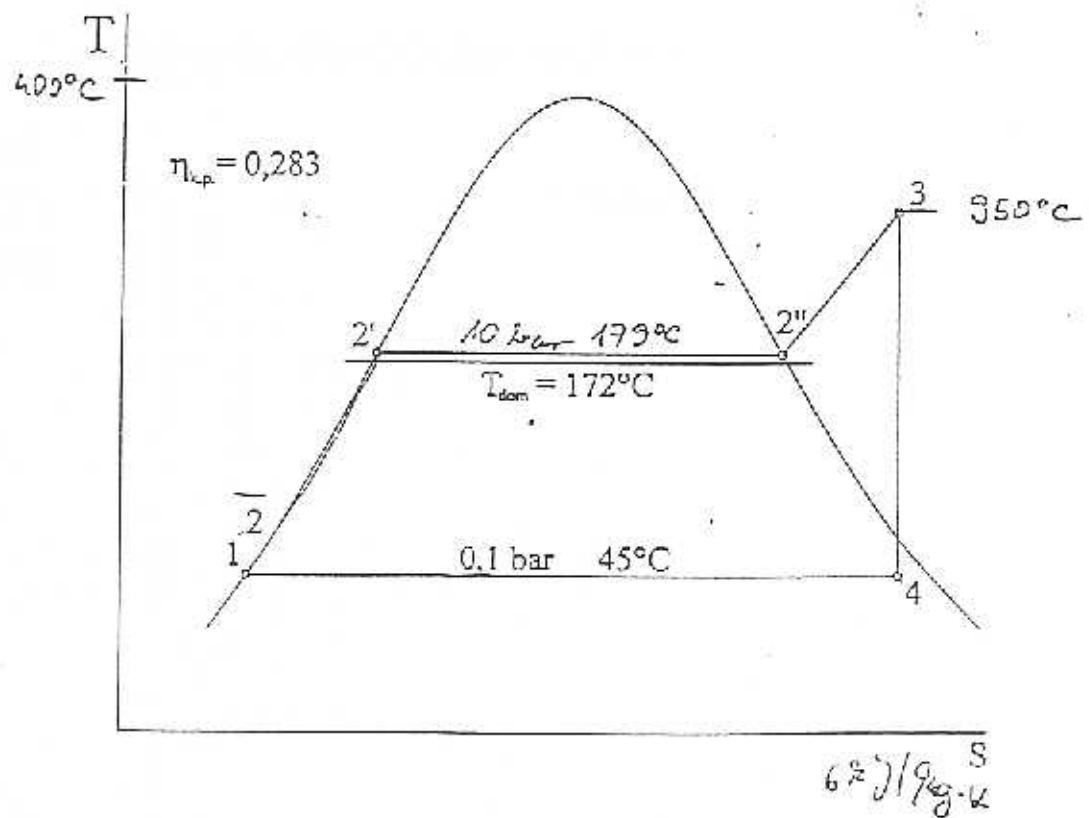




PRIMER IZBOLJŠANJA IZKORISTKA Z ENOJNIM PREGREVANJEM



Parni proces z enojnim pregrevanjem vodne pare

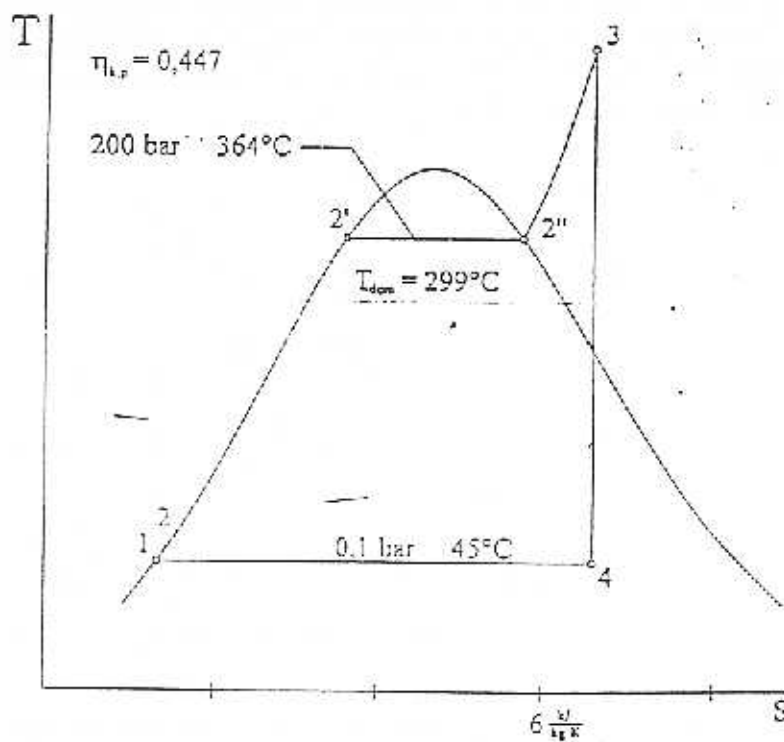
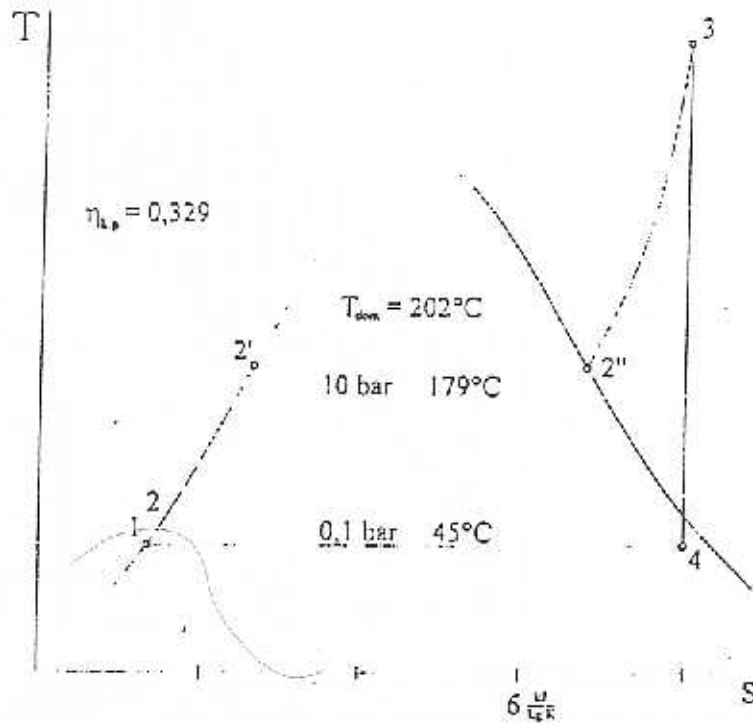




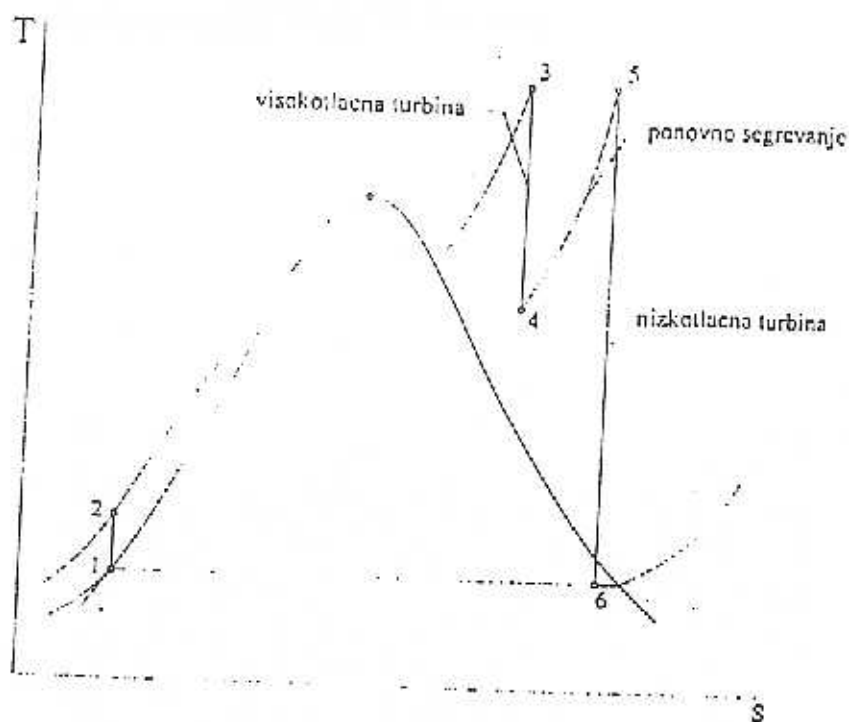
ŠE DVA PRIMERA IZBOLJŠANJA IZKORISTKA

I. primer:

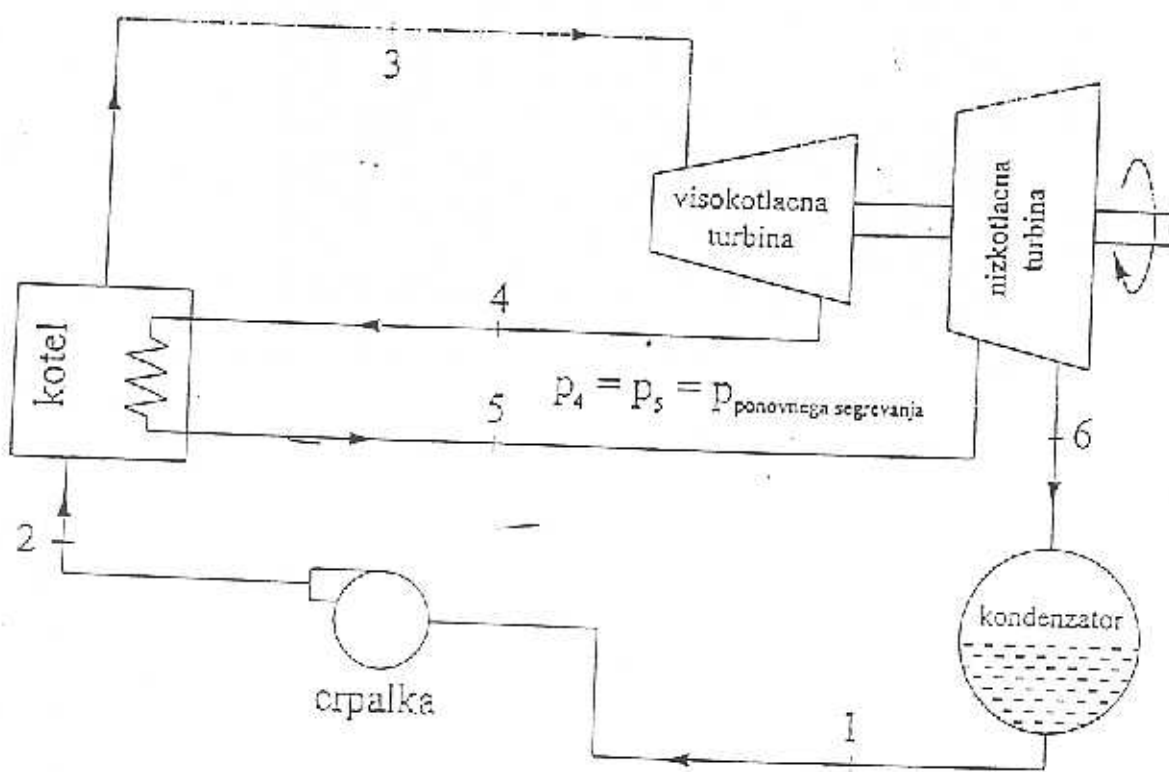
Izkoristek lahko povečamo tudi s tem, da se čim manj časa nahajamo v dvofaznem področju – voda-para (heterogenost je, kot že vemo, indikator nepovračljivosti oz. padca izkoristka).



POVEČANJE IZKORISTKA Z DVOJNIM PREGREVANJEM VODNE PARE

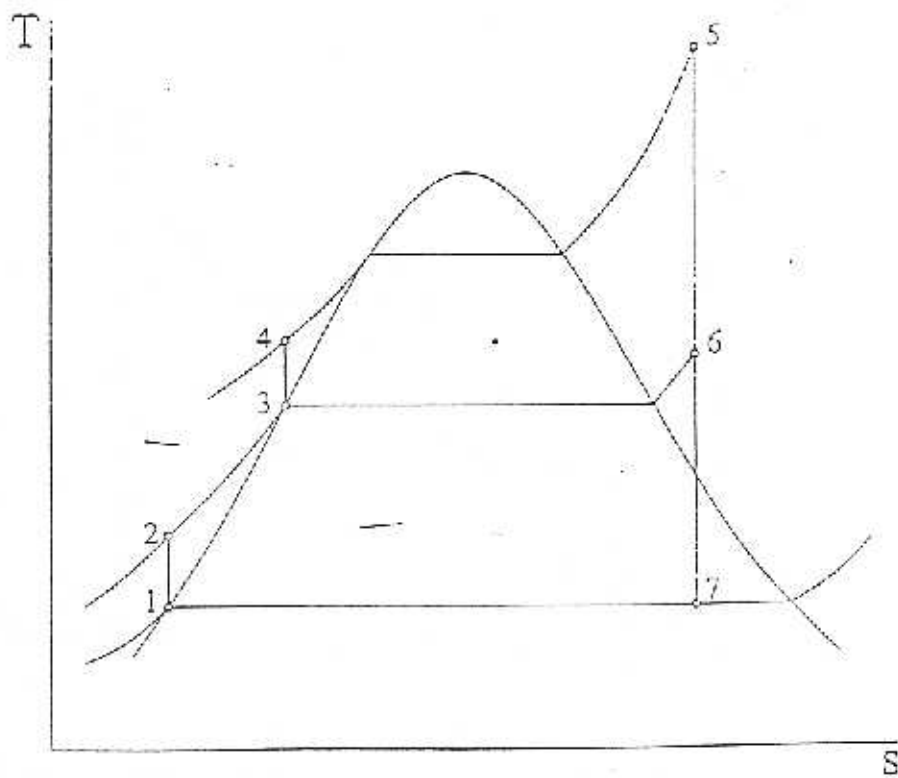
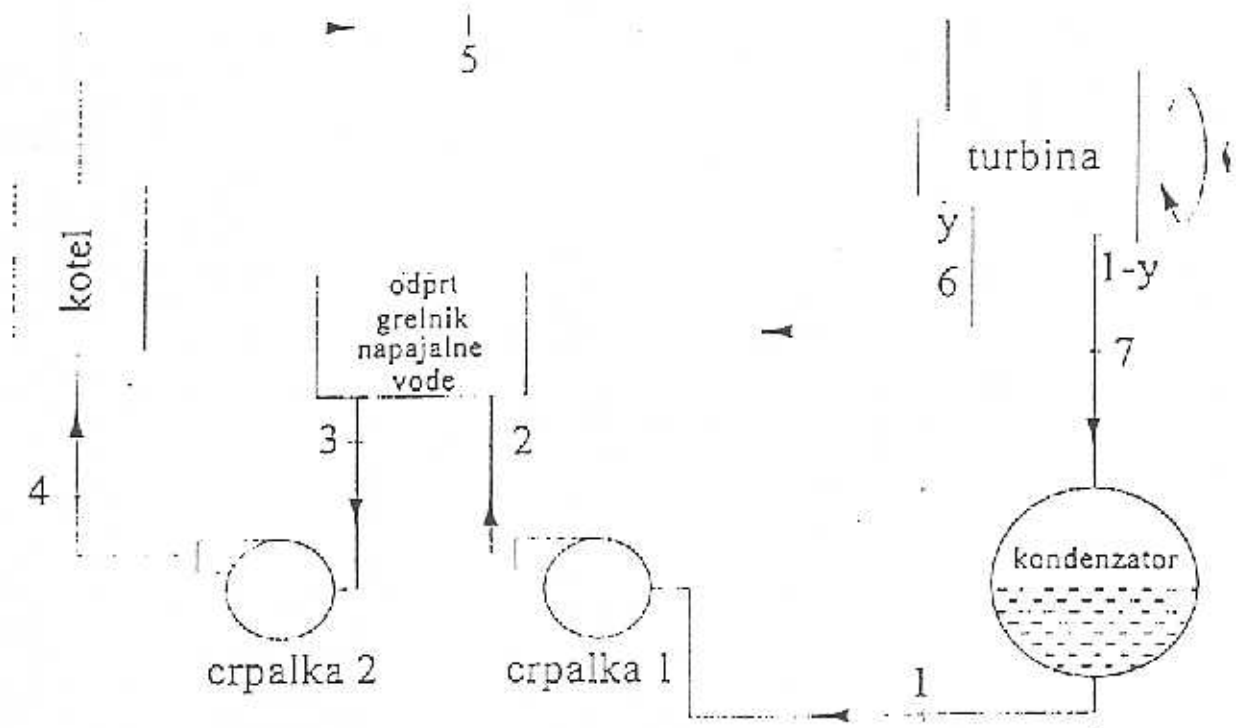


Shema

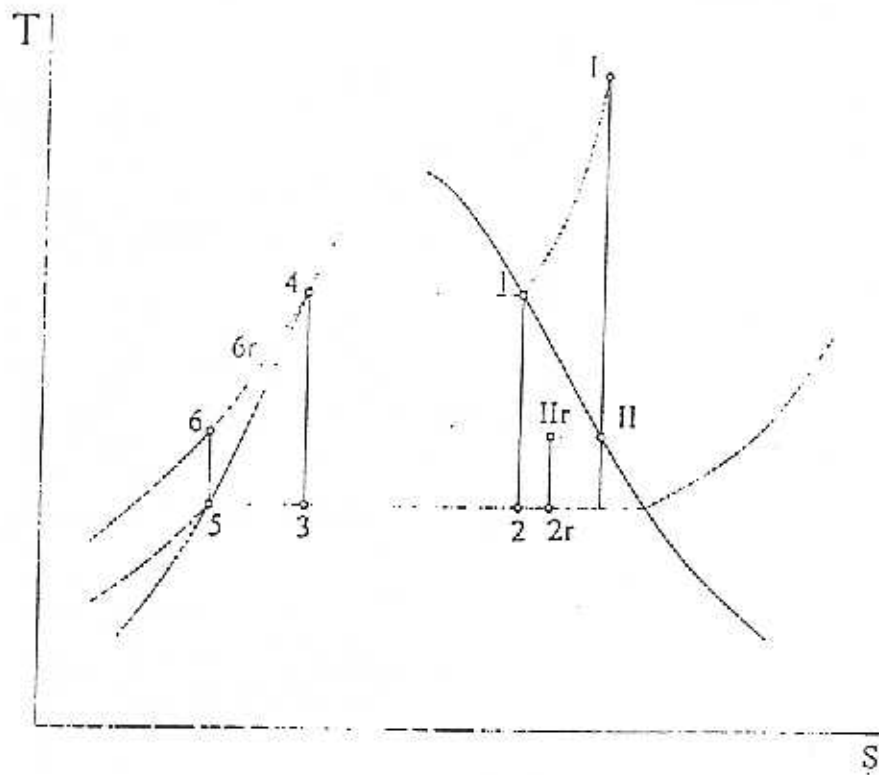


POVEČANJE IZKORISTKA Z REGENERATIVNIM GRETJEM NAPAJALNE VODE

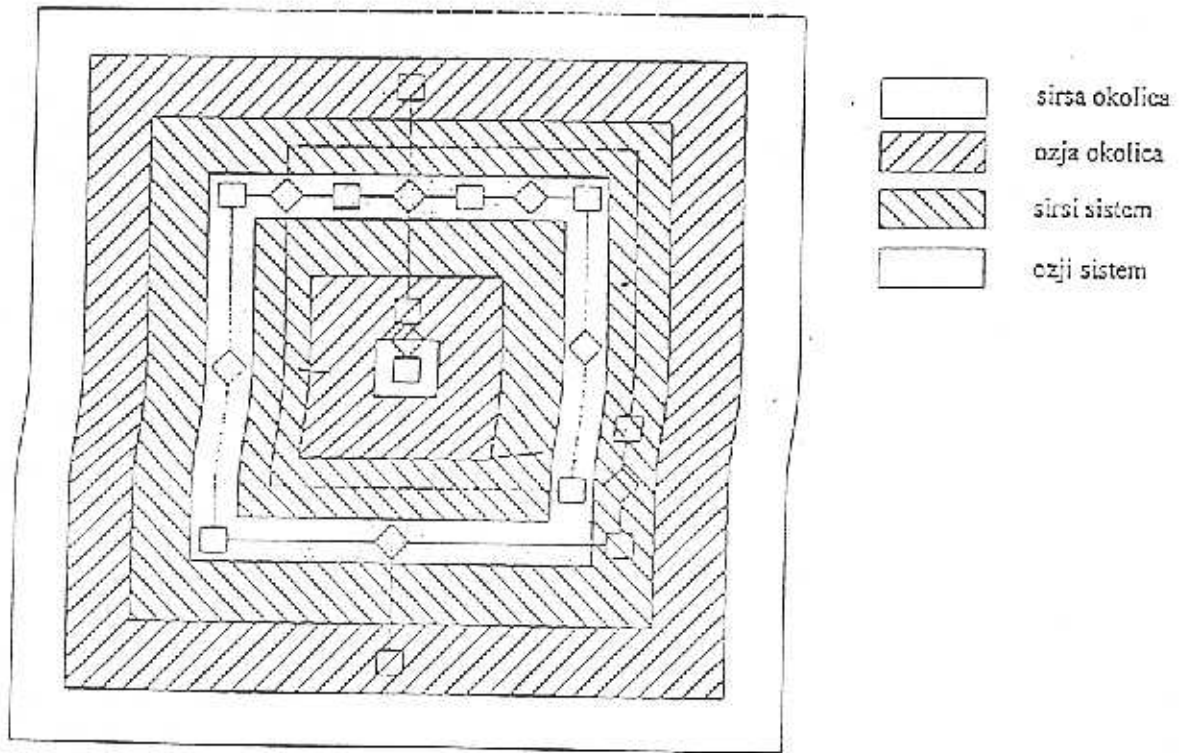
1. primer – Odprt sistem gretja napajalne vode



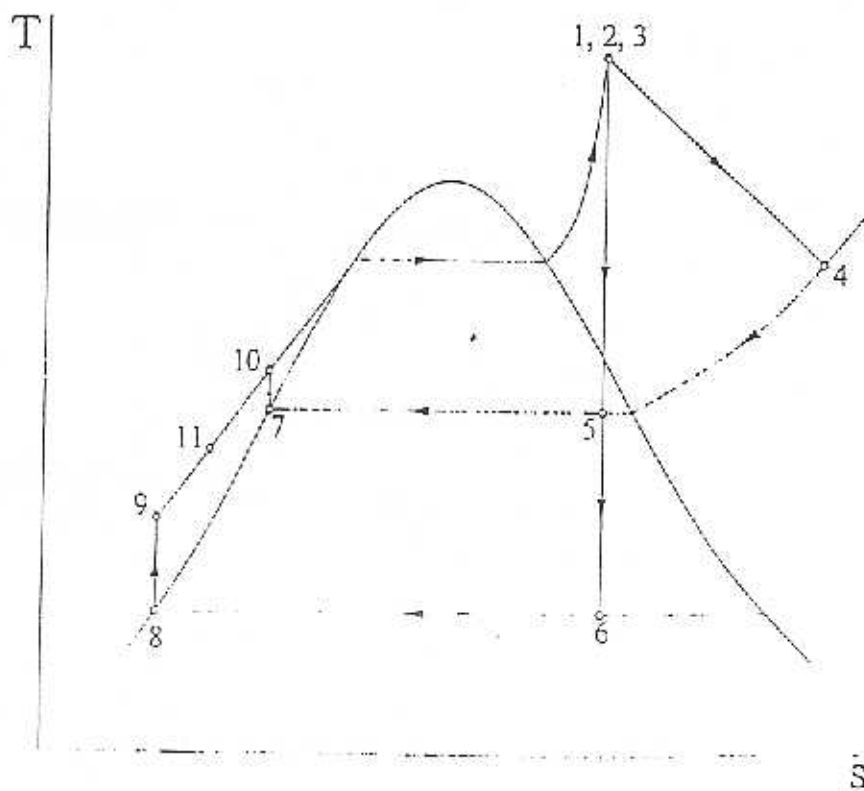
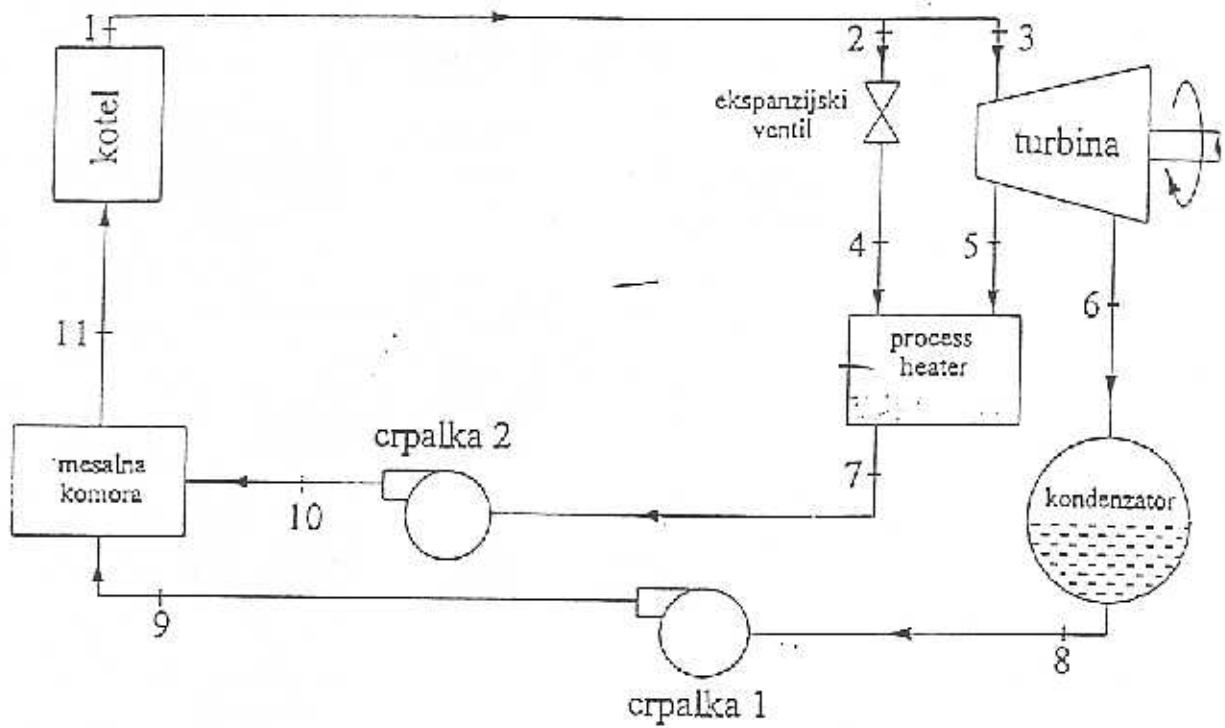
KROŽNI PROCES S PREGREVANJEM IN REGENERACIJO



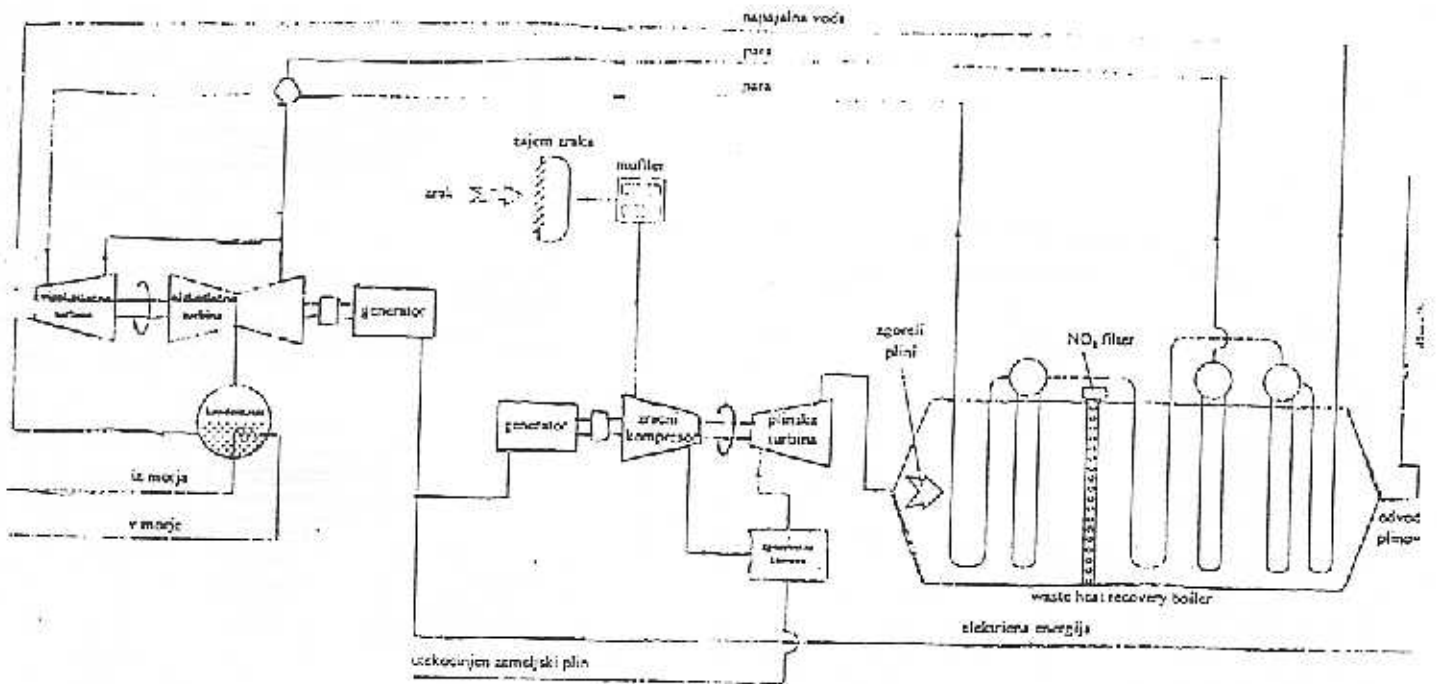
Strukturna slika



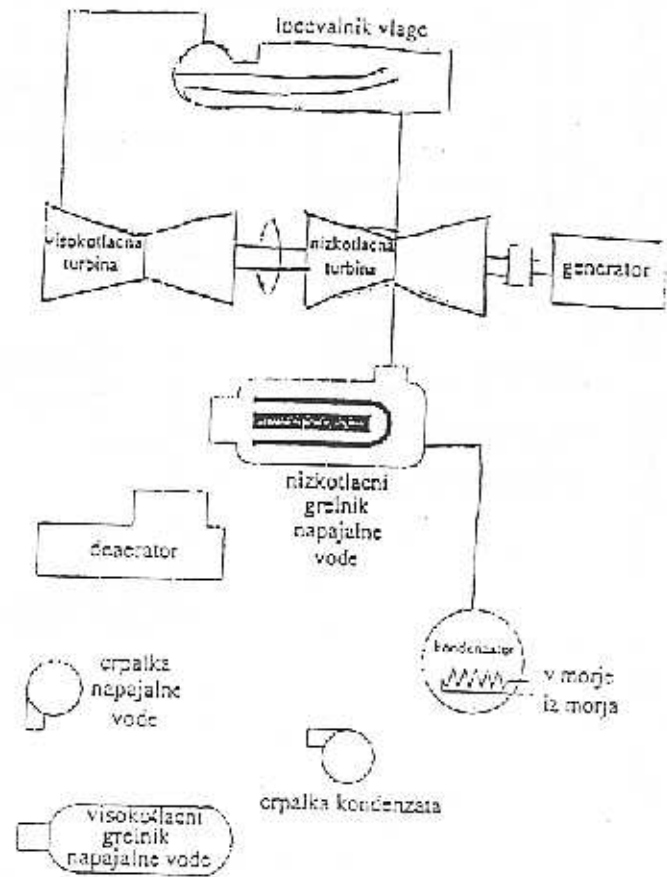
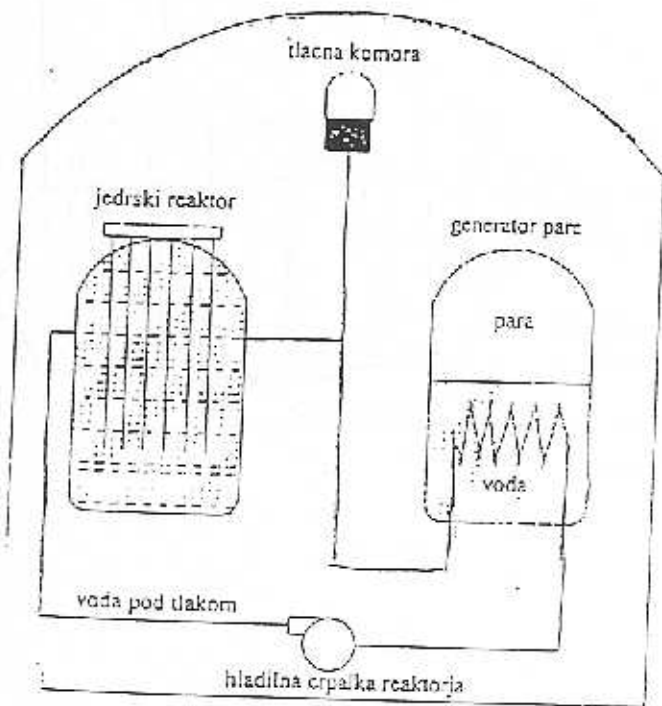
SOČASNA PROIZVODNJA DVEH ALI VEČ VRST ENERGJE ALI  
KOGENERACIJA



PRIMER KOMBINIRANE ELEKTRARNE (MITSUBISHI)

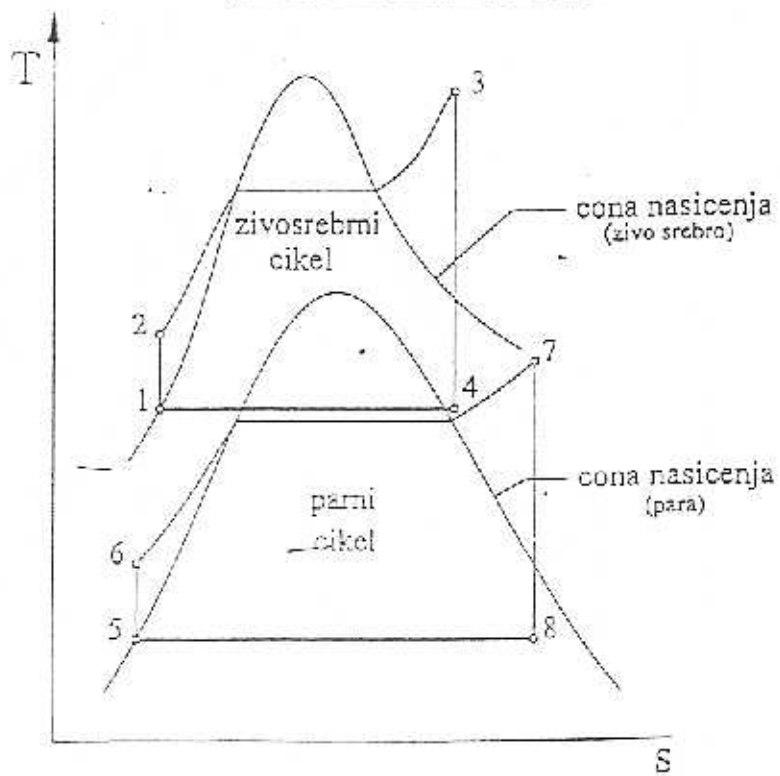
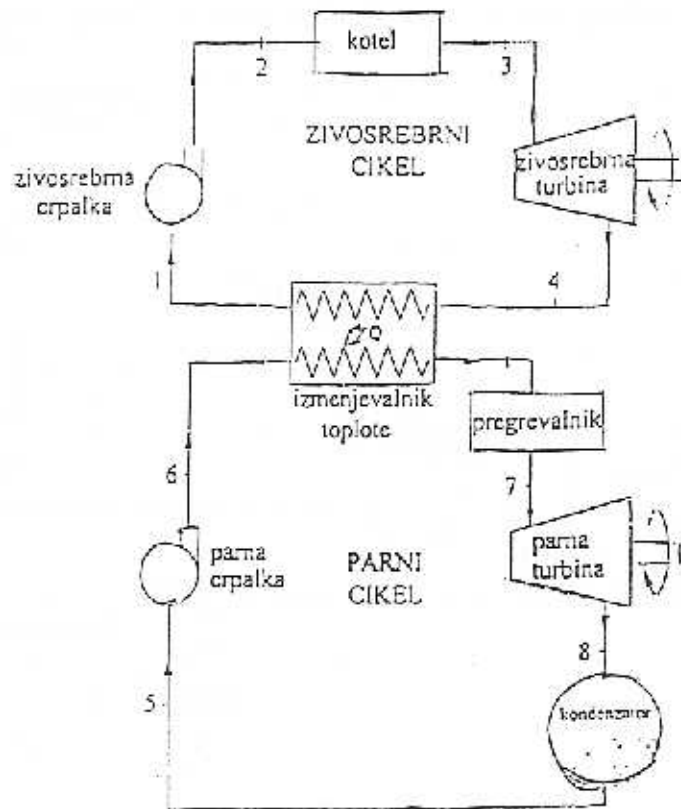


TLAČNOVODNA JEDRSKA ELEKTRARNA



na str. 56 ⇒ ZGOREVANJE

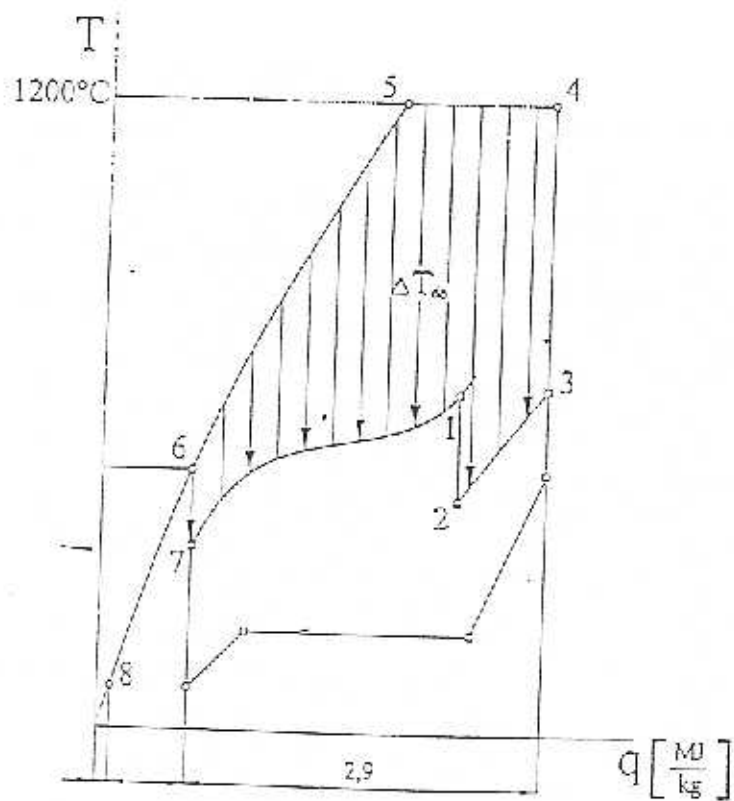
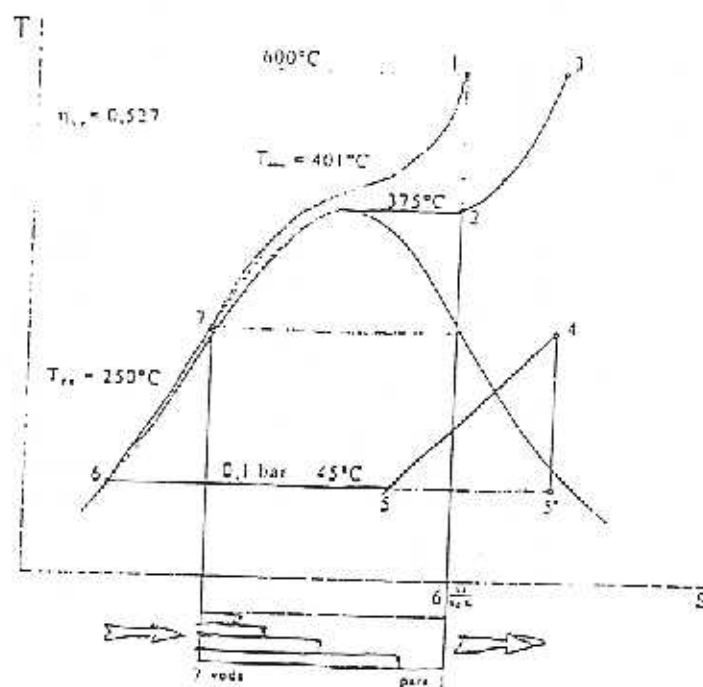
BINARNI PARNI CIKEL ŽIVO SREBRO-VODA



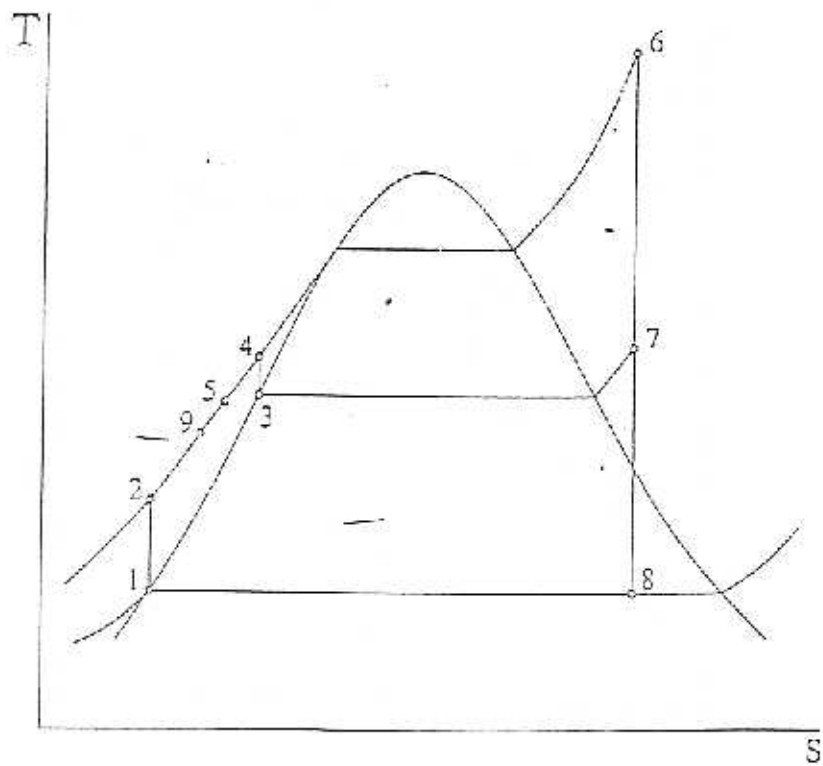
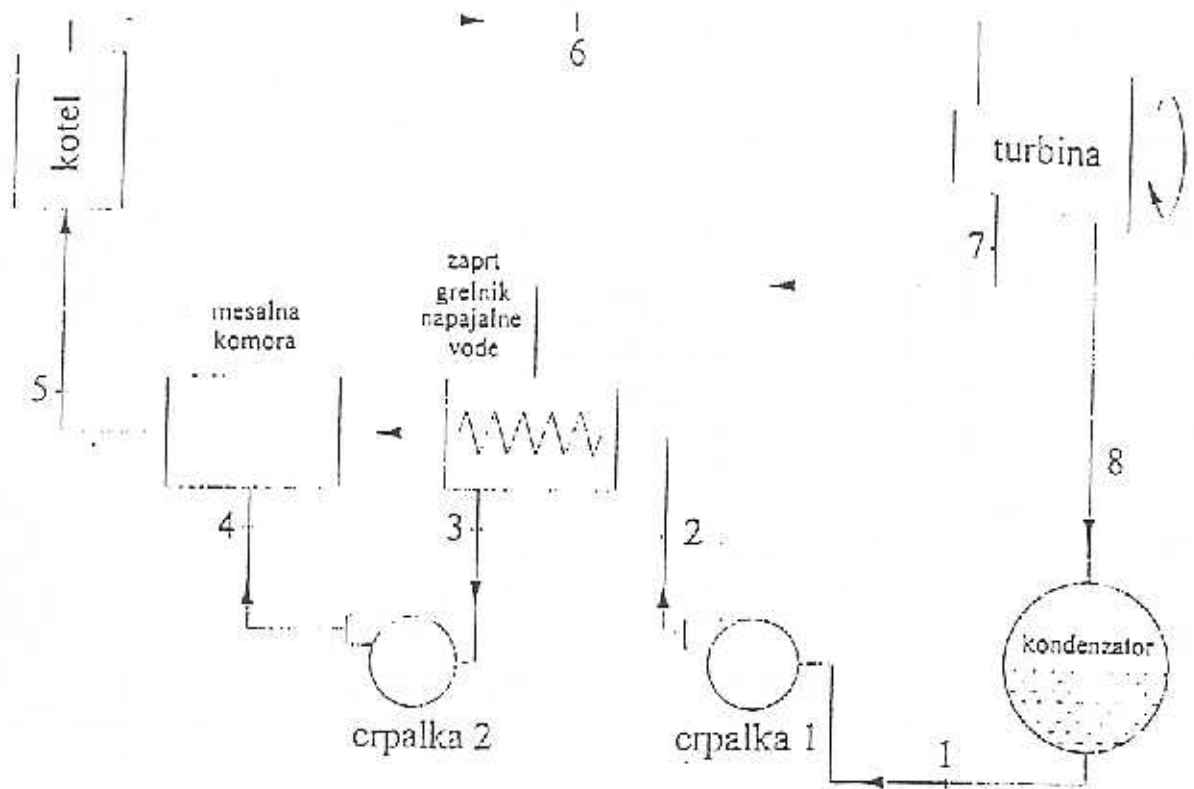


## KROŽNI PROCES Z DVOJNIM PREGREVANJEM IN REGENERACIJO

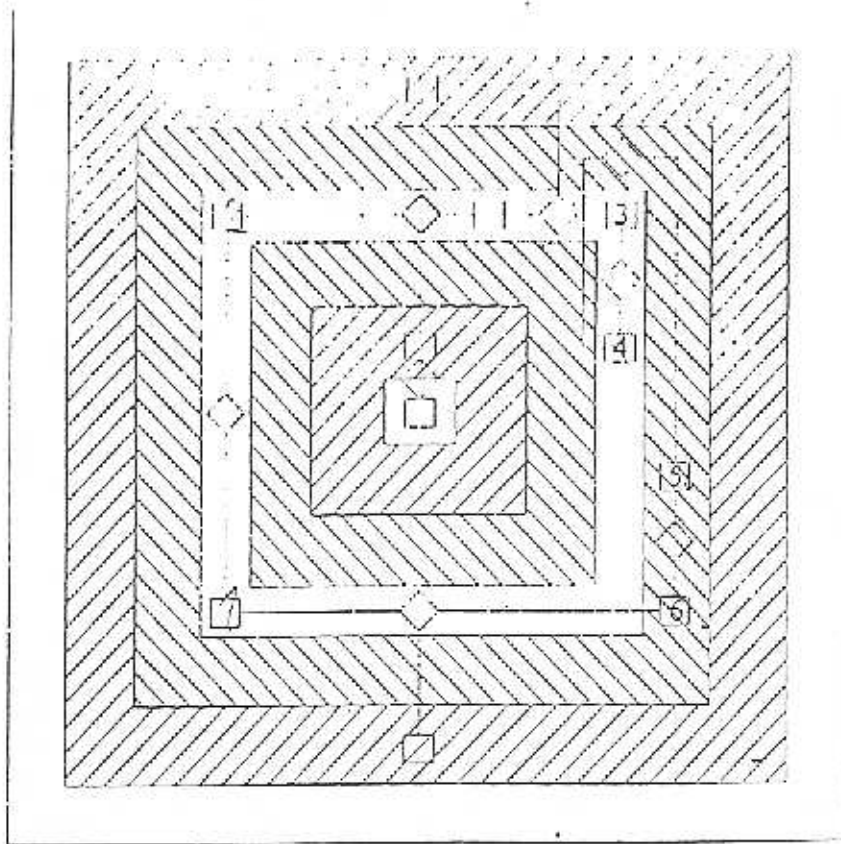
S kombinacijo prej naštetih izboljšav v tem krožnem procesu dosežemo največji izkoristek.


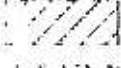
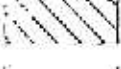



2. primer – Zaprt sistem gretja napajalne vode

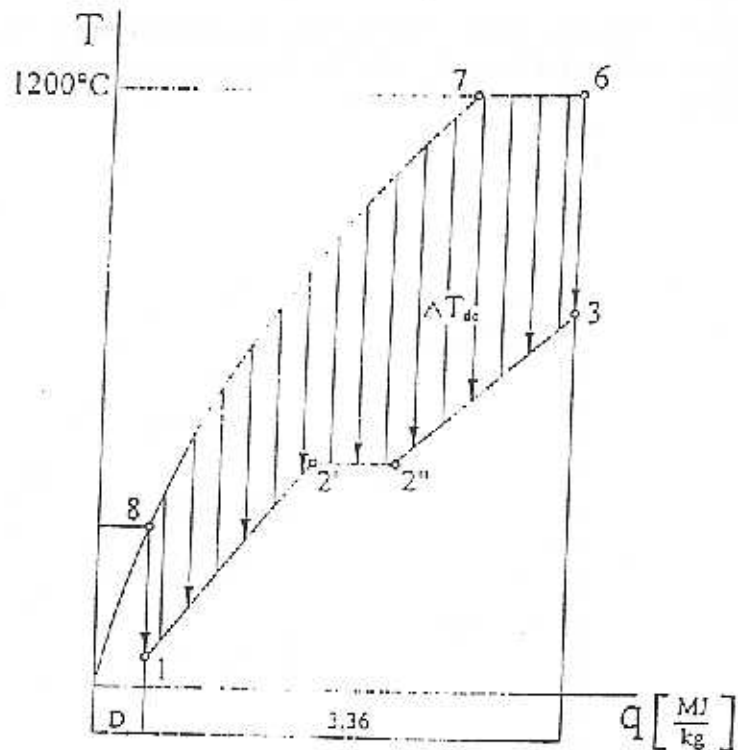


Strukturna slika za dvojno pregrevanje



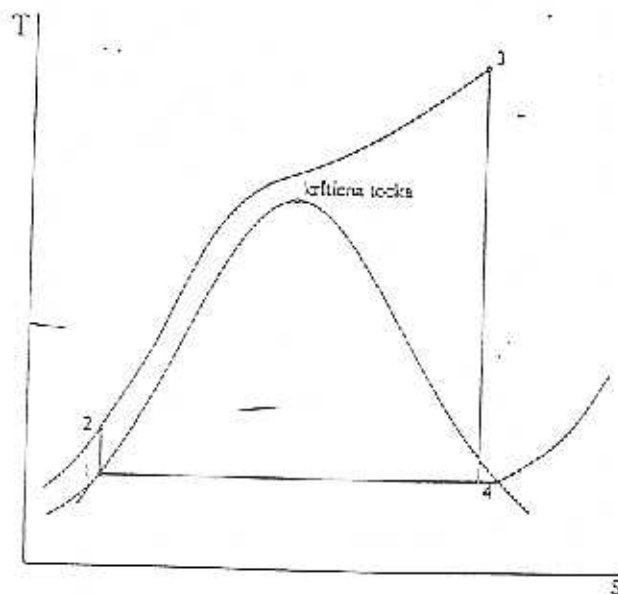
-  sirsa okolice
-  ozja okolice
-  sirsi sistem
-  ozji sistem

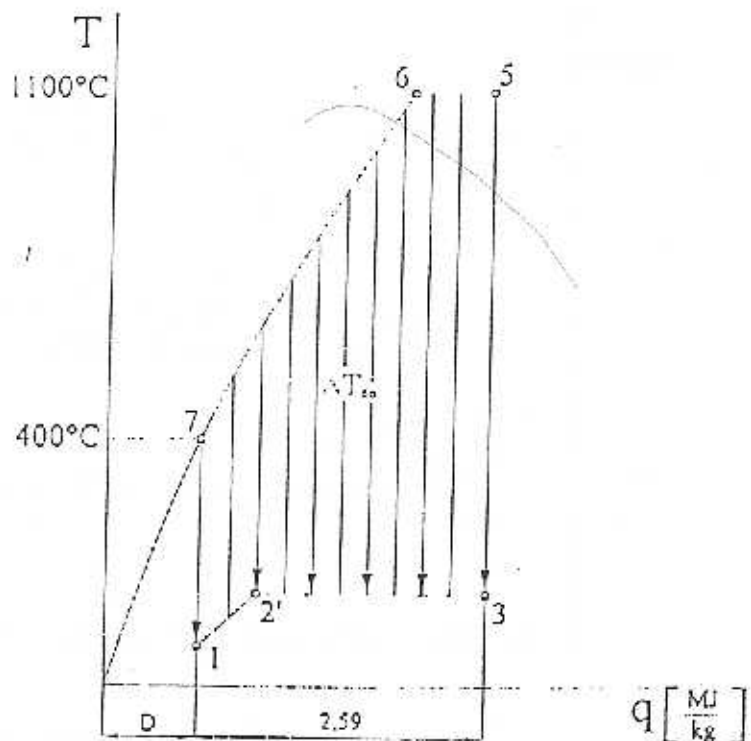
T, q diagram za primer boljšega izkoristka



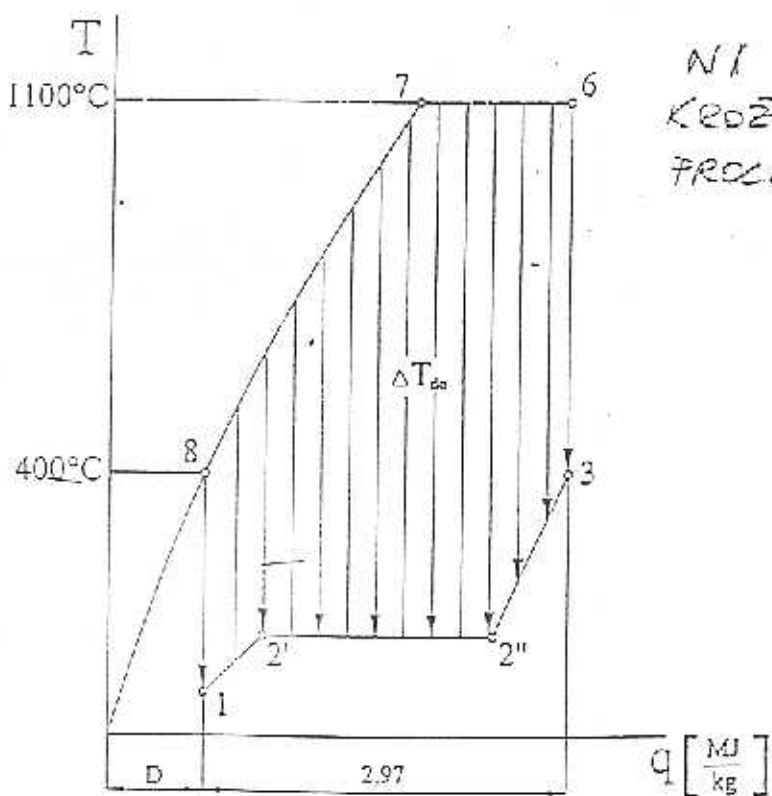
2. primer – povečanje izkoristka z izogibom dvofaznemu področju:

Ta primer sloni na ugotovitvi iz prejšnjega primera, in sicer pravi: 'Če v dvofaznem področju nastajajo izgube, zakaj se mu nebi popolnoma izognili?' Nekatere elektrarne delujejo na tem principu, vendar je problem v tem, da je potrebno dosegati visoke tlake, da se voda ne začne uparjati prekmalu (da se izognemo krivulji nasičene kapljevine). Te elektrarne delujejo v t.i. nadkritičnem območju.

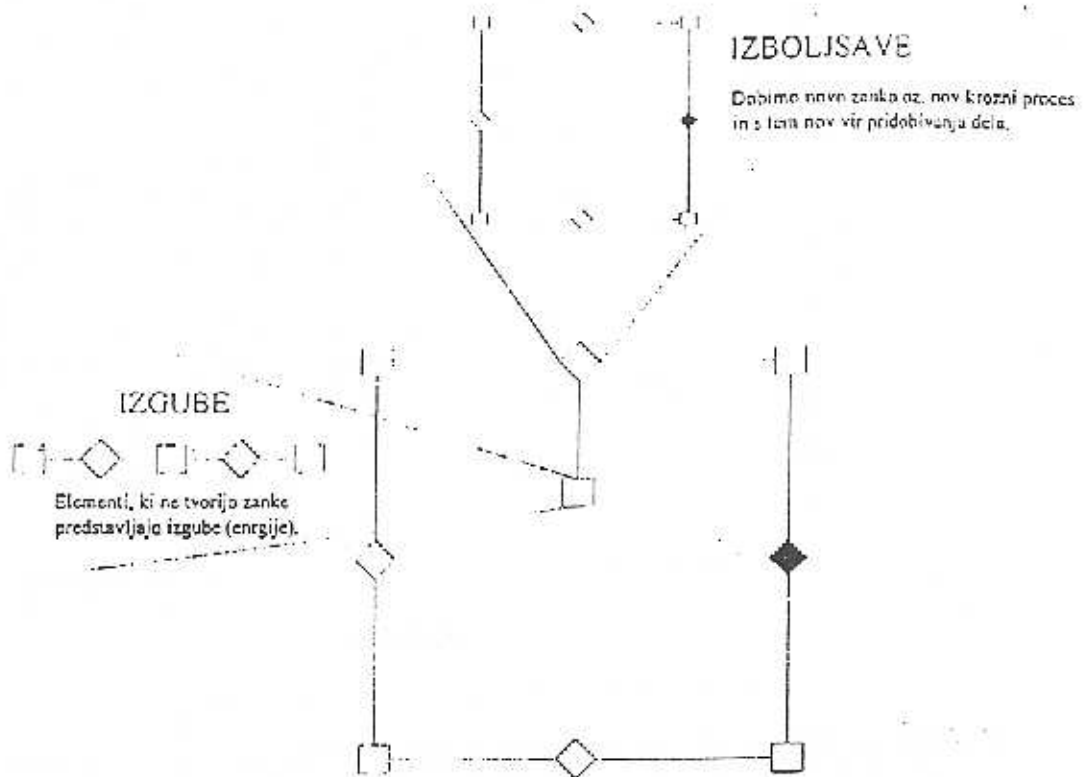




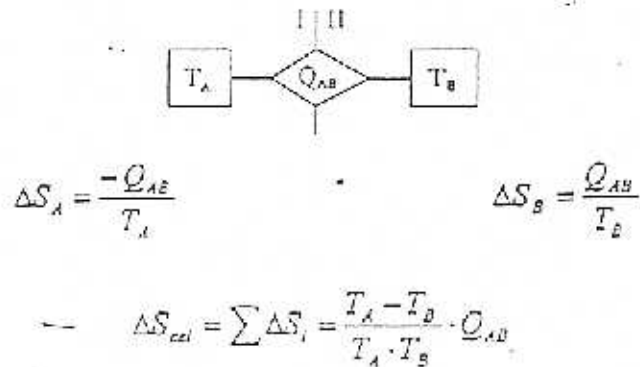
Parni proces z enojnim pregrevanjem vodne pare



POJASNILO ZA PREJŠNJA KROŽNA PROCESA



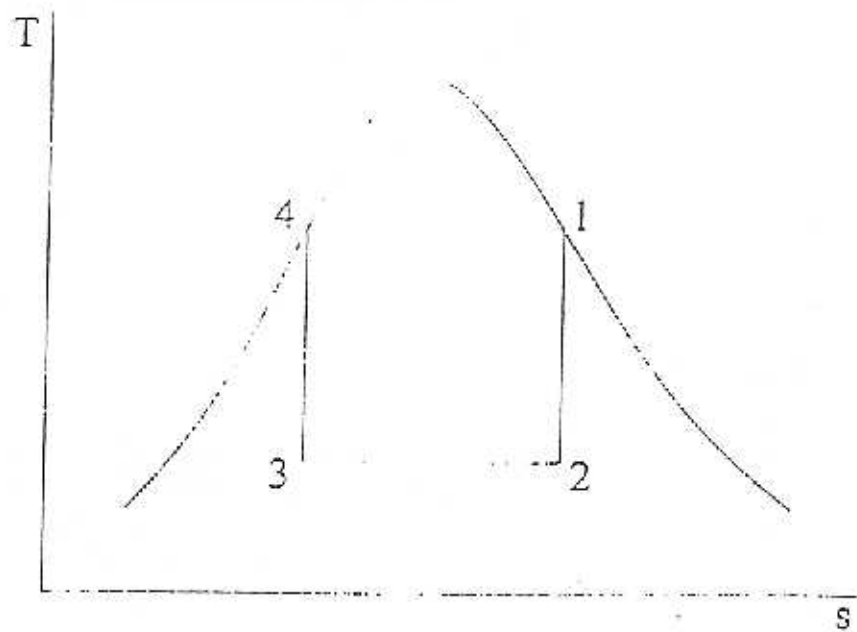
POGLED NA IZKORISTKE S STRANI CLAUSIUSOVE DEFINICIJE ZA ENTROPIJO OZ. ENTROPIJSKEGA ZAKONA



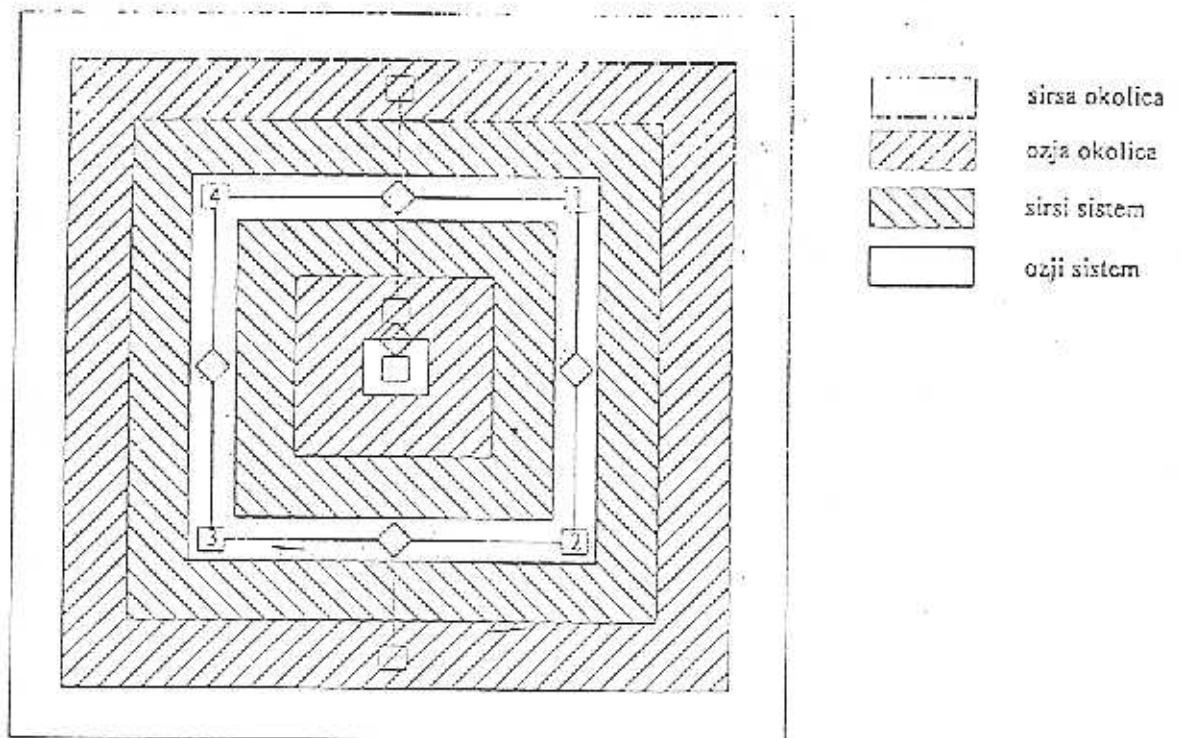
Iz enačbe za  $\Delta S_{cel}$  sledi, da bo sprememba (dvig) entropije in s tem izgube oz. padeo izkoristka tem večji, čim večja bo temperaturna razlika. Iz tega sledi, da za izboljšanje izkoristka:

- naj bo  $T_A - T_B$  čim manjši oz.
- naj proces poteka pri čim višjih temperaturah (ker potem razlika  $T_A - T_B$  ne pride več tako do izraza)

KROŽNI PROCES V T, s DIAGRAMU

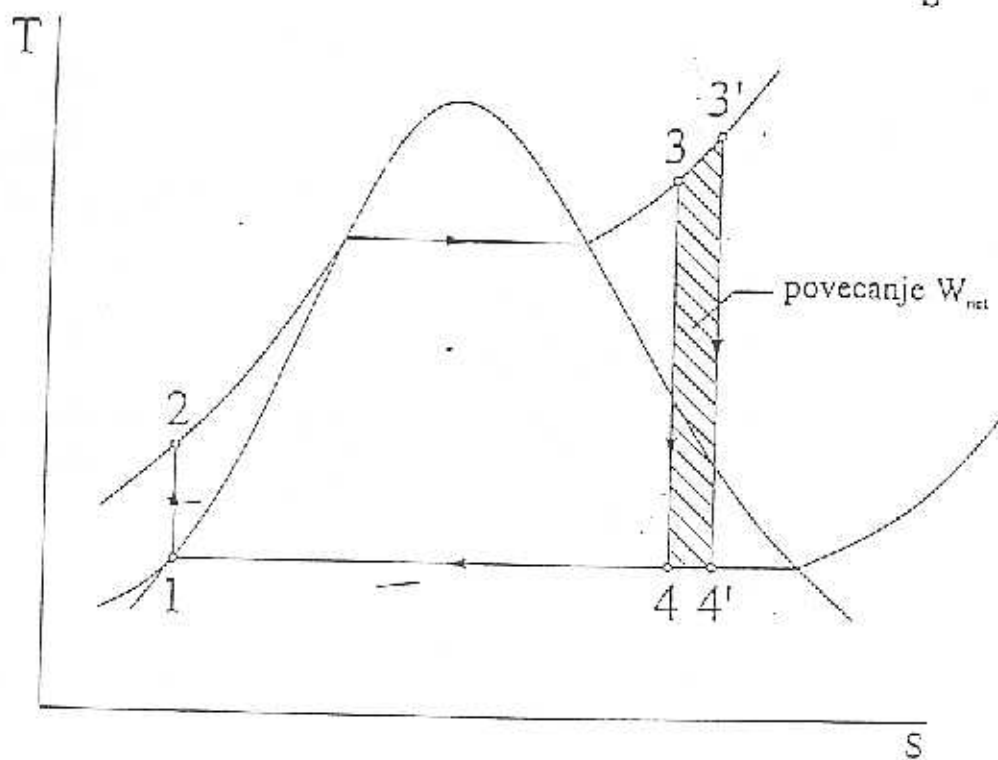
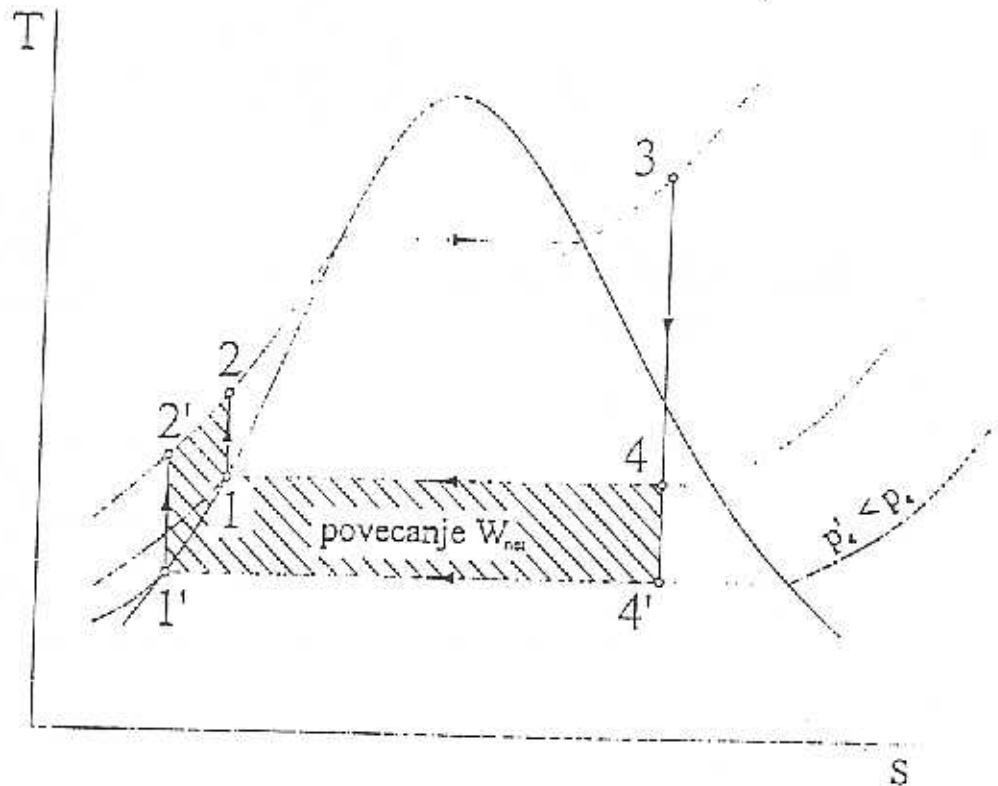


Strukturna slika



Ker imamo nek nezaključen (odprt) proces, ki vpliva na del krožnega procesa, nam to predstavlja izgube.

PRIMERA POVEČAVE IZKORISTKA RANKINOVEGA PROCESA



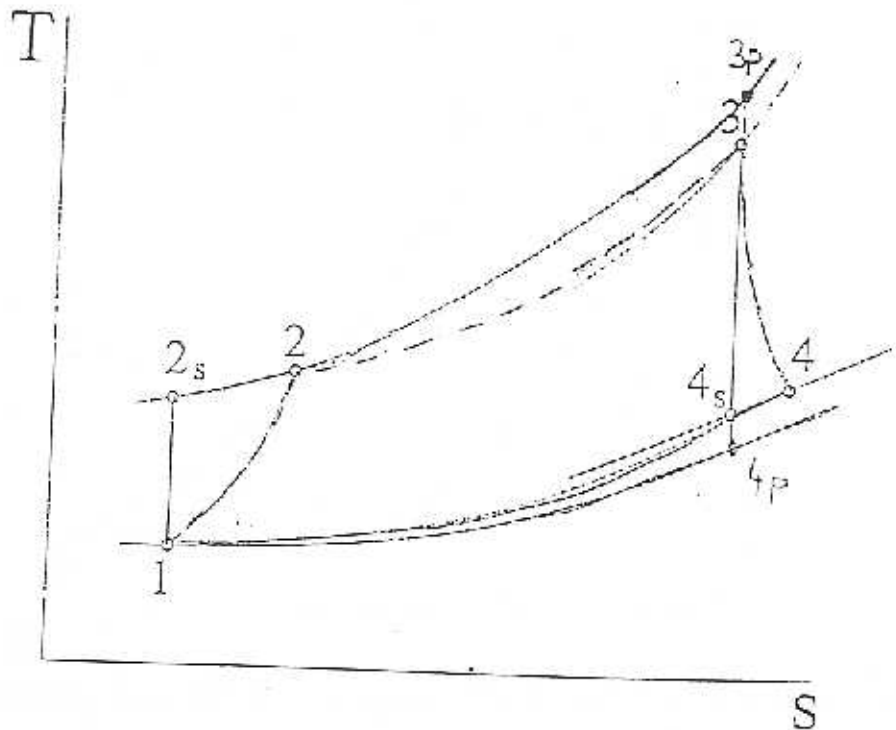


IZGUBE PRI PLINSKI TURBINI

Izkoristka turbine in kompresorja določamo glede na najboljši možni proces – izentropni. Izkoristek turbine torej predstavlja razmerje med dejanskim in najboljšim možnim – izentropnim procesom, izkoristek kompresorja pa razmerje izentropnega procesa z dejanskim.

$$\eta_{\text{kompresorja}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

$$\eta_{\text{turbine}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$$

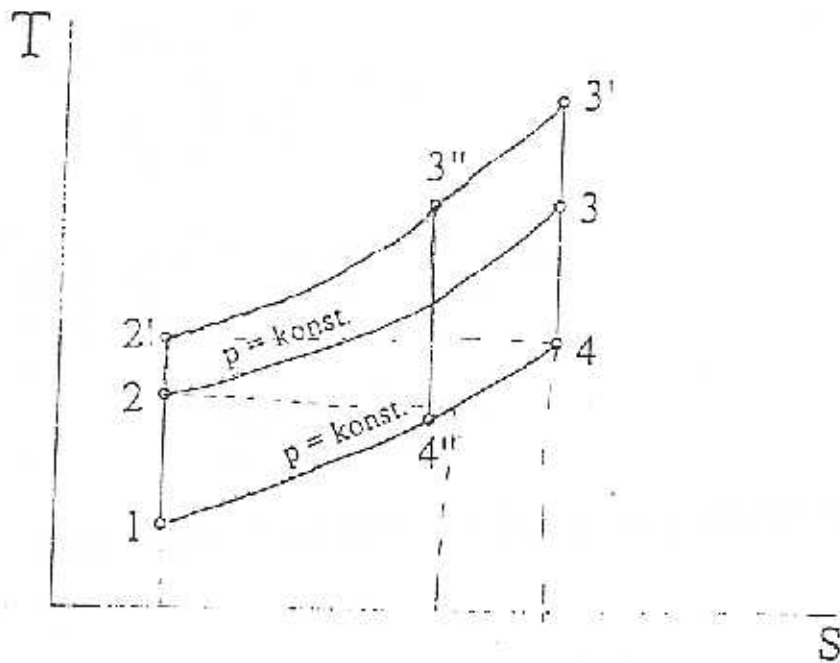


Delo za pogon kompresorja (imenovano tudi 'baza' poklicano delo) lahko zahteva od 40% do 80% dela, ki ga pridobimo iz turbine.

Celotni izkoristek tako zelo hitro pada z zmanjševanjem izkoristka kompresorja in/ali turbine (če njuna izkoristka padeta pod 60%, se bo vse delo, pridobljeno iz turbine, porabilo za pogon kompresorja). To je v ostrem nasprotju z Rankinovim cirkom.

+ Zaraj razlike med idealnim in realnim procesom

S povečevanjem tlačnega razmerja preide prvotni proces 1-2-3-4-1 v 1-2'-3'-4'-1. Pri slednjem procesu je dovedena toplota večja kot pri prvotnem, kar nam da pri enaki odvedeni toploti večji izkoristek drugega procesa.



### DELO BRAYTONOVEGA CIKLA

$$W_{net} = m \cdot c_p \cdot (T_3 - T_4) - m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

$$T_4 = \frac{T_3 \cdot T_1}{T_2}$$

$$W_{net} = m \cdot c_p \cdot \left( T_3 - T_2 + T_1 - \frac{T_3 \cdot T_1}{T_2} \right)$$

Maksimalno delo

$$\frac{dW_{net}}{dT_2} = 0 \quad \rightarrow \quad T_2 = (T_1 \cdot T_3)^{\frac{1}{2}}$$

$$(W_{net})_{max} = m \cdot c_p \cdot \left( T_3 + T_1 - 2 \cdot (T_1 \cdot T_3)^{\frac{1}{2}} \right)$$

Z oznakami na slikah 18.12 in 18.13 je:

koristna energija toplotnih črpalk: v ogrevah napravo dovodena toplotna energija  $Q_{gr}$  porabljena energija toplotnih črpalk: dovodeno mehansko delo  $W_p$ ,

S tem dobimo

$$\epsilon_{gr} = \frac{Q_{gr}}{W_p} \quad (18-19)$$

$$\epsilon_{gr} = \frac{Q_{gr}}{W_p} = \frac{AS \cdot (T_{max} - T_{min})}{AS \cdot (T_{max} - T_{min})} = 1$$

Če vstavimo (po sliki 18.13)  $Q_{gr} = T_{max} \cdot \Delta S$  in  $W_p = AS \cdot (T_{max} - T_{min})$  dobimo

grelno število po Carnotu  $\epsilon_{gr} = \frac{T_{max}}{T_{max} - T_{min}} = \frac{231,15K}{77K} = 3,0$  (lopladna črpalke) 18-20 > 1

P 75 V praksi med drugim spodbujamo, da bi se toplotna črpalka polati uporabljala kot agregat za hlajenje prostorov. V tem primeru gre za toplotno črpalko z ogrevanim in hladnim delovanjem. Iztrenjalno storilnostno število po Carnotu za:

- a) Hladno delovanje s  $\beta_{max} = 35^\circ C$ ,  $\beta_{min} = -42^\circ C$ ,
- b) za ogrevno delovanje s  $\beta_{max} = 22^\circ C$ ,  $\beta_{min} = -42^\circ C$

Rešitev: a)  $\epsilon_{gr} = \frac{T_{min}}{T_{max} - T_{min}} = \frac{231,15K}{77K} = 3,0$

b)  $\epsilon_{gr} = \frac{T_{max}}{T_{max} - T_{min}} = \frac{295,15K}{64K} = 4,61$

Oporaba: Iz uveljeb 18-18 in 18-20 ter iz rezultatov te naloge ugotovimo:

**Hladno število hladilnega stroja in grelno število toplotne črpalke sta vedno večji od 1.**

18.4.3 Idealni proces hladilnega stroja oz. toplotne črpalke

Prav tako kot doslej še ni bilo mogoča realizirati desnega Carnotovega procesa v pogonskem stroju, velja to tudi za realizacijo levega Carnotovega procesa v hladilnem stroju ali toplotni črpalci. Tudi tu rabi Carnotov proces le za primerjalni proces.

Levi Carnotov proces se uporablja kot primerjalni proces za oceno hladilnih strojev in toplotnih črpalk

Ker se v hladilni tehnologiji in tehnologiji toplotnih črpalk odzemanje toplotne energije uresničuje z uporabljenim kapljeviti, njemu oddeljanja na s kondenzacijo po paru, je za to potreben krožni proces, ki uresničuje spremembo agregatnega stanja iz kapljevite v paro.



Pri obravnavanju parnega procesa je treba upoštevati tudi spremembo agregatnega stanja. To možnost ponuja desni Clausius-Rankinov proces. Podatno kot pri desnem in levem Carnotovem procesu velja:

Idealni proces hladilnih strojev in toplotnih črpalk je levi Clausius-Rankinov proces.

Ta proces v glavnem zrcerava omogoča vlažne pare pri nizkih temperaturah, torej hladno paro. Zaradi tega označujemo hladilna stroje in toplotne črpalke za hladna parne stroje.

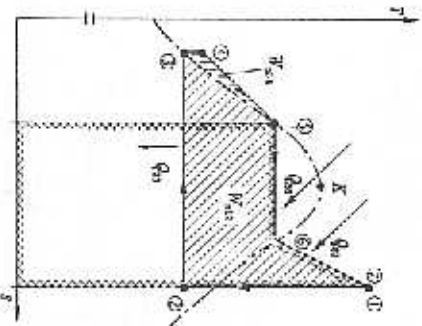
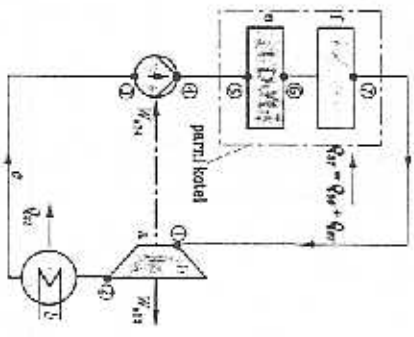
18.4.3.1 Primerjava desnega in levega Clausius-Rankinovega procesa

Desni parni proces (parni stroji na pregreto paro)

Nasprtno kot pri motornih z notranjo zgorevanjem, kjer lahko merilo označujemo za idealni plin in se dogajala prevarjanje energije v valju motorje, je za realizacijo procesov, povezanih s spremembi stanja, potrebnih več posameznih naprav. Vsaka posamezna naprava mora med potekom procesa prevesti svojo nalogo. Slike 18.14 prikazuje vezalni načrt, na katerem je poleg njegaj našen diagram T, s (slika 18.15), ki nern poraznje ene gretske vrednosti

Vezalni načrt

Diagram T, s



18.14

18.15

Na slik 18.14 pomeni:

- a: turbina  $\rightarrow$  oddaja mehansko delo  $W_{me}$  in  $W_{gr}$
- b: kondenzator (naprava za ukapljevanje)  $\rightarrow$  oddaja kondenzacijsko toploto  $Q_{zd}$
- c: kapljevinski cevovod (vodovod)
- d: napajalna črpalke
- e: uparjalnik  $\rightarrow$  uparjata toplota  $Q_{gr}$  se dovaja
- f: pregravanje  $\rightarrow$  pregravanja toplota  $Q_{od}$  se dovaja
- g: cevovod za paro

