

7 Postupci povećanja termičkog stupnja djelovanja u termoelektranama s parnim turbinama

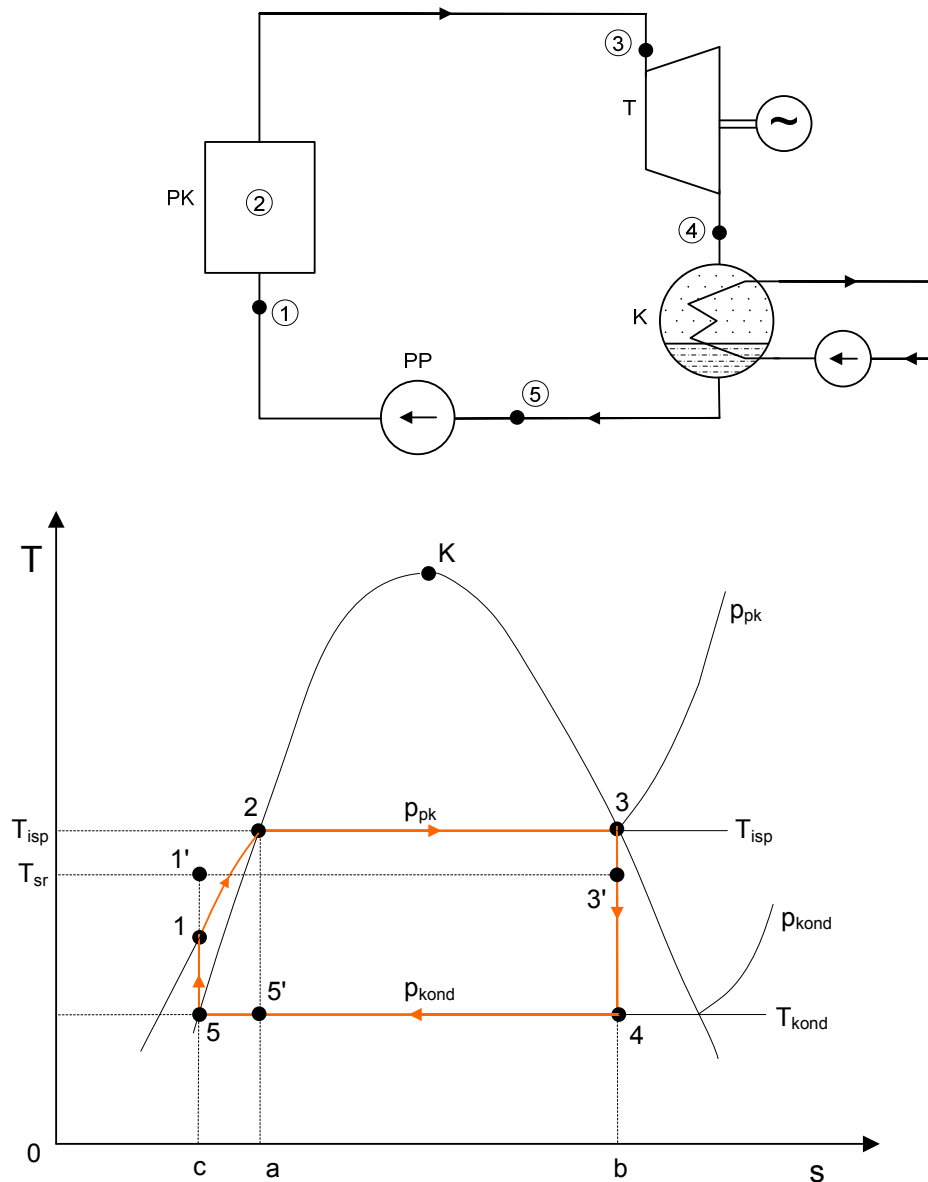
Rankineov kružni proces, stupnjevi djelovanja realnih procesa, postupci povećanja termičkog stupnja djelovanja termoelektrana s parnim turbinama

U termoelektrani se s parnom turbinom za vrijeme procesa mijenja agregatno stanje: voda prelazi iz tekućeg u plinovito agregatno stanje i obratno. Prednost je takvog procesa u vrlo velikoj promjeni specifičnog volumena pri isparivanju i kondenzaciji što znači da se pomoću 1kg fluida dobiva relativno veliki mehanički rad. (U p,v odnosno T,s – dijagramu ploština je površine takvog kružnog procesa velika.) Daljnja je prednost u tome što se toplinska energija potrebna za isparivanje dovodi istodobno i uz izobarni i uz izotermni proces, a isto vrijedi i za odvođenje toplinske energije za vrijeme kondenzacije: toplinska se energija odvodi i uz izobarni i uz izotermni proces. Izobarni je proces pri dovođenju (odvođenju) toplinske energije povoljan za tehničku izvedivost procesa, a izotermni proces za vrijeme dovođenja toplinske energije osigurava najmanji mogući prirast entropije a za vrijeme odvođenja toplinske energije omogućuje prilagodbu s toplinskim karakteristikama okolice i time minimiziranje gubitaka eksergije, relacija **Error! Reference source not found.** U usporedbi s izrazito nepovoljnim procesom dovođenja toplinske energije u kružni proces termoelektrane s parnom turbinom, temperatura je plinova izgaranja u parnom kotlu znatno viša od vode odnosno vodene pare u kružnom procesu pa su tu posljedično i gubici eksergije veliki, energetski je proces pri odvođenju toplinske energije u kondenzatoru termoelektrane s parnom turbinom vrlo povoljan. Zbog toga se svi naponi tehnološkog poboljšanja parnih procesa (primjena materijala koji podnose visoka toplinska i mehanička opterećenja) odnose na prilike za vrijeme dovođenja toplinske energije za razliku od napora poboljšanja procesa u termoelektrani s plinskom turbinom (u kojoj se plinu ne mijenja agregatno stanje) gdje se pozornost poklanja odnosima tijekom odvođenja toplinske energije budući da su temperature dovođenja toplinske energije u takvim procesima jednake temperaturama izgaranja. Prilagodba je međutim odvođenja toplinske energije u termoelektrani s plinskom turbinom toplinskim karakteristikama okolice znatno kompliciranija u usporedbi s istim procesom u termoelektrani s parnom turbinom: može se ostvariti samo kad se kompresija podijeli na veliki broj stupnjeva pa se zbog toga danas rabe spojni procesi, 3.2.

7.1 Nprovedivost Carnotovog kružnog procesa

U području mokre pare mogao bi se izvesti kružni proces među stalnim tlakovima, a budući da su u području mokre pare izobare ujedno i izoterme, proces s mokrom parom među stalnim tlakovima ujedno je i Carnotov kružni proces, najbolji mogući proces u kojemu se toplinska energija pretvara u mehanički rad (eksergiju). Razmotrimo dakle način odvijanja Carnotovog kružnog procesa u kondenzacijskoj termoelektrani s parnom turbinom (para ekspanzira do tlaka u kondenzatoru u kojem se kondenzira), Slika 7-1. Nacrtajmo shemu termoelektrane s parnom turbinom i pratimo odvijanje procesa u T,s – dijagramu.

**POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U
TERMoeLEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA**



Slika 7-1 Desnokretni Carnotov kružni proces s mokrom (suhom) parom

Proces ima četiri faze i svaka se odvija u odvojenom dijelu termoelektrane. Dovod se toplinske energije uz istodobno isparivanje između stanja **2** i **3** provodi u parnom kotlu, pa je dovedena toplina proporcionalna ploštini površine **a-2-3-b**. U stanju **2** fluid je u tekućem agregatnom stanju (vrela voda), a u stanju **3** suha je para. Ta para, proizvedena u kotlu, ekspandira adijabatski (izentropski) u parnoj turbini od stanja **3** do **4**. Za ekspanzije dio se pare kondenzira (ulazi se u područje mokre pare) jer se izentropa sve više udaljuje od gornje granične krivulje, pa u kondenzator dolazi smjesa pare i kapljevine (tekućine). Na kraju ekspanzije mokra para ima temperaturu T_{kond} (temperaturu jednaku temperaturi u kondenzatoru), koja je i najniža temperatura u procesu. U kondenzatoru se para postupno kondenzira zbog toga što se toplinska energija (pretežito anergija) odvodi rashladnom vodom koja struji kroz kondenzator. Odvedena toplina proporcionalna je ploštini površine

b-4-5'-a. Do ovog trenutka opisani proces točno slijedi procese Carnotovog desnokretnog kružnog procesa. Sada, međutim, da bi se adijabatskom (izentropskom) kompresijom mogla dobiti vrela voda stanja **2**, i tako zatvoriti kružni proces, morala bi se iz kondenzatora isisati smjesa tekućine i pare (mokra para) koja odgovara stanju **5'** i tu bi smjesu trebalo zatim komprimirati na vrlo visoki tlak koji vlada u parnom kotlu, p_{pk} . Prilikom kompresije međutim ugrijala bi se samo para, a tekućina bi, zbog loših uvjeta pri izmjeni toplinske energije, ostala pretežno hladna. Drugim riječima, na kraju kompresije ne bismo mogli dobiti vrelu vodu stanja **2**, već neku smjesu pregrijane pare i hladne vode; ne će, dakle, nastati stanje koje odgovara Carnotovom kružnom procesu što znači da je praktički nemoguće ostvariti kružni proces s mokrom parom. Stoga se u praksi kompresor zamjenjuje pojnom pumpom, a to znači da se sva para koja izlazi iz parne turbine mora kondenzirati u kondenzatoru i da na izlazu mora biti postignuto stanje na izobari p_{kon} , koja je ujedno i izoterma $T_{kon} = \text{konst}$, ali je na donjoj graničnoj krivulji. To je stanje **5**, Slika **7-1**. Pojna pumpa siše vodu temperature T_{kon} i tlaka p_{kon} , pa je adijabatski (izentropski) komprimira na tlak p_{pk} , koji je jednak tlaku u kotlu. Pritom temperatura vode naraste za vrlo mali iznos; stanja **5** i **1** padaju gotovo zajedno. (Na slici ona su preuveličano odmaknuta.) Naime, voda je praktički nekompresibilna pa je potrebni rad za pumpanje ($|w_{pumpe}| = (p_{PK} - p_{kon})v_5$) vrlo malen u usporedbi s mehaničkim radom koji se dobiva ekspanzijom pare u turbini. U praktičnim se proračunima mehanički rad koji se utroši na pumpanje vode u parni kotao uračunava u vlastiti potrošak termoelektrane, pa se tada kružni proces promatra ne smatrajući pumpanje dijelom kružnog procesa. Temperatura vode koja je pod tlakom p_{pk} dovedena u kotao (stanje **1**) niža je od temperature isparivanja pri tlaku p_{pk} , pa se ona mora prije isparivanja ugrijati od T_1 do $T_2 = T_{isp}$. To se postiže ili predgrijavajući vodu prije nego što se uvede u kotao ili upumpavajući je u hladnom stanju u kotao, gdje se miješa s njegovom vrućom vodom. Takav se kružni proces naziva **Rankineov kružni proces** u počast Škotu W.J.M. Rankine koji ga je prvi predložio.

Stupanj bi djelovanja Carnotovog kružnog procesa, Slika **7-1**, ovisio samo o temperaturama T_{isp} i T_{kond} :

$$\eta_{terCKP} = 1 - \frac{T_{kond}}{T_{isp}} \quad [7.1]$$

Prijelazom na Rankineov kružni proces dobiva se više mehaničkog rada iz 1kg pare jer je mehanički rad nastao prema Rankineovu procesu proporcionalan ploštini površine **1-2-3-4-5-1**, a onaj iz Carnotova procesa (kad bi bio moguć) proporcionalan je ploštini površine **2-3-4-5'-2**. To je posljedica veće količine dovedene toplinske energije. Termički je međutim stupanj djelovanja Rankineova procesa slabiji od Carnotova. Dovedena je naime toplinska energija q_{dov} u Rankineovu procesu proporcionalna ploštini površine **c-1-2-3-4-b**, a odvedena, q_{odv} , ploštini površine **c-5-4-b**, pa je termički stupanj djelovanja Rankineova procesa

$$\eta_{ter} = 1 - \frac{|q_{odv}|}{q_{dov}} \quad [7.2]$$

Ako se ploština površine **c-1-2-3-4-b** zamijeni pravokutnikom jednake ploštine, ali da osnovica bude jednaka razlici entropija $s_b - s_c$ ($s_4 - s_5$), dobiva se iz visine pravokutnika **c-1'-**

Termički stupanj djelovanja promatranog Rankineovog kružnog procesa ovisi o tlaku svježeg pare p_{pk} i tlaku na kraju procesa p_{kond} . Da se postigne što veći pad entalpije (što veća razlika $h_3 - h_4$) između stanja na ulazu u parnu turbinu i stanja na kraju ekspanzije, para se dovodi u kondenzator, u kojem se kondenzira djelovanjem rashladne vode. Zbog toga u kondenzatoru vlada vrlo mali tlak, i do 0,02 bara (0,002 MPa), koji ovisi o temperaturi rashladne vode koja pak djeluje kao hladni spremnik, odnosno kao okolica. U takvoj se „kondenzacijskoj turbini“ (termoelektrani) iskorištava najveći mogući pad entalpije polazeći, naravno, od zadanog stanja pare na ulazu u turbinu, no, potrebne su i relativno velike količine vode za hlađenje. To je, međutim, praktički jedino rješenje nije li u neposrednoj blizini potrebna para (toplinska energija) koja je djelomično ekspanzirala u turbini. U tom se slučaju govori o „protutlačnoj parnoj turbini“ u kojoj para ekspanzira ne do tlaka u kondenzatoru, ne ekspanzira u kondenzator, nego do znatno višeg tlaka od onoga u kondenzatoru. Takva se para (visoke temperature) naime zatim iskorištava za tehnološke procese u industriji (grijanje, isparivanje, kuhanje, sušenje i sl.) ili za grijanje prostorija. Tlak je pare na kraju ekspanzije određen pritom potrebnom temperaturom pare na izlazu iz turbine. Uz konstantan tlak pare na ulazu u turbinu, a s porastom tlaka na kraju ekspanzije, smanjuje se adijabatski pad entalpije za proizvodnju mehaničkog rada (električne energije), ali se povećava entalpija (temperatura) pare koju mogu iskoristiti toplinski potrošači. S povećanjem tlaka na kraju ekspanzije smanjuje se dakako termički stupanj djelovanja (stupanj djelovanja transformacije toplinske energije u mehanički rad), što, međutim ne znači da je cijeli proces nepovoljan budući da je sada (teorijski) stupanj djelovanja iskorištenja energije pare (samo toplinske energije) jednak jedinici. Istaknimo, još nešto. Mogućnost iskorištenja pare ovisi očito o njezinoj temperaturi. Para koja je ekspanzirala do tlaka kondenzatora temperatura je samo nekoliko stupnjeva viša od one u rashladne vode, odnosno temperature okolice. Dakle, njezina se energija sastoji praktički samo od anergije, a ona se ne može transformirati u drugi oblik energije. Nadalje, uz konstantne tlakove na ulazu i izlazu iz parne turbine, proizvodnja mehaničkog rada (električne energije) određena je količinom pare koju preuzimaju toplinski potrošači. Prema tome za upotrebu takve turbine (proces) mora postojati ne samo istodobna potreba za električnom i toplinskom energijom nego i stalan i nepromijenjen omjer tih potreba. Stoga se, bez elektroenergetskog sustava koji će moći nadoknađivati manjak, a preuzimati višak električne energije, protutlačna turbina najčešće ne može upotrijebiti kao stroj kojim će se za neku industriju osiguravati i potrebna električna energija i potrebna toplinska energija. Zbog toga se danas grade turbine s reguliranim oduzimanjem pare. Konačno, naglasimo ponovno, upotreba je protutlačne turbine opravdana samo ako postoje toplinski potrošači u odgovarajućoj blizini postrojenja; u protivnom preveliki su gubici toplinske energije na putu transporta pare do potrošača.

Međutim, za vrijeme ekspanzije pare do kondenzatorskog tlaka, stanje pare prelazi gornju graničnu krivulju, Slika 7-2, pa se dalje promjene stanja događaju u području mokre pare. Pojavljuju se kapljice vode u pari izazivajući dodatne gubitke; što je viši tlak suhe pare na ulazu u turbinu, to će na kraju ekspanzije biti veća komponenta kapljevine u mokroj pari. Kako, međutim, odrediti stanje mokre pare: količinu vode koja je nastala zbog ekspanzije odnosno kondenzacije pare, ili pare koja je nastala isparivanjem vode, s obzirom na to da u području isparivanja, u kojemu se pojavljuje mokra para, (specifični) volumen nije definiran tlakom i temperaturom jer svakom tlaku odgovara određena temperatura? (Tlak i temperatura nisu međusobno neovisne veličine: tlak je funkcija temperature, ili obratno, temperatura je funkcija tlaka prema krivulji tlaka isparivanja, Slika 3-11.) Nužno je stoga, da bi se odredilo stanje mokre pare, uvesti novu veličinu stanja kojom će se definirati sastav

**POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U
TERMOELEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA**

heterogenog sustava (mokre pare) sastavljenog od vrele vode i suhe pare, Slika 6-25, stanje **c**. Tu ćemo novu veličinu stanja nazvati „sadržajem pare x “, i definirati je kao omjer suhe pare i ukupne mokre pare. ($1 - x$ tada je „sadržaj vlage“ definiran kao omjer vode (vrole vode ili kondenzata) u mokroj pari i ukupne mokre pare.) Označimo li s m' masu vrele tekućine, a s m'' masu suhe pare, sadržaj će pare biti definiran izrazom

$$x = \frac{m''}{m' + m''} \quad [7.5]$$

Sadržaj pare ima vrijednost $x = 0$ za vrelu vodu (stanje na krivulji isparivanja, na donjoj graničnoj krivulji), a $x = 1$ za suhu paru (stanje na krivulji kondenzacije, na gornjoj graničnoj krivulji).

Ako se s v' i v'' označi specifični volumen vrele vode i suhe pare, volumen se mokre pare može odrediti iz relacije

$$V = m'v' + m''v'' \quad [7.6]$$

pa se specifični volumen mokre pare dobiva dijeljenjem s masom mokre pare

$$m = m' + m'' \quad [7.7]$$

$$v = \frac{V}{m} = \frac{m'}{m' + m''}v' + \frac{m''}{m' + m''}v'' \quad [7.8]$$

Uzevši u obzir [7.5] dobiva se

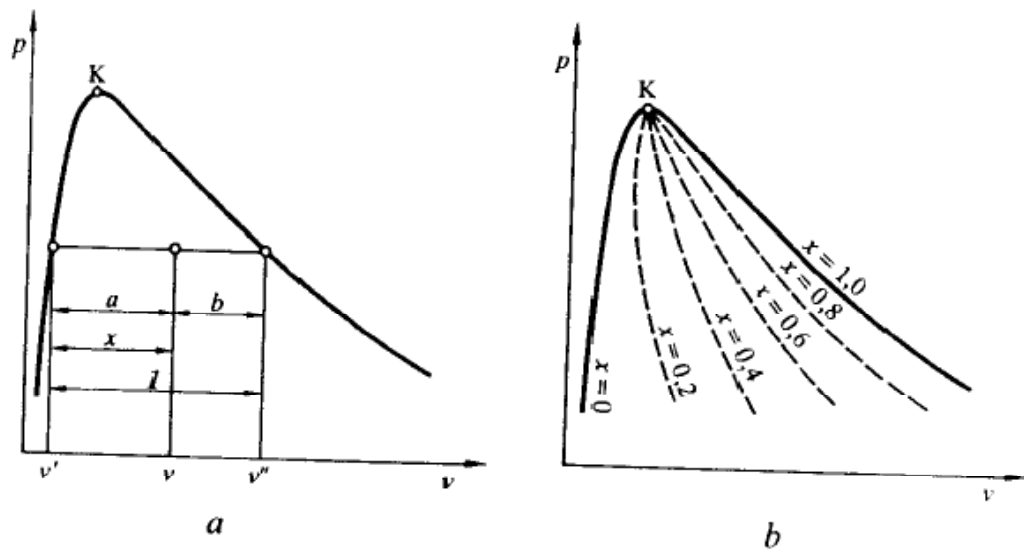
$$v = (1 - x)v' + xv'' = v' + x(v'' - v') \quad [7.9]$$

Volumeni su v' i v'' funkcije temperature, pa je volumen mokre pare određen ako je poznat sadržaj pare x .

Iz [7.9] mogu se postaviti omjeri

$$\frac{v - v'}{v'' - v'} = \frac{x}{1} = \frac{a}{a + b} \quad [7.10]$$

iz kojih je, Slika 7-3 a, moguće za svaku točku isparivanja u p, v – dijagramu odrediti sadržaj pare x , pa i krivulje konstantnog sadržaja pare $x = \text{konst.}$, Slika 7-3 b. Donja i gornja granična krivulja također su krivulje konstantnog sadržaja pare $x = 0$ i $x = 1$.



Slika 7-3 Određivanje krivulja konstantnog sadržaja pare ($x = \text{konst.}$)

Na isti način kao što je određen specifični volumen mokre pare dolazi se do izraza za unutrašnju kaloričku energiju mokre pare

$$u = u' + x(u'' - u'), \quad [7.11]$$

za entalpiju mokre pare

$$h = h' + x(h'' - h') \quad [7.12]$$

i za entropiju mokre pare

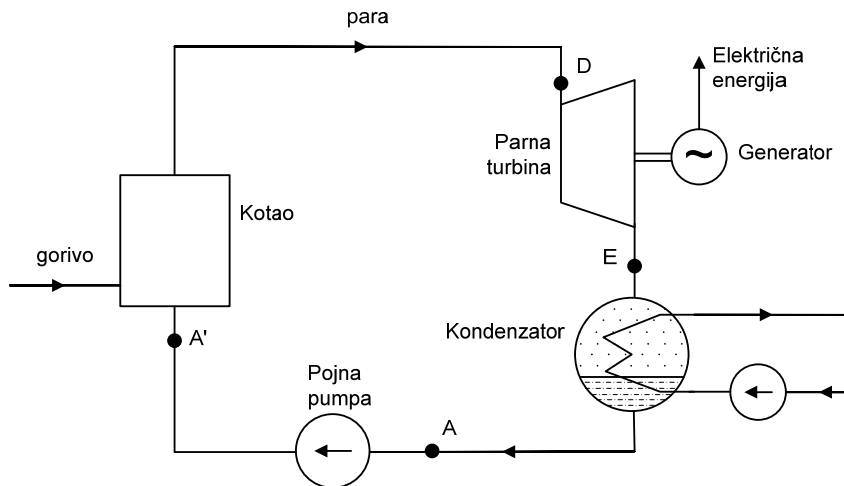
$$s = s' + x(s'' - s') \quad [7.13]$$

U T, s – dijagramu krivulje konstantnog sadržaja pare $x = \text{konst.}$ utvrđuju se na analogan način kao u p, v – dijagramu.

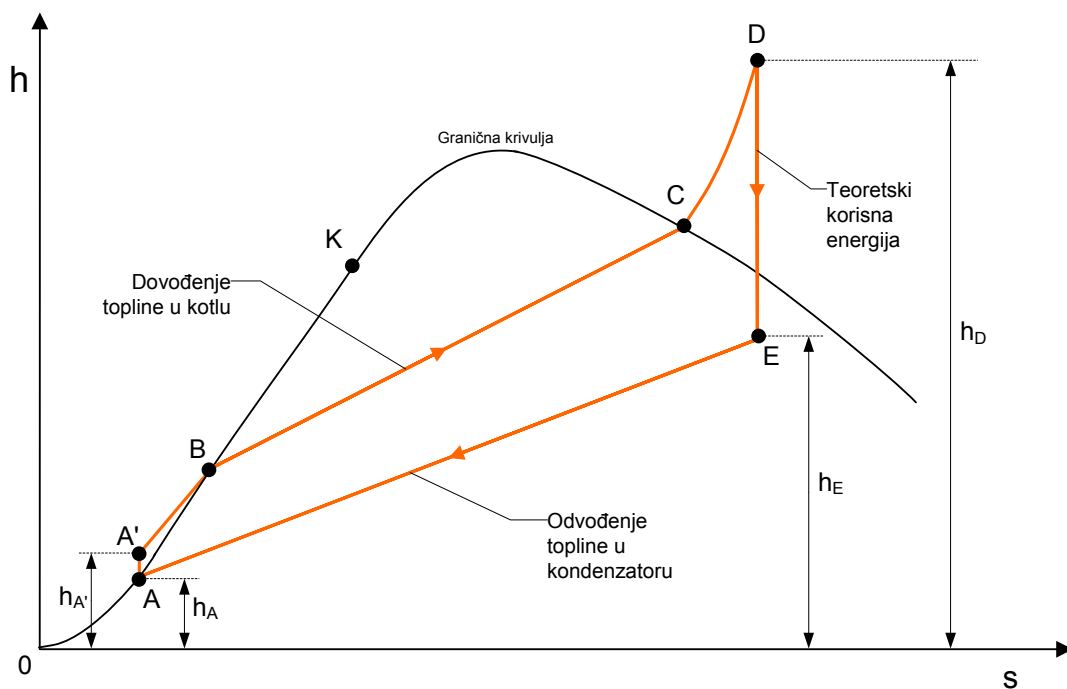
7.2 Postupci povećanja termičkog stupnja djelovanja

U kondenzacijskoj termoelektrani ista voda, zanemarimo li gubitke, isparuje, pregrijava se, kondenzira (nakon ekspanzije u turbini), da bi se vratila u parni kotao gdje će ponovno ispariti. Voda je podvrgnuta dakle kružnom procesu, Slika 7-4, budući da kružnim procesom možemo smatrati i onaj kada se ne vraća dio ili sva kondenzirana voda, jer izgubljena voda postiže temperaturu okolice, a istu temperaturu ima i voda kojom nadoknađujemo gubitke.

**POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U
TERMoeLEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA**



Slika 7-4 Shematski prikaz kružnog procesa u kondenzacijskoj termoelektrani
Kružni ćemo proces u termoelektrani prikazati u h,s – dijagramu, Slika 7-4.



Slika 7-5 Povratljivi kružni proces u kondenzacijskoj termoelektrani

Točka A' odgovara stanju vode na izlazu iz pojne pumpe (točka A' Slika 7-4). S tim stanjem voda ulazi u kotao, u kojem se ugrijava ($A' B$), ispariva ($B C$) i pregrijava ($C D$), Slika 7-5. U turbini para ekspandira, uz pretpostavku izentropske ekspanzije (radi se o povratljivom procesu), do tlaka kondenzatora (točka E), u kojemu se para kondenzira i sa stanjem koje odgovara točki A izlazi iz kondenzatora. Promjena stanja od A na A' posljedica je povišenja tlaka vode pojnom pumpom.

POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U TERMOELEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA

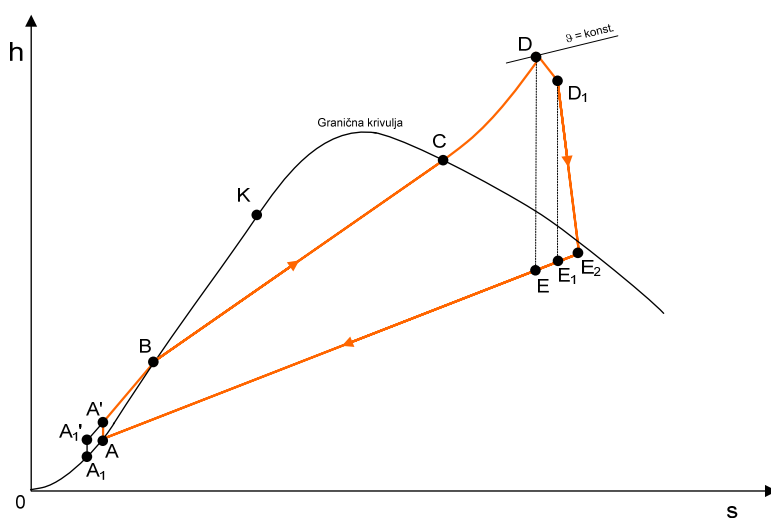
Eksergija je 1 kg pare, za povratljivi proces u turbini, jednaka je $h_D - h_E$. h_D je entalpija pare na ulazu u turbinu, a h_E entalpija na izlazu iz turbine. Dovedena je toplinska energija u kružni proces jednaka $h_D - h_{A'}$, gdje je $h_{A'}$ entalpija vode na ulazu u kotao, a odvedena $h_E - h_A$. Uvažimo li mehanički rad potreban za pumpanje pojne vode, maksimalni je rad kružnog procesa $h_D - h_E - (h_{A'} - h_A)$. Proširimo li izraz za dovedenu toplinsku energiju s $h_{A'}$, dobit ćemo relaciju $h_D - h_A - (h_{A'} - h_A)$, pa je termički stupanj djelovanja kružnog procesa

$$\eta_{ter} = \frac{h_D - h_E - (h_{A'} - h_A)}{h_D - h_A - (h_{A'} - h_A)} \quad [7.14]$$

Iz razmatranja ispuštamo drugi član $(h_{A'} - h_A)$ u brojniku budući da se uobičajeno, zbog vrlo malog iznosa u odnosu na tehnički rad dobiven na osovini parne turbine, potrošak mehaničkog rada za pojnu pumpu uključuje u ostali vlastiti potrošak elektrane. Osim toga, prema dosad rečenome, možemo zanemariti taj isti član i u nazivniku, čime se čini nešto veća pogreška samo kad je tlak u parnom kotlu jako visok, budući da se točka A' , Slika 7-5, (gotovo) poklapa s točkom A , pa relacija koja se rabi za termički stupanj djelovanja razmatramo li povratljive procese u kondenzacijskim termoelektanama glasi:

$$\eta_{ter} = \frac{h_D - h_E}{h_D - h_A} \quad [7.15]$$

Na taj način dolazimo do jedinstvene relacije koja vrijedi za sve kondenzacijske termoelektrane. Posebnosti pojedinačnih termoelektrana (njihovu veličinu) uzimamo u obzir uvažavajući količinu pare, koja se u jedinici vremena proizvodi u parnom kotlu, a njihovu izvedbu (kvalitetu ugrađenog materijala) uvažavajući gubitke koji se u realnom pogonu ne mogu izbjeći. Radi se o ovim gubicima energije i eksergije, Slika 7-6:



Slika 7-6 Realni kružni proces u kondenzacijskoj termoelektrani

**POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U
TERMoeLEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA**

- a) gubici u parnom kotlu (ložište je dio parnog kotla),
- b) gubici u parnom vodu od kotla do turbine i u regulacijskom ventilu turbine. Zbog njih stanje pare na ulazu u turbinu ne odgovara točki D već točki D_1 (Slika 7-6.),
- c) gubici (trenja) u parnoj turbini: ne radi se o izentropskoj ekspanziji $D_1 E_1$ već o adijabatskoj $D_1 E_2$. (Pritom zanemarujemo odvođenje toplinske energije iz parne turbine u okolicu; radi se o malim gubicima.) Omjerom razlika entalpija pare u točkama D_1 i E_2 (realni proces) i entalpije u točkama D_1 i E_1 (povratljivi proces) definiran je tzv. unutrašnji stupanj djelovanja turbine:

$$\eta_i = \frac{h_{D1} - h_{E2}}{h_{D1} - h_{E1}} \quad [7.16]$$

- d) gubici zbog pothlađenja kondenzata, u nekim slučajevima, ispod temperature zasićenja koja odgovara tlaku u kondenzatoru. U tom je slučaju stanje kondenzata na izlazu iz kondenzatora određeno točkom A_1 ,
- e) gubici pare kroz brtvenice i gubici toplinske energije zbog odvođenja i isijavanja, koje možemo zanemariti i
- f) mehanički gubici u turbini.

Označimo li s η_k stupanj djelovanja kotla, s η_p stupanj djelovanja parovoda, s η_i unutrašnji stupanj djelovanja a s η_m mehanički stupanj djelovanja turbine, može se odrediti stupanj djelovanja na vratilu turbine (η_e) iz izraza:

$$\eta_e = \eta_{ter} \cdot \eta_m \cdot \eta_i \cdot \eta_p \cdot \eta_k \quad [7.17]$$

pri čemu je pretpostavljeno da ne dolazi do pothlađivanja kondenzata. Stupanj djelovanja η_e nazvan je efektivnim stupnjem djelovanja.

Uvažavanjem stupnja djelovanja generatora (η_g) dolazimo do stupnja djelovanja elektrane na priključnicama generatora

$$\eta_{el} = \eta_e \eta_g, \quad [7.18]$$

te ako s ν označimo omjer između snage potrebne za vlastiti potrošak termoelektrane (P_{vl}) i snage na priključnicama generatora (P_{el}),

$$\nu = \frac{P_{vl}}{P_{el}}, \quad [7.19]$$

određujemo stupanj djelovanja na pragu termoelektrane:

$$\eta_{el,prag} = \eta_{el} \cdot (1 - \nu) \quad [7.20]$$

$$\left(\frac{P_{el} - P_{vl}}{P_{el}} = 1 - \frac{P_{vl}}{P_{el}} = 1 - \nu; P_{el}(1 - \nu) = P_{el} - P_{vl} = \text{električna snaga na pragu elektrane}\right)$$

Termoelektrane se međusobno uspoređuju pokazateljem koji govori o tome koliko toplinske energije u džulima [J] treba potrošiti da bi se proizveo 1 kWh električne energije. Taj je pokazatelj nazvan „specifičnim potroškom topline“. Razlikujemo specifični potrošak topline na priključnicama generatora:

$$s_g = \frac{3,6 \cdot 10^6}{\eta_{el}} = \frac{3,6 \cdot 10^6}{\eta_{ter} \eta_k \eta_p \eta_i \eta_m \eta_g} \text{ [J/kWh]} \quad [7.21]$$

i na pragu termoelektrane:

$$s_p = \frac{3,6 \cdot 10^6}{\eta_{el,prag}} = \frac{3,6 \cdot 10^6}{\eta_{el}(1 - \nu)} \text{ [J/kWh]} \quad [7.22]$$

Specifičnim potroškom topline naziva se i broj koji pokazuje koliko kilograma pare mora biti podvrgnuto kružnom procesu da bi se dobio koristan mehanički rad ($w_{KP} = w_t - |w_p|$) iznosa 1 kWh. Što je veća vrijednost specifičnog potroška pare, to su veće dimenzije termoelektrane. Naime, polazeći od ovakve definicije specifičnog potroška topline, dobivamo:

$$s_g = \frac{\dot{m} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{W}_{KP} [kW]} \cdot \frac{3600s}{1h} = \frac{3600}{w_{KP}} \left[\frac{kg}{kWh} \right]$$

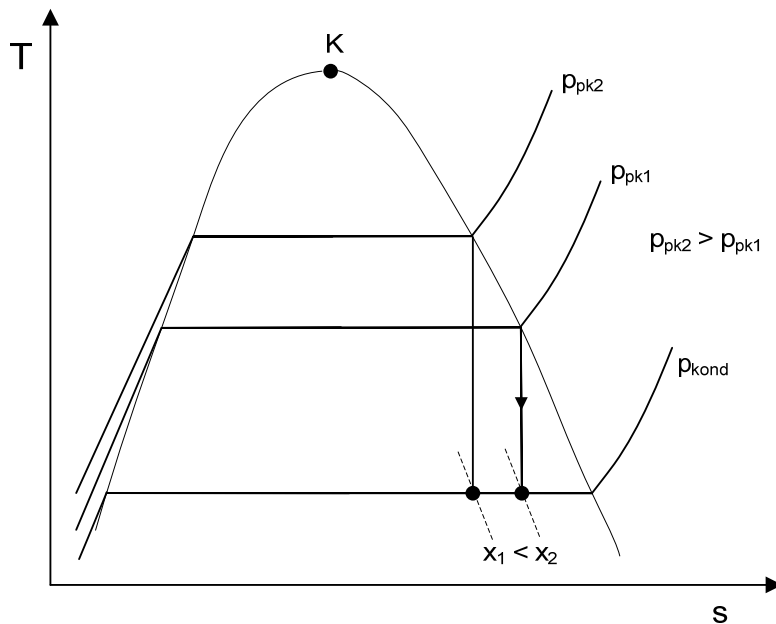
U tom slučaju specifični potrošak topline konstrukcijski je parametar termoelektrane koji naznačuje veličinu (dimenzije) termoelektrane.

Odlučujući utjecaj na stupanj djelovanja termoelektrane ima termički stupanj djelovanja, koji je normalno i najmanji, pa je razumljivo nastojanje da se termički stupanj djelovanja poboljša (poveća).

7.2.1 Proces sa suhom parom

S porastom tlaka suhe pare povisuje se termički stupanj djelovanja, ali je taj porast malen u usporedbi s povišenjem tlaka dok se cijelo postrojenje zbog većeg tlaka mora čvršće graditi. Relativno se mali porast termičkog stupnja djelovanja može rastumačiti činjenicom da s povišenjem tlaka, premda se povisuje temperatura suhe pare, srednja temperatura dovođenja toplinske energije T_m , Slika 7-1, sve polaganije raste što je tlak suhe pare viši. Sve se više, naime, dolazi u užu dio ispod graničnih krivulja, **Error! Reference source not found.** Pokraj toga povećanje tlaka suhe pare uz isti tlak u kondenzatoru prigodom ekspanzije dovodi do povećanja sadržaja vlage na izlazu iz turbine i posljedično smanjenja unutrašnjeg stupnja djelovanja turbine, Slika 7-4.

POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U TERMOELEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA



Slika 7-7 Povećanje sadržaja vlage na kraju ekspanzije uzrokovano povišenjem tlaka suhe pare

Zbog veće mase kapljice vode zaostaju u mlazu pare, troši se rad za njihovo povlačenje, a osim toga kapljice vode, udarajući o lopaticu, oštećuju površinu lopatica povećavajući tako trenje koje se javlja kad mlaz pare (i kapljice vode) kližu duž lopatice.

Ovisnost se unutrašnjeg stupnja djelovanja o sadržaju vlage u pari prikazuje relacijom

$$\eta'_i = \eta_i [1 - \alpha(1 - x)] \quad [7.23]$$

u kojoj je η_i unutrašnji stupanj djelovanja turbine kad ne bi bilo djelovanja vlage u pari, a α veličina koja ovisi o stanju pare na ulazu i izlazu iz turbine i o entalpiji na prijelazu u područje mokre pare.

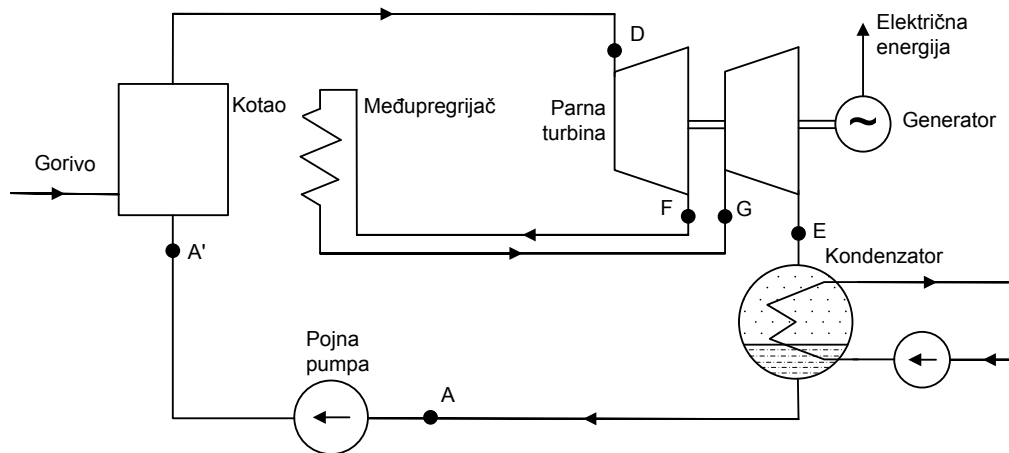
7.2.2 Proces s pregrijanom parom

Kako bi se izbjegli visoki tlakovi, a da se ipak postignu visoke temperature, normalno se kružni proces u termoelektrani s parnom turbinom izvodi s pregrijanom parom, Slika 7-5. U usporedbi s procesom sa suhom parom proces s pregrijanom parom ima bolji stupanj djelovanja koji je to viši što je temperatura pregrijanja viša. To je posljedica porasta srednje temperature T_{sr} dovođenja toplinske energije, [7.3].

7.2.3 Proces s međupregrijanjem pare

Termički se stupanj djelovanja može poboljšati međupregrijanjem pare koja je već djelomično ekspanzirala u prvom (visokotlačnom) dijelu turbine s tim da ponovno pregrijana para u drugom (niskotlačnom) dijelu turbine ekspanzira do kondenzatorskog tlaka, Slika 7-8.

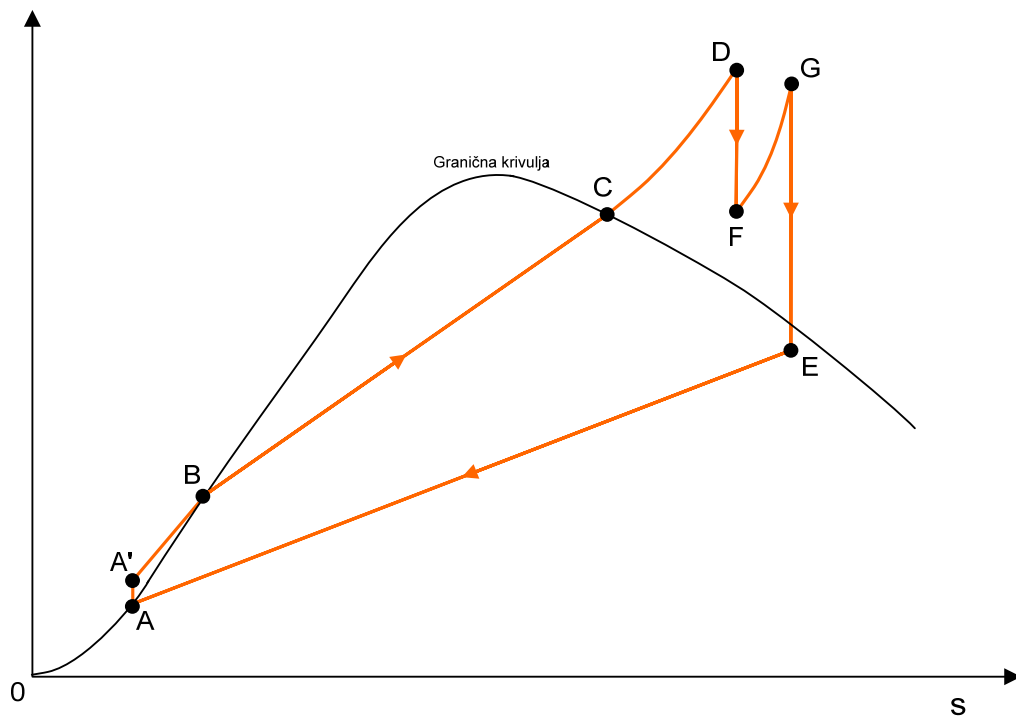
POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U TERMOELEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA



Slika 7-8 Shematski prikaz procesa s međupregrijanjem u kondenzacijskoj termoelektrani

Ponovno se pregrijanje obavlja u kotlu. Pregrijanje je svježom parom teoretski istovrijedno kao i pregrijanje u kotlu, ali temperatura je ponovno pregrijane pare ograničena temperaturom zasićenja koja pak odgovara tlaku svježe pare.

Termički stupanj djelovanja procesa određujemo na temelju Slika 7-9:



Slika 7-9 Prikaz procesa s međupregrijanjem u kondenzacijskoj termoelektrani

$$\eta_{ter} = \frac{(h_D - h_F) + (h_G - h_E)}{(h_D - h_A) + (h_G - h_F)} = \frac{(h_D - h_E) + (h_G - h_F)}{(h_D - h_A) + (h_G - h_F)} \quad [7.24]$$

POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U TERMOELEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA

Pritom je $\frac{(h_D - h_E)}{(h_D - h_A)}$ termički stupanj djelovanja kad ne bi bilo međupregrijanja pare, a dio je

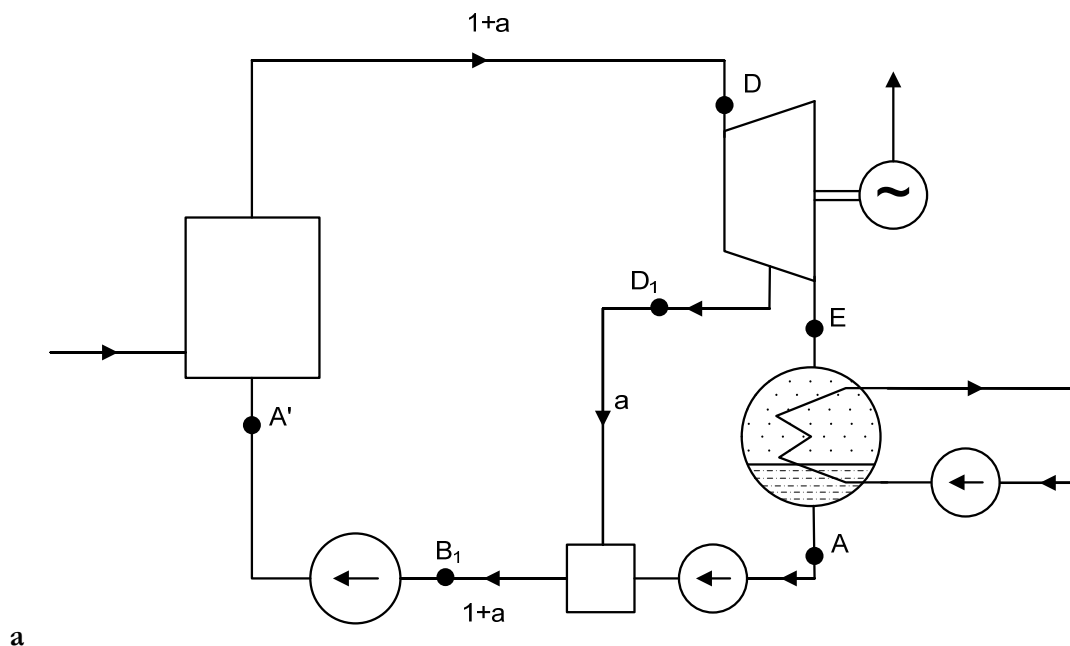
$\frac{(h_G - h_F)}{(h_G - h_F)}$ jednak jedan što znači da se sva, u međupregrijaču dovedena toplinska energija,

$h_G - h_F$, pretvara u mehanički rad (eksergiju). Zbog toga je termički je stupanj djelovanja za procese s međupregrijanjem bolji od termičkog stupnja djelovanja za procese bez međupregrijanja osim u slučaju kad se međupregrijava para vrlo niskog tlaka. S povećanjem temperature međupregrijanja povećava se termički stupanj djelovanja. Za svako stanje svježje pare postoji jedan optimalni tlak međupregrijanja za koji se postiže maksimalni termički stupanja djelovanja koji je jednak za sve temperature međupregrijanja.

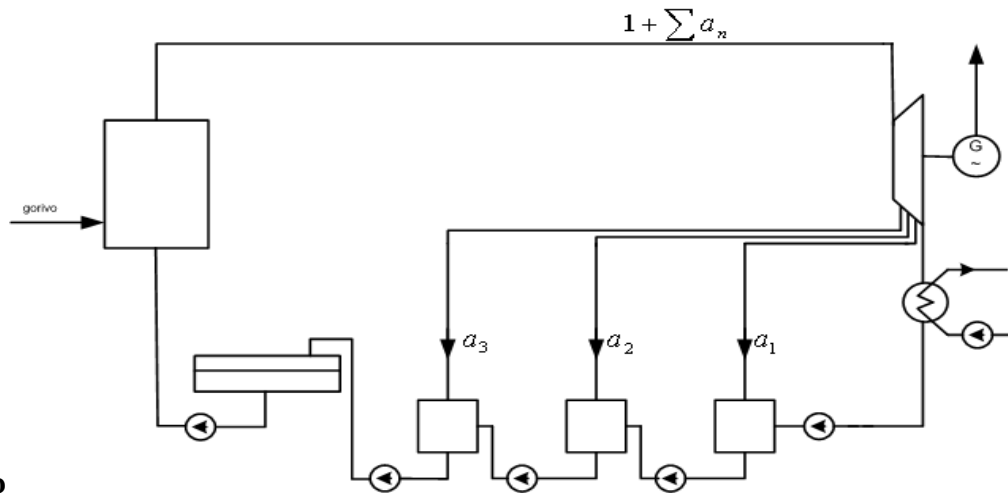
U stvarnom je procesu korist od međupregrijanja pare nešto veća od one koja se pokazuje razmatranjem teoretskog ciklusa, usprkos gubicima u cjevovodu između turbine i kotla, radi poboljšanja unutrašnjeg stupnja djelovanja u niskotlačnom dijelu turbine. (Međupregrijanjem se povećava sadržaj pare na kraju ekspanzije.)

7.2.4 Proces sa zagrijavanjem kondenzata

U opisanim se ciklusima može i dalje poboljšati termički stupanj djelovanja zagrijavanjem kondenzata parom koja je već djelomično ekspanzirala u turbini, Slika 7-10.



POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U TERMOELEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA



Slika 7-10 Shematski prikaz procesa sa zagrijavanjem kondenzata miješanjem: a – u jednom stupnju; b – u više stupnjeva

Ako pretpostavimo da je za zagrijavanje 1kg kondenzata potrebno a kg djelomično ekspanzirane pare, te ako s h_A označimo entalpiju kondenzata, s h_{D1} entalpiju na ulazu u zagrijač, a s h_{B1} entalpiju $(a+1)$ kg vode na izlazu iz zagrijača u kojem je zagrijavanje postignuto miješanjem, mora biti ispunjena jednačba (bilanca energije), Slika 7-10 a:

$$a(h_{D1} - h_{B1}) = 1 \cdot (h_{B1} - h_A) \quad [7.25]$$

Maksimalni se sada rad dobiva ekspanzijom dijela pare do kondenzatorskog tlaka i dijela pare (a kg za svaki kg pare koji ekspanzira do kondenzatorskog tlaka) koji samo djelomično ekspanzira do tlaka oduzimanja za zagrijavanje kondenzata:

$$1 \cdot (h_D - h_E) + a \cdot (h_D - h_{D1}) \quad [7.26]$$

U kotlu svakom kg vode treba dovesti toplinsku energiju iznosa $h_D - h_{B1}$, a budući da je količina vode $1+a$, količina dovedene toplinske energije iznosi

$$(1+a) \cdot (h_D - h_{B1}) \quad [7.27]$$

pa je termički stupanj djelovanja

$$\eta_{ter} = \frac{h_D - h_E + a(h_D - h_{D1})}{(1+a)(h_D - h_{B1})} \quad [7.28]$$

Nazivnik možemo proširiti s h_A i a h_{D1} , pa dobivamo

$$h_D - h_A - (h_{B1} - h_A) + a[(h_D - h_{D1}) + (h_{D1} - h_{B1})]$$

Uvaživši relaciju [7.25] dobivamo za termički stupanj djelovanja

$$\eta_{ter} = \frac{h_D - h_E + a(h_D - h_{D1})}{h_D - h_A + a(h_D - h_{D1})} \quad [7.29]$$

POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U TERMOELEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA

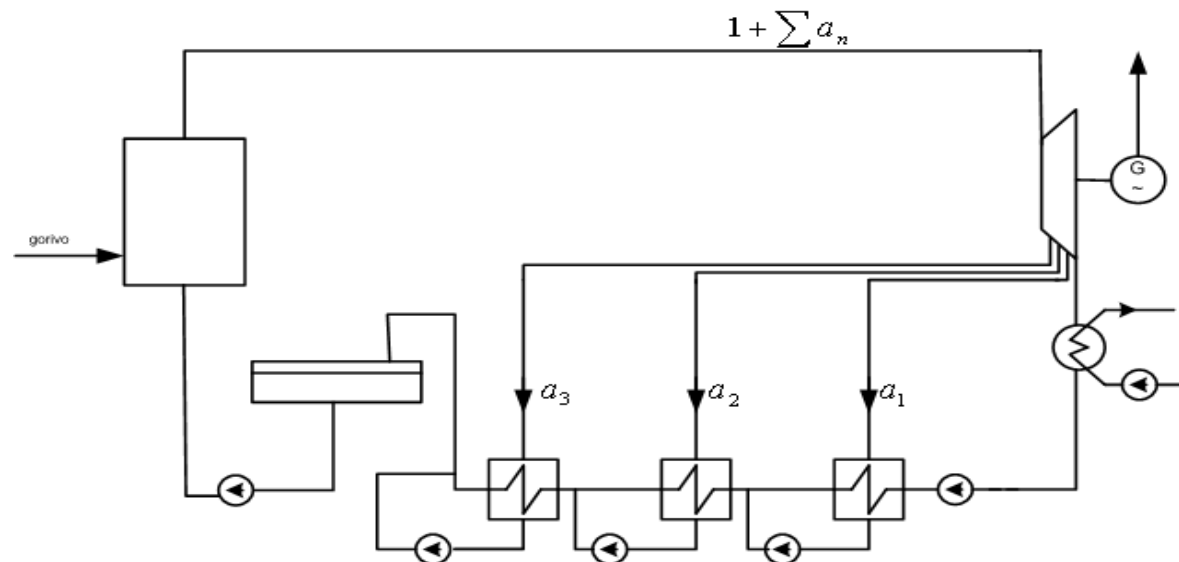
Prema [7.29] promatrani se ciklus razlikuje od ciklusa bez zagrijavanja kondenzata, [7.15], po tomu što se sva dovedena toplinska energija, $a \cdot (h_D - h_{D1})$, pretvara u eksergiju, dakle taj dodatni ciklus radi s termičkim stupnjem djelovanja jednakim 1. Naime, povećanjem se dovedene količine toplinske energije ne povećava količina toplinske energije koja se odvodi iz kondenzatora, $h_E - h_A$. Zagrijavanjem se kondenzata postiže dakle uvijek poboljšanje termičkog stupnja djelovanja. To naravno ne vrijedi ako zagrijavanje provodimo svježom parom, dakle kad je $h_{D1} = h_D$ (u tom slučaju ta para ne obavi nikakav rad), i kad se para za zagrijavanje kondenzata oduzima pred ulazom u kondenzator. (Ta je para iste temperature kao i kondenzat pa se, jasno, tom parom ne može zagrijati kondenzat.)

Daljnje se poboljšanje termičkog stupnja djelovanja može postići zagrijavanjem kondenzata u dva ili više stupnjeva, Slika 7-10 i Slika 7-11. U tom se slučaju termički stupanj djelovanja može odrediti iz izraza analognog [7.29]:

$$\eta_{ter} = \frac{h_D - h_E + \sum_1^n a_n (h_{Dn} - h_{Bn})}{h_D - h_A + \sum_1^n a_n (h_{Dn} - h_{Bn})} \quad [7.30]$$

Povećanjem se broja stupnjeva zagrijavanja kondenzata povećava termički stupanj djelovanja, jer se s povećanjem broja stupnjeva povećava i količina toplinske energije koja se, bez povećanja odvođenja toplinske energije u kondenzatoru, može iskoristiti u turbini. Međutim, svaki novi stupanj zagrijavanja ne donosi isto poboljšanje termičkog stupnja djelovanja; povećanje se smanjuje s povećanjem broja stupnjeva zagrijavanja, Slika 7-12.

a



a

[illegible]

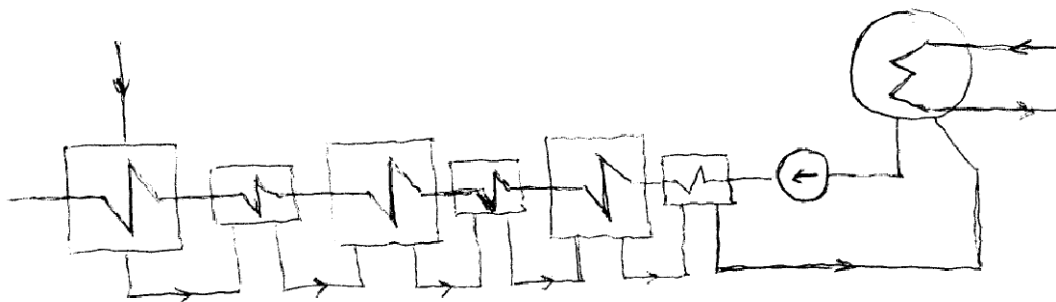
The graph plots the improvement of thermal efficiency (%) on the y-axis against the temperature of the heating medium (t_z in °C) on the x-axis. The y-axis ranges from 0 to 14 in increments of 2. The x-axis ranges from 0 to 300 in increments of 50. Seven curves, labeled 1 through 7, represent different heating stages. Curve 1 is labeled '1 stupanj zagrijavanja'. All curves start at approximately 25% efficiency at 25°C. Curves 1 through 4 peak at higher temperatures (around 150-200°C), while curves 5 through 7 peak at lower temperatures (around 100-150°C). Curve 7 reaches the highest efficiency of approximately 12.5% at 250°C.

t_z (°C)	1	2	3	4	5	6	7
25	25	25	25	25	25	25	25
50	35	35	35	35	35	35	35
100	55	60	65	70	75	80	85
150	68	85	95	105	110	115	120
200	55	90	102	110	115	120	125
250	35	80	100	110	115	120	125
300	10	70	90	100	110	115	120

17

Maksimalni se termički stupanj djelovanja postiže, kako pokazuju proračuni, ako se zagrijavanje tako podijeliti na stupnjeve da se u svakom stupnju postigne jednako povišenje temperature kondenzata.

Određivanje je termičkog stupnja djelovanja i određivanje podjele na stupnjeve zagrijanja provedeno pritom uz pretpostavku zagrijavanja miješanjem kondenzata i pare. Takav način zagrijavanja ima prednosti s obzirom na termički stupanj djelovanja, ali zahtijeva postavljanje pumpe za ukupnu količinu kondenzata (iz kondenzatora i kondenzirane pare za zagrijavanje) iza svakog stupnja zagrijavanja. Radi toga se normalno upotrebljavaju površinski zagrijači u kojima radi prijelaza toplinske energije dolazi do niže temperature zagrijavanja kondenzata uz iste tlakove pare za zagrijavanje. Vraćanje kondenzirane pare u krug ostalog kondenzata možemo postići ili pumpanjem kondenzata iz svakog zagrijača, Slika 7-11a, ili odvođenjem kondenzata iz zagrijača višeg tlaka u zagrijač nižeg tlaka sve do turbinskog kondenzatora, Slika 7-11 b. U prvom slučaju imamo iste prilike kao u slučaju zagrijavanja miješanjem, jer, nakon dovodenja kondenzirane pare, kondenzat postiže istu temperaturu. U drugom se slučaju postiže niži stupanj djelovanja, jer se dio topline dovodi u prethodni zagrijač, pa se na taj način smanjuje mehanički rad koji proizvodi u turbini para za zagrijavanje. Poboljšanje postićemo postavljanjem pomoćnih zagrijača, Slika 7-13, u kojima kondenzirana para predaje toplinsku energiju prije ulaska u prethodni zagrijač.



Slika 7-13 Vraćanje kondenzirane pare kroz pomoćne zagrijače nižeg tlaka u kondenzator

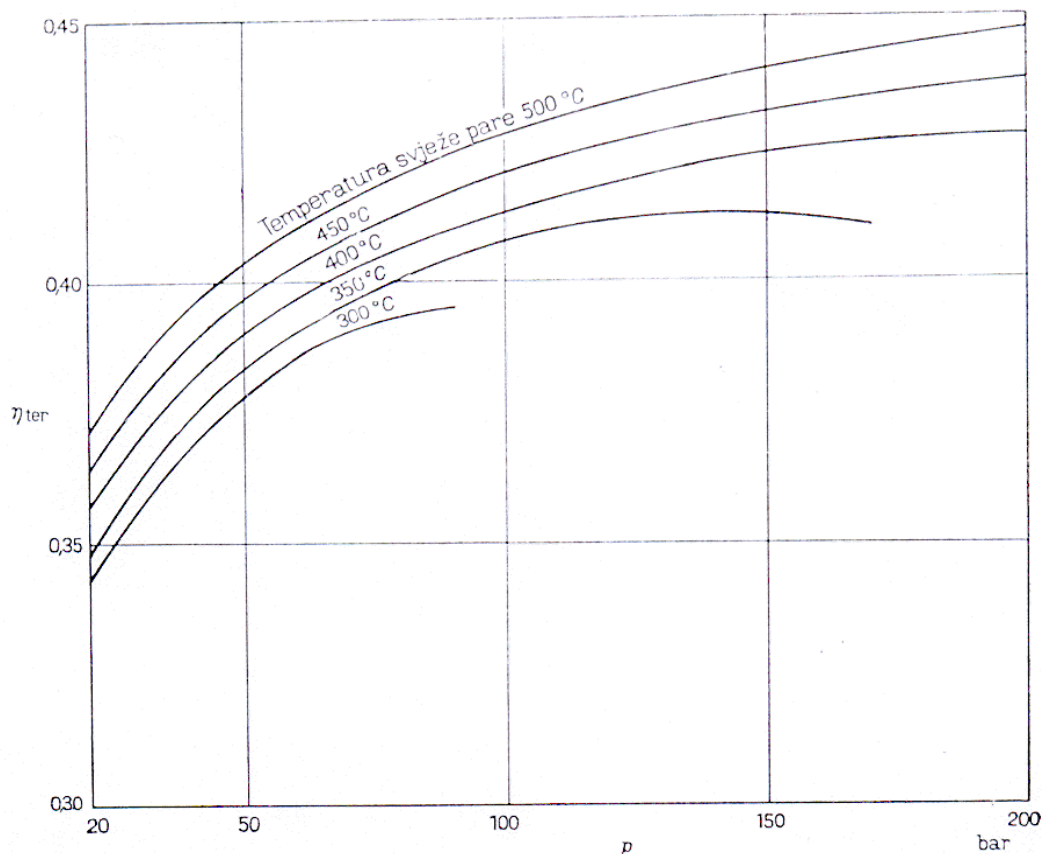
U praksi, pri podjeli zagrijavanja na stupnjeve, nije moguće u potpunosti zadovoljiti uvjete za postizanje maksimalnog termičkog stupnja djelovanja radi toga što paru iz turbine možemo oduzimati samo između stupnjeva turbine, a podjela se na stupnjeve u turbini obavlja prema drugim zahtjevima. Međutim manja odstupanja od optimalne podjele na stupnjeve zagrijavanja ne mijenjaju znatnije termički stupanj djelovanja, jer se η_{ter} malo mijenja u okolini maksimalne vrijednosti.

7.2.5 Utjecaj tlaka i temperature svježeg pare

Termički stupanj djelovanja kružnog procesa raste s povećanjem tlaka pare sve do optimalnog tlaka uz koji se postiže maksimalni stupanj djelovanja. Taj je optimalni tlak to veći što je temperatura pare viša tako da za temperature od 450 °C i više doseže vrijednost iznad 200 bara (Slika 7-14). To vrijedi za ciklus bez zagrijavanja kondenzata, dok za ciklus već s jednim stupnjem zagrijavanja maksimum iščezava, pa povišenje tlaka donosi i povećanje termičkog stupnja djelovanja. Povišenje pak temperature svježeg pare dovodi uvijek do poboljšanja termičkog stupnja djelovanja. Granica temperature određena je svojstvima

POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U TERMOELEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA

upotrijebljenog čelika. Feritni čelici mogu se upotrijebiti do temperature od 560 °C, za više temperature (do 650 °C) potrebni su austenitni čelici.

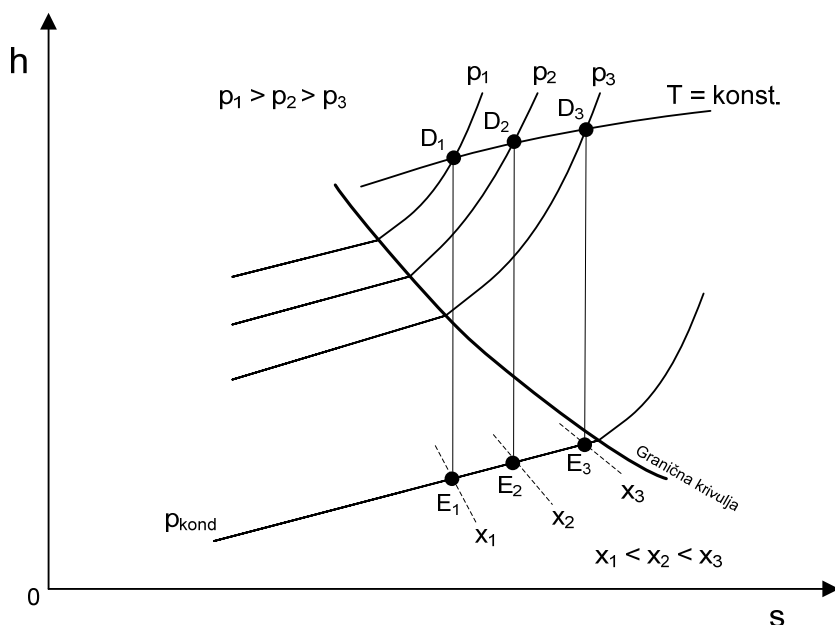


Slika 7-14 Ovisnost termičkog stupnja djelovanja η_{ter} o tlaku p i temperaturi svježe pare za teoretski ciklus bez zagrijavanja kondenzata (temperatura u kondenzatoru 27 °C)

Međutim, spomenuli smo to, tlak utječe i na unutrašnji stupanj djelovanja turbine. Povećanjem tlaka smanjuje se unutrašnji stupanj djelovanja i u visokotlačnom i u niskotlačnom dijelu turbine. Na smanjenje unutrašnjeg stupnja djelovanja u visokotlačnom dijelu turbine djeluje relativno povećanje gubitaka propustivosti (gubici u brtvenicama i gubici u rasporu) i povećanje trenja rotora i ventilacije. Utjecaj je visokotlačnog dijela turbine na unutrašnji stupanj djelovanja to veći što je snaga turbine manja i što je tlak pare veći. Praktički je, uvaživši samo gubitke u visokotlačnom dijelu turbine, unutrašnji stupanj djelovanja ovisan o količini pare koja se dovodi turbini. Turbina male snage s visokim tlakom pare ima i mali stupanj djelovanja. Utjecaj je količine pare na stupanj djelovanja tim veći što je turbina manja i tlak pare viši.

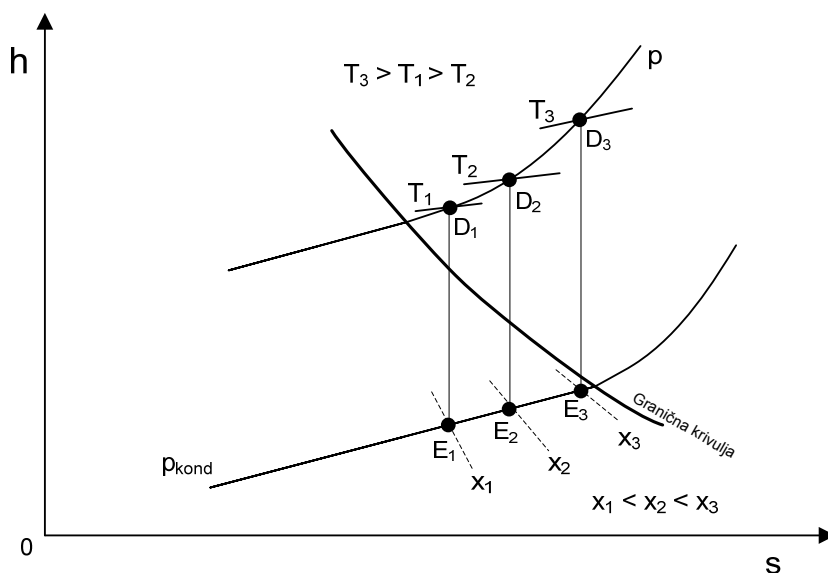
U niskotlačnom dijelu turbine smanjenje unutrašnjeg stupnja djelovanja radi povećanja tlaka prouzrokovano je povećanjem sadržajem vlage u posljednjim stupnjevima turbine. Povećanje tlaka svježe pare naime, uz istu temperaturu i uz isti tlak u kondenzatoru, dovodi do povećanja sadržaja vlage u posljednjim stupnjevima turbine, Slika 7-15.

POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U TERMOELEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA



Slika 7-15 Povećanje sadržaja vlage na kraju ekspanzije uzrokovano povećanjem tlaka svježe pare

Povećanje pak temperature svježe pare povećava sadržaj pare na kraju ekspanzije, Slika 7-16, i dovodi uvijek do poboljšanja stupnja djelovanja.



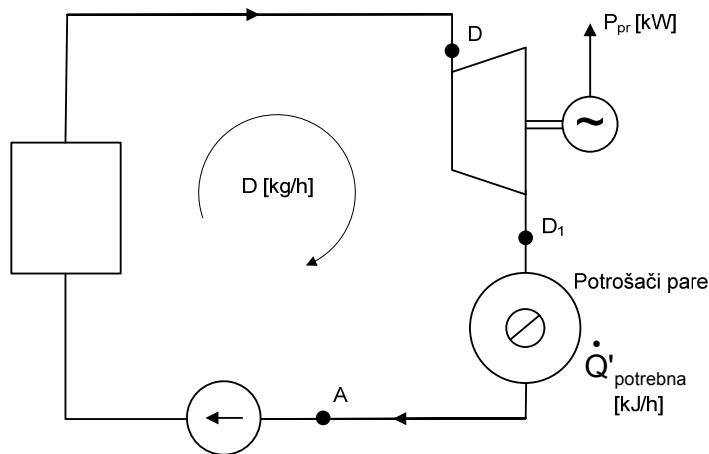
Slika 7-16 Povećanje sadržaja pare na kraju ekspanzije uzrokovano povećanjem temperature svježe pare

Povećanjem se tlaka svježe pare poboljšava međutim termički stupanj djelovanja. Budući da je za određenu snagu turboagregata efektivni stupanj djelovanja, [7.17], ovisan najvećim dijelom o umnošku $\eta_{\text{ter}} \cdot \eta_i$, s povećanjem tlaka dolazimo u područje u kojem će šteta radi smanjenja unutrašnjeg stupnja djelovanja turbine biti veća od koristi radi poboljšanja

termičkog stupnja djelovanja. Tek (opsežan) proračun ovisnosti specifičnog potroška topline o tlaku za različite snage turbine daje odgovor na pitanje o optimalnim vrijednostima tlaka svježe pare.

7.2.6 Kombinirana proizvodnja pare i električne energije

Neke industrije trebaju za tehnološki proces osim električne energije i paru (toplinsku energiju): kemijska i petrokemijska industrija, tvornice šećera cementa, papira itd. Para se osim toga koristi za grijanje prostorija bilo u tvornicama bilo u javnim zgradama i stanovima. Istodobna potreba električne i toplinske energije omogućuje kombiniranu proizvodnju. Jedan je od primjera uporaba protutlačne turbine u kojoj para najprije ekspandira do tlaka koji odgovara potrošačima pare (taj tlak je određen potrebnom temperaturom pare), a zatim se odvodi potrošačima, Slika 7-17.



Slika 7-17 Kombinirana proizvodnja pare i električne energije

Poznavajući tlak i temperaturu ulazne pare, tlak pare na izlazu iz turbine, te unutrašnji stupanj djelovanja turbine, možemo odrediti entalpiju pare na ulazu (h_D) i na izlazu iz turbine (h_{D1}). Iz potrebne količine toplinske energije (toplinske snage, $\dot{Q}'_{potrebna} \equiv \dot{Q}'_p [kJ/h]$) za potrošače određujemo količinu pare koja (u jedinici vremena, ovdje jednom satu) struji kroz turbinu:

$$D = \frac{\dot{Q}'_p}{h_{D1} - h_A} [kg/h] \quad [7.31]$$

Ekspanzijom se količine pare D u turbini proizvodi električna energija snage $P_{proizvedeno} \equiv P_{pr}$ na stezaljkama generatora:

$$P_{pr} = D(h_D - h_{D1}) [kW] \quad [7.32]$$

pa je proizvedena (tražena) energija (snaga), $\dot{Q}'_{tražena} \equiv \dot{Q}'_{tr}$ jednaka:

$$\dot{Q}'_{tr} = \dot{Q}'_p + P_{pr} \quad [7.33]$$

POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U TERMOELEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA

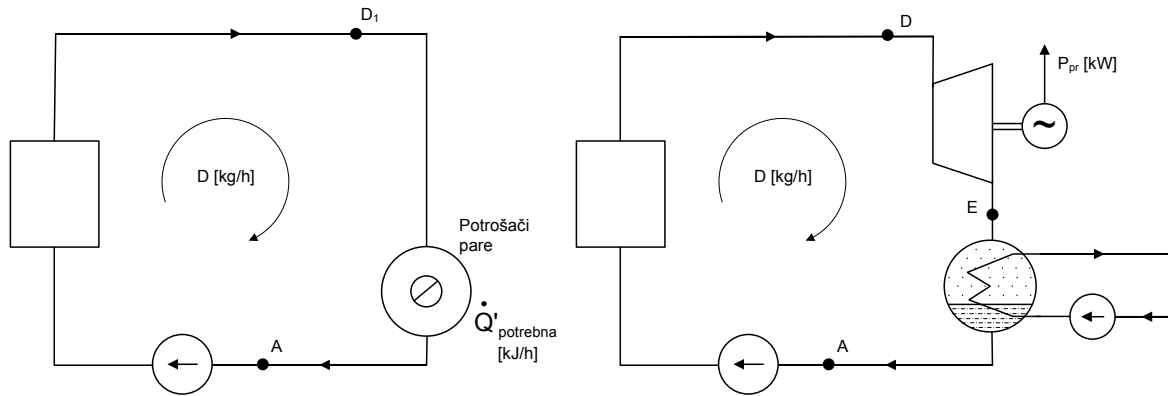
Dovedena je toplinska energija (snaga) pritom

$$\dot{Q}'_{dov} = D(h_D - h_A) [kJ/h] \quad [7.34]$$

pa je stupanj djelovanja procesa (to nije termički stupanj djelovanja):

$$\eta_1 = \frac{\dot{Q}'_p + P_{tr}}{\dot{Q}'_{dov}} = \frac{(h_{D1} - h_A) + (h_D - h_{D1})}{h_D - h_A} \quad [7.35]$$

Razmotrimo sada odvojenu proizvodnju pare i električne energije, Slika 7-18.



Slika 7-18 Odvojena proizvodnja pare i električne energije

Potrebna je količina pare za predaju količine toplinske energije (snage) $\dot{Q}''_{potrebno} \equiv \dot{Q}''_p$:

$$D_p = \frac{\dot{Q}''_p}{h_{D1} - h_A} [kg/h] \quad [7.36]$$

Dok je za električnu energiju (snagu, $P_{traženo} \equiv P_{tr}$) potrebna količina pare:

$$D_e = \frac{P_{tr}}{h_D - h_E} [kg/h] \quad [7.37]$$

Ukupna je tražena (potrebna, korisna) proizvedena (dostavljena) energija (snaga) stoga:

$$\dot{Q}''_{tr} = D_p(h_{D1} - h_A) + D_e(h_D - h_E) \quad [7.38]$$

dok je dovedena energija:

$$\dot{Q}''_{dov} = D_p(h_{D1} - h_A) + D_e(h_D - h_A) \quad [7.39]$$

Stupanj je djelovanja dakle:

$$\eta_2 = \frac{D_p(h_{D1} - h_A) + D_e(h_D - h_E)}{D_p(h_{D1} - h_A) + D_e(h_D - h_A)} \quad [7.40]$$

Uspoređujemo li slučajeve kombinirane i odvojene proizvodnje pare i električne energije, moramo računati s istim količinama korisne (tražene, proizvedene, dostavljene) energije:

$$P_{pr} = P_{tr} \text{ i } \dot{Q}'_p = \dot{Q}''_p \quad [7.41]$$

Tada je drugi član u brojniku relacije [7.40] jednak

$$D_e(h_D - h_E) = P_{tr} = P_{pr} = D(h_D - h_{D1}) \text{ (jednakost električne energije /snage/)}$$

Budući da je $D_p = D$, možemo pisati, dijeljenjem s D :

$$\eta_2 = \frac{(h_{D1} - h_A) + (h_D - h_{D1})}{(h_{D1} - h_A) + \frac{D_e}{D}(h_D - h_A)} \quad [7.42]$$

(Vrijedi naime: $D_e(h_D - h_E) = D(h_D - h_{D1})$.)

Izrazimo li D_e snagom $P_{tr} = D_e(h_D - h_E)$

$$D_e = \frac{P_{tr}}{h_D - h_E} \quad [7.43]$$

te uvaživši jednakost električnih snaga u oba postrojenja

$P_{tr} = P_{pr}$, a jer je

$$D = \frac{P_{pr}}{h_D - h_{D1}} \quad [7.44]$$

dobivamo:

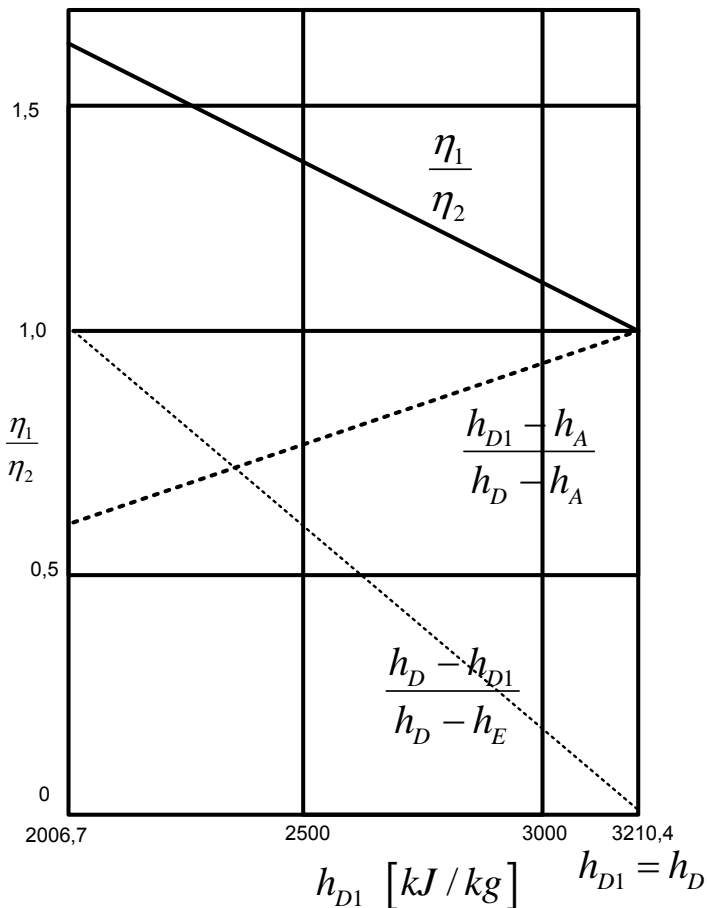
$$\eta_2 = \frac{(h_{D1} - h_A) + (h_D - h_{D1})}{(h_{D1} - h_A) + \frac{h_D - h_{D1}}{h_D - h_E}(h_D - h_A)} \quad [7.45]$$

Omjer je stupnjeva djelovanja η_1 i η_2 tada

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{h_{D1} - h_A}{h_D - h_A} + \frac{h_D - h_{D1}}{h_D - h_E} \quad [7.46]$$

Taj ćemo omjer prikazati u ovisnosti o h_{D1} (u ovisnosti o potrebama parnih potrošača) jer su vrijednosti h_D , h_E i h_A određene izvedbom termoelektrane. h_{D1} se kreće u granicama h_D i h_E . Za sve je $h_{D1} < h_D$ stupanj djelovanja η' veći od η'' jer je $\eta_1 / \eta_2 > 1$, Slika 7-19.

**POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U
TERMoeLEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA**



Slika 7-19 Ovisnost omjera stupnjeva djelovanja η_1/η_2 o entalpiji pare za grijanje h_{D1} za

$$h_D = 3210,4 \text{ kJ/kg}, h_E = 2006,7 \text{ kJ/kg} \text{ i } h_A = 125,6 \text{ kJ/kg}$$

Takvi se odnosi dobivaju u svim slučajevima, što ukazuje na to da je energetski povoljno, kad god je to moguće, ostvariti kombiniranu proizvodnju pare i električne energije. Međutim, ostvarenje kombinirane proizvodnje moguće je samo kad se potrošač toplinske energije nalazi u (neposrednoj) blizini termoelektrane, jer prijenos pare na veće udaljenosti nije ekonomski podnošljiv.

Kombinirana se proizvodnja pare, Slika 7-17, može ostvariti samo kad u svakom trenutku postoji vremenski sklad između potrošnje pare i potrošnje električne energije, odnosno i kad elektroenergetski sustav može preuzeti svu električnu energiju, koja se može proizvesti, ili nadoknaditi sav manjak tražene električne energije koji se može pojaviti. U svim drugim slučajevima treba za kombiniranu proizvodnju pare i električne energije upotrijebiti druge sheme.

Pri razmatranju energetskih odnosa u slučaju kombinirane proizvodnje treba razlikovati dva omjera: *omjer moguće proizvodnje* σ_0 i *omjer potražnje* σ . Omjer moguće proizvodnje definiran je izrazom:

$$\sigma_0 = \frac{P}{Q} \quad [7.47]$$

gdje je:

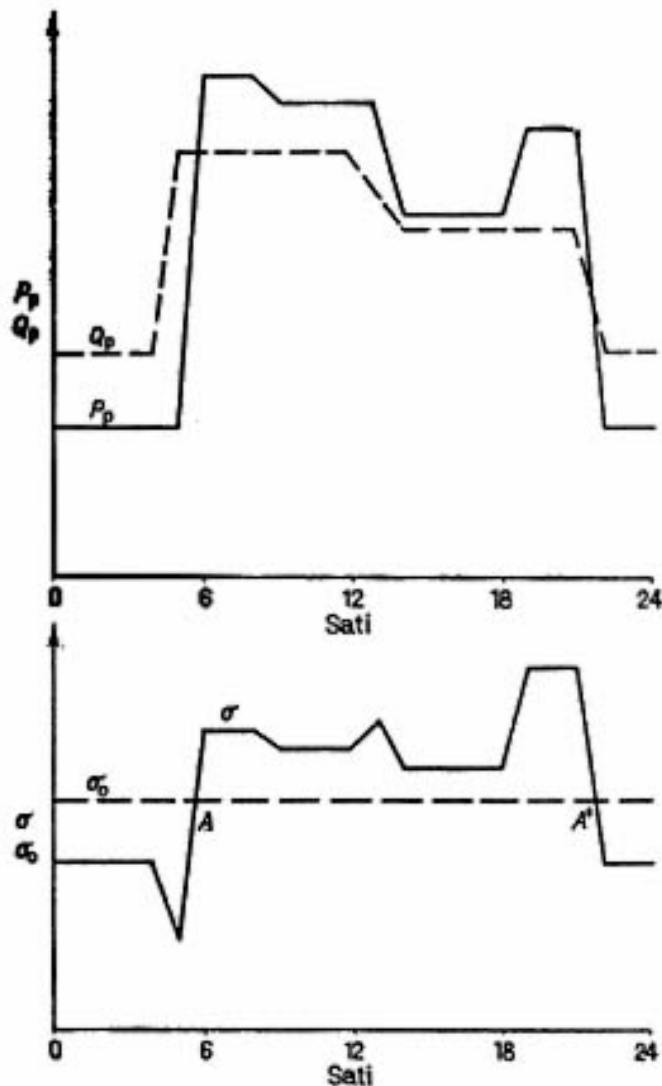
$P[kW]$ snaga na generatoru, a $Q[MJ/h]$ - toplinska koja se predaje potrošačima u kombiniranoj proizvodnji električne energije.

Ako se zanemari utjecaj stupnjeva djelovanja i njihova ovisnost o opterećenju, omjer σ_0 ovisi o parametrima svježe pare, o tlaku pare za potrošače i o temperaturi kondenzata koji se vraća u elektranu. Taj je omjer dakle praktički konstantna veličina za izgrađenu elektranu, odnosno za odabrane parametre svježe pare, jer su ostale veličine ovisne o potrošačima. S druge strane, omjer potražnje σ , koji ovisi o potrošnji električne energije P_p i o potrošnji topline Q_p prema izrazu:

$$\sigma = \frac{P_p}{Q_p} \quad [7.48]$$

varira tijekom dana u vrlo širokim granicama. Slika 7-20 prikazuje primjer dnevnog dijagrama potražnje električne energije i topline, te promjena omjera σ tijekom dana, koja odgovara dijagramima potražnje.

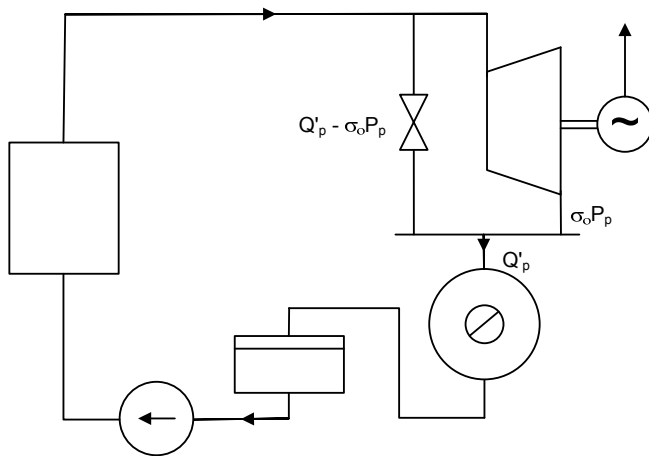
**POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U
TERMOELEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA**



Slika 7-20 Dijagrami potražnje električne snage P_p i topline Q_p te promjena omjera σ tijekom dana

Samo u dva trenutka tijekom dana (točke A i A' Slika 7-20) postoji jednakost $\sigma = \sigma_0$, pa je samo tada moguće zadovoljiti potražnju i električne energije i topline, Slika 7-17. Pogon koji prikazuje Slika 7-17 za slučaj $\sigma < \sigma_0$ nije moguć jer se potrebnom količinom pare može proizvesti električna snaga veća od one koja je potrebna potrošačima. To bi dovelo do povećanja broja okretaja turbine, do djelovanja regulatora turbine i do smanjenja dovoda pare turbini dok se ne uspostavi ravnoteža između proizvodnje i potrošnje električne snage, ali onda ne bi bila zadovoljena potražnja pare. Shema koju prikazuje Slika 7-21 omogućuje opskrbu potrošača za slučaj $\sigma < \sigma_0$, jer osim protutlačne turbine postoji redukcijski ventil, preko kojega se dopunjuje manjak pare.

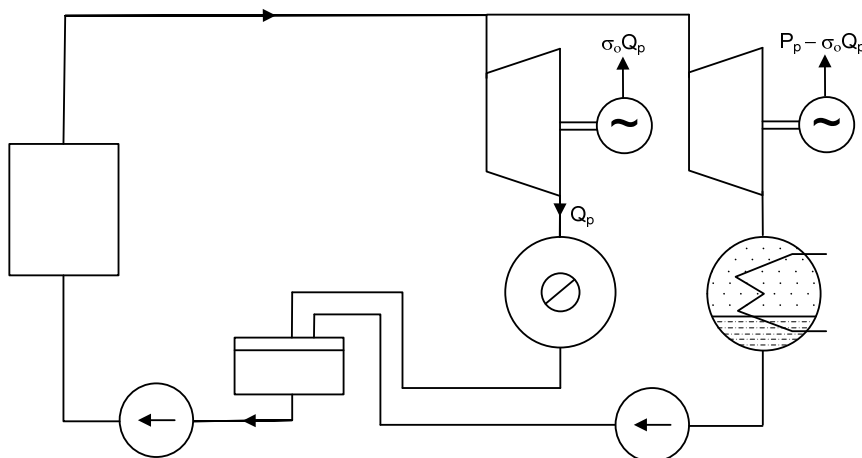
**POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U
TERMoeLEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA**



Slika 7-21 Shema spoja za kombinirana proizvodnja pare i električne energije za slučaj $\sigma < \sigma_0$

Kroz turbinu naime prolazi količina pare koja odgovara toplinskoj energiji $\sigma_0 P_p$, a kroz reduksijski ventil struji razlika koja odgovara količini toplinske energije $Q_p - \sigma_0 P_p$.

Obrnuta je slika za slučaj $\sigma > \sigma_0$ jer tada potrošači električne energije traže snagu veću od one koju ekspanzijom u protutlačnoj turbini može proizvesti para potrebna potrošačima pare. Da se zadovolje oba potrošača, potrebno je postaviti još jednu kondenzacijsku turbinu, Slika 7-22, koja će osigurati neovisnost proizvodnje električne energije o potražnji pare.



Slika 7-22 Shema spoja za kombinirana proizvodnja pare i električne energije za slučaj $\sigma > \sigma_0$

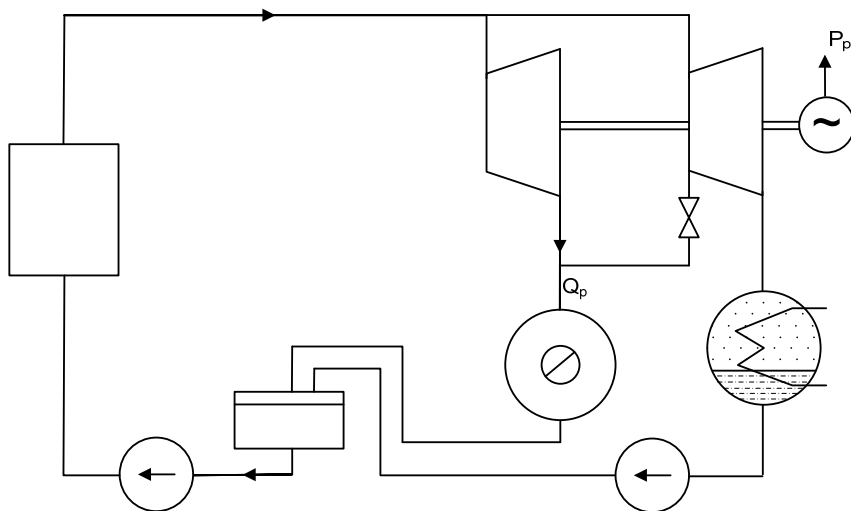
Protutlačna turbina daje sada snagu $\sigma_0 Q_p$, a kondenzacijska ostatak $P_p - \sigma_0 Q_p$.

Razmatranje o odnosu između omjera σ_0 i σ , istaknimo ponovno, važno je samo u slučaju kad promatrana termoelektrana radi izolirano od elektroenergetskog sustava ili kad je elektroenergetski sustav malen u odnosu na promatranu termoelektranu. Ako je

POSTUPCI POVEĆANJA TERMIČKOG STUPNJA DJELOVANJA U TERMOELEKTRANAMA S PARNIM TURBINAMA

elektroenergetski sustav velik prema promatranoj elektrani, može se računati da će se svi manjkovi električne energije moći nadoknaditi iz sustava i da će sustav moći preuzeti sve viškove električne energije.

Kako bi se osigurala potpuna elastičnost pogona, koriste se turbine s oduzimanjem pare, Slika 7-23, koje uz korištenje redukcijuskog ventila omogućuju opskrbu potrošača za sve moguće odnose između omjera σ i σ_0 .



Slika 7-23 Shema spoja turbine s oduzimanjem pare

Ispraviti:

umjesto „**Error! Reference source not found**“ treba stajati [6.52]