

Termoelektrane, mogućnosti pretvorbe oblika energije u električnu energiju u termoelektranama

Termoelektrane su energetska postrojenja čija je osnovna namjena proizvodnja i transformacija primarnih oblika energije u koristan rad, koji se kasnije u obliku mehaničke energije dalje iskorištava za proizvodnju električne energije. Danas se elektrane rijetko grade kao izolirana postrojenja u kojima se električna energija proizvodi samo za određene industrijske potrošače locirane su daleko od postojećih električnih mreža. One su dio elektroenergetskog sistema koji ima:

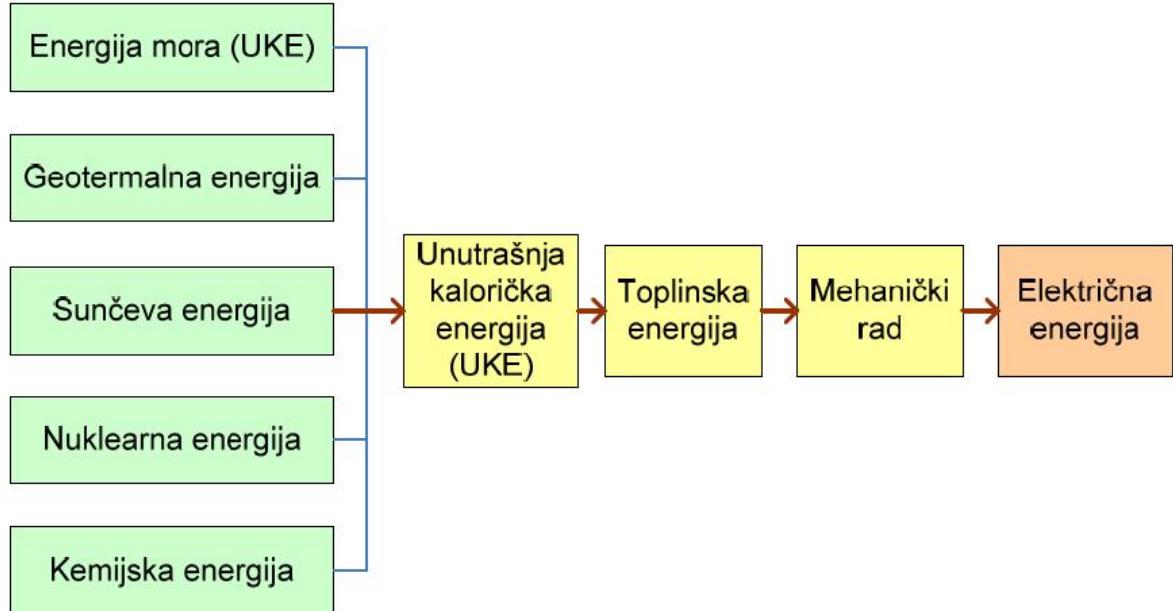
- Veći broj elektrana za proizvodnju električne energije,
- rasklopna postrojenja za razvod i transformaciju električne energije,
- vodove za prijenos i razdiobu električne energije i
- postrojenja, uređaje i aparate u kojima se električna energija kod potrošača pretvara u onaj oblik energije koji mu je potreban (toplino, mehanički rad, kemijsku energiju, svjetlo).

Način izgradnje elektrane, dimenzioniranje njezinih uređaja i izbor njihovih pogonskih karakteristika, ovise je o uticaju elektroenergetskog sistema kojem pripada. Uloga i režim rada pojedine elektrane u elektroenergetskom sistemu ovise o sposobnosti elektrane da se prilagodi brzim promjenama opterećenja (da u svakom trenutku proizvodi točno one količine električne energije koje zahtijevaju potrošači (potrošnja). Najbolje se mogu prilagoditi akumulacijske hidroelektrane i termoelektrane s plinskim turbinama, Redovo je potrebno da ispunjavaju zahtjev da se potrebna električna energija proizvede uz što niže troškove (maksimalno iskorištenje raspoložive vode, što veća proizvodnja u termoelektranama s malim specifičnim troškovima za gorivo).

Termoelektrana se sastoji od mnogo različitih dijelova koji tvore jednu kompleksnu cjelinu. Najvažnije dijelove koji tvore zatvorenu cjelinu unutar jedne termoelektrane su:

- generator pare,
- turbina,
- generator električne energije i
- kondenzator

Glavna primjena i svrha termoenergetskih postrojenja je proizvodnja pare koja će pokretati turbinu, a zatim i generator električne energije. Elektrane u kojima se iskorištava potencijalna energija vode hidroelektranama (tu se ubrajaju i elektrane koje se koriste plimom i osekom). Elektrane u kojima se iskorištava kinetička energija zraka vjetroelektranama, termoelektranama elektrane u kojima se toplinska energija pretvara u mehanički rad, a ovaj u električnu energiju, bez obzira na to radi li se o toplinskoj energiji dobivenoj transformacijom iz nuklearne energije fisijom, iz kemijske energije izgaranjem fosilnih i drugih goriva ili iz energije Sunčeva zračenja, odnosno radi li se o unutrašnjoj kaloričkoj energiji geotermalnih izvora ili mora, slika 1.



slika 1: Shema pretvorbi oblika energije u električnu energiju u termoelektranama

Da bi se istakle razlike između primarnih oblika energije koji se koriste u termoelektranama, govori o

- konvencionalnim („klasičnim“) termoelektranama,
- nuklearnim elektranama
- solarnim elekranama
- geotermalnim elektranama

Da bi se naglasilo u kojem se stroju transformira unutrašnja kalorička energija (točnije entalpija) u mehanički rad, govori se o:

- termoelektranama s parnim turbinama (nekada je to bio parni klipni stroj)
- plinskim turbinama
- odnosno o termoelektranama s dizelskim motorima (to je još uvijek klipni stroj)

U ovisnosti o fluidu koji se upotrebljava kao posrednik u energetskim transformacijama u termoelektranama (to može biti plin ili vodena para), govori se o termoelektranama s plinskim i termoelektranama s parnim turbinama. Sva nabrojena postrojenja za proizvodnju električne energije nazivamo termoelektrane, a najvažniji energetski proces u njima je proces pretvorbe toplinske energije u mehanički rad je kružni proces.

Energetske pretvorbe u termoelektranama-

1. Energetske pretvorbe u solarnim elektranama

U solarnim se elektranama energija Sunčeva zračenja pretvara u električnu energiju. Dva su osnovna načina pretvorbe Sunčeve u električnu energiju.

- Prvi je izravna (direktna) pretvorba u električnu energiju pomoću solarnih ćelija (takva se transformacija naziva fotonaponskom (fotovoltaičnom) energetskom transformacijom, a solarna elektrana s fotonaponskom pretvorbom ne ubraja se u termoelektrane,
- Drugi je neizravan (klasični) način pretvorbe energije Sunčevog zračenja, posredstvom toplinske energije, najprije u unutrašnju kaloričku energiju vode i vodene pare; takve elektrane nazivamo solarnim termoelektranama

Jedna je izvedba takvih elektrana termoelektrana sa solarnim tornjem, slika 2.



Slika 2: Solarna termoleketrana sa centralnim tornjem

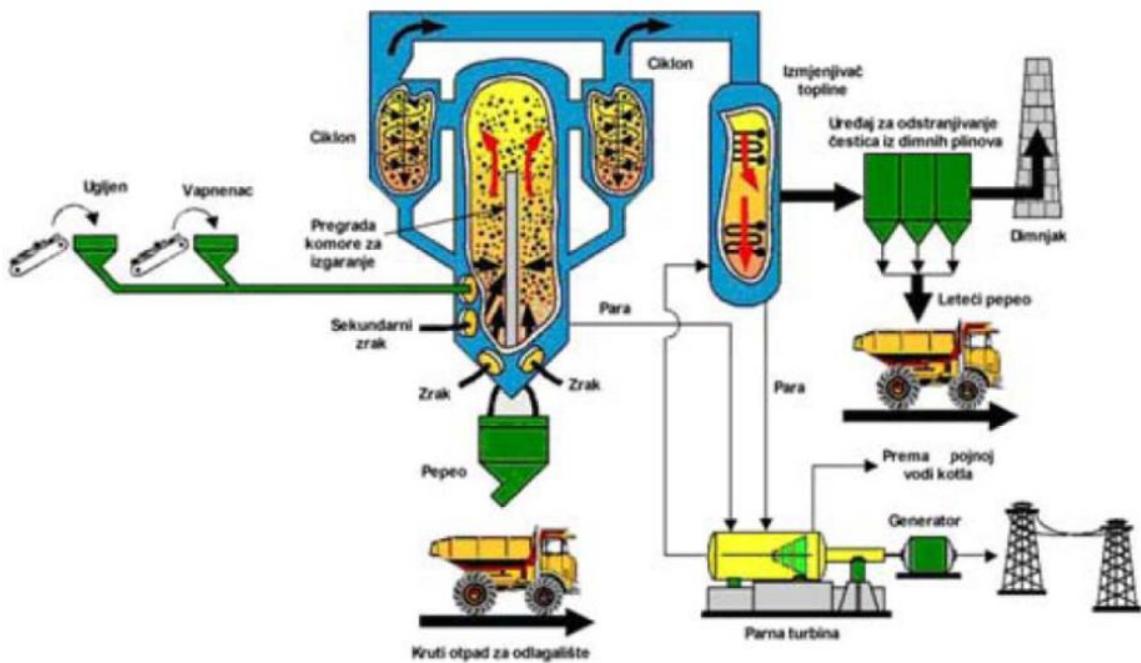
Sunčeve se zrake koncentriraju pomoću pomičnih zrcala koje slijede kretanje Sunca na sistem za isparavanje vode (parni kotao). Sunčev zračenje pogađa stijenke kotla te pretvara u unutrašnju kaloričku energiju koja se pohranjuje u stijenkama. Zbog toga raste temperatura stijenki postajući višom od temperature vode u parnom kotlu: započinje prijelaz toplinske energije nastale transformacijom iz unutrašnje kaloričke energije stijenki kotla na vodu i vodenu paru u kotlu te pretvorba te toplinske energije u unutrašnju kaloričku energiju vode odnosno vodene pare. Unutrašnja se kalorička energija vodene pare (entalpija pare) pretvara zatim u parnoj turbini u mehanički rad a ovaj u sinhronom generatoru u električnu energiju. Radi se o pretvorbama identičnim onima u „klasičnim“ termoelektranama i nuklearnim elektranama. (Optimalna snaga takvih postrojenja procjenjuje se u rasponu od 10 do 100 MW.)

2. Energetske pretvorbe u geotermalnim elektranama

Rad geotermalne elektrane temelji se na pretvorbi unutrašnje kaloričke energije geotermalnih energetskih izvora (vruće vode ili pare koja se pojavljuje na površini Zemlje, vrućih i suhih stijena i vrele vode u velikim dubinama) u mehanički rad u parnoj turbini te potom u električnu energiju u sinhronom generatoru.

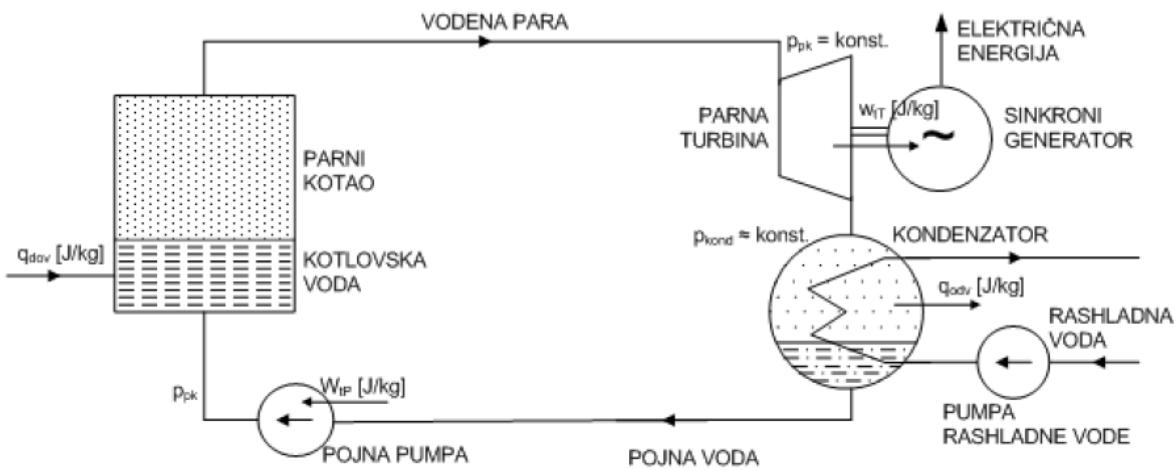
3. Energetske pretvorbe u termoelektrani s parnom turbinom

Energetske pretvorbe u termoelektrani s parnom turbinom, bez obzira na to izgara li u termoelektrani ugljen, mazut, ili teško ili lako ulje za loženje ili plin, započinju procesom izgaranja, procesom transformacije hemijske energije goriva u unutrašnju kaloričku energiju produkata izgaranja.



Shema termoelektrane ložene ugljenom

Izgaranje se goriva odvija u ložištu koje služi za pripremu goriva za izgaranje, za osiguranje potpunog izgaranja i za odvod pepela. Način izvedbe ložišta ovisi o karakteristikama goriva, pa se izvedba parnog kotla mora prilagoditi tim svojstvima. (Ložište je, naime, dio parnog kotla.) Zbog toga se razlikuju ložišta za čvrsta, tekuća i plinovita goriva. Konačni produkti izgaranja su posljedica izgaranja. Tok same oksidacije praćen je promjenom hemijskih spojeva. Količine zraka (kisika) potrebnog za izgaranje nekog goriva određenog sastava je moguće odrediti kao i količinu i sastav plinova izgaranja i eksergiju unutrašnje kaloričke energije plinova izgaranja, te upravljati izgaranjem. Plinovi izgaranja napuštaju ložište i struje oko parnog kotla odlazeći kroz dimnjak u okolicu (atmosferu). Unutrašnja kalorijska energija plinova izgaranja se pretvara pritom u toplinsku energiju. Zadatak parnog kotla je da tu toplinsku energiju, oslobođenu izgaranjem goriva, dovede vodi i vodenoj pari koja na izlazu iz parnog kotla treba imati određeni (projektovani) pritisak i temperaturu. Danas su parni kotlovi izvedeni kao sistem cijevi (kako bi se što više povećala površina preko koje toplinska energija prelazi na vodu i paru), pa se često nazivaju generatorima pare. U parni se kotao dovodi „napojna (kotlovska) voda“ (vodena para kondenzirana u kondenzatoru termoelektrane), gorivo i zrak za izgaranje, a iz njega se odvode proizvedena vodena para, plinovi izgaranja i pepeo kao kruti neizgoreni dio goriva, slika 3.



Slika 3 Šema termoelektrane s parnom turbinom

Pojašnjenje energetskih pretvorbi se može početi sa trenutkom kada toplinska energija započinje prelaziti na vodu u parnom kotlu termoelektrane. S trenutkom početka prelaženja na vodu u parnom kotlu toplinska se energija što se dovodi jednom kg vode ($q_{dov} = Q_{dov}/m$ [J/kg]), gdje je m je masa vode (vodene pare) što stvarno sudjeluje u procesima) pretvara u unutrašnju kaloričku energiju vode, slika 3.

Poslijedično, s povećanjem količine unutrašnje kaloričke energije, raste temperatura vode do temperature vrelišta, isparivanja, zasićenja ili kondenzacije (karakteristična temperatura kod koje, dovođenjem toplinske energije, započinje prijelaz iz kapljevitog u plinovito agregatno stanje, ali i se odvođenjem toplinske energije odvija obratan proces: prelaženje plinovitog u kapljivo agregatno stanje). Postizanjem temperature vrelišta započinje promjena agregatnog stanja vode iz tekućeg (kapljevitog) u plinovito. Povećanjem količine unutrašnje kaloričke energije akumulirane u vodi povećava se energija molekula vode pa u ovisnosti o pritisku pod kojim se nalazi voda, energija molekula u određenom trenutku postaje dovoljna da se nadvladaju sile privlačenja između molekula, pa započinje odvajanje molekula odnosno prijelaz u plinovito agregatno stanje. (Drugim riječima, za prijelaz je iz tekućeg stanja u plinovito potrebno je vodi (sistemu) dovoditi energiju kako bi se savladale međumolekularne sile.) Što je viši pritisak pod kojim se nalazi voda, to je viša temperatura isparivanja (vrelišta, zasićenja), (pogledati sljedeću sliku).

Što je viša temperatura, to je povoljniji energetski proces: što znači da se u jednom kilogramu vodene pare mogu akumulirati veće količine energije pa bi termoelektrana moga biti manjih dimenzija, te bi utrošak materijala za izgradnju bio manji. Međutim, takav materijal mora izdržavati visoke pritiske i temperature. Željeni pritisak u parnom kotlu se postiže pumpom uz utrošak mehaničkog rada.

Otpočeti proces isparivanja, dovođenjem toplinske energije, odvija se sve dok 1kg vode u cijelosti ne ispari. (Napomena, obzirom da dolazi do promjene agregatnog stanja, potrebno je pogledati dio predavanja koji se odnosi na ovaj dio).

Voda (i vodena para) pritom nalazi pod konstantnim tlakom, temperatura vode koja isparava i pare koja je nastala isparivanjem vode za vrijeme isparivanja se ne mijenja: ostaje jednaka temperaturi vrelišta (isparivanja, zasićenja). Sva se energija (toplinska) što se dovodi troši na svladavanje međumolekularnih sila (odvajanja molekula) a ne na povećanje unutrašnje kaloričke energije vode (vodene pare). Ta se para zatim odvodi u parnu turbinu, ili, u većini procesa u današnjim termoelektranama, toj se pari najprije povisuje temperatura (količina akumulirane unutrašnje kaloričke energije) iznad temperature vrelišta, do granične temperature izdržljivosti materijala, dovođenjem toplinske energije koja se, nakon što je sva voda isparila, pretvara u unutrašnju

kaloričku energiju pare povišujući joj temperaturu. U najmodernijim se termoelektranama radi o temperaturi i pritisku vodene pare većim od 650 °C i 360 bara. (1 bar = 105 N/m²).

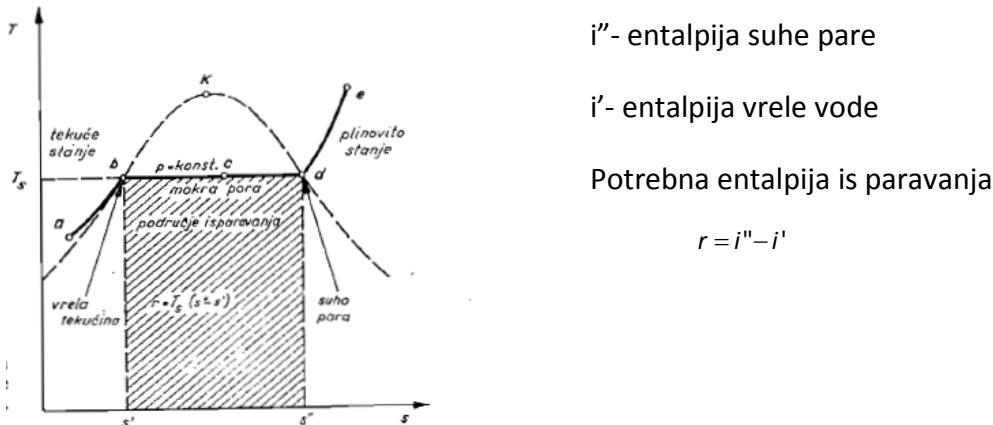
Iz parnog kotla para struji prenoseći akumuliranu energiju u parnu turbinu, u idući sistem termoelektrane, u kojoj se odvijaju daljnje transformacije energije. U pari koja struji pohranjeni su različiti oblici energije. Jedna od njih je unutrašnja kalorijska energija ili preobražena toplinska energija koja je transformirana nuklearna, kemijska, energija Sunčeva zračenja ili geotermalna energija. Pošto para struji (strujanje je način kretanja fluida) određenom brzinom, u pari je pohranjena i kinetička energija. Kako se energetske pretvorbe i procesi odvijaju u polju sile teže Zemlje, u pari je pohranjena i gravitacijska potencijalna energija. Fluid (para) se neće sam od sebe početi kretati i strujati. Da bi promatrani kilogram pare započne strujati i da struji od parnog kotla **parovodom** (cijev kojom struji para) trebat će se obaviti mehanički rad, svladati silu na putu do parne turbine. Mehanički rad je oblik energije, a energija je neuništiva, pa se taj obavljeni rad ne može izgubiti: ostaje pohranjen u pari što struji. On se naziva **rad strujanja**. Zbroj unutrašnje kaloričke energije i rada strujanja naziva se **entalpija**.

(Napomena : pogledati dio predavanja koji se odnosi na agregatna stanja.)

Objašnjenje: Šta je entalpija? Zbroj unutrašnje energije i specifične energije pomaka naziva se specifična entalpija, $i=u+pv$.

Za isparavanje, promjenu od stanja vrele vode do suhe pare (od b do d) na slici ispod, potrebna je energija to je entalpija pare. U diferencijalnom obliku se entalpija računa kao:

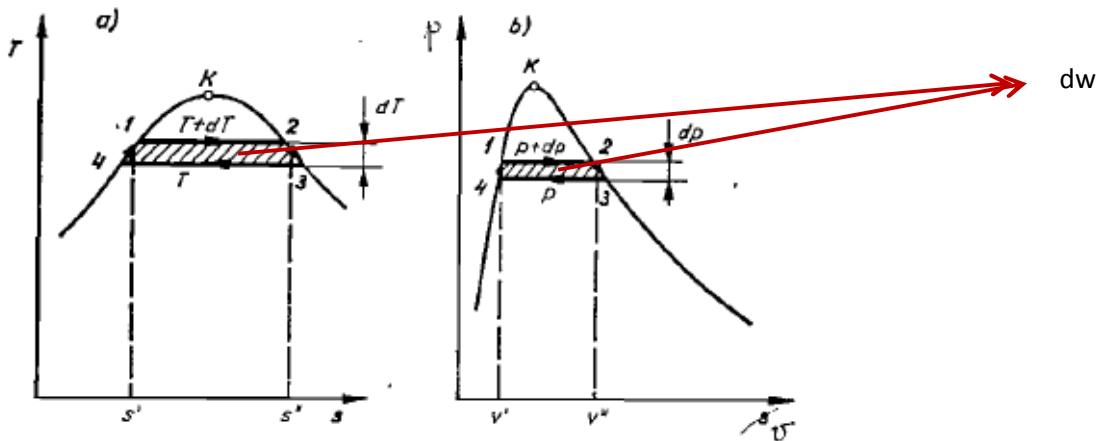
$$dq = di - v \cdot dp, \text{ pošto je } p=\text{const}, dp=0, \\ dq=di$$



Stanja se prikazuju u p-v ili T-s dijagramu, kao i u T-v dijagramu (oznake su kao kod T-v dijagrama).

$$q = \int_1^2 T \cdot ds - \text{veza između topline i entropije, pa je entalpija isparavanja} \quad r = T_s \cdot (s'' - s')$$

Entalpija se može se izračunati iz elementarnog procesa i iz T-s, p-v dijagrama, slika ispod.



Elementarni proces
isparavanja i konden-
zacije u T, s i
 p, v -dijagramu

Dođenjem topline tekućina isparava od 1 do 2 uzduž gornje granične krive na slici gore. Ekspanzija do stanja 3, nakon toga kondenzira u stanje 4 odvođenjem topline.

Ako se kružni proces odvija između bliskih temperatura i pritisaka

$$T + dT$$

$$p + dP$$

Dobija se mehanički rad $dw = (s'' - s')dT$

$$dw = (v'' - v')dp$$

$$\Rightarrow r = T_s(v'' - v') \frac{dp}{dT}$$

Clasius Clapeyronova jednadžba-
za određivanje entalpije

Ona daje vezu između topline isparavanja r i krivulje napetosti $p = f(T)$. Diferencijalni kvocijent dp/dT je koeficijent nagiba krivulje za onu temperaturu zasićenja T na koju se odnosi r i $(v'' - v')$. (Kraj objašnjenja vezano za entapliju).

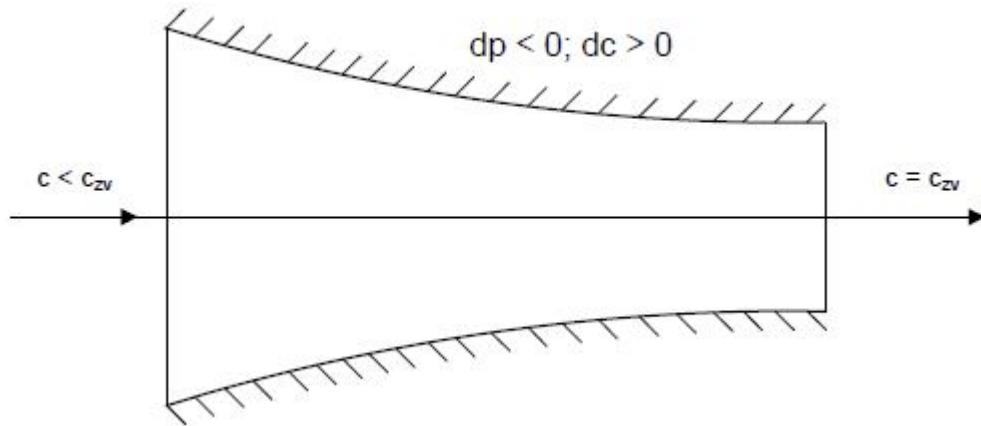
Daljnja pojašnjenja u vezi pretvorbi: Energija pohranjena u pari se pretvara u parnoj turbini u mehanički rad (prijelazni oblik energije). U parnim se turbinama dvostruka transformacija i to:

1. entalpije pare u kinetičku energiju i

2. kinetičke energije pare u mehanički rad.

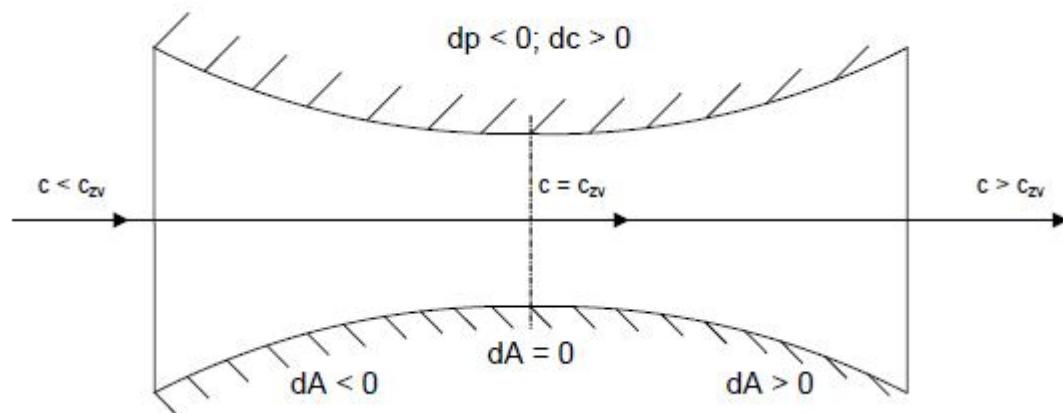
Prva je transformacija posljedica ekspanzije pare visokog tlaka i temperature u **nepokretnom** dijelu turbine, u **nepomičnim kanalima** ili **sapnicama**, odnosno **statoru**. U statoru se para skreće s prvotnog smjera strujanja da bi se dovela pokretnom dijelu turbine: **rotoru**. Stator sadrži sapnice koje usmjeravaju strujanje pare između **lopatica** koje se nalaze na rotoru. Strujanje pare između lopatica rotora izaziva okretanje rotora, slika 7.

Sapnice su cijevi posebnog oblika. Sužava li se presjek sapnice u smjeru strujanja vodene pare sapnica je konvergentna, slika 5.

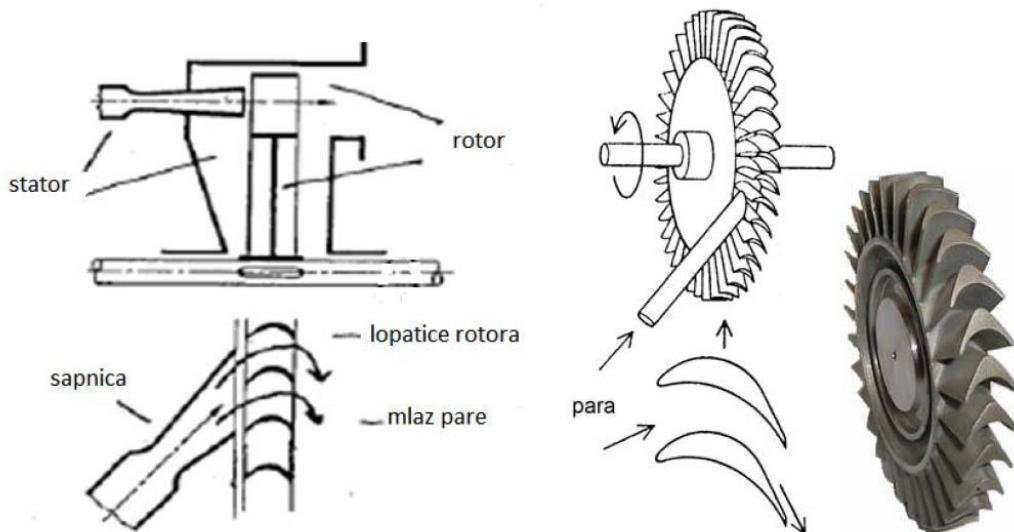


Slika 5 Konvergentni tip sapnice

Za vrijeme strujanja vodene pare (fluida) kroz takvu sapnicu povećava se brzina strujanja budući da vrijedi princip očuvanja mase. Najveća brzina pare koja se postiže jednaka je (samo) brzini zvuka (ako je ulazna brzina pare u sapnicu manja od brzine zvuka, c_{zv} , slika 5). Iako se radi se o brzini zvuka u vodenoj pari koja je (mnogo) veća od brzine zvuka u zraku, s razvojem se termoelektrana (porastom tlaka i temperature pare) ta brzina pokazala nedostatnom: sva sve raspoloživa energija (eksergija) akumulirana u pari nije mogla pretvoriti u kinetičku energiju (eksergiju) zbog premaljenih (uvjetno premaljenih) brzina strujanja pare. Problem je riješio švedski inženjer Gustav de Laval konstruirajući konvergentno-divergentnu sapnicu, Slika 6.

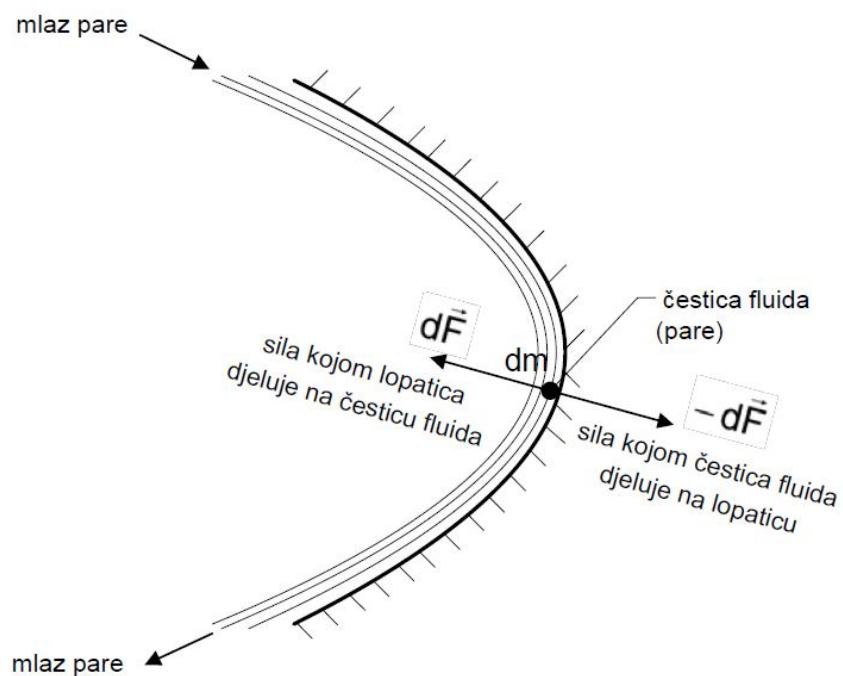


Slika 6 Oblik de Lavalove sapnice i odnosi u njoj



Slika 7 Parna turbine i rotor

Druga se transformacija obavlja u rotoru. Pošto je para ekspandirala u sapnici, postigavši određenu brzinu, dovodi se među lopatice rotora. Para struji preko lopatica rotora, površina koje su konkavno zakrivljene, Slika 8.



Slika 8 Oblik lopatice i sile što djeluje na lopaticu

Mlaz pare skreće sa smjera strujanja uslijed djelovanja lopatice –centripetalna sila. Istom silom suprotnog smjera mlaz pare djeluje na lopaticu. Kako je lopatica pričvršćena na vratilo turbine, ta sila izaziva (preko momenta) okretanje osovine:

$$M = F \cdot r$$

Sila djeluje na putu, obavlja se dakle mehanički rad na „račun“ kinetičke energije mlaza pare. Sila djeluje na putu s , koji je sa radijusom r povezan preko:

$$W = F \cdot s = \frac{M}{r} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi \cdot n = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

$$s = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n$$

n – broj okretaja

Uobičajeno se takav mehanički rad, koji se pomoću vratila pogonskog stroja predaje u okolicu, sinkronom generatoru naziva **tehničkim radom**. Para struji kroz turbinu zbog razlike pritisaka: pritisak pare na ulazu u turbinu je jako visok, to je pritisak koji vlada u parnom kotlu termoelektrane, $p_{\text{par}} \approx p_{\text{pk}}$. S druge strane, pritisak pare na izlazu iz turbine je jako nizak, manji od pritiska okoline (okolnog zraka /atmosfere/), $p_{\text{ok}} \approx 1 \text{ bar}$. Para ekspandira a da joj se pritom ne dovodi toplinska energija, pa se pritisak pare što struji kroz turbinu smanjuje.

Da bi se dobio što veći mehanički rad, a on je proporcionalan razlici pritisaka na ulazu i izlazu iz turbine.

$$W_{\text{TURBINE}} \approx \int_{p_{\text{ulaz}}}^{p_{\text{izlaz}}} v \cdot dp$$

Para se, nakon što je izašla iz turbine, dovodi u kondenzator u kojem se para što pristiže kondenzira (ukapljuje) djelovanjem rashladne vode iz okoline (vode rijeke, jezera ili mora), koja toplinsku energiju (transformiranu unutrašnju kaloričku energiju vodene pare) odvodi u okolicu, q_{odv} [J/kg]. Zbog kondenzacije pare u kondenzatoru vlada vrlo mali tlak: p_{kon} , i do 0,02 bara, koji ovisi o temperaturi rashladne vode (temperaturi okoline).

Pri transformaciji se unutrašnje kaloričke energije u mehanički rad, što je međutransformacija za pretvorbu u električnu energiju, zahtijeva (u skladu s drugim glavnim stavkom termodinamike), odvođenje znatnih količina toplinske energije u okolicu. Naime svaka se energija sastoji iz ekservije i anergije. U procesima se pretvorbe jednih oblika energije u druge u termoelektranama zapravo odvaja ekservija energije od anergije energije: ekservija sudjeluje dalje u najrazličitijim energetskim transformacijama, a anergija se, u obliku toplinske energije (prijeđeni oblik energije), na temperaturi i pritisku okoline, odvodi u okolicu.

Voda koja se nalazi u prirodi (podzemna i izvorska voda, voda iz vodotoka, jezerska i morska voda), ne može se, bez odgovarajuće pripreme, upotrijebiti u kotlovima termoelektrana. Voda u prirodi nije naime hemijski čista i redovno sadrži grube nečistoće (plivajući i lebdeći sastojci te sastojci koji se talože), minerale i organske tvari i molekularne nečistoće otopljeni soli, kiseline i plinovi.

Kondenzator je izmjenjivač topline kojem se s jedne strane dovodi para, a s druge rashladna voda koja strujeći kroz cijevi u kondenzatoru od pare preuzima toliko unutrašnje kaloričke energije (koja je najvećim dijelom anergija) koliko je dovoljno da se para potpuno kondenzira. Para i kondenzat (voda nastala kondenzacijom vodene pare) odijeljeni su od rashladne vode, mada je moguće izvesti kondenzator u kojem se para miješa s rashladnom vodom. (Takvi se kondenzatori planiraju za područja s malim količinama rashladne vode.). Kondenzatoru nije jedini zadatak osigurati kondenzaciju eksplandirane pare. Osim te pare kondenzator preuzima i paru, koja za vrijeme pokretanja i obustavljanja rada termoelektrane ne prolazi kroz turbinu kao i paru u početnim trenucima kad se naglo smanji opterećenje parne turbine.

Pojašnjenja vezano za agregatne pretvorbe

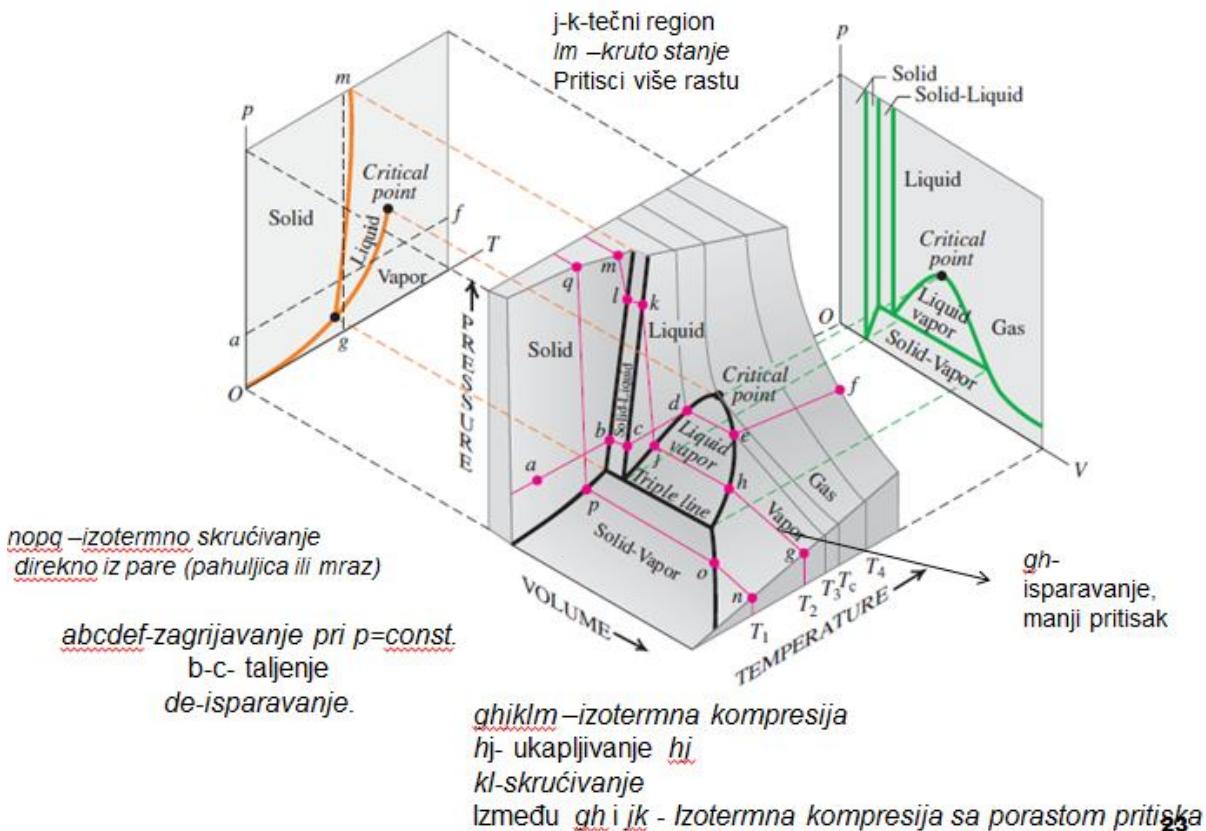
Agregatne pretvorbe (knjiga strana 249 do 252)

Idealna agregatna stanja su:

- idealno kruto stanje
- Idealno plinovito stanje

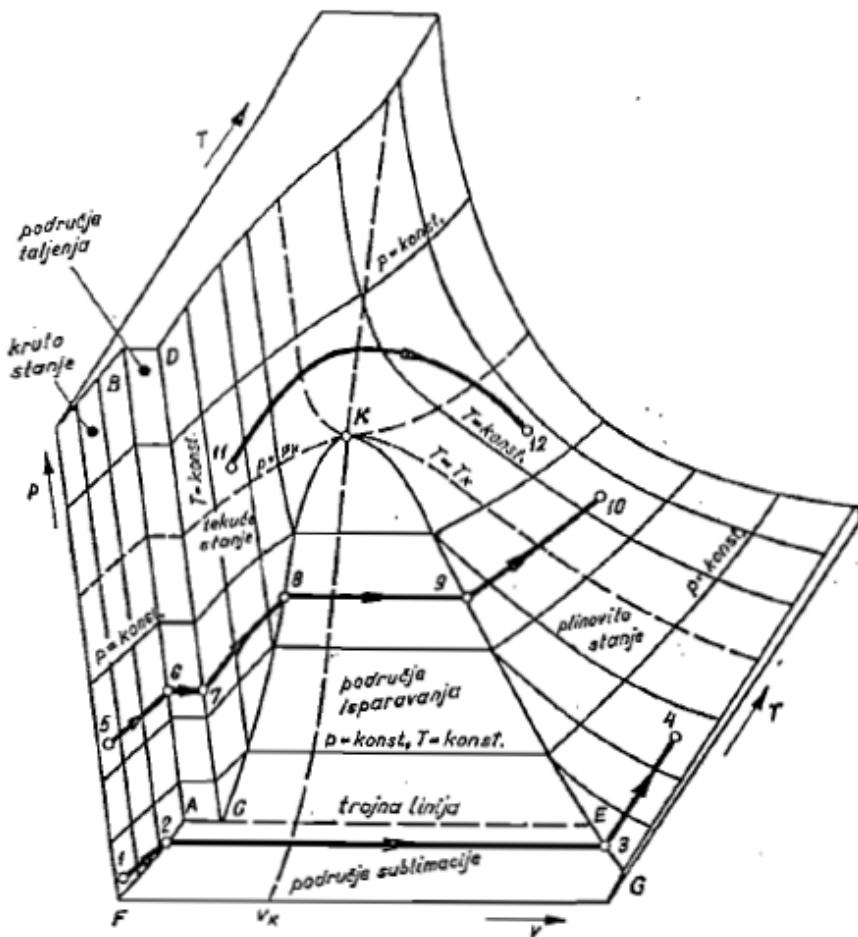
Realna stanja se nalaze između idealnih stanja: čvrsto, tekuće, i plinovito.

Promjena agregatnog stanja se odvija dovođenje topline. Prelazi iz jednog u drugo stanje se nazivaju pretvorbe. Veličine koje se mijenjaju su : pritisak, specifični volumen, temperatura (p, v, T). Agregatne pretvorbe se mogu prikazati dijagramom u koordinatnom sistemu p, v, T , naredna slika.



Slika 8 p, v, T dijagram

Pojašnjenje dijagrama:



Slika 9 p,v,T dijaagram

Na slici 98 stanje 1 se nalazi na maloj temperaturi i niskom pritisku. Neka dođe do dovođenja topline Q. Dolazi do prelaza u stanje 2- kriva sublimacije (sublimacija je preazak iz čvrstog stanja u gasovito). Prijelaz od 2-3 ide postepeno. Stanje 3- plinovito stanje- nalazi se na krivoj desublimacije E-G(kriva po kojoj je moguće povratak iz gasovitog u čvrsto stanje).

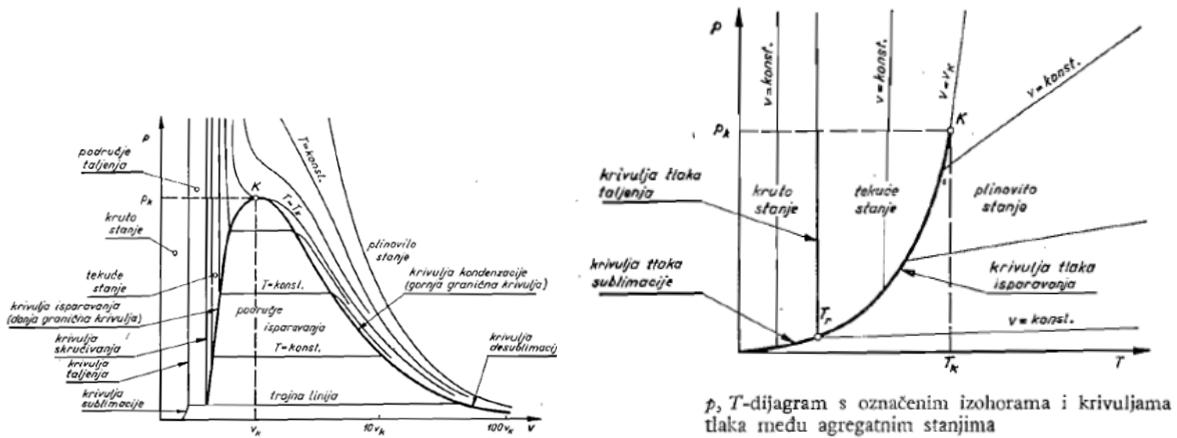
Uz $p=const.$, dovođenjem Q , T raste. Odvođenjem Q počinje ponovo vraćanje plina u kruto stanje. Neka sada posmatramo stanje 5 (primijetiti da je viši p , i da je to kruto stanje sve do stanja 6. U stanju 6 – viša T i isti p . Stanje 6 se nalazi na AB krivoj. To je kriva taljenja. Od 6-7 tvar je homogena jer se sastoji od dva agregatna stanja: krutog i tekućeg stanja. U tački 7 - prestaje taljenje, tada postoji samo tekućina. U stanju 8- povećana je temperatura T i i zapremina V . Ova točka se nalazi na krivoj C-K. Kriva C-K se naziva kriva sparavanja. Daljim dovođenjem Q , uz $p=const.$, tekućina isparava (nastaje mješavina). U tački 9 nastaje potpuno isparavanje. Ova točka se nalazi na krivoj kondenzacije E-K kriva, pogledati sliku. Odvođenjem topline Q pojavljuju se prve kaplice tekućine. Smjesa tekućine i pare se naziva mokra para. Nalazi se između krivulje isparavanja C-K i krivulje kondenzacije E-K.

Plin ili para u stanju koje odgovara granici rošenja se naziva zasićenja para a ona u blizini granice kondenzacije se naziva pregrijana para.

U tački K na slici sastaju se krivulja isparavanja i krivulja rosišta naziva se kritična točka. Izoterma i izobara koje prolaze kroz kritičnu tačku su kritična temperatura $T=T_k$, i kritična izobara $p=p_k$. Samo pri temperaturama nižim od kritične moguće je ravnotežno stanje tekućeg i plinovitog stanja. Iznad te

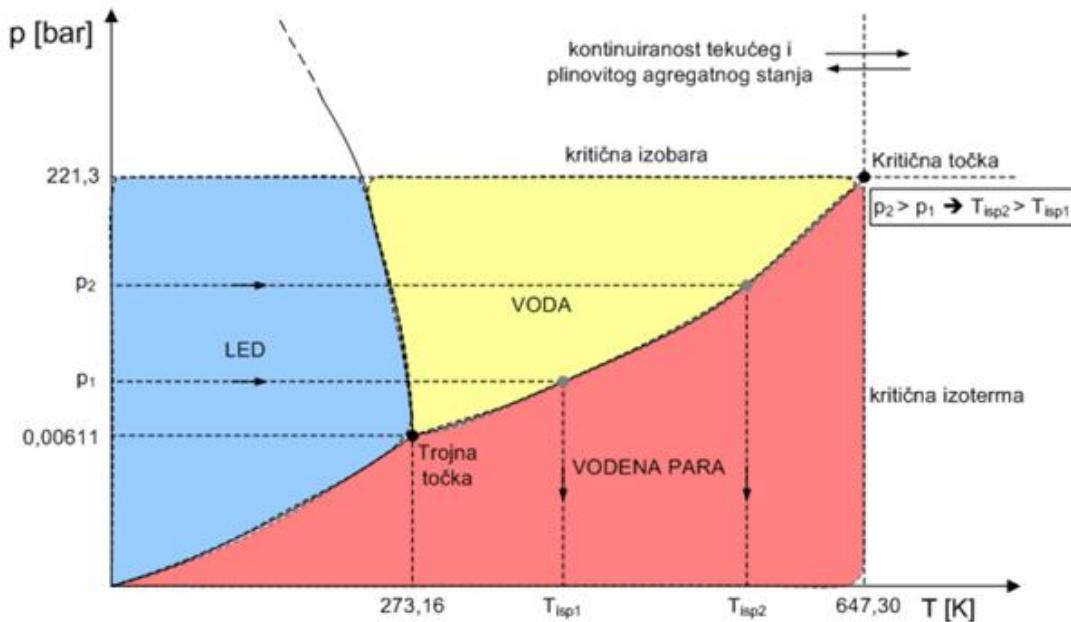
temperature nema granice između ta dva stanja. Dakle, Isparavanje i kondenzacija su mogući samo pri $T < T_k$.

Trojna linija ACE- granica između ta tri agregatna stanja. Ako se dijagram na slici 9 nacrti u koordinatnom sistemu pritiska i zapremine dobija se pT dijagram (na slici 8 je prikazana ta projekcija), ili ako se nacrti u koordinatnom sistemu p-v dobija se p-v dijagram (projekcija je prikazana na slici 8 u boji) . Te izdvojene slike su :



Slika 10 p-v i p-T dijagram s označenim izotermama i graničnim krivuljama među agregatnim stanjima

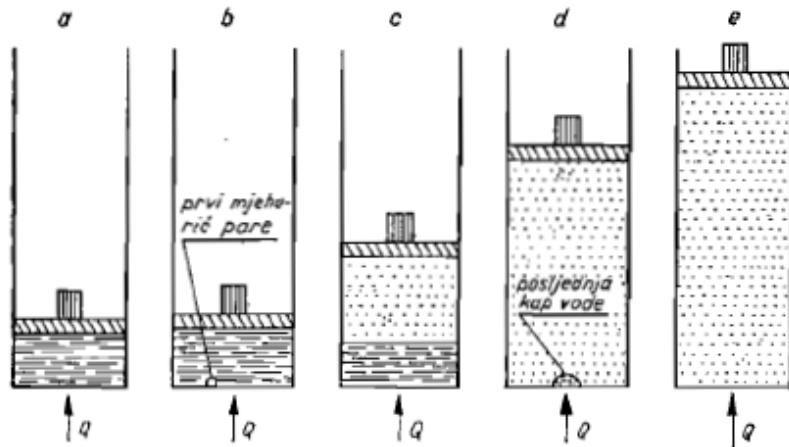
Dijagram u ravni PV zadržava se osobine trodimenzionalnog dijagrama. U pT dijagramu sve tri krivulje se sastaju u trojnoj tački T_r . U trojnoj tački sva tri agregatna stanja su u ravnoteži: $T=273,16 \text{ K}$, $p=0,00611 \text{ bar}$. Krivulja pritiska isparavnja se završava kritičnom tačkom K. Dodatno, je ovo predočeno i na slici 11.



Slika 11 Agregatna stanja vode: ovisnost temperature isparavanja o pritisku

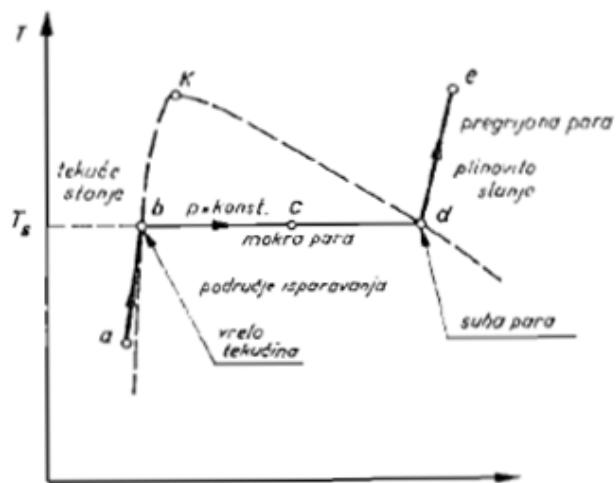
Isparanje i mokra para

Promjena stanja od zagrijavanja vode preko isparavanja do pregrijavanja pare se nabolje prikazuje stanjem tekućine u posudi (zatvorena i konstatnog pritiska), donja slika.



Slika 11: Isparavanje do pregrijavanja pare

Tekućina je zatvorena u posudi da bi se osigurao konstantan p. Dovođenjem topline raste temperatura tekućine uz jedva primjetno povećanje zamjepmine V. Početno stanje – tačka a-dijagram T-v. Za isparavanje je potrebno tekućinu ugrijati do temperature vrelista T_s , pri odgovarajućem pritisku. Isparavanje: počinje kad je tekućina stigla u tačku b- prvi mjeđuhriči. To je vrela kipuća tekućina. Proizvedena para ima istu temperaturu kao i vrela tekućina. Daljim dovođenjem topline sve više topline isparava, volumen se naglo povećava, T ostaje nepromijenjeno.



Promjena stanja za vrijeme zagrijavanja i isparavanja u T_v -dijagramu

Između stanja b- c, mokra para-smjesa vrele tekućine i pare koje su u termodinamičkoj ravnoteži imaju istu temperaturu i pritisak. Tačka d- isparila je i posljednja kap tekućine- suha para. Uz dalji dovod topline je moguće povisiti temperaturu pare – stanje e- pregrijana para