

3 Energetske pretvorbe u elektranama: termoelektranama

Elektrane su postrojenja za proizvodnju većih količina električne energije (eksergije). Pretvorba najrazličitijih oblika energije u električnu energiju odvija se na najrazličitije načine, no, ono što karakterizira sve elektrane je da se, u konačnici, radi o pretvorbi mehaničkog rada u električnu energiju posredstvom pogonskih strojeva (vodnih, parnih i plinskih turbina, motora s unutrašnjim izgaranjem ili elisa za pogon vjetrom /vjetroelektrana/) i (električnih) generatora (sinkronih i asinkronih). Osim pogonskih strojeva i generatora (pogonski stroj i generator čine „agregat“), postoje i ostali uređaji i naprave koji su potrebni za pogon tih strojeva, za regulaciju, kontrolu, upravljanje i druge namjene.

Osnovni je zadatak elektrana proizvesti točno toliku količinu električne energije koliko to traži potrošač u trenutku kad to traži potrošač. S obzirom da ne postoji mogućnost akumuliranja (većih količina) električne energije (pretvorbom u neki stalni, stacionarni oblik energije), proizvodnja električne energije mora u svakom trenutku biti jednaka potražnji (potrošnji); elektrane moraju udovoljiti tom zahtjevu.

Danas se elektrane rijetko grade kao izolirana postrojenja u kojima se električna energija proizvodi samo za određene potrošače, npr. neke industrije locirane daleko od postojećih električnih mreža; one su redovito dio elektroenergetskog sustava koji, osim većeg broja elektrana za proizvodnju električne energije, obuhvaća još i 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 (toplinu, mehaničku energiju, kemijsku energiju, svjetlo). Svi dijelovi elektroenergetskog sustava trebaju biti stoga dimenzionirani tako da osiguravaju opskrbu potrošača električnom energijom određenog napona i frekvencije na kvalitetan i najekonomičniji način.

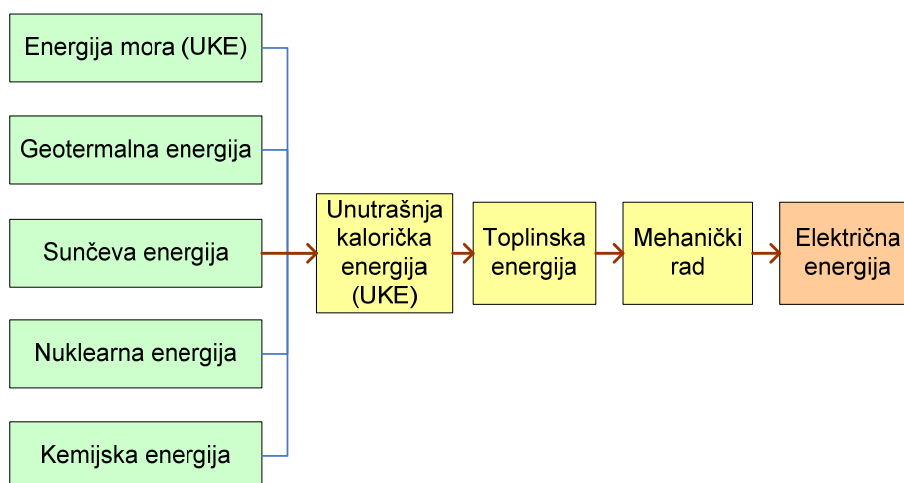
Elektrane obuhvaćene elektroenergetskim sustavom dio su cjeline, pa način njihovog rada ovisi o radu drugih elektrana i o potražnji svih potrošača sustava. To vrijedi i za rasklopna postrojenja i vodove. Pojedinačna se elektrana stoga ne može promatrati odvojeno (neovisno), već je, kako način njezine izgradnje tako i dimenzioniranje njezinih uređaja i izbor njihovih pogonskih karakteristika, ovisna od utjecaja elektroenergetskog sustava kojem pripada. Primjerice, uloga i režim rada pojedine elektrane u elektroenergetskom sustavu 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), te i o ispunjenju zahtjeva 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). Uloga elektrana zbog toga nije unaprijed čvrsto određena. U kišnom razdoblju godine većina hidroelektrana (osim onih s vrlo velikim akumulacijama) rade kao „temeljne elektrane“, a termoelektrane se što je moguće više koriste kao „vršne elektrane“.

(Temeljnim elektranama nazivamo one koje su po pogonskim svojstvima prilagođene konstantnom opterećenju, a vršnim one koje mogu, i s obzirom na pogonska svojstva i veličinu,

preuzeti dio „vršnog opterećenja“ („višak“ potražnje za električnom energijom (novopriključena trošila ili povećana potražnja postojećih trošila) proizvodeći, drugim riječima, količine električne energije koju ne mogu, jer im snaga nije dostatna, proizvesti temeljne elektrane). Vršne se elektrane mogu uvijek upotrijebiti kao temeljne, dok se promjena uloge normalno ne može provesti za temeljnu elektranu.)

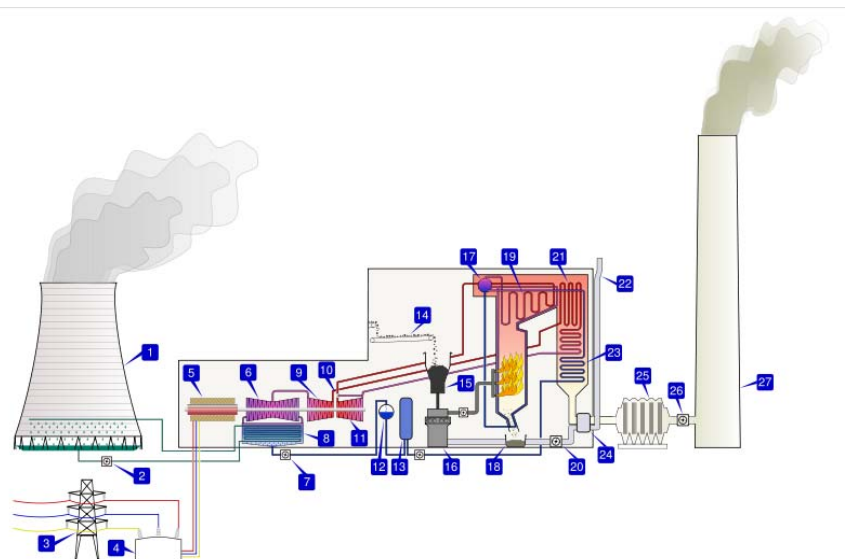
U sušnom razdoblju, kad je to moguće, uloge se zamjenjuju. Osim toga, uloga elektrana mijenja se i s razvojem sustava (izgradnjom novih elektrana): starije termoelektrane rade sve više kao vršne (jer imaju veće specifične troškove za gorivo), a nove termoelektrane preuzimaju ulogu temeljnih.

Nadalje, elektrane u kojima se potencijalna energija vode pretvara u električnu energiju nazivamo hidroelektranama (tu se ubrajaju i elektrane koje se koriste plimom i osekom), elektrane u kojima se iskorištava kinetička energija zraka vjetroelektranama, a 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 3-1.

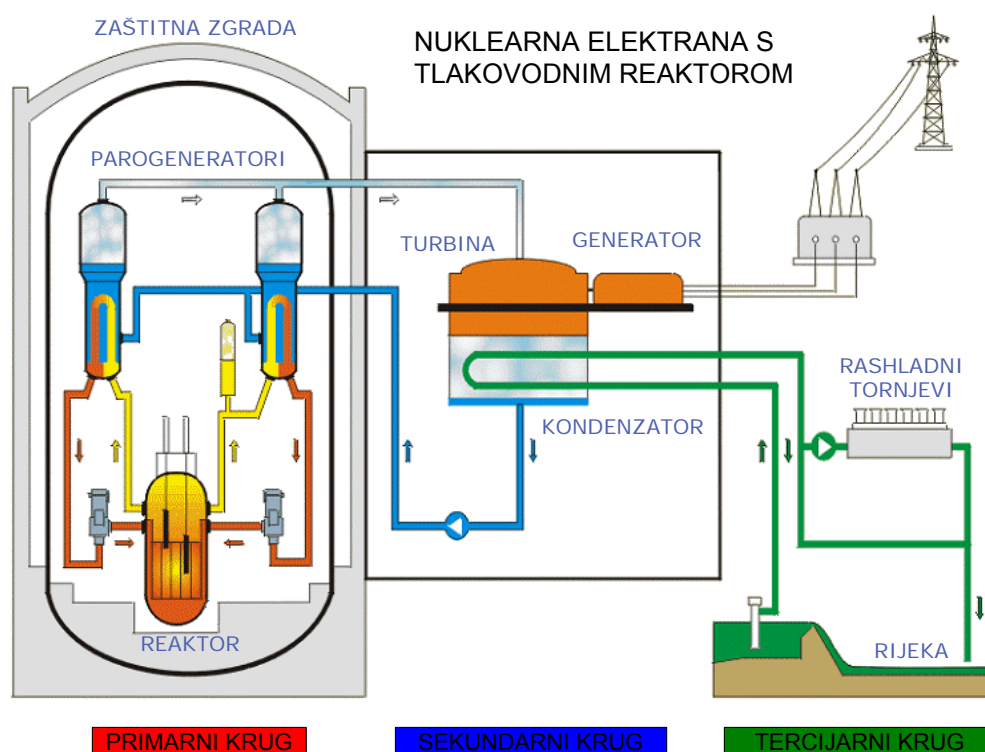


Slika 3-1 Shema pretvorbi oblika energije u električnu energiju u termoelektranama

Uobičajeno se, da bi se istakle razlike između primarnih oblika energije koji se rabe u termoelektranama, govori o konvencionalnim („klasičnim“) termoelektranama, Slika 3-2, te nuklearnim, Slika 3-3, solarnim, Slika 3-4 i Slika 3-5, i geotermalnim elektranama, Slika 3-6.



Slika 3-2 Termoelektrana pretvara kemijsku energiju (fosilnog) goriva (ugljena u ovom slučaju) u električnu energiju



Slika 3-3 Shema nuklearne elektrane „Krško“ (lakovodni reaktor s vodom pod tlakom)

(Ovlada li se kontroliranom nuklearnom fuzijom, najvjerojatnije će se upotrebljavati iste energetske pretvorbe i procesi kao za energetska iskorištavanje kemijske energije odnosno nuklearne fisije.)

Slično, da bi se naglasilo u kojem se stroju transformira unutrašnja kalorička energija (točnije entalpija) u mehanički rad, govori se o termoelektanama s parnim turbinama

(nekada je to bio parni stapni stroj) ili plinskim turbinama, odnosno o termoelektranama s dizelskim motorima (to je još uvijek stapni stroj). U ovisnosti o fluidu koji se upotrebljava kao posrednik u energetske transformacijama u termoelektranama (to može biti plin ili vodena para), govori se o termoelektranama s plinskim i termoelektranama s parnim turbinama.

(Vodena je para dakako plin kao i svaki drugi no da bi se naglasilo da za vrijeme pretvorbi u termoelektranama s parnim turbinama, za razliku od procesa u termoelektranama s plinskim turbinama, dolazi do promjene agregatnog stanja fluida, ističe se naziv „vodena para“.)

Postoje i daljnje podjele, o njima ćemo govoriti kasnije, najbitnije je pritom, a to objedinjuje sva nabrojena postrojenja za proizvodnju električne energije pod zajedničkim nazivom „termoelektrane“, da je energetski proces proizvodnje električne energije u osnovi jednak u svim termoelektranama: radi se o **kružnom procesu** pomoću kojeg se toplinska energija pretvara u mehanički rad. Taj ćemo proces opisati razmatrajući energetske pretvorbe i procese u termoelektrani s parnom turbinom, a zatim i u termoelektrani s plinskom turbinom, u kojima se kemijska energija fosilnih goriva ili nuklearna energija fisije pretvara u električnu energiju (eksergiju).

*U današnjim se nuklearnim elektranama nuklearna energija fisije u nuklearnim reaktorima, koji preuzimaju ulogu ložišta, a mogu i parnih kotlova, slično onima u „klasičnim“ termoelektranama, transformira prvo u unutrašnju kaloričku energiju produkata fisije da bi se nakon toga odvijao proces pretvorbe u električnu energiju pomoću parnih turbina i sinkronih generatora istovjetan u potpunosti procesu u termoelektranama koje kemijsku energiju (ili unutrašnju kaloričku energiju) pretvaraju u električnu energiju. Prvo se, naime, unutrašnja kalorička energija produkata fisije (ili produkata pretvorbe kemijske energije u „klasičnim“ termoelektranama, plinova izgaranja) pretvara u toplinsku energiju koja prelazi na vodu u generatoru pare nuklearne elektrane (odnosno na vodu u parnom kotlu termoelektrane), pretvarajući se u unutrašnju kaloričku energiju vode. Voda zbog toga isparuje i struji u parnu turbinu. (Postoje i nuklearni reaktori u kojima se zagrijava plin umjesto vode (vodene pare) pa se u plinskoj turbini transformira unutrašnja kalorička energija (entalpija) u mehanički rad. /S energetskeg stajališta nema (bitnih) razlika u radu parnih, plinskih i vodnih turbina./). U pari (fluidu) što struji pobranjen je, pokraj unutrašnje kaloričke energije, kinetičke i potencijalne energije, i „**rad strujanja**“ koji treba obaviti da bi para (fluid) strujala. Pobranjena je dakle, prema ranije rečenom, entalpija koja se zatim u parnoj turbini pretvara u mehanički rad. Mehanički pak rad, posredovanjem rotirajućeg vratila parne turbine, prelazi u sinkroni generator gdje se pretvara u električnu energiju. (Djelovanje je rotirajućeg vratila ekvivalentno sili što djeluje na putu, dakle*

mehaničkom radu: $W_{12} = \int_1^2 M \cdot d\vartheta$. /M je moment, a ϑ je kut zakreta vratila./)

Nuklearna je elektrana dakle u osnovi termoelektrana, samo što se u njoj unutrašnja kalorička energija ne dobiva izgaranjem fosilnih goriva, nego fisijom atoma uranija i plutonija.

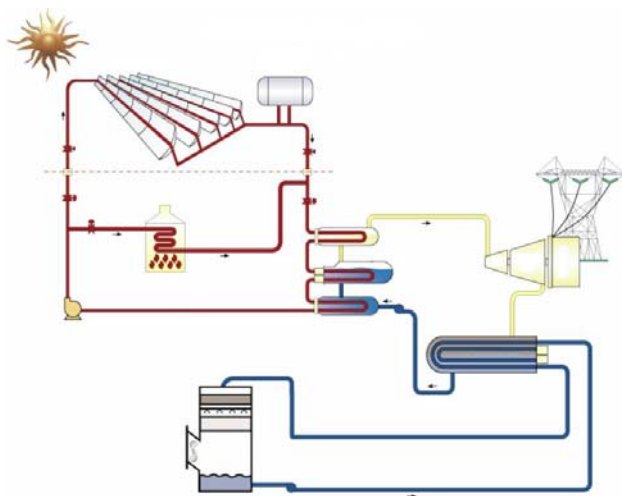
U solarnim se elektranama energija Sunčeva zračenja pretvara u električnu energiju. Dva su osnovna načina pretvorbe Sunčeve u električnu energiju. Prvi je izravna pretvorba u električnu energiju pomoću solarnih ćelija (takva se transformacija naziva fotonaponskom (fotovoltaičnom) energetske transformacijom, a solarna elektrana fotonaponskom; ne ubraja se u termoelektrane), a 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. Sunčeve se zrake koncentriraju pomoću pomičnih zrcala što slijede gibanje Sunca na sustav za isparivanje vode /parni kotao/, Slika 3-4.



Slika 3-4 Solarna termoelektrana sa solarnim tornjem

Sunčevo se zračenje što pogađa stijenke kotla 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 sinkronom 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.) Razvijenija je, međutim, drugačija izvedba solarnih termoelektrana, Slika 3-5: parabolične protočne solarne termoelektrane. Konkavna zrcala fokusiraju Sunčeve zrake na cijevi zagrijavajući ulje što struji kroz cijevi u generator pare.



Slika 3-5 Solarna elektrana u kojoj ulje pohranjuje i predaje energiju Sunčeva zračenja vodi i pari u parnom kotlu (parogeneratoru)

Slika 3-5a) slika je pilot postrojenja parabolične protočne solarne termoelektrane.



Slika 3-5a) Parabolična protočna solarna termoelektrana 30 MWe Kramer Junction, California

(Smatra se da bi optimalna snaga takvih postrojenja trebala biti oko 200 MWe.)

Najnerazvijenije solarne termoelektrane koriste se paraboličnim tanjurima, slika 3-5b), najmanje podsjećajući na konvencionalne termoelektrane: toplinski stroj i generator nalaze se smješteni u fokusu tanjura promjera oko 10 m.

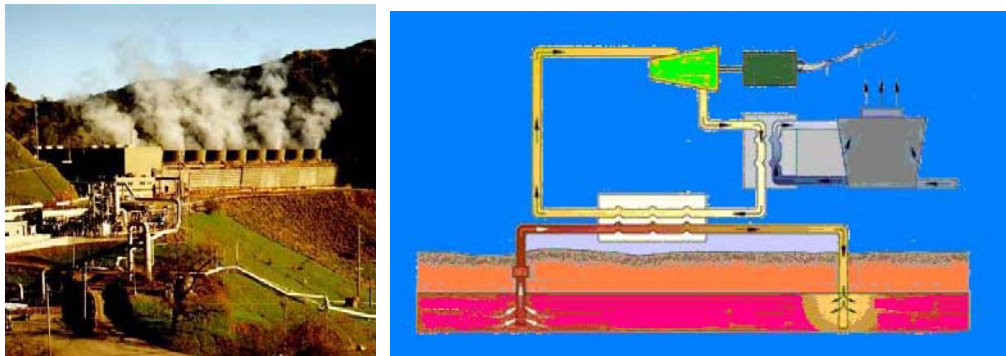


Slika 3-5b) Ilustracija izvedbi solarne termoelektrane s paraboličnim tanjurom

Uobičajena izvedba je sa Stirlingovim toplinskim strojem (postoje izvedbe s mikroturbinama i Braytonovim kružnim procesom). Stirlingov motor ima prednost zbog efikasnosti (i preko 40%), ali problem predstavlja pouzdanost. Ukupna efikasnost, koja se postiže, iznosi 22%, što je bolje od ostalih izvedbi solarnih termoelektrana. Sunčeva svjetlost se koncentrira više od 3000 puta što predstavlja izazov kod realizacije (zbog skupoće). Naime, takve solarne termoelektrane karakterizira velika gustoća snage (oko 55 kW/l), dok temperatura medija u toplinskom stroju dostiže vrijednosti od preko 750 °C; jedna jedinica pritom snage je od 10 do 25 kW.

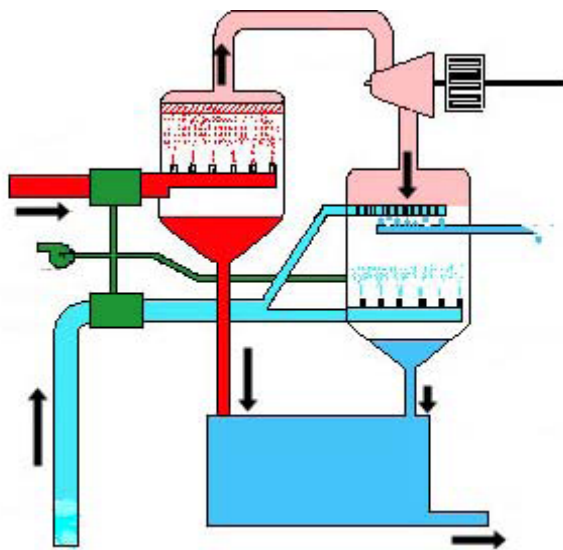
Geotermalna je pak elektrana, Slika 3-6, postrojenje u kojem se unutrašnja kalorička energija, nastala transformacijom nuklearne energije za vrijeme procesa polaganog prirodnog raspadanja radioaktivnih elemenata koji se nalaze u Zemljinoj kori (u prvom redu uranija, torija i kalija), i unutrašnja kalorička energija od nastanka Zemlje, pretvaraju u električnu energiju. 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 sinkronom generatoru.



Slika 3-6 Geotermalna elektrana

Dovede li se topla voda s morske površine u prostor dovoljno niskog tlaka, ona će ispariti. Unutrašnja kalorička energija pohranjena u vodi, sada pari (entalpija pare), pretvorit će se u parnoj turbini u mehanički rad hladimo li **kondenzator** vodom iz većih dubina (vodom niže temperature od vode na površini mora). U takvoj se termoelektrani iskorištava razlika između temperature na površini i u dubini mora, odnosno razlika između tlakova koji odgovaraju tim temperaturama: tlak je pare na ulazu u parnu turbini veći od tlaka pare koja se kondenzira (ukapljuje) u kondenzatoru termoelektrane, Slika 3-7.

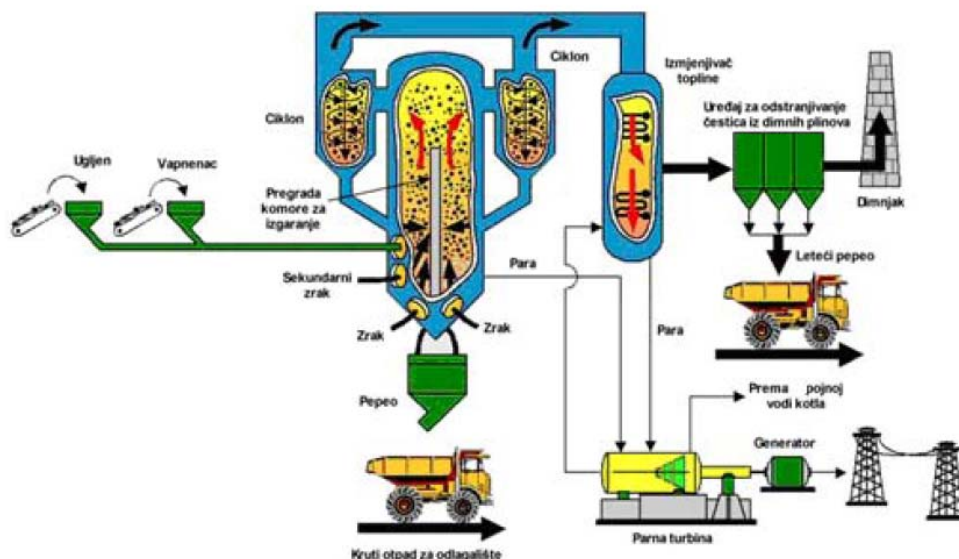


Slika 3-7 Pretvorna unutrašnje kaloričke energije mora u električnu energiju

Prvo je takvo postrojenje, snage 22 kW, izgrađeno 1930. godine na Kubi, potvrdilo tehničku mogućnost iskorištavanja unutrašnje kaloričke energije mora na opisani način, ali i, zasad, ekonomsku neisplativost, zbog visokih troškova izgradnje, u usporedbi s „klasičnim“ termoelektranama.

3.1 Energetske pretvorbe u termoelektrani s parnom turbinom

Energetske pretvorbe u termoelektrani s parnom turbinom, bez obzira na to izgara li u termoelektrani ugljen, Slika 3-7, mazut, Slika 3-8, ili teško ili lako ulje za loženje ili plin, Slika 3-9, započinju procesom izgaranja, procesom transformacije kemijske energije goriva u unutrašnju kaloričku energiju produkata izgaranja.

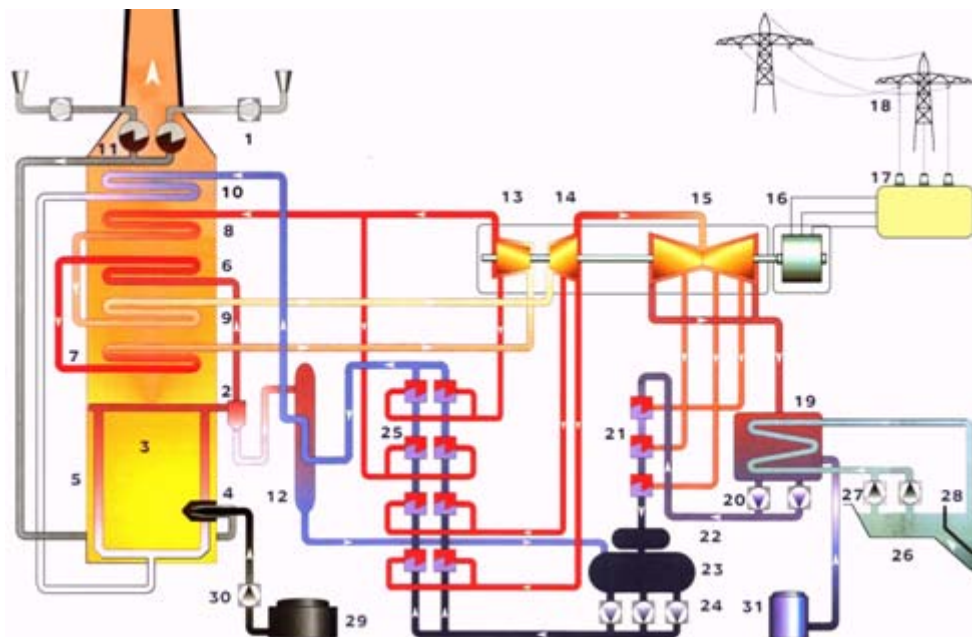


Slika 3-7 Shema termoelektrane ložene ugljenom

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.

Sam mehanizam izgaranja ni najjednostavnijih goriva nije još sasvim razjašnjen. Ne zna se pouzdano kakve sve spojeve prolazi tijekom oksidacije dok se ne postignu konačni produkti izgaranja. Moguće je međutim odrediti količine zraka (kisika) potrebnog za izgaranje nekog goriva određenog sastava, količinu i sastav plinova izgaranja kao i eksergiju unutrašnje kaloričke energije plinova izgaranja, te upravljati izgaranjem, poglavlje 8.

Plinovi izgaranja napuštaju ložište i struje oko parnog kotla odlazeći kroz dimnjak u okolicu (atmosferu), Slika 3-8.



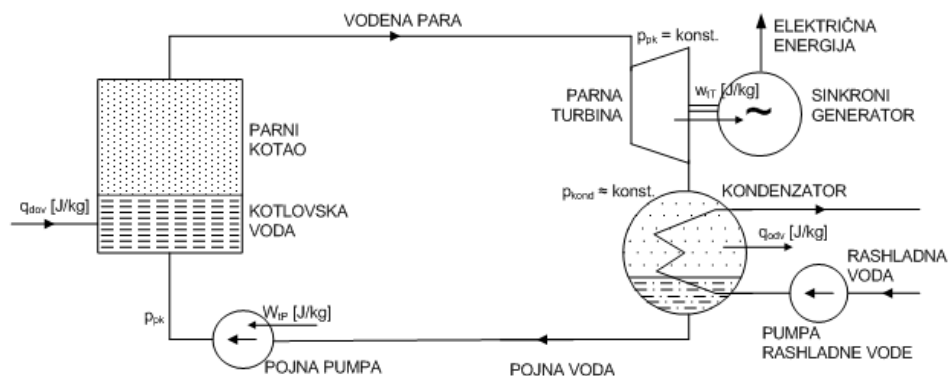
Slika 3-8 Shema termoelektrane ložene mazutom

Unutrašnja se kalorička energija plinova izgaranja pretvara pritom u toplinsku energiju, pa je zadatak parnog kotla da tu toplinsku energiju, oslobođenu izgaranjem goriva, dovede vodi i vodenoj pari koja na izlazu iz parnog kotla treba imati određeni (projektirani) tlak i temperaturu. Riječ je dakle o izmjenjivaču topline koji je u početnim fazama razvoja bio izveden kao posuda grijana plinovima izgaranja, djelomično napunjena vodom, pa odatle potječe naziv parni kotao. Danas su parni kotlovi izvedeni kao sustav cijevi (kako bi se što više povećala površina preko koje toplinska energija prelazi na vodu i paru), pa se često nazivaju generatorima pare. (U nuklearnim elektranama, budući da nisu u doticaju s plinovima izgaranja, isključivo se tako nazivaju /parogeneratori ili generatori pare/.) U parni se kotao dovodi „**pojna (kotlovska) voda**“ (vodena para kondenzirana u kondenzatoru termoelektrane), gorivo i zrak za izgaranje, a iz njega se odvođe proizvedena vodena para, plinovi izgaranja i pepeo kao neizgoreni dio goriva.



Slika 3-9 Termoelektrana Sisak, 420 MW, ložena teškim loživim uljem ili plinom

Opišimo sada energetske pretvorbe u termoelektrani s parnom turbinom, Slika 3-10.



Slika 3-10 Pojednostavljena shema termoelektrane s parnom turbinom

(Ograničit ćemo se na početku samo na kvalitativan opis pretvorbi, energetskih procesa i odnosa. Kasnije, kvantificirat ćemo ih.)

Započet ćemo promatranje s trenutkom kada toplinska energija započinje prelaziti na vodu u parnom kotlu termoelektrane.

(Pritom je nebitan za daljnje odvijanje pretvorbi proces proizvodnje toplinske energije: sasvim je svejedno radi li se o toplinskoj energiji dobivenoj transformacijom iz energije Sunčevog zračenja, nuklearne energije, kemijske energije ili geotermalne energije.)

Promatrat ćemo što se događa s 1 kg fluida: u termoelektrani s parnom turbinom: radi se o jednom kilogramu vode (prije nego li voda ispari u parnom kotlu odnosno jednom kilogramu vode nakon kondenzacije vodene pare u kondenzatoru termoelektrane) ili jednom kilogramu vodene pare (nakon što voda ispari u parnom kotlu). Dva su razloga takvog postupanja. Prvi, svi će izvedeni analitički izrazi vrijediti za sve termoelektrane s parnom turbinom. Posebnosti će biti izražene množimo li dobivene izraze s količinom fluida promatrane termoelektrane: primjerice; u nuklearnoj se elektrani „Krško“ u jednom satu proizvodi 3.924 tona vodene pare. Drugi je razlog, sve fizikalne veličine koje nisu intenzivne (dakle koje su ekstenzivne, ovisne o proširenju sustava ili o količini mase sustava) postaju time intenzivne jer se njihova veličina daje po jedinici mase. Takvim se veličinama onda pridružuje pridjev jedinični ili specifični, a označavaju se malim slovima. Npr., jedinični mehanički rad,

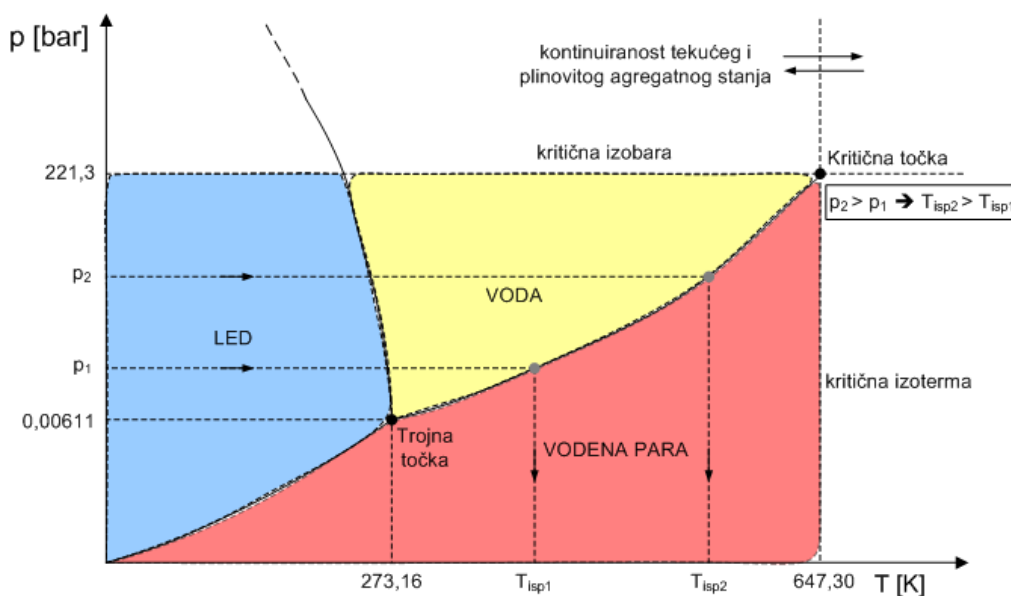
prikaže li se mehanički rad za jedinicu mase sustava: $w_{12} = \frac{W_{12}}{m}$ [J/kg], jedinična

toplinska energija $q_{12} = \frac{Q_{12}}{m}$ [J/kg] ili specifični volumen: $v = \frac{V}{m}$ [$\frac{m^3}{kg}$].

S trenutkom početka prelaženja na vodu u parnom kotlu toplinska se energija što se dovodi jednom kg vode ($q_{dov} = \frac{Q_{dov}}{m}$ [J/kg], m je masa vode /vodene pare/ što stvarno sudjeluje u procesima) pretvara u unutrašnju kaloričku energiju vode. Posljedično, s povećanjem količine unutrašnje kaloričke energije, raste temperatura vode. (Prosječna je translatorska brzina /kinetička energija/ molekula proporcionalna temperaturi.) Do koje temperature? Do temperature **vrelišta, isparivanja, zasićenja**

ili **kondenzacije**, kako se, različitim imenima, naziva ta karakteristična temperatura kod koje, dovodenjem toplinske energije, započinje prijelaz iz kapljevitog u plinovito agregatno stanje, no, isto tako, odvođenjem toplinske energije, obratan proces: prelaženje plinovitog u kapljevito agregatno stanje. Postizanjem temperature vrelišta započinje dakle promjena agregatnog stanja vode iz tekućeg (kapljevitog) u plinovito. Zašto? Povećanjem se količine unutrašnje kaloričke energije akumulirane u vodi povećava energija molekula vode; u jednom trenutku, u ovisnosti o tlaku pod kojim se nalazi voda, energija je molekula dostatna da se nadvladaju sile privlačenja između molekula: započinje odvajanje molekula odnosno prijelaz u plinovito agregatno stanje. (Drugim riječima, za prijelaz je iz tekućeg stanja u plinovito potrebno vodi (sustavu) dovoditi energiju kako bi se svladavale međumolekularne sile.) Kod koje se temperature to događa? Što je viši tlak pod kojim se nalazi voda, to je viša temperatura isparivanja (vrelišta, zasićenja), Slika 3-11.

(Što je viša temperatura, to je povoljniji energetski proces: u jednom se kilogramu vodene pare mogu akumulirati veće količine energije. Posljedično, termoelektrana može biti manjih dimenzija, manji je utrošak materijala za izgradnju. Međutim, takav materijal mora izdržavati visoke tlakove i temperature. Kako se postiže određeni, željeni tlak u parnom kotlu? Pumpom (crpkom), uz utrošak mehaničkog rada dakako.)



Slika 3-11 Agregatna stanja vode – ovisnost temperature isparivanja o tlaku

Otpočeti proces isparivanja, dovodenjem toplinske energije, odvija se sve dok 1kg vode u cijelosti ne ispari. Jer se voda (i vodena para) pritom nalazi pod konstantnim tlakom, temperatura se vode što isparuje i pare koja je nastala isparivanjem vode za vrijeme isparivanja ne mijenja: ostaje jednaka temperaturi vrelišta (isparivanja, zasićenja).

Zašto? 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 termoelekttranama, toj se pari najprije povisuje temperatura (količina akumulirane unutrašnje kaloričke energije) iznad temperature vrelišta, do granične temperature izdržljivosti materijala, dovodenjem toplinske energije koja se, sada međutim, nakon

što je sva voda isparila, pretvara u unutrašnju kaloričku energiju pare povisujući joj temperaturu.

*(U najmodernijim se termoelektranama radi o temperaturi i tlaku vodene pare većim od 650 °C i 360 bara. (1 bar = 10⁵ N/m²) O koliko se temperaturi i tlaku radi bit će jasnije podsjetimo li da su **kritična temperatura i tlak vode jednaki 374,15 °C i 221,3 bar.**)*

Iz parnog kotla para struji prenoseći akumuliranu energiju u parnu turbinu, u idući sustav termoelektrane, u kojoj se odvijaju daljnje transformacije energije. Koji su oblici energije pohranjeni u pari što struji? Očito, unutrašnja kalorička energija – preobražena toplinska energija koja je transformirana nuklearna, kemijska, energija Sunčeva zračenja ili geotermalna energija. No, budući da para struji (strujanje je način gibanja fluida) određenom brzinom, u pari je pohranjena i kinetička energija. Dalje, jer se energetske pretvorbe i procesi odvijaju u polju sile teže Zemlje, u pari je pohranjena i gravitacijska potencijalna energija. Jesu li to svi oblici energije pohranjeni u pari što struji? Ne. Fluid (para) ne će se sam od sebe početi gibati, kretati, strujati. Trebat će obaviti mehanički rad, svladati silu na putu, da promatrani kilogram pare započne strujati i da struji od parnog kotla **parovodom** (tako se zove cijev kojom struji para) do parne turbine. Jer je mehanički rad oblik energije, a energija je neuništiva, taj se obavljeni rad ne može izgubiti: ostaje pohranjen u pari što struji. (Zvat ćemo ga „**radom strujanja**“; koliki je iznos tog rada odredit ćemo uskoro.) Uobičajeno, bit će kasnije jasno zašto, zbroj se unutrašnje kaloričke energije i rada strujanja naziva **entalpijom**:

$$\text{entalpija} = \text{unutrašnja kalorička energija} + \text{rad strujanja.}$$

(To je moguće i dopustivo budući da je energija skalarna veličina: različiti se oblici energije mogu stoga algebarski zbrajati i/ili oduzimati.)

Što je entalpija možemo, za naše potrebe, iskazati i ovako:

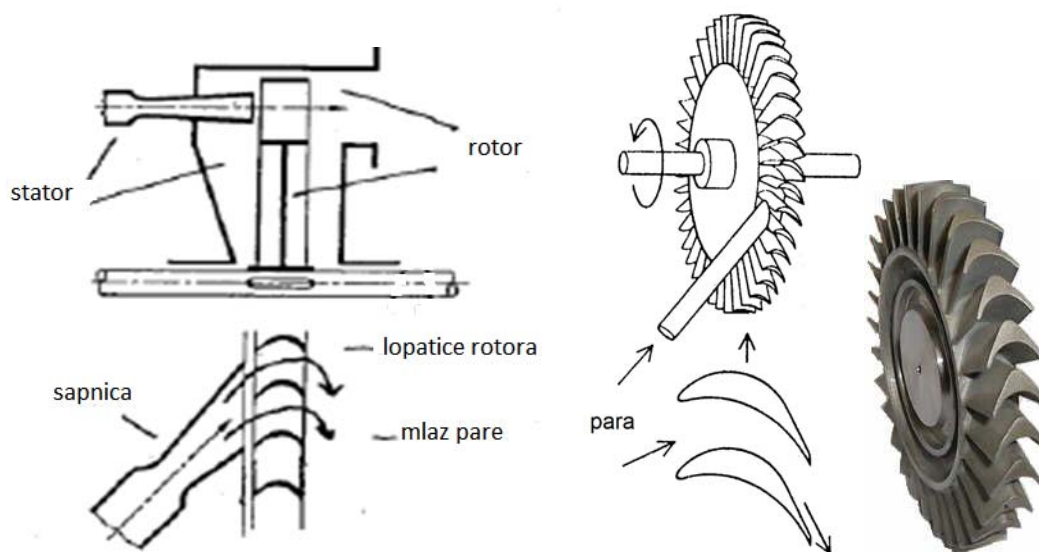
**entalpija je oblik energije pohranjen u fluidu što struji
a nije ni kinetička ni potencijalna energija.**

Energija (sumarna) pohranjena u pari (stalni oblici energije) pretvara se zatim u parnoj turbini u mehanički rad (prijelazni oblik energije). Kako? U parnim se turbinama (u svim turbinama) odvija dvostruka transformacija:

- entalpije pare u kinetičku energiju i
- kinetičke energije pare u mehanički rad.

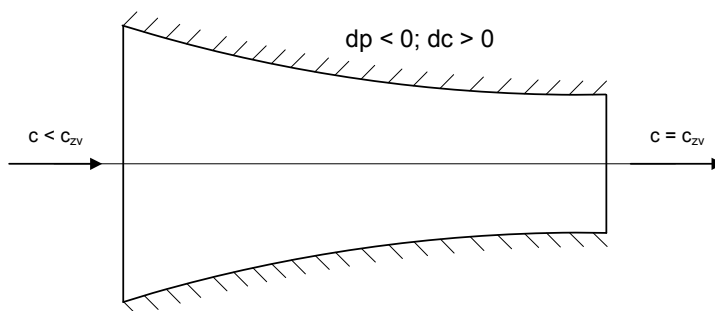
Prva je transformacija posljedica ekspanzije pare visokog tlaka i temperature u **nepokretnom** dijelu turbine, u **nepomičnim kanalima** ili **sapnicama**, odnosno **privodnom kolu** ili **statoru**. U statoru se para skreće s prvotnog smjera strujanja da bi se dovela pokretnom dijelu turbine: **okretnom kolu** ili **rotoru**. Druga se transformacija obavlja u rotoru. *(U rotoru se, međutim, mogu provoditi i obje transformacije: i u kinetičku energiju i u mehanički rad.)*

Kako se odvijaju spomenute transformacije? Pojednostavljeno, stator sadrži sapnice koje usmjeravaju strujanje pare između **lopatica** koje se nalaze na rotoru. Strujanje pare između lopatica rotora izaziva okretanje rotora, Slika 3-12.



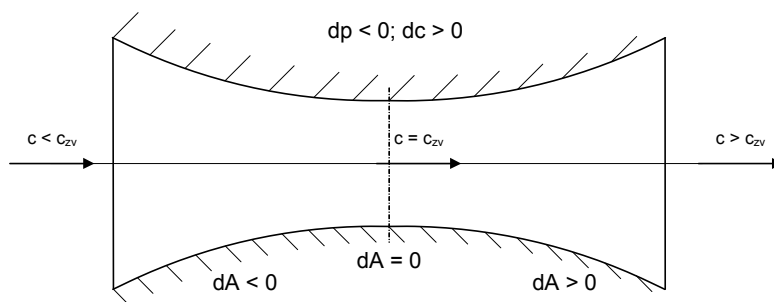
Slika 3-12 Skica najjednostavnije parne turbine

Sapnice su cijevi posebna oblika. Sužava li se presjek sapnice u smjeru strujanja vodene pare (smanjuje li se ploština površine kroz koju struji para), Slika 3-13, sapnica je konvergentna.



Slika 3-13 Oblik konvergentne sapnice i odnosi u njoj

Za vrijeme strujanja vodene pare (fluida) kroz takvu sapnicu povećava se brzina strujanja budući da vrijedi princip očuvanja mase. (Jednadžba kontinuiteta govori o tome.) No, najveća brzina pare koja se postiže jednaka je (samo) brzini zvuka (ako je ulazna brzina pare u sapnicu manja od brzine zvuka, c_{zv}). 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 premaleni (uvjetno premaleni) brzina strujanja pare. Problem je riješio švedski inženjer Gustav de Laval konstruirajući konvergentno-divergentnu sapnicu, Slika 3-14.

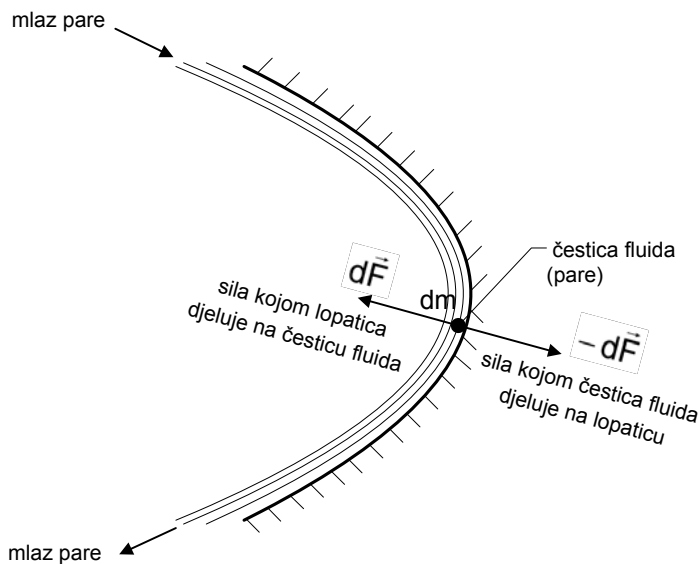


Slika 3-14 Oblik de Lavalove sapnice i odnosi u njoj

Na izlazu se iz takve sapnice, ukoliko je brzina pare na ulazu manja od brzine zvuka, postižu brzine (višestruko) veće od brzine zvuka.

(Zašto? O tome ćemo govoriti kasnije, u trećem svesku udžbenika.)

Pošto je para ekspanzirala u sapnici, postigavši određenu brzinu, dovodi se među lopatice rotora, Slika 3-12. Para struji preko lopatica rotora, površina koje su konvavno zakrivljene, Slika 3-15. (Otuda i naziv „lopatica“.) Prema prvom Newtonovom aksiomu mlaz bi pare zadržao prvotni smjer strujanja da na njega ne djeluje lopatica silom, prema drugom Newtonovom aksiomu, skrećući ga sa smjera strujanja. (Radi se o centripetalnoj sili čija je jakost upravo razmjerna kvadratu brzine klizanja čestice fluida duž lopatice.) Silom jednakog iznosa no suprotnog smjera, prema trećem Newtonovom aksiomu, mlaz pare djeluje na lopaticu. Budući da je lopatica pričvršćena na vratilo turbine, ta sila izaziva okretanje vratila: sila djeluje na putu, obavlja se dakle mehanički rad na „račun“ kinetičke energije mlaza pare.



Slika 3-15 Oblik lopatice i sila što djeluje na lopaticu

(Sila \cdot krak sile = moment = $M = F \cdot r$ / ako je $F = \text{konst.}$, $M = \text{konst.}$ jer je $r = \text{konst.}$ / Dobivamo: $F = \frac{M}{r}$ i dalje, budući da sila djeluje na putu s koji je povezan s radijusom r rotora turbine, $s = 2r\pi \cdot n$ / n = broj okretaja vratila/,

$W = F \cdot s = \frac{M}{r} \cdot 2r \cdot \pi \cdot n = 2\pi \cdot n \cdot M [J]$. Snaga mehaničkog rada turbine koji se sinkronom generatoru predaje pomoću vratila tada je $\dot{W} = 2\pi \cdot \dot{n} \cdot M [W]$ gdje je \dot{n} broj okretaja vratila turbine u jedinici vremena. Uobičajeno se takav mehanički rad, koji se pomoću vratila pogonskog stroja predaje u okolicu, sinkronom generatoru primjerice, naziva **tehničkim radom**.)

Zašto para struji kroz turbinu? Otkuda se namiruje potrebiti rad strujanja? Para struji zbog razlike tlakova: tlak je pare na ulazu u turbinu (jako) visok, to je tlak koji vlada u parnom kotlu termoelektrane: $p_{ulaz} \equiv p_{PK}$. S druge strane, tlak je pare na izlazu iz turbine (jako) nizak, manji od tlaka okolice (okolnog zraka /atmosfere/): $p_{ok} \approx 1$ bar. Kako je to moguće? Jasno je zašto se tlak pare što struji kroz turbinu smanjuje: para ekspanzira a da joj se pritom ne dovodi toplinska energija. No kako ekspanzira do tlaka manjeg od tlaka okolice (okolnog zraka)?

Da bi se dobio što veći mehanički rad, a on je proporcionalan, što ćemo pokazati,

razlici tlakova na ulazu i izlazu iz turbine: $w_{turbine} \approx - \int_{p_{ulaz}}^{p_{izlaz}} v dp$, para se, nakon što je izašla

iz turbine, dovodi u posebno pripremljen uređaj, nazvan kondenzatorom, koji je zrakoprazan, i u kojemu se para što pristiže kondenzira (ukapluje) djelovanjem rashladne vode iz okolice (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 okolice), Slika 3-11.

(Radi se o odnosu tlaka i temperature zasićenja (vrelišta na tom tlaku); temperature kod koje započinje proces kondenzacije: prijelaz plinovitog u tekuće (kapljevito) agregatno stanje.)

Je li je postizanje niskog tlaka pare na izlazu iz turbine jedini razlog ugradnje (skupog) kondenzatora u termoelektranu? Zašto se para kondenzira, zašto se u okolicu odvodi toplinska energija?

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. Zašto? Govorili smo o tome, svaka se energija sastoji iz eksergije i anergije. U procesima se pretvorbe jednih oblika energije u druge u termoelektranama zapravo odvaja eksergija energije od anergije energije: eksergija sudjeluje dalje u najrazličitijim energetskim transformacijama, a anergija se, u obliku toplinske energije (prijelazni oblik energije), na temperaturi i tlaku okolice, odvodi u okolicu.

Radi se o velikim iznosima anergije (energije). Primjerice, za proizvodnju 1000 MW električne snage potrebno je posredovanjem kondenzatora odvesti u okolicu od 1380 do 2 100 MW toplinske snage, ovisno o tipu termoelektrane. Je li je mogući proces u kojem bi para u parnoj turbini ekspanzirala u okolicu, dakle, do tlaka okolnog zraka? Dakako, s tehničkog je stajališta posve svedeno do kojeg tlaka ekspanzira para u parnoj turbini. Međutim, takav bi proces bio višestruko lošiji od procesa s kondenzatorom. Prvo, izlazni bi tlak pare bio 1 bar umjesto 0,02 bara do 0,06 bara, što je područje uobičajenih tlakova u kondenzatoru: zbog toga bi i mehanički rad turbine bio mnogo manji. Dalje, velike količine pare odvedene iz turbine u okolicu bile bi nepodnošljive u okolici (nekoliko tisuća tona pare na sat iz velikih turbina) jer bi joj temperatura na izlazu iz turbine bila oko 100 °C i

kondenzacija bi se odvijala u neposrednoj i daljoj okolici takva postrojenja: kiša bi ne prestajući padala poplavljujući okolicu. Konačno, postoji (barem) još jedan razlog zbog kojeg se spomenuta mogućnost ne realizira: vodu ispuštenu iz parnog kotla u obliku pare treba nadoknađivati kako bi se proces proizvodnje električne energije mogao kontinuirano odvijati. S obzirom na poplave u okolici termoelektrane, to ne bi trebao (barem načelno) biti problem. Međutim, 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 kemijski čista i redovito sadrži grube nečistoće (plivajući i lebdeći sastojci te sastojci koji se talože), koloidne nečistoće (minerale i organske tvari) i molekularne nečistoće (otopljene soli, kiseline i plinovi). „Pojna“ voda, to je voda koja se dovodi u kotao, i „kotlovska“ voda, to je voda koja se nalazi u kotlu, mora biti očišćena; sve spomenute nečistoće moraju biti uklonjene. U protivnom, taloženje na ogrjevnim površinama koje su u dodiru s vodom ili parom, te korozija svih dijelova u krugu voda-para brzo bi onemogućile odvijanje energetskih procesa u termoelektrani. Priprema vode međutim košta; zbog toga se, jednom pripremljena količina vode, neophodna za odvijanje procesa proizvodnje električne energije, nastoji zadržati stalno u krugu parni kotao – turbina – kondenzator – parni kotao. Nadoknađuju se pritom samo (relativno mali) gubici nastali u obliku supare (otparka) na izlazu iz otpinjača i iz (labirintnih) brtvenica turbine, zatim za paru koja se troši za otpuhivanje čade u kotlu, za uzimanje uzoraka vode te pri stavljanju u pogon i obustavljanju pogona. Drugim riječima, ispuštanje pare u okolicu ne dolazi u obzir. Zašto, međutim, budimo pametni, ne bismo postupili ovako: neka para iz parne turbine odlazi u kondenzator (golemi zrakoprazni prostor), ali nemojmo je kondenzirati odvođenjem toplinske energije u okolicu (time izbjegavamo toplinsko opterećenje okolice), već je kompresorom (jer moramo obaviti rad kako bismo paru utisnuli u kotao u kome se voda nalazi pod vrlo visokim tlakom) vratimo u kotao? Sijesni smo, jer se para sada ne kondenzira u kondenzatoru, u kondenzatoru bi vladao tlak (mnogo) viši od tlaka okolice te bismo, posljedično, dobivali manje mehaničkog rada, no, sumarno, ne bi li takav proces svejedno bio energetski povoljniji, ekološki prihvatljiviji?

Odgovarajući na pitanje, odgovorimo prvo na ovo pitanje: želimo li jednom kilogramu vode (kapljevine), koja se u cilindru sa stapom nalazi na temperaturi okolice i pod tlakom od 1 bara, povišiti tlak na, recimo, 300 bara, i zatim jednom kilogramu zraka (plina) na temperaturi okolice i pod tlakom od 1 bara isto tako povišiti tlak na 300 bara, u kojem ćemo slučaju „potrošiti“ više mehaničkog rada? Što je „lakše“ komprimirati: vodu ili zrak?

99,99 % upitanih odgovorit će: zrak. Drugim riječima, s manje ćemo rada (muke) komprimirati zrak (plin).

Točno? Ne, nije. 1 kg vode, odnosno 1 kg plina, zatvoreni je sustav na kojem obavljamo (mehanički) rad djelujući silom na pomičnu granicu (stap) sustava, komprimirajući ga (povećavajući mu tlak / unutrašnju kaloričku energiju u koju se pretvara (pretvorio) obavljeni rad). Prejudiciramo, o tome ćemo detaljno govoriti, na sustavu obavljamo tzv. „mehanički rad promjene volumena“ koji je

proporcionalan izrazu $\int_{v_1}^{v_2} p dv$ gdje je v_1 iznos specifičnog volumena (promatramo sustav mase jednog

kilograma: $v = \frac{V}{m} [\frac{m^3}{kg}]$) sustava kada je sustav izložen tlaku od 1 bara, a v_2 specifični volumen

sustava pod tlakom od 300 bara.

Voda (tekućina, kapljevina) praktički je nestlačiva (nestišljiva, nekompresibilna): $v_2 - v_1 \approx 0$. Posljedično, rad je komprimiranja vode (jako) malen. S druge strane, plinovi su (jako) kompresibilni (stišljivi, stlačivi), $v_2 - v_1$ veličina je velikog iznosa, pa je i rad koji treba uložiti kako bi se plinu povišio tlak jako, jako velik u usporedbi s radom utrošenim na kompresiju tekućine (kapljevine). Drugim riječima, rad koji bi se trošio na kompresiju pare bio bi toliki da se opisani proces ne bi isplatio. (Pritom bi u okolicu prelazila i velika količina toplinske energije.) Zbog toga se u termoelektrani

para, koja je svu svoju eksergiju (najveći dio) predala u parnoj turbini, kondenzira da bi pojom pumpom bila vraćena u parni kotao. Pumpom se, uz utrošak mehaničkog rada, zanemarljivo prema količini mehaničkog rada koji dobavlja parna turbina, vodi (kondenzatu) pod niskim tlakom, što vlada u kondenzatoru, povišuje tlak do iznosa tlaka u parnom kotlu.

Prostor je kondenzatora zrakoprazan, no, zbog nemogućnosti potpunog brtvljenja, u kondenzator stalno prodire nešto zraka, što u njemu izaziva porast tlaka budući da se zrak ne kondenzira pri temperaturama koje vladaju u kondenzatoru. (*Taj se zrak zbog toga mora uklanjati iz kondenzatora.*)

Kondenzator je izmjenjivač topline kojemu se s jedne strane dovodi para, a s druge rashladna voda što, strući kroz cijevi u kondenzatoru, Slika 3-10, 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 kojemu se para miješa s rashladnom vodom. (Takvi se kondenzatori planiraju za područja s malim količinama rashladne vode.)

Nije, međutim, kondenzatoru jedini zadatak osigurati kondenzaciju ekspanzirane 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 (prestanu se koristiti električnom energijom veliki potrošači), pa se dio pare, koji ne će ekspanzirati u turbini (treba smanjiti količinu pare što se dovodi u turbinu, kako bi se smanjila i količina proizvedenog mehaničkog rada, budući da se smanjila potreba za električnom energijom), odvodi kroz (sigurnosni) ventil, u kojem se para „prigušuje“ (snizuje joj se tlak), odmah u kondenzator. Zbog toga se kondenzator mora tako dimenzionirati da bude sposoban preuzeti onu količinu pare koja, u najnepovoljnijem slučaju, donosi u kondenzator približno dvostruko više energije nego za vrijeme maksimalnog opterećenja u normalnom pogonu.

Ako se kondenzatoru dovodi uvijek svježja voda iz vodotoka, jezera ili mora, to je **protočno hlađenje** koje se upotrebljava kad ima dovoljno vode. Naime, za današnje su snage termoelektrane potrebne velike količine vode koje protječu rashladnim sustavom kondenzatora: od 90 litara ($0,09 \text{ m}^3$) do 360 litara ($0,36 \text{ m}^3$) vode po kWh, ovisno o tipu termoelektrane, o dopuštenom povišenju temperature rashladne vode i sl., odnosno, termoelektrane snage 1.000 MW treba od 25 do $100 \text{ m}^3/\text{s}$ vode za kondenziranje vodene pare u kondenzatoru. Riječ je dakle o količinama vode koje protječu velikim rijekama jer se mora računati da valja osigurati vodu za hlađenje i u najsušnijim razdobljima. Odvođenje toplinske energije iz kondenzatora povezano je s porastom temperature rashladne vode koja se vraća u vodotok (toplinska energija koja s vodene pare prelazi u kondenzatoru na rashladnu vodu pretvara se u unutrašnju kaloričku energiju rashladne vode – vanjska je manifestacija porast temperature rashladne vode), te je ono toplinsko (termičko) opterećenje vodotoka, s (ponekad) negativnim posljedicama na kemijska svojstva vode i na život u njoj.

Sva se energija, naglašavamo, u energetske pretvorbama i procesima, pretvara konačno u anergiju koja u obliku toplinske energije prelazi u okolicu. Kad se promatraju pojedinačni energetske procesi, prihvatljivo je smatrati da je stanje okolice konstantno ($T_{ok} = konst$, $p_{ok} = konst$.) ili, što ima isto značenje, da taj proces ne utječe na stanje okolice. U našim matematičkim modelima, kako bi

proračuni bili što jednostavniji, postupamo uvijek tako. U realnosti, međutim, ta pretpostavka nije ispunjena kad se razmatraju sve energetske transformacije što se danas ostvaruju (primjerice u termoelektranama) a pogotovo one u budućnosti. Npr., temperatura se vode rijeke Save, iz koje se uzima voda za kondenzator nuklearne elektrane „Krško“, zbog toga (bitno) mijenja. Kako se ne bi ugrožio život u rijeci, flora i fauna, temperatura se vode u rijeci, prije i poslije nuklearne elektrane, ne smije razlikovati više od 3°C (3K), a temperatura vode ne smije prijeći 28 °C. U suprotnom, u situacijama kada je smanjen protok Save pa bi zbog toga temperatura rijeke porasla za više od 3 °C, kondenzator se mora hladiti (i) vodom u (zatvorenom) kružnom ciklusu koja se pak hladi u rashladnim tornjevima.

Protočno je hlađenje kondenzatora parne turbine najpovoljnije kako s obzirom na potrebne investicije tako i s obzirom na stupanj djelovanja termoelektrane. Rashladna voda samo jednom prolazi kroz kondenzator i zagrijana vraća se u vodotok, jezero ili more. Mogućnosti su međutim hlađenja vodom iz rijeka vrlo ograničene ili zbog nedostatnih protoka ili zbog ograničenja dopuštenim porastom temperature. Takva se ograničenja pojavljuju i pri upotrebi jezerske vode. Za hlađenje morskom vodom normalno nema ograničenja zbog porasta temperature na širem području, iako se mogu pojaviti nedopuštena zagrijavanja u neposrednoj blizini termoelektrana. Upotreba morske vode međutim zahtijeva veće investicije, jer cijeli rashladni sustav mora biti otporan na koroziju, a valja spriječiti i rast alga i školjki. Zbog toga se sve češće izvodi **povratno hlađenje** kondenzata parne turbine u kojem se ista voda ponovno vraća u kondenzator pošto se ohladila u rashladnom tornju ili u posebnom izmjenjivaču topline. Danas se izvode vlažni rashladni tornjevi s prirodnim i prisilnim strujanjem zraka, suhi rashladni tornjevi s prirodnim i prisilnim strujanjem zraka, te zračni kondenzatori. Dakako, i takav način odvođenja anergije iz termoelektrane utječe na okoliš. Npr., u vlažnom tornju s prirodnim strujanjem zraka zagrijana se voda iz kondenzatora dovodi u toranj nekoliko metara iznad osnovice, tamo se raspršuje u sitne kapljice koje padaju na prepreke koje omogućuju bolju izmjenu topline između vode i zraka što zbog uzgona struji prema vrhu tornja. (I o uzgonu ćemo detaljno govoriti kasnije, u trećem svesku.) Voda se hladi isparivanjem 1 do 2% vode koja kruži u zasebnom rashladnom sustavu, te prijelazom topline od vode na zrak. Smjesa zraka i vodene pare izlazi na vrhu tornja i diže se uvis jer joj je temperatura viša od temperature okolnog zraka; ubrzo postaje vidljiva zbog kondenzacije vodene pare. Ta kondenzirana vodena para povećava količinu oborina u smjeru vjetra, dok oblaci vodene pare iz rashladnih tornjeva pridonose nastanku magli te leda na cestama i dalekovodima u blizini tornjeva zimi. Konačno, svojim glomaznim dimenzijama tornjevi mijenjaju krajolik: za termoelektranu snage 800 do 1 300 MW potreban je rashladni toranj visok 130 do 170 metara, s promjerom osnovice od 100 do 130 metara. (Nuklearna elektrana „Krško“ ima 12 rashladnih tornjeva, Slika 3-16.)



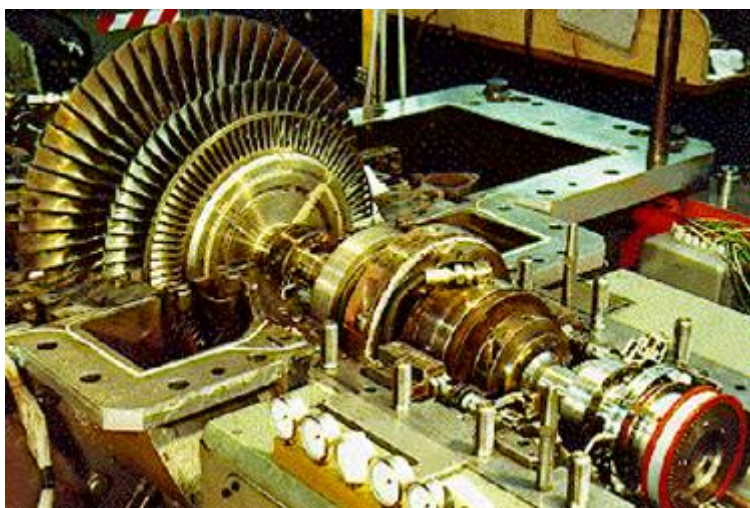
Slika 3-16 Nuklearna elektrana „Krško“

U prvim su se počecima termoelektrane koristile stapnim parnim strojevima, Slika 3-17.



Slika 3-17 Stapni parni stroj

S rastom snage termoelektrana parne su turbine istisnule stapne strojeve, Slika 3-18.



Slika 3-18 Rotor parne turbine

Zašto? Snaga je jednaka produktu sile i brzine: $P = \vec{F} \cdot \vec{c}$. Sila je pak jednaka produktu mase i akceleracije: $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$. Prema tome s velikom snagom raspolažemo raspolažemo li s velikom silom i/ili brzinom, odnosno, s velikom masom i/ili akceleracijom: $P = m \cdot \vec{a} \cdot \vec{c}$. Brzina je i akceleracija stapnog stroja ograničena velikim naprezanja, kojim su izvrgnuti pokretni dijelovi stroja, zbog promjene smjera kretanja te usporavanja i ubrzavanja koja se vrlo brzo smjenjuju. Velika se snaga stapnog stroja može stoga postići samo ukoliko je velike mase (sila je stapnog stroja jednaka umnošku tlaka u cilindru stroja i ploštine površine stapa - što veći tlak i/ili površina stapa to veća sila): dizelski su motori većih snaga visoki poput trokatnice. Nasuprot tome, mehaničko je naprezanje pokretnih dijelova turbina (koje se nazivaju i turbostrojovima, strojevima pokretanim strujanjem fluida), jednoliko. Rotor se turbine jednoliko okreće i nema dijelova koji su izvrgnuti promjeni smjera gibanja. Zbog toga su postizive velike brzine vrtnje i time snage ne na račun velikih masa. To je glavna prednost tih strojeva pred stapnim. Nedostatak im je što su dijelovi s lopaticama skuplji od cilindra, stapa i ventila. To naročito vrijedi za strojeve male snage, pa se oni danas do reda veličine od oko 1 MW (osim iznimnih slučajeva – termoelektrane u zabačenim krajevima nepokrivenim elektroenergetskim sustavom u kojima dizel motori mogu biti snage i do 30 MW) grade kao stapni strojevi.

Iznad te granice (1MW) najčešće se upotrebljavaju turbostrojevi, a oni su to ekonomičniji što im je snaga veća. *(Naravno da se ponekad izrađuju i turbostrojevi vrlo malih snaga, zbog posebnih zahtjeva.)*

Glede stapnih parnih strojeva, spomenimo, njihova uporaba može biti opravdana samo kad je za tehnološki proces uz mehanički rad ili električnu energiju potrebna i para relativno niskog tlaka, ali i to samo onda ako je riječ o malim snagama. Smatra se da do 200 kW stapni parni stroj ima prednost, od 200 do 1 000 kW on se može uspoređivati s parnom turbinom, a za snage veće od 1 000 kW povoljnija je parna turbina.

Završili smo time kvalitativni opis energetske pretvorbe u „klasičnoj“ termoelektrani. Da bismo, međutim, ustanovili koliko ugljena, nafte, odnosno plina treba izgorjeti u termoelektrani određene električne snage, recimo 5000 MW, koliko vode (vodene

pare) treba pritom sudjelovati u pretvorbama i procesima, pod kojim tlakom i temperaturom, koliko toplinske energije treba odvesti u okolicu, koliko rashladne vode treba strujati kroz kondenzator itd, itd, termoelektranu ćemo promatrati prvo kao zatvoreni sustav, a zatim kao sklop otvorenih sustava. Masa je takvih sustava fluid (voda, odnosno vodena para, ili plin), podvrgnut različitim energetskim pretvorbama i procesima. Pritom fluid (masa sustava) preuzima energiju, pohranjuje je, prenosi, pretvara i konačno predaje u okolicu (drugim sustavima). Ono što se događa sa sustavima, zatvorenim i otvorenima, analizirat ćemo primjenom 6 jednadžbi: 4 principa očuvanja, princip rasta entropije i jednadžba stanja idealnog fluida (plina), budući da se, bez obzira na vrstu događaja, svi događaji (pretvorbe i procesi) svode na izmjenu energije između sustava i okolice. (Masa je samo oblik energije.) Radi se o ovim jednadžbama:

- (1) analitički oblik principa očuvanja mase (*Masa ne može nestati, niti ni iz čega nastati, samo se njezin sastav može mijenjati iz jednog oblika u drugi. Postoji više analitičkih oblika principa uključujući li se i strujanje fluida u razmatranja.*)
- (2) analitički oblik principa očuvanja energije (*Energija se ne može ni stvoriti ni uništiti. Analitički oblik tog principa naziva se 1. glavnim stavkom termodinamike. Postoji više analitičkih oblika promatramo li strujanje fluida.*)
- (3) analitički oblik principa očuvanja količine gibanja (*Postoji više analitičkih oblika principa: morat ćemo ih izvesti za strujanje fluida.*)
- (4) analitički oblik principa očuvanja momenta količine gibanja (*Postoji više analitičkih oblika principa: morat ćemo ih izvesti za strujanje fluida.*)
- (5) analitički oblik principa rasta entropije (*Entropija se ne može uništiti ali se može stvoriti. Analitički oblik tog principa naziva se 2. glavnim stavkom termodinamike. Postoji više analitičkih oblika uključujući li se i strujanje fluida.*) i
- (6) jednadžba stanja idealnog fluida (plina).

Te principe, koji se u „Fizici“ kakvu poznajete, primjenjuju na konstantnu i poznatu količinu mase, dakle na zatvoreni sustav, morat ćemo prilagoditi za promatranja događanja s otvorenim sustavima kroz koje struji fluid (beskonačan niz materijalnih čestica) često nepoznate količine mase koja se trenutačno nalazi u otvorenom sustavu odnosno koja ustrujava u ili istrujava iz otvorenog sustava preko dijelova granice sustava prijelaznih za masu.

Na početku promatranja, međutim, pojednostavnit ćemo naše analize. Zanimat će nas samo energetske transformacije, a ne i veličine sila koje pritom djeluju. Koristit ćemo se stoga s dva principa očuvanja (principima očuvanja mase i energije), principom rasta entropije i jednadžbom stanja idealnog fluida (plina). (Kasnije, na 4. godini studija, kad ćemo određivati i sile, odnosno i jakosti tih sila, služit ćemo se i s preostala dva principa.) Nadalje, kad ćemo promatrati energetske pretvorbe i procese što se odvijaju u otvorenim sustavima, promatrat ćemo na početku samo (vrlo) specijalne procese: tzv. **jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese**. U tom slučaju, bez obzira radi li se o zatvorenom ili otvorenom sustavu, smatrat ćemo da sustav sadrži samo 1kg mase (zatvoreni sustav) odnosno, promatrat ćemo što se događa s 1 kg fluida što struji kroz otvoreni sustav. (Obrazložili smo zašto tako postupamo kad

možemo tako postupati: dobivamo opće izraze koji vrijede za bilo koji zatvoreni sustav ili otvoreni sustav u kojemu se odvijaju jednodimenzionalni, stacionarni, strujni procesi. Te opće izraze množimo onda s masom promatranog sustava kako bismo dobili izraze što vrijede za pojedinačne sustave. Osim toga, sve ekstenzivne fizikalne veličine postaju tako intenzivnima, neovisnima o masi.)

3.1.1 Termoelektrana kao zatvoreni sustav

U termoelektrani ista količina vode, odnosno vodene pare, u prvom približenju, kruži (struji, cirkulira) u zatvorenom krugu: parni kotao – parna turbina – kondenzator – parni kotao, pa cijelu termoelektanu možemo smatrati zatvorenim sustavom budući da zatvoreni sustav karakteriziraju granice nepropusne za masu. Samim time, jer vrijedi princip očuvanja mase, masa je zatvorenog sustava konstantna i poznata (lako ju je izračunati odnosno izmjeriti).

Analizirat ćemo sada što se događa s tom masom primjenjujući spomenute jednadžbe.

3.1.1.1 Princip očuvanja mase za zatvoreni sustav

Kako glasi analitički oblik principa očuvanja mase za zatvoreni sustav (ZS)?

$$m_{ZS} = \text{konst. [kg]}, \quad dm_{ZS}/dt = 0 \text{ [kg/s]} \quad [3.1]$$

Dakle, princip očuvanja mase za zatvoreni sustav izriče da je masa zatvorenog sustava nepromjenjiva (konstantna) u vremenu.

3.1.1.2 Princip očuvanja energije za zatvoreni sustav

Kako glasi njegov analitički oblik?

Odgovorimo na to pitanje pitajući se kako zatvoreni sustav može međudjelovati (komunicirati) sa svojom okolicom?

Očito, samo izmjenjujući energiju (prijelazne oblike energije):

- mehanički rad i/ili
- toplinsku energiju koji se mogu bilo dovoditi bilo odvoditi iz sustava i/ili
- rad trenja koji se, uvjerit ćemo se, samo dovodi u sustav; sustav ga ne može predavati u okolicu. (*Rad je trenja dakako samo oblik mehaničkog rada. Kao i rad strujanja, odnosno i mehanički rad promjene volumena. Zbog njihovih se specifičnosti naglašavaju njihovi nazivi.*)

Jer se rad trenja samo dovodi u sustav, rad je trenja uvijek negativan. U našim ćemo razmatranjima energetske pretvorbe i procesa međutim, u većini analiza, rad trenja zanemariti; u odnosu na količine drugih oblika energije njegova je veličina neznatna.

Kako se mogu izmjenjivati prijelazni oblici energije između zatvorenog sustava i njegove okoline?

Samo (uvjerit ćemo se)

- posredovanjem sile u obliku mehaničkog rada (najčešće mehaničkog rada promjene volumena) i rada trenja; i
- posredovanjem razlike u temperaturi sustava i okolice u obliku toplinske energije, što ćemo pokazati.

Takva će međudjelovanja biti određena i ograničena principom očuvanja energije.

Pogledajmo prvo što se događa kada sila djeluje na zatvoreni sustav obavljajući rad na (nekom) putu? Na granicu krutog sustava, zasad. (Volumen je sustava konstantan, oblik sustava nepromjenjiv. Sila dakle, djelujući na sustav, ne deformira ga niti rotira oko neke (trenutačne) .osi ili točke.) Sila obavlja rad, odnosno, druga mogućnost, sustav obavlja rad svladavajući silu. Što se pritom događa? Mijenja se mehanička energija sustava: kinetička, potencijalna, elastična energija i energija rotacije u najopćenitijem slučaju. U slučajevima, međutim, koje ćemo promatrati, mijenjat će se samo položaj u prostoru i brzina sustava, odnosno potencijalna i kinetička energija sustava; time pojednostavnjujemo ilustraciju odnosa ne gubeći ništa od biti fizikalne slike događanja:

$$W_{12} = - \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{s} = - m [g(z_2 - z_1)] + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) [J] \quad [3.2]$$

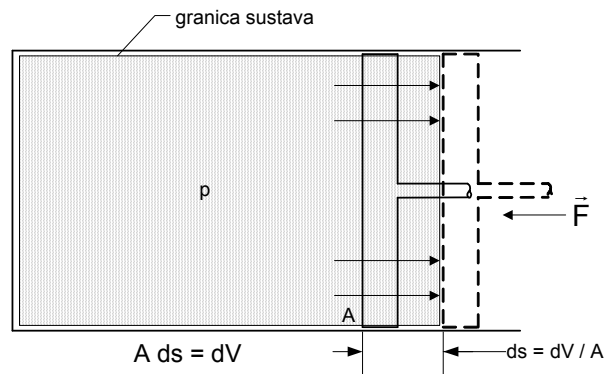
(Promatramo sustav čija je masa m kg, a minus je predznak dogovoren.)

Prvi član izraza [3.2] predstavlja promjenu potencijalne, a drugi član promjenu kinetičke energije pohranjenih u sustavu kao cjelini. Ako je npr. $z_2 > z_1$ i $c_2 > c_1$, desna će strana [3.2] biti negativna, pa će vrijednost mehaničkog rada W_{12} biti negativna, što znači da je energija dovedena u sustav (mehanički je rad predan sustavu, rad je obavljen na sustavu), jer je povećana akumulirana količina potencijalne i kinetičke energije. Suprotno, ako je $z_2 < z_1$ i $c_2 < c_1$, desna će strana [3.2] postati pozitivna, pa će vrijednost W_{12} biti pozitivna, što znači da sustav predaje mehanički rad (sustav obavlja rad pretvorbom iz potencijalne i kinetičke energije) i pritom mu se smanjuje količina akumulirane potencijalne i kinetičke energije. Naravno da su moguće i bilo kakve promjene z i c , pa o predznaku desne strane [3.2] ovisi je li je mehanički rad doveden ili odveden: je li je sustav obavio rad ili je na sustavu (nad sustavom) obavljen rad.

(Mehanički rad možemo dakle promatrati i kao transfer (prijelaz) energije (mehaničke energije) na sustav ili sa sustava koji je ekvivalentan djelovanju sile na putu.)

Što ako sustav miruje? Ako mu je $c_1 = c_2 = 0$ i ako u cjelini ne mijenja položaj $z_1 = z_2 = \text{konst}$? Može li takav sustav obaviti rad, odnosno, može li rad biti obavljen na takvom sustavu?

Da, djeluju li sile okomito na njegove granice i pritom se pojavi pomak granica sustava i s tim i promjena volumena sustava. Mehanički rad koji je posljedica takve promjene naziva se **mehaničkim radom promjene volumena**. Da se odredi mehanički rad promjene volumena, promatra se plin zatvoren u cilindru s pomičnim stapom, Slika 3-19.



Slika 3-19 Određivanje mehaničkog rada promjene volumena

Plin predstavlja zatvoreni sustav. Njegovo je stanje određeno dvjema veličinama stanja: tlakom p i specifičnim volumenom v . U svakom stanju ravnoteže mora djelovanju tlaka plina p biti suprotstavljena sila \vec{F} kojom stap djeluje na plin. Ta je sila okomita na stap i iznosi $F = pA$ (pokazat ćemo to kad ćemo govoriti o tome što je tlak), gdje je A površina stapa što dolazi u kontakt s plinom. (Nije li sila okomita na stap, rastavlja se na okomitu i tangencijalnu komponentu. U tom je slučaju sila $\vec{F} \equiv \vec{F}_n$ okomita komponenta promatrane sile.) Pomakne li se stap za ds , Slika 3-19, pomaknut će se i hvatište sile \vec{F} , što odgovara obavljanju rada:

$$dW = -\vec{F} \cdot d\vec{s} = -F ds \cos\varphi = -F ds \cos 180^\circ = F ds = pA ds = p dV \quad [3.3]$$

gdje je $A ds$ promjena volumena plina, dV , jer se stap pomaknuo za ds .

(Pomak je hvatišta sile u smjeru suprotnom smjeru gibanja hvatišta sile što znači da sustav obavlja mehanički rad promjene volumena. Potrebno je napomenuti da relacija [3.3] vrijedi samo kad je promatrani sustav u stanju ravnoteže, što znači da su razlike veličina stanja u sustavu zanemarivo male. To je ispunjeno uvijek kad je brzina stapa malena prema brzini zvuka u promatranom plinu. Budući da se brzina zvuka u plinu kreće između 300 i 1.000 m/s, što ovisi o vrsti plina i njegovoj temperaturi, postavljeni je uvjet ispunjen i u najbržim stapnim strojevima.)

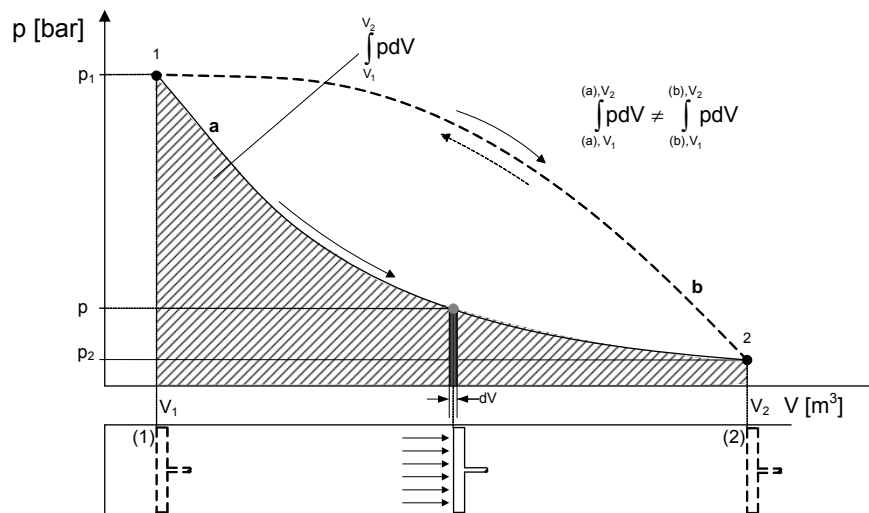
Uz poznatu ovisnost promjene tlaka o promjeni volumena, krivulja **a** Slika 3-20, moguće je integriranjem izraza [3.3] između početnog stanja 1 (trenutak kad sustav počinje svladavati silu na putu) i konačnog stanja 2 (trenutak kad sustav prestaje svladavati silu na putu), iz relacije

$$W_{12} = \int_1^2 p dV \equiv \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad [3.4]$$

odrediti mehanički rad promjene volumena. Valja istaknuti da se oznaka stanja (1 ili 2) odnosi na obje veličine stanja. To znači da npr. stanju 1 odgovara tlak p_1 i volumen V_1 . Prikažemo li mehanički rad za jedinicu mase plina (1 kg) u cilindru, dobivamo:

$$\frac{W_{12}}{m} = w_{12} = \int_1^2 p \frac{dV}{m} = \int_1^2 p dv \equiv \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad [\text{J/kg}] \quad [3.5]$$

Pritom je m masa (kg) plina u sustavu (cilindru).



Slika 3-20 Prikaz određivanja mehaničkog rada promjenom volumena

Površina ispod krivulje **a** (Slika 3-20) upravo je jednaka vrijednosti integrala [3.4], odnosno mehaničkom radu koji je obavio plin povećanjem volumena od V_1 na V_2 , možemo li zanemariti silu trenja što djeluje na stap prigodom pomicanja stapa. Količina mehaničkog rada ovisi, dakle, ne samo o početnom i konačnom stanju nego i o promjenama između tih krajnjih vrijednosti. Uz drukčiju ovisnost promjene tlaka o promjeni volumena, krivulja **b** Slika 3-20, dobili bismo različitu količinu mehaničkog rada. Drugim riječima, $dw = p dv$ nije totalni diferencijal, mehanički rad promjene volumena nije veličina stanja: ovisi ne samo o stanju sustava već i kako je sustav „došao“ u to stanje. Diferencijal mehaničkog rada promjene volumena dw nije totalni diferencijal (morali bismo upotrijebiti drugu oznaku):

$$\int_1^2 dw \neq w_2 - w_1, \text{ nego je } \int_1^2 dw = w_{12}.$$

Uobičajeno rabe se slova δ ili đ . Trebali bismo dakle pisati δw ili $\text{đ}w$. Budući da smo slovo δ već rezervirali, a slovo đ „nespretno izgleda“, slovom d obilježavat ćemo i diferencijale fizikalnih veličina koje nisu veličine stanja, koje, dakle, nemaju svojstvo totalnog diferencijala, znajući, međutim, (nepogrešivo) kada se radi o stanju i kada ne radi o veličini stanja.

(Zbog istog razloga, brzinu ćemo označavati slovom c (\vec{c}) a ne v (\vec{v}), koje smo rezervirali za specifični volumen, itd. Bit će još sličnih nespretnosti: previše je fizikalnih veličina koje ćemo razmatrati, a premalo „pogodnih“ slova kojima ih možemo označiti. No, uvijek ćemo na vrijeme upozoriti na oznake koje smo prihvatili.)

Zašto mehanički rad promjene volumena nije veličina stanja, zašto dw nije totalni diferencijal? Zato jer tlak nije samo funkcija volumena: $p \neq f(v)$. Tlak je funkcija

volumena i temperature: $p = f(v, T)$. Nije li poznat proces ekspanzije (ili kompresije) plina, drugim riječima, nije li poznata krivulja promjene tlaka o promjeni volumena, ako put nije zadan, nije poznata ni druga veličina, temperatura, ne možemo riješiti integral, [3.4] odnosno [3.5], nije nam poznata ovisnost tlaka o volumenu. Tek kad poznajemo proces (put), $p = f(v, T)$, integral je rješiv. S druge strane, unutrašnja je kalorička energija, pokazat ćemo to, funkcija samo temperature, $U[J]$ ili $u[J/kg] = f(T)$, pa je zato unutrašnja je kalorička energija veličina stanja; dU , odnosno du , totalni su diferencijali. Vrijedi dakle:

$$\int_1^2 dU = U_2 - U_1, \text{ odnosno } \int_1^2 du = u_2 - u_1.$$

Ako se promjene stanja događaju, ako se proces odvija uz povećanje volumena (dV , odnosno $dv > 0$), govori se tada o ekspanziji plina pa one teku od 1 prema 2 i mehanički je rad pozitivan, sustav obavlja rad.

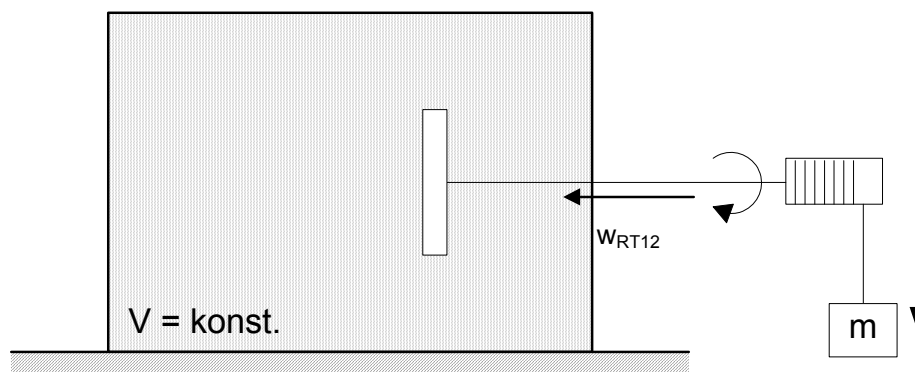
(Na račun kojeg (kojih) oblika energije? Sustav miruje, ne radi se, očito, ni o kinetičkoj ni potencijalnoj energiji.)

Proces se, međutim, može odvijati i uz smanjenje volumena, crtkana strelica Slika 3-20. Tada je $dV < 0$ ($dv < 0$), pa se govori o kompresiji plina, a promjene stanja teku od 2 prema 1. Mehanički je rad negativan, ali se i opet određuje iz integrala [3.5] odnosno [3.4] i proporcionalan je površini ispod krivulje, Slika 3-20. (Jednak je površini, ukoliko možemo zanemariti trenje što se javlja za vrijeme procesa.) Mehanički je rad negativan, dakle, dovodi se u sustav, predaje se sustavu, odnosno sila obavlja mehanički rad na sustavu.

(U koji se oblik energije pretvara mehanički rad miruje li sustav u prostoru?)

Što ako zatvoreni sustav miruje ne mijenjajući svoj položaj u prostoru i ne mijenjajući volumen? Može li i u tom slučaju sustav izmjenjivati energiju (mehanički rad) s okolicom?

Da, djeluje li tangencijalna sila (sila trenja) na sustav. Ilustrirajmo to ovako. Promatrajmo zatvoreni sustav nepomičnih stijenki (kruti spremnik) u kojemu se nalazi plin, Slika 3-21.



Slika 3-21 Dovođenje rada trenja u mirujući zatvoreni sustav rotacijom pločice u plinu

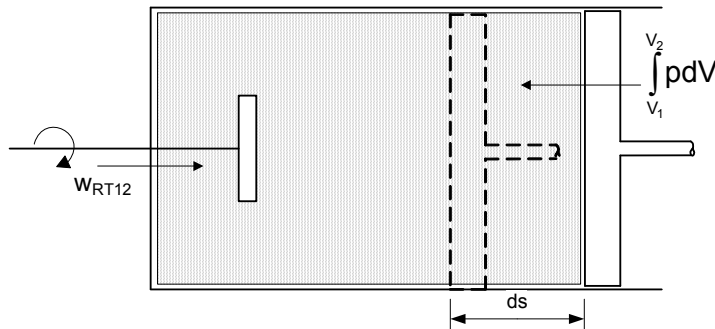
Uvedemo li u spremnik osovinu s pričvršćenom pločicom, koja se okreće, u sustav će se dovoditi mehanički rad (tehnički rad) jer u svakom plinu (fluidu) nastaje trenje među molekulama koje se suprotstavlja okretanju pločice. Da bi se pločica okretala treba svladavati silu trenja na putu okretanja pločice, treba obavljati mehanički rad, mehanički se rad dovodi u sustav. Budući da se volumen sustava ne mijenja, ne pojavljuje se dakle mehanički rad kao posljedica promjene volumena. Takav je mehanički rad nazvan radom trenja jer je posljedica sila trenja.

U mirujućem se zatvoreni sustav prema tome mehanički rad može dovesti kao mehanički rad promjene volumena i/ili kao rad trenja,

Slika 3-22. Ukupno je dovedeni mehanički rad tada jednak njihovom zbroju:

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p dv + w_{RT12} \text{ [J/kg]} \quad [3.6]$$

Tu je w_{RT12} [J/kg] rad trenja pri promjeni stanja od stanja 1 do stanja 2.



Slika 3-22 Dovođenje mehaničkog rada promjene volumena i rada trenja u mirujućem zatvoreni sustav

Giba li se zatvoreni sustav, valja uzeti u obzir i promjenu potencijalne i kinetičke energije sustava:

$$w_{12} = - \int_1^2 \frac{\vec{F}}{m} \cdot d\vec{s} = - [g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2)] + \int_{v_1}^{v_2} p dv + w_{RT12} \text{ [J/kg]} \quad [3.7]$$

Jednadžba [3.7] predstavlja analitički oblik **principa očuvanja energije za mehanički rad zatvorenog sustava** koji se translatorno giba mijenjajući brzinu, volumen i položaj u polju sile teže Zemlje.

Većinom, međutim, kad je riječ o zatvorenim sustavima, kinetička i potencijalna energija ne sudjeluju u energetskim transformacijama. Relacijom je [3.6] stoga najčešće određen ukupni mehanički rad što se dovodi u zatvoreni sustav ili predaje iz njega.

U promatranome primjeru, Slika 3-21, rad je trenja doveden sustavu, pa je, dakle, negativan. Može li rad trenja biti pozitivan? Može li zatvoreni sustav predavati rad trenja u okolicu? Prema 2. glavnom stavku termodinamike, o tome ćemo govoriti, rad

se trenja mirujućem zatvorenom sustavu može samo dovesti: on je stoga uvijek negativan ili je u graničnom slučaju jednak nuli:

$$w_{RT12} \leq 0 \quad [3.8]$$

To potvrđuje i iskustvo: nikada se nije opazilo da bi se pločica uronjena u fluid počela sama od sebe okretati i na taj način predavati mehanički rad iz sustava u okolicu.

Kad je tijekom nekog procesa rad trenja jednak nuli, što odgovara graničnom slučaju relacije [3.8], takav se proces naziva **mehanički povratljivim procesom**. U mehanički povratljivom procesu mehanički je rad točno jednak mehaničkom radu koji je posljedica promjene volumena, pa vrijedi izraz [3.5]:

$$w_{12} = \int_1^2 p dv \equiv \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad [\text{J/kg}] \quad [3.9]$$

Nastaje li, međutim, trenje za vrijeme procesa, mehanički je rad jednak:

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p dv - |w_{RT12}| \quad [\text{J/kg}] \quad [3.10]$$

To je tzv. **mehanički nepovratljivi proces**. Potrebno je u [3.10] računati s apsolutnom vrijednošću rada trenja jer je on uvijek negativan.

Relacije [3.10], odnosno [3.5] ([3.9]), pokazuju da se mehanički povratljivim procesom dobiva maksimalni mehanički rad. Ako plin ekspandira, sustav predaje mehanički rad u okolicu, pa će predana količina rada biti maksimalna ako nema rada trenja, odnosno ako je proces mehanički povratljiv. Nasuprot tome, treba li komprimirati plin, sustav prima mehanički rad iz okolice, pa prvi član u [3.10] ima negativan predznak. Kad nema rada trenja, za kompresiju je potrebna najmanja moguća količina dovedenog mehaničkog rada, a s povećanjem rada trenja raste i količina dovedenog mehaničkog rada. Prema tome, mehanički su povratljivi procesi idealni procesi prema kojima se uspoređuju stvarni mehanički tehnički procesi.

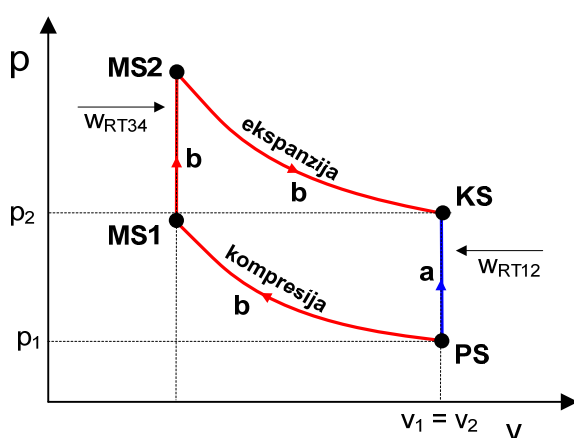
Pokazat ćemo, dovedeni se rad trenja transformira u unutrašnju kaloričku energiju sustava i pohranjuje u sustavu: samo dio se te unutrašnje kaloričke energije može pretvoriti u mehanički rad i predati u okolicu. Na taj se način, posredovanjem pretvorbe u unutrašnju kaloričku energiju, mehanički rad potrošen na svladavanje sile trenja može dijelom vratiti.

3.1.1.2.1 Prvi glavni stavak termodinamike za zatvorene sustave

Ustanovili smo da je u mirujućem zatvorenom sustavu moguće dovesti mehanički rad i kompresijom plina (mehanički rad promjene volumena) i kao rad trenja. Prema principu očuvanja energije tako dovedena energija (mehanički rad) ne može nestati, već se mora akumulirati u sustavu pretvarajući se u neki od oblika energije koji nisu ni kinetička ni potencijalna energija jer sustav miruje. Dolazimo tako do oblika energije koji se naziva **unutrašnja kalorička energija**.

Unutrašnja kalorička energija veličina je stanja sustava. Ona se sastoji, ponovimo, djelomično od kinetičke energije molekula koje se kreću, a djelomično od potencijalne

energije molekula kao posljedice privlačnih i odbojnih sila među njima. Mehanički rad doveden u sustav povećava srednju brzinu gibanja molekula i mijenja njihove srednje razmake, povećava dakle zatečenu količinu akumulirane unutrašnje kaloričke energije sustava. Istaknuli smo, međutim, da ćemo energetske pretvorbe i procese, s kojima ćemo se baviti, osim iznimno, promatrati i mjeriti makroskopski, ne povezujući ih sa strukturom materije. Promatrajući dakle makroskopski, mirujućem se zatvorenom sustavu dovođenjem mehaničkog rada ne mijenja ni kinetička ni potencijalna energija. Kako bismo se ograničili samo na promatranje mehaničkog rada, pretpostavit ćemo da se preko granica sustava može prenijeti energija samo kao mehanički rad (kao mehanički rad promjene volumena i/ili rad trenja). Očito, radi se onda o adijabatskom sustavu. Ako su zadana dva stanja, početno stanje, PS, i konačno stanje, KS, Slika 3-23, određena odgovarajućim tlakovima i volumenima, moguće je na različite načine doći iz početnog u konačno stanje.



Slika 3-23 Promjene stanja u adijabatskom sustavu

Slika 3-23 prikazuje dvije mogućnosti od velikog broja. U prvoj (put **a**) promjena je stanja posljedica dovođenja rada trenja, a u drugoj (put **b**) plin se najprije komprimira (u sustav se dovodi mehanički rad promjene volumena), zatim mu se dovodi rad trenja, da bi konačno ekspanzirao (iz sustava se odvodi mehanički rad promjene volumena) do stanja KS, dakle do istog stanja koje je postignuto promjenom putem **a**. Za oba ta procesa, dakako, vrijedi princip očuvanja energije, pa zaključujemo: ako je zatvoreni adijabatski sustav doveden iz nekog početnog stanja u neko konačno stanje, ukupno dovedeni i ukupno odvedeni mehanički rad ne će se mijenjati bez obzira na proces proveden da bi se došlo iz početnog u konačno stanje. Očito, takav, „adijabatski“, mehanički rad ne ovisi o putu promjene nego samo o početnom i o konačnom stanju, pa je on veličina stanja. Pretvara se u jedan od oblika unutrašnje energije, u unutrašnju kaloričku energiju, koja je stoga isto veličina stanja pa vrijedi relacija:

$$-W_{12\text{adijabatski}} = U_2 - U_1 \text{ [J]}, \text{ odnosno } -w_{12\text{adijabatski}} = u_2 - u_1 \text{ [J/kg]} \quad [3.11]$$

Tu je $W_{12\text{adijabatski}}$ ($w_{12\text{adijabatski}}$) mehanički rad adijabatskog sustava. Dovedeni mehanički rad služi samo za povećanje unutrašnje kaloričke energije, a obavljeni je rad adijabatskog sustava rezultat promjene njegove unutrašnje kaloričke energije.

Ako se dakle promatra neki adijabatski sustav, bit će uvijek zadovoljena relacija [3.11], ali ako sustav nije adijabatski, mehanički rad koji se dovodi u sustav ili odvodi iz sustava ne će biti jednak promjeni unutrašnje kaloričke energije, pa vrijedi:

$$-W_{12} \neq U_2 - U_1 \text{ [J]}, \text{ odnosno } -w_{12} \neq u_2 - u_1 \text{ [J/kg]} \quad [3.12]$$

I doista, takve zaključke potvrđuje iskustvo: u nekim je procesima opaženo da mehanički rad nije dostatan da se protumači promjena unutrašnje kaloričke energije (npr, neelastičan sraz dvaju tijela jednakih masa i jednakih ali suprotnih brzina kada tijela nakon sudara miruju). Budući da i tada (za sve procese) vrijedi princip očuvanja energije, moralo se pretpostaviti da postoji oblik energije različit od mehaničkog rada koji može prijeći granicu neadijabatskog sustava, nevezano uz masu, a koji je posljedica promjene unutrašnje kaloričke energije. Taj je oblik energije toplinska energija definirana relacijom:

$$Q_{12} = U_2 - U_1 + W_{12} \text{ [J]}, \text{ odnosno } q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12} \text{ [J/kg]} \quad [3.13]$$

Na taj je način toplinska energija definirana već poznatim veličinama. Ona je prijelazni oblik energije. Prema [3.13] toplinska je energija pozitivna ako se dovodi sustavu, a negativna kad se odvodi iz sustava, što je u skladu s tumačenjem zašto je upravo suprotno odabrano za predznake mehaničkog rada koji se dovodi u sustav odnosno odvodi iz sustava. Toplinska je energija naime energija, za razliku od mehaničkog rada koji je eksergija. U posebnom se energetskom procesu kojem je podvrgnut sustav, kružnom procesu, dovedena toplinska energija pretvara u unutrašnju kaloričku energiju, koja se zatim razlaže ne eksergiju i anergiju. Eksergija se u obliku mehaničkog rada predaje drugim sustavima, a anergija se u obliku toplinske energije odvodi u okolicu.

(Takav se proces odvija u termoelektrani. Pritom se još mehanički rad (eksergija) u sinkronom generatoru pretvara u električnu energiju (eksergiju).)

Diferencijalni je oblik jednadžbi [3.13]:

$$dQ = dU + dW \text{ [J]}, \text{ odnosno } dq = du + dw \text{ [J/kg]} \quad [3.14]$$

dw (dW), prema rečenome, nije totalni diferencijal (ne radi se o mehaničkom radu adijabatskog sustava), za razliku od du (dU) koji jest totalni diferencijal, pa, dakle, to nije ni dq (dQ):

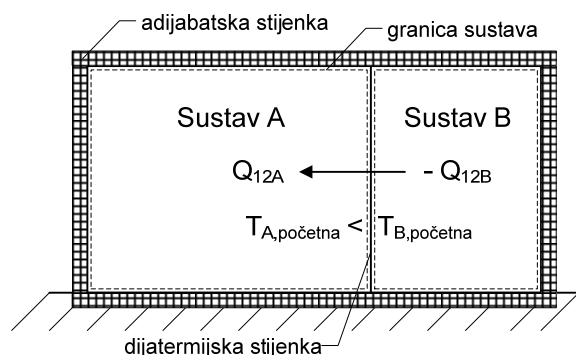
$$\int_1^2 dq \neq q_2 - q_1, \text{ nego je } \int_1^2 dq = q_{12}.$$

Drugim riječima, relaciju [3.14], bismo trebali ovako pisati: $\delta q = du + \delta w$ ili, možda, $\dot{q} = du + \dot{w}$, ili još na koji drugačiji način, što međutim, ponovimo, ne ćemo raditi. Pisat ćemo jednadžbe u obliku [3.14] znajući da toplinska energija i mehanički rad nisu veličine stanja.

Toplinska je energija, više smo puta to ponavljali, prijelazni oblik energije, oblik energije koji prelazi granice sustava spontano, samopoticajno, samoodržavajuće i nezaustavljivo čim postoji razlika između temperatura sustava (samo zbog razlike između temperatura).

Kako to znamo, i što se pritom događa?

Promatramo nepomični adijabatski sustav, krutih stijenki, sastavljen od dva parcijalna sustava A i B, Slika 3-24, odijeljenih međusobno stijenkom koja propušta toplinsku energiju (dijatermijska stijenka) ali ne i masu.



Slika 3-24 Adijabatski sustav sastavljen od dva dijela A i B, odijeljena dijatermijskom stijenkom

Ako dva sustava u stanju 1 imaju različite temperature (npr., temperatura sustava A, $T_{A,početna}$, manja je od temperature sustava B, $T_{B,početna}$, $T_{A,početna} < T_{B,početna}$), nakon određenog vremena ustalit će se stanje 2 u kojem će temperature oba parcijalna sustava biti jednake (izjednačene). (*Temperatura će se sustava početno više temperature snižavati, dok će temperatura sustava početno niže temperature rasti: sve do izjednačenja temperatura: $T_{A,konačna} = T_{B,konačna}$.*) Nakon toga, dokle god je sustav izoliran od okoline, nikakve se promjene više u adijabatskom sustavu (u dva parcijalna sustava) ne će zbivati (temperature se parcijalnih sustava više ne će mijenjati, ostat će konstantne za sve vijeke vjekova): sustav se ponaša kao da je obamro. Kako to znamo? Nikada se do dana današnjeg nije dogodilo da se ne bi dogodilo to što smo upravo opisali. Sve ljudsko (dvijetisućljetno i više) iskustvo upućuje na isto: ako dva tijela (dva sustava) različitih temperatura (različitih toplinskih stanja) dovedemo u međusobnu vezu, temperature (stanja) će im se mijenjati dok se ne smire, tj., dok se ne uspostavi toplinska ravnoteža (jednakost temperatura). Tijela (sustavi) prevedena u toplinsku ravnotežu, a izdvojena od vanjskog utjecaja, ne pokazuju više nikakvih promjena; pojam je toplinske ravnoteže sinonim za pomanjkanje bilo kakvog spontanog zbivanja. To je iskustvo sažeto u dva **ravnotežna postulata**. Prema prvom svako prirodno tijelo, ili svaki sustav prirodnih tijela teži konačnoj toplinskoj ravnoteži (izjednačenju temperatura) iz koje se, kad je jednom ta ravnoteža postignuta, ne može pokrenuti samo od sebe, bez zahvata iz okoline. Prema drugom, ako se za neko tijelo (sustav) C pronašlo da je u toplinskoj ravnoteži s tijelom A i B, onda su, po iskustvu, i tijela A i B u toplinskoj ravnoteži.

(Ovaj se postulat naziva „**nultim stavkom termodinamike**“: /„Nultim“, budući da su nazivi „prvi“ i „drugi“ stavak dani već odavno drugim spoznajama./)

Za dva tijela, kad su u toplinskoj ravnoteži, kažemo da imaju istu temperaturu. Time smo strogo odredili pojam temperature.

Razmotrimo sada što se događa za vrijeme procesa izjednačavanja početno različitih temperatura u adijabatskom sustavu. Za cjelokupan adijabatski sustav vrijedi princip očuvanja energije:

$$Q_{12} = U_2 - U_1 + W_{12}$$

Pritom je, za opisani proces,

$$Q_{12} = 0 \text{ i } W_{12} = 0.$$

Zašto? Q_{12} je jednako nuli jer se radi o adijabatskom sustavu čije su granice neprelazne za toplinsku energiju. (Q_{12} je toplinska energija koja se izmjenjuje između sustava i okolice; ne radi se o toplinskoj energiji koja se, možda, izmjenjuje unutar sustava.) W_{12} je jednak nuli jer se mehanički rad ne izmjenjuje s okolicom: sustav miruje, ne mijenja mu se obujam, ne dovodi rad trenja. Dobivamo:

$$U_2 - U_1 = 0, U_2 = U_1.$$

Zaključujemo: za vrijeme se procesa izjednačavanja temperatura unutar adijabatskog sustava unutrašnja kalorička energija adijabatskog sustava ne mijenja – ostaje konstantnom. No, energija je skalarna veličina: ukupna je unutrašnja kalorička energija adijabatskog sustava na početku procesa (u stanju 1) jednaka zbroju unutrašnjih kaloričkih energija parcijalnih sustava:

$$U_1 = U_{1A} + U_{1B}.$$

Isto vrijedi i za stanje 2 adijabatskog sustava:

$$U_2 = U_{2A} + U_{2B}.$$

Jer je

$U_2 = U_1$, možemo pisati:

$U_{2A} + U_{2B} = U_{1A} + U_{1B}$, odnosno (energija je skalarna veličina):

$$U_{2A} - U_{1A} = U_{1B} - U_{2B} = -(U_{2B} - U_{1B})$$

Dalje, budući da je

$U_{2A} - U_{1A} = Q_{12A}$, a $U_{2B} - U_{1B} = Q_{12B}$, dobivamo:

$$Q_{12A} = -Q_{12B}.$$

Zaključujemo: u adijabatskom sustavu kao cjelini, bez mogućnosti obavljanja mehaničkog rada, toplina (toplinska energija) koju predaje jedan njegov dio jednaka je toplini (toplinskoj energiji) koju preuzima drugi dio sustava. Toplina (toplinska energija) dovedena drugom dijelu služi samo za povećanje unutrašnje kaloričke energije (zbog toga raste temperatura tog dijela adijabatskog sustava), dok se za isti

iznos smanjuje unutrašnja kalorička energija prvog dijela sustava (zbog toga mu se snižava temperatura).

Q_{12A} toplinska je energija koja se dovodi sustavu A (ulazi u sustav A): zato je pozitivnog predznaka. Q_{12B} toplinska je energija koja se odvodi iz sustava B (napušta sustav B): zato je negativnog predznaka.

Kako znamo da vrijede jednakosti:

$$U_{2A} - U_{1A} = Q_{12A}, \text{ a } U_{2B} - U_{1B} = Q_{12B}?$$

Napišemo li princip očuvanja energije za parcijalni sustav A (sada je „parcijalni sustav A“ sustav) dobivamo:

$$Q_{12A} = U_{2A} - U_{1A} + W_{12A}.$$

Jer je $W_{12A} = 0$ (sustav A ne izmjenjuje mehanički rad s okolicom), vrijedi relacija:

$$Q_{12A} = U_{2A} - U_{1A}.$$

Posve isto rasuđivanje vrijedi i za sustav B: $Q_{12B} = U_{2B} - U_{1B} + W_{12B}$. $W_{12B} = 0$.

Koliki je iznos temperature kada dva ili više sustava (tijela) postignu toplinsku ravnotežu?

Da bismo odgovorili na to pitanje promatramo prvo dva kruta tijela masa m_1 i m_2 kg, specifičnih toplina (specifičnog toplinskog kapaciteta) c_1 i c_2 J/kgK, temperatura T_1 i T_2 K ($T_1 > T_2$) i odredimo temperaturu $T_{\text{konačno}} \equiv T_k$ K tijela nakon toplinskog uravnoteženja smatrajući da promatrana tijela formiraju adijabatski sustav.

Istaknimo ponovno, izjednačenje se temperatura između dvaju (ili više) tijela početno različitih temperatura tumači dvjema iskustvenim postavkama. Prema prvoj svako prirodno tijelo teži konačnoj toplinskoj ravnoteži odnosno nastoji postići toplinsku ravnotežu s tijelom niže ili više temperature. Kad se ta ravnoteža postigne stanje se bez vanjskog utjecaja ne može vratiti na početno. Prema drugoj postavci dva su tijela u toplinskoj ravnoteži ako je svako od njih posebno u ravnoteži s nekim trećim tijelom. (Nulti glavni stavak termodinamike.) Dva ili više tijela u toplinskoj su ravnoteži kada imaju istu temperaturu.

Sva su ta razmatranja nužna da se pojam izjednačenja temperature ne bi shvatio pogrešno: dva (ili više) tijela u međusobnoj težnji prema toplinskom uravnoteženju mijenjaju, doduše, pri tome svoju temperaturu, no nužno je naglasiti da je ovdje izjednačenje temperatura samo vanjsko obilježje toplinskog uravnoteženja. Dokaž je tome činjenica da konačna temperatura nije aritmetička sredina početnih temperatura tijela nego ona temperatura pri kojoj toplinska energija „oduzeta“ jednom tijelu (što prelazi s jednog tijela) postaje jednaka toplinskoj energiji koju je drugo tijelo primilo. Za izjednačenje temperatura, odnosno toplinsko uravnoteženje, uz pretpostavku da nema izmjene toplinske energije s okolicom (adijabatski sustav), vrijedi dakle:

$$|Q_{12}| = |Q_{21}| \quad (Q_{12} < 0, Q_{21} > 0)$$

gdje je Q_{12} toplinska energija koju je prvo tijelo predalo, a Q_{21} toplinska energija koju je drugo tijelo primilo. Pri tome će prvo tijelo predati

$$Q_{12} = m_1 c_1 (T_k - T_1) < 0, \text{ a drugo tijelo primiti}$$

$$Q_{21} = m_2 c_2 (T_k - T_2) > 0. (T_1 > T_2, T_1 > T_k, T_k > T_2)$$

Došavši do tih spoznaja određujemo temperaturu dvaju krutih tijela nakon toplinskog uravnoteženja:

$$|Q_{12}| = |Q_{21}| \Rightarrow m_1 c_1 (T_1 - T_k) = m_2 c_2 (T_k - T_2) \text{ i } T_k = \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}.$$

Ako je $m_2 = m_{okolice} \approx \infty$, dijeljenjem s $m_2 c_2$ i uzimanjem limesa kad m_2 teži prema beskonačnom dobivamo da je temperatura izjednačenja jednaka temperaturi okolice ($T_2 = T_{ok}$):

$$T_k = \lim_{m_2 \rightarrow \infty} \frac{\frac{m_1 c_1}{m_2 c_2} T_1 + T_2}{\frac{m_1 c_1}{m_2 c_2} + 1} = T_2$$

Temperaturu smjese više tijela (krutih ili kapljevitih, $c_v = c_p = c$) nakon toplinskog uravnoteženja možemo odrediti preko razmatranja unutrašnjih kaloričkih energija sastojaka smjese.

Iz 1. glavnog stavka termodinamike

$$Q_{12} = U_2 - U_1 + W_{12}$$

dobivamo da je izmijenjena toplinska energija jednaka razlici unutrašnjih kaloričkih energija

$$Q_{12} = U_2 - U_1$$

jer rad predan u okolicu (rad potiskivanja okolice zbog (moguće) promjene volumena smjese za vrijeme postizanja toplinskog uravnoteženja) možemo zanemariti

$$W_{12} = p_{ok}(V_2 - V_1) \approx 0.$$

Zanemarimo li oblađivanje smjese (smjesa se nalazi u adijabatskom sustavu) to sva izmijenjena toplinska energija ostaje unutar smjese, pa možemo napisati da je zbroj unutrašnjih kaloričkih energija sudionika u smjesi jednak unutrašnjoj kaloričkoj energiji smjese budući da je (to ćemo kasnije pokazati) unutrašnja kalorička energija (idealne tvari) funkcija jedino temperature:

$$m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2 + \dots + m_n c_n T_n = T_k (m_1 c_1 + m_2 c_2 + \dots + m_n c_n) \Rightarrow T_k$$

Radi li se pak o tvarima (plinovima) koje prigodom postizanja toplinske ravnoteže bitno mijenjaju volumen, temperaturu izjednačenja određujemo preko izjednačavanja toplinske energije i razlike entalpija budući da u slučaju odvijanja procesa pri konstantnom tlaku, npr. tlaku okolice, vrijedi, kao što ćemo pokazati:

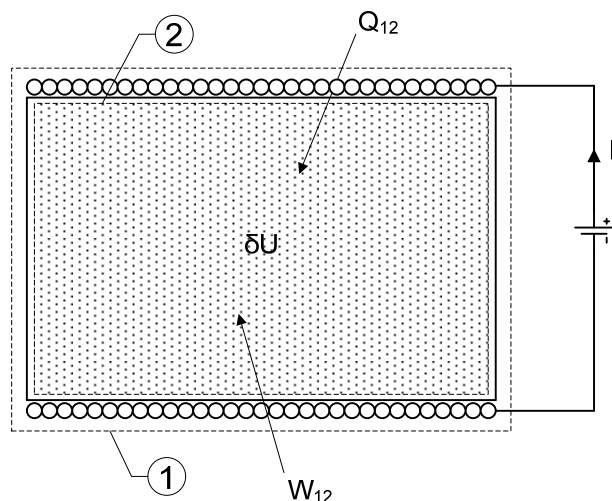
$$Q_{12} = H_2 - H_1 = c_p \delta T.$$

Kako je i entalpija funkcija samo temperature (idealnih tvari), dobivamo (zbroj je entalpija sudionika u smjesi jednak entalpiji smjese):

$$m_1 c_{p1} T_1 + m_2 c_{p2} T_2 + \dots + m_n c_{pn} T_n = T_k (m_1 c_{p1} + m_2 c_{p2} + \dots + m_n c_{pn}) \Rightarrow T_k$$

(c_{pi} je specifična toplina pri konstantnom tlaku plina „i“)

Toplinska je energija dakle energija koja prelazi granice između dva sustava samo zbog razlike njihovih temperatura. Toplinska energija nije svojstvo sustava: toplinska energija nije akumulirana u sustavu. Toplinska energija nije „ono“ što neminovno (neizbježno, nužno) uzrokuje porast temperature (može, no ne mora): za vrijeme se izotermnih procesa dovode (ili odvođe) goleme količine toplinske energije, a temperatura se ne mijenja, nije „ono“ što je uvijek nazočno kad raste (kad se mijenja) temperatura. (Zamislamo adijabatski sustav u kome izgara gorivo. Toplinska energija ne prelazi granicu sustava, u sustavu svejedno raste temperatura.) Poput mehaničkog rada, toplinska je energija prijelazni oblik energije: postoji samo u vremenu trajanja međudjelovanja između sustava. Poput mehaničkog rada, ona je događanje, ne materija. Svojom su prirodom toplinska energija i mehanički rad slični razgovoru: mada posljedice razgovora mogu trajati vječno, razgovor prestaje sa zadnjom izgovorenom riječi. Uvjerimo se u rečeno na primjeru događanja sa slike 3.25. Na kruti je spremnik namotana otporna žica protjecana strujom koja zagrijava masu (nebitno je agregatno stanje mase) u spremniku. Odgovorimo na pitanje: koji oblik energije prelazi granicu sustava?



Slika 3-25 Spremnik krutih stijenki zagrijavan električnom energijom

Odgovor ovisi o izboru sustava. (Očito, izbor sustava može (bitno) pojednostaviti rješenje problema).

Odaberemo li sustav tako da sadrži spremnik i žicu (granica 1), mehanički se rad dovodi u sustav. Sadrži li sustav samo spremnik (granica 2) toplinska se energija dovodi u spremnik. Zaključujemo: mehanički rad i toplinska energija jednom kada prijeđu granicu sustava pretvaraju se u unutrašnju kaloričku energiju i nije ih moguće više razlikovati:

$$Q_{12} - W_{12} = U_2 - U_1 \text{ [J]}, \text{ odnosno } q_{12} - w_{12} = u_2 - u_1 \text{ [J/kg]}.$$

Mehanički je rad što se predaje sustavu rad trenja. Naime, električna se energija pomoću otpornika (otporne žice) pretvara u rad trenja, ovaj u unutrašnju kaloričku energiju otpornika, koja se pak

pretvara u toplinsku energiju. Toplinska energija prelazi kroz stijenke spremnika na masu u spremniku pretvarajući se u unutrašnju kaloričku energiju zbog čega raste temperatura mase u spremniku.

Relacija

$$q_{12} - w_{12} = u_2 - u_1 \text{ [J/kg]} \quad [3.15]$$

analitički je oblik principa očuvanja energije za zatvoreni sustav. Naziva se **prvim glavnim stavkom termodinamike za zatvoreni sustav**.

Uzevši u obzir podjelu mehaničkog rada na rad zbog promjene volumena i na rad trenja, prvi glavni stavak termodinamike za zatvoreni sustav možemo i ovako izraziti:

$$q_{12} - \int_{v_1}^{v_2} p dv + |w_{RT12}| = u_2 - u_1 \text{ [J/kg]} \quad [3.16]$$

Pritom je nebitno miruje li ili se giba zatvoreni sustav. Naime, giba li se, s promjenom brzine \mathbf{c} i s promjenom položaja \mathbf{z} mijenja se kinetička, odnosno potencijalna energija sustava. Uzevši još u obzir i unutrašnju kaloričku energiju, ukupna akumulirana energija u sustavu bit će:

$$e_{ak} = u + \frac{1}{2} c^2 + gz \text{ [J/kg]} \quad [3.17]$$

Promjenom stanja sustava mijenja se i akumulirana energija, a njezina se razlika pojavljuje, na prelasku granice sustava, kao toplinska energija i kao mehanički rad pa je

$$\begin{aligned} q_{12} - \int_{v_1}^{v_2} p dv + |w_{RT12}| + g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) \\ = (u_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + gz_2) - (u_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + gz_1) \end{aligned} \quad [3.18]$$

što odgovara relaciji [3.15] odnosno [3.16].

Zašto su, fizikalno gledano, izrazi [3.18] i [3.15] odnosno [3.16] istovjetni?

Kinetička je energija, kao i potencijalna, akumulirana na razini sustava (kao cjelini), eksergija. Ubrzava li se sustav, ili mijenja li mu se položaj djelovanjem sile (izmjennom mehaničkog rada) to nije u svezi s toplinskom energijom: toplinska se energija ne pretvara u kinetičku i potencijalnu energiju sustava. (*Primjerice, dovodenjem toplinske energije u sustav ne može se podići sustav u polju sile teže Zemlje.*)

Tri su oblika energije dakle osnova prvog glavnog stavka termodinamike za zatvorene sustave. Toplinskom energijom i mehaničkim radom nazvani su oblici energije pri prijelazu granica sustava (prijelazni oblici energije). Kad su toplinska energija i mehanički rad prešli granicu sustava i kad su dovedeni u sustav, više ih nema smisla

(niti se mogu) razlikovati jer su postali unutrašnja kalorička energija sustava. Pogrešno je stoga govoriti o sadržaju toplinske energije ili mehaničkog rada u nekom sustavu jer se unutrašnja kalorička energija ne može podijeliti na toplinsku energiju i mehanički rad.

Primijenimo sada princip očuvanja energije, odnosno prvi glavni stavak termodinamike, na termoelektanu. Termoelektana je zatvoreni sustav (odnosno fluid u termoelektani smatramo i promatramo kao zatvoreni sustav) podvrgnut **kružnom procesu**.

Što je kružni proces, odnosno o kružnim procesima detaljno ćemo govoriti. Zasad kađimo samo ovo: kružni je proces svaki onaj koji sustav ponovno dovodi u početno stanje. U slučaju kružnog procesa koji se provodi u termoelektani, 1 kg vode, koji smatramo sustavom (zatvorenim sustavom, ne mijenja mu se masa), uvodi se u parni kotao, zagrijava, isparuje, para se odvodi u parnu turbinu, eksergija se pare pretvara u mehanički rad, kilogramu se pare u kondenzatoru odvodi toplinska energija (anergija), para se kondenzira, da bi se konačno taj isti kilogram vode pumpom, koja mu povišuje tlak na tlak u parnom kotlu, vratio u parni kotao: krug je zatvoren, obavljen je kružni proces. Očito, kilogram vode sumarno ne pretrpljuje nikakvu promjenu: vraćen je u početno stanje, na istu temperaturu i tlak. Bio je samo posrednik (medij) u energetske procesima koji su se odvijali na njegovom (kružnom) putu (često se zato naziva djelatnim medijem ili djelatnom tvari): preuzeo je energiju u parnom kotlu i pobranio je (unutrašnja kalorička energija, rad strujanja, kinetička i potencijalna energija), prenosio je parnim cjevovodom do parne turbine, bio zatim posrednik u njezinoj pretvorbi u parnoj turbini da bi je konačno predao u parnoj turbini (mehanički rad / eksergija /) i kondenzatoru (toplinska energija / anergija /).

Stoga, prema [3.15], dobivamo:

$$Q_{12} = W_{12} \text{ [J]}, \text{ odnosno } q_{12} = w_{12} \text{ [J/kg]} \quad [3.19]$$

Očito, $u_2 - u_1 = \delta u = 0$ ($u_2 = u_1$, sustav se vratio u početno stanje), promjena je unutrašnje kaloričke energije sustava podvrgnutog kružnom procesu jednaka nuli. To ćemo kasnije analitički dokazati, no, fizikalna je slika jasna: unutrašnja je kalorička energija veličina stanja, veličina koja ovisi o stanju a ne o tome kako je sustav postignuo promatrano stanje; na kraju je kružnog procesa temperatura sustava (jednog kilograma vode), tlak, specifični volumen, brzina itd. ista (isti) kao na početku procesa pa zaključujemo da je i unutrašnja kalorička energija sustava ostala ista. Jednadžba je [3.19] zapravo izvorni oblik (izvorna formulacija) 1. glavnog stavka termodinamike koji je postavljen na temeljima razmatranja kružnih procesa i iskustava s njima:

„Za zatvoreni je sustav podvrgnut kružnom procesu rad (mehanički rad) predan u okolicu proporcionalan toplini (toplinskoj energiji) preuzetoj iz okoline.“

Za promjenu stanja sustava ovaj stavak ima korolar (posljedak) koji pokazuje da je promjena unutrašnje kaloričke energije zatvorenog sustava jednaka razlici ukupno dovedene toplinske energije i ukupno obavljenog mehaničkog rada:

$$U_{\text{konačno}} - U_{\text{početno}} = Q_{\text{ukupno}} - W_{\text{ukupno}} \text{ [J]}, \text{ odnosno } u_{\text{konačno}} - u_{\text{početno}} = q_{\text{ukupno}} - w_{\text{ukupno}} \text{ [J/kg]}.$$

Što to znači? Sasvim općenito, za vrijeme se nekog procesa (za vrijeme pojedinačnih dijelova procesa) toplinska energija može dovoditi i odvoditi što vrijedi i za mehanički rad. (U slučaju kružnog procesa to je neminovno, pokazat ćemo; u protivnom kružni se proces ne bi mogao odvijati). Jer je energija skalarna veličina, očito će ukupno izmijenjena toplinska energija za vrijeme procesa biti jednaka razlici između ukupno dovedene i ukupno odvedene toplinske energije. (Za vrijeme se pojedinih dijelova procesa toplinska energija može dovoditi ili odvoditi, odnosno, niti dovoditi niti odvoditi. Isto vrijedi i za mehanički rad.) Pritom se uvažavaju dogovorene vrijednosti: toplinska je energija dovedena u sustav pozitivna veličina, odvedena negativna. (Suprotno vrijedi za mehanički rad.) Drugim riječima vrijedi ovo: q_{12} , odnosno w_{12} , u jednadžbi su [3.19] jednaki:

$$q_{12} = q_{\text{dov}} + q_{\text{odv}}, \text{ a } w_{12} = w_{\text{turbine}} + w_{\text{pumpe}} \quad [3.20]$$

q_{dov} je ukupno dovedena toplinska energija jednom kilogramu vode za vrijeme jednog ciklusa kružnog procesa (1 kg pare izlazi iz parnog kotla, 1 kg vode vraća se u parni kotao). U procesu u termoelektrani toplinska se energija sustavu (1 kg vode /pare/) dovodi samo u parnom kotlu. Iznos je te toplinske energije pozitivan.

q_{odv} je ukupno odvedena toplinska energija jednom kilogramu vode za vrijeme jednog ciklusa kružnog procesa. To je toplinska energija odvedena 1 kg pare u kondenzatoru. Iznos je te toplinske energije negativan. Da se to naglasi, uzima se njena apsolutna vrijednost koja se odbija od dovedene toplinske energije, [3.21].

w_{turbine} je mehanički rad predan u okolicu (sinkronom generatoru). Zato je $w_{\text{turbine}} > 0$.

w_{pumpe} je mehanički rad doveden u sustav (za pogon pojne pumpe koja kondenzat /vodu iz kondenzatora/ vraća u parni kotao). Zato je $w_{\text{pumpe}} < 0$, [3.21]

$$q_{\text{dov}} - |q_{\text{odv}}| = w_{\text{turbine}} - |w_{\text{pumpe}}| \quad [3.21]$$

Mehanički rad potreban za pogon pumpe, ubacivanje 1 kg kondenzata u parni kotao s tlaka u kondenzatoru na tlak u parnom kotlu, mnogo je manji od mehaničkog rada što se dobiva na osovini turbine, pa se zanemaruje u jednadžbi [3.21]. Mehanički je rad dakle, koji se proizvodi (mehanički je rad eksergija pa se proizvodi) u kružnom procesu termoelektrane, i zatim transformira u električnu energiju, jednak razlici količine toplinske energije koja se dovodi vodi (pari) u parnom kotlu i toplinske energije (anergije) koja se u kondenzatoru odvodi u okolicu:

$$w_{\text{turbine}} = q_{\text{dov}} - |q_{\text{odv}}| \text{ [J/kg]} \quad [3.22]$$

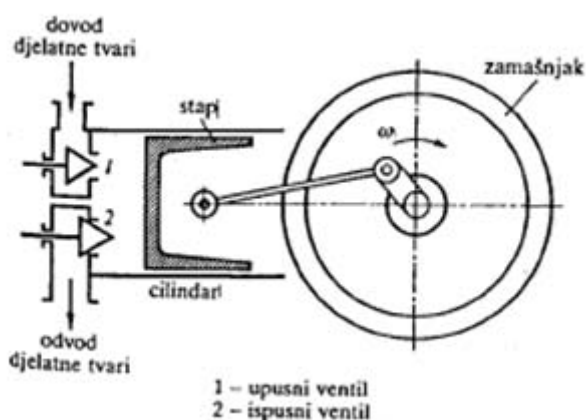
Dobivamo tako odgovor na pitanje što se događa s energijom u termoelektrani. Na pitanje međutim koliki su iznosi dovedene i odvedene toplinske energije, o čemu ovisi, odnosno koliki je mehanički rad dobiven na osovini parne turbine, koliki je mehanički rad utrošen na pumpanje i sl., ne znamo (ne možemo) odgovoriti: 1. glavni stavak termodinamike za zatvorene sustave ne omogućuje odgovore.

Da bismo odgovorili na ta pitanja valja uočiti da termoelektranu možemo promatrati kao sklop otvorenih sustava.

3.1.2 Termoelektrana kao sklop otvorenih sustava

U zatvorenom se sustavu ekspanzija plina (vodene pare) može samo jednom upotrijebiti za dobivanje mehaničkog rada (eksergije). Plin se prije ekspanzije nalazio u cilindru, Slika 3-20, u kojem ostaje i nakon ekspanzije. Na taj je način iscrpljena njegova uporabljivost, a i uporabljivost uređaja i stroja. Takav postupak, dakako, za praksu nije prihvatljiv jer se uređaji i strojevi ne grade za jednokratno iskorištavanje. Zbog toga se stroj mora stalno puniti plinom ili vodenom parom početnog stanja, ali se iz njega plin (vodena para) i istiskuje nakon ekspanzije (predavanja mehaničkog rada promjene volumena). Na taj se način dolazi do otvorenih sustava. Plin ili para koja se dovodi i odvodi iz sustava naziva se **djelatnom tvari (djelatnim medijem)**.

Primjer je otvorenog sustava stapni parni stroj, Slika 3-26.



Slika 3-26 Shema otvorenog sustava (stapnog parnog stroja)

*Stapni stroj radi periodički. Stap je pokretni dio stroja na koji se prenosi mehanički rad promjene volumena djelatne tvari. Kroz **upusni** se **ventil** (**ispusni** je **ventil** zatvoren) određena količina djelatne tvari, u kojoj je pohranjena unutrašnja kalorička energija, utiskuje u cilindar, upusni se ventil zatim zatvara, a djelatna tvar ekspanzira obavljajući rad. Nakon ekspanzije otvara se, do tog trenutka zatvoreni, **ispusni ventil** kroz koji se djelatna tvar istiskuje iz cilindra. Postupak se zatim ponavlja otvaranjem upusnog ventila. Zamašnjak, postavljen na osovini stroja, osigurava da se ona jednoliko kreće. Svejedno, pokretni su dijelovi stapnog stroja izloženi velikim naprezanjima zbog promjene smjera kretanja te usporavanja i ubrzavanja koja se vrlo brzo smjenjuju. Takve promjene skraćuju i ograničuju vijek trajanja stapnih strojeva.*

Otvoreni su sustavi sustavi čije su granice prolazne kako za energiju tako i za masu. Očito, bezbrojni su primjeri neživih, tehničkih otvorenih sustava. No, otvoreni su sustavi i živa bića, dijelovi živih bića. Razumljivo je stoga da su i procesi s otvorenim sustavima (izmjene energije i mase) najrazličitiji. Od sve te raznolikosti mi ćemo se na početku ograničiti samo na razmatranje posebnih, specijalnih procesa: **jednodimenzionalnih, stacionarnih, strujnih procesa**. Zašto? Bit će uskoro jasno. Odgovorimo prvo na pitanje što je **jednodimenzionalni, stacionarni, strujni proces**?

„Strujni procesi“ otvorenih sustava energetski su procesi koji uključuju fluid kao djelatnu tvar što prelazi granice sustava. (Granicu sustava može prelaziti i kruta (čvrsta) tvar.)

Što je fluid, o tome ćemo kasnije (u trećem svesku) detaljno govoriti. Zasad kažimo ovo: fluid „voli“ teći, deformirati se, strujati (treba ga ograničiti da to ne čini); otud i naziv „strujni procesi“. I najmanje količine fluida sadrže toliko molekula da je nerealističan pokušaj opisivati strujanje (gibanje, kretanje) fluida (osim u posebnim slučajevima) razmatrajući gibanje pojedine molekule. *(Trebalo bi, naime, promatrati gibanje svake pojedine molekule, budući da se molekule fluida, za razliku od molekula čvrste tvari, gibaju jedna u odnosu na drugu, druge.)*

Umjesto toga primjenjuje se *hipoteza kontinuuma* i smatra da je fluid izgrađen od „**čestica fluida**“, konstantne mase, koje međudjeluju međusobno i sa svojom okolicom.

Svaka čestica fluida sadrži golemo mnoštvo molekula tako da kada kažemo da je u nekoj točki prostora (u infinitezimalnom volumenu što ga zauzima čestica fluida) brzina, gustoća, tlak itd., ta i ta, naznačujemo stvarno samo kolika je srednja brzina molekula, koliki je srednji tlak, srednja temperatura, srednja gustoća itd. u infinitezimalnom volumenu koji okružuje tu (geometrijsku) točku. Nadalje pretpostavljamo da između čestica fluida nema praznog prostora (što nije slučaj s molekulama fluida), čime impliciramo da se sva svojstva fluida kontinuirano mijenjaju kroz fluid, tj., postupamo s fluidom kao kontinuumom. (Promatran tako fluid je neprekidni sustav beskonačnog broja materijalnih čestica /čestica fluida/.) Drugim riječima, ne uzimamo u obzir (stvarnu) diskretnu, atomsku (molekularnu) strukturu tvari, već uvodimo pojam neprekidne sredine ili kontinuuma. /Razlog je pragmatički: takav pristup omogućuje služenje s infinitezimalnim računom u našim matematičkim modelima./)

Na taj način možemo opisati onda strujanje fluida opisujući gibanje čestica fluida poznavajući njihovu brzinu i akceleraciju (ubrzanje). U svakom trenutku vrijednost bilo kojeg svojstva fluida (gustoća, tlak, temperatura, brzina, akceleracija, ...) može biti određena kao funkcija položaja fluida (čestice fluida) i vremena. Npr., da bismo odredili temperaturu u pojedinim točkama u sobi, moramo poznavati funkciju $T=T(x,y,z,t)$, služimo li se pravokutnim Kartezijevim koordinatnim sustavom, po cijelom prostoru (volumenu) sobe (od poda do stropa, od zida do zida) u bilo kojem trenutku dana ili noći. (Temperatura je zraka u sobi naime, sasvim općenito, i funkcija vremena: mijenja se s protokom vremena.) Temperatura je skalarna veličina, poput energije, mase, mehaničkog rada, što znači da je potpuno određena realnim brojevima. Za razliku od tih veličina, za čiju je potpunu karakterizaciju dostatan samo mjerni broj (njihova brojna vrijednost), postoje i veličine za koje je za potpunu karakterizaciju nužno znati još i smjer djelovanja, a ponekad i smjer vrtnje. Takve veličine zovemo vektorima (sila, brzina, ubrzanje, kutna brzina, kutno ubrzanje, električno i magnetsko polje, ...).

(Naprezanje je u fluidu pak tenzor drugog reda. Zašto, objasniti ćemo kasnije.)

Koji je proces „**jednodimenzionalni**“?

Promatramo strujanje fluida. Ono je, u općem slučaju, poprilično kompliciran trodimenzionalni, vremenski ovisan proces. Npr., promatramo brzinu čestice fluida; ona ovisi o položaju čestice u nekom polju sila i o vremenu:

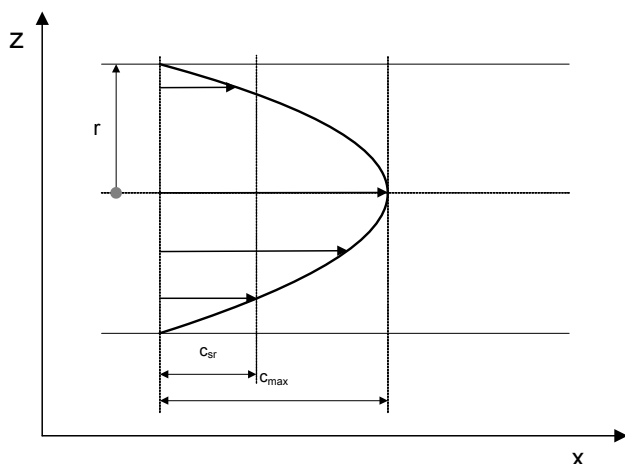
$$\vec{c} = c_x(x,y,z,t) \vec{i} + c_y(x,y,z,t) \vec{j} + c_z(x,y,z,t) \vec{k} = \vec{c}(\vec{r}, t).$$

U posebnim slučajevima međutim (strujanje fluida kroz cijevi, turbine, kompresore, pumpe, sapnice, kotlove, kondenzatore itd.), dopustiva su pojednostavljenja koja olakšavaju razumijevanja zbivanja s fluidom a da se pritom ne smanjuje potrebna

točnost proračuna. Jedno je od takvih pojednostavljenja aproksimiranje realnog trodimenzionalnog strujanja fluida sa strujanjem u jednoj dimenziji (zanemaruju se ovisnosti o druge dvije dimenzije):

$$\vec{c} = c_x(x,t) \vec{i}.$$

Govorimo tada o **jednodimenzionalnom** procesu što znači da su sve fizikalne veličine funkcija samo jedne dimenzije, pravca strujanja (ovise samo o, npr., koordinati x): po čitavom presjeku (ravnini) okomitom na smjer strujanja fluida (djelatne tvari), u svakoj točki presjeka, vrijednosti su promatrane fizikalne veličine (brzine, akceleracije, gustoće, tlaka, temperature itd.) jednake. Time bitno pojednostavnjujemo matematičke modele. Primjerice, promatrajmo dvodimenzionalno strujanje fluida kroz cijev, što je poseban slučaj realnog, trodimenzionalnog strujanja.



Slika 3-27 Laminarno strujanje fluida u ravnoj cijevi: profil brzina u presjeku cijevi

Trebali bismo računati s ovakvom funkcijom brzine:

$$\vec{c} = c_x(x,z,t) \vec{i} + c_z(x,z,t) \vec{k}.$$

Pojednostavnjujemo pristup aproksimirajući dvodimenzionalno strujanje s jednodimenzionalnim:

$$\vec{c}_{srednja} = c_x(x,t) \vec{i}$$

gdje je $\vec{c}_{srednja}$ brzina koja je jednaka sada po cijelom presjeku okomitom na smjer strujanja fluida.

($\vec{c}_{srednja}$ je određena tako da je količina fluida što u jedinici vremena prostruji kroz promatrani presjek s tom brzinom jednaka količini fluida u dvodimenzionalnom strujanju.)

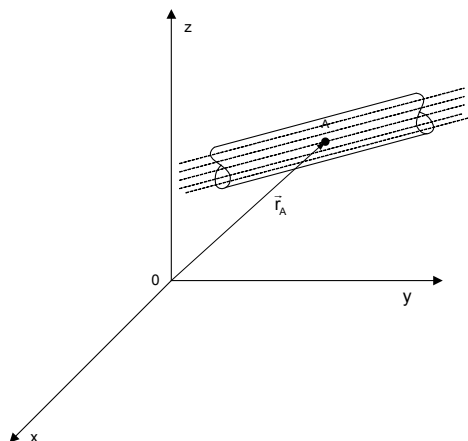
Što znači „stacionarni proces“?

Niti jedna fizikalna veličina nije funkcija vremena:

$$\frac{\partial(T, \rho, u, v, p, \vec{F}, \vec{c}, m\vec{c}, \vec{a}, \dots)}{\partial t} = 0,$$

ovise samo o položaju promatrane čestice fluida.

No, to se ne smije bukvalno shvatiti. Ne radi se o tome da su vrijednosti svojstava fluida konstantne, nepromjenjive u vremenu, nego da se u promatranoj fiksnoj točki u prostoru strujanja fluida ne mijenjaju. Strujanje je fluida predstavljeno strujanjem beskonačnog niza materijalnih točaka (čestica fluida), Slika 3-28.



Slika 3-28 Stacionarno strujanje fluida

Svaka čestica fluida koja smjenjuje prethodnu u točki A, određenoj radijvektorom \vec{r}_A , ima istu brzinu, akceleraciju, količinu gibanja, na nju djeluje ista sila itd., kao ona ispred nje, odnosno, sve iduće (bezbrojne) čestice fluida imat će u promatranoj točki prostora ista svojstva kao čestice ispred njih što znači da se svojstva fluida u promatranoj točki ne mijenjaju s vremenom. S pomakom iz točke A čestici se može promijeniti brzina, akceleracija itd. To ujedno znači i da je količina mase (djelatne tvari) dovedene u otvoreni sustav, u kojem se odvija stacionarni proces, u jedinici vremena konstantna, da se količina mase u otvorenom sustavu ne mijenja, te da, posljedično, u slučaju stacionarnog procesa otvorenog sustava vrijedi: koliko mase u jedinici vremena ulazi (ustrujava) u otvoreni sustav, isto toliko mase mora istodobno izlaziti (istrujavati) iz otvorenog sustava. Prema tome ta je masa poznata, naziva se **masenim protokom**, jer se radi o količini mase u jedinici vremena [kg/s].

Mehanički rad predan iz otvorenog sustava (odnosno doveden u otvoreni sustav) naziva se **tehničkim radom** ili **radom na osovini** (W_{t12} [J] odnosno w_{t12} [J/kg]) jer se pojavljuje na osovini turbostroja (parna ili plinska turbina, pumpa,...) odnosno na osovini stapnog (parnog) stroja.

(U turbinama mlaz pare struji preko lopatica djelujući na njih, okreće ih i na taj način predaje mehanički rad, koji je posljedica strujanja djelatne tvari, na osovini parne turbine.)

Tehnički rad otvorenog sustava, pokazat ćemo to, nije identičan s mehaničkim radom promjene volumena zatvorenog sustava.

Kako odrediti tehnički rad različitih otvorenih sustava (stapnih strojeva i turbostrojeva)?

Primjenom principa očuvanja mase i energije.

3.1.2.1 Princip očuvanja mase za otvoreni sustav

Princip očuvanja mase vrijedi dakako nepromijenjeno i za otvoreni sustav: „***masa ne može nestati, niti ni iz čega nastati, samo se njezin sastav može mijenjati iz jednog oblika u drugi***“, jer na princip ne utječe sustav koji je podvrgnut nekom energetsom procesu (u kojem se odvija neki energetski proces). Ono što se mijenja matematički je (analitički) oblik principa. Budući da kroz granice otvorenog sustava masa ulazi i izlazi, budući da se može akumulirati u otvorenom sustavu, a jer je nestvoriva i neuništiva, to princip očuvanja mase možemo ovako formulirati:

**masa što uđe u otvoreni sustav minus masa što izađe iz otvorenog sustava
mora biti jednaka masi što se akumulira u otvorenom sustavu.**

Uobičajeno, međutim, analitički se oblik principa očuvanja mase za otvoreni sustav izražava na temelju drukčije formulacije, dogovorene formulacije, koja prati što se događa s veličinama stanja za vrijeme nekog energetskog procesa:

**konačna vrijednost neke veličine stanja minus početna vrijednost te veličine
jednaka je njenoj promjeni.**

Drugim riječima, za otvoreni sustav vrijedi:

**[masa što je izašla iz otvorenog sustava] – [masa što je ušla u otvoreni sustav]
= - [masa što se akumulira u otvorenom sustavu].**

Pogledajmo zadovoljava li ovakva formulacija princip očuvanja mase.

Uđe li više mase u otvoreni sustav, nego što izađe, povećava se količina mase u otvorenom sustavu. To će biti moguće jedino ako se povećava obujam otvorenog sustava ili/i gustoća mase u otvorenom sustavu. U tom je slučaju lijeva strana formulacije negativna vrijednost što zadovoljava princip očuvanja mase: zbog minusa na desnoj strani i desna je negativna jer je veličina „masa što se akumulira u otvorenom sustavu“ pozitivna (povećava se količina mase u otvorenom sustavu). Obrnuto vrijedi izađe li više mase nego što uđe (to se može dogoditi jedino smanjuje li se količina mase akumulirane u otvorenom sustavu): lijeva je strana formulacije pozitivna, a to je i desna zbog minusa: sada je „masa što se akumulira u otvorenom sustavu“ negativna vrijednost (ta se masa odvodi iz otvorenog sustava, za iznos se te mase smanjuje količina mase akumulirane u otvorenom sustavu; zato je njezina vrijednost negativna). Konačno, izađe li masa količinski jednaka ušloj u otvoreni sustav, lijeva je strana formulacije jednaka nuli, a to je i desna: ništa se (nove) mase nije akumuliralo u otvorenom sustavu, količina je mase akumulirane u otvorenom sustavu ostala ista, proces je izmjene mase **stacionarni**. Prema tome, matematički iskazan princip očuvanja mase za otvoreni sustav (analitički oblik) glasi:

$$\oint_{KP} \rho \cdot \vec{c}_r \cdot d\vec{A} = - \frac{d}{dt} \iiint_{KV} \rho dV \quad [\text{kg/s}] \quad [3.23]$$

Zašto? Što znače pojedini članovi u tom izrazu? Čemu dvostruki i trostruki integral? Zašto derivacija po vremenu?

Relaciju ćemo [3.23] izvesti i detaljno protumačiti kasnije, na višoj godini studija. Za sada, budući da razmatramo jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese,

protumačimo samo njezinu „fizičnost“. Naglasili smo, promatramo energetske pretvorbe i procese u kojima je masa (tvar) posrednik (masa se pritom ne mijenja). Ona preuzima energiju iz okoline (drugih sustava), pohranjuje je, prenosi, pretvara i predaje u okolicu (drugim sustavima). Ta je masa u agregatnom stanju koje omogućuje gibanje, kretanje, strujanje (masa mora prenositi energiju) uz što manji utrošak energije (mehaničkog rada): ona je fluidnom agregatnom stanju (kapljevina i/ili plin). U tehničkom iskorištavanju energije (energetskih procesa) pretvorbe se i uporaba energije odvijaju u tehničkim sustavima. Jedna se vrsta takvih sustava naziva otvorenim sustavima. U matematičkim proračunima energetskih procesa taj se sustav sve učestalije naziva „**kontrolnim volumenom**“ (KV oznaka u jednadžbi [3.23].)

Zašto? Ne postoji općeprihvaćeni razlog. Kontrolni je volumen samo drugi naziv za otvoreni sustav. Neki kažu: „kontrolni volumen, za razliku od otvorenog sustava, ima konstantan obujam“. Drugi tvrde obrnuto: „otvoreni je sustav sustav konstantnog (stalnog) i oblikom nepromjenjivog volumena“.

(Mjerni se brojevi geometrijskih tvorbi dužine, plohe /površine/ i volumena zovu duljina, ploština i obujam.)

Za nas su kontrolni volumen i otvoreni sustav istoznačnice. U odnosu na otvoreni sustav kontrolni je volumen više „matematički“ pojam od otvorenog sustava koji je više „tehnički“ pojam. Slično kao što je sustav odabrani objekt promatranja i analize, kontrolni je volumen odabrani volumen u prostoru kroz koji struji fluid. U tom se volumenu promatraju svojstva fluida, transformacije energije i sile što pritom djeluju. (Zašto je to tako postavljeno, protumačit ćemo kasnije.) Kontrolni volumen sadržava dakle, poput otvorenog sustava, masu, no, za razliku od otvorenog sustava koji, ne sadržava li masu, sadržava energiju, kontrolni volumen može sadržavati „ništa“: ni masu ni energiju ni vakuum.

(To se svojstvo kontrolnog volumena vrlo djelotvorno iskoristava u nekim (teškim) problemima određivanja prijelaza toplinske energije. Zato i kažemo da je kontrolni volumen „matematički“ pojam.)

*Poput otvorenog sustav, prostor je kontrolnog volumena omeđen u se zatvorenom granicom koja se naziva **kontrolnom površinom**. (KP oznaka u jednadžbi [3.23].) Ona može biti stvarna ili zamišljena. Dijelovi se kontrolne površine kroz koju masa (fluid) ulazi u kontrolni volumen zovu **ulaznom površinom**, a dijelovi kroz koje fluid izlazi iz kontrolnog volumena **izlaznom površinom**. Obujam kontrolnog volumena može biti konstantan (stalan) no može se i mijenjati širenjem (ekspanzijom) ili sažimanjem (kompresijom) kontrolnog volumena. Naime, kontrolna se površina kontrolnog volumena (ulazna i izlazna), odnosno dijelovi kontrolne površine mogu micati; različitim brzinama u različitim (pa i suprotnim) smjerovima. Kontrolni volumen može pritom biti nepokretan u prostoru strujanja fluida, no može se i gibati kroz prostor koji zauzima fluid. U svakom slučaju valja onda računati s relativnim brzinama strujanja fluida u kontrolni volumen i iz kontrolnog volumena kroz ulaznu i izlaznu kontrolnu površinu. Slovo \mathbf{r} uz oznaku za brzinu, \vec{c}_r u [3.23], upućuje na to: radi se o relativnoj brzini s kojom fluid ustrojava u kontrolni volumen odnosno istrojava iz kontrolnog volumena. O toj brzini ovisi količina fluida koja prelazi kontrolnu površinu i količina fluida u kontrolnom volumenu, a iznos te brzine ovisi o brzinama kojima se kreću kontrolna površina i kontrolni volumen.*

(Više će putnika ući u tramvaj koji miruje, nego li u tramvaj koji odmiče od putnika nekom (dobvatljivom) brzinom. /Brzinom manjom od brzine kretanja putnika; u suprotnom putnici ne bi mogli ulaziti u tramvaj, ne bi ga mogli stići./)

Matematički su aparat analize energetske procesa i transformacija oblika energije diferencijalne jednačbe. Kako se pritom uglavnom gubi fizikalna slika, kadgod je to moguće, služiti ćemo se nekima od poznatih dinamičkih veličina što se izvode iz II. Newtonovog aksioma (količina gibanja, moment količine gibanja, mehanički rad, snaga, kinetička energija itd.) ili integralnim računom.

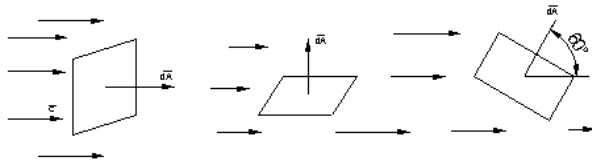
Zašto se međutim služimo integralima u matematičkom (analitičkom) predstavljanju principa očuvanja mase za otvoreni sustav (kontrolni volumen)? Zbog toga jer su realni procesi, što se odvijaju u otvorenim sustavima (kontrolnim volumenima), trodimenzionalni i nestacionarni strujni procesi. Drugim riječima, svako je svojstvo, svaka fizikalna veličina čestice fluida funkcija i mjesta nalaženja u struji fluida i vremena. Svaka čestica fluida ima (može imati) različitu brzinu i akceleraciju, različita sila (vrstom i iznosom) djeluje na čestice fluida, različita je gustoća mase fluida u kontrolnom volumenu itd. Da bismo mogli riješiti jednačbu [3.23] morali bismo poznavati funkcije $\rho = \rho(\vec{r}, t)$ i $\vec{c}_r = \vec{c}_r(\vec{r}, t)$ te poznavati kako se mijenja ploština kontrolne površine (A) i obujam kontrolnog volumena (V) u prostoru i vremenu. Naime, strujanje nije niti jednodimenzionalno niti stacionarno. Zbog toga moramo promatrati i izračunati što se događa na diferencijalnoj površini dA (ona je toliko mala da možemo pretpostaviti da je strujanje fluida kroz nju jednodimenzionalno) odnosno što se događa u diferencijalnom volumenu dV , koji je toliko malog obujma da možemo pretpostaviti da se u tom volumenu ne mijenjaju svojstva fluida (da su jednaka u cijelom volumenu – kao da se radi o jednodimenzionalnom procesu u tom volumenu). Točnije, to je volumen čestice fluida koja, po definiciji, ima konstantnu masu: $dm = \rho dV$. Pritom se ρ i dV mogu mijenjati, ali ne i dm . Nakon toga moramo sumirati događanja na svim diferencijalnim površinama kako bismo dobili ukupnu količinu fluida što prelazi kontrolnu površinu, odnosno, moramo integrirati. Jer integriramo preko dvodimenzionalnog prostora (ravnina), integral je dvostruki. Integral u jednačbi [3.23] kraći je način zapisivanja što stvarno radimo: integriramo preko izlazne površine (sume svih izlaznih površina /može ih biti više/) i preko ulazne površine (sume svih ulaznih površina /može ih biti više/):

$$\begin{aligned} \oint_{KP} \rho \cdot \vec{c}_r \cdot d\vec{A} &= \iint_{A_i} \rho_i \vec{c}_{ri} d\vec{A}_i + \iint_{A_u} \rho_u \vec{c}_{ru} d\vec{A}_u = \\ &= \iint_{A_i} \rho_i c_{ri} dA_i \cos \alpha_i + \iint_{A_u} \rho_u c_{ru} dA_u \cos \alpha_u \\ &= \iint_{A_i} \rho_i c_{ri} dA_i \cos \alpha_i - \iint_{A_u} \rho_u c_{ru} dA_u |\cos \alpha_u| \end{aligned} \quad [3.24]$$

Indeks **i** označava izlaznu površinu, brzinu i gustoću fluida na izlaznoj površini, a indeks **u** isto za ulaznu površinu. Moramo računati sa skalarnim produktom odnosa vektora brzine i površine jer „**maseni protok**“ (zanimat će nas količina fluida što prestruji kroz neku površinu u jedinici vremena):

$$\iint_A \rho \vec{c}_r d\vec{A} = \dot{m} \text{ [kg/s]} \quad [3.25]$$

ovisi o nagibu te površine u odnosu na smjer brzine, Slika 3-29.



Slika 3-29 Strujanje fluida kroz različito orijentirane plohe

Negativni predznak u [3.24] posljedica je dogovora označavanja orijentacije ploha u prostoru vanjskom normalom: na ulazu u kontrolni volumen vektori brzine i ulazne kontrolne površine zatvaraju kut veći od 180° . Na izlazu, manji.

Da bismo odredili količinu fluida u kontrolnom volumenu u nekom trenutku, moramo zbrojiti količine fluida u diferencijalnim volumenima: moramo integrirati preko trodimenzionalnog prostora, integral je trostruki. Budući da nas zanima **promjena** (u vremenu) mase u otvorenom sustavu (kontrolnom volumenu), matematički to znači, da bismo odredili tu promjenu, moramo iznos mase što se u nekom trenutku (promatranom trenutku) nalazi u kontrolnom volumenu (otvorenom sustavu) derivirati po vremenu. Dobivamo fizikalnu veličinu koju zovemo masenim protokom i koju ćemo označavati s točkom iznad oznake za masu:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m} \text{ [kg/s]} \quad [3.26]$$

Jednadžba se [3.23] može (matematički) pojednostavniti s obzirom na to da je sa stajališta principa očuvanja mase, što ćemo kasnije pokazati, nebitno (svejedno) radi li se o nepomičnoj i krutoj ili pomičnoj, fleksibilnoj kontrolnoj površini (mijenja li se ili ne obujam kontrolnog volumena), odnosno kreće li se ili ne kontrolni volumen. Drugim riječima ne moramo računati s relativnim brzinama i s promjenom obujma kontrolnog volumena:

$$\oint_{KP} \rho \cdot \vec{c} \cdot d\vec{A} = - \iiint_{KV} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \iint_{A_i} \rho_i \vec{c}_i d\vec{A}_i + \iint_{A_u} \rho_u \vec{c}_u d\vec{A}_u \text{ [kg/s]} \quad [3.27]$$

Relacija [3.28] analitički je oblik principa očuvanja mase za otvoreni sustav (kontrolni volumen).

Izvedimo sada iz jednadžbe [3.27], koja vrijedi za bilo kakvo strujanje i bilo kakav kontrolni volumen, jednadžbu principa očuvanja mase za jednodimenzionalni, stacionarni, strujni proces. Ako je proces jednodimenzionalni, sve su fizikalne veličine funkcije samo jedne dimenzije, integral možemo zamijeniti sumom. Dobivamo:

$$\iiint_{KV} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{KV} \rho dV = \frac{dm_{KV}}{dt} \text{ [kg/s]}$$

Relacija određuje promjenu mase akumulirane u kontrolnom volumenu u jedinici vremena, jer je integral $\iiint_{KV} \rho dV$ jednak masi fluida [kg] u kontrolnom volumenu u trenutku t .

Dalje je

$$\iint_{A_i} \rho_i \vec{c}_i d\vec{A}_i = \sum_{k=1}^n \rho_i \vec{c}_i \vec{A}_i = \sum_{k=1}^n \dot{m}_{i_k}$$

Integral je jednak ukupnom (sumarnom) masenom protoku [kg/s] koji kroz izlazne površine kontrolnog volumena istrujava iz kontrolnog volumena u jedinici vremena. Slično je

$$\iint_{A_u} \rho_u \vec{c}_u d\vec{A}_u = \sum_{j=1}^m \rho_u \vec{c}_u \vec{A}_u = \sum_{j=1}^m \dot{m}_{u_j}$$

Integral je jednak ukupnom (sumarnom) masenom protoku [kg/s] koji kroz ulazne površine kontrolnog volumena ustrujava u kontrolni volumen u jedinici vremena.

Jednadžba se dakle principa očuvanja mase za otvoreni sustav (kontrolni volumen), [3.27], bitno pojednostavljuje možemo li proces smatrati jednodimenzionalnim:

$$\sum_{k=1}^n \dot{m}_{i_k} - \sum_{j=1}^m \dot{m}_{u_j} = - \frac{dm_{kv}}{dt} \quad [3.28]$$

Jednadžba [3.27] naziva se **jednadžbom kontinuiteta**.

Jednadžba kontinuiteta derivacija je jednadžbe očuvanja mase (masa što je izašla iz otvorenog sustava – masa što je ušla u otvoreni sustav = - masa što se akumulira u otvorenom sustavu) po vremenu.

Jednadžbom se određuje trenutačni protok mase (fluida) kroz kontrolni volumen (otvoreni sustav).

Ukoliko je strujanje i stacionarno, što znači da se ne mijenja količina mase u kontrolnom volumenu (masa je u kontrolnom volumenu konstantna), dobivamo (budući da je $\frac{dm_{kv}}{dt} = 0$):

$$\sum_{k=1}^n \dot{m}_{i_k} - \sum_{j=1}^m \dot{m}_{u_j} = 0, \text{ odnosno, } \sum_{k=1}^n \dot{m}_{i_k} = \sum_{j=1}^m \dot{m}_{u_j} .$$

Za cijev kroz koju protječe fluid (proces je strujanja jednodimenzionalni i stacionarni), odnosno za otvoreni sustav u kome se odvija jednodimenzionalni, stacionarni, strujni proces, dobivamo ove izraze:

$$\rho_1 \vec{c}_1 \vec{A}_1 = \rho_2 \vec{c}_2 \vec{A}_2 = \dot{m} \text{ [kg/s]},$$

odnosno

$$\sum_{k=1}^n \dot{m}_{i_k} = \sum_{j=1}^m \dot{m}_{u_j} = \dot{m} \text{ [kg/s]} = \text{konst.} \quad [3.29]$$

Relacija [3.29] analitički je oblik principa očuvanja mase za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava.

U stacionarnim je procesima otvorenih sustava (kontrolnih volumena) količina dovedene mase (fluida, odnosno djelatne tvari) u proces u jedinici vremena konstantna i jednaka \dot{m} kilograma u sekundi.

3.1.2.2 Princip očuvanja energije za otvoreni sustav

Riječima iskazan princip očuvanja energije za otvoreni sustav (kontrolni volumen) glasi:

energija koja u jedinici vremena izlazi iz sustava
(energija pohranjena u fluidu i prijelazni oblici energije)
– (minus) energija koja u jedinici vremena ulazi u sustav
(energija pohranjena u fluidu i prijelazni oblici energije)
= (jednaka je)
= - (minus) vremenskoj promjeni energije
akumuliranoj u masi u otvorenom sustavu.

Iskazano matematičkim jezikom (jednadžbu ćemo izvesti u 3. dijelu udžbenika):

$$\dot{Q}_{KV} = \dot{W}_{KV} + \frac{d}{dt} \iiint_{KV} \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right) \rho dV + \oint_{KP} \left(u + pv + \frac{c^2}{2} + gz \right) \rho \vec{c}_r d\vec{A} \left[\frac{J}{s} \right] \quad [3.30]$$

Jednadžba [3.30] obuhvaća najopćenitije strujanje fluida (trodimenzionalno i nestacionarno) i najopćenitija događanja s kontrolnim volumenom (kontrolni se volumen kreće i mijenja mu se obujam), no, promatrano u inercijskom koordinatnom sustavu. Možemo je zvati **prvi glavni stavak termodinamike za kontrolni volumen (otvoreni sustav)**. Pritom:

\dot{Q}_{KV} [W] je toplinska energija što u jedinici vremena (1s), dakle radi se o toplinskoj snazi, prelazi granicu otvorenog sustava (kontrolnog volumena), bilo da se dovodi ili odvodi,

$\frac{d}{dt} \iiint_{KV} \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right) \rho dV$ [W] je promjena energije akumulirane u masi otvorenog sustava (u fluidu što se u promatranom trenutku nalazi u kontrolnom volumenu) u jedinici vremena,

(Radi se o unutrašnjoj kaloričkoj energiji dobivenoj pretvorbom iz nuklearne ili kemijske energije ili energije Sunčeva zračenja, odnosno, to može biti geotermalna

energija, kinetičkoj energiji (moguće je da se kontrolni volumen kreće) i potencijalnoj energiji (energiji zbog djelovanja sile teže.)

$$\oint_{KP} \left(u + pv + \frac{c^2}{2} + gz \right) \rho \vec{c}_r d\vec{A} = \iint_{A_i} \left(u_i + p_i v_i + \frac{c_i^2}{2} + gz_i \right) \rho_i \vec{c}_n d\vec{A}_i + \iint_{A_u} \left(u_u + p_u v_u + \frac{c_u^2}{2} + gz_u \right) \rho_u \vec{c}_{ru} d\vec{A}_u [W] \quad [3.31]$$

je razlika između energije što, akumulirana u fluidu, u jedinici vremena istrujava iz kontrolnog volumena (otvorenog sustava) i energije što u jedinici vremena, akumulirana u fluidu, ustrujava u kontrolni volumen (otvoreni sustav),

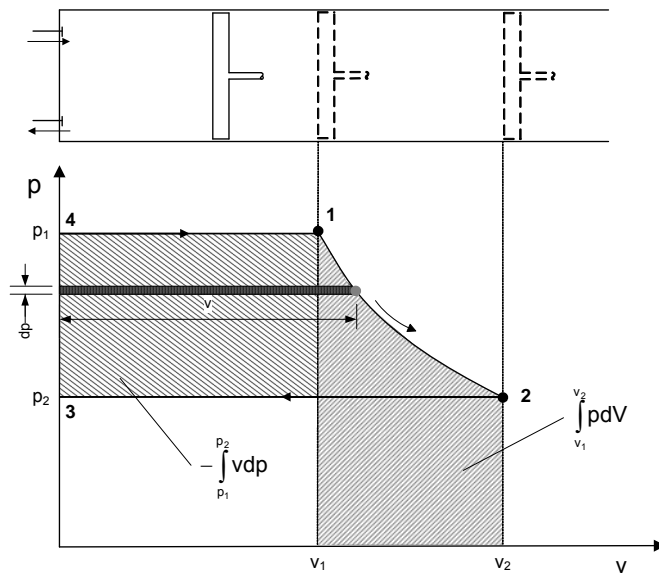
(*pv* je, pokazat ćemo, rad strujanja pobranjen u 1 kg fluida; $p_u v_u$ je rad strujanja pobranjen u fluidu koji ustrujava u kontrolni volumen, a $p_i v_i$ rad je strujanja pobranjen u fluidu koji istrujava iz kontrolnog volumena.)

W_{KV} [J] je „mehanički rad kontrolnog volumena“.

(\dot{W}_{KV} [W] je ukupni mehanički rad što u jedinici vremena (1s), dakle mehanička snaga, prelazi granicu otvorenog sustava (kontrolnog volumena), bilo da se dovodi ili odvodi.)

Najčešće se radi o tehničkom radu, pa je $W_{KV} = W_{t12}$, no, mehanički rad kontrolnog volumena može uključiti i rad pridružen tangencijalnim silama (naprezanjima), električnim, magnetskim i površinskim efektima, efektima ekspanzije ili kontrakcije kontrolnog volumena itd.)

Prilagodimo sada relaciju [3.30] za primjenu na jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava: izvedimo jednadžbu prvog glavnog stavka termodinamike za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava. No, prije toga, odgovorimo na pitanje koliko tehničkog rada dobivamo iz stapnog stroja u kome se odvija jednodimenzionalni, stacionarni, strujni proces. Promatramo, dakle, jedan od jednostavnijih tehničkih otvorenih sustava u kome se odvija jedan od najjednostavnijih (kružnih) procesa: „**proces među stalnim tlakovima**“, Slika 3-30.



Slika 3-30 Proces među stalnim tlakovima

Proces otpočinje otvaranjem upusnog ventila, stanje (4), istodobnim pomicanjem stapa od krajnjeg lijevog položaja (položaja nultog volumena cilindra) udesno. Započinje usisavanje plina (vodene pare) tlaka p_1 . S povećanjem volumena tlak se plina ne mijenja jer je količina plina koja ulazi upravo tolika da tlak u cilindru ostaje konstantan usprkos povećavanju volumena. S postizanjem stanja (1) tlaka plina p_1 , specifičnog volumena v_1 i temperature T_1 , zatvara se upusni ventil. Plin nakon toga ekspanzira (radi se sada o ekspanziji u zatvorenom sustavu: plin je zatvoren u cilindru kojeg su trenutačno granice nepropusne za plin budući da su oba ventila zatvorena), do stanja (2), krajnjeg desnog položaja stapa, tlaka p_2 , specifičnog volumena v_2 i temperature T_2 . S postizanjem stanja (2) otvara se ispusni ventil i plin kod konstantnog tlaka p_2 biva istisnut iz cilindra pomicanjem stapa ulijevo. S trenutkom dosezanja stanja (3), krajnjeg lijevog položaja stapa, zatvara se ispusni ventil, a otvara upusni: trenutačno se postiže ponovno stanje (4) i otpočinje ponavljanje opisanog procesa. Zanimljivo je da rad trenja i promjene kinetičke i potencijalne energije za vrijeme procesa, tehnički je rad (w_{t12}) što se dobiva očito jednak sumi mehaničkih radova promjene volumena. U protivnom, približno je jednak:

$$w_{t12} \approx \int_{v_4}^{v_1} p dv + \int_{v_1}^{v_2} p dv + \int_{v_2}^{v_3} p dv + \int_{v_3}^{v_4} p dv = \oint p dv \quad [\text{J/kg}] \quad [3.31]$$

Integriramo po zatvorenoj krivulji pa suma integrala mora biti jednaka ploštini površine 4-1-2-3-4 u p,v-dijagramu:

$$\begin{aligned} \int_{v_4}^{v_1} p dv + \int_{v_1}^{v_2} p dv + \int_{v_2}^{v_3} p dv + \int_{v_3}^{v_4} p dv &= p_1(v_1 - v_4) + \int_{v_1}^{v_2} p dv + p_2(v_3 - v_2) + 0 = p_1 v_1 + \\ &+ \int_{v_1}^{v_2} p dv - p_2 v_2 = \text{površina 4-1-2-3-4.} \end{aligned}$$

Naime, u prvom je integralu $p = p_1 = \text{konstanta}$, a $v_4 = 0$, pa je rezultat $p_1 v_1$. Drugi integral ne znamo riješiti jer ne poznajemo funkciju $p = p(v, T)$. U trećem je integralu ponovno tlak konstantan i jednak p_2 , a v_3 jednak nuli. Dobivamo $-p_2 v_2$. Granice su četvrtog integrala jednake nuli, pa je i vrijednost integrala jednaka nuli. $p_1 v_1$ odgovara površini 4-1- v_1 -0-4 u p, v -dijagramu. Odbijemo li od te površine površinu $p_2 v_2$ koja je jednaka 3-2- v_2 -0-3, dobit ćemo površinu 4-1-2-3-4 kojoj je jednak (točnije proporcionalan /zanemarili smo trenje i promjene kinetičke i potencijalne energije plina za vrijeme procesa/) tehnički rad.

No, tu površinu možemo i drukčije odrediti: sumirajući elementarne površine vdp ,

Slika 3-30: $\int_{p_1}^{p_2} v dp$.

Budući da površina ne može biti negativna, to vrijedi:

$$\int_{v_1}^{v_2} p dv - (p_2 v_2 - p_1 v_1) = - \int_{p_1}^{p_2} v dp \quad [3.32]$$

što je lako provjeriti, Slika 3-30. No, integral $\int_{v_1}^{v_2} p dv$ jednak je mehaničkom radu

zatvorenog sustava, zanemarimo li rad trenja, površina 1-2- v_2 - v_1 -1, pa je relacijom [3.32] određena veza između mehaničkog rada promjene volumena (mehaničkog rada zatvorenog sustava) i tehničkog rada (mehaničkog rada otvorenog sustava):

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p dv = w_{t12} + (p_2 v_2 - p_1 v_1) = - \int_{p_1}^{p_2} v dp + (p_2 v_2 - p_1 v_1) \quad [3.33]$$

odnosno

$$w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} v dp = w_{12} - (p_2 v_2 - p_1 v_1) = \int_{v_1}^{v_2} p dv - (p_2 v_2 - p_1 v_1) \quad [3.34]$$

Uzmemo li u obzir i promjene kinetičke i potencijalne energije kao i rad trenja za vrijeme procesa u stapnom stroju, tehnički je rad jednak:

$$w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} v dp - |w_{RT12}| - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) = \int_{v_1}^{v_2} p dv - |w_{RT12}| - (p_2 v_2 - p_1 v_1) - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \quad [3.35]$$

U našim ćemo razmatranjima većinom moći zanemariti trenje (rad trenja količinski u usporedbi s drugim oblicima mehaničkog rada), pa će tehnički rad stapnih strojeva biti određen ovom relacijom:

$$w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} v dp - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) = \int_{v_1}^{v_2} p dv - (p_2 v_2 - p_1 v_1) - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \quad [3.36]$$

U termoelektranama, međutim, stapni je parni stroj istisnut parnim turbinama; možemo li relacijom [3.36] odrediti tehnički rad turbine?

Na to ćemo pitanje dobiti odgovor primijenimo li prvi glavni stavak termodinamike za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese na proces u stapnom stroju i turbini. No prije toga morat ćemo izvesti analitički oblik stavka.

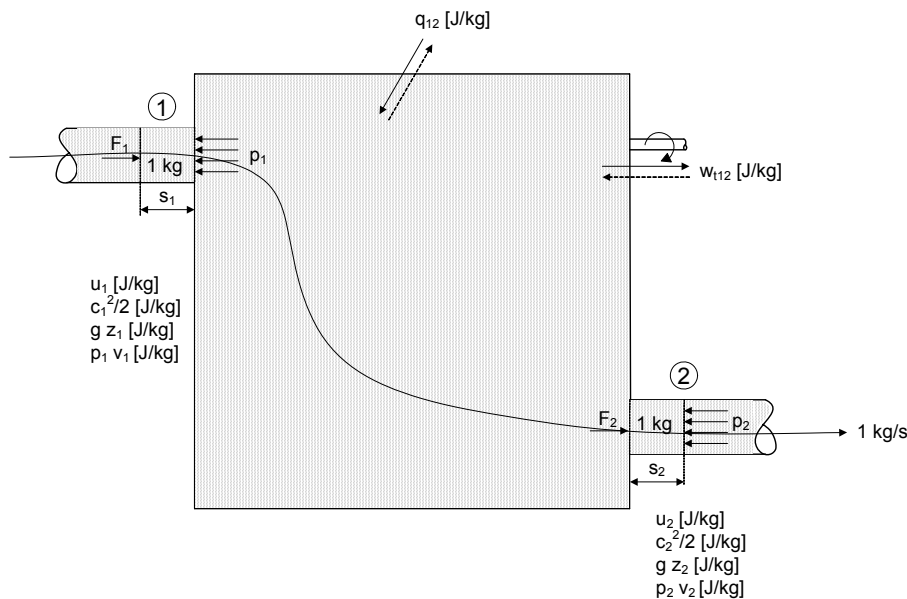
3.1.2.2.1 Prvi glavni stavak termodinamike za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava

Budući da se u slučaju stacionarnih procesa otvorenih sustava energija ne akumulira u sustavu, mora vrijediti:

$$\begin{aligned} &\text{energija koja ulazi u sustav} \\ &(\text{energija pohranjena u fluidu i prijelazni oblici energije}) \\ &= (\text{jednaka je}) \\ &= \text{energiji koja izlazi iz sustava} \\ &(\text{energija pohranjena u fluidu i prijelazni oblici energije}). \end{aligned}$$

Radi li se o jednodimenzionalnom, stacionarnom strujanju, analitički je oblik principa očuvanja energije jednostavan,

Slika 3-31:



Slika 3-31 Zamišljeni otvoreni sustav u kojem se odvija jednodimenzionalni, stacionarni, strujni proces

$$q_{12} + u_1 + p_1 v_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + g z_1 = w_{t12} + u_2 + p_2 v_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + g z_2 \quad [\text{J/kg}] \quad [3.37]$$

Jednadžba [3.37] naziva se **prvim glavnim stavkom termodinamike za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava.**

Promatramo pritom kilogram fluida što u jednoj sekundi prostrujava kroz otvoreni sustav (kontrolni volumen) u kojem se mogu odvijati najrazličitiji procesi transformacije oblika energije, no ti su procesi uvijek jednodimenzionalni i stacionarni. Najopćenitiji proces uključuje sve oblike unutrašnje i prijelazne energije, kao i sve moguće transformacije. U jednadžbi [3.37]:

q_{12} toplinska je energija koja se po kilogramu fluida bilo dovodi u sustav ili odvodi iz sustava, (*Dovodi li se, pozitivan je predznak, stavljamo je na lijevu stranu jednadžbe /ili na desnu, s negativnim predznakom/.*)

w_{t12} tehnički je rad koji se po kilogramu fluida bilo odvodi iz sustava ili dovodi u sustav, (*Odvodi li se, pozitivan je predznak, stavljamo ga na desnu stranu jednadžbe /ili na lijevu, s negativnim predznakom/.*)

u_1, u_2 unutrašnja je kalorička energija koja je akumulirana u kilogramu fluida što ustrojava u otvoreni sustav odnosno istrojava iz otvorenog sustava, (*Unutrašnja kalorička energija dobivena je transformacijom iz nuklearne, kemijske energije ili energije Sunčeva zračenja. Ili je to geotermalna energija, odnosno unutrašnja kalorička energija mora.*)

$\frac{1}{2} c_1^2, \frac{1}{2} c_2^2$ kinetička je energija pohranjena u kilogramu fluida što ustrojava u otvoreni sustav odnosno istrojava iz otvorenog sustava s brzinom c_1 odnosno c_2 ,

$g z_1, g z_2$ potencijalna je energija akumulirana u kilogramu fluida što ustrojava u otvoreni sustav odnosno istrojava iz otvorenog sustava, a

$p_1 v_1, p_2 v_2$ radovi su strujanja obavljeni na jednom kilogramu fluida koji ustrojava u otvoreni sustav odnosno istrojava iz otvorenog sustava.

(*Radovi strujanja ostaju pohranjeni u fluidu budući da je energija neuništiva. Obavlja ih pumpa, kao što je to slučaj u termoelekttranama, ili nastaju pretvorbom iz potencijalne energije vode, npr. u hidroelekttranama. Naime, na ulazu u otvoreni sustav (kontrolni volumen) vlada tlak p_1 . Protiv djelovanja tog tlaka treba 1 kg fluida, specifičnog volumena v_1 , utisnuti u otvoreni sustav (kontrolni volumen). Treba svladati silu $p_1 A_1$ na putu s_1 . (A_1 je ulazna površina kontrolne površine preko koje 1 kg fluida struji u kontrolni volumen.) Rad je strujanja dakele jednak:*

$$p_1 A_1 s_1 = p_1 v_1 \quad [\text{J/kg}] \quad [3.38]$$

gdje je $A_1 s_1 = v_1 \quad [\text{m}^3 / \text{kg}]$ (specifični) volumen 1 kg fluida na ulazu u kontrolni volumen.

Jer je rad strujanja mehanički rad (energija), ne može nestati, ostaje pohranjen u kilogramu fluida što ustrojava u kontrolni volumen.

Na izlazu iz otvorenog sustava da bi 1 kg fluida izašao na njemu treba isto tako obaviti rad strujanja. Taj kilogram fluida naime „gura“ kilogram fluida ispred sebe. Na izlazu vlada tlak p_2 , specifični je volumen fluida v_2 , izlazna površina A_2 , a treba svladati silu na putu s_2 . Dobivamo:

$$p_2 A_2 s_2 = p_2 v_2 \text{ [J/kg]} \quad [3.39]$$

Sada je $A_2 s_2 = v_2 \text{ [m}^3/\text{kg]}$ (specifični) volumen 1 kg fluida na izlazu iz kontrolnog volumena. Rad strujanja $p_2 v_2$ ostaje pohranjen u kilogramu fluida što istrujava iz kontrolnog volumena.)

Suma se rada strujanja i unutrašnje kaloričke energije naziva entalpijom:

$$u + pv = h \text{ [J/kg]}, \text{ odnosno } H = U + pV \text{ [J]} \quad [3.40]$$

Vrijedi dakle za ulaz: $u_1 + p_1 v_1 = h_1$, odnosno za izlaz: $u_2 + p_2 v_2 = h_2$, pa se pisanje prvog glavnog stavka termodinamike za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava, relacija [3.11], skraćuje:

$$q_{12} + h_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + gz_1 = w_{t12} + h_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + gz_2 \text{ [J/kg]} \quad [3.41]$$

Relacije se [3.11] i [3.41] mogu proširiti i na slučaj kad kroz otvoreni sustav istodobno struji više djelatnih tvari, pa, npr., izraz [3.41] tada glasi:

$$q_{12} + \sum_u (h_{1u} + \frac{1}{2} c_{1u}^2 + gz_{1u}) = w_{t12} + \sum_i (h_{2i} + \frac{1}{2} c_{2i}^2 + gz_{2i}) \text{ [J/kg]} \quad [3.42]$$

Relacija je [3.37], odnosno [3.41], izvedena bez naznake o kakvom se procesu otvorenog sustava radi. Jedini je uvjet bio da je proces jednodimenzionalni, stacionarni i strujni. Drugim riječima, radi se o **općem obliku prvog glavnog stavka termodinamike za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava** koji prema tome treba vrijediti za bilo kakav proces bilo kakvog otvorenog sustava; dakako, uz ispunjenje spomenutog uvjeta. Relacije moraju vrijediti dakle kako za stapne strojeve tako i za turbostrojeve, za parne kotlove, pumpe, kompresore, kondenzatore itd. Provjerimo relaciju [3.37] primjenjujući je na turbinu i stapni stroj. Dobivamo za tehnički rad turbine:

$$w_{t12} = q_{12} - (u_2 - u_1) - (p_2 v_2 - p_1 v_1) - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \quad [3.43]$$

Relacija [3.43] mora biti jednaka relaciji [3.36], kojom je određen tehnički rad stapnog stroja:

$$w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} v dp - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1)$$

Jesu li te dvije relacije istovjetne?

Da, uz uvjet da toplinsku energiju, koja se izmjenjuje između otvorenog sustava i okolice, možemo izraziti 1. glavnim stavkom termodinamike za zatvorene sustave, dakle kao toplinsku energiju koja se izmjenjuje između zatvorenog sustava i okolice:

$$q_{12} = u_2 - u_1 + \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (A)$$

U tom slučaju dobivamo:

$$\begin{aligned} w_{t12} &= u_2 - u_1 + \int_{v_1}^{v_2} p dv - (u_2 - u_1) - (p_2 v_2 - p_1 v_1) - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) = \\ &= \int_{v_1}^{v_2} p dv - (p_2 v_2 - p_1 v_1) - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) = - \int_{p_1}^{p_2} v dp - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \end{aligned}$$

jer vrijedi relacija [3.36]:

$$\begin{aligned} w_{t12} &= \int_{v_1}^{v_2} p dv - (p_2 v_2 - p_1 v_1) - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) = \\ &= - \int_{p_1}^{p_2} v dp - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \end{aligned}$$

Dobivamo dakle, kao što smo i morali (u protivnom bili bismo u ozbiljnim problemima), vrijedi li relacija (A), identične izraze: jednačba je [3.41] doista opći oblik 1. glavnog stavka termodinamike za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava.

Postavlja se pitanje kako utvrditi vrijedi li relacija (A)?

Uz pomoć matematike i (malo) logičkog zaključivanja. Naime, poslužiti ćemo se definicijom entalpije, relacija [3.40]:

$$h = u + pv.$$

Diferencirajmo taj izraz. Dobivamo:

$$dh = du + p dv + v dp, \text{ odnosno, } du + p dv = dh - v dp.$$

Prema 1. glavnom stavku termodinamike za zatvorene sustave

$$du + p dv \text{ jednako je } dq \text{ (} du + p dv = dq \text{)}.$$

dq je diferencijal toplinske energije koja se izmjenjuje između zatvorenog sustava i okolice. I to je točno budući da je du promjena unutrašnje kaloričke energije (oblika energije koji je akumuliran u mirujućem zatvorenom sustavu), a $p dv$ diferencijal

mehaničkog rada promjene volumena (mehaničkog rada koji zatvoreni sustav izmjenjuje s okolicom). Dakle je:

$$du + pdv = dq = dh - vdp.$$

Veličine dh i $-vdp$ karakteriziraju pak otvoreni sustav: dh je promjena entalpije otvorenog sustava (oblik energije povezan sa strujanjem mase (fluida) kroz otvoreni sustav), a $-vdp$ je diferencijal tehničkog rada (mehaničkog rada koji otvoreni sustav izmjenjuje s okolicom). Dakle je $dq = dh - vdp$ diferencijal toplinske energije koja se izmjenjuje između otvorenog sustava i okoline pa je prema tome svejedno kojom se diferencijalnom jednačbom određuje toplinska energija koja se izmjenjuje između otvorenog sustava i okoline:

$$dq = du + pdv \text{ ili } dq = dh - vdp \quad [3.44]$$

No, radi se o jednakosti diferencijalnih iznosa toplinske energije. Vrijedi li to i za cijeli proces otvorenog (ili zatvorenog sustava) koji se odvija između stanja (1) i (2)?

Odgovor možemo dobiti samo izračunamo li ukupni iznos toplinske energije koja se izmjenjuje za vrijeme procesa. Drugim riječima, moramo integrirati relaciju [3.44]:

$$\int_1^2 dq = \int_1^2 du + \int_{v_1}^{v_2} pdv; \int_1^2 dq = \int_1^2 dh - \int_{p_1}^{p_2} vdp$$

Dobivamo:

$$q_{12} = u_2 - u_1 + \int_{v_1}^{v_2} pdv \text{ i } q_{12} = h_2 - h_1 - \int_{p_1}^{p_2} vdp.$$

Jesu li izrazi istovjetni?

Da. Poslužimo li se relacijama [3.40] i [3.33] vrijede jednakosti:

$$q_{12} = h_2 - h_1 - \int_{p_1}^{p_2} vdp = (u_2 + p_2 v_2) - (u_1 + p_1 v_1) - \int_{p_1}^{p_2} vdp = u_2 - u_1 + \int_{v_1}^{v_2} pdv.$$

Potvrđuje li „Fizika“ „Matematiku“ (matematičke rezultate)?

Da. Toplinska je energija prijelazni oblik energije, oblik energije koji prelazi granice sustava nevezano uz masu. Odvija li se prema tome isti proces, između istih stanja (1) i (2), dakle između istih temperaturnih razlika, u zatvorenom ili otvorenom sustavu, to ne utječe na izmjenu toplinske energije: ona ovisi samo o temperaturi sustava i njegove okoline.

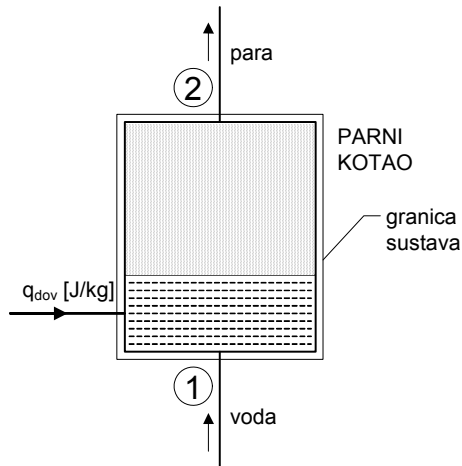
Analizirajmo sada jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese što se odvijaju u (nekim) otvorenim sustavima termoelektrana i hidroelektrana primjenjujući opći oblik prvog glavnog stavka termodinamike za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava. Jednačbu [3.37]:

$$q_{12} + u_1 + p_1 v_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + gz_1 = w_{t12} + u_2 + p_2 v_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + gz_2 \text{ [J/kg]},$$

ili [3.41]:

$$q_{12} + h_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + gz_1 = w_{t12} + h_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + gz_2 \text{ [J/kg]}.$$

Započnimo s procesom u parnom kotlu termoelektrane, Slika 3-32.



Slika 3-32 Shema procesa u parnom kotlu

Promatramo li proces u parnom kotlu zaključujemo da se za vrijeme procesa ne izmjenjuje tehnički rad, dakle je $w_{t12} = 0$. U kotao se dovodi voda, a odvodi para na različitim visinama, no, zanemarit ćemo te razlike visina (z) na ulazu i izlazu iz parnog kotla. To možemo buduću da je iznos potencijalne energije $\delta e_p = g(z_2 - z_1)$ zanemariv prema količini toplinske energije koja se u parnom kotlu dovodi 1kg vode odnosno pare. Isto vrijedi i za kinetičku energiju

$$\delta e_k = \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) \approx 0.$$

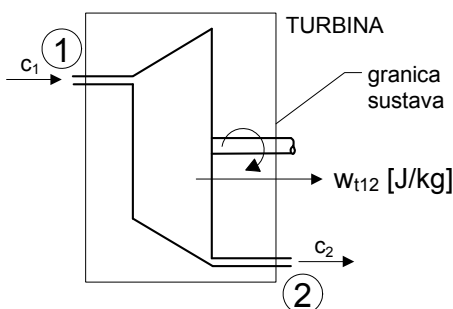
Prema [3.41] dobivamo.

$$q_{12} = h_2 - h_1 \text{ [J/kg]}.$$

h_2 je entalpija vodene pare na izlazu iz parnog kotla, a h_1 je entalpija vode na ulazu u parni kotao (na izlazu iz pojne pumpe). Uvjerit ćemo se, $h_2 > h_1$, pa je $q_{12} > 0$. Toplinska je energija pozitivna, dovodi se u parnom kotlu vodi i pari, kako to treba i biti, a njezin je iznos jednak razlici vrijednosti entalpije vodene pare i vode:

$$q_{12} = q_{dov} = h_2 - h_1 \text{ [J/kg]} \quad [3.45]$$

Promatrajmo dalje proces u parnoj ili plinskoj turbini, Slika 3-33.



Slika 3-33 Shema procesa u parnoj ili plinskoj turbini

Možemo pretpostaviti, u prvoj aproksimaciji, da se za vrijeme ekspanzije pare (plina) u turbini ne dovodi (što je točno – ne loži se vatra ispod turbine) ni odvodi toplina.

(Postoji odvođenje toplinske energije iz turbine: kroz turbinu struji fluid vrlo visoke temperature, no, s obzirom na velike brzine s kojima fluid struji kroz turbinu, i toplinsku izolaciju turbine, relativno se male količine toplinske energije (u odnosu na iznos dobivenog tehničkog rada), odvođe iz turbine pa se mogu zanemariti.)

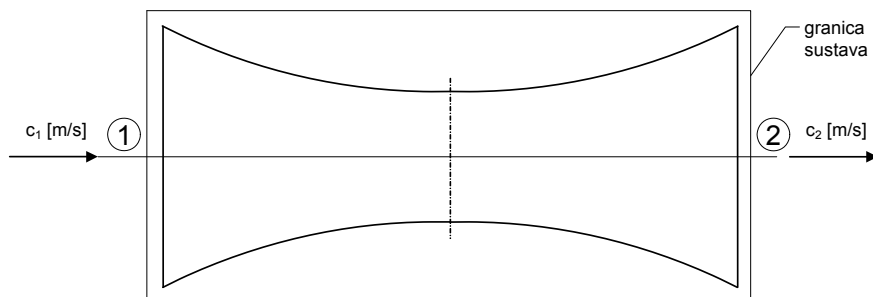
Dobivamo stoga.

$$w_{t12} = h_1 - h_2 - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) \text{ [J/kg]}$$

Uobičajeno se, zbog (relativno) malog iznosa, uz gravitacijsku potencijalnu energiju, zanemaruje i kinetička energija, $\delta e_k = \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2)$, pa, budući da je entalpija fluida na ulazu u turbinu veća od entalpije na izlazu iz turbine (potvrdit ćemo to), $h_1 > h_2$, tehnički je rad pozitivan, $w_{t12} > 0$, predaje se iz turbine, a jednak je razlici entalpija (dobivamo relaciju sličnu relaciji [3.45]):

$$w_{t12} = h_1 - h_2 \text{ [J/kg]} \quad [3.46]$$

Odredimo sada brzinu fluida na izlazu iz de Lavalove sapnice, Slika 3-34.



Slika 3-34 Shema procesa u de Lavalovoj sapnici

Tehnički je rad jednak nuli; sapnica nije opskrbljena uređajem koji bi omogućio izmjenu tehničkog rada. Za izmijenjenu toplinsku energiju vrijedi isto kao za turbinu: toplinska se energija ne dovodi, a količinu toplinske energije, koja iz sapnice (plina ili

pare) prelazi u okolicu, zanemarujemo. Primjenom 1. glavnog stavka, relacije [3.41], dobit ćemo ($\delta e_p = g(z_2 - z_1) = 0$, sapnica je vodoravno položena):

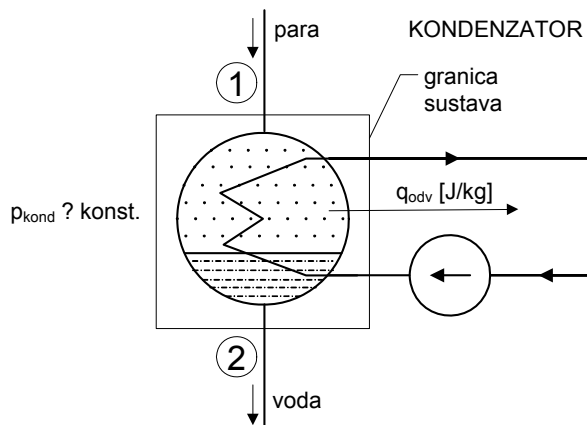
$$c_2^2 = 2(h_1 - h_2) + c_1^2.$$

Premda brzina c_1 nije mala, u usporedbi se s brzinom c_2 zanemaruje, tako da je brzina fluida na izlazu iz sapnice jednaka dvostrukoj razlici između vrijednosti entalpije plina (pare) na ulazu i izlazu iz sapnice):

$$c_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)} \quad [\text{m/s}] \quad [3.47]$$

Zbog velikih se razlika u vrijednostima entalpija, na ulazu u sapnicu (h_1) i izlazu iz sapnice (h_2), postižu velike brzine strujanja fluida: velike se količine eksergije entalpije pretvaraju u kinetičku energiju.

Pogledajmo sada koliko se toplinske energije odvodi iz termoelektrane u kondenzatoru, Slika 3-35.



Slika 3-35 Shema procesa u kondenzatoru termoelektrane

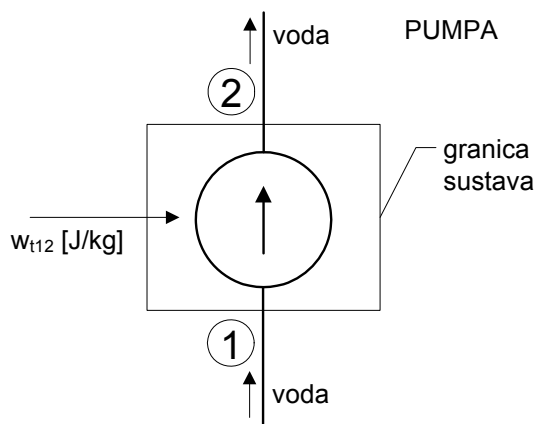
Proces je u kondenzatoru istovrstan s procesom u parnom kotlu. S jednom razlikom: u parnom se kotlu djelatnoj tvari dovodi toplina dok se u kondenzatoru odvodi. Međutim, ostalo je isto: $w_{t12} = 0$, $\delta e_p = 0$ i $\delta e_k = 0$, tako da dobivamo:

$$q_{12} = h_2 - h_1 \quad [\text{J/kg}]$$

Sada je međutim entalpija h_1 entalpija vodene pare na ulazu u kondenzator, a h_2 entalpija vode na izlazu iz kondenzatora. Jer je $h_2 < h_1$, to je $q_{12} < 0$: predznak potvrđuje da se toplinska energija odvodi iz otvorenog sustava (kondenzatora) u okolicu. Dakle je količina toplinske energije odvedene iz termoelektrane u okolicu jednaka:

$$q_{odv} = h_2 - h_1 \quad [\text{J/kg}] \quad [3.48]$$

Odredimo na kraju razmatranja procesa u otvorenim sustavima termoelektrane tehnički rad pojne pumpe, Slika 3-36. Slično kao što je proces u kondenzatoru istovrstan s procesom u parnom kotlu, tako je proces u pojnoj pumpi istovrstan s procesom u turbini.



Slika 3-36 Shema procesa u pojnoj pumpi termoelektrane

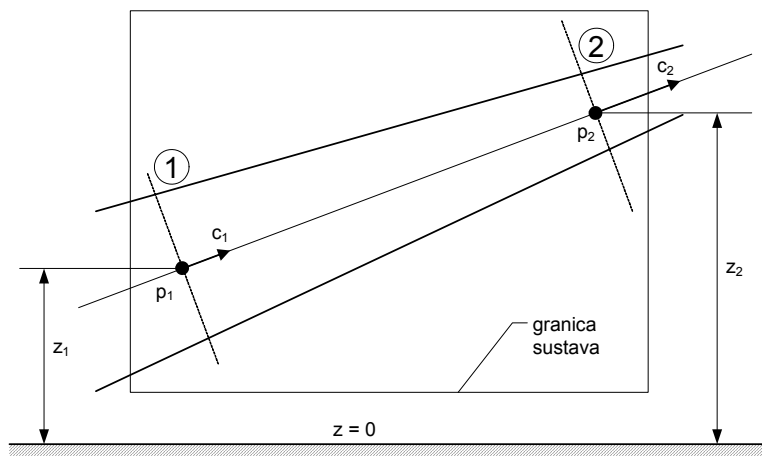
Dobivamo:

$$w_{t12} = w_{\text{pumpe}} = h_1 - h_2 \text{ [J/kg]} \quad [3.49]$$

Međutim, dok se u slučaju turbine tehnički rad dobiva iz sustava, transformacijom iz oblika energije pohranjenih u fluidu, u slučaju pumpe, da bi se proces pumpanja mogao odvijati, treba dovoditi tehnički rad. Taj se tehnički rad pretvara u unutrašnju energiju (kinetičku i/ili potencijalnu i/ili entalpiju) i pohranjuje u fluidu. Naime, entalpija je vode (kondenzata) na ulazu u pumpu, h_1 , manja je od entalpije vode na izlazu iz pumpe (vode na ulazu u parni kotao), h_2 , pa je $w_{t12} < 0$ ($w_{\text{pumpe}} < 0$) kako to treba biti (tehnički se rad dovodi otvorenom sustavu /pojnoj pumpi/), a veličina je tehničkog rada određena relacijom [3.49].

(Razmatrajući energetske procese i transformacije oblika energije u otvorenim sustavima termoelektrane ustanovili smo da svi uključuju entalpiju; to je i razlog definiranja entalpije kao sume dvaju oblika energije.)

Promatramo sada strujanje vode u cjevovodu (otvoreni sustav) hidroelektrane. Vodu ćemo smatrati idealnom kapljevnom (tekućinom): neviskoznom (trenje je jednako nuli) i nestlačivom (ne mijenja joj se specifični volumen). Strujanje vode u cijevi prikazuje Slika 3-37.



Slika 3-37 Prikaz strujanja vode

Budući da se toplinska energija ne dovodi i ne odvodi, to je $q_{12}=0$. Ne obavlja se ni tehnički rad (za to nema uređaja), pa je i $w_{12} = 0$. Relacija [3.37] onda glasi:

$$u_1 + p_1 v_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + gz_1 = u_2 + p_2 v_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + gz_2 \quad [3.50]$$

Jer je trenje jednako nuli za vrijeme strujanja vode, i jer je voda nekompresibilna (nestlačiva), to iz 1. glavnog stavka termodinamike za zatvoreni sustav,

$$q_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p dv - |w_{RT12}| + u_2 - u_1,$$

dobivamo: $u_2 - u_1 = 0$, odnosno, $u_1 = u_2$.

$$(q_{12} = 0, w_{RT12} = 0, \int_{v_1}^{v_2} p dv = 0 \text{ /v = konst, dv = 0/})$$

Relacija [3.50] prelazi stoga u izraz:

$$p_1 v_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + gz_1 = p_2 v_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + gz_2, \quad [3.51]$$

odnosno u izraz:

$$pv + \frac{1}{2} c^2 + gz = \text{konst. [J/kg]} \quad [3.52]$$

što vrijedi za svaki presjek cijevi.

(Naime, presjeci su 1 i 2 u cijevi, Slika 3-37, proizvoljno odabrani što znači da jednačžba [3.51] mora vrijediti za svaki presjek cijevi. Možemo je stoga pisati u obliku [3.52].)

Jednačžba [3.52] naziva se Bernoullijevom. Očito, Bernoullijeva je jednačžba samo jedan od analitičkih oblika prvog glavnog stavka termodinamike za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava koji, u ovom slučaju (jednodimenzionalno, stacionarno, strujanje idealne kapljevine bez izmjene tehničkog rada), iskazuje da suma rada strujanja (naziva se i „energijom tlaka“), kinetičke i potencijalne energije idealne kapljevine ostaje stalna prigodom međusobnih transformacija tih oblika energije. (Svaki se oblik može preobraziti u druga dva).

Ako se umjesto specifičnog volumena v u jednačžbu [3.52] uvrsti gustoća $\rho = 1/v$ i zatim se jednačžba podijeli s g , dobiva se (u tom se slučaju govori o „visini tlaka“ i „visini brzine“):

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{c^2}{2g} + z = \text{konst. [m]} \quad [3.53]$$

odnosno, množenjem s ρg

$$p + \frac{1}{2} \rho c^2 + \rho g z = \text{konst. [N/m}^2\text{]} \quad [3.54]$$

što su, za razliku od relacije [3.52], oblici Bernoullieve jednadžbe koji se rabe u analizama mehanike fluida.

Koliki je tehnički rad vodne turbine hidroelektrane?

Primjena relacije [3.37] daje:

$$w_{t12} = -v(p_2 - p_1) - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \text{ [J/kg]} \quad [3.55]$$

Naime, radi se o strujanju idealne kapljevine (tekućine): $q_{12} + u_1 - u_2 = 0$ jer je $v_1 = v_2 = v = \text{konst.}$

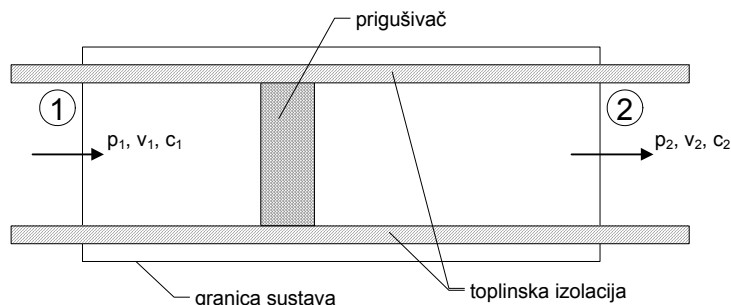
Jednadžba [3.55] potvrđuje zaključak o univerzalnosti jednadžbe [3.37]. Očita je jednakost ($v = \text{konst.}$):

$$w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} v dp - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) = -v(p_2 - p_1) - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \text{ [J/kg]}$$

Tehnički se rad vodne turbine osigurava transformacijom iz energije tlaka (rada strujanja), kinetičke i potencijalne energije vode.

Konačno, na kraju ovog razmatranja, upoznajmo još jedan proces važan u radu postrojenja za proizvodnju električne energije, proces prigušivanja.

Prigušivanje nekog plina ili kapljevine (tekućine) nastaje kada se slobodni presjek strujanja naglo suzi (ili proširi). Posljedica je pad tlaka iza prigušilišta. Za dalja razmatranja nije bitno na koji je način suženje presjeka izvedeno. To može biti pritvoreni ventil, ugrađena prirubnica ili čep od poroznog materijala (pamuk, vuna), Slika 3-38.



Slika 3-38 Prikaz procesa prigušenja

U prigušilištu (prigušivač /prigušilo/, Slika 3-38) dijelovi su plina izvrgnuti promjenama stanja, koje će zbog trenja, vrtloženja i pada tlaka za svaki dio biti drukčije. Međutim, može se očekivati da će se stanje plina ustaliti dosta daleko ispred i

iza prigušilišta, pa se u presjecima 1 i 2 može računati sa srednjim vrijednostima. Neka, dakle, dovoljno daleko ispred prigušivača vlada srednje stanje (1), a dovoljno daleko iza prigušivača vlada srednje stanje (2).

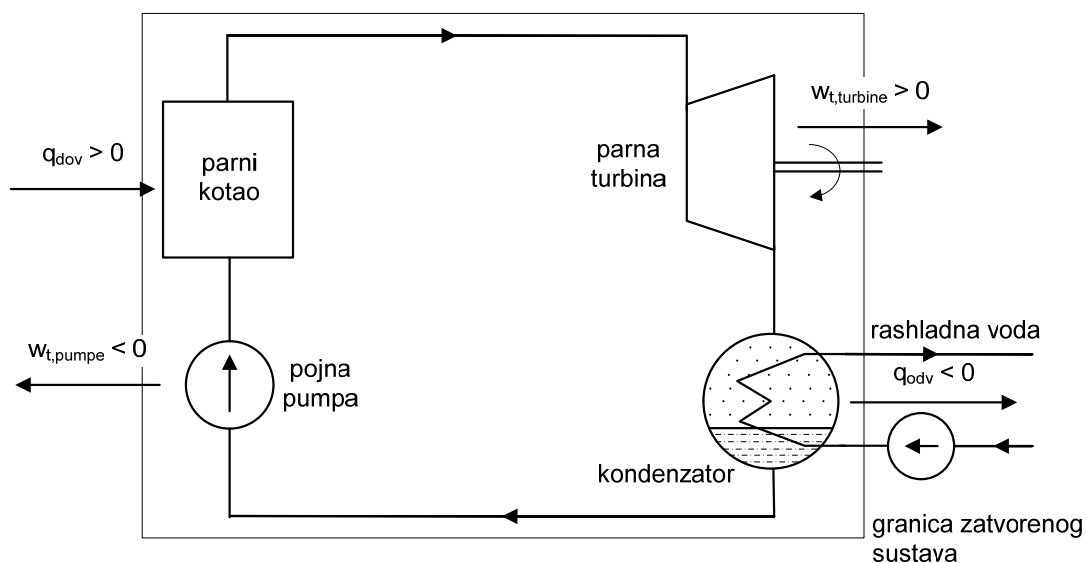
(Pod „dovoljno daleko“ misli se na takvu udaljenost na kojoj se mogu zanemariti smetnje jednodimenzionalnom i stacionarnom strujanju prouzrokovane prigušilom.)

Uzevši u obzir da se za vrijeme trenja ne dovodi i ne odvodi toplinska energija (sustav je adijabatski), da se ne obavlja tehnički rad (ne postoji uređaj za to), može se u [3.41] postaviti da je $q_{12} = 0$ i $w_{t12} = 0$. Razlike su u brzinama strujanja malene pa možemo zanemariti promjenu kinetičke energije, $\frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) \approx 0$, odnosno, većina se kinetičke energije proizvedene ekspanzijom (plina zbog snižavanja tlaka) troši na svladavanje otpora strujanju kroz prigušilište. Konačno, cijev je položena vodoravno, pa je $z_1 = z_2$. Iz [3.41] dobivamo da je

$$h_1 = h_2, \text{ ili } u_1 + p_1 v_1 = u_2 + p_2 v_2 \quad [3.56]$$

Prigušivanjem ostaje entalpija nepromijenjena, ali se može promijeniti unutrašnja kalorička energija fluida.

Zaključno za ovo poglavlje ponovimo osnovno. Govorili smo dosad o nekoliko matematičkih modela principa očuvanja mase i energije povezanih s procesima proizvodnje električne energije u termoelektranama: matematičkom modelu principa očuvanja mase za zatvoreni i otvoreni sustav (jednadžbi kontinuiteta), matematičkom modelu mehaničkog rada promjene volumena i tehničkog rada, i o matematičkom modelu principa očuvanja energije za zatvoreni i otvoreni sustav (1. glavnom stavku termodinamike za zatvoreni i otvoreni sustav u kojem se odvijaju jednodimenzionalni, stacionarnu, strujni procesi). Ustanovili smo da se u termoelektrani odvija kružni proces ostvaren energetske procesima u otvorenim sustavima termoelektrane, Slika 3-39.



Slika 3-39 Shema spoja termoelektrane

Para struji iz parnog kotla kroz turbinu u kondenzator, gdje se kondenzira. Kondenziranu paru (kao tekućinu) tiska pojna pumpa u parni kotao, pa tu ponovno isparuje.

Promatrano u cjelini, to je onda zatvoreni sustav jer u njemu trajno struji stanovita ista količina vodene pare, ili vode. Razmatranjem tog zatvorenog sustava odredili smo odnos između oblika energija koji se dovode u termoelektranu i onih koji se odvođe iz termoelektrane, [3.21]:

$$Q_{\text{dov}} - |Q_{\text{odv}}| = W_{\text{turbine}} - |W_{\text{pumpe}}|$$

Promatrajući pak energetske procese u otvorenim sustavima definirali smo pojam tehničkog rada, odredili iznos tog rada,

$$w_{12} = - \int_{p_1}^{p_2} v dp - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1),$$

i pokazali kako se Q_{dov} , Q_{odv} , W_{turbine} i W_{pumpe} mogu izračunati poznavanjem vrijednosti entalpija fluida (plina i tekućine) na izlazu i ulazu pojedinog otvorenog sustava (parnog kotla, turbine, kondenzatora i pojne pumpe).

No, kako odrediti sile (moramo poznavati mase i akceleracije), tlakove i temperature, i njihovu povezanost, za vrijeme pojedinačnih procesa?

Kako, npr., odrediti vrijednosti entalpije: $h = u + pv$?

Tlak i specifični volumen lako je odrediti: izmjere se na ulazu i izlazu otvorenog sustava. Kako međutim odrediti iznos unutrašnje kaloričke energije?

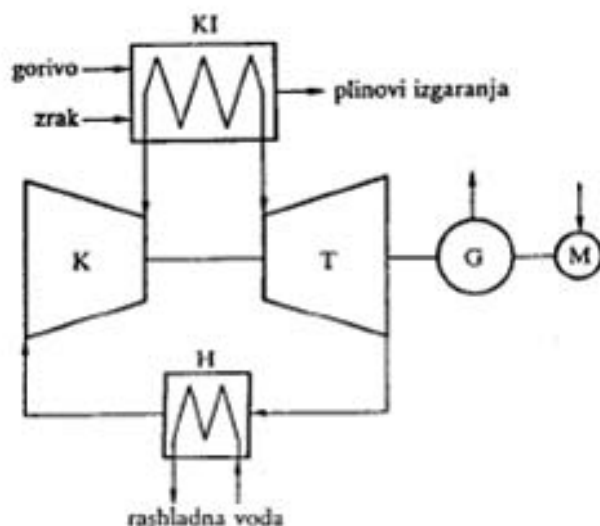
Dosad znamo ovo: što je veća količina akumulirane unutrašnje kaloričke energije u nekom sustavu konstantne mase, to je viša temperatura tog sustava. Očito, pomoću temperature sustava trebali bismo moći odrediti iznose (ili barem promjene) unutrašnje kaloričke energije. Kako? Da bismo odgovorili na ta pitanja, da bismo u potpunosti mogli opisati energetske pretvorbe i procese u termoelektranama i hidroelektranama, morat ćemo raspolagati s matematičkim modelima koji će opisivati i predviđati ponašanje fluida u termoelektranama i hidroelektranama, morat ćemo detaljnije upoznati prirodu (svojstva i stanja /promjene stanja/) fluida: kapljevine i plinova.

No, prije toga, upoznajmo osnove rada termoelektrana s plinskom turbinom.

3.2 Energetske pretvorbe u termoelektranama s plinskom turbinom

S eneretskog je gledišta „zatvoreni proces“ u termoelektrani s plinskom turbinom analogan kružnom procesu u termoelektrani s parnom turbinom. Naime, postrojenje se sastoji od kompresora, komore za izgaranje, plinske turbine i hladnjaka, Slika 3-400, kroz koje neprestano kruži isti zrak. (Zbog toga se proces naziv „zatvorenim“. Postoji naime i proces „otvoreni proces“, u kojem se zrak, točnije smjesa zraka i plinova izgaranja, nakon ekspanzije u plinskoj turbini odvođi u okolicu, gdje se ohladi

predajući toplinu okolnom zraku, a za ponavljanje idućeg ciklusa kružnog procesa kompresor usisava potrebne količine zraka iz okoline.) Pritom komora za izgaranje s izmjenjivačem topline odgovara parnom kotlu, plinska turbina parnoj turbini, hladnjak kondenzatoru, a kompresor pojnjoj pumpi. S jednom razlikom: fluid u postrojenju s plinskom turbinom ne mijenja agregatno stanje (plinovito) za razliku od fluida u postrojenju s parnom turbinom koji je i u kapljevitom i u plinovitom agregatnom stanju.



Slika 3-40 Shema najjednostavnije izvedbe termoelektrane s plinskom turbinom i zatvorenim procesom: K – kompresor, KI – komora za izgaranje, T – turbina, H – hladnjak,

G – sinkroni generator, M – motor za pokretanje rada postrojenja

Kompresor usisava zrak (plin) ohlađen u hladnjaku i komprimira ga do pogodnog tlaka. U izmjenjivaču topline, koji se nalazi u komori za izgaranje, zrak preuzima toplinsku energiju zagrijavajući se uz konstantan tlak. (U komori za izgaranje izgara gorivo: kruto, tekuće ili plinovito.) Zrak zatim ekspandira u plinskoj turbini u kojoj se, na potpuno analogan način onom u parnoj turbini, unutrašnja kalorička energija (entalpija) zraka transformira u mehanički (tehnički) rad. U hladnjaku se zatim zrak hladi jer se anergija entalpije, u obliku toplinske energije, odvodi u okolicu te započinje idući ciklus kružnog procesa.

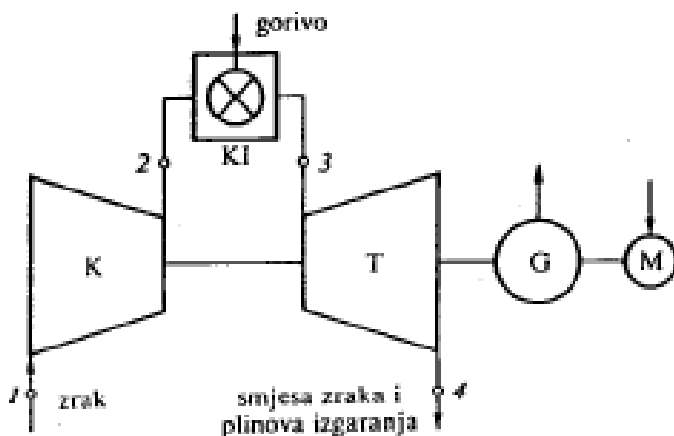
(Za stavljanje u pogon postrojenja služi električni (asinkroni) motor (ili neki drugi pogonski stroj, npr. dizelski motor) jer je za pogon turbine potreban komprimirani zrak.)

Sve rečeno o kondenzatoru termoelektrane s parnom turbinom vrijedi i za hladnjak termoelektrane s plinskom turbinom. Npr., kada se anergija (toplinska energija) ne bi odvodila u okolicu proces bi bio neprovediv: komprimiranje bi neohlađenog zraka koji istrujava iz plinske turbine trošilo sav tehnički rad turbine budući da je specifični volumen neohlađenog zraka jako velik pa dakle i tehnički rad komprimiranja:

- $\int_{p_1}^{p_2} v dp \gg$, jer je $v \gg$. (I za ohlađeni se zrak, za razliku od procesa u termoelektrani

s parnom turbinom u kojem se voda pumpom vraća u parni kotao, $\approx \frac{2}{3}$ tehničkog rada turbine troši na komprimiranje zraka kompresorom pa se, dakle, samo $\frac{1}{3}$, u sinkronom generatoru, pretvara u električnu energiju.)

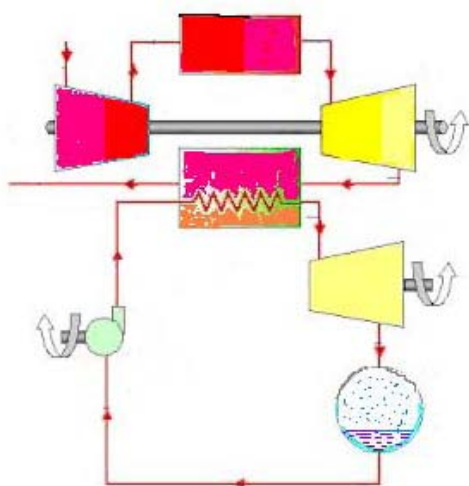
Prednost je zatvorenog procesa, u usporedbi s otvorenim, da za pogon postrojenja može poslužiti i kruto gorivo. U otvorenom procesu naime, Slika 3-411, gorivo izgara u zraku, koristeći kisik iz zraka, tako da smjesa zraka i plinova izgaranja struji kroz turbinu, pa bi krute čestice pepela vrlo brzo uništile lopatice plinske turbine.



Slika 3-41 Shema najjednostavnije izvedbe termoelektrane s plinskom turbinom i otvorenim procesom: K – kompresor, KI – komora za izgaranje, T – turbina, H – hladnjak, G – sinkroni generator, M – motor za pokretanje rada postrojenja

U otvorenom se procesu mora stoga rabiti puno skuplje kapljevito i plinovito gorivo. No, kako su termoelektrane s plinskom turbinom i zatvorenim procesom kompliciranija postrojenja od onih s otvorenim procesom, usprkos spomenutoj prednosti, u današnjoj se praksi više ne grade (osim u iznimnim slučajevima nemogućnosti zadovoljavanja tzv. „vršnih opterećenja“ drugim načinima) tim više što se danas u termoelektranama s parnim turbinama može postići povoljni termički stupanj djelovanja (omjer tehničkog rada turbine i toplinske energije dovedene u kružni proces), a i termoelektrane se s plinskim turbinama i otvorenim procesom sve više upotrebljavaju u „spojnom procesu“ s termoelektranama s parnom turbinom kako to ilustrira Slika 3-422.

(U „spojnom procesu“ smjesom se zraka i plinova izgaranja zagrijava voda (vodena para) u termoelektranama s parnom turbinom.)



Slika 3-42 Shema najjednostavnije izvedbe „spojnog procesa“ – kombinacije rada plinske i parne turbine u termoelektrani

Analiza je energetske pretvorbe i procesa u termoelektranama s plinskom turbinom potpuno istovjetna analizi u termoelektranama s parnom turbinom.