

1 Uvodna razmatranja

Energija i električna energija ili čime ćemo se baviti

Energija, energetske pretvorbe i procesi materijalna su osnova svake civilizacije, a oblici energije koji su dostupni, koji se rabe, određuju stupanj razvoja te civilizacije: tehnološki (i industrijski) razvoj civilizacije prestaje s iscrpljenjem izvora energije (*energetskih izvora*), prestaje s prestankom odvijanja „**energetskih procesa**“. „Naša“ (današnja, trenutačna) civilizacija počiva tako na **električnoj energiji** i na njezinoj pretvorbi u „**korisne oblike energije**“ i malo je vjerojatno da će bitno napredovati ne promijeni li se oblici energije na kojima se razvija.

Energetskim procesima nazivamo procese preobrazbe jednih oblika energije u druge u tehničkim sustavima, a korisni su oblici energije oblici nužni za održavanje života ljudi: mehanički rad (kraće rad), toplinska, kemijska i rasvjetna energija.

(Što je mehanički rad, mehanička, nuklearna, kemijska, unutrašnja kalorička, toplinska energija itd., odnosno o svim za naša razmatranja važnim oblicima energije, detaljno ćemo govoriti kasnije.)

Uočimo li i činjenicu da i današnje („masovne“) komunikacije („elektrokomunikacije“) rabe električnu energiju, te da se na uporabi električne energije temelji i obuhvat, prijenos, obrada, uskladištenje, korištenje i prikaz informacija (što se ponekad naziva „procesiranje znanja“) to dostačno govorи o važnosti opskrbljenosti električnom energijom, odnosno energijom općenito, budуći da se električna energija dobiva transformacijom iz najrazličitijih oblika energije, i o važnosti energetskih procesa: „proizvodnji“, prijenosu, razdiobi (raspodjeli) i uporabi (primjeni, korištenju, iskorištenju, „potrošnji“) električne energije (korisnih oblika energije), odnosno, i o važnosti tema kojima se bavi udžbenik.

Riječ su proizvodnja i potrošnja električne energije (energije) stavlјene u znake naroda budуći da se prema jednom od temeljnih principa (aksioma, postulata, načela, zasada, zakona) svijeta u kojem postojimo, „principu očuvanja energije“, „energija ne može poništiti (potrošiti) ni stvoriti, već samo promijeniti svoj oblik“.

Ako je to tako, logično se nameće pitanje: otkud onda „problem opskrbe energijom“? Zašto govorimo o „gubitcima energije“ kad se energija ne može izgubiti, zašto o „potrošnji energije“ kad se energija ne može potrošiti? Uverit ćemo se, problem opskrbe energijom, pa dakle i električnom energijom, izvire iz jedne druge činjenice u našem svijetu: „potrošnja eksurgije“, odnosno „gubitci eksurgije“ (eksurgija je oblik energije koji se može, u idealnom slučaju, u potpunosti pretvoriti u korisne kao i u sve druge oblike energije) neugodna su realnost naše stvarnosti: već i puko održanje naših života nemoguće je bez energije, no, ne bilo kakve energije već eksurgije – oblika energije koji se po želji može pretvoriti u bilo koji drugi oblik energije. Za potrebe našeg opstanka, pogotovo kvalitetnijeg života, nužno je stalno proizvoditi eksurgiju (poput električne energije koja je eksurgija), budуći da se, u što ćemo se uveriti, eksurgija neprekidno troši rabiljenjem (uporabom, primjenom, korištenjem, iskorištanjem) u, praktički, bezbrojnim procesima i načinima odnosno i kroz prirodne, spontane, samonikle, samopoticanje, samoodržavajuće i nezaustavljive procese izjednačavanja početno nejednolikih raspodjela gustoće energije u jednoliku pretvarajući se u „anergiju“ i postajući time besporvatno izgubljena. (Anergija je oblik energije koji se ne može pretvoriti niti u jedan drugi oblik energije pa, dakle, ni u eksurgiju, ni u korisne oblike energije.) Uobičajeni su pojmovi prema tome, kao što su „proizvodnja energije“,

„potrošnja energije“ i „gubitak energije“, suprotni principu očuvanja energije jer se energija ne može niti proizvesti, niti potrošiti niti izgubiti. Nasuprot tome, što ćemo kasnije potanko razmatrati, „proizvodnja ekservije“, „potrošnja ekservije“, odnosno „gubitak ekservije“, u potpunom su skladu s tzv. „glavnim stavcima termodinamike“ jer se u nepovratljivim (nepovratnim, ireverzibilnim) procesima ekservija troši i gubi, pretvarajući se konačno i nepovratno u anergiju. (Rabit ćemo sintagmu „stavci termodinamike“, a ne „zakoni termodinamike“, budući da se tvrdnje što ih izriču temelje isključivo na istkustvu; nije ih moguće dokazati direktnim argumentom (argumentima), ne radi se, dakle, o zakonima. Uobičajeno govoriti se tako o nullom, prvom, drugom i trećem glavnom stavku termodinamike).

S druge strane pak, uvažavajući uvriježene izraze, i dalje ćemo govoriti o **“proizvodnji i potrošnji (električne) energije“** znajući da se radi o ekserviji.

Električna se energija (ekservija) proizvodi, prenosi, raspodjeljuje i troši, najvećim dijelom, u **„elektroenergetskom sustavu“**. Elektroenergetski se sustav sastoji od elektrana za proizvodnju električne energije („postrojenja za proizvodnju električne energije“: termoelektrana, u koje spadaju i nuklearne, geotermalne i solarne /”sunčeve“/ elektrane, hidroelektrana i vjetroelektrana), rasklopnih postrojenja za razvod i transformaciju električne energije (aparati za uklapanje i isklapanje /prekidači i rastavljači/, transformatori, uređaji za zaštitu transformatora i vodova, uređaji za mjerjenje radi kontrole pogona i obračuna energije, te uređaji za upravljanje uklopnim aparatima i za signalizaciju stanja pojedinih aparata), vodova za prijenos i vodova i kabela za raspodjelu (*razdiobu, distribuciju*) električne energije, različitih (mnogobrojnih) uređaja za vođenje, upravljanje, zaštitu, mjerjenje, kontrolu i signalizaciju rada elektroenergetskog sustava, te potrošačkih uređaja, motora i aparata u kojima se električna energija pretvara u onaj oblik energije koji je potreban za održavanje ljudskog života i aktivnosti (mehanički rad, toplinsku, kemijsku i rasvjetnu energiju). Svi su dijelovi elektroenergetskog sustava električki ili magnetski među sobom tako povezani da električne prilike u jednom dijelu sustava ovise o prilikama u svim ostalim dijelovima. Primjerice, sve elektrane u sustavu rade paralelno povezane s točno istom frekvencijom; danas su u svim razvijenijim zemljama praktički sve elektrane spojene u elektroenergetski sustav bez obzira na vlasnike elektrana i vodova i bez obzira na organizacijske oblike **„elektroprivrede“**.

(Elektroprivreda je grana gospodarstva koja se bavi proizvodnjom, prijenosom i razdiobom /distribucijom, raspodjelom/ električne energije i uskladištanjem njezine potrošnje.)

Osim toga su i elektroenergetski sustavi mnogih (većine) zemalja jedni s drugima povezani, pa u tim slučajevima jedan elektroenergetski sustav pokriva i više zemalja, cijeli kontinent. Današnji je elektroenergetski sustav stoga, najvjerojatnije, najkomplikiraniji među tehničkim sustavima, kojima je zadatak opskrba energijom, ikada izgrađen: izvan svake sumnje on je najveći, najrasprostranjeniji, najutjecajniji, najneophodniji i najskuplji takav tehnički sustav. Zašto? Najkraće, uz dosad spomenuto ulogu električne energije, zato jer je električna energija **„prijezni oblik energije“**. Što to znači? Električna je energija oblik energije koja se očituje samo dok teče električna struja (bilo istosmjerna, bilo izmjenična), samo kada se energija elektromagnetskih polja pretvara u neki drugi oblik energije (mehanički rad, unutrašnju kaloričku, mehaničku, kemijsku i/ili rasvjetnu energiju). Pritom je električna energija jedno od najvažnijih svojstava elektriciteta a pojavljuje se u energetskim procesima odvajanja elektrona iz elektronskih omotača atoma. Odvajanje

se može postići na različite načine uporabom energije (mehaničkog rada): elektromehaničkom energetskom pretvorbom, termoelektričnom, termoioniskom, fotoelektričnom pretvorbom, neposrednom pretvorbom kemijske u električnu energiju u gorivnom članku, magnetohidrodinamičkim generatorom itd. Jedna je od (naj)bitnih značajki električne energije što se ona pojavljuje u dinamičkim procesima, ona je stoga „prijeđazni oblik energije“; ne može se uskladištiti (*akumulirati, sakupiti, nakupiti, nagomilati, zgurnuti, pobraniti, umnožiti na jednom mjestu*) u izvornom obliku nego se mora proizvoditi u trenutku kada je potrebna: npr., kada „upalimo“ televizor, PC ili svjetlo, pretvorbom (transformacijom) iz bilo kojeg drugog oblika energije koji nije anergija. Zbog toga elektrane i cijeli elektroenergetski sustav trebaju biti izgrađeni tako da mogu trenutačno zadovoljiti potražnju za električnom energijom, odnosno, istog časa obustaviti pretvorbu nekog od mnogobrojnih oblika energije u električnu energiju kada, primjerice, „ugasimo“ televizor, PC, svjetlo, ... Danas je električna energija vrlo važan (najvažniji) oblik energije (eksergije) jer je omogućila, po prvi puta u (poznatoj) povijesti čovječanstva, dovođenje energije (eksergije) na mjesto uporabe, na svaki kućni prag, tako da je svatko, doslovce svatko, u svoj njezinu raznolikosti, može po volji jednostavno upotrebljavati služeći se različitim napravama i uređajima.

*Primjerice, osoba koja glača raspolaze sa snagom većom od snage šestoro volova i, za razliku od volova koje treba braniti i koji tek oko 8% energije unesene branom pretvaraju u korisni oblik energije (mehanički rad), beskonačnom (teoretski gledano) energijom (eksergijom). U posljednja se tri i pol desetljeća XX. st. svjetska potrošnja energije povećala tri puta, s bitno većim udjelom potrošnje električne energije. Najveće je povećanje zabilježeno u razvijenim zemljama, gdje je tehnički napredak, pa i porast proizvodnosti, većinom izravno ili neizravno povezan s uporabom električne energije. Između potrošnje električne energije te gospodarskog rasta i blagostanja postoji u velikom broju zemalja prepoznatljiv odnos. Na kraju tog razdoblja godišnja je potrošnja električne energije po stanovniku bila najveća u Norveškoj (više od 25.000 kWh), a najmanja u Kambodži (8 kWh). U SAD je ta potrošnja bila veća od 12.000 kWh, a u Hrvatskoj oko 3.000 kWh. Iako zemlje u razvoju predstavljaju tri četvrtine čovječanstva, one troše samo jednu četvrtinu ukupno iskorištene energije u svijetu i samo jednu desetinu ukupne električne energije. Električna je energija nedostupna približno dvijema milijardama ljudi (u nerazvijenim zemljama). Prema (nekim) predviđanjima, iz 1990. godine, do 2010. godine, u razvijenim će zemljama potrošnja **primarnih oblika energije** porasti 1,9 do 2,1 puta, a električne energije 2,4 do 2,5 puta. U zemljama u razvoju odgovarajući će porast biti 1,1 do 1,2, odnosno 1,2 do 1,4. Prema tim će predviđanjima, povezano s gospodarskim razvojem i brojnim drugim okolnostima, do 2050. godine, potrošnja primarnih oblika energije porasti 3 do 5 puta, a potrošnja električne energije 5 do 7 puta.*

Uz mehanički rad i mehaničku energiju, električna je energija jedini oblik energije koji se može neograničeno pretvarati u druge oblike energije. (Potpuna je pretvorba međutim, istaknimo, moguća samo u povratljivim (*idealnim, povratnim, obratnim / obrtljivim, reverzibilnim*) procesima.) U usporedbi s pretvorbama drugih oblika energije (eksergije), konverzija je električne energije u korisne oblike, na mjestu na kojem se zbiva, najjednostavnija, najpouzdanija, najsigurnija, najbrža, najčistija, najudobnija, pa stoga u ukupnosti i najekonomičnija. Naime, električna se energija (eksergija), u usporedbi s drugim oblicima eksergije, najekonomičnije prenosi (na velike udaljenosti). Njezina važnost u općoj opskrbi energijom postaje još veća i sve veća jer će se, primjerice, u budućnosti, većina tzv. „**nekonvencionalnih primarnih oblika energije**“ moći iskoristiti tek nakon pretvorbe u električnu energiju.

„**Primarni oblici energije**“ oblici su energije što se nalaze u prirodi, ili se u njoj pojavljuju, a svrstavaju se, prema nositeljima („gorivima“), u „**konvencionalne**“ (koji se danas uobičajeno i najčešće upotrebljavaju) i „**nekonvencionalne oblike energije**“. Konvencionalni su oblici energije (točnije, njihovi nositelji): ogrevno drvo, treset, ugljen, sirova nafta i prirodni plin (nazivaju se gorivima, a ugljen, sirova nafta i prirodni plin nazivaju se još i „**fosilnim gorivima**“), zatim vodotoci (potencijalna / gravitacijska/ energija vodotoka), nuklearna goriva (uranij i torij) i vrući izvori, a nekonvencionalni: uljni škriljevc i bituminozni pjesak, plima i oseka, vjetar, valovi, Sunčev zračenje, more, sube stijene u Zemljinoj kori i laki atomi (energija fuzije).

S obzirom na oblik primarne energije radi se o ovim oblicima: **kemijska energija** (nositelji drvo, treset, ugljen, sirova nafta, prirodni plin, uljni škriljevi i bituminozni pjesak), **nuklearna energija** (nositelji uranij, torij, laki elementi upotrijebljivi za fuziju), **gravitacijska potencijalna energija** (nositelji vodotoci, valovi, plima i oseka), **kinetička energija** (vjetar), **unutrašnja kalorička energija** (nositelji vrući izvori, sube stijene i more) i **energija zračenja (Sunčev zračenje)**.

Osim podjele na konvencionalne i nekonvencionalne oblike energije, primarni se oblici energije mogu podjeliti i s obzirom na obnovljivost njihovih nositelja (goriva) u dvije skupine: primarni oblici koji se prirodno obnavljaju i oni koji se ne obnavljaju. „**Obnovljivi**“ su oblici: Sunčev zračenje koje se neposredno iskorištava (Sunčeva energija u užem smislu, jer je pretežita (golema) većina svih oblika energije na Zemlji u krajnjem posljedica Sunčeve aktivnosti), vodne snage, energija vjetra, plime i oseke, valova i unutrašnja kalorička energija mora, a „**neobnovljivi**“: fosilna goriva (ugljen, nafta i prirodni plin) i nuklearna goriva, Zemljina unutrašnja kalorička energija koja se pojavljuje na površini (vrući izvori), unutrašnja kalorička energija u Zemljinoj unutrašnjosti i laki atomi potrebni za fuziju.

Primarni se oblici energije mogu nadalje podjeliti, s obzirom na tehničku mogućnost i ekonomsku opravdanost iskorištavanja, u tri skupine: oblici energije za koje nije tehnički riješen način iskorištavanja; oblici energije za koje je riješen način tehničkog iskorištavanja, ali su oni – prema današnjem shvaćanju – ekonomski nepovoljni da bi se u većoj mjeri iskorištavali; i energijski oblici kojih je uporaba i ekonomski opravdana.

Nijedan od primarnih oblika energije koji se obnavljaju nije moguće transportirati onakav kakav se pojavljuje u prirodi, a većina primarnih oblika koji se ne obnavljaju transportira se u prirodnom obliku. To vrijedi naročito za fosilna i nuklearna goriva koja danas čine znatan dio međunarodne trgovine.

Većinu oblika energije koji se obnavljaju nije moguće akumulirati (vjetar, plima i oseka, energija valova, Sunčeva energija), pa se njima valja služiti u času kad se pojavljuju. (Akumuliranje je vodnih snaga moguće, ali su za to potrebna velika ulaganja.) Nasuprot tome, primarni oblici energije koji se ne obnavljaju daju se uskladištiti bez većih poteškoća i zatim iskorištavati prema potrebama.

Uporabom se električne energije nadalje, što je iznimno važno, smanjuje štetan utjecaj energetskih pretvorbi na okoliš: izbjegava se iscrpljivanje prirodnih izvora koji se ne obnavljaju (minerali, fosilna goriva) i sprječava onečišćenje prirodnih izvora koji se ciklički iskorištavaju (zrak, voda, zemlja i sl.), kako ono ne bi premašilo granice prirodnog obnavljanja. Drugim riječima, uporaba električne energije omogućuje „**održivi razvoj**“.

(Ne postoji još uvijek opće prihvaćena definicija održivog razvoja. Najблиža je tome ona koja govori da je održivi razvoj onaj koji, zadovoljavajući potrebe današnjice, ne ugrožava mogućnosti zadovoljavanja potreba sutrašnjice.)

U ovom ćemo udžbeniku prvenstveno razmatrati samo one energetske pretvorbe i procese koji su temeljni za proizvodnju električne energije; procese koji se odvijaju u postrojenjima za proizvodnju električne energije: termoelektranama (nuklearnim, geotermalnim i solarnim elektranama), hidroelektranama i vjetroelektranama - do pretvorbe u mehanički rad. (Ostale procese, neophodne za rad /funkcioniranje/ elektroenergetskog sustava, izučavat će drugi predmeti i udžbenici.) Zbog cjelovitosti, međutim, i njihove sve veće važnosti u opskrbi električnom energijom, u drugom ćemo dijelu udžbenika opisati i procese „izravne, neposredne, direktnе“ pretvorbe unutrašnjih oblika energije u električnu energiju (bez prethodne pretvorbe u toplinsku energiju): procese poput termoelektrična, termoionska i fotoelektrična transformacija, neposredna transformacija kemijske energije u električnu (gorivna ćelija), magnetohidrodinamički generatori,...

Pritom se ne ćemo detaljnije baviti fizičkim izvedbama postrojenja; bavit ćemo se prvenstveno **pravilnostima koje upravljaju energetskim procesima preobrazbi energije** potanko gradeći sliku o energiji i opskrbi energijom pokušavajući odgovoriti i na pitanje **kako rješavati (rješiti) ili ublažavati (ublažiti) „problem opskrbe energijom“?**

Uočit ćemo, razmatrajući takve energetske procese, da se temelje na tvarima čija je uloga **preuzimanje energije iz sustava** (jednog ili više; pojam sustava definirat ćemo uskoro), **pohranjivanje (akumuliranje, uskladištavanje)**, **prenošenje (transportiranje, transferiranje)**, **preobražavanje (pretvaranje, transformiranje, konvertiranje, preoblikovanje)** i konačno **predaja** u drugi sustav ili sustave, odnosno okolicu. Primjerice, u „klasičnim“ (konvencionalnim) termoelektranama to je voda i vodena para, odnosno plin u termoelektranama s plinskim turbinama. U hidroelektranama - voda. U nuklearnim elektranama uz vodu i vodenu paru te plin to mogu biti organske tvari ali i kovina. U motorima s unutrašnjim izgaranjem, smjesa plinova. To može biti i plazma u nekim transformacijama (magnetohidrodinamički generatori). Zajedničko je pritom međutim da je ta tvar, koju nazivamo (**radnim**) **medijem, posrednikom ili djelatnom tvari, fluid (tekućina)**, odnosno da je u **fluidnom (tekućem)** stanju: voda, vodena para, najrazličitiji plinovi odnosno smjese plinova, živa, rastaljena kovina ili organske tvari, itd.

(Preporučena je hrvatska riječ za fluid tekućina. U tom slučaju govorimo, s obzirom na aggregatno stanje fluida (tekućina), o **kapljevinama ili plinovima**. Tekućine (fluidi), u kapljevitom aggregatnom stanju, smještene u posudu, koju djelomično ispunjuju, poprimaju oblik posude i formiraju „slobodnu površinu“ na granici s okolišnom atmosferom, a izbačene u atmosferu, u obliku tankog mlaža, kapljevine se raspršuju formirajući sitne kapljice – otuda naziv; plinovi ne formiraju kaplje. Plinovi pak, za razliku od kapljervina, šire se svakim raspoloživim im prostorom.)

Morat ćemo stoga upoznati svojstva (*karakteristike, značajke, obilježja*) i ponašanje fluida promatrajući energetske pretvorbe i procese što se odvijaju u postrojenjima za proizvodnju električne energije u cijelini kao i u pojedinim podsustavima (dijelovima, elementima) tih postrojenja. (Nuklearne procese u nuklearnim elektranama u ovim našim razmatranjima ne ćemo potanko izučavati, njima se bare drugi predmeti; upoznat ćemo ih samo do razine koja će nam omogućiti razumijevanje biti energetskih pretvorbi u nuklearnim elektranama kao i prijeporna pitanja povezana s radom nuklearnih elektrana.) Sva ćemo naša razmatranja

provesti, najjednostavnije i najlakše, oslanjajući se na neke od temeljnih principa (načela, zasada, aksioma), na principe očuvanja, odnosno na neke zakonitosti materijalnog svijeta u kojem živimo:

princip očuvanja (održanja, konzervacije) mase (točnije, princip očuvanja mase i energije);

princip očuvanja količine gibanja;

princip očuvanja momenta količine gibanja;

princip očuvanja energije (točnije, princip očuvanja mase i energije) - prvi glavni stavak termodinamike;

princip rasta entropije (drugi glavni stavak termodinamike) i jednadžbe stanja tvari.

Zašto ćemo se služiti principima očuvanja? Zbog toga jer ti principi izriču da određene „stvari“ moraju ostati nepromijenjene (neizmijenjene) bez obzira na to kakvi su se procesi odvijali u postrojenjima za proizvodnju električne energije olakšavajući tako analize pretvorbi energije i energetskih procesa. No, prije nego li započnemo s upoznavanjem energetskih pretvorbi, procesa i fluida, morat ćemo odgovoriti na pitanje što je energija.

1.1 O važnosti opskrbe energijom

Živimo u razdoblju kad se ponovno, možda najočiglednije u (poznatoj) povijesti čovječanstva, željeli to ili ne, sučeljavamo s dva životna tijeka; dakle, s tijekovima o kojima ovisi naš opstanak i opstanak naše civilizacije: s tijekom energije i s tijekom znanja, odnosno informacija (obavijesti). Budući da je i tijek znanja u osnovi energijski, to dostatno govori o važnosti energije i važnosti opskrbljenosti energijom, a potvrđuje se kroz ulogu elektroenergetskog sustava.

(Elektroenergetski je sustav najveći, najrasprostranjeniji, najkomplikiraniji (naj složeniji), najneophodniji, najskupljii i najutjecajniji tehnički sustav upravo zbog toga jer je opskrba energijom zahtijevanih oblika opstojni temelj gospodarstva (prosperiteta, napretka i blagostanja) svake zemlje.)

Da bi se proširila slika o važnosti opskrbe energijom i ulozi iskorištavanja energije, na današnjem stupnju razvoja, često se navodi podatak da je u posljednjih tridesetak godina prošlog stoljeća iskorišteno više energije negoli u tijeku cijelog povijesnog razdoblja prije toga, kao i podatak da je u zadnjih dvadesetak godina prošlog stoljeća potrošeno više sirove nafte negoli u cijelom dotadašnjem povijesnom razdoblju, te predviđanje da će se u još kraćem razdoblju u budućnosti to ponovno dogoditi iako će, kako se očekuje, relativna potrošnja nafte opadati. Predviđa se dakle, promatrajući svijet u cjelini, daljnje veliko povećanje potreba za energijom usprkos istodobnom očekivanju da će u najrazvijenijim zemljama potrošnja energije praktički stagnirati ili da će se ostvarivati uz vrlo mali porast. Naime, nekoliko činjenica upućuju na daljnji porast potrošnje energije. Prvo, maleni se porast potrošnje energije očekuje jedino i samo u zemljama s vrlo velikom uporabom energije po stanovniku, nekoliko puta većoj od prosječne u svijetu, dok se u svim drugim zemljama očekuje bitan porast potrošnje energije budući da je porast iskorištavanja energije u svijetu, kao cjelini, uvjetovan s jedne strane porastom stanovništva, a s druge strane razvojem zemalja koje se danas smatraju nerazvijenim ili zemljama u razvoju. Drugo, budući da je za održanje današnje civilizacije presudno ispuniti ova dva zahtjeva: izbjegći iscrpljivanje

prirodnih izvora koji se ne obnavljaju (minerali, fosilna goriva), i spriječiti onečišćenje prirodnih izvora koji se ciklički iskorištavaju (zrak, voda, zemlja i sl.) kako ono ne bi premašilo granice prirodne regeneracije, problem se svodi na energetski. Problem se, naime, očuvanja, odnosno smanjenja trošenja rezerva, svodi na činjenicu da se sve osnovne tvari mogu iskorištavati u zatvorenom ciklusu, ali je za njihovu ponovnu pripremu potrebna energija. Isti se problem pojavljuje pri pročišćavanju zraka i vode, pri dobivanju novih količina slatke vode (npr., iz mora desalinizacijom). Treće, to isto vrijedi i za povećanje proizvodnosti u poljoprivredi (natapanje, mehanizacija, proizvodnja umjetnih gnojiva) budući da će se, u svjetskim razmjerima, uz povećani broj stanovnika, pojavitи (već se pojavio u određenoj mjeri) i problem dostatne proizvodnje hrane, dakle i opet energije. Naglasimo li zatim i da zadovoljenje potreba za energijom zahtijeva velika ulaganja i znatnu proizvodnju opreme za energetska postrojenja, uređaje i energetska trošila, zahtijeva, dakle, u osnovi, energiju, bit će jasno da će, zbog ključne pozicije energije kao, moglo bi se reći, univerzalnog izvora, i zbog razvoja nedostatno razvijenih područja, potrebe energije po stanovniku još dugo rasti, vjerojatno i nakon što se, iz bilo kojeg razloga, stabilizira broj stanovnika na našem planetu. Opskrba će i gospodarenje energijom zbog toga postajati sve važnijim područjem bavljenja i istraživanja tim važnijim jer zadovoljenje potreba za energijom izaziva, i izazivat će još više u budućnosti, političke sporove i sukobe budući da su i nalazišta pojedinih oblika energije i sirovina nejednoliko geografski raspodijeljena i ograničena, a u prošlosti se ta ograničenost nije uzimala u obzir. To je bilo i opravdano sve dok je iskorištanje bilo malo u odnosu na rezerve, pa su rezerve izgledale neiscrpljive. Danas međutim, kad je iskorištanje nekih oblika energije i sirovina dostiglo takvu razinu da se procjenjuje da će zalihe biti iscrpljene i za manje od stotinjak godina, mora se postupati oprezno i racionalno. Drastični naime primjeri posljedica nepostojanog i nedostatnog dobavljanja energije, u našem dobu, zabilježeni u razdoblju drugog svjetskog rata i zatim za vrijeme tzv. dueske krize (1956.) i energetske krize (1973.) kada je započelo povećavanje cijena nafte, te u razdoblju nakon 1979. godine (iranska revolucija) i 1980. godine (iračko-iranski sukob) koje bilježi daljnja povišenja cijena nafte, trenutačna zbivanja u Iraku i s Iranom, te, napokon, naše vlastito iskustvo, vezano uz najteže i najtragičnije događaje u Republici Hrvatskoj, u razdoblju nakon 1991. godine, kad je počela srpsko-crnogorska agresija s golemlim razaranjima, između ostalog, i energetskih objekata, upućuju na to.

Posljedice su pritom nedostatka energije u bilo kojem razdoblju povijesti čovječanstva uvijek (u osnovi) iste potvrđujući da je energija doista temelj svake civilizacije te da se ona bitno mijenja ili nestaje ugrožena li je opskrba energijom. Posljednjih godina prošlog stoljeća, i prvih ovog, ta iskustvena činjenica postaje sve više neugodnom spoznajom dosad nezainteresiranog mnoštva. Svjedoci smo, ponovno i ponovno, "krize energije" koja traje ili prijeti neprekidno od 1973. godine i biva tek kroz kraća međurazdoblja, tu i tamo, nakratko otklonjena, potisnuta ili ublažena. Zamislimo li na trenutak revoluciju, recimo, u Saudijskoj Arabiji, ili neki novi sukob među arapskim zemljama dobavljačicama nafte, ili sukob u koji su uvučene, i svijet će se, najvjerojatnije, naći u krizi kakvu moderna povijest čovječanstva ne pamti niti poznaje.

9.XI.1965. godine tridesetak je milijuna stanovnika sjeveroistočnog dijela SAD-a, površine veće od 208.000 kvadratnih kilometara (ploština je kopnenog dijela Hrvatske 56.414 kvadratnih kilometara), ostalo bez električne energije. Prekid je opskrbe trajao 12 sati. 13.VII.1977. cijeli je New York utonuo u potpuni mrak. Udar munja u ključnu trafostanicu izazvao je „raspad“ elektroenergetskog sustava (prekid opskrbe električnom energijom) što je najveći američki grad bacilo u

neopisivi kaos s brojnim nesrećama, ubojstvima i pljačkama, (ponorno) pokazarići svu nemoc moderne civilizacije bez električne energije. 14.VIII.2003. 50 je milijuna ljudi sjeveroistočnog dijela SAD-a i istočne Kanade ostalo bez napajanja električnom energijom: 40 milijuna u 8 država SAD-a i 10 milijuna u kanadskoj provinciji Ontario; procijenjene štete izazvane prekidom opskrbe iznose 6 milijardi američkih dolara. 28.IX.2003. raspad elektroenergetskog sustava pogada Italiju (s iznimkom otoka Sardinije) i dio Švicarske (ženevski kanton). Prekid je opskrbe električnom energijom trajao 9 sati u Italiji (neka su područja Italije, 5%, ostala bez električne energije i 24 sata), 3 sata u Švicarskoj, obuhvaćajući 56 milijuna ljudi. (Brazom reakcijom, odvajanjem elektroenergetskog sustava od europskih, Hrvatska je izbjegnula raspad svog elektroenergetskog sustava.) I uopće, 2003. je godina, zbog brojnih razloga o kojima ne ćemo govoriti u ovom udžbeniku, „obilovala“ većim brojem raspada elektroenergetskih sustava odnosno raspada dijelova elektroenergetskog sustava. Uz dosad spomenute, ove su još zemlje pretrpjеле raspad (dijelova) svojih elektroenergetskih sustava: 28.VIII. London, 500.000 ljudi ostalo je bez napajanja električnom energijom; 2.IX. 5 država (od njih 13) Malezije i glavni grad Kuala Lumpur; 23.IX. 5 milijuna ljudi u Danskoj i južnim dijelovima Švedske pogodeno je raspadom danskog i dijela švedskog elektroenergetskog sustava; 20.XII. San Francisko je ostao „u mraku“. Od 1965. godine, do (zaključno) 2005., zbilja su se 23 raspada elektroenergetskih sustava diljem svijeta. Riječ je pritom samo o raspadima većih razmjera koji, izazvani najrazličitijim djelovanjima i uzrocima, dijelom i izvan elektroenergetskih sustava, iznova i iznova upozoravaju na neopstojnost naše civilizacije bez raspolaganja s električnom energijom.

Posljedice neopskrbljenosti energijom uvijek, uglavnom, ukazuju na ovo:

nedostatak energije, posebice za vrijeme rata i u poslijeratnom razdoblju, ili u razdobljima sukoba u koje su „uvučene“ zemlje opskrbljivača naftom ili prirodnim plinom, ugrožava redoviti život današnjeg društva pa radi li se i o relativno malom pomanjkanju energije: i najmanja ograničenja u potrošnji energije uzrokuju velike poteškoće u proizvodnji, prometu i kućanstvima;

postoji jasno uočljiva korelacija između potrošnje energije u svakoj zemlji, s jedne strane, i ukupne proizvodnje i bogatstva zemlje, s druge strane. Ta je korelacija razumljiva jer ukupna proizvodnja ovisi o raspoloživoj energiji pa je energija doista jedan od najbitnijih preduvjeta za prosperitet i snagu bilo koje zemlje. (*Primjerice, proizvodnja je žita u SAD porasla od 1945. godine do 1970. godine 2,4 puta, a potrošnja energije za tu proizvodnju 3,1 puta.*);

pouzdana je i sigurna opskrba energijom, između ostalog, uvjetovana i međunarodnom trgovinom različitim oblicima energije, što znatno utječe na bilance novčanih (deviznih) sredstava zemlje i time, povratno, na pouzdanost opskrbe potrošača energijom.

Dostatna opskrba energijom sadrži stoga tri čimbenika koji se ne mogu zaobići:

cijenu energije i troškove opskrbe energijom: da bi, naime, bilo koji proizvod uopće mogao biti konkurentan na međunarodnom tržištu, proizvodnja se mora, pokraj ostalog, opskrbljivati energijom po što nižoj cijeni;

raspoloživost deviznim (novčanim) sredstvima: njihova ograničenost zahtijevat će u protivnom traženje dugoročnih rješenja uz prioritetno iskorištavanje vlastitih energetskih izvora, pa i onda kad je to ekonomski promatrano nepovoljnije; i

pouzdanost i sigurnost opskrbe energijom: to upućuje također na vlastite energetske izvore ili na one oblike energije koji se mogu bez većih troškova uskladištiti za dulje vremensko razdoblje (nuklearna energija primjerice).

Mišljenja se pak o važnosti i prioritetu ovih triju aspekata često mijenjaju, a prihvaćanje jednog na račun ostalih uzrokuje bitne promjene u praktičnoj energetskoj politici utječući tako i na razvoj energetskih grana.

Pogledajmo sada „kako je sve počelo“, a „kako je danas“.

Ukupna je i jedina potrošnja energije homo sapiensa bila energija unesena hranom: 8 MJ po ljudskom biću u danu; isključivo je zanimanje bilo prehranjivanje. Danas ljudsko biće troši hraneći se, u prosjeku (svjetski projekti), usprkos zaprepašćujućim brojevima gladnih i umiranja od gladi svakodnevno, oko 8,4 MJ, a stanovnik "zapada" (razvijenih zemalja) oko 12,6 MJ energije.

(*Neandertalac je, živeći u vrlo hladnoj klimi, trošio mnogo više energije u hrani: oko 42 MJ.*)

Ukupna je potrošnja energije, međutim, po stanovniku planeta 175 MJ po danu.

(*Pritom stanovnik SAD-a troši 950 MJ: kada bi svi stanovnici Zemlje trošili toliko energije morali bismo, u ovom trenutku razvoja, raspolagati s nekoliko planeta poput Zemlje.*)

Da bismo spoznali što znači tih 175 MJ po stanovniku planeta dnevno, provedimo jednostavni račun. Mi, "električari", volimo energiju iskazivati u Wh ili kWh, MWh, GWh ili TWh.

(*1W = 1J/s; 1Wh = 1J/s•3600s = 3600J; 1kWh = 3600•10³J = 3,6•10⁶J = 3,6MJ. Što znači raspolagati s (električnom) energijom (eksergijom) iznosa 1kWh? S tom se eksersijom podiže 50 kg (vreća cementa) 7,3 km u vis. Koliko bi energije (hrane i pića) i vremena trebalo čovjeku da takvu vreću odnese na planinu visoku 7,3 km?*)

Ljudsko biće treba 3500 Wh (12,6 MJ) energije u hrani da bi sa snagom od 60 W moglo raditi 5,5 sati dnevno. (Više ne može, umrlo bi od iscrpljenosti.) Energetski je stupanj djelovanja pritom oko 10%. Drugim riječima, tek približno 10% energije unesene hranom može čovjek pretvoriti u mehanički rad. (Očito, rad, mehanički rad, i energija u hrani različiti su oblici energije, različiti po "kvaliteti", po sposobnosti preobrazbe u druge oblike energije: o tome ćemo govoriti kasnije.) Odnosno, kada bismo 175 MJ po danu osiguravali ljudskim radom za svakog bi stanovnika Zemlje trebali raditi 147 robova. A tko bi proizvodio hranu za te robeve? Otkuda potrebita energija za proizvodnju hrane?

*Vrlo je jasno dakle, s energetskog stajališta, zašto su propale robovlasničke civilizacije poput egiptanske, grčke, rimske itd.: opskrba energijom na temelju ljudskog rada energetski je neodrživa: fizički je ljudski rad energetski preskuš, nemoguć. (Upravo zbog toga mnoge se okolnosti karakteristične za ta razdoblja bitno razlikuju od današnjih: primitivni je čovjek (*homo sapiens*) živio, u prosjeku, 18 godina, stari Egipćanin 29, stari Rimjanin 22. (Europljani su u XIX. stoljeću u prosjeku živjeli 37 godina, u XX. 70, dok se očekuje da će u XXI. stoljeću živjeti 120 godina.) U vrijeme Gaja Julija Cezara (100. - 44. god.pr.Kr.) na Zemlji je živjelo samo 150 milijuna ljudi.)*

U okvir opskrbe energijom ne uključuje se problem prehrane iako prehrambeni proizvodi sadrže energiju neophodnu za održanje života ljudi i životinja. Vrijednost je hrane, naime, mnogo veća od vrijednosti goriva. Tako, primjerice, pšenica ima energetsku vrijednost koja je samo polovica količine energije pobranjene u kamenom ugljenu, ali joj je na tržištu novčana vrijednost mnogostruko veća,

dakako za jednaku masu. Drugim riječima, jednaka količina energije u pšenici vrijedi bitno više od iste količine energije pobranjene u ugljenu. Pritom se za proizvodnju jedne tone žita (u SAD) troši nešto manje od 1700 kWh energije; većim se dijelom radi o potrošnji ekservije. (Usporedbe radi, potrošnja je električne energije po stanovniku u Hrvatskoj godišnje nešto malo veća od 3000 kWh u ovom trenutku, 2006. godina.)

Opravdani su razlozi da se problem prehrane odijeli od problema opskrbe energijom. Prehrana je, naime, specifični oblik energije koji mora imati posebna i točno određena svojstva: derivati najte, npr., nisu upotrebljivi kao hrana premda se radi o istom obliku uskladištene energije, kemijskoj energiji. Nadalje, prehrabeni proizvodi imaju, s obzirom na životne potrebe, bitnu prednost pred svim drugim oblicima energije. Zbog toga se ne usporeduju, npr., potrebne količine energije (za natapanje, obradu zemljišta, umjetna gnojiva, zaštitna sredstva i žetu) za proizvodnju pšenice s energetskom vrijednošću proizvedene pšenice, jer se radi o oblicima energije koji se ne mogu međusobno uspoređivati, pa se stoga potrebna energija za prehranu razmatra odvojeno od svih drugih energetskih potreba.

Naglasimo na kraju ovog razmatranja ponovno nezamjenjivu ulogu električne energije u današnjoj opskrbi energijom: otkrićem je električne energije po prvi puta u povijesti čovječanstva omogućeno ljudskom biću („modernom čovjeku“) da, na krajnje jednostavan način, raspolaze s (teoretski, pa i praktički) golemin (beskonačnim) količinama energije (ekservije) što je i, posljedično, izazvalo veliko povećanje potrošnje energije (ekservije).

1.2 O energetskom i elektroenergetskom sustavu, energetici i elektroenergetici

Energetski se sustav, a posebice elektroenergetski sustav, svojom prirodnom razlikuje od većine drugih tehničkih sustava. Nužno je stoga, tražeći načine dostatne, što jeftinije, pouzdane i sigurne opskrbe energijom, istaknuti najprije najbitnije značajke oba sustava.

Temeljna je djelatnost energetskog sustava zadovoljiti sustav potrošača (kupaca) toliko gospodarstveno svrshodno koliko je to moguće unutar razumske granice neprekidnosti i kakvoće (kvalitete). Pobliže ta se djelatnost opisuje zadatkom dobavljanja energije zahtijevanog oblika, pa, dakle, i pretvorbom primarne energije u korisnu i raspodjelom do konačnog potrošača, te je u načelu određena s nužnošću pronaalaženja optimalnog rješenja opskrbe, što ovdje znači najmanje štetnog rješenja, uz uvažavanje pritom zahtjeva poput: dosta, pouzdana, kvalitetna i ekonomična (jeftina, štedljiva, racionalna) opskrba energijom promatranog područja u predviđenom razdoblju, ali i uz razboritu (racionalnu) uporabu energije od strane potrošača i očuvanje okoliša.

Teškoće nalaženja zadovoljavajućeg, najmanje štetnog rješenja izviru, između ostalog, i iz odnosa među zahtjevima; svaki od zahtjeva ovisan je o drugima. Na primjer, pouzdana i sigurna opskrba energijom ovisi o zalihosti i pričuvu u sustavu, o troškovima primijenjene tehnologije za pretvorbu, prijenos, razdiobu i potrošnju energije, ali i o, u rastućoj mjeri, zahtjevima potrošača (kupaca), odnosno cijelog društva. Prevladavanje svih teškoća i nalaženje optimalnog rješenja zadatak je ENERGETIKE odnosno i ELEKTROENERGETIKE. Pritom, najopćenitije promatrano, ENERGETIKU smatramo znanostu (skupom znanstvenih disciplina)

koja se bavi izučavanjem energije, njenih izvora, tehničkog korištenja izvora energije i svega što je s time u svezi:

- procesima pretvorbe, preobrazbe, transformacije, ili, kako se još govori, konverzije različitih oblika energije u traženi, zahtijevani oblik, prijenosom i razdiobom energije, i
- ekonomskim iskorištavanjem energetskih izvora i energije (postupcima njezine racionalne uporabe) odnosno i ekonomskom raspodjelom i primjenom energije u različite svrhe uz očuvanje okoliša (razmatranje utjecaja i posljedica proizvodnje i iskorištavanja energije na okoliš, odnosno, ekološke prihvatljivosti uporabe energije).

Tako shvaćena znanstvena disciplina, energetika, sadrži ovisnosti koje vrijede kako za najvažnije primarne oblike energije, kao što su vodne snage (potencijalna energija vodotoka) i goriva u širem smislu (dakle i nuklearna goriva), tako i naročito za električnu energiju (eksergiju) kao najvažniji od transformiranih oblika energije. Električna energija, naime, kao transformirani oblik energije fosilnih goriva, nuklearne energije, hidroenergetskog potencijala, vjetra, valova, Sunca itd., predstavlja nerazdvojni dio i, po svemu sudeći, najbitniji dio energetike na današnjem stupnju razvoja znanosti, tehnologije i tehnike, budući da je to oblik energije na kojem počiva naša (trenutačna) civilizacija. Zbog toga se u okviru energetike razvija specijalizirana znanstvena disciplina, *ELEKTROENERGETIKA*, koja se u područjima elektroprivrede odnosi na istraživanje, studiranje, planiranje, projektiranje, izgradnju, vođenje i upravljanje, te eksplataciju elektroenergetskih objekata (sustava) koji ulaze u jedinstveni tehnološki proces proizvodnje, prijenosa, razdiobe i potrošnje električne energije. (*Danas nije više posve jasno je li je elektroenergetski sustav podsustav energetskog sustava ili obratno.*) Razvoj je elektroenergetike svake zemlje tjesno povezan s razvojem ostalih grana energetike i stoga se ne može promatrati odvojeno tim više što je pokraj toga kako elektroenergetika tako i energetika povezana sa cijelokupnim ekonomskim i društvenim razvojem, dakle povezana sa skoro cijelokupnim životom i razvojem zemlje na gospodarskom, vojnem, društvenom i privatnom području te i s nizom znanstvenih, tehničkih, tehnoloških, ekonomskih, financijskih, političkih, ekoloških itd. čimbenika. Elektroenergetika je stoga danas klasična elektrotehnika proširena mnogim najsuvremenijim spoznajama i područjima istraživanja:

teorijom vođenja i upravljanja složenim sustavima;
metodama optimiranja i racionalizacije, regulacije i automatizacije;
teorijom pouzdanosti, informacije, ekspertnih sustava;
metodama očuvanja i zaštite ljudskog okoliša, metodama racionalnog korištenja energije;
različitim ekonomskim metodama itd.

Sažeto rečeno, osnovni se zadatak i problem razvoja elektroenergetike, slično kao i energetike, nekog područja svodi na određivanje optimalnog rješenja dostatne, pouzdane, kvalitetne i ekonomične opskrbe promatranog područja električnom energijom i snagom u zahtijevanom razdoblju, ali uz racionalnu uporabu električne energije i snage od strane potrošača i očuvanje okoliša.

Razmotrimo postavljene uvjete.

- 1) "dostatna opskrba" energetska je (ali i ekomska) kategorija koja predstavlja nužnost da se bilo kojem potrošaču osigura nesmetan razvoj s obzirom na količinu potrebite električne energije; ne smije se dogoditi da je, u bilo kojem trenutku, bilo kojem potrošaču (kupcu), električna energija nedostupna ma o kojoj god se količini radilo;
- 2) "pouzdana opskrba" matematički je pojam teorije vjerovatnosti (i danas već samostalne znanstvene discipline, „teorije pouzdanosti“), što znači da treba predviđjeti racionalnu vjerovatnost nesmetane opskrbe električnom energijom potrošača i u slučajevima nenadanih kvarova i ispada iz pogona pojedinih dijelova elektroenergetskog sustava i elemenata ili u slučajevima drugih uzroka neredovite opskrbe električnom energijom;
- 3) "kvalitetna opskrba" u ovom je smislu elektrotehnički pojam što znači da vrijednosti frekvencije i napona moraju biti unutar dopuštenih granica budući da su njihove zahtijevane vrijednosti neophodan uvjet za ispravni rad električnih aparata i uređaja i to kako proizvodnih tako i potrošačkih;
- 4) "ekonomična opskrba" ekomska je ali i tehnička kategorija što predstavlja težnju da troškovi proizvodnje, prijenosa i razdiobe električne energije, tj. cijelog procesa uključivo sve do potrošača (kupaca), budu što niži. Pod pojmom "ekonomičnost" podrazumijevamo ekonomičnost s obzirom na elektroenergetski sustav kao cjelinu. (*Elektroenergetski je sustav (EES), ponovimo, skup elektrana, transformatorskih stanica, dalekovoda (prijenosnih mreža), razdjelnih mreža i potrošačkih postrojenja, uređaja i aparata, u kojem mora biti u svakom trenutku ostvarena točno tolika proizvodnja električne energije koliko traže potrošači.*) Na mrežu se EES-a potrošači (trošila) priključuju onako kako žele, u trenutku kada to žele, praktički bez ikakvih ograničenja, a EES mora biti sposoban zadovoljiti svaku potražnju (potrošnju električne energije) koja se može pojaviti. Dakako, ta potražnja ima stohastički (vjerovatnosni) karakter i može se, pogodnim metodama, s više ili manje sigurnosti (pouzdanosti), predvidjeti. To vrijedi i za dinamiku razvoja potražnje u duljem vremenskom razdoblju i raspored te potražnje za dan ili više dana unaprijed. Takve su analize potrebite da se pravodobno predviđe neophodna gradnja novih elektrana (izgradnja je elektrana dugotrajna), vodova, transformatorskih stanica i razdjelne mreže, odnosno da se predviđe za idući dan, odnosno iduće dane, rad pojedinih agregata (pogonskih strojeva i sinkronih generatora) u elektranama koji će biti, uz zahtijevanu rezervu (predviđa se mogućnost kvara agregata, vodova itd.) sposobni zadovoljiti očekivanu potražnju jer je, ističemo, kontinuiranost (neprekidnost, stalnost) opskrbe potrošača kvalitetnom električnom energijom osnovni zadatak EES-a. Pomanjkanje električne energije stvara poremećaje ne samo u industrijskoj proizvodnji nego i u životu stanovnika. Štete koje nastaju zbog pomanjkanja električne energije često su i stotinjak puta veće od cijene (nedostavljene, neisporučene) električne energije. Međutim, i pokraj toga EES ne treba izgraditi tako da se postigne potpuna pouzdanost opskrbe potrošača, jer bi to toliko povećalo investicije za gradnju elektrana i drugih dijelova EES-a da bi se više povećali troškovi u EES-u od očekivanih šteta zbog pomanjkanja električne energije. Potrebito je, dakle, odrediti "racionalnu" pouzdanost opskrbe potrošača i svjesno preuzeti rizik manjka energije u prilikama koje se vrlo rijetko događaju i ponavljaju uzrokujući prekid opskrbe električnom energijom. Ta "racionalna" pouzdanost ovisi o strukturi elektrana u EES-u (udio hidroenergije) i strukturi

potrošača. Analiza mogućnosti proizvodnje električne energije u EES-u predstavlja osnovu za određivanje te pouzdanosti uzimajući pritom u obzir promjenu hidroloških prilika, oscilacije potrošnje u tijeku godine i raspoloživost (pouzdanost) elektrana. Izgradnja EES-a mora slijediti razvoj (zahtjeve) potrošnje električne energije. To je trajan i neprekidan zadatak jer, kako dosadašnje iskustvo pokazuje, nema povećanja industrijske proizvodnje ni povećanja društvenog proizvoda (standarda) bez povećanja potrošnje električne energije. Daljnji razvoj EES-a traži, međutim, vrlo velike investicije. Nužna je stoga detaljna analiza prilika u EES-u kojom će se odrediti optimalni redoslijed gradnje elektrana, s tim da se najprije grade elektrane koje daju najbolje efekte u EES-u, i optimalna snaga elektrana. Nadalje, u radu se EES-a pojavljuje međusobni utjecaj svih elektrana i cijele mreže (prijenosne i razdjelne), pa je najčešće moguće zadovoljiti potražnju za električnom energijom bezbrojnim kombinacijama agregata i najrazličitijom raspodjelom opterećenja među elektranama i aggregatima. O toj raspodjeli opterećenja među elektranama ovise promjenljivi troškovi u EES-u, a to su praktički troškovi goriva; primjenom se metoda optimizacije mogu postići fascinantne uštede. Detaljno poznavanje odnosa stoga u EES-u i detaljne analize tih odnosa i prilika u EES-u osnova su i za ekonomičnu (racionalnu) izgradnju EES-a i za njegovu optimalnu eksploataciju;

- 5) "racionalna uporaba električne energije i snage" od strane potrošača tehnička je ali i ekomska kategorija što se svodi na ekonomiziranje sa stajališta potrošača (kupaca električne energije) ali i na ekonomiziranje u odnosu na zahtjeve EES-a; ekonomiziranje glede vršnog opterećenja (maksimalne potražnje električne energije u danu), jalove snage i energije, intenzivnije potrošnje u doba nižih opterećenja i dr.

1.3 O posebnostima elektroenergetike i elektroenergetskog sustava

Proizvodnja, prijenos, razdioba i potrošnja (uporaba) električne energije sadrže niz svojstava, značajki odnosno obilježja koje izdvajaju elektroenergetiku od ostalih grana energetike odnosno drugih sličnih gospodarskih grana. Elektroenergetika postavlja, naime, za svoja istraživanja, planiranja, projektiranja, izgradnju i eksplataciju toliko složenu tehničko-energetsku i ekonomsko-finansijsku problematiku kakva se ne susreće niti u jednoj drugoj gospodarskoj grani.

Upozorimo na posebnosti svojstava ove grane energetike.

Prva je i najvažnija sadržana u činjenici da se proizvodnja električne energije, njen prijenos, razdioba i pretvorba u druge oblike energije događaju u, praktički, jednom te istom trenutku: električna je energija prijelazni oblik energije. Drugim riječima, električna se energija ne može akumulirati, uskladištiti, nagomilati, sakupiti, pohraniti već se mora proizvoditi (transformacijom iz nekog drugog oblika energije) samo onda kada to zahtijevaju potrošači (kupci); dakle, u svakom trenutku mora biti zadovoljena relacija:

$$\text{proizvodnja} = \text{potražnji (potrošnji)} + \text{gubici proizvodnje, prijenosa i razdiobe.}$$

Upravo ta osobitost pretvara EES, čiji pojedini dijelovi mogu biti međusobno prostorno udaljeni tisućama kilometara, u jedinstveni složeni mehanizam; ova

istodobnost proizvodnje i potrošnje električne energije važi za bilo koji kratki vremenski razmak, tj, u bilo kojem trenutku u EES-u postoji (odgovarajuća) ravnoteža za djelatnu odnosno jalovu snagu. Neuravnoteženost između ukupne snage elektrana i ukupne snage potrošača u sustavu ne smije postojati: smanjuje li se potražnja potrošača valja istodobno smanjivati proizvodnju elektrana. Međutim, treba upozoriti i naglasiti da se pritom može promijeniti kvaliteta električne energije, dakle, promijeniti vrijednosti napona i frekvencije, što, kao nepoželjnu pojavu, treba sprječiti.

Druga je svojstvenost (osebujnost) elektroenergetike velika brzina odvijanja prijelaznih procesa u EES-u. Valni procesi javljanja viših napona radi prijelaznih pojava pri isklapanju, uklapanju i atmosferskim pražnjenjima, procesi povezani s kratkim spojevima i oscilacijama u sustavu, rušenju stabilnosti itd, odvijaju se tolikom brzinom da nužno zahtijevaju primjenu automatskih uređaja koji, svojom brzinom djelovanja, moraju osigurati neophodno uspješno odvijanje prijelaznih procesa.

Treća je osobitost elektroenergetike činjenica da proizvodnju i potrošnju radne električne energije izmjenične struje neminovno prati i proizvodnja i potrošnja jalove električne energije i snage kao posebne specifičnosti u odnosu na ostale oblike energije.

Četvrta je zasebnost postojanje stalne i velike neravnomjernosti potražnje električne energije tijekom godine, mjeseca, tjedna, dana pa i sata.

Peta je osobitost da postoji isto tako stalna i velika neravnomjernost proizvodnje hidroelektrana, vjetroelektrana i solarnih elektrana ovisna o promjenljivosti dotoka vode, vjetra i Sunčeva zračenja (oblačnosti) tijekom godine, mjeseca, tjedna, dana pa čak i sata.

Šesta je značajka iznimno velika složenost (kompliciranost) elektroenergetskih i električnih proračuna koji su neprovedivi bez uporabe kako elektroničkih i procesnih računala tako i specijalnih računskih strojeva: npr, mrežnih i diferencijalnih analizatora, mikro-modela mreža, specijalnih uređaja za određivanje ekonomične raspodjele opterećenja među elektranama i dr., i, konačno,

sedmo je bitno svojstvo elektroenergetike sadržano u povezanosti s, doslovce, svim granama gospodarstva što znatno otežava izradbu njenog plana razvoja. Naime, prigodom planiranja EES-a, ili pojedinih njegovih dijelova, nužno je planirati istodobno i razvoj ostalih grana energetike kao i cijelokupnog gospodarstva, istraživati porast broja stanovnika, razvoj gradova i drugih naselja, razvoj životnog standarda itd.

1.4 O šest „naj“ elektroenergetskog sustava

Elektroenergetski je sustav danas još uvjek najveći, najrasprostranjeniji, najutjecajniji, najkompliciraniji, najneophodniji i najskupljii tehnički sustav ikada izgrađen.

On je „najveći“ jer golema postrojenja (elektrane) za proizvodnju električne energije, zajedno s prijenosnim (dalekovodi, Slika 1-1, rasklopna postrojenja, Slika 1-2) i razdjelnim dijelom (razdjelne mreže, Slika 1-3, transformatorske stanice, Slika 1-4) elektroenergetskog sustava zauzimaju velika prostranstva Zemlje.

(U bivšem su SSSR-u političari isticali da se, kada se zbroje površine koje zauzimaju njihove elektrane, dobije površina Belgije.)



Slika 1-1 Visokonaponski dalekovod



Slika 1-2 Rasklopno postrojenje



Slika 1-3 Razdjelna (distribucijska) mreža



Slika 1-4 Razdjelna (distribucijska) transformatorska stanica

Trenutačno najveća je elektrana na svijetu hidroelektrana „Itaipu“, Slika 1-5, koja proizvodi električnu energiju, $108 \text{ TWh godišnje} (\Gamma = 10^{12})$, transformirajući energiju vodotoka rijeke Parane, granične rijeke Paragvaja i Brazila, pete po veličini (količini

vode) i trinaeste po duljini rijeke svijeta. (*Prosječna je godišnja proizvodnja nuklearne elektrane „Krško“ nešto više od 5 TW h godišnje.*)



Slika 1-5 Pogled na hidroelektranu „ITAIPU“: (Na lijevoj je strani preljev, a elektrana se nalazi u sredini.)

Godine 1973. vlade su Brazila i Paragvaja potpisale ugovor "o razvoju hidroelektričnih izvora na rijeci Parana", a 1974. godine osnovale "ITAIPU Binacional", kooperaciju s legalnim, administrativnim i finansijskim kapacitetima i tehničkom odgovornošću za planiranje, izgradnju i rad elektrane. Izgradnja je započela 1975. godine, završena je 1991, no, 2005. godine ugrađena su još dva generatora tako da ih je sada ukupno dvadeset. Svaki je generator snage 700 MW. Svoj je vrhunac izgradnja dosegla 1978. sa 40.000 zaposlenih radnika. Mjesečna je potrošnja betona bila 338.000 m³, a ukupno je potrošeno 12.800.000 m³ betona. Količina čelika i željeza ugrađenih u strukturu brane dosta je za izgradnju 380 Eiffelovih tornjeva, a količina betona za izgradnju jednomiljiunske grada: ta je količina betona 15 puta veća od količine utrošene na izgradnju podvodnog tunela između Francuske i Engleske.

Brana se sastoji, Slika 1-6 i Slika 1-7, od niza različitih tipova brana ukupne duljine 7.744 metara s najvišom točkom od 225 m; srednja je visina brane 196 m. Akumulacijsko je jezero dugo 170 km i sadrži 29 milijardi tona vode.

(*Najviša brana međutim, 300 m visoka, nalazi se na rijeci Vakhsh /Surkhob/, u Tađikistanu, na kojoj je u izgradnji još viša brana: 335 m.*)



Slika 1-6 Na vrhu 7,7 km duge brane

450.000 ljudi preseljeno je zbog gradnje hidroelektrane (zbog nastanka akumulacijskog jezera, Slika 1-8), a za potrebe radnika i njihovih obitelji izgrađeno je 9.500 kuća, nekoliko škola, 2 bolnice, bazeni, igrališta, parkovi, ...



Slika 1-7 Na dnu 196 m visoke brane: cijevi dovode vodu za 20 agregata

Snaga je hidroelektrane „Itaipu“ 14.000 MW ($14.000 \cdot 10^6 \text{ W}$).

Kolika je ta snaga bit će jasnije spomenemo li da je snaga motora automobila srednje klase manja od 100 kW ($100 \cdot 10^3 \text{ W}$), a snaga hrvatskog elektroenergetskog sustava, (suma snaga svih postrojenja za proizvodnju električne energije izgrađenih na području Republike Hrvatske, 2007. godina), 3.502 MW od čega u hidroelektranama 2.063 MW / 25 hidroelektrana/, a u termoelektranama 1.439 MW / 4 termoelektrana i 3 termoelektrane-toplane/. Hidroelektrane su većinom akumulacijskog tipa smještene pretežno u hrvatskom priobalju, te manjim dijelom protočne elektrane koje se uglavnom nalaze u sjeverozapadnom dijelu Hrvatske.

(Snaga je najveće hrvatske elektrane, hidroelektrane „Zakučac“ koja se nalazi na rijeci Cetini, 486 MW , dok je snaga najveće hrvatske termoelektrane, termoelektrane „Sisak“, 420 MW .)

Većina je termoelektrana izvedena s pogonom na tekuća goriva (derivati nafte: loživo ulje i ekstra lako ulje), a manji broj je s pogonom na ugljen i prirodni plin. Tri termoelektrana uz električnu proizvodnju i toplinsku energiju kojom opskrbljuju toplinske potrošače u velikim gradovima.

Osim vlastitih izvora Hrvatska raspolazi i s elektranama izgrađenim u drugim državama. Temeljem udjela u izgradnji nuklearne elektrane „Krško“ u Sloveniji, za potrebe Hrvatske raspoloživa je polovica instalirane snage, 354 MW. Temeljem finansiranja izgradnje termoelektrane „Obrenovac“ u Srbiji, Hrvatska ima ugovorno pravo korištenja njezinih 300 MW, a temeljem ulaganja u termoelektranu „Gacko“, snage 100 MW, u Bosni i Hercegovini, Hrvatska ima ugovorno pravo raspolaganja i s tom snagom. Ukupna je prema tome snaga postrojenja za proizvodnju električne energije kojima raspolazi Hrvatska 4.256 MW.



Slika 1-8 Akumulacijsko jezero nastalo izgradnjom brane zauzima površinu od 1.350 km², duljine je 170 km i prosječne širine 7 km

Međutim, u Kini se, na rijeci Jangce (Yangtze ili Chang Jiang), trećoj svjetskoj rijeci po duljini, gradi još veća hidroelektrana, hidroelektrana "Tri klisure", ili „Tri kanjona“, kako je mnogi zovu, Slika 1-9.



Slika 1-9 Hidroelektrana "Tri klisure"

Hidroelektrana "Tri klisure" gradi se blizu grada Yichanga u provinciji Hubei. Njena će snaga biti 18.200 MW, a predviđena proizvodnja 84,7 TWh ($84,7 \cdot 10^{12}$ Wh) električne energije godišnje, što je blizu 10% današnje ukupne kineske proizvodnje električne energije: radi se o drugom najvećem građevinskom poduhvatu u svijetu dosad – prvi je "Veliki (kineski) zid".

Osim proizvodnje električne energije brana će sprječavati katastrofalne poplave rijeke Jangce koje su stoljećima odnosile na tisuće i tisuće ljudskih života godišnje.

Hidroelektrana se gradi u više faza, a radovi su započeli 1993. godine. 2003. godine u rad je pušteno prvih šest generatorskih jedinica, svaka snage 700 MW. Dovršetak gradnje i puštanje u rad svih generatorskih jedinica očekuje se 2009. godine.

Navedimo još nekoliko fascinantnih podataka o hidroelektrani "Tri klisure".

Projekt izgradnje brane:

iskopano 102,6 milijuna m³ zemlje i kamenja;

potrošeno betona: 26,43 milijuna m³;

potrošeno čelika: 354.000 tona;

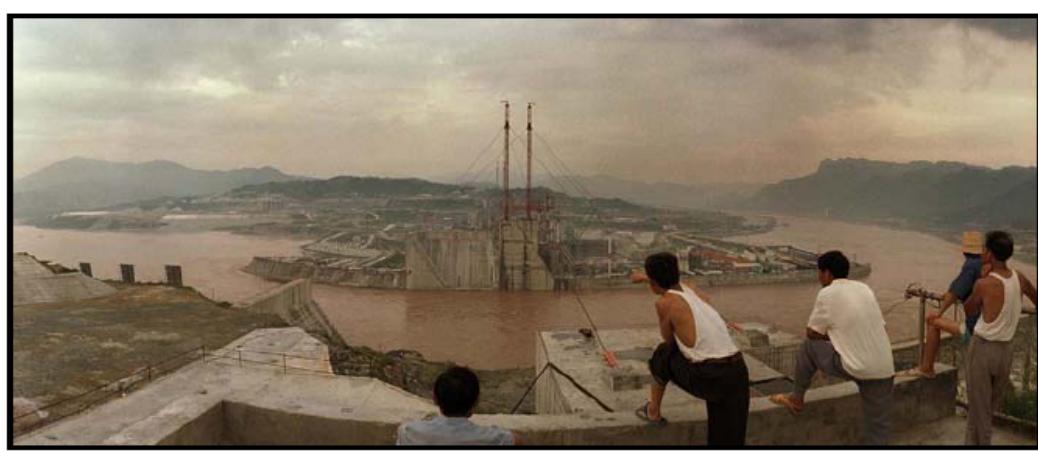
visina brane: 185 metara;

duljina brane: 2.309 metara, podijeljena u tri dijela. U sredini će biti preljevni dio dug 484 metara, s 23 cijevna ispusta i 22 zapornice. Lijevo i desno od preljeva bit će dvije velike strojarnice;

vrijeme gradnje: Prva je faza radova započela 1994. a završila 1997. godine sa skretanjem rijeke Jangce iz njenog prirodnog vodotoka kako bi se mogla izgraditi brana akumulacijskog jezera, Slika 1-10 i Slika 1-11. Druga faza započela je 1998. a završila 2003. godine kad je razina vode u rezervoaru dosegla 156 metara, a elektrana otpočela s proizvodnjom (prvih šest agregata). Do kraja 2006. godine 14 generatora trebalo je proizvoditi električnu energiju. Treća bi faza trebala završiti 2009. godine kad će visina vode dosegnuti 175 metara, a elektrana raditi punim kapacitetom.



Slika 1-10 Radovi na brani



Slika 1-11 Pogled s brane

Posljedice izgradnje brane:

onečišćenje će vode rijeke Jangce porasti najmanje dva puta jer je zbog brane potopljeno mnogo rudnika, tvornica i ljudskih naselja u kojima se nalazi oko 50 vrsta raznih tvari koje onečišćuju okoliš;

oko 1.300 arheoloških nalazišta bit će preseljeno ili poplavljeno;

kritičari ističu da će velike količine mulja u rijeci stvarati guste naslage uz krajeve brane otežavajući glavne tijekove rijeke prema gradu Chongqingu. (Chongqing je petnaestomiljunske grad do kojeg će brodovi ploviti 1.500 km uzvodno od mora i pritom biti podizani preko brane u akumulacijsko jezero: dizani 186 m uvis najsnažnijim dosad izgrađenim "vodenim dizalom", Slika 1-9 i 1-13.);

poplavljeno je 632 km^2 , 19 gradova, 326 sela, uključujući 27 000 hektara farmi i voćnjaka;

bit će preseljeno između 1,1 i 1,9 milijuna ljudi.

(Nabrojene su samo činjenične posljedice izgradnje brane; ukupne (moguće) posljedice koje predviđaju analize rizika spadaju u kategoriju katastrofa.)

Akumulacijsko jezero:

prosječna širina: 1,1 kilometar;

duljina: 600 kilometara;

volumen: 39,3 milijardi m^3 vode;

razina vode: 175 metara iznad razine vode rijeke Jangce;

otjecanje: Svake će godine 451 milijardi m^3 vode iz rijeke Jangce utjecati u akumulacijsko jezero;

mulj: Muljeviti će Jangce u jezero nataložiti 530 milijuna tona mulja svake godine.

Električna energija:

generatori: U dvije strojarnice smješteno je 26 generatora, svaki snage 700 MW;

kapacitet: Ukupni proizvodni kapacitet bit će 18.200 MW, ili kapacitet 18 velikih nuklearnih reaktora;

prijenos električne energije: Petnaest prijenosnih vodova napona 500.000 volti prenosit će električnu energiju do Šangaja i drugdje u Istočnu Kinu, Centralnu Kinu i istočnu provinciju Sichuan;

proizvedena električna energija: 84,7 TWh godišnje.

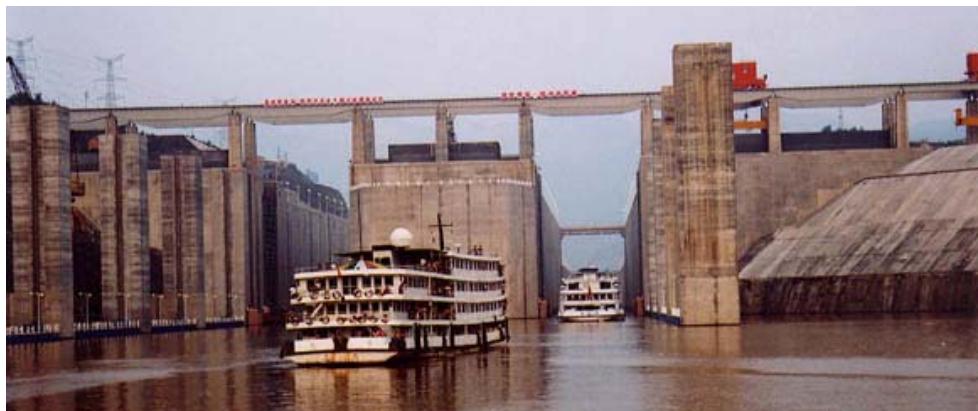
Plovidba:

prevodnica se za brodove sastoji od pet ustava. Svaka je duga 280 metara i široka 35 metara s dubinom vode od 5 metara, Slika 1-12;

plovidba je omogućena brodovima na dijelu rijeke od Šangaja (mora) do Chongqingu;

ustave za dizanje brodova dižu brodove mase do 3 000 tona; Slika 1-13.

predviđa se da će brodarenje preko tog dijela rijeke porasti s 10 milijuna na 50 milijuna tona godišnje, sa smanjenjem transportnih troškova od 30 do 37%.



Slika 1-12 Prva ustava



Slika 1-13 Podizanje brodova preko brane

Zaštita od poplava:

pretpostavlja se da će 22,1 milijardi kubičnih metara kapaciteta rezervoara za kontrolu poplava smanjiti učestalost velikih nizvodnih poplava s jedne u 10 godina na jednu u 100 godina.

Na kraju, govoreći o dvije najveće hidroelektrane na svijetu, spomenimo i ovo: bez obzira na veličinu i snagu hidroelektrane „Tri klisure“, hidroelektrana „Itaipu“ je ipak u najvažnijem segmentu – proizvodnji električne energije – nadmašuje. Razlog je stabilniji tok rijeke Parana od toka rijeke Jangce na onom dijelu gdje se gradi hidroelektrana „Tri klisure“. Uz to, vode se rijeke Parana reguliraju kroz veći broj hidroelektrana uzvodno od hidroelektrane „Itaipu“.

Najveća je svjetska nuklearna elektrana japanska nuklearna elektrana „Kashiwazaki Kariwa“ snage 8.212 MW, Slika 1-14. Sadrži 7 nuklearnih reaktora. (*5 snage 1.067 MW i 2 snage 1.315 MW.*)



Slika 1-14 Nuklearna elektrana „Kashiwazaki Kariwa“ snage 8.212 MW

Najveća je termoelektrana izgrađena u Južnoafričkoj Republici, Slika 1-15. Snage je 4.116 MW, a sadrži 6 agregata (agregatom nazivamo sklop pogonskog stroja, u ovom slučaju parne turbine, i sinkronog generatora) snage 686 MW svaki.



Slika 1-15 Termoelektrana „Kendal“ snage 4.116 MW

Najveće postrojenje za indirektnu pretvorbu Sunčeve energije u električnu energiju nalazi se u kalifornijskoj pustinji Mojave; izgrađeno je dosad devet solarnih termoelektrana ukupne snage 354 MW,

Slika 1-16.

(*Dvije najveće među njima snage su 80 MW; one su trenutačno najveća (pojedinačna) postrojenja u kojima se Sunčeva energija pretvara u električnu energiju bez obzira na to radi li se o direktnoj ili indirektnoj pretvorbi.*)

Najveće pak postrojenje za direktnu pretvorbu Sunčeve energije u električnu energiju (solarna fotonaponska elektrana) trenutačno, snage 12 MW, izgrađeno je u Njemačkoj. Do kraja 2009. godine međutim u Njemačkoj će biti izgrađeno još veće

takvo postrojenje, snage 40 MW, a Australija planira izgraditi solarnu fotonaponsku elektranu snage 154 MW.



Slika 1-16 Pet od devet solarnih termoelektrana u pustinji Mojave
Solarna termoelektrana

Najveći vjetroagregat danas snage je 6 MW, no većina izgrađenih vjetroagregata u posljednjih nekoliko godina snage je između 1,5 i 2 MW, Slika 1-17.

(Uobičajeno vjetroelektrana sadrži više vjetroagregata. Vjetroagregatom nazivamo sklop vjetroturbine i generatora u kojem se mehanički rad pretvara u električnu energiju.)



Slika 1-17 Vjetroelektrane (vjetroagregati) snage 2 MW

Elektroenergetski je sustav „najrasprostranjeniji“ tehnički sustav budući da je, povezujući države, pa i kontinente, još uvijek rasprostranjeniji od Interneta: električna energija, naime, stiže u više domova od Interneta.

10.X.2004. godine, nakon 13 godina, ponovno su povezivani elektroenergetski sustavi zapadne i jugoistočne Europe, razdvojeni zbog rata na područjima bivše SFR Jugoslavije, u europski elektroenergetski sustav, drugi po veličini EES u svijetu. (Bit će najveći kad se priključi i Rusija, što se dogovara i postupno ostvaruje.) Nakon objedinjavanja, naime, čitava je kontinentalna Europa postala jedinstveno sinkrono elektroenergetsko područje s 480 milijuna ljudi u 22 države i s godišnjom potrošnjom električne energije od približno 2.300 TW·h. Povezivanje je obavljeni u dispečerskom centru Hrvatske elektroprivrede u Zagrebu čime je iskazano veliko uvažavanje hrvatskih elektroenergetskih stručnjaka; europske su države izrazile povjerenje u njihovo znanje tražeći da oni povežu države Europe u jedinstveni elektroenergetski sustav.

Spominjući da je „EES najutjecajniji tehnički sustav“ mislimo pritom na, nažalost, neželjene utjecaje na ljude i okoliš koji se, međutim, u znatnoj mjeri (gotovo u potpunosti) mogu otkloniti; doduše uz veliku potrošnju energije (eksergiјe) odnosno novca. Tako, primjerice, u termoelektrani, relativno male snage, 1.000 MW, izgara dnevno više od 8.000 tona najkvalitetnijeg ugljena (kamenog ugljena) omogućujući proizvodnju električne energije ali i opterećujući okoliš nus produktima. Energetski su

procesi pritom, pretvorbe kemijske energije (fosilnih) goriva u termoelektranama u električnu energiju, relativno komplikirani: odvija se neprekidno i istodobno nekoliko procesa transformacije oblika energije do konačnog oblika, električne energije. (*Na ovom mjestu predstaviti ćemo kvalitativnu sliku njihovih odvijanja, kasnije bavit ćemo se njihovom kvantifikacijom.*) Sve započinje procesom izgaranja: kemijska se energija, pohranjena u ugljenu, pretvara u unutrašnju kaloričku energiju produkata izgaranja. Primjerice, u „konvencionalnoj“ termoelektrani snage 1000 MW, koja radi 80% vremena u godini dana, izgorjet će godišnje oko 2.500.000 tona kamenog ugljena (najkvalitetniji ugljen), nastati više od 8.750.000 tona CO₂, više od 100.000 tona SO₂ (pritom se radi o kamenom ugljenu s vrlo malim postotkom sadržanog sumpora, ispod 1%) i više od 16.000 tona NO₂ koji se, u plinovitom stanju, oslobađaju u atmosferu, kao i više od 580.000 tona (krutog) pepela. Ugljik-dioksid (ugljični dioksid), CO₂, jedan je od uzročnika „efekta staklenika“, a sumporni i dušikovi oksidi vežu se s vodikom u sumpornu i dušičnu kiselinu izazivajući „kisele kiše“ odnosno uzrokujući kiselost tla. (*Usporedbe radi spomenimo da termički fizijski reaktor nuklearne elektrane iste snage troši godišnje, uz iste uvjete, 30 tona nuklearnog goriva.*)

Dakako, „prirodni“ efekt staklenika neophodan je za održanje života na Zemlji. Zašto? Bez tog bi efekta prosječna temperatura na Zemlji bila -19 °C. (Ovako, prosječna je temperatura ≈ 15 °C). Naime, u svijetu kojem živimo neprestano se odvija samo jedan te isti proces - strujanjem energije izjednačuje se početno nejednolika raspodjela gustoće energije: energija struje sa sustava (iz prostora) veće gustoće na sustav (u prostor) manje gustoće. Tako se energija Sunčeva zračenja pristigla na Zemlju stalno isijava u Svetiš. Pritom vrijedi bilanca energije (princip očuvanja energije): količina dozračene energije jednak je količini izračene energije u nekom vremenskom razdoblju, znameniamo li dio te energije koja se pretvara u stacionarne (stalne) oblike energije. Budući da je vrijednost solarne konstante (vidjeti 2.2.2) 1,36 kW/m², da Zemlju, s obzirom na dozračenu Sunčevu energiju, možemo smatrati ravnim diskom površine $r_{\text{Zemlje}}^2 \cdot \pi$, da se 30% dozračene energije sa Sunca na vanjskom obodu atmosfere odmah reflektira u Svetiš, te da Zemlja zrači prema Stefan-Boltzmannovom zakonu, to vrijedi:

$$P_{\text{apsorbirana}} = (1-0,3) \cdot 1,36 \text{ kW/m}^2 \cdot r_{\text{Zemlje}}^2 \cdot \pi = P_{\text{izračena}} = 5,67 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2 \text{K}^4 \cdot T^4 \cdot 4 r_{\text{Zemlje}}^2 \cdot \pi,$$

pa dobivamo

$$T^4 = 0,7 \cdot 1,36 \text{ kW/m}^2 / 4 \cdot 5,67 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2 \text{K}^4 = 4,17 \cdot 10^9 \text{ K}^4, \text{ odnosno, } T = 254 \text{ K} (\approx -19^\circ\text{C}).$$

Kruti pepeo sadrži otrovne kovine, ali i radioaktivne elemente.

(Ironicno ili ne, većina među nama ne zna da termoelektrana (pepeo) zrači bitno više od nuklearne elektrane u normalnom pogonu /ispravnom, pogon bez krvara/.)

Transformacije se pak energije nastavljaju dalje: unutrašnja se kalorička energija pohranjena u plinovitim produktima izgaranja ugljena (fosilnih goriva) pretvara u toplinsku energiju koja, kao prijelazni oblik energije, nevezan uz masu (tvar), prelazi na vodu i vodenu paru u parnom kotlu termoelektrane pretvarajući se ponovno u unutrašnju kaloričku energiju vode i vodene pare. U vodenoj pari što struje iz parnog kotla do turbine pohranjena je kinetička i potencijalna energija i oblik energije koji nazivamo entalpija.

(Entalpijom nazivamo sumu unutrašnje kaloričke energije i mehaničkog rada obavljenog na rođenoj pari kako bi vodena para iz parnog kotla strnjala do parne turbine. Energija je, naime, skalarna veličina; podliježe zakonima algebre: razlikati se oblici energije mogu zbrajati, odnosno oduzimati, dajući konačan, sumaran, ukupan iznos promatranog oblika energije.)

Ti se oblici energije u statoru parne turbine (u nekim parnim turbinama dodatno i u rotoru) pretvaraju u kinetičku energiju pare koja zatim velikom brzinom struji kroz rotor parne turbine gdje se kinetička energija pare pretvara u mehaničku energiju rotora turbine a ova, posredstvom sile, u mehanički rad koji se dobiva na osovinu rotora turbine i naziva tehničkim radom. Mehanički je rad, poput toplinske i električne energije, prijelazan oblik energije. Ne može se akumulirati, nastaje samo u trenutku kad sila djeluje na pomicnu granicu sustava. Bez posredstva fluida, odnosno djelatne tvari ili medija, prelazi, posredstvom sile, koja u ovom slučaju djeluje na osovinu parne turbine povezane s osovinom rotora sinkronog generatora, u sinkroni generator gdje obavlja rad odvajajući elektrone iz elektronskih omotača atoma transformirajući se tako u oblik energije koji nazivamo električnom energijom. Električna se energija zatim vodovima (dalekovodima), vodičima i kabelima usmjerava do uređaja u kojima se, po potrebi, pretvara u jedan ili više korisnih oblika energije. No, to još nije kompletan sumarni energetski proces. Kemijска је energија наиме energија што значи да садржи и (veliki) dio anergije, oblika energije koji se не може pretvoriti niti u jedan drugi oblik па, dakle, ni u električnu energiju (eksergiju). Jer je i anergija energija, а energija је neuobičajena, nemamo kamo s njom nego vratiti је у (нашу) okolicu: нешто manje od 2/3 energije ugnjena (goriva), ovisno о ukupnom stupnju djelovanja termoelektrane (ovisno о „modernosti“ termoelektrane) odvodi se у okolicu termoelektrane (predaje se vodi, zraku, tlu) у obliku toplinske energije opterećujući toplinski (termički) okoliš: prijelazom у okolicu та се toplinska energija pretvara у unutrašnju kaloričku energiju, pohranjuje у okolini (podsistavima okolice: zraku, vodi i tlu) povisujući temperaturu (podsistava) okolice. (Nužno se mora raditi о toplinskoj energiji budući da јe она prijelazni oblik energije.)

(Tu količinu energije, koja je sva (teoretski) anergija (sadrži vrlo malo eksersije u što ćemo se uvjeriti), slabo upućeni nazivaju „gubitkom energije“ zgražavajući se „kako veliki gubitak energije proizvode termoelektrane“ zgražavajući nas „elektroenergetičare“, ne toliko svojim neznanjem, koliko hrabrošću (drskošću) da govore о stvarima koje niti poznaju niti razumiju.)

Na kraju, uz nužno ograđivanje, mi nismo provodili takve analize, spomenimo nalaze studija prema kojima termoelektrane (sve termoelektrane u svijetu sumarno), koje se koriste fosilnim gorivom, svojim radom uzrokuju i do 3 milijuna (preranih) smrti ljudi godišnje.

„Elektroenergetski je sustav danas najneophodniji tehnički sustav?“ Nemate li proživljeno iskustvo sa „životom bez električne energije („modernog“) ljudskog bića“, pokušajte dočarati (svoj) dan bez električne energije. Predočite si posljedice prekida opskrbe električnom energijom u trenutku dok ste u dizalu nebodera, uspinjači na planini za vrijeme oluje, u metrou stotinama metara ispod površine Zemlje, u zubarskom stolcu, na operacijskom stolu bolnice? Ili, mnogo bezazlenije, ali svejedno irritirajuće: za vrijeme prijenosa finalne utakmice Svjetskog nogometnog prvenstva ili kada „nestanak struje“ rezultira gubitkom dijela napisanog teksta i/ili obavljenog proračuna?

Konačno, prema dosad izrečenom, lako je razumjeti zašto je elektroenergetski sustav doista i „najkomplikiraniji (najsloženiji)“ i „najskuplji“ tehnički sustav sa zadaćom opskrbljivanja eksergijom.

1.5 O potrošnji i proizvodnji električne energije

Svjetska će potrošnja električne energije, prema nekim predviđanjima, rasti brže od svih ostalih oblika energije: do 2030. udvostručit će se sa sadašnjih 16.500 TWh na približno 31.600 TWh. Istodobno, broj se stanovnika u svijetu povećava godišnje za 78 milijuna, od 1960. udvostručio se, a gotovo dvije milijarde ljudi nema pristup električnoj energiji. U 2030. godini 70% električne energije u svijetu proizvodit će se, prema procjenama, iz fosilnih goriva, očekuje se veći doprinos obnovljivih izvora energije, te zadržavanje udjela nuklearne energije u proizvodnji električne energije (17%). Predviđena se opskrba električnom energijom time, u odnosu na današnju, vrlo malo mijenja. Naime, od trenutačne sumarne snage svjetskih elektrana, koja je nešto veća od 2 TW, približno 66% otpada na termoelektrane u kojima izgara fosilno gorivo (ugljen pretežito), a preostalih 34 % dijele, praktički pola-pola (ovisno od godine do godine), hidro i nuklearne elektrane.

(Postotak je sudjelovanja ostalih postrojenja za proizvodnju električne energije (vjetroelektrana, solarnih elektrana, odnosno elektrana što pretvaraju energiju plime i oseke, morskih valova, biomase, geotermičke energije itd. u električnu energiju) u ovom trenutku toliko malen da se u statistikama ne navodi.)

Pritom, radi se (približno) o ovim odnosima energije, oslobođene izgaranjem (ili fisijom) 1 kg goriva, odnosno energije sadržane u 1 kg vode ili zraka, te transformirane u postrojenjima za proizvodnju električne energije (termoelektranama, nuklearnim elektranama, hidroelektranama i vjetroelektranama) u električnu energiju:

- 1 kg drva omogućuje proizvodnju 1 kWh električne energije,
- 1 kg ugljena 3 kWh električne energije,
- 1 kg nafte 4 kWh električne energije; (približno i 1 kg plina),
- 1 kg prirodnog uranija 50.000 kWh električne energije,
- 1 kg plutonija 6.000.000 kWh električne energije, dok se
- iz potencijalne energije 1 kg vode, smještene na visini **h** iznad hidroelektrane, odnosno kinetičke energije 1 kg zraka, brzine **c**, dobiva, u idealnom slučaju, **$2,778 \cdot 10^{-7} \cdot g \cdot h$** kWh odnosno **$2,778 \cdot 10^{-7} \cdot c^2 / 2$** kWh.

Ilustrativan odnos zadovoljenja svjetskih potreba za energijom objavljen je nedavno u časopisu IEEE Spectrum. Troši li svijet godišnje približno energiju akumuliranu u jednoj kubičnoj milji nafte (CMO), stvarno troši nešto više, usporedba namirenja te energije iz različitih postrojenja dana je u tablici.

Pritom označe „x“, „*“ i „#“ znače:

„x“ - nakon izgradnje postrojenja proizvedena je energija praktički besplatna;
„*“ - ne računajući energiju, vodu i sirovine potrebne za izradu fotonaponskih celija;

„#“ ne računajući gorivo potrebno za proizvodnju biogoriva; ako bi se i to uračunalo ukupna obradiva površina na planetu nije dostatna

Vrsta izvora	Broj jedinica	Prekrivena površina + rudnici	Cijena koštanja
nuklearna elektrana	1.630	10.000 km ² (≈ 1/5 površine RH)	1,4 CMO ^x
termoelektrana na ugljen	4.035	30.000 km ² (≈ 1/2 površine RH)	1,1 CMO
vjetroelektrana s 77 metarskim lopaticama	3.5 milijuna	600.000 km ² (≈ površina Francuske)	2,42 CMO ^x
fotonaponska celija 2,1kW 1,4m ²	4.500 milijuna	650.000 km ² (≈ površina Belgije i Francuske)	34 CMO [*]
biogoriva	–	15 milijuna km ² (≈ površina pola ukupnih oranica na planetu) [#]	–

1.5.1 O nuklearnoj energiji fisije

Očito, mala je gustoća energije pohranjena u vodi i zraku, pa su zbog toga potrebne goleme količine vode i velike dubine akumulacijskih jezera (poput akumulacijskih jezera hidroelektrana „Itaipu“ i „Tri klisure“) ili velike visine s kojih pada voda (h [m]), odnosno goleme količine i velike brzine (c[m/s]) zraka (vjetra). (*Velike su brzine vjetra međutim neiskoristive zbog prevelikih snaga koje ne mogu izdržati vjetroelektrane; snaga vjetra raste s trećom potencijjom brzine.*) Pritom se, dakako, u elektranama ne može iskoristiti sva energija vode ili zraka jer i voda i zrak moraju dalje strujati (odnositi neiskorištenu, netransformiranu energiju) da bi načinili mjesta količinama koje dolaze; radi se, naime, o strujanju fluida.

Otkuda tolika razlika u količini električne energije dobivene transformacijom nuklearne energije sadržane u 1 kg prirodnog uranija odnosno 1 kg plutonija?

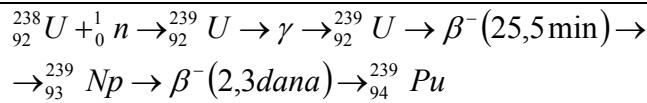
Prema današnjem stanju tehnike i tehnologije jedino je nuklearno gorivo, koje se u svom prirodnom obliku može neposredno upotrijebiti, izotop uranija U-235. No budući da njega u „prirodnom uraniju“ ima samo 0,712 %, dugoročni se razvoj iskoriščavanja nuklearne energije temelji na tzv. „umjetnim nuklearnim gorivima“: plutoniju (Pu-239) i izotopu uranija U-233.

(Još dva umjetna kemijska elementa, americij i kalifornij, posjeduju svojstva „umjetnog nuklearnog goriva“, no ne spominju se jer se ne iskorištavaju u elektroenergetici.)

Prirodnim uranijem nazivamo smjesu uranijevih izotopa kojih je ukupan broj 15. Dva su pritom izotopa toliko zastupljena u toj smjesi da se ostali niti ne uračunavaju: uranij U-238, koji je glavni sastojak prirodnog uranija, ima ga 99,282 % i uranij U-235, 0,712 %.

Plutonij se dobiva od U-238. Ako se naime U-238 zrači („bombardira“) neutronima, jezgra U-238, koja je prihvatile neutron, postaje U-239 jer se za jedan neutron povećao broj nukleona. (Broj je nukleona jednak zbroju neutrona i protona, koji se zajedničkim imenom nazivaju nukleonima.) U-239 emitira γ-zrake, a nakon emisije elektrona (β - zračenje) povećava se broj

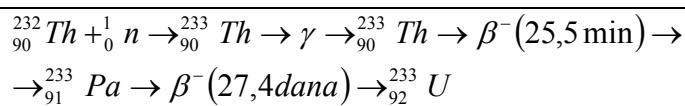
protona uz nepromijenjeni broj nukleona jer je jedan neutron gubitkom naboja (elektrona) postao proton. Nakon emisije elektrona nastaje neptunij ($Np-239$) koji emisijom elektrona prelazi u plutonij ($Pu-239$):



[1.1]

(Plutonij ima 94 protona no svejedno je (praktički) stabilan jer mu je vrijeme poluraspada 24.000 godina.)

Izotop uranija $U-233$ dobiva se na isti način, ali od torija ($Tb-232$). $Tb-232$ nakon prihvata neutrona postaje $Tb-233$ a ovaj, β^- -zračenjem, protaktinij ($Pa-233$). Protaktinij idućim β^- -zračenjem prelazi u $U-233$:



[1.2]

($U-233$ ima 92 protona i vrijeme poluraspada 160.000 godina.)

Treba naglasiti da je za dobivanje umjetnih nuklearnih goriva potrebna izgradnja nuklearnih reaktora na bazi $U-235$ u kojima se, osim pretvorbe nuklearne u unutrašnju kaloričku energiju, proizvode i umjetna nuklearna goriva.

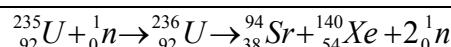
Pretvorbu je nuklearne u unutrašnju kaloričku energiju moguće ostvariti pomoću većeg broja različitih procesa. Npr., raspadom litija djelovanjem neutrona: litij se nakon pretvorbe u berilij raspada na dva helijeva atoma. Pritom se, pri raspodu svake jezgre litija, dio mase (što se naziva „defektom mase“) transformira u unutrašnju kaloričku energiju ($E = \delta m c^2$ sjedlosti) te se dobiva oko 17 MeV energije. (Defekt mase razlika je između mase atoma i sume masa njezinih konstituenata:

$$\delta m = [Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n] - m_{\text{atom}}$$

Z je broj protona i elektrona promatranoj atoma, a A broj nukleona.)

1eV /elektronvolt/ definira se kao kinetička energija elektrona koju on dobije prošavši kroz električno polje razlike potencijala od 1V: $1\text{eV} = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot \text{V} = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.)

Takra je nuklearna reakcija međutim tehnički beskorisna, kao uostalom i većina nuklearnih procesa, jer se ne može sama po sebi dalje nastaviti. Za tehničke svrhe, naime, zanimljivi su samo oni nuklearni procesi, koji se, jedanput započeti vanjskim djelovanjem, mogu sami po sebi dalje nastaviti. Prikažimo jedan od takvih procesa:

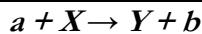


[1.3]

(Početno je stanje na lijevoj, a konačno na desnoj strani.) Preuzimanjem neutrona (n) u jezgru $U-235$ nastaje prijelazna jezgra $U-236$, koja se raspada u stronij ($Sr-94$) i ksenon ($Xe-140$) uz istodobno oslobođanje dva neutrona pomoću kojih je moguće izazvati raspad drugih jezgara $U-235$. Vremenski interval između prodora neutrona u jezgru i fizijske iznosi oko 10^{-15} s .

Treba naglasiti da je moguć veći broj (četrdesetak) načina raspada prijelazne jezgre $U-236$, pa se oslobođaju i tri neutrona. U proračunima se stoga uzima da se pri raspadu

U-235 (prijelazne jezgre U-236) oslobađa u prosjeku 2,5 neutrona. Pri raspadu se najveći dio nuklearne energije transformira u unutrašnju kaloričku energiju produkata raspada. Općenito, nuklearnu reakciju možemo napisati u obliku



[1.4]

gdje slovo a označuje česticu koja izaziva reakciju u jezgri X . Jezgra X reakcijom prelazi u jezgru Y uz emisiju čestice b . Analitički je oblik principa očuvanja energije u reakciji pritom:

$$m_a c_{sv}^2 + M_x c_{sv}^2 + E_{kp} = m_b c_{sv}^2 + M_y c_{sv}^2 + E_{kk}$$

[1.5]

gdje su M_x , M_y , m_a i m_b mase jezgara i čestica, E_{kp} i E_{kk} početna i konačna kinetička energija, a c_{sv} brzina svjetlosti. Ako je razlika između konačne i početne kinetičke energije pozitivna, reakcije su „egzoergične“, tj. u njima se oslobađa energija. Princip očuvanja energije pokazuje da se u takvim reakcijama dio mase pretvara u energiju (izraz u uglastoj zagradi defekt je mase):

$$E_{kk} - E_{kp} = [(M_x + m_a) - (M_y + m_b)] c_{sv}^2$$

[1.6]

Egzoergične nuklearne reakcije osnovni su izvori energije Sunca i zvijezda. U nuklearnim procesima ekvivalencija mase i energije ($E = \delta m \cdot c_{sv}^2$) manifestira se mnogo više nego pri procesima u kojima se mijenja samo raspored elektrona oko atomskih jezgara (u procesima izgaranja); mase su, naime, atomskih jezgara manje blizu jedan postot od zbroja masa protona i neutrona jer se u procesu spajanja nukleona u jezgru oslobađa energija koja prelazi u okolicu. Pritom, osim principa očuvanja u ostalim područjima fizike, postoje i specifični principi očuvanja u nuklearnim transformacijama. Ti se principi ne manifestiraju u makroskopskim i atomskim procesima u kojima se ne mijenjaju jezgre atoma. U reakcijama pak u atomskim jezgrama ti dodatni principi očuvanja ovise o razini promjena u jezgri.. Ako se pri nuklearnim reakcijama ne zbivaju promjene osnovnih sastojaka jezgre, protona i neutrona, djeluju i

- princip očuvanja električnog naboja i
- princip očuvanja ukupnog broja nukleona.

Zbivaju li se promjene i samih konstituenata jezgre, procesima beta-raspada, kojima proton može preti u neutron ili neutron u proton, djeluje i

- princip očuvanja lakih čestica (elektrona, pozitrona ili neutrina).

Posljedica je djelovanja tih dodatnih principa da se odgovarajućim potroškom energije može proizvesti par elektron-pozitron, ali ne samo jedna od tih čestica. Pozitron je antičestica elektrona, pa stvaranjem para ni ukupan broj lakih čestica, niti ukupan naboja nije promijenjen.

(Spomenimo još da u reakcijama na vrlo visokim energijama u kojima nastaju i nove čestice srednje mase (mezoni), odnosno čestice mase jednake ili slične masi nukleona, djeluju i drugi principi očuvanja. Oni, međutim, ne utječu neposredno na (niskoenergetske) nuklearne reakcije važne u elektroenergetici, pa ih ne ćemo razmatrati.)

Budući da se raspadom jedne jezgre U-235 oslobađa više neutrona nego što je potrebno da bi se izazvao raspad iduće, naglo će se povećati broj raspadnutih jezgara jer je vremenski razmak između dva sukladna raspada 0,001s. Prema tome ne samo da se takva nuklearna reakcija jednom započeta može sama po sebi održavati, već se može razvijati kao lavina: ta je pojava upotrijebljena za

izradu nuklearne („atomske“) bombe. (Pritom, međutim, da bi se ostvarila „nuklearna eksplozija“, nužno je raspolagati s nuklearnim gorivom u kojem je postotak zastupljenosti U-235 najmanje 93,5% (u prirodnom uraniju zastupljenost je U-235 samo 0,712%), a postupak povećavanja količine U-235 u smjesi U-235 i U-238 nije jednostavan i uvjetuje znatan potrošak energije; drugim riječima, izrada nuklearne bombe, koja će se koristiti bilo U-235 ili Pu-239, zahtijeva veliki tehnološki i energetski angažman.) Postigne li se pak da se reakcija odvija uz konstantan broj neutrona, dobiva se „lančana reakcija“ koja omogućuje tehničko iskorištanje raspada jezgre U-235: transformaciju nuklearne energije fisije (cijepanja, za razliku od nuklearne energije fuzije – stapanja, udruživanja lakih atomskih jezgara u težu pri čemu se oslobođaju velike količine unutrašnje kaloričke energije na račun defekta mase) u električnu energiju. Lančana se reakcija može održavati zbog toga što je jezgra U-235 toliko labilna da se raspada, pošto pribavlja neutron, i bez dovođenja vanjske energije, odnosno i onda kad neutron ima minimalnu kinetičku energiju (tzv. „spori neutron“).

(Upravo to iznimno važno svojstvo, raspad pod djelovanjem sporih neutrona, omogućuje kontroliranje i upravljanje lančanom reakcijom u procesu proizvodnje električne energije.)

Nasuprot tome, npr., za raspad U-238 potrebna je znatna vanjska energija (velika kinetička energija neutrona, velika brzina neutrona), a za raspad jezgara lakih atoma potrebna energija iznosi i više stotina MeV. Prema tome tehnička važnost raspada jezgre U-235 nije samo u mogućnosti transformacije nuklearne u unutrašnju kaloričku energiju, što se postiže i drugim tipovima nuklearnih reakcija, već u tome što se može osigurati lančana reakcija; samoodrživo cijepanje jezgri atoma U-235 pomoću neutrona malih brzina (malih energija).

(Prema rečenome, kao U-235 (prirodno nuklearno gorivo) vladaju se još samo U-233 i Pu-239 (umjetna nuklearna goriva), pa su to jedine jezgre pomoću kojih se može osigurati lančana reakcija odnosno pretvorba nuklearne energije fisije u konačnosti u električnu energiju. /Americijem i kalifornijem, ponovimo, provediva je također lančana reakcija, no oni se ne ubrajaju u umjetna nuklearna goriva./)

Kad je omjer kvadrata broja protona i broja nukleona (zbroj protona i neutrona) veći od 45, takve se jezgre spontano raspadaju, dakle, bez dovođenja energije. Za U-235 taj omjer iznosi 36 (92²/235), pa spontani raspad (normalno) još nije moguće veći se za raspad mora dovesti energiju pomoću neutrona. (Zašto, objasnit ćemo kasnije. Spominjemo „normalno“ budući da vrijedi statistička zakonitost jer se pojavljuju pojedinačni raspadi U-235 i bez dovođenja energije izvana.)

Dovedena energija neutronom, potrebna za raspad jezgre, zove se „**energija aktiviranja**“. Za U-235 ona iznosi 6,8 MeV, a za U-238 7,1 MeV. No, energija je sporog neutrona 0,025 eV, pa ona ne bi bila dostatna da izazove raspad jezgre U-235. Usprkos tome, jezgra se U-235 raspada. Zašto? Treba užeti u obzir da masa neutrona posjeduje i „**energiju mirovanja**“, mc^2_{sp} , pa se postavlja pitanje je li prirast energije prijelazne jezgre U-236 u usporedbi s jezgrom U-235 dostatan da osigura raspad. Usporedbom mase U-235 i mase neutrona s jedne strane i mase U-236 s druge strane, dolazimo do zaključka da razlika iznosi 1,00168 jedinica mase (j.m. – relativna atomska masa, 1 j.m. = 1/12 mase najlakšeg izotopa atoma ugljika $^{12}_6C$, poglavljje 4.1.). Ako se izračuna razlika između mase neutrona (1,00898 j.m.) i navedene razlike, dolazi se do defekta mase (manjka mase) koji iznosi 0,00730 j.m. Budući da 1 jedinica mase odgovara energiji od 931 MeV, zaključujemo da se u procesu dovođenja neutrona u jezgru U-235 oslobođa energija od $0,00730 \cdot 931 \text{ MeV} = 6,8$

MeV. Prema tome oslobođena je energija upravo dostatna za raspad jezgre U-236, pa se dakle U-235 može raspasti djelovanjem sporih neutrona.

(Odnos se jedinice mase kao energije i elektronvolta dobiva iz sljedećeg razmatranja. Jedinica mase iznosi $\approx 1,661 \cdot 10^{-27}$ kg, pa će za toliku masu energija mirovanja (mc_{sys}^2) biti :

$$1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 14,924 \cdot 10^{11} \text{ J.}$$

Kako je energija od jednog elektronvolta jednaka $1,6021 \cdot 10^{-19}$ J izlazi da je

$\text{Jedna jedinica mase} = \frac{14,924 \cdot 10^{-11}}{1,6021 \cdot 10^{-19}} \text{ eV} \approx 9,31 \cdot 10^8 \text{ eV} = 931 \text{ MeV}$	[1.7]
--	-------

Ako se analogni račun provede za U-238, dobira se da oslobođena energija, kao posljedica defekta mase, iznosi 5,3 MeV, što je znatno manje od potrebne energije aktiviranja (7,1 MeV). Zaključuje se da raspad U-238 djelovanjem sporih neutrona nije moguć. Dovedeni neutron mora razliku energije $7,1 - 5,3 = 1,8$ MeV donijeti u obliku kinetičke energije. To drugim riječima znači da se raspad U-238 može ostvariti samo pomoću bržih neutrona (neutrona velike energije). Odnos između brzine (c_n) i energije (W_n) neutrona u elektronvoltima dobiva se na osnovi mase neutrona, koja iznosi $1,675 \cdot 10^{-27}$ kg, i relacije da 1 eV predstavlja energiju od $1,6022 \cdot 10^{-19}$ J. Ako kinetičku energiju neutrona prikažemo relacijom

$W_n = \frac{m \cdot c_n^2}{2}$	[1.8]
---------------------------------	-------

izlazi da je

$c_n = 1,4 \cdot 10^4 \sqrt{W_n} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	[1.9]
--	-------

S obzirom na mogućnost raspada za jezgre Pu-239 i U-233 dolazi se do istih zaključaka koji vrijede za U-235.

Raspadom jezgre U-235, prema razmatranoj relaciji, nastaje jezgra stroncija (Sr) i ksenona (Xe) te dva neutrona. Masa U-236 iznosi 236,127 j.m., a zbroj mase stroncija (93,938 j.m.), ksenona (139,955 j.m.) te mase dvaju neutrona ($2 \cdot 1,00898 = 2,01796$ j.m.), iznosi 235,91096 j.m. Raspadom se stoga U-236 pojavljuje defekt mase od $236,127 - 235,91096 = 0,21604$ j.m., što odgovara energiji od $931 \cdot 0,216 \approx 202$ MeV. Ta se energija pojavljuje većinom (oko 80%) kao unutrašnja kalorička energija (kinetička energija) produkata raspada (u promatranom slučaju stroncija i ksenona), zatim kao kinetička energija neutrona, a ostatak čine β -zračenje i γ -zračenje. Točnija je raspodjela energije dana u tablici 1.1.

Tablica 1.1. Raspodjela energije fisije (raspada) jezgre U-235

	Generirana energija MeV	Iskoristiva energija MeV
fisijski fragmenti	168	168
raspad fisijskih produkata		
β -zrake	8	8
γ -zrake	7	7
neutrina	12	-

promptne γ -zrake	7	7
kinetička energija fizijskih neutrona	5	5
sekundarne γ -zrake	-	3
Ukupno	207	198

Međutim, istaknimo, količina je transformirane nuklearne energije u unutrašnju kaloričku energiju samo mali dio energije nuklearnog goriva. Ako naime uzmemu u obzir da jezgra U-235 ima masu od 235 j.m., a u energiju se transformira samo 0,216 j.m., to znači da je energetski iskoristivo samo (približno) 0,1 % ukupne mase koja sudjeluje u nuklearnoj reakciji. S takvim se stanjem međutim moramo zadovoljiti jer za tehničko iskorištenje ne postoji (ne znamo) bolji proces pretvorbe nuklearne energije, odnosno bilo kojeg oblika energije u druge energetske oblike, u korisne oblike energije. (Najbolji je ljudskom biću (teoretski) poznat proces proces termonuklearne fuzije koji se održava na Suncu: u tom se procesu 0,75 % mase pretvara u unutrašnju kaloričku energiju.)

Promatrano makroskopski energija oslobođena nuklearnom fisijom nije mala količina energije. U masi 1g U-235 ima, pokazat ćemo, $6,022 \cdot 10^{23} / 235$ jezgara, a raspadom svake od njih dobiva se oko 200 MeV , što odgovara $320 \cdot 10^{13} \text{ J}$, jer je $1 \text{ MeV} = 1,6022 \cdot 10^{13} \text{ MJ}$. Prema tome raspadom se 1g U-235 dobiva energija

$$\frac{1}{235} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 320 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 0,82 \cdot 10^{11} \text{ J}, \text{ odnosno}$$

$$\frac{0,82 \cdot 10^{11}}{3,6 \cdot 10^6} = 2,3 \cdot 10^4 \text{ kWh} = 23 \text{ MWh}$$

dok bi se pretvorbom čitavog mase 1g U-235 dobilo oko 23 GWh. ($1 \text{ M} = 10^6$, $1 \text{ G} = 10^9$)

(Raspadom jedne jezgre U-235 oslobađa se $0,89 \cdot 10^{-17} \text{ kWh}$ jer se jednim raspadom dobiva $3,20 \cdot 10^{-11} \text{ Ws}$, a $1 \text{ Ws} = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ kWh}$. Da bi se nuklearna energija transformirala u 1kWh unutrašnje kaloričke energije, potreban je raspad $1,12 \cdot 10^{17}$ jezgara U-235.)

Oba elementa, prirodni uranij i torij, nisu rijetki u Zemljinoj kori. Prosječni udio uranija iznosi 4 g/t, a torija 10 do 15 g/t.

(U stijenama uranija ima od nekoliko milograma do nekoliko stotina grama po toni, a u morskoj vodi oko tri milograma po toni.)

Plutonij se ne nalazi u prirodi (iznimno i samo u veoma malim količinama unutar uranijeve rudače), već se proizvodi u nuklearnim reaktorima od U-238 prema relaciji [1.1]. Radi se pritom o dijema vrstama reaktora: „termičkim reaktorima“ u kojima se smanjuje brzina (energija) neutrona kako bi se povećala vjerojatnost pogodaka jezgara U-235, ili reaktorima s bržim neutronima (tzv. „oplodnim reaktorima“), reaktorima u kojima se ne smanjuje brzina (energija) neutrona. U termičkim reaktorima samo neusporeni neutroni, pogode li jezgru U-238, osiguravaju proizvodnju plutonija, dok u oplodnim reaktorima svaki neutron, koji pogodi jezgru U-238, izaziva proizvodnju plutonija jer se radi o bržim neutronima. Kako takvi reaktori rade s „obogaćenim uranijem“ (u prirodnom je uraniju komplikiranim i skupim (energetski gledano) postupcima povećan postotak U-235 u odnosu na U-238) to se na završetku lančane reakcije, koja se odvija s U-235, ili, još

povoljnije, s Pu-239, dobije više nuklearnog goriva (Pu-239) nego što je bilo na početku (jer se pritom iz U-238 dobiva Pu-239). Zbog toga se takvi reaktori nazivaju i „brzim, oplodnim reaktorima“.

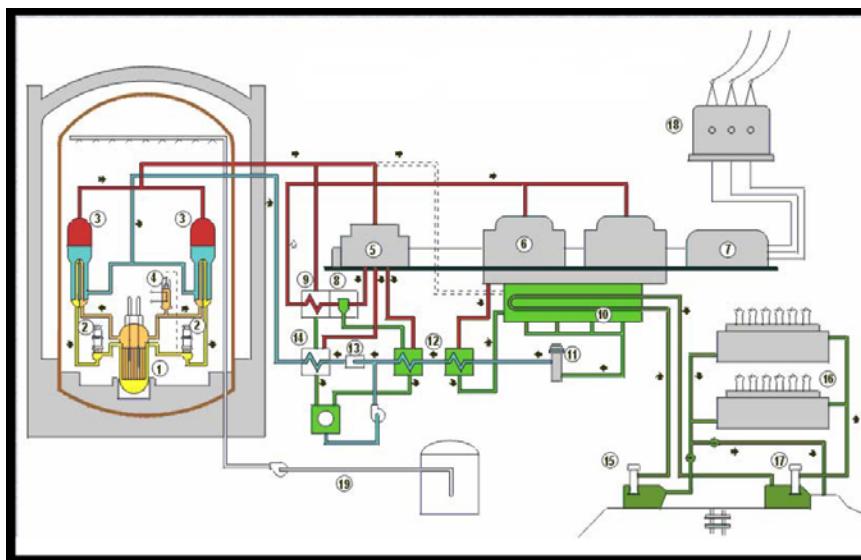
(Uranij mora biti obogaćen, mora biti povećan broj jezgara U-235, ili Pu-239, u odnosu na broj jezgara U-238, kako bi se povećala vjerojatnost fisije (raspada jezgara U-235 ili Pu-239) koja je smanjena jer se sada lančana reakcija odvija održavana ne sporim već brzim neutronima.)

Tijekom nastajanja u termičkim reaktorima gotovo se polovica proizvedenog plutonija raspada fisijom, pa se s porastom izgaranja goriva energetski doprinos plutonija ne razlikuje mnogo od energetskog prinosa U-235.

Netopričvodnja plutonija ovisi o tipu termičkog reaktora. Tako u „lakovodnom reaktoru s vodom pod tlakom“ ili, kako se još naziva, „tlakovodnom reaktoru“, u kojem se „obična“ voda upotrebljava i kao „rashladno sredstvo“ i kao „moderator; tj. „sredstvo za usporavanje neutrona“ (smanjivanje energije neutrona), električne snage 1.000 MW, koji radi godinu dana s nazivnom snagom, nastaje oko 710 kg „fisibilnog“ plutonija, od čega se u reaktoru raspadne 440 kg, pa u ozračenom gorivu ostaje oko 270 kg, što je jednak netopričvodnji plutonija. U „teškovodnom reaktoru“, reaktoru u kojem se „teška voda“ upotrebljava i kao rashladno sredstvo i kao moderator, tipa „CANDU“, uz jednake pretpostavke, netopričvodnja iznosi skoro 500 kg fisibilnog plutonija, a u reaktoru hlađenom ugljik-dioksidom više od 600 kg.

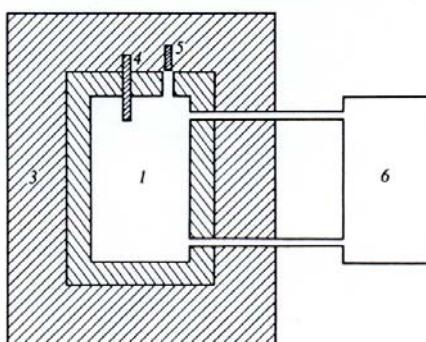
Lakovodni reaktor s vodom pod tlakom, Slika 1-18, reaktor je dakle u kojem (obična) voda usporava („moderira“) neutrone (neutroni nastali raspadom jezgre U-235 i Pu-239 brzi su neutroni koje valja usporiti; u protivnom ne bi se uopće mogla održavati lančana reakcija) i ujedno pohranjuje i prenosi unutrašnju kaloričku energiju nastalu transformacijom iz nuklearne energije fisije. (*Unutrašnja kalorička energija, nastala transformacijom nuklearne energije, pohranjuje se u nuklearnom gorivu i u produktima raspada, pretvara zatim u toplinsku energiju koja pak prelazi na vodu što struji kroz nuklearni reaktor (1).* S trenutkom prijelaza ta se toplinska energija pretvara u unutrašnju kaloričku energiju vode.) Zbog velikih je količina pohranjene unutrašnje kaloričke energije temperatura vode visoka: preko 300 °C na izlazu iz nuklearnog reaktora. Ta voda, tako su zamišljeni i tako se provode energetski procesi transformacije u električnu energiju u promatranoj nuklearnoj elektrani, ne smije ispariti. To je izvedivo jedino ako se voda nalazi pod velikim tlakom; otuda i naziv reaktora: „**reaktor s vodom pod tlakom**“ (ili, kraće „**tlakovodni reaktor**“) Zbog toga su potrebna dva odvojena (zatvorena) kruga: „primarni“ i „sekundarni“. Kroz prvi krug, primarni krug, voda pod tlakom tjerana crpkama (pumpama) (2) kruži kroz nuklearni reaktor (1) i izmjenjivače toplinske energije („generatore pare“ ili „parogeneratore“), (3). (Pumpama se, utroškom energije (električne), održava visoki tlak u primarnom krugu: tlak veći od 150 bara.) Unutrašnja se kalorička energija te vode u generatorima pare pretvara u toplinsku energiju koja prelazi na vodu u sekundarnom krugu nuklearne elektrane pretvarajući se u unutrašnju kaloričku energiju. Zbog toga raste temperatura vode pa se voda pretvara u paru jer se u sekundarnom krugu nalazi pod bitno nižim tlakom (60-ak bara) od vode u primarnom krugu. Para struji kroz (parnu) turbinu, visoko (5) i niskotlačni dio (6) turbine, u kojoj se unutrašnja kalorička energija pare (točnije, entalpija pare) pretvara u mehanički rad, zatim kroz „kondenzator“ (10) u kojem se kondenzira (ukapljuje) da bi pumpom (11) bila vraćena u generatore pare. (Pumpom (crpkom) se povisuje tlak vode s niskog tlaka u kondenzatoru na mnogostruko viši tlak u generatorima pare.)

Mehanički se rad konačno, u sinkronom generatoru nuklearne elektrane (7), pretvara u električnu energiju.)



Slika 1-18 Funkcionalna shema nuklearne elektrane s reaktorom hlađenim i moderiranim običnom vodom pod tlakom: 1-(nuklearni) reaktor, 2-crpkе (pumpe) primarnog rashladnog kruga, 3-parogeneratori, 4-tlačnik, 5-visoko tlačni dio turbine, 6-nisko- tlačni dio turbine, 7-sinkroni generator, 10-kondenzator, 11 kondenzatna pumpa (sekundarni rashladni krug), 12-rashladni tornjevi

Uredaj u kojem su ostvareni uvjeti održavanja lančane reakcije nazvan je „nuklearnim reaktorom“, slika 1-19. U njegovoj je jezgri smješteno nuklearno gorivo i materijal za usporavanje neutrona (moderator). Kroz jezgru strují sredstvo kojim se odvodi toplinska energija korisniku. (U slučaju nuklearne elektrane, to je parogenerator odnosno sekundarni krug.) Da bi se spriječio „bjeg“ neutrona iz jezgre, ona je oklopljena reflektoriom, a da bi se onemogućio prodor radioaktivnog zračenja u okoliš, oko reflektora je izgrađen biološki štit. Za regulaciju lančane reakcije služi kontrolni (regulacijski) sustav za koji se upotrebljavaju šipke od materijala (bor, kadmij) koji apsorbira („guta“) neutrone, pa tako oni ne mogu izazvati daljnje raspade jezgara U-235, a rezerva je sigurnosni sustav od istovrsnih šipki.



Slika 1-19 Shematski prikaz nuklearnog reaktora: 1 – jezgra reaktora, 2 – reflektor, 3 – sigurnosni (biološki) štit, 4 – kontrolni sustav, 5 – sigurnosni sustav, 6 – korisnik toplinske energije

Sedamdesetih se godina prošlog stoljeća predlagalo da se ne prerađuje „ozračeno gorivo“ (to je gorivo u kojem je U-235 potrošen do postotka koji onemogućuje nastavljanje lančane reakcije) nego da se takvo gorivo ostavlja neprerađeno u bazenima za odležavanje („prerada“ ozračenog goriva jest odvajanje ostataka U-235 (ima ga oko 1% u „istrošenom gorivu“, dakle više nego u prirodnom uraniju), U-238 i Pu-239 iz ozračenog goriva izvađenog iz nuklearnog reaktora kako bi se u nuklearni reaktor stavilo „svježe“ (neupotrijebljeno) nuklearno gorivo), kako plutonij, i U-235, koji bi se iz takvog goriva izdvojio, ne bi bio zloupotrijebljen u vojne svrhe i kao materijal za terorističke akcije. Tako bi nuklearno gorivo na bazi uranija ostalo samo djelomično iskorišteno. Ako se, naime, ozračeno gorivo preradi, U-235 i plutonij mogu se iskoristiti za nuklearnu fisiju i u termičkim i u oplodnim reaktorima, a uranij 238 kao oplodni materijal u oplodnim reaktorima.

Pokraj svakog se nuklearnog reaktora, u krugu nuklearne elektrane, nalazi veliki bazen napunjen običnom vodom. U taj se bazen pohranjuje, čim se izvadi iz nuklearnog reaktora, ozračeno gorivo. Naime, premda je zaustavljena lančana reakcija, ozračeno gorivo i dalje zrači. Radi se o radioaktivnom, po život opasnom zračenju, pa treba stoga onemogućiti prodror radioaktivnog zračenja u okolicu: stupac vode u bazenu dostatan je za to. Nadalje, premda se više ne odvija raspadanje jezgara U-235, niti Pu-239, pa se prema tome ne proizvodi ni unutrašnja kalorička energija iz nuklearne energije fisije, ozračeno je gorivo i dalje generator toplinske energije koja nastaje transformacijom iz unutrašnje kaloričke energije ozračenog goriva budući da je ono i nadalje radioaktivni izvor. Naime, mnoge atomske jezgre, nastale raspadom U-235 i Pu-239, nisu još u stanju najniže energije. Kako svaki sustav u prirodi teži mijenjanju prema stanju niže (najniže) energije, takve se jezgre raspadaju i oslobođaju višak energije emisijom čestica ili fotona povećavajući unutrašnju kaloričku energiju, time i temperaturu, ozračenog goriva. Premda se radi se o neznatnim količinama energije, u usporedbi s energijom koja se oslobođa za vrijeme lančane reakcije, tek nekoliko postotaka te energije, ozračeno gorivo treba hladiti; odvoditi toplinsku energiju u okolicu. U protivnom, i ta bi količina energije bila dosta da se temperaturu ozračenog goriva povisi do temperature taljenja, što se mora sprječiti zbog sigurnosnih razloga. (U protivnom radioaktivnost bi prodirala u okoliš ugrožavajući živote i zdravlje.) Ulogu hladila preuzima voda u bazenu na koju prelazi toplinska energija, transformirana unutrašnja kalorička energija ozračenog goriva, i voda u izmjenjivačima topline posebnog sustava, „sustava za hlađenje nuklearnih komponenata“ koji, uz hlađenje drugih komponenata nuklearne elektrane, služi i za hlađenje vode u bazenu upotpunjajući odvođenje toplinske energije preko slobodne površine vode u bazenu. Ta se toplinska energija pretvara ponovno u unutrašnju kaloričku energiju, no, pohranjenu sada u vodi bazena i vodi izmjenjivača topline. Zbog velike mase vode temperatura vode neznatno poraste i zatim se vrlo brzo uspostavlja toplinska ravnoteža s okolicom (okolnim zrakom, vodom): zbog razlike između temperature vode u bazenu i izmjenjivačima topline, koja je viša, i temperature okolnog zraka (vode), koja je niža, unutrašnja se energija vode pretvara u toplinsku energiju koja prelazi u okolicu (zrak, vodu) ponovno se pretvarajući u unutrašnju kaloričku energiju. Na taj se način temperatura vode u bazenu, odnosno i temperatura ozračenog goriva, održava konstantnom na malim vrijednostima. Ozračeno gorivo može neograničeno dugo ostati u bazenu ili se, nakon što se protokom vremena smanjio intenzitet radioaktivnog zračenja, izvući iz bazena i preraditi ili pohraniti u, za tu svrhu, posebno pripremljenim odlagalištima.

U lakovodnim reaktorima (obična) voda usporava neutrone omogućujući odvijanje i kontroliranje lančane reakcije. Obična voda, međutim, i „guta“ (apsorbira) neutrone smanjujući potreban višak neutrona za odvijanje lančane reakcije. Naime, da bi se odvijala fisija treba sičušnu metu (jezgru U-235) pogoditi s još sičušnjim projektilom (neutronom). Vjerojatnost je tog događaja izvanredno mala. Pokazuje se, povećava se, ukoliko se sporim neutronima (neutronima male energije) „gada“ jezgra. (Zbog toga se neutroni usporavaju, „moderiraju“.) Kako bi se kompenzirao manjak neutrona, gorivo u lakovodnim reaktorima mora biti (malo) „obogaćeni uranij“; u prirodnom je uraniju posebnim postupcima povećan postotak U-235 na (do) 5 %..

(U reaktorima s brzim neutronima postotak obogaćenja iznosi i do, graničnih, 40%).)

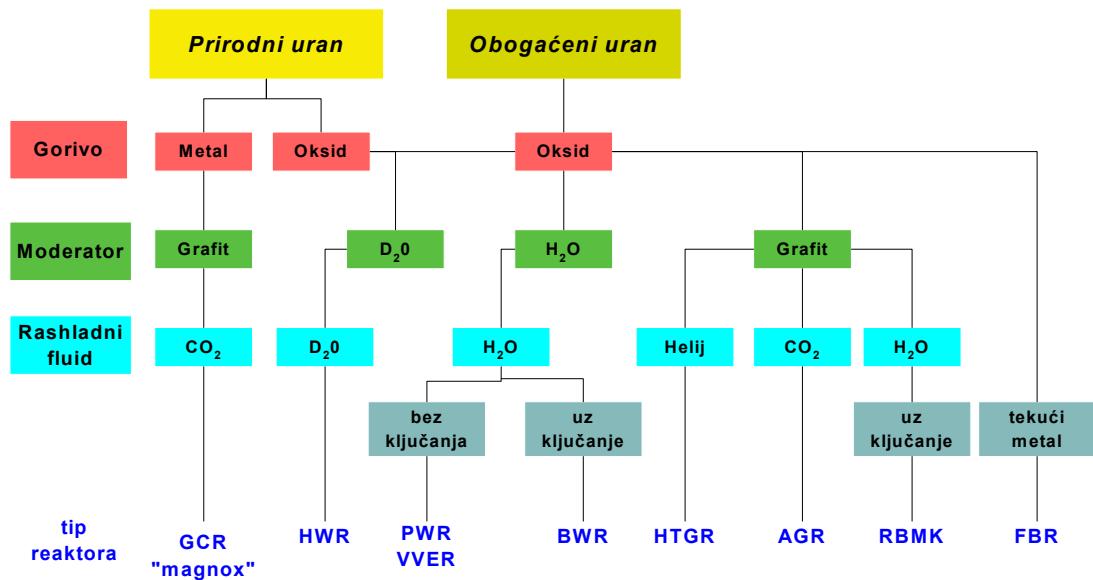
Za razliku od lakovodnih reaktora, teškovodni reaktori mogu iskorištavati prirodni uranij kao nuklearno gorivo. Teškovodni su reaktori naime oni u kojima je moderator teška voda (D_2O). Teška voda usporava neutrone ali ih ne apsorbira poput obične („lake“) vode (H_2O), pa nije potrebno obogaćivati uranij, što je prednost u odnosu na lakovodne reaktore. Ta se prednost poništava međutim troškovima „proizvodnje“ teške vode tako da ni jedna vrsta reaktora nije u prednosti pred drugom: nuklearne su elektrane s reaktorom moderiranim i hlađenim teškom vodom u osnovi slične nuklearnim elektranama s reaktorima koji su hlađeni i moderirani običnom vodom, uz razliku što je u primarnom krugu obična voda zamijenjena teškom vodom. Uporaba teške vode za hlađenje i moderiranje omogućuje da se kao nuklearno gorivo upotrijebi prirodni uranij, što nije moguće s reaktorima s običnom vodom.

(Jedna se vrsta teškovodnog reaktora naziva „CANDU“ jer ga razvijaju Kanadani: CANDU je kratica za "CANada Deuterium Uranium".)

Razvijeni su i još se razvijaju brojni tipovi termičkih reaktora. Mogu se klasificirati prema nuklearnom gorivu, moderatoru (sredstvu što usporava neutrone) i prema rashladnom sredstvu (sredstvu koje sudjeluje u procesu (procesima) pretvorbe nuklearne energije fisije u električnu energiju preuzimajući i prenoseći u daljnje procese nuklearnu energiju transformiranu u toplinsku energiju u nuklearnom reaktoru), slika 1-20. S obzirom na nuklearno gorivo (prirodni ili obogaćeni uranij, metalni uranij ili oksid uranij), dva su osnovna tipa termičkih reaktora: reaktori s prirodnim uranijem i reaktori s malo (slabo) obogaćenim uranijem (između 1 i 5%). Umjesto obogaćenog uranija može se djelomično upotrijebiti i plutonij.

Moderator može biti: obična voda, teška voda, grafit, berilij, berilij-oksid, organske tekućine i cirkonij-hidrid, a rashladno sredstvo: obična i teška voda (obje pod tlakom ili s isparivanjem u nuklearnom reaktoru), organske tekućine, natrij, smjesa natrija i kalija, rastaljene soli te plinovi kao zrak, ugljik-dioksid, helij i vodena para.

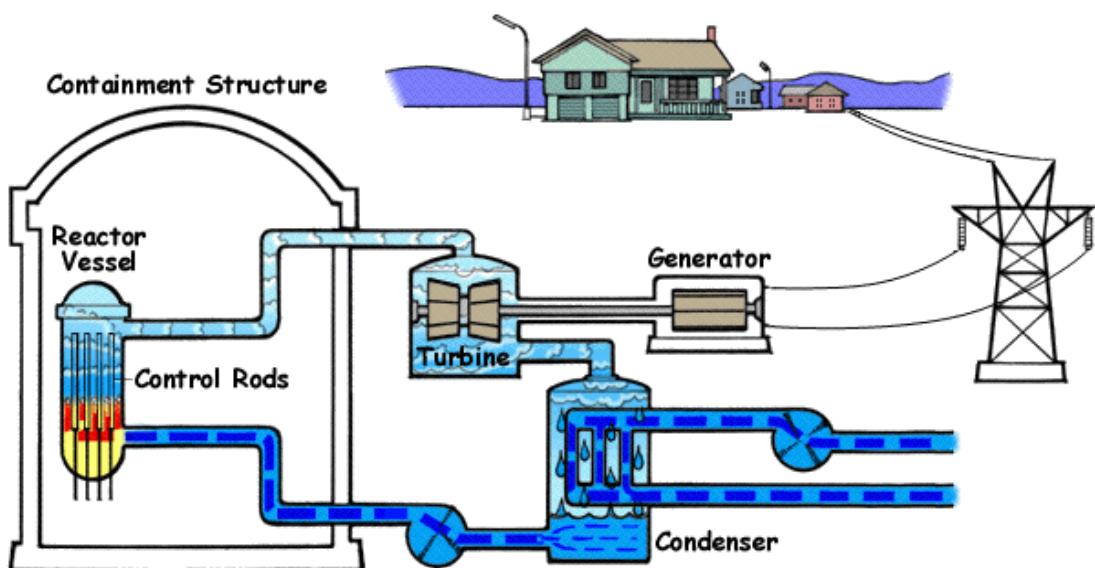
Kombiniranjem moderatora i rashladnog sredstva u reaktorima s prirodnim i obogaćenim uranijem do danas je razvijeno tridesetak tipova nuklearnih reaktora.



Slika 1-20 Pregled tipova nuklearnih energetskih reaktora

Najzastupljeniji su ovi reaktori (poredani prema važnosti za današnju nuklearnu energetiku), slika 1-19:

- **reaktor hlađen i moderiran običnom vodom** Taj se reaktor izvodi u dvije varijante: voda u reaktoru ima tlak viši od tlaka isparivanja, pa se, najčešće, naziva tlakovodnim reaktorom (reaktorom s vodom pod tlakom), engleska kratica PWR (Pressurized Water Reactor), ruska VVER (vodo-vodnoj energetičeskij reaktor), ili, voda u reaktoru kipi („kipući reaktor“) pretvarajući se u paru koja se odvodi u parnu turbinu; nuklearna elektrana ima samo jedan rashladni kruž, slika 1-21. Engleska je kratica za taj tip reaktora BWR (Boiling Water Reactor). U oba slučaju nuklearno je gorivo oksid obogaćenog uranija, UO_2



Slika 1-21 Funkcionalna shema nuklearna elektrane s kipućim reaktorom

- **reaktor hlađen i moderiran teškom vodom** (teškovodni reaktor) Engleska kratica za reaktor je HWR. Reaktor je ujedno i tlakovodni, a gorivo je oksid prirodnog ili obogaćenog uranija.
- **reaktor moderiran grafitom i hlađen ugljik-dioksidom** (plinom hlađeni reaktor) Radi se o dviye verzije reaktora: prvoj generaciji reaktora, poznatoj pod nazivom magnox, ime je dobila po leguri magnezija koja se upotrebljavala kao materijal za obloge šipki, a gorivo je bio metalni prirodni uranij, te drugoj, obilježavanoj kraticom AGR (Advanced Gas Reactor), koja se bitno razlikovala u izvedbi i materijalu gorivnih šipki čije su obloge bile od nehrđajućeg čelika, a gorivo je oksid obogaćenog uranija.
- **reaktor moderiran grafitom i hlađen kipućom vodom** Reaktor tog tipa gradi se samo u bivšem SSSR-u, a označava se kraticom RBMK (reaktor boljšoj močnosti kipjači). Gorivo reaktora je oksid obogaćenog uranija.
- **reaktor moderiran grafitom i hlađen helijem** Taj reaktor, poznat kao visokotemperaturni reaktor, kratica HTGR (High Temperature Gas Reactor) je posljednji korak u razvoju grafitom moderiranih reaktora. Gorivo reaktora je oksid obogaćenog uranija.
- **brz oplodni reaktor, kratica FBR** (Fast Breeder Reactor) Svi dosad navedeni tipovi reaktora pripadaju kategoriji termičkih reaktora u kojima moderatori usporavaju neutrone do „termičkih“ brzina. Brzi oplodni reaktor nema moderatora, a gorivo je oksid uranija višeg obogaćenja ili oksid plutonija.

Osim ovih reaktora u nuklearnim su energetskim postrojenjima pokusno upotrebljavani još neki tipovi nuklearnih reaktora. Primjerice, reaktori moderirani teškom vodom a hlađeni plinom i običnom vodom, te reaktori hlađeni organskim hlađilom. Slično, očekuje se da se neki od navedenih tipova reaktora (vrlo vjerojatno) ne će više upotrebljavati u bliskoj budućnosti. To se ponajprije odnosi na grafitne reaktore (s iznimkom visokotemperaturnog reaktora). Relativna važnost pojedinih reaktorskih tipova za nuklearnu elektroenergetiku najbolje se može uočiti iz njihove rasprostranjenosti u pogonu, tablica 1-2. Naročito je indikativan broj postrojenja u gradnji.

Budući da je naša, zasad jedina, nuklearne elektrana (u surlasništvu s Republikom Slovenijom, 50:50 %) nuklearna elektrana s tlakovodnim reaktorom, te da je taj tip nuklearnih elektrana daleko najzastupljenije u nuklearnoj elektroenergetici, to ćemo u poglavlju 10. razmatrati samo takvu nuklearnu elektranu.

Tablica 1-2. Rasprostranjenost nuklearnih reaktora u svijetu potkraj 2008. godine

Tip reaktora	Reaktori u pogonu	Reaktori u izgradnji	Obustavljeni reaktori
PWR	265	34	33
BWR	94	3	21
GCR	18		34
FBR	2	2	6
HTGR			4
HWGCR			3
HWLWR			2
LWGR	16	1	8
PHWR	44	4	5
SGHWR			1
X			2
	$\sum 439$	$\sum 44$	$\sum 119$

PWR = Pressurized Water Reactor

BWR = Boiling Water Reactor

GCR =AGR & Magnox = Gas Cooled Reactor

FBR = Fast Neutron Reactor

HTGR = High Temperature Gas Reactor

HWGCR = Heavy Water Gas Cooled Reactor

HWLWR = Heavy Water Moderated, Light Water Cooled Reactor

LWGR = RBMK = Light Water Graphite Reactor

PHWR = Pressurized Heavy Water Reactor 'CANDU'

SGHWR = Steam Generating Heavy Water Reactor

X = ostali

Takovodni reaktori, koji prevladavaju u nuklearnoj elektroenergetici današnjice, svoj razvoj dobrim dijelom zahvaljuju činjenici da je njihova prvotna uloga bila pogoniti ratne brodove i podmornice, pa je njihov razvoj bio sufinanciran od vojnih ustanova velesila (SAD, SSSR, Velike Britanije, Francuske, ...). Naime, razvoj potpuno novog tipa reaktora veoma je skup (više desetaka milijarda dolara) jer uključuje opsežan studijski i analitičko-istraživački rad, razvoj opreme, projekt, pogonsku dokumentaciju, gradnju prototipskog postrojenja, prikupljanje pogonskog iskustva i obiman proces licenciranja (dobavljanja dopuštenja za rad). Zbog toga je razvoj početno nastalih reaktorskih sustava bio dugotrajan i uključivao samo postupna poboljšanja, a ne korjenite promjene koncepcije. Čak obrnuto, neki u početnoj fazi predloženi reaktorski sustari („homogeni reaktori“, reaktori s organskim hladilom, lakovodni i plinom hladeni reaktori moderirani teškom vodom, grafitni reaktori s prirodnim uranom) postupno nestaju iz nuklearne elektroenergetike. Zbog toga je malo vjerojatno da će se razviti potpuno novi tip nuklearnog reaktora, čak ni u daljoj budućnosti. Umjesto toga postupni razvoj reaktorskih sustava najvećim dijelom uključuje povećanja sigurnosti (uključujući i „pasivnu“ sigurnost) postojećih izvedaba lakovodnih reaktorskih sustava.

Na taj bismo način mogli podijeliti nuklearne reaktore (nuklearne elektrane) u 4 generacije (prema projektnim karakteristikama odnosno vremenima ulaska u komercijalni pogon):

- *prva generacija uključuje prototipna postrojenja koja su u pogon ulazila pedesetih godina 20. stoljeća;*
- *drugu generaciju predstavljaju nuklearne elektrane koje su radile krajem 20. i koje rade početkom 21. stoljeća (tu pripada i nuklearna elektrana „Krško“);*
- *treća generacija nuklearnih elektrana postrojenja su napredne izvedbe koja se koriste poboljšanjima postojeće tehnologije povećavajući sigurnost i ekonomičnost (npr. intenzivnija upotreba oblika pasivne sigurnosti) i*
- *elektrane četvrte generacije koje će ući u pogon nakon 30-tih godina 21. stoljeća.*

Spomenuto je, od torija se može, djelovanjem neutrona u termičkom reaktoru, dobiti fizijski materijal U-233. Zbog toga se može torij, poput U-238, upotrijebiti kao oplodni materijal. Budući da torija ima više nego uranija, nastaje se razviti procesi za energetsko iskorištanje torija. Najveća je prednost nuklearnog ciklusa $\text{Th-232} \rightarrow \text{U-233}$ u odnosu na ciklus $\text{U-238} \rightarrow \text{Pu-239}$ u tome što U-233 ima veći neutronske prinos po fiziiji, pa je potrebno manje goriva za jednaku snagu reaktora. (Kad nastane fisijska U-233, emitiraju se dva do tri neutrona, a za lančanu je reakciju dostatan jedan neutron. Ako se taj višak neutrona iskoristi za proizvodnju U-233 od Th-232, moguće je dobiti faktor konverzije veći od jedan (više se umjetnog nuklearnog goriva dobiva iz torija nego iz U-238), što je velika prednost torija. Nuklearnim torijskim reaktorima mogao bi se, promatrano dugoročno, ostvariti ekonomičniji gorivi ciklus nego upotreboom drugih tipova reaktora. Neki unaprijeđeni tipovi torijskih reaktora izgleda da mogu proizvoditi dostatno U-233 da bi se mogao ostvariti sustav koji bi sam sebe održavao i u koji ne bi trebalo dodavati obogaćeni uranij. Takav bi sustav bio pogodan za zemlje koje ne raspolažu s većim količinama fizijskih materijala i koje nastoje osloboditi se uvoza (obogaćenog) uranija.)

Ciklus Th-232 → U-233 ima međutim i veliki nedostatak jer je za početno punjenje potreban visokoobogaćeni uranij ili plutonij, a postoje i dodatne poteškoće u preradi goriva zbog jakog γ - zračenja torija koji emitira i a-čestice.

1.6 O nekim pitanjima i mjerama (pouzdane) opskrbe (električnom) energijom

Osnovne su značajke razvoja današnjeg ljudskog društva nagli i veliki porast broja ljudi, brzi razvoj tehnike i tehnologije, te težnja za višim životnim standardom, pri čemu je najneophodniji uvjet za takav razvoj pouzdana i sigurna opskrba energijom. Jedna je od temeljnih zadaća pritom odrediti i ispitati utjecaj i posljedice stohastičke (vjerovatnosne) prirode energetskog (elektroenergetskog) sustava na opskrbu energijom te usporedbom različitih rješenja ustanoviti je li je nađena najekonomičnija ravnoteža između troškova postojane opskrbe i cijene (šteta) nedostavljene (neisporučene) energije budući da preostali zahtjevi mogu biti jedanput u tolikoj mjeri međusobno ovisni da ih je nemoguće strogo odvojiti, a drugi put, pak, zadovoljenje nekog od zahtjeva posve isključuje ostale. Za sada je, međutim, još uvijek, kvantitativna primjena teorije pouzdanosti u energetskom sustavu u razvoju pa je njena uloga svedena uglavnom na kvalitativna razmatranja. Ta činjenica iznenađuje budući da je pouzdana opskrba energijom oduvijek bila temelj gospodarstva razvijenih, industrijskih zemalja: spomenute su krize pokazale od kakve je presudne važnosti opskrba električnom energijom, odnosno energijom (naftom), kako za industrijske ("razvijene") zemlje tako i za "zemlje u razvoju". (*Očito, radi se o jako komplikiranoj teoriji.*) Ističemo naftu, između oblika energije, budući da je ona još uvijek, a bit će i u dogledno vrijeme, stožer (temelj) energetike jer zauzima oko polovine svjetskog tržišta energijom i jer danas, tridesetak godina nakon što je embargo na naftu istaknuo pitanje energetske sigurnosti i pouzdanosti u sam vrh svjetskog zanimanja, te dvadesetak godina nakon što je revolucija u Iranu probudila strahovanja od još gorih energetskih prilika, ponovno jača zabrinutost zbog nepouzdane opskrbe energijom (naftom i plinom) i pojave novih (starih) kriza u posljednjem desetljeću prošlog stoljeća i prvim godinama ovog. U kojoj su mjeri zabrinutost i strahovanje opravdani? Prijete li nam još teže krize ili je doživljavanje i preživljavanje, uz drukčije energetsko ponašanje, tegobnog i gorkog iskustva iz sedamdesetih godina prošlog stoljeća promijenilo energetsku zbilju toliko da potrošači (kupci) mogu očekivati jedno dulje razdoblje u kojem dostupnost energije ne će biti ni ekonomski ni politički ograničena? Odgovor je, dakako, u domaćaju predviđanja, ali, istodobno, i mnogo stvarniji: da bi se potvrdio mora propisati načine ponašanja koje će morati prihvatići čovječanstvo ne želi li ugroziti svoj opstanak. Mnoštvo, naime, pokazatelja opominje ukazujući na opravdanost zabrinutosti, no, srećom, iako zbumujuće, postoji i ne manje uvjerljivih naznaka što upućuju na vjerovanje da je ostvareno pouzdanije energetsko uporiše od očekivanog. Ironično ili ne, tome su doprinijele upravo energetske krize; prevladavanjem kriza i razumijevanjem pokazatelja kriza dokučit će se zasade uspješnijeg energetskog ponašanja što će jamčiti bezbrižniju energetsku budućnost.

Bit je energetske pouzdanosti, istaknimo, da osigura odgovarajuću, količinsku i kvalitetom dostatnu, opskrbu energijom po razumnim cijenama i na načine koji ne ugrožavaju nacionalne vrijednosti i ciljeve. Nije stoga naročito teško zamisliti vrstu događaja koji bi mogao izazvati energetsku krizu. Zapravo, pitanje nije u tome hoće li se zbiti događaji koji će ugroziti pouzdanost opskrbe energijom ili energetske zalihe - jer će ih nesumnjivo biti, bili oni političke, vojne ili tehnološke prirode - već u kojoj će

mjeri samo energetsko tržište biti elastičnije i hoće li njere pouzdanje opskrbe energijom polući uspjeh. No, nažalost, postoji pritom i mnogo toga što je neizvjesno (nepouzdano), na pragu 21. stoljeća, počevši od količina zaliha nafte izvan OPEC-a, usmjeravanja naraslih novčanih viškova u zemlje u razvoju, što je dovelo do velikog međunarodnog zaduživanja i prouzrokovalo današnju neprekidnu dužničku krizu potkopavajući time razvoj mnogih zemalja i prijeteći im gubitkom nacionalne autonomije i političke neovisnosti, točnih zaliha neobnovljivih izvora energije (nafte i prirodnog plina), stvarnog utjecaja energetskih pretvorbi na okoliš (pitanje porasta temperature zbog „efekta staklenika“), ekonomskog rasta razvijenih i nerazvijenih, rasta broja stanovnika planeta, itd, itd, pa do tehnološkog razvoja koji može bitno promijeniti stanje opskrbljenoosti energijom i pouzdanost opskrbe, da bi odgovor bio jednostavan, lako razumljiv ili, barem, jednoznačan.

Ograničeni opsegom (i nakanjenim sadržajem) ovog udžbenika ne razmatramo stoga (detaljno sve) elemente energetskih kriza i pouzdane opskrbe energijom, koji bi trebali omogućiti propisivanje energetskog ponašanja, već navodimo samo kratko važnije pokazatelje, nedoumice i pitanja energetske sadašnjosti i budućnosti, ostavljajući za detaljnija i višeobuhvatnija promišljanja njihovo tumačenje, i ističemo samo spoznaje i zaključno mjere što će povoljno utjecati na dostatnost, cjenovnu prihvatljivost, pouzdanost i sigurnost opskrbe energijom:

- nafte je stožer energetike, još uvijek najvažniji izvor energije za industrijski svijet. Radi li se o prometu, ne postoji nikakva značajnija zamjena;
- većina je danas poznatih rezervi nafte smještena daleko od glavnih svjetskih potrošača; nafte prelazi mnoge granice i putuje morem i kopnom preko velikih udaljenosti. Više nego li bilo koja druga roba, ili oblik energije, nafte je tijesno isprepletena s nacionalizmom i državnom moći; za njezinu se kontrolu vode političke i oružane borbe;
- potražnja za naftom ponovno raste, može se očekivati i daljnje povećanje proizvodnje u zemljama izvan OPEC-a. Vlade tih zemalja sklone su smanjiti poreze kompanijama koje su voljne investirati kako bi spremne dočekale, predviđljivo, daljnje povećanje cijene nafte i dobro zaradile;
- postaje li dobavljanje nafte iz prirodnih izvora sve otežanijim?;
- hoće li ekološki proturazlozi kociti uporabu nafte (u elektroenergetici barem)?;
- količine su nafte, po svemu sudeći, ipak konačne, dakle iscrpljive? (Postoje hipoteze o mogućnosti anorganskog dobivanja nafte.);
- povećanje cijene nafte snažno potiče inflaciju do mjere da ona izgleda nerješivi problem, uzrokuje recesije, nezaposlenost, ekonomski pad i političke probleme koji se vrlo teško rješavaju i u zapadnim demokracijama?;
- naftna kriza nije izmijenila svjetsku politiku: prijetnja uskraćivanja nafte pogđa više izvoznike od bogatih uvoznika?;
- poremećena opskrba naftom nije jedina prijetnja energetskoj stabilnosti; nova nuklearna nezgoda (nesreća) bila bi veća?;
- utjecaj informaticke revolucije: danas je većina tržišnih informacija gotovo trenutačno dostupna svim zainteresiranim što znači da je vrijeme reagiranja

daleko kraće, da su razna energetska tržišta tješnje povezana i da neposrednije utjecu jedna na druge;

- utjecaj eskalirane brige za okoliš (Kyoto sporazum): hoće li uzrokovati udaljavanje od fosilnih goriva što bi opet, posljedično, rezultiralo novim nedoumicama glede energetskih mjera, velikom zbrkom u energetskim industrijama i dodatnim troškovima?;
- manipulacije opskrbom naftom (i plinom) u političke svrhe; valja razmisliti o ukupnim potrebama, viškovima, proizvodnim kapacitetima da bi se izbjegle nestabilnosti energetskog sustava i onemogućile zlorabe: primjerice, kada je rat na Bliskom Istoku doveo do embarga na arapsku naftu i prvi "naftnog šoka", jedva da su postojale neke rezerve u svijetu na koje se moglo osloniti;
- smanjenje udjela OPEC-a u opskrbi, stvorene strateške rezerve, preorijentacija na ugljen i plin, supertankeri i naftovodi (iransko-irački rat promovirao je potrebu za supertankerima i potaknuo izgradnju naftovoda);
- nestabilnosti Bliskog Istoka i Zaljeva;
- razvoj primjene drugih oblika energije (obnovljivih, fuzije), smanjenje potrošnje energije po jedinici bruto nacionalnog proizvoda;
- viškovi u energetskom sustavu: kojom će brzinom nestajati?;
- hoće li, postigne li se, sigurnija energetska opskrba usporiti (zaustaviti) napore poboljšanja energetske efikasnosti (djelotvornosti)?;
- koliko (energije) košta gospodarenje energijom (koliko košta racionalna uporaba energije)?;
- je li je briga za životnu sredinu danas (okoliš) jedini (isključivi) pokretač energetske efikasnosti, kao što je to bio slučaj sa cijenom energije sedamdesetih godina prošlog stoljeća, ili je efikasnost (djelotvornost, racionalnost) ugrađena (inherentna) u energetski sustav;
- može li se predvidjeti porast potrošnje energije (nafte) u zemljama u brzom razvoju (Kini, Indiji, ...)?;
- koliko (stvarno) ima (još) nafte, prirodnog plina i ugljena?;
- ne poboljša li se tehnologija izgaranja i pohranjivanje (skladištenje) CO₂, hoće li restriktivne mjere ograničiti uporabu ugljena (Kyoto protokol /sporazum/)?;
- hoće li današnja nedorečenost propisa i nadalje otežavati izgradnju nuklearnih elektrana?;
- skreće li zabrinutost zbog globalnog zagrijavanja pozornost na nove generacije manjih, inherentno pouzdanijih nuklearnih reaktora?

Razmišljati, dakle, o neizvjesnostima prigodom procjenjivanja (pouzdane) opskrbe energijom znači suočiti se sa stvarnošću, prepoznati i razumjeti nepouzdanosti od bitne važnosti za donošenje energetskih odluka kako u državnom tako i u privatnom sektoru. U takvim okolnostima, koje mjere predložiti (hrvatskoj, svjetskoj) energetskoj politici sa stajališta (pouzdane) opskrbe energijom? Nameću se gotovo same:

- usporiti porast potrošnje nafte (što manje ovisiti o nafti /uvozu nafte/), odnosno potrošnju za energetske pretvorbe (Nafta je nezamjenjiva, praktički; u svim tehnološkim procesima.);
- ojačati industriju nafte i plina;
- povećati uporabu prirodnog plina;
- povećati stupnjeve djelovanja (energetsku korisnost, efikasnost, djelotvornost);
- potpomagati istraživanja i razvoj (obnovljivi izvori, fuzija);
- osigurati konkurentna energetska tržišta; i
- ponovno razmotriti prednosti nuklearne energije (fisije – brzi oplodni reaktori) u traženju trajnijeg rješenja opskrbe električnom (i toplinskom) energijom.

2 O energiji

Energija, pojmovi i odnosi koji je određuju

Na početku govorit ćemo o energiji.

Zašto? Tri su razloga tome.

Prvi, to nam je zadatak: naš se fakultet u osnovi bavi s dva (životna) tijeka: s tijekom energije i tijekom informacija, koji je isto samo strujanje energije.

Informacija je samo oblik energije: mi se međusobno vidimo i čujemo, izmjenjujemo informacije (energiju koju naše tijelo osigurava transformirajući „kemijsku energiju“ unesenu branom), jedino i samo zbog toga što energija struje između nas i obavlja rad u našim osjetilima.

Pritom, razmatrat ćemo samo onaj prvi tijek, tijek energije. Preciznije, bavit ćemo se većinom pretvorbama najrazličitijih oblika energije u (mehanički) rad: energetskim procesima pridobivanja (mehaničkog) rada koji se odvijaju u termoelektranama, hidroelektranama, solarnim, vjetroelektranama i nuklearnim elektranama.

(Pretvorbom mehaničkog rada u električnu energiju u sinkronim generatorima, zatim električne energije u korisne oblike energije i u informaciju, i sa svime povezanim s takvim transformacijama, bare se drugi predmeti i udžbenici).

No, zbog sve veće važnosti „obnovljivih izvora energije“ u proizvodnji električne energije, predstaviti ćemo i tzv. „direktne (neposredne, izravne) pretvorbe“ u električnu energiju, pretvorbe što se odvijaju bez uključivanja toplinske energije u energijske procese. Zvuči jednostavno; u osnovi i jest.

Koji je **drugi** razlog?

Taj razlog dobro poznajete: zbog važnosti energije (i informacije).

Čuli ste,

energija je osnova života, bez energije nema života, itd, itd.

I to je točno.

Energija je materijalna osnova svake civilizacije, a oblici energije koji su dostupni, koji se rabe, određuje stupanj razvoja te civilizacije.

Dostupnost su i opskrbljenost energijom doista preduvjeti ne samo djelovanja i rasta gospodarstva već i pukog održanja života. No, pitanje je, kako se opskrbljivati energijom? Primjerice, električnom? Što biste odgovorili, kako biste glasovali, postavili se referendumsko pitanje izgraditi ili ne nuklearnu elektranu u Hrvatskoj? Da, ne? U svakom slučaju bilo bi neodgovorno (i nedopustivo) odlučivati ne ovlada li se prije toga znanjem i razumijevanjem koje će otkloniti donošenje odluke temeljene na neznanju, nerazumijevanju, predrasudama, manipulacijama, strahovima i/ili lijepim željama i snovima. Bavit ćemo se stoga energijom na „najdirektniji način“ kako bismo

spoznali što je to energija, kako se opskrbljujemo energijom, kako upotrebljavamo energiju, kako rješavamo problem koji nazivamo "problemom opskrbe energijom".
(Kako to da uopće postoji takav problem kad je energija nestvoriva ni uništiva: postoji odvijek i postojat će uvek?)

Izučavat ćemo energetske procese u elektroenergetskom sustavu (s kojim se pak potanko bavi jedan od profila studija na našem fakultetu: „Elektroenergetika“).

Elektroenergetski je sustav danas još uvijek najveći, najrasprostranjeniji, najutjecajniji, najneophodniji, najsloženiji (najkompliciraniji) i najskupljii tehnički sustav.

Kako to?

Jer je zadatak elektroenergijskog sustava opskrba električnom energijom, a električna je energija oblik energije na kojem se razvija naša civilizacija, na kojem počiva naša civilizacija.

I, konačno, **treći** je razlog, da bismo mogli razumjeti rad elektroenergetskog sustava, odnosno proizvodnju i opskrbu električnom energijom (eksergijom).

Naime, usprkos navedenom, malo znademo o energiji i to malo što znamo zaboravimo ili pogrešno shvaćamo.

Pokušajmo stoga najprije odgovoriti na pitanje: **što je energija?**

Pokušajmo definirati energiju.

Moramo odmah reći:

ne postoji jednostavna, „dobra“, općeprihvaćena definicija energije.

Zašto?

Razumjet ćemo spomenemo li nekoliko definicija koje se najučestalije rabe.

Primjerice:

1. Energija je sposobnost obavljanja (mehaničkog) rada.

Je li je to dobra definicija energije?

Ne, nije. Zašto?

Zato što ništa ne definira. **Rad (mehanički rad) je samo oblik energije.** Jedan pojam "definiramo" pomoću drugog, koji je isti, možda samo (nekima) bolje poznat.

(Morali bismo sada definirati što je to (mehanički) rad, pa zatim pojmove kojima se definira rad itd., itd.)

Ni brojne druge definicije energije nisu upotrebljivije. Pogledajmo:

2. **Energija je jedan od osnovnih oblika materije.**
(To je točno, no beskorisno: čemu služi takva definicija? **Materija jest tvar plus energija.**)
3. **Energija je svojstvo materije da može biti transformirana u rad i/ili toplinu.**
(**Materija = tvar + energija;** definiranje energije pomoću energije: rad i toplina jesu energija, oblici energije.)
4. **Energija je sposobnost izazivanja promjene.**
(Točno i lijepo rečeno, ali isto tako i beskorisno za naša razmatranja.)
5. **Energija je „ono“ što mijenja stanje zatvorenog sustava kada prelazi njegove granice.**
(Točno, no ne sveobuhvatno: postoje i drugi oblici energije uz one koji „mijenjaju stanje zatvorenog sustava“. Drugi oblici uz mehanički rad, toplinsku energiju i rad trenja, oblika što prelaze granice zatvorenog sustava i mijenjaju mu stanje. Osim toga, što je to „**zatvoreni sustav**“?)
6. **Energija je temeljno svojstvo koje posjeduje svaki fizički sustav.**
Energija je fizičkog sustava u određenom stanju definirana kao mehanički rad potreban da se promijeni stanje sustava od nekog početnog stanja (zvanog referentno) do danog (promatranog) konačnog stanja.
(Nedostatna i nejasna definicija: koje je to početno i konačno stanje, što je s drugim oblicima energije bez kojih se, u većini slučajeva, ne će moći promijeniti stanje sustava od početnog do konačnog?)

Zašto ne postoji prihvatljiva (dobra) definicija energije?

Dva su razloga: jedan subjektivni, drugi objektivni.

Subjektivni: mi, ljudi, ne znamo što je to energija premda se sve, doslovce sve, što se događa na Zemlji svodi, u što ćemo se uvjeriti, samo na **energetske procese:**

- **pretvorbe oblika energije, odnosno**
- **strujanje i izmjenu energije.**

(I mi se, kako smo već istaknuli, međusobno vidimo i čujemo samo zbog toga što energija struje između nas. U protivnom, bili bismo i glubi i sljepi; jeste li se ikad upitali bili stvarno mogao vidjeti „nevidljivi čovjek“ /lik brojnih filmova/?)

Međutim, znamo se služiti energijom.

Objektivni razlog: kako se povećava naše znanje o nekom pojmu, predmetu ili sadržaju, to smo skloniji, i to možemo, sve više apstraktno razmišljati o njima. U tom slučaju, posljedično, s porastom našeg znanja svaka definicija postaje ubrzo ograničavajućom. (Ne obuhvaća nova saznanja.)

Ljudsko biće, međutim, ne voli ne znati. Izmišlja zbog toga aksiome (*aksiom je temeljno načelo čija se valjanost i istinitost prihvata bez dokazivanja, „pravistina“*), odnosno, ono što ne

zna proglaši osnovnim pojmom. A osnovni se pojam ne može definirati – ne postoji još "osnovniji pojam".

Drugim riječima, energija je osnovni pojam; dakle, ne može se definirati.

Usprkos tome, budući da je proces učenja najlakše započeti s definicijama, pa čak i osnovnih pojmoveva i odnosa, to se i čini tako. A zatim se kasnije takve definicije nadopunjaju ili odbacuju.

Zbog toga ćemo, premda je, naglasimo, svaka definicija energije nedorečena, jer jedan osnovni pojam definiramo pomoću drugih osnovnih pojmoveva, ipak prihvati jednu od navedenih definicija:

„energija je sposobnost obavljanja rada (mehaničkog rada)“.

Zašto baš tu definiciju?

Jer ćemo uz pomoć te definicije, za naše potrebe, moći podijeliti sve oblike energije u skupine kako nam to odgovara. Zasad, u dvije skupine. Kasnije, u tri.

Prvu će skupinu sačinjavati oblici energije koji se mogu pohraniti, akumulirati, uskladištiti, nagomilati, sačuvati u masi (tvari) i zadržati svoj oblik u vremenu – kroz određeno dulje vrijeme barem.

To su stalni ili stacionarni oblici energije. Zvat ćemo ih još i „*unutrašnjom energijom*“ jer se pohranjuju u tijelu (sistemu) kao cjelini, ali i u razinama građe tijela (sistema): jezgri atoma, atomima i molekulama.

Drugu će skupinu tvoriti tzv. „*prijelazni oblici energije*“.

To su oblici energije čiji se oblik ne može zadržati u vremenu; oni postoje samo u trenutku kad jedan od stacionarnih oblika mijenja svoj oblik odnosno kad energija prelazi, struji s tijela na tijelo, sustava na sustav nevezano uz masu (tvar).

Kako ćemo to učiniti?

Definirat ćemo prvo pojmove (**mehanički rad i sila**).

Što je (**mehanički rad**)? Sjetimo se definicije iz „Fizike“.

(*Tu ćemo definiciju, za naše potrebe, morati promijeniti i dopuniti.*)

- **Mehanički je rad svaldavanje sile na putu: rad je učinjen, rad se obavlja, ako se hvatiše sile pomaklo, pomiče u pravcu djelovanja sile.**

(Podsetimo, to je bitno za našu („novu“) definiciju rada, pravac ima dva smjera.)

Što je **sila**?

- Sila je svako ono djelovanje koje nastoji promijeniti, ili je promijenilo, brzinu, odnosno položaj, i/ili oblik i/ili obujam tijela (sustava) na koji djeluje.

Pojednostaviti ćemo promatranja i krenuti od **četiri temeljne prirodne sile** (ne „interakcije“) svijeta u kojem živimo:

- gravitacijska*, beskonačnog doseg, jakost opada s kvadratom udaljenosti;
- elektromagnetska* („drži“ elektrone u atomu), beskonačnog doseg, jakost opada s kvadratom udaljenosti;

(Magnetska sila nastaje kao posljedica električnih promjena, npr. gibanja naboja. Magnetska je sila relativistička električna pojava. /Elektromagnetska sila kontrolira „svijet“ atoma i molekula i omogućuje život./)

- jaka nuklearna* („drži“ protone i neutrone u jezgri atoma), doseg 1 fermi¹ (10^{-13} cm), jakost opada mnogo brže nego li s kvadratom udaljenosti, i
- slaba nuklearna sila*² („određuje“ kako se jezgra raspada sadrži li višak protona ili neutrона), doseg mnogo manjeg od jednog fermija, kako bismo razvrstali (klasificirali) oblike energije.

Tablica 2-1 Temeljne sile

Teorija (trenutačna)	Sila	Medijatori	Relativna jakost [#]	Opadanje jakosti sile s udaljenosću	Doseg
kromodinamika	jaka nuklearna	gluon	10^{38}	$1/r$	$1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
elektrodinamika	elektromagnetska	foton	10^{36}	$1/r^2$	beskonačan
flavordinamika	slaba nuklearna	W i Z bozon	10^{25}	$\frac{e^{-m_{W,Z}r}}{r}$	10^{-18} m
geometrijska dinamika (ne kvantna)	gravitacijska	graviton	10^0	$1/r^2$	beskonačan

■

[#]Aproksimacije. Točna jakost ovisi o uključenim česticama i energijama.

2.1 Klasifikacija oblika energije

Čim postoji sila, postoji i polje sile (prostor u kome se osjeća djelovanje sile, u kome djeluje sila) i, poslijedično, postoji i potencijalna energija koja se pohranjuje (akumulira) u tvari. Primjerice, električna i/ili gravitacijska potencijalna energija energija je

¹ Jedinica fermi nije jedinica Međunarodnog sustava jedinica no u počast Fermiju, čovjeku koji je prvi proveo kontroliranu nuklearnu fisiju 1942. godine, učestalo se rabi.

² Elektromagnetska i slaba nuklearna sila spojene su u jednu silu, tzv. elektroslabu silu što, međutim, za naša razmatranja nije bitno.

akumulirana u rasporedu električnih naboja, odnosno tijela (sustava) u gravitacijskom polju neke mase.

Naziv „električna potencijalna energija“ nastao je kao rezultat gledanja na svaki izvor struje kao na nabijeni kondenzator. Ako je, naime, u kondenzatoru pohranjen naboј Q pri naponu U , električna je potencijalna energija jednaka produktu QU [J]. (As $V=J$) Neka se baterija, npr., može promatrati na potpuno isti način, samo što je naboј Q u njoj posljedica kemijskih reakcija. Isto vrijedi i za električnu mrežu elektroenergetskog sustava u kojoj naboј Q potječe od elektromagnetskog međudjelovanja u proizvodnom dijelu elektroenergetskog sustava (u sinkronim generatorima elektrana). Pojam je pak „električna energija“ namijenjen drugoj svrsi. Njime opisujemo **tranzijent** u procesu pretvaranja električne potencijalne energije u neki drugi oblik: mehanički rad, potencijalnu, kinetičku, rasijetnu, unutrašnju kaloričku energiju, ...

Zbog postojanja četiriju sila, postoji šest stalnih oblika, stacionarnih oblika energije koji se mogu akumulirati, uskladištiti, sakupiti, nagomilati, pohraniti u tvari i sačuvati svoj oblik kroz određeno dulje vrijeme. Te ćemo oblike energije kratko nazivati **unutrašnjom energijom**.

To su:

1. **gravitacijska potencijalna energija,**
2. **električna (elektromagnetska) potencijalna energija,**
3. **nuklearna energija,**
(fuzije i fisije /pojednostavljeno, električna potencijalna energija na razini jezgre atoma; oslobađa se kad odbojna električna sila prevlada privlačnu jaku nuklearnu silu/),
4. **kinetička energija,**
(zbog djelovanja jedne ili više sila),
5. **energija mirovanja ($E = mc_{sv}^2$) koju tijelo (sustav) posjeduje jer posjeduje masu, i**
6. **unutrašnja kalorička energija (UKE).**

(U tijelu /sustavu/, s definiranim granicama, UKE energija je akumulirana na razini molekula /ili atoma radi li se o sustavu izgrađenom od atoma/. Jednaka je sumi kinetičke energije molekula (energiji translacije, rotacije i vibracije) i potencijalne energije pridružene vibracijama molekula /privlačenje i odbijanje molekula/. Naime, mehanička se energija /zajednički naziv za sumu kinetičke, potencijalne, elastične i rotacijske energije tijela/ može akumulirati ne samo u tijelu kao cjelini već i na razini molekula koje se kreću i međusobno privlače i odbijaju. /Odnosno, i na razini atoma radi li se o jednoatomskom kemijskom elementu ili krutim tvarima./ Molekule čvrstih tijela titraju /vibriraju/ oko svojih srednjih položaja, pa i tu postoji stalna pretvorba potencijalne u kinetičku energiju i obratno. Prosječna (translatorna) bržina molekula proporcionalna je temperaturi tijela.)

Ostali su oblici energije prijelazni. To su oblici energije koji prelaze s tijela na tijelo, sa sustava na sustav, nevezano uz masu, bez posredovanja mase (nisu pohranjeni u masi):

1. **mehanički rad ili kraće rad,**

2. toplinska energija,

3. električna (elektromagnetska) energija i

(Električna je energija, ponovimo, tranzijent u procesu pretvorbe energije elektromagnetskih polja / elektrostatičkih i magnetskih/, stvorenih mehaničkim odvajanjem elektrona od jezgre atoma, u neki drugi oblik energije. Elektroenergetski sustav je najkomplikiraniji tehnički sustav upravo zbog činjenice da je električna energija prijelazni oblik energije; oblik koji se ne može direktno pobraniti i onda po volji rabiti u vrijeme kada nam to odgovara.)

4. rad trenja

(Rad je trenja mehanički rad kojim se sviđavaju sile trenja / sile što tangencijalno djeluju na granicu tijela/ i/ ili otpora / naprezanja/ pretvoreni u unutrašnju kaloričku energiju).

Svi ostali oblici energije, različitih naziva, samo su oblici koji pripadaju jednom od nabrojenih. Primjerice, ono što zovemo **mehaničkom energijom** zajednički je naziv za sumu ovih **stalnih, stacionarnih** oblika energije koji se pohranjuju u tijelu (sustavu) kao **cjeline**:

- **kinetičke,**
- **gravitacijske potencijalne,**
- **elastične potencijalne i**
- **rotacijske energije sustava (tijela).**

U mehaničku se energiju dakle ne uključuju oblici unutrašnje energije poput nuklearne, kemijske i unutrašnje kaloričke energije.

Mehanička se energija često (pogrešno) naziva radom, odnosno mehaničkim radom, budući da je u povratljivim (reverzibilnim, povratnim, obratnim) procesima u potpunosti pretvoriva u mehanički rad te da količinu mehaničke energije koja je prešla sa sustava na sustav iskazujemo radom (mehaničkim radom). Drugim riječima, mehanički je rad prijenos mehaničke energije, no, istaknimo, ne samo mehaničke energije.

Mehanička je energija nagomilani oblik energije, stacionarni, stalni oblik energije, dok je rad (mehanički rad) prijelazni oblik energije koji se javlja samo u trenucima kada mehanička energija, ali i unutrašnja kalorička energija, posredovanjem sila, koje djeluju između sustava (tijela), prelazi s jednog sustava na drugi (s jednog tijela na drugo).

Mehanički je rad, sasvim općenito, količina energije izmijenjene između sustava i okolice (drugih sustava). Ne uključuje energiju izmijenjenu posredstvom toplinske energije. Mehanički je rad prijelazni oblik energije koji se javlja samo u trenucima kada mehanička energija i/ili unutrašnja kalorička energija, posredovanjem sile, prelaze sa sustava na sustav, a po iznosu je jednak umnošku komponente sile u smjeru puta i prevaljenog puta.

(Toplinska energija, pokazat ćemo, prelazi spontano, samoinicijativno i nezaustavljivo sa sustava na sustav (s tijela na tijelo) jedino i odmah postoji li razlika između temperatura sustava / tijela/.)

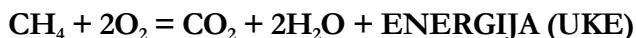
Od stalnih, stacionarnih oblika energije "nema nikakve koristi". Tek kad se ti oblici energije pretvaraju u prijelazne oblike koji počinju strujati između tijela (sustava, prostora) oni omogućuju uporabu, korištenje energije za potrebe stvaranja i održavanja života i razuma. Energija strui pritom uvijek iz prostora veće gustoće energije u prostor manje gustoće. (Emitiranje energije sa Sunca u

sremir.) Taj je proces spontani, samonikli, samopoticanji i samoodržavajući: odvija se dok se ne izjednače početno nejednolike raspodjele gustoće energije. Primjerice, toplinska energija počinje strujati čim postoji razlika u temperaturama tijela: tijelo više temperature posjeduje veću gustoću UKE, pa započinje strujanje energije. UKE tijela više temperature, i zbog toga veće gustoće, pretvara se u toplinsku energiju koja struje na tijelo niže temperature. Tamo se pretvara u UKE i time raste gustoća UKE tijela početno niže temperature do izjednačenja s gustoćom UKE tijela iz kojeg struje toplinska energija. Posljedica je sniženje temperature toplijeg tijela (smanjenje gustoće UKE) i povišenje temperature hladnjeg tijela (povećanje gustoće UKE) sve do izjednačenja temperature tijela (izjednačenja gustoća UKE). Veličina je tijela (ukupna količina pohranjene UKE) pritom nebitna; ne utječe na smjer prenošenja energije.

2.1.1 O unutrašnjoj kaloričkoj, kemijskoj i nuklearnoj energiji

Što je unutrašnja kalorička energija još ćemo bolje razumjeti kada razmotrimo što su, pojednostavljeno, no dosta točno za naša razmatranja, kemijska i nuklearna energija.

Kemijska je energija, posredovanjem fotosinteze, uskladištena Sunčeva energija. Ona je oblik unutrašnje energije akumuliran u tvari na razini atoma (oslobađa se pri promjeni rasporeda elektrona oko jezgre atoma, a jezgra se pritom ne mijenja): električna potencijalna energija akumulirana u rasporedu atoma u molekuli, koja se, u svakidašnjem životu, naziva kemijskom energijom. Naime, među atomima djeluju sile, pa je to znak da postoji poseban oblik energije kojoj se iznos mijenja s promjenom veza među atomima, odnosno, s promjenom kemijskog spoja. U tehničkim primjenama oslobađa se najčešće izgaranjem (izgaranje je ubrzani proces oksidacije) koje pregrupira atome u molekulama. Primjerice, razmotrimo izgaranje metana (plina najzastupljenijeg u prirodnom plinu). Što se događa za vrijeme tog (energijskog) procesa? U osnovi, atomi se ugljika, vodika i kisika, u molekulama metana i kisika, pregrupiraju stvarajući nove molekule (nove kemijske elemente): ugljik-dioksid (ugljični dioksid) i vodu (vodenu paru). Svi su atomi i dalje tu, „na broju“, ali u novoj formaciji (rasporedu) atoma u molekulama pohranjena je manja količina električne potencijalne energije nego li u početnoj:



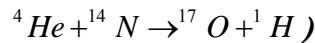
Višak se električne potencijalne energije „oslobađa“ u obliku unutrašnje kaloričke energije pohranjene u skupinama molekula produkata izgaranja koje su na visokoj temperaturi i velikih brzina i zato velikog iznosa unutrašnje kaloričke energije: produkti su izgaranja u plinovitom agregatnom stanju.

(Na temperaturi od dvadeset stupnjeva celzijusa (20°C) i pod normalnim tlakom ($1\text{ atm} = 0,101\text{ }325\text{ MPa} = 1,01\text{ }325\text{ bar}$; $1\text{ bar} = 10^5\text{ Pa/paskala/}$; $1\text{ Pa} = 1\text{ N/m}^2$) brzina je molekule H_2 1690 m/s , a O_2 425 m/s . Pritom je broj sudara molekula 10^{10} u sekundi.)

Nuklearna energija energija je koja se oslobađa u nuklearnim transformacijama, tj. pri promjeni strukture atomskih jezgara. Da se energija oslobađa pri spontanim nuklearnim transformacijama, tj. „radioaktivnom raspadu“, bilo je poznato već brzo nakon otkrića radioaktivnosti (A. H. Becquerel, 1896.) Radioaktivni raspad, međutim, kao izvor energije može biti zanimljiv samo u specijalnim situacijama i za male snage. (Posredno se energija radioaktivnog raspada u unutrašnjosti Zemlje iskorištava prigodom korištenja

geotermalne energije.) Za energetsko pak iskorištanje nuklearne energije najvažnije su transformacije jezgre atoma izazvane vanjskim djelovanjem na jezgru atoma koje se ostvaruje naletom ili ulaskom u atomsku jezgru neke čestice ili druge jezgre; takve transformacije nazivamo nuklearnim reakcijama.

(Prvu nuklearnu reakciju ostvario je E. Rutherford 1919. godine bombardirajući jezgre dušika a-česticama; pritom su opaženi protoni velikih energija. Odvijanje reakcije simbolički opisuje relacija:



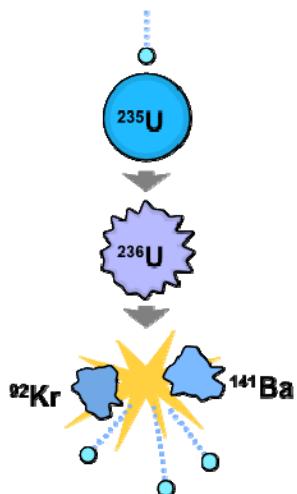
Nuklearnu fizijsku energiju (energiju cijepanja jezgre), pojednostavljeno promatrano, možemo također smatrati električnom potencijalnom energijom ali akumuliranoj na razini jezgre atoma. Radi se o električnoj potencijalnoj energiji akumuliranoj u skupini i položaju naboja (protona) i neutrona u jezgri. Naime, da bi se u nekom prostoru skupio (sakupljaо) istoimeni električni naboј, mora se obaviti (obavljati) rad; mora se svladati (svladavati) rezultantna Coulombova sila, kojom se istoimeni naboјi odbijaju na putu dovođenja naboja. (Rad se osigurava transformacijom iz nekog stalnog oblika energije.) Jer je rad oblik energije, a energija je neuništiva, to se obavljeni rad ne može izgubiti: pohranjuje se u obliku električne potencijalne energije određene količinom i rasporedom protona (naboјa) i neutrona u jezgri atoma. Istoimeni naboјi (protoni), međutim, odbijaju se silom, električnom silom, Coulombovom silom: da bi ostali na okupu u jezgri atoma mora protiv djelovanja Coulombove sile djelovati neka druga (privlačna) sila - to je jaka nuklearna sila koja djeluje i koja se javlja između nukleona, proton-proton, proton-neutron, neutron-neutron, kad se te čestice dovoljno približe jedna drugoj. *(Jaka nuklearna sila ne djeluje na elektrone pa stoga ne utječe niti na kemijske procese.)*

Pogledajmo što se dalje događa na primjeru jedinog „prirodnog“ fisionog elementa, uranija-235, prirodnog elementa s kojim je provediva lančana reakcija, prirodnog kemijskog elementa (postoje u što smo se uvjerili i „umjetni“ kemijski elementi) s najvećim brojem protona u jezgri: jezgra uranija sadrži 92 protona. Između svih tih protona djeluje Coulombova sila nastojeći ih razdvojiti: svaki proton djeluje na preostale, svi preostali djeluju na njega. Coulombova sila je elektromagnetska sila, dakle, sila beskonačnog dosega, a jakost joj opada obrnuto proporcionalno kvadratu razmaka između naboja. Razdvajajući protona protivi se jaka nuklearna sila. Ona je jača od Coulombove sile, no njezin je doseg ograničen: na pojedini proton ne djeluju jakom nuklearnom silom oni nukleoni koji su izvan dosega djelovanja jake nuklearne sile. Uz to, jakost nuklearne sile opada mnogo brže nego li obrnuto proporcionalno kvadratu razmaka između protona. U slučaju jezgre uranija-235 rezultantna jaka nuklearna sila upravo uravnovešuje rezultantnu Coulombovu silu što djeluje na pojedini proton. No, ta je ravnoteža labilna: jezgra samo što se nije raspala pod djelovanjem električnih sila odbijanja. Dostatan je „lagani udarac“ o jezgru i ona će se raspasti: Coulombova će sila nadvladati jaku nuklearnu. Pritom se jezgra uranija raspada u dva (iznimno rijetko u tri) dijela, nastaju dva ili više (tri) neutrona, a oslobađa se dio električne potencijalne energije pretvorivši se (većinom) u UKE dijelova nastalih raspadom jezgre uranija. (Raspadom jezgre uranija nastaju jezgre drugih kemijskih elemenata.) Ljudsko je biće naučilo kako izazvati raspad jezgre uranija-235: neutronom valja pogoditi jezgru, Slika 2-1.

(Neutron je čestica bez naboja pa na nju ne djeluje Coulombova sila kada prolazi oblak elektrona oko jezgre atoma, odnosno, kada se približava jezgri atoma.)

Tako nastaje jezgra uranija-236. Povećana veličina jezgre, što i dalje sadrži 92 protona, izaziva neravnotežu: smanjuje se veličina sumarne jake nuklearne sile, na pojedine

protone, u odnosu na Coulombovu te se, posljedično, jezgra uranija-236 raspada. Nastaju pritom, u ovom slučaju, barij i kripton i tri neutrona koji zatim mogu izazvati raspad idućih jezgara: to je princip rada nuklearnih reaktora (elektrana) ali i „rada“ (eksplozije) nuklearne („atomske“) bombe.



Slika 2-1 Raspadanje jezgre uranija-235

Unutrašnja kalorička energija, koja se dobiva izgaranjem (oksidacijom), nastaje na račun gubitka energije atoma koji ulaze u spoj. Tako atomi vodika i kisika imaju veću energiju, dok su rastavljeni, nego ti isti atomi u spoju H_2O . Želimo li H_2O opet rastaviti u elemente, treba za to potrošiti energiju i taj je potrošak jednak upravo energiji dobivenoj izgaranjem. Drugim riječima, molekulama H_2O treba dovesti energiju da bi se rastavile u elemente iz kojih su izgradene. Ta energija, koju treba dovesti molekuli spoja, da bi se rastavila na atome iz kojih je načinjena, naziva se „energijom vezanja“ te molekule.

Slične su prilike i kod jezgre atoma; jezgra je načinjena iz protona i neutrona. Ta jezgra ima manju energiju, nego te čestice, kad su svaka za sebe. Primjerice, pokušamo li približiti dva protona i dva neutrona kako bismo formirali jezgru helija, protoni će se međusobno odbijati: što ih drži zajedno u jezgri helija? Odgovor leži u činjenici da je atom helija lakši od sume dva protona, dva neutrona, i dva elektrona. Nešto je mase odvojenih čestica pretvoreno u energiju koja je prešla u okolicu (raspršena u okolini) kad je stvorena jezgra helija. I sada, prije nego li se jezgra helija ponovno rastavi u sastavne čestice, ista količina (odvedene) energije mora biti pretvorena u masu; ukoliko nije raspoloživa, jezgra se helija ne može raspasti. Ta se energija naziva „energijom vezanja“. Dakle, energija je vezanja jezgre energija koju treba potrošiti da bi se atomska jezgra rastavila u zasebne protone i neurone (od kojih je načinjena). Kod atomske jezgre energija je vezanja vrlo velika tako da se može registrirati gubitak mase pomoću relacije:

$${}_{Z}^A M + \frac{E}{c_{sv}^2} = Z \cdot {}_1^1 H + (A - Z) \cdot {}_0^1 n.$$

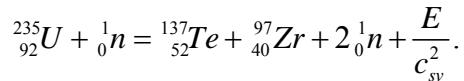
Energija E, koja se iz ove relacije može izračunati, energija je vezanja jezgre atoma ${}_{Z}^A M$:

$$E = c_{sv}^2 \left[Z \cdot {}_1^1 H + (A - Z) \cdot {}_0^1 n - {}_{Z}^A M \right],$$

a izraz u zagradi defekt je mase:

$$\delta m = Z \cdot {}_1^1 H + (A - Z) \cdot {}_0^1 n - {}_Z^A M$$

Razmotrimo sada ponovno cijepanje jezgre U-235 pogodene neutronom. Neka se reakcija ovog puta odvija ovako:



Budući da neutroni nemaju električnog naboja, to onda bedem električnog potencijala, koji okružuje jezgru, za neutron ne postoji pa i najsporiji neutron (neutron najmanje energije) može ući u jezgru u slobodnu energetsku razinu za neutrone u jezri. Time u jezri nastaje nova situacija koja ima važne posljedice. Naime, u promatranom slučaju (U-235), broj je neutrona u jezri neparan, pa je energija posljednjeg neutrona u jezri, budući da nema svojeg para, razmjerno visoka. Dolaskom neutrona izvana sparjuje se taj posljednji neutron i zbog toga se njegova energija smanjuje. To oslobođanje energije neparnog neutrona, kad je dobio svoj par, daje energiju oscilacije jezre, kod koje onda odbojne električne sile prevladavaju i jezgra se rascijepi u dva približno jednakom teška dijela, koji se odbijaju električnom silom i zato se razdvajaju velikom brzinom. U procesu nastaju i dva do tri brza neutrona. Uкупna količina gibanja produkata jednak je nuli budući da je jezra U-235 na početku mirovala, a neutron, koji je u nju ušao, imao je malu brzinu. Što je međutim s bilancem energije? Kolika je energija oslobođena cijepanjem jezre U-235? Poznajemo li mase produkata cijepanja, tu energiju lako određujemo iz gubitka mase mirovanja:

$$E = c_{sv}^2 \cdot \delta m = c_{sv}^2 \cdot \left[{}_{92}^{235} U + {}_0^1 n - ({}_{52}^{137} Te + {}_{40}^{97} Zr + 2 {}_0^1 n) \right]$$

Međutim, možemo je i procijeniti („procijeniti“, budući da energija oslobođena za vrijeme fizijske nije samo električna potencijalna energija oslobođena „preuređenjem rasporeda“ nukleona) izračunamo li rad što ga obavi električna sila rastavljujući jezre telurija i cirkonija koje su se dodirivale u trenutku početka razdvajanja. Označimo li s \mathbf{r}_1 polumjer prve, a s \mathbf{r}_2 polumjer druge jezre, onda je razmak njihovih središta u trenutku nastanka ($\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2$), a električna potencijalna energija

$$E_{el} = \frac{Z_1 e \cdot Z_2 e}{4\pi\epsilon_0 (r_1 + r_2)}.$$

$Z_1 = 52$ je redni broj prve jezre, $Z_2 = 40$ druge, a e je naboje elektrona. Polumjer \mathbf{r} jezre bilo kojeg atoma može se izračunati iz njegovog masenog broja:

$$r = R_0 A^{\frac{1}{3}}$$

gdje je $R_0 = 1,4 \cdot 10^{-15}$ metara.. Provede li se račun, dobivamo da se u našem slučaju radi o energiji $E_{el} \approx 200 \text{ MeV}$ što se slaže s dosad rečenim.

Zaključno, međutim, valja istaknuti i naglasiti da današnja energetska tehnologija upotrebljava (rabi) samo relativno slabe prirodne sile: gravitaciju i elektromagnetizam. Daleko jača, jaka nuklearna sila, sadrži neusporedivo više. No, eksploatacija svijeta ispod jednog fermija i razvoj "nuklearne vještine" (iskorištavanje jake nuklearne sile)

još su uvijek (veoma) daleka budućnost. Da niti ne spominjemo poznavanje pretvorbe većih količina (sve) mase u energiju.

2.2 O opskrbi Zemlje energijom

Postavimo sada pitanje: otkud energija na Zemljii?

Najviše, i presudnu količinu, energije Zemlja dobiva izravno (direktno), ili neizravno (indirektno), od Sunca. Bez te energije ne bi bilo života na Zemlji. Ona omogućuje održavanje srednje temperature Zemlje, a akumulira se pomoću fotosinteze u zelenim biljkama i u nekim bakterijama i algama u oceanima.

Uloga je kemijske energije pritom ključna. Naime, fotosintezom se dio dozračene Sunčeve energije, u obliku svjetlosti (elektromagnetsko zračenje vidljivo okom), pretvara u kemijsku energiju pohranjenu u stvorenim organskim molekulama.

Za fotosintezu su potrebni, između ostalog, voda i ugljik-dioksid (uglični dioksid). Za vrijeme dok je biljka izložena svjetlosti apsorbira ugljik-dioksid (uglični dioksid) a ispušta kisik. Tijekom fotosinteze biljka kroz korijen uzima hranjive tvari:



(U suprotnom procesu, procesu oksidacije, izgaranja, oslobada se energija uz istodobno stvaranje CO_2 :



Na fotosintezi se, njenom minulom radu točnije, još uvijek, i dugo će se, temelji naša (Zemljina) opskrba energijom: fotosinteza omogućuje proizvodnju hrane i goriva. Taj je proces započeo prije oko tri milijarde godina na našem planetu omogućujući stvaranje kisika u atmosferi i fosilnih goriva koja se nalaze u tlu. U njima je, pomoću fotosinteze, pohranjena energija Sunčevog zračenja (prijeđeni oblik energije) transformirana u kemijsku energiju (stacionarni oblik energije). Tako akumulirana kemijska energija, tijekom milijuna godina, kroz hranidbeni lanac i djelovanje tlaka i temperature, zapravo su današnji primarni energetski izvori u obliku ugljena, sirove nafte i prirodnog plina.

(Spaljivanjem se goriva akumulirana kemijska energija nemilice troši i nepovratno smanjuje: oko 90% energetske potrebe čovječanstva osigurava se danas izgaranjem ugljena, nafte i prirodnog plina.)

Međutim, vrlo se mali dio dozračene Sunčeve energije akumulira posredstvom fotosinteze: tek 0,023%. (Prema nekim analizama, Slika 2-2, 0,1%).

Nadalje, od energije preuzete djelovanjem fotosinteze, samo 45% ostaje u biljkama u obliku materije, a ostatak od 55% vraća se tzv. disanjem u atmosferu. Netoprirast nastao djelovanjem fotosinteze na Zemljii godišnje iznosi $164 \cdot 10^9$ tona, od čega se 2/3 takve materije proizvodi na kontinentima, a 1/3 u oceanima.

2.2.1 Sunčovo zračenje

„Sunčovo zračenje“ opći je naziv za energiju koju Sunce emitira u svemir. Izvor su Sunčeve energije fuzione nuklearne reakcije, kao npr. spajanje dvaju atoma vodika u

atom helija, spajanje dvaju atoma helija u atom berilija, pretvorba berilija u litij itd. Međutim, najvažniji je izvor Sunčeve energije odvijanje ovakve termonuklearne fuzije na Suncu:

- 4 atoma vodika spaja se u helij i pritom se oslobađaju goleme količine energije:
0,75% mase pretvara se u energiju (0,7% prema nekim autorima), dok se u današnjem najboljem, ljudima poznatom procesu, procesu fisije, samo 0,1 % mase pretvara u energiju;
- nastaje jezgra helija, 2 pozitrona i 2 neutrina, i oslobađa energija koja iznosi 26,21 MeV
$$4^1H \rightarrow_2^4 He + 2e^+ + 2\nu + 26,21\text{MeV}.$$
- 4,2 i nešto milijuna tona u sekundi gubitak je mase Sunca (pretvorba mase u energiju)
(No, zasad, to nas ne brine: Sunce će potrajati još kojih 5 milijardi godina prije negoli se pretvori u „crvenog diva“.);
- samo milijarditi dio emitirane energije Sunca dopire do Zemlje.

Energija je, koja se formira i pohranjuje u unutrašnjosti Sunca, unutrašnja kalorička energija: transformirana energija fuzije. Pretvara se u toplinsku energiju i prenosi prema površini (kondukcijom /vođenjem, provođenjem/) s koje se emitira u obliku elektromagnetskog zračenja. Osim tog postojanog zračenja, Sunce povremeno emitira i pljuskove elektrona, protona i električki nabijenih jezgara nekih elemenata.

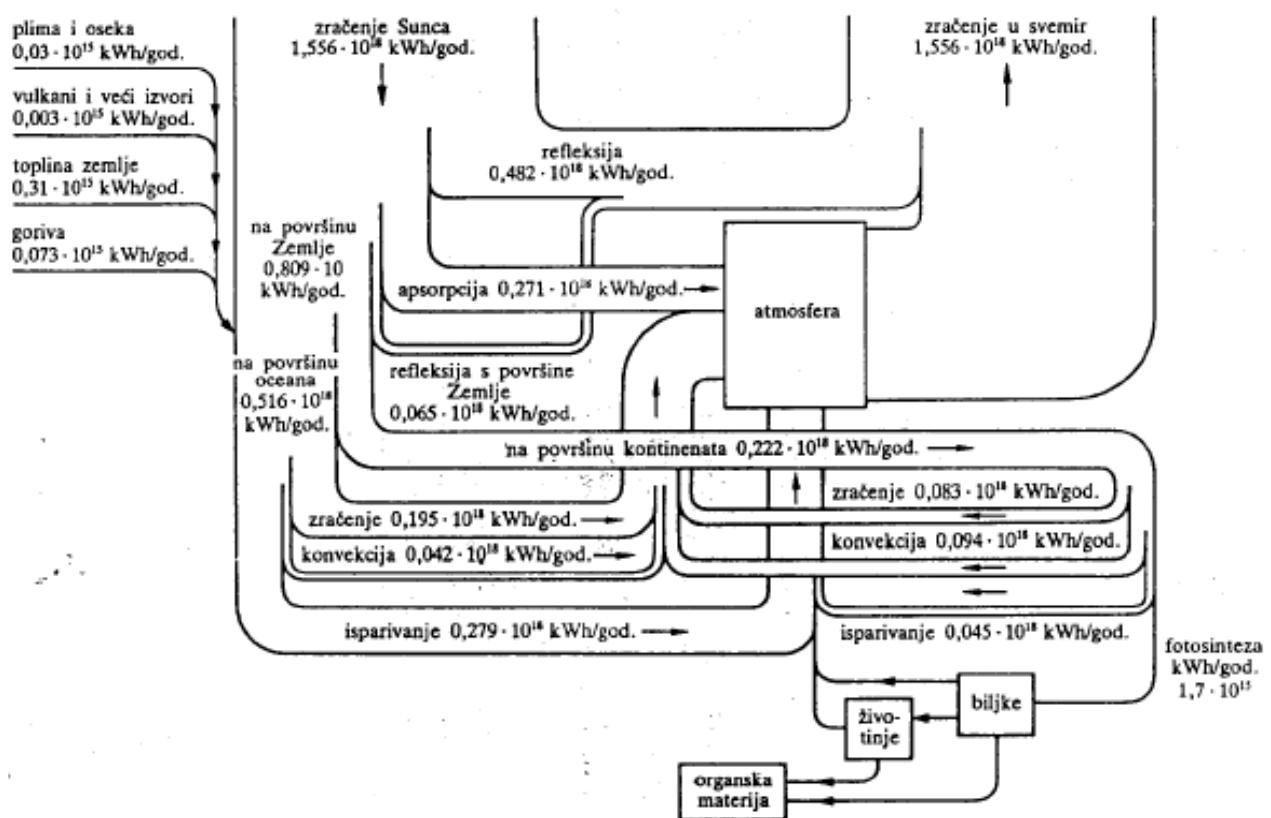
Sunčev je zračenje elektromagnetsko zračenje. Nastaje kada atomi ili molekule, u kojima je pobranjena unutrašnja kalorička energija, emitiraju elektromagnetske valove.

Približno pola Sunčevog zračenja što dopire do Zemlje vidljivi je dio elektromagnetskog spektra; drugi je dio pretežito infracrveno zračenje s malim postotkom ultraljubičastog zračenja. Naime, ako su temperature tijela veće od oko 800 K, tijela počinju zračiti uz infracrveno zračenje i vidljivu svjetlost, a pri vrlo visokim temperaturama, osim infracrvenog i vidljivog zračenja, emitiraju i ultraljubičasto zračenje.

2.2.2 O prijepornostima Sunčeve energije

Spomenimo sada proturječnosti (kontroverzije, nesuglasice, nesporazume, nerazumijevanja, prijepornosti) povezane s mogućnošću zadovoljavanja energetskih potreba Zemlje Sunčevom energijom. Istaknimo ponovno, Sunčeva je energija energija koja nastaje u unutrašnjosti Sunca za vrijeme termonuklearne fuzije. Spajanjem četiri jezgara vodika u helij oslobađa se energija od 26,21 MeV = $1,17 \cdot 10^{-18}$ kWh za svaku jezgru helija. Ta se energija prenosi prema površini Sunca s koje zrači u Svemir: $3,3 \cdot 10^{27}$ kWh godišnje. Od toga dopire do Zemlje, do vrha Zemljine atmosfere točnije, tek, približno, milijarditi dio: $1,56 \cdot 10^{18}$ kWh godišnje. Od te energije, ponavljamo, dozračene do vanjskog ruba Zemljine atmosfere, oko 30% reflektira se u svemirski prostor, oko 47% pretvara se u toplinu i emitira kao infracrveno zračenje (elektromagnetsko zračenje), oko 23% troši se na isparivanje vode i oborinski ciklus u troposferi, a samo se mali dio troši na fotosintezu (0,023% /0,1%/), pretvara u energiju vjetra, i slično, Slika 2-2. Naime, od Sunčeve se energije, dozračene do ruba atmosfere, $0,482 \cdot 10^{18}$ kWh godišnje (odmah) neposredno reflektira u svemir. Osim toga jedan dio energije koji stigne do Zemljine površine također se reflektira bez

promjene valne duljine: $0,065 \cdot 10^{18}$ kWh godišnje. $0,271 \cdot 10^{18}$ kWh godišnje Sunčeve energije apsorbira atmosfera pri njezinom prolasku kroz atmosferu. Do Zemljine površine tako dopire i utječe na toplinske procese energija od $0,738 \cdot 10^{18}$ kWh godišnje, ili 47,4% one koja sa Sunca stiže do vanjskog ruba Zemljine atmosfere. Od te energije dio se reemitira u obliku infracrvenog zračenja, a ostatak se ili konvekcijom (način prijelaza toplinske energije) predaje atmosferi ili se njime isparuje voda s oceana i kontinenata. I ta se količina energije također, u obliku entalpije vodene pare, prenosi u atmosferu. Ako se pretpostavi da je energija koja dopire do Zemljine površine proporcionalna ploštinu, do oceana stiže $0,516 \cdot 10^{18}$ kWh godišnje, a na kontinentu $0,222 \cdot 10^{18}$ kWh godišnje. Od dozraćene energije reflektira se kao infracrveno zračenje nešto manje od 38%, bez obzira na to je li je riječ o kopnenoj ili vodenoj površini. (Energija konvekcijom prenesena u atmosferu znatno je veća na kontinentima nego na oceanima, a za energiju isparivanja po jedinici površine vrijedi obrnuto.) Sva energija Sunčeva zračenja konačno zrači u atmosferu, pa se na taj način održava toplinska ravnoteža na Zemlji.



Slika 2-2 Zemljina energetska bilanca

Sunčevu se zračenje na vrhu Zemljine atmosfere (zračenje što dopire do vanjskog ruba Zemljine atmosfere) naziva **ekstraterestičkim zračenjem**. Njegova srednja vrijednost, koja se naziva i **solarnom (Sunčevom) konstantom**, iznosi

$$1366 \text{ W/m}^2.$$

(Sunčeva se konstanta mijenja za približno 6,9% kroz godinu: od 1412 W/m^2 u siječnju do 1321 W/m^2 u srpnju kao i za nekoliko promila tijekom dana.)

To je snaga Sunčeva zračenja na jediničnu površinu okomitu na smjer Sunčevih zraka na srednjoj udaljenosti Zemlje od Sunca, i to na vrhu Zemljine atmosfere, tako da ne postoji utjecaj apsorpcije i raspršenja u atmosferi. Međutim, pri prolasku kroz atmosferu Sunčeve zračenje slabiti jer se djelomično raspršuje na molekulama plinova i česticama prašine, a djelomično ga apsorbiraju plinovi (ozon, vodena para, ugljični dioksid i dr.) te kad dopre do Zemlje snage je (prosek na Zemljinoj površini) nešto veće od 160 W/m^2 . S druge strane, gustoća je energije u New Yorku oko 400 W/m^2 ; bi li bilo isplativo zauzeti toliko golemu površinu na kojoj bi se prikupljala Sunčeva energija za energijske potrebe grada New Yorka? Pokraj toga, uvjerit ćemo se, eksergija je Sunčeve energije na površini Zemlje jako mala. Posljedično, trebamo raspolagati s velikim količinama eksergije (materijala) kako bismo osigurali iskorištavanje Sunčeve energije. Kako to razumjeti? Daruje li vam netko šaku riže, preživjet ćete dan s količinom energije pohranjene u riži. Međutim, razbaca li se ta količina riže preko teritorija Hrvatske umrijet ćete od gladi (nedostatka energije) prije nego li prikupite svu rižu.

Rješenje je, dakle, prikupljanje Sunčevog zračenja (Sunčeve energije) na vrhu Zemljine atmosfere i prenašanje (bez /velikih/ gubitaka) na Zemlju. To je problem kojeg treba riješiti.

Konačno, da bi se dobila potpuna Zemljina energetska bilanca, valja energiji Sunčeva zračenja dodati „vlastitu“ energiju Zemlje („geotermalnu energiju“ i energiju plime i oseke) i ljudsko djelovanje.

Geotermalna se energija može smatrati fosilnom nuklearnom energijom. Ona je zbroj unutrašnje kaloričke energije nastale raspadanjem radioaktivnih elemenata koji se nalaze u Zemljinoj kori (u prvom redu uranija, torija i kalija), procesa koji se spontano, samopoticajno razvija i održava u unutrašnjosti Zemlje, i unutrašnje kaloričke energije od nastanka Zemlje: „Zemljine topline“ koja se provođenjem pojavljuje na površini. Pritom je 80% geotermalne energije energija radioaktivnog raspadanja, a 20% energija je od nastanka Zemlje. Energija plime i oseke pak rezultat je gravitacijskog djelovanje Sunca i Mjeseca, ali i rotacije Zemlje. Ni jedan od tih oblika energije nije posljedica Sunčeva zračenja, a njihov je udio u ukupnoj energiji na Zemlji jako malen, manji od 0,04% Sunčeve energije koja dopire do Zemljine površine, pa se stoga rijetko razmatra. Slično, i ljudsko se djelovanje na Zemljini energetsku bilancu uobičajeno ne promatra budući da ono, u današnjim razmjerima, ne utječe na globalnu toplinsku (termičku) ravnotežu.

2.3 O energiji, eksergiji i anergiji

Upoznali smo jednu mogućnost podjele (klasifikacije) oblika energije. Upoznajmo sada i drugu. I opet ćemo krenuti od prihvaćene definicije energije:

energija je sposobnost obavljanja rada.

No, morat ćemo prije toga malo pozornije razmotriti što to znači „obavljanje rada“, što je to (mehanički) rad?

Zbog toga ćemo prihvatići promijenjenu definiciju mehaničkog rada, koja će se (malo) razlikovati od (poznate nam) definicije iz „Fizike“:

„neki je sustav obavio pozitivni rad, za vrijeme nekog procesa, ako se jedino vanjsko djelovanje tog sustava može svesti na podizanje tereta.“

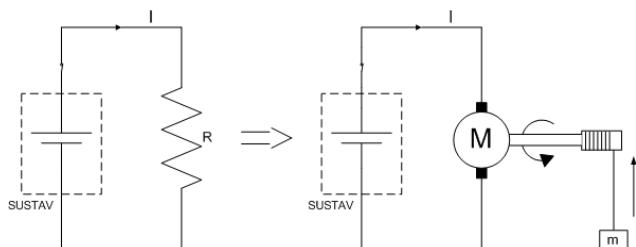
Zašto mijenjamo definiciju rada? Zašto prihvaćamo ovakvu definiciju? Što je „sustav“? Zašto naglašavamo „pozitivni rad“? Što je „proces“? Što znači „jedino vanjsko djelovanje“? Što je „teret“?

Krenimo redom. Zašto mijenjamo definiciju i prihvaćamo novu?

Postavimo pitanje: obavlja li se rad ako električna struja, koja nastaje transformacijom iz kemijske energije baterije (*baterija je sustav*), protjeće kroz radni otpornik, slika 2-3? (*Svladava li se pritom sila na putu? Postoji li pomak hvatišta sile?*)

Makroskopski (fenomenološki) promatrano, a tako ćemo odsad (uglavnom) promatrati energijske pretvorbe i procese, prema „definiciji iz Fizike“, ne! Ne svladava se sila na putu (nema pomaka hvatišta sile u pravcu djelovanja sile), posjedično, nikakav se rad ne obavlja!

Što, međutim, protjeće li ta ista struja, ne kroz otpornik, slika 2-3, nego kroz električni motor? Obavlja li se sada rad? Očito, da. Električna se energija u električnom motoru pretvara u mehanički rad kojim se podiže masa u polju sile teže Zemlje. Kemijska se energija baterije (sustava) posredovanjem električne energije i mehaničkog rada pretvara u potencijalnu energiju „tereta“: sustav (baterija) obavlja rad. Zato mijenjamo definiciju.



Slika 2-3

Električna energija oblik je mehaničkog rada

Što je „sustav“?

Sustav je (odabrani) predmet opažanja, promatranja, praćenja, proučavanja, izučavanja, analize, studiranja, razmatranja, ...

Sustav može biti bilo što ili tko: foton, elektron, atom, dio ili cijela termoelektrana, svemir. Može biti ljudsko biće ili životinja, ljudsko ili životinjsko tijelo ili dio (dijelovi). Može biti i zrakoprazan prostor. (*Npr., kolika je eksnergija 1m^3 vakuuma?*)

Sve što nije sustav, okolina je (sustava).

Okolicu sustava mogu pojedinačno ili sumarno predstavljati zrak (atmosfera), tlo i voda, no, isto tako i različiti drugi sustavi s kojima promatrani sustav međudjeluje (komunicira) izmjenjujući energiju i/ili masu (tvar, materiju).

(U našim čemo razmatranjima upotrebljavati tri pojma: *okolina, okolica i okoliš*. „Okolina“ – sa sociološkim značenjem: „Okolina (ili sredina) u kojoj se djeca svakodnevno kreću u velike utječe na njihov razvoj.“ „Okolica“ – s prostornim značenjem: „Okolica je Zagreba privlačna izletnicima.“ „Okoliš“ – s ekološkim značenjem: „Okoliš industrijske četvrti Zagreba neždrav je za stanovanje.“)

Granica sustava odvaja sustav od okolice, od ostalih sustava.

Granica sustava može biti fizička ili pomišljena (apstraktna, nematerijalna: npr, matematički definiranom graničnom plohom), čvrsta ili pomična: volumen (obujam, zapremnina) sustava može biti stalan (konstantan) ili promjenljiv.

Većina sustava koje čemo promatrati bit će (jesu) **tvarni sustavi**, tj. oni sadržavaju masu (tvar, materiju) iako katkad mogu sadržavati samo energiju.

(U našim če razmatranjima (većinom) masa biti u takvom agregatnom stanju koje se malim otporom suprotstavlja promjeni oblika: bit će u fluidnom stanju. Promjena oblika fluida (deformacija fluida) naziva se strujanjem.)

Svaki sustav posjeduje niz **osobina** (dobar, lijep, pametan, spretan, marljiv, suzdržan, masa, tlak, temperatura, obujam, oblik, gustoća, broj elektrona, neutrona, boja, količina i oblik akumulirane energije,...) koje se mogu opažati i, neke, barem u načelu, mjeriti tj. kvantitativno iskazati.

Mjerljive se osobine sustava (masa, tlak, volumen, temperatura, gustoća, ...) nazivaju **fizikalna svojstva ili svojstva** a katkad i **funkcije**.

Stanjem sustava naziva se sklop (skup) njegovih (fizikalnih) svojstava, odnosno, **stanje** je sustava (fizikalno, kemijsko, emotivno, ...) određeno njegovim svojstvima.

Nije potrebno poznavati sva svojstva promatranog sustava da bi se njegovo stanje moglo jednoznačno definirati i razlikovati od bilo kojeg drugog mogućeg stanja.

Svojstva (funkcije) koja su određena isključivo stanjem sustava, a ne načinom (putom, procesom) na koji je dotično stanje postignuto, nazivaju se *veličine (funkcije) stanja*. Matematički, te funkcije (veličine) posjeduju svojstvo **totalnog (potpunog) diferencijala**.

Sustav međudjeluje (komunicira) sa svojom okolicom (s drugim sustavima) jedino i samo tako (ne postoji druga mogućnost) da izmjenjuje energiju i/ili masu, odnosno i oblike energije koji su akumulirani u masi što prelazi granice sustava ulazeći i izlazeći iz sustava. Pritom se mijenja stanje sustava (fizikalno i/ili kemijsko). (Zašto vidimo, čujemo?)

Sustav se ne definira, definiraju se odnosi između sustava i okolice koji su posljedica postojanja četiri vrsta sustava:

- zatvoreni sustav (ZS): granice su sustava neprelazne za masu. Masa je zatvorenog sustava time nepromjenljiva i poznata. (Pretpostavljamo da, za naša razmatranja, tako dugo dok nisu uključeni nuklearni procesi, vrijedi princip očuvanja mase: „masa je nestvoriva niti uništiva“. Naime, energije s kojima ćemo se susretati, a koje nisu nuklearnog porijekla, toliko su male da im je relativistička masa E/c_{sv}^2 zanemariva u odnosu prema masi sustava.) Energija može prelaziti granice zatvorenog sustava. (Radi se pritom, očito, o prijelaznim oblicima energije);
- otvoreni sustav (OS): granice su otvorenog sustava prelazne za masu i energiju. Zbog toga je, u najopćenitijem slučaju, masa otvorenog sustava promjenljiva i nepoznata (količinski);
- adijabatski sustav (AS): granice su adijabatskog sustava neprelazne za toplinsku energiju. (To je idealizacija realnosti kako bi se mogli provesti proračuni promjene entropije /gubitaka ekservije/.) Ostali oblici energije, kao i masa, mogu prelaziti granice adijabatskog sustava;
- izolirani sustav (IS): granice su izoliranog sustava neprelazne kako za masu tako i za energiju. (Npr., svemir, odnosno, termos-boca /idealizacija realnosti/.)

Zašto naglašavamo „pozitivni rad“?

Rad je, podsjetimo se, u „Fizici“ definiran ovom jednadžbom:

$$\begin{aligned} W_{12} &= \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} \cdot \bar{c} dt = \\ &= \int_{t_1}^{t_2} \left\{ F_x [x(t), y(t), z(t)] x'(t) + F_y [x(t), y(t), z(t)] y'(t) + F_z [x(t), y(t), z(t)] z'(t) \right\} dt [J] \\ &\quad (\text{Sila je, u općem slučaju, funkcija puta, brzine i vremena.}) \end{aligned}$$

Dakle, mehanički je rad jednak skalarnom produktu vektora sile i vektora pomaka njezina hvatišta:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s} = F ds \cos\varphi = F cdt \cos\varphi [J].$$

Jednadžbu, za naše potrebe, prilagođujemo tako da na desnoj strani dodajemo minus ispred integrala:

$$W_{12} = - \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{s} = - \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} \cdot \bar{c} dt [J]$$

odnosno,

$$dW = - \vec{F} \cdot d\vec{s} = -F ds \cos\varphi = -F cdt \cos\varphi [J].$$

Ta je promjena pitanje dogovora – nije vezana uz fizikalnost mehaničkog rada.

Protumačimo zašto stavljamo predznak minus.

Djeluje li sila na sustav tako da se njezino hvatište kreće u smjeru djelovanja sile, mehanički se rad dovodi sustavu. (Sila obavlja rad na sustavu: taj se rad pretvara u kinetičku i/ili potencijalnu i/ili unutrašnju kaloričku energiju i pohranjuje u sustavu.) Uobičajeno je da se takav mehanički rad u elektroenergetici označi negativnim predznakom. Ako, naprotiv, sila djeluje nasuprot smjeru gibanja hvatišta, sustav obavlja (predaje u okolicu) mehanički rad: sustav svladava silu na putu. Pritom se mehanički rad dobiva transformacijom iz mehaničke energije (kinetičke, potencijalne, ...) i/ili unutrašnje kaloričke energije pohranjenih u sustavu; obavljanjem mehaničkog rada smanjuje se količina unutrašnje energije (kinetičke, potencijalne, unutrašnje kaloričke energije / pretpostavljamo pritom da su i nuklearna i kemijska energija već pretvorene u unutrašnju kaloričku energiju/) sustava. Takav rad označujemo pozitivnim predznakom. Zašto? Zadatak je energetskih procesa proizvodnja ekservije transformacijom iz oblika unutrašnje energije. Najrazličitiji su sustavi pritom samo posrednici; ne pretrpuju nikakve (konačne) promjene. Drugim riječima, unutar sustava odvijaju se pretvorbe unutrašnje energije u ekserviju (mehanički rad i/ili električnu energiju) i tu ekserviju sustav predaje u okolicu (drugim sustavima u kojima će se obavljati transformacije u korisne oblike energije). Zbog toga se onda takav (zahtijevani) smjer tijeka (strujanja) ekservije (mehaničkog rada, električne energije) dogovorno označava pozitivnim predznakom.

Na kraju, naglasimo: **mehanički se rad pojavljuje samo uz međusobno djelovanje sustava i njegove okolice; posrednik je međudjelovanja sila.**

Što je „proces“?

Proces je promjena stanja sustava iz jednog u drugo, odnosno, prijelaz promatranog sustava iz nekog početnog stanja (1), stanja neposredno prije početka odvijanja procesa (npr, prije početka djelovanja neke sile), u neko konačno, završno stanje (2) postignuto neposredno nakon svršetka procesa (npr, nakon što je sila prestala djelovati), pri čemu se mijenja jedno ili više, pa čak i sva svojstva sustava.

(*Proces se odvija jer sustav izmjenjuje energiju i/ili masu s okolicom, s drugim sustavima. Energija i/ili masa izmjenjuju se, pokazat ćemo, zbog djelovanja sile /sila/ i/ili temperaturnih razlika između sustava i okolice.*)

Proces može biti bilo kakav, sustav može biti bilo što ili tko.

Ilustrirajmo dosad rečeno jednostavnim primjerom: odgovorimo na upit ovog „problema“. Promatrajmo dvije (prozirne) čaše ispunjene do polovice: u jednoj je bijelo, a u drugoj crno vino. Određena se količina, recimo žličica, bijelog vina izvadi iz prve čaše i prenese u drugu, u crno vino; smjesa se vina zatim dobro promiješa. Nakon toga se ista količina (žličica), sada jednolike mješavine vina, iz druge čaše vrati u prvu. Pitanje je: ima li u prvoj čaši manje crnog vina nego li u drugoj bijelog ili obratno? Ili, možda su te količine jednakе?

Odgovor znademo, intuitivno. Međutim, kako ga protumačiti (objasnit, dokazati njegovu točnost)?

Inženjerstvo je materijalizacija znanosti: u osnovi valja postići da uvijek "nešto" radi "nešto". ("Nešto" i "nešto" može biti bilo što. Recimo program koji mijenja font slova, ili sinkroni generator,

visokonaponski prekidač, nuklearni reaktor, ...) Ono je sklop najrazličitijih znanstvenih i neznanstvenih disciplina i utjecaja (politike primjerice). Iako se najvećim dijelom temelji na egzaktnim znanstvenim disciplinama, inženjerstvo uključuje i najrazličitije neznanstvene i heurističke discipline kao i kompromis (mirenje, nagodbu, suglasje) između realnosti, egzaktnosti i nužnih pojednostavljenja (idealizacija) fizičkih pojava i zbiranja kako bi (numerički) matematički proračuni bili provedivi, kako bi se (uopće) moglo dobiti (upotrebljivo / ili bilo kakvo /) numeričko rješenje nekog problema. (Na primjer, „inženjersko“ / upotrebljivo / rješenje nije toliko veliki sustav diferencijalnih jednadžbi da ga ne može riješiti današnje elektroničko računalo; inženjer će ih, primjerice, pretvoriti u algebarske jednadžbe, tako da promatra samo stacionarna stanja, kako bi dobio numeričko rješenje.) Matematički proračuni nisu pritom sami sebi svrha: omogućuju predviđanje ponašanja tehničkih sustava. (Predviđanje je, međutim, povezano s budućnošću, budućnost s neizvjesnošću, neizvjesnost s vjerojatnošću: zato inženjeri moraju dobro poznavati i teoriju vjerojatnosti (teoriju pouzdanosti) i matematičku statistiku.) Tek kad mogu predviđjeti ponašanje nekog tehničkog sustava, inženjeri smatraju da o njemu nešto znaju. Npr., inženjer zadužen za let zrakoplova između Zagreba i New Yorka mora do detalja znati što će se dogadati sa zrakoplovom: kojom će rutom letjeti, kojom brzinom, na kojoj visini, koliko će dugo trajati let, kolika će biti potrošnja goriva, što ako se promjene zračne struje, što ako se dogodi kvar (kvarovi), itd, itd.) No, premda matematika svojom dubokom logikom upućuje inženjerstvo (inženjera), ona ne može potvrditi valjanost inženjerskih rješenja. Njih potvrđuju pokus ili praksa: što se stvarno događa u odnosu na predviđena događanja. Inženjer zatim prilivača ili odbacuje rješenja prosudjujući kako se blisko tehnički sustav ponaša u odnosu na predviđanja. Drugim riječima, inženjer rješava probleme i proujerava rješenja. Ne bira probleme; rješava ih kako „pristizu“. Pritom postupak rješavanja mora biti što „ekonomičniji“: inženjer se neće služiti teorijama relativnosti daje li zadovoljavajuće rješenje „klasična (Newtonova) mehanika“, ne će posegnuti za Maxwellovim jednadžbama ako zadovoljavajuće rješenje može dobiti primjenom Ohmovog zakona. Temeljni zadatak (većine) inženjera nije stoga potraga za novim znanjima, znanje mu je alat. Što bolji alat, što veće znanje, to bolje. (Dakako, inženjer i stvara alat. Ali onda je alat problem koji treba riješiti. U tom slučaju obogaćuje čovječanstvo novim spoznajama.)

(Kako se školuje inženjer? Proučavanjem inženjerskih predmeta kojih je zadatak podučiti razmišljanjima i djelovanjima primjereno inženjerima.)

Vratimo se sada našem „problemu“. Spomenuli smo, probleme ćemo, povezane s energetskim pretvorbama i procesima, rješavati primjenjujući četiri principa očuvanja (mase, količine gibanja, energije i momenta količine gibanja), princip rasta entropije i jednadžbu stanja tvari. Drugim riječima, moći ćemo (matematički egzaktно) rješavati samo probleme (do) sa šest nepoznanica. No, ti su principi primjenjivi i na mnogobrojne jednostavnije probleme: poput „našeg“ sa čašama. Da bismo ga riješili, dostajat će primjena samo principa očuvanja mase: „masa je nestvoriva i neuništiva“. Kako?

Zamislimo svaku od čaša okruženu imaginarnom granicom. U tom slučaju, povezano s našim pićanjem odnosno „procesom“, čaša postaje otvoreni sustav, a vino u čaši masa otvorenog sustava.

Promatrajmo prvo ukupan (ne obaziremo se na boju) prijelaz vina (mase) preko jedne od granica otvorenog sustava, npr., onog što početno sadrži bijelo vino. Budući da ista količina mase (žličica vina) prelazi granicu u jednom i u drugom smjeru (prvo oduzimamo masu / žličicu vina/ otvorenom sustavu, da bismo je zatim vratile) to je **ukupan** prijelaz vina, očito, jednak nuli („masa je nestvoriva i neuništiva“):

$$\delta m = 0.$$

(Simbol će δ u našim izučavanjima značiti ovo:

$\delta = \text{konačna vrijednost (2) neke fizikalne veličine (svojstva) sustava} - \text{početna vrijednost (1) te veličine}$

Simbolom Δ označavat ćemo malu količinu neke fizikalne veličine: Δm znači malu količinu mase, dm diferencijalnu, beskonačno malu.)

Drugim riječima vrijedi:

$$\delta m = m_2 - m_1 = 0.$$

Pritom je m_1 masa otvorenog sustava (masa vina u prvoj čaši) prije početka održavanja procesa, a m_2 masa otvorenog sustava (masa vina u prvoj čaši) nakon završetka procesa kojem je podvrgnut otvoreni sustav. Sam se pak proces sastoji u oduzimanju žličice bijelog vina, stavljanju tog bijelog vina u čašu s crnim, miješanju smjese, kako bismo dobili jednoliku, i zatim vraćanju žličice smjese u čašu s bijelim vinom. (Naglasili smo, proces može biti bilo kakav tijek najrazličitijih događanja koja imaju početak i kraj.)

Promatrajmo sada ukupan prijelaz bijelog vina.

Koliko bijelog vina nije vraćeno nazad u prvu čašu (čašu s bijelim vinom)?

Neka ta količina bude mase x [kg]. Tada, budući da je **ukupan prijelaz mase (vina)** jednak nuli, masa x [kg] crnog vina mora iz druge čaše biti prenesena u prvu.

Odgovor je dakle: koliko u čaši s bijelim vinom ima crnog vina, toliko u čaši s crnim vinom ima bijelog vina: cijeli je proces simetričan.

Je li je zaključak točan, rješenje točno? Jest, uz jedan uvjet: gustoće vina moraju biti jednake

$$\varrho_{\text{bijelog vina}} = \varrho_{\text{crnog vina}}$$

Nije li ispunjen taj uvjet, u realnosti ne mora biti, problem postaje stohastičke (vjerojatnosne) prirode i, najvjerojatnije, ne može se egzaktno rješiti. (Potrebne su daljnje pretpostavke koje mogu, ali i ne moraju biti ispunjene.)

Očito, tražeći odgovor na postavljeno pitanje, sjesno smo idealizirali realnost, pojednostavnili odnose, što je uobičajeni inženjerski postupak, kako bismo dobili rješenje, odnosno, kako bismo pojednostavili fizičke, a time i matematičke modele, do razine da uopće možemo dobiti (nekakvo, bilo kakvo) rješenje. Ono bitno pritom, inženjer mora znati prepoznati, odabrat i poznavati pretpostavke, i biti ih svestan u svakom trenutku, uz koje vrijedi rješenje i samim time ograničenja rješenja: inženjerska je prosudba ponaša li se sustav zadovoljavajuće prema predviđanjima rješenja. („Zadovoljavajuće“ rješenje svodi se na odgovor na pitanje: može li se upravljati sustavom i predviđeti njegovo ponašanje na temelju dobivenog rješenja?) Ukoliko da, rješenje se prihvata kao točno. U suprotnom, istražuju se druge mogućnosti (drugi putovi). Ne može li dobiti numerička rješenja, inženjer prihvata da ne može (ne zna) rješiti razmatrani problem. U našem slučaju, čak i ako uvjet jednakih gustoća nije ispunjen, rješenje smatramo točnim (inženjersko rješenje mora biti pravodobno i jednostorno, da bi bilo optimalno: najracionalnije i najekonomičnije), jer možemo zanemariti utjecaj razlike gustoća vina na rezultat provedene analize. (Možemo li? Konačan bi odgovor dalo, povrđilo ili odbacilo rješenje, tek precizno mjereno gustoća i količina vina u čašama.)

Razmotrimo dalje još jedan primjer. U zimi ste grudu snijega spremili u bladnjak, u duboko smrzavanje. Ljetos ste je izvadili iz bladnjaka i zapitali se u kojem će se vremenu rastopiti?

Ništa više ne znamo o grudi snijega. Ni masu, ni obujam, ni temperaturu, ni temperaturu okolice. (Kada bismo poznavali neke od tih podataka mogli bismo dobiti točniji (egzaktniji) odgovor na pitanje služeći se (jako komplikiranim) znanstvenom disciplinom koja se bavi prijelazom toplinske energije.) Zbog toga morat ćemo se poslužiti „inženjerskim pristupom“. U ovakvim, i sličnim slučajevima, u prvom koraku inženjer „opaža“ što se događa. Ako je moguće „oponaša“ zatim događanja. (Nastoji ponoviti opaženo, po mogućnosti u laboratorijskim uvjetima.) Pritom „apstrahuje“, odvaja nebitno od bitnog, nastojeći identificirati, prepoznati problem ili žadatak (ono što se želi riješiti ili učiniti) i postaviti fizikalni model (fizikalni opis događaja ili problema).

U našem slučaju, što će se dogodati i dogoditi? Opisimo fizikalni model događanja.

Gruda je snijega ohlađena ispod 0 °C. Toplinska energija, oblik energije koji nevezano uz masu može prelaziti sa sustava na sustav, prelazit će iz okolice na grudu snijega (zbog razlike temperature kako ćemo kasnije pokazati) i pretvarati se u unutrašnju kaloričku energiju grude snijega. (Energija je neuništiva.)

(Brzina prijelaza i količina toplinske energije bit će proporcionalna razlici temperatura okolice i grude snijega i veličini grude snijega (površini grude snijega preko koje prelazi toplinska energija).)

Prijelazom toplinske energije rast će temperatura grude snijega, zbog povećanja količine, što znači gustoća unutrašnje kaloričke energije, do temperature topljenja i zatim ostati konstantnom sve dok se snijeg (led) ne preobradi u vodu.

(Za vrijeme preobražbe dovodić će se i dalje toplinska energija, no ona će se sva „trošiti“ na tu preobrazbu (svladavat će se međumolekularne sile prigodom odvajanja molekula leda do razmaka molekula tvari u kapljivitom agregatnom stanju), i zbog toga ne će rasti temperatura grude za vrijeme topljenja.)

Tek nakon što je gruda snijega cijela rastopljena, prijelazom će toplinske energije iz okolice temperatura te vode rasti sve do temperatuve okolice kada će se uspostaviti toplinska ravnoteža s okolicom i prestati prijelaz toplinske energije.

Postavimo sada matematički model, koji će nam omogućiti kvantitativan odgovor na pitanje („nakon kojeg će se vremena gruda snijega rastopiti?“), i hipotezu. (Hipoteza ordje znači formuliranje mogućeg objašnjenja zivanja.)

Pretpostavit ćemo da je gruda snijega kugla radijusa r , dakle volumena

$$V = \frac{4}{3} r^3 \pi.$$

(Dakako, gruda snijega nije (idealna) kugla, no matematiku možemo primjenjivati samo na matematičke objekte; u ovom slučaju model kugle je dobar jer nije suriše komplikiran i jer dobro opisuje realnost.)

Poznajemo li brzinu s kojom se smanjuje volumen kugle (grude snijega) moći ćemo odrediti vrijeme kad će volumen nestati. Odaberimo stoga **hipotezu** o brzini kojom se volumen grude snijega mijenja

(smanjuje zbog topljenja). Jedna je mogućnost pretpostaviti da se volumen smanjuje brzinom proporcionalnoj površini grude.

(Mogli smo odabrat i neki drugi model, no ovaj nam se čini odgovarajućim budući da nas „Fizika“ uči (Fourierov zakon /fizikalni model/) da je količina toplinske energije koja prelazi na tijelo proporcionalna površini tijela: toplinska energija prelazi preko površine tijela. /Inženjer uvijek povezuje prirodne znanosti i matematiku./)

Dakle je naš matematički model:

$$\frac{dV}{dt} = -k(4r^2 \pi)$$

Derivacija odgovara brzini, a predznak minus naznačuje da se volumen grude snijega smanjuje za vrijeme promatranog procesa, $r \downarrow$, k je faktor proporcionalnosti.

(Faktor proporcionalnosti je „uvijek tu“ kad se povezuju kroz različite odnose različite matematičke ili fizikalne veličine: bez faktora proporcionalnosti u većini slučajeva ne bi jednadžbe dimenzijski „štimali“; ne zaboravljajte ga ni kad je vrijednosti 1 i bez dimenzije.)

Postavljamo još jednu hipotezu:

$$k = \text{konst.} (?!)$$

Pretpostavili smo da je faktor proporcionalnosti konstantan. Ta je pretpostavka jako „nategnuta“, no, kako, jako pojednostavljuje matematički model. (Rekli smo, inženjerski pristup „pomiruje“ realnost i pojednostavljenje matematičkih modela; često vrlo uspješno jer, između ostalog, omogućuje iterativno poboljšavanje modela.)

O čemu ovisi k ?

Najvjerojatnije o mnogo „toga“ (mnogo parametara): o temperaturi i veličini grude snijega, o temperaturi okolice (zraka), o vlaži u zraku, o strujanju zraka, o insolaciji (direktnoj i indirektnoj) o ... itd., bilo bi jako komplikirano naći funkcionalnu ovisnost faktora proporcionalnosti o svim tim veličinama.

No, to još nije sve: nedostaje nam barem još jedan podatak da bi naš pristup (fizikalni i matematički model) „profunkcionirao“. Bez da uključimo još neka opažanja (pokus i mjerjenje) nema ničega da nas „vodi“ kroz matematički model. Npr., ustanovimo

„potrebno vrijeme da se određeni postotak grude snijega rastopi“.

(Pokus i mjerjenje omogućuju stvaranje uvjeta za provjeru točnosti hipoteza.)

Pokusom i mjeranjem utvrđujemo da se uz uvjete koji prevladavaju

„ $\frac{1}{4}$ grude snijega rastopila za 2 h (dva sata)“.

Vratimo se sada ponovno našem matematičkom modelu. Moramo obaviti proračun kako bismo ustanovili predviđa li naš matematički model točno žbivanja.

Imamo:

$$V = \frac{4}{3} r^3 \pi \quad i \quad \frac{dV}{dt} = -k(4r^2 \pi).$$

Označimo s

$V = V_p$ početni volumen kad je $t = t_p = 0$ (trenutak vodenja grude snijega iz hladnjaka), a s

$$V = V_2 = \frac{3}{4} V_p \text{ volumen nakon isteka 2 sata kad je } t = t_2 = 2h \text{ (Dakle je } V = V(t))$$

Moramo naći:

$$t = t_{topljenja} \equiv t_i \text{ kad je } V_{konačno} \equiv V_k = 0.$$

Možemo li $\frac{dV}{dt}$ izraziti i na neki drugi način?

Možemo:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dr} \cdot \frac{dr}{dt}. \text{ Dakle je:}$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{4}{3} \pi \cdot (3r^2) \frac{dr}{dt} = 4r^2 \pi \frac{dr}{dt},$$

pa imamo

$$4r^2 \pi \frac{dr}{dt} = -k(4r^2 \pi), \text{ odnosno, } \frac{dr}{dt} = -k \text{ ili } dr = -kdt \quad (\text{Radijus se smanjuje konstantnom brzinom!})$$

Dobili smo jednostavnu diferencijalnu jednadžbu čije će nam rješenje (odmah je možemo integrirati) odgovoriti na pitanje kolika je promjena radijusa nakon isteka dva sata ($r_{početno} = r_p$) i pomoći ustanoviti čemu je jednak faktor proporcionalnosti:

$$\int_{r_p}^{r_2} dr = - \int_{t_p=0}^{t_2=2h} kdt \Rightarrow r_2 - r_p = -2k \Rightarrow k = \frac{r_p - r_2}{2}.$$

Odredili smo tako vrijednost faktora proporcionalnosti!

Vrijeme trajanja topljenja bit će onaj trenutak kad radijus grude snijega postane jednak nuli:

$$\int_{r_p}^0 dr = - \int_0^{t_i} kdt \Rightarrow 0 - r_p = -k t_i \Rightarrow kt_i = r_p.$$

Dobivamo:

$$t_t = \frac{r_p}{k} = \frac{2r_p}{r_p - r_2} = \frac{2}{1 - \left(\frac{r_2}{r_p}\right)}; \quad \frac{r_2}{r_p} = \frac{\left(\frac{3}{4\pi}V_2\right)^{\frac{1}{3}}}{\left(\frac{3}{4\pi}V_p\right)^{\frac{1}{3}}} = \left(\frac{V_2}{V_p}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{\frac{3}{4}V_p}{V_p}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{1}{3}} \approx 0,91$$

$$t_t \approx \frac{2}{1 - 0,91} \approx 22 \text{ sata.}$$

Ako se dakle $\frac{1}{4}$ grude snijega otopi za 2 sata, 20 sati trebat će da se otopi preostali dio.

Je li je ovaj model dobar? Tek provjera u praksi mjerjenjem može dati odgovor. Nije li, predstoji prikupljanje podataka i dotjerivanje modela.

Je li je problem isključivo akademski? Nije. Sve veći nedostatak vode (ne samo pitke) možda će uskoro zahtijevati dopremanje ledenjaka i santi leda do mjesta uporabe.

Što znači „jedino vanjsko djelovanje“?

Električnu smo energiju, slika 2-3, mogli pretvoriti u unutrašnju kaloričku energiju, koja bi se zatim pretvorila u toplinsku, kojom bismo zagrijavali vodu pretvarajući je u paru (toplinska energija dovedena vodi pretvorila bi se u unutrašnju kaloričku energiju vode odnosno pare), paru bismo odveli u parnu turbinu u kojoj bi se konačno entalpija pare pretvorila u mehanički rad (dobiven na osovini turbine) kojim će se podići teret. To, očito, ne bi bilo „jedino djelovanje“.

Što je „teret“?

Teretom nazivamo masu u polju sile teže Zemlje. (Zemlja je neinerički sustav. Polje je sile teže Zemlje suma polja gravitacijske sile kojom Zemlja privlači neku masu i polja centrifugalne sile.) Podizanje je tereta svladavanje sile na putu, odnosno obavljanje mehaničkog rada.

Što dakle znači „energija je sposobnost obavljanja rada“?

To drugim riječima znači da se energija pretvara u rad, odnosno, da se rad obavlja na račun energije, odnosno, da bi se moglo raditi, treba raspolagati s energijom.

(Govori se: "on je pun energije", a ne: "on je pun rada", za nekoga tko može puno raditi.)

U kojim količinama?

U količinama većim, odnosno, u graničnom slučaju, jednakim količini obavljenog rada.

O čemu to ovisi?

Mehanički se rad uvijek i u potpunosti može pretvoriti u energiju. Primjerice, u unutrašnju kaloričku energiju (odnosno toplinsku energiju): npr, trenjem. Međutim, neki se oblici energije ne mogu uvijek i u potpunosti pretvoriti u mehanički rad; prema

2. glavnom stavku termodinamike postoje tri oblika (vrste) energije s obzirom na mogućnost pretvorbe u mehanički rad.

Podsjetimo kratko na neke pojmove i sadržaje, koji su vam poznati, i koje ćemo kasnije dopuniti i proširiti; i opet samo u mjeri zadovoljenja naših potreba.

Što je 2. glavni stavak termodinamike?

Niz formulacija (sudova). 2. glavni stavak termodinamike sažima iskustva i logička razmišljanja povezana s energetskim transformacijama oblikujući ih u brojnije iskaze (o kojima ćemo govoriti). U osnovi odgovara na pitanje kako to da postoji problem opskrbe energijom kad je energija neuništiva niti stvoriva. Ne tvrdi da je nešto nemoguće već samo kako, kako, kako malo vjerojatno. (2. glavni stavak termodinamike nije zakon jer ne može direktnim argumentima ništa potvrditi ili dokazati; otuda riječ „stavak“.)

Što je termodinamika?

Najkraće, znanost o energiji i entropiji, odnosno, o pravilnostima koje upravljaju procesima pretvorbi energije.

Dakle, prema 2. glavnom stavku termodinamike postoje tri oblika (vrste) energije s obzirom na mogućnost pretvorbe u mehanički rad:

- **eksergija:** to su mehanička i električna energija koje se u, nazovimo to zasad tako, „idealnim procesima“ u potpunosti pretvaraju u mehanički rad odnosno međusobno ili u bilo koji drugi oblik energije. (Dakle, i mehanički je rad eksergija, uz mehaničku i električnu energiju, jer se u potpunosti pretvara u sve druge oblike energije.);
- **energija:** to su nuklearna energija, kemijska energija, unutrašnja kalorička energija, toplinska energija, rad trenja (rad trenja je mehanički rad kojim se svladavaju sile trenja i otpora, odnosno naprezanja prigodom deformacije tijela, pretvoren u unutrašnju kaloričku energiju). Radi se o oblicima energije koji se, zbog prirodnih ograničenja, ne mogu u potpunosti pretvoriti u mehanički rad, u eksergiju; i
- **anergija:** to su oblici energije koji se, i opet zbog prirodnih ograničenja, ne mogu pretvoriti u mehanički rad niti u bilo koji drugi oblik energije. To je unutrašnja kalorička energija akumulirana u okolini, točnije u podsustavima okoline: tlu, vodi i zraku, na temperaturi i tlaku okoline. (Unutrašnja kalorička energija mora, primjerice, koja je akumulirana energija dozračena sa Sunca i energija radioaktivnog raspadanja u unutrašnjosti Zemlje, odnosno i energija svih sustava u termodinamičkoj ravnoteži /nuklearnoj, kemijskoj, toplinskoj i mehaničkoj/ s okolicom.)

(Neuspjeli su pokušaji pretvorbe anergije u ekserviju pokušaji pretvaranja oslobođene energije prigodom smrzavanja voda početkom zime, pokušaji pretvorbe unutrašnje kaloričke energije mora u ekserviju pomoći samo jednog toplinskog spremnika (brod plavi po moru koristeći se unutrašnjom kaloričkom energijom mora) i slični. Takvi se pokušaji nazivaju „perpetuum mobile druge vrste“.)

Uvođenjem se pojmove eksergija, energija i anergija prva dva glavna stavka termodinamike mogu i ovako formulirati:

- **1. glavni stavak termodinamike** (analitički oblik principa očuvanja, održanja, konzervacije energije):

U svim procesima ostaje zbroj eksergije i anergije sačuvan i jednak energiji:

$$\text{EKSERGIJA+ANERGIJA} = \text{konstanta} = \text{ENERGIJA}.$$

(To je u skladu s očuvanjem energije jer su ekservija i anergija energije.)

- **2. glavni stavak termodinamike** (princip rasta entropije):

Svaka se energija sastoji od ekservije i anergije od kojih jedna može imati vrijednost nula:

$$\text{ENERGIJA} = \text{EKSERGIJA+ANERGIJA}.$$

Što to znači? Zašto navodimo takve definicije prvih dvaju stavaka termodinamike?

Da bismo razumjeli „o čemu se tu radi“ kada govorimo o „problemu opskrbe energijom“; da bismo razumjeli zašto se energija ne može stalno u potpunosti pretvarati u mehanički rad (ekserviju /električnu energiju/).

(Pokušaji pretvaranja toplinske energije, odnosno bilo kojeg oblika energije, stalno i u potpunosti (jelovitosti) u mehanički rad /ekserviju/ pripadaju također kategoriji *perpetuum mobile* druge vrste.)

Opskrba se energijom svodi stvarno na opskrbu ekservijom.

Naime, za naš je život potrebna energija, ali ne bilo kakva energija, već ekservija; takva energija koja se, jednostavnim procesima, može pretvarati u mehanički rad i druge korisne oblike energije (mehanički rad, toplinsku, kemijsku i rasvjetnu energiju). Zadatak je, dakle, proizvoditi ekserviju. Recimo, želite glačati. Što vam treba? Glačalo treba ugrijati, učiniti vrućim. Kako se to nekada radilo? Pretvorbom kemijske energije (izgaranjem ugljena ili drva); takvo glačalo sada postoji samo u muzejima (u zemljama koje raspolažu električnom energijom). Danas nam, naime, za to treba električna energija koja će se u glačalu pretvarati u unutrašnju kaloričku energiju povisujući temperaturu glačala na željeni iznos.

Većina se energetskih procesa stoga, kojima se osigurava opskrba ekservijom, svodi, u što ćemo se uvjeriti, na odvajanje ekservije od anergije u energiji. (Zato i govorimo o proizvodnji ekservije.) Ekservija se dalje iskorištava u najrazličitijim procesima, a anergija odvodi u okolicu; nema kamo drugdje.

Potrošači, međutim, služeći se ekservijom, troše ekserviju jer se za vrijeme iskorištanja ekservije, ne radi li se o „idealnim“ već o „realnim“ procesima, ekservija pretvara u anergiju i postaje nepovratno izgubljena. Samo u "idealnim procesima" ekservija se ne pretvara u anergiju, njena količina ostaje konstantna. No, što su „idealni procesi“? Kažemo li to su „procesi u kojima se ekservija ne pretvara u anergiju“, zapleli smo se u „circulus vitiosus“. Upitamo stoga prvo: što je idealno, tko je idealan? Ono, onaj što se, koji se ponaša prema našim očekivanjima. Međutim, naša su očekivanja različita. Ne mogu se kvantitativno uspoređivati ni mjeriti. Zbog toga ćemo trebati idealne procese opisati nekako drugčije kako bismo ih mogli kvantificirati (*u tom će se*

slučaju idealni procesi morati ponašati prema rezultatima naših matematičkih modela), na primjer ovako:

- „idealni“ su procesi **povratljivi** (povratni), reverzibilni procesi, a
- „neidealni“ procesi su **nepovratljivi** (nepovratni), ireverzibilni procesi: to su realni procesi, procesi koji se stvarno odvijaju u svijetu u kojem obitavamo,

(Idealni se, povratljivi, reverzibilni procesi, golemom većinom, odvijaju nažalost samo „na papiru“, samo u našim „idealiziranim“ / pojednostavljenim / matematičkim modelima.)

pa s obzirom na vladanje eksnergije i anergije u energetskim procesima vrijedi sljedeće:

- a) u svim se nepovratljivim (nepovratnim) procesima pretvara eksnergija u anergiju;
- b) samo u povratljivim (povratnim) procesima ostaje eksnergija konstantna;
- c) nemoguće je anergiju pretvoriti u eksnergiju; proces u kojem bi se anergija pretvarala u eksnergiju je nemoguć.

Budući da su naši (realni) energetski procesi nepovratljivi, transformacije oblika energije uzrokom su smanjivanja zaliha eksnergije jer se jedan njezin dio pretvara u anergiju.

U svim procesima ostaje dakle, prema 1. glavnom stavku termodinamike, principu očuvanja energije, energija konstantna, ali ona gubi mogućnost transformacije to više što je više eksnergije pretvoreno u anergiju.

Problem se opskrbe energijom javlja prema tome jer pretvorbe energije (realni, nepovratljivi procesi) uzrokuju gubitak eksnergije koji treba nadoknađivati, i jer povećanje broja stanovnika Zemlje i povećanje standarda zahtjeva proizvodnju novih (dodatnih) količina eksnergije.

Koiji su procesi povratljivi odnosno u kojem bi slučaju bili povratljivi (povratni)?

Kvalitativne odgovore znadete, barem djelomično.

Povratljivi je proces onaj koji se može odvijati kako u jednom tako i u drugom, povratnom, obratnom, suprotnom smjeru, vraćajući se u početno stanje prolazeći kroz ista stanja u obratnom smjeru, a da nigdje u procesu (sustavu podvrgnutom procesu) ili okolicu ne zaostanu neke trajne, vidljive (zabilježive) promjene.

(Na primjer, njihalo pomaknuto iz položaja ravnoteže. Kada ne bi bilo trenja, njihalo bi njihalo vječno. Potencijalna bi se energija (eksnergija) pretvarala u kinetičku energiju (eksnergiju) i obratno. Drugim riječima, eksnergija bi ostala sačuvana, stalna, konstantna. Zbog trenja, međutim, koje se javlja prolaskom njihala kroz zrak, dio se eksnergije / kinetičke ili potencijalne energije/ troši na sruđivanje sile trenja: obavlja se mehanički rad (rad trenja) koji se pretvara u unutrašnju kaloričku energiju njihala, zatim se unutrašnja kalorička energija njihala pretvara u toplinsku energiju koja prelazi u okolicu pretvarajući se u unutrašnju kaloričku energiju okoline, dakle anergiju. Njihalo se

(zbog toga ne može vratiti u početni položaj: proces je nepovratljiv, nepovratan, irreverzibilan. Da bismo vratili njihalo u početno stanje (početni položaj) treba obaviti mehanički rad: svladavati silu težu. Taj rad možemo dobiti samo transformacijom iz nekog raspoloživog oblika energije; time će zaoštati trajna, zabilježiva promjena u okolini, (sustavima okoline): manjak eksergije i višak anergije. U makrosvijetu stoga ne postoje potpuno reverzibilni (povratljivi, povratni) procesi, ali se mnoge pojave približuju takvim procesima.)

Kvantitativne odgovore na ta pitanja omogućuje razmatranje promjena fizikalne veličine nazvane **entropija**.

Što je entropija, o tome ćemo kasnije detaljnije govoriti. Zasad kažimo samo ovo:

entropija je jednaka omjeru ukupne količine toplinske energije koja se izmjenjuje između sustava i okoline i temperature pri kojoj se to događa.

Pritom vrijedi za adijabatski sustav (AS grade sustav u kojem se odvijaju energetski procesi i okolina):

- ostaje li entropija AS konstantna, dakle promjena, prirast entropije jednak nuli, $ds_{AS} = 0$, za vrijeme energetskih procesa, u adijabatskom se sustavu odvijaju povratljivi procesi, idealni procesi: sva eksnergija ostaje sačuvana, ništa se eksergije ne pretvara u anergiju;
- raste li entropija AS, $ds_{AS} > 0$, radi se o nepovratljivim, realnim procesima. Što je veći porast entropije, to je promatrani proces lošiji, dalje od povratljivog: više se eksergije pretvara u anergiju;
- smanjuje li se entropija AS, $ds_{AS} < 0$, radi se o nemogućim procesima: pokušajima pretvaranja anergije u eksnergiju (perpetuum mobile druge vrste).

Zašto promatramo zbivanja u adijabatskom sustavu?

Jer adijabatski sustav zadovoljava gore postavljene odnose (potvrdit ćemo to kasnije) s obzirom na to da je entropija, točnije, promjena entropije, definirana ovom diferencijalnom jednadžbom:

$$ds = dq/T + d[\text{procesi koji uzrokuju proizvodnju entropije}]/T \quad [\text{J/kgK}].$$

Npr., ako se radi o trenju (proses kojim se proizvodi entropija):

$$ds = \frac{dq}{T} + \frac{|dw_{trenja}|}{T} \quad [\text{J/kgK}].$$

Promjena se entropije, naime, dijeli na strujanje entropije (dq/T) i na proizvodnju entropije (npr, $|dw_{trenja}|/T$). Drugi je član uvijek veći od nule, a predznak prvog člana ovisi o predznaku toplinske energije. Objasnit ćemo kasnije zašto je toplinska energija što se dovodi sustavu, što ustrujava u sustav, pozitivna, a ona koja se odvodi iz sustava, ustrujava iz sustava, negativna. S dovođenjem toplinske energije sustavu povećava se naime entropija sustava: u njega strui entropija. Obratno vrijedi ustrujava

li toplinska energija iz sustava; entropija se sustava smanjuje, struja entropije napušta sustav.

(To nije u suprotnosti s dosad rečenim da se entropija ne može smanjivati jer to vrijedi samo za adijabatski sustav kojemu se ne može ni dovoditi ni odvoditi toplinska energija.)

S druge strane, rad je trenja uvijek negativan, jer se može samo dovoditi u sustav, pokazat ćemo to, zato uzimamo njegovu apsolutnu vrijednost. Naime, rad trenja povećava entropiju sustava jer se, nakon pretvorbe u unutrašnju kaloričku energiju, u obliku toplinske energije dovodi sustavu.

Budući da toplinska energija može imati i pozitivni i negativni predznak, što posljedično znači povećanje ili smanjenje entropije sustava, promjena entropije adijabatskog sustava može biti jednaka nuli ($ds_{AS} = 0$) samo ako je $w_{trenja} = 0$, tj. ako su procesi mehanički povratljivi (rad trenja jednak je nuli – ne postoji sile trenja) i ako se unutar adijabatskog sustava ne odvijaju nepovratljivi procesi tj. procesi koji uzrokuju proizvodnju (porast) entropije (prijez topkinske energije preko konačnih razlika temperature, ekspanzija bez obavljanja mehaničkog rada itd.), odnosno, samo ako se odvijaju povratljivi procesi izjednačavanja početno nejednolike raspodjele gustoće energije. (Npr., prijez topkinske energije na povratljivi način.)

(Što to točno znači, odnosno koji uvjeti, uz zahtjev da nema trenja, moraju biti ispunjeni kako bi proces bio povratljiv, razmotrit ćemo kasnije.)

Dakle, **za vrijeme se iskorištavanja ili proizvodnje eksnergije dio eksnergije u realnim, nepovratljivim procesima pretvara u anergiju.**

Koliki dio?

Pokazat ćemo, gubitak je eksnergije direktno proporcionalan produktu temperature okolice i prirasta entropije adijabatskog sustava, pa se određuje tako da se riješi diferencijalna jednadžba:

$$d(\text{gubitak eksnergije}) = T_{ok} ds_{AS}.$$

T_{ok} je temperatura okolice, a ds_{AS} je promjena entropije adijabatskog sustava; jednaka je algebarskoj sumi promjene entropije okolice i promjene entropije sustava:

$$ds_{AS} = ds_{ok} + ds_s$$

Tu ćemo jednadžbu rješiti kasnije, a sada ćemo najprije promatrati i opisivati **energijske pretvorbe i procese u termoelektranama.**

3 Energetske (energijske) 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 uredaji 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 (toplinsku, 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.

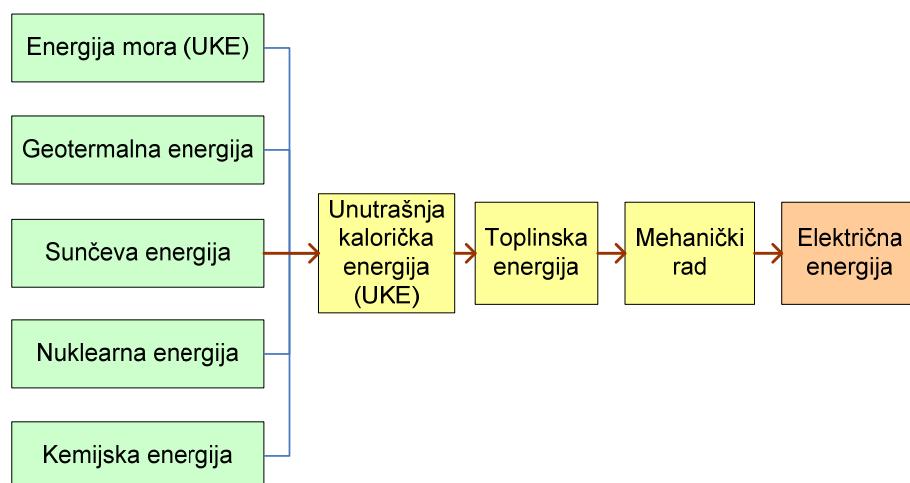
Elektrane obuhvaćene elektroenergetskim sustavom dio su cjeline, pa način njihovog rada ovisi o radu drugih elektrana i o potražnji svih potrošača sustava. To vrijedi i za rasklopna postrojenja i vodove. Pojedinačna se elektrana stoga ne može promatrati odvojeno (neovisno), već je, kako način njezine 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 uvek upotrijebiti kao temeljne, dok se promjena uloge normalno ne može provesti za temeljnu elektranu.)

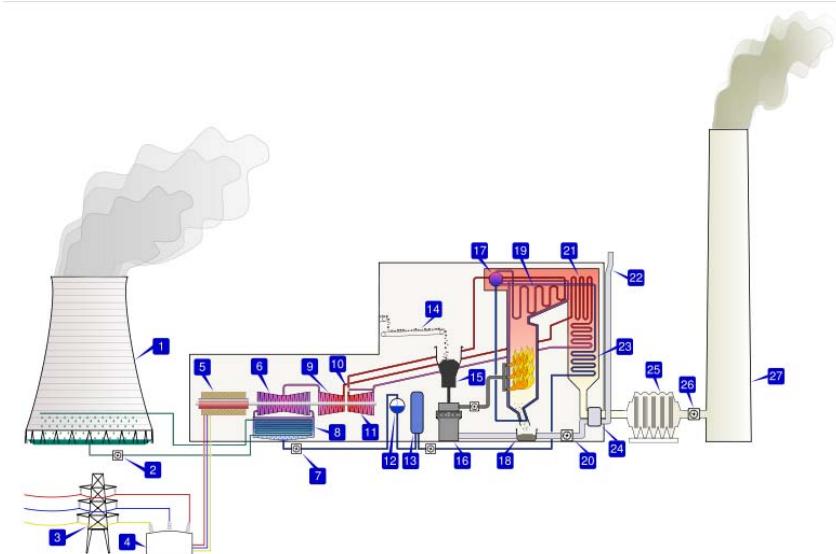
U sušnom razdoblju, kad je to moguće, uloge se zamjenjuju. Osim toga, uloga elektrana mijenja se i s razvojem sustava (izgradnjom novih elektrana): starije termoelektrane rade sve više kao vršne (jer imaju veće specifične troškove za gorivo), a nove termoelektrane preuzimaju ulogu temeljnih.

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.

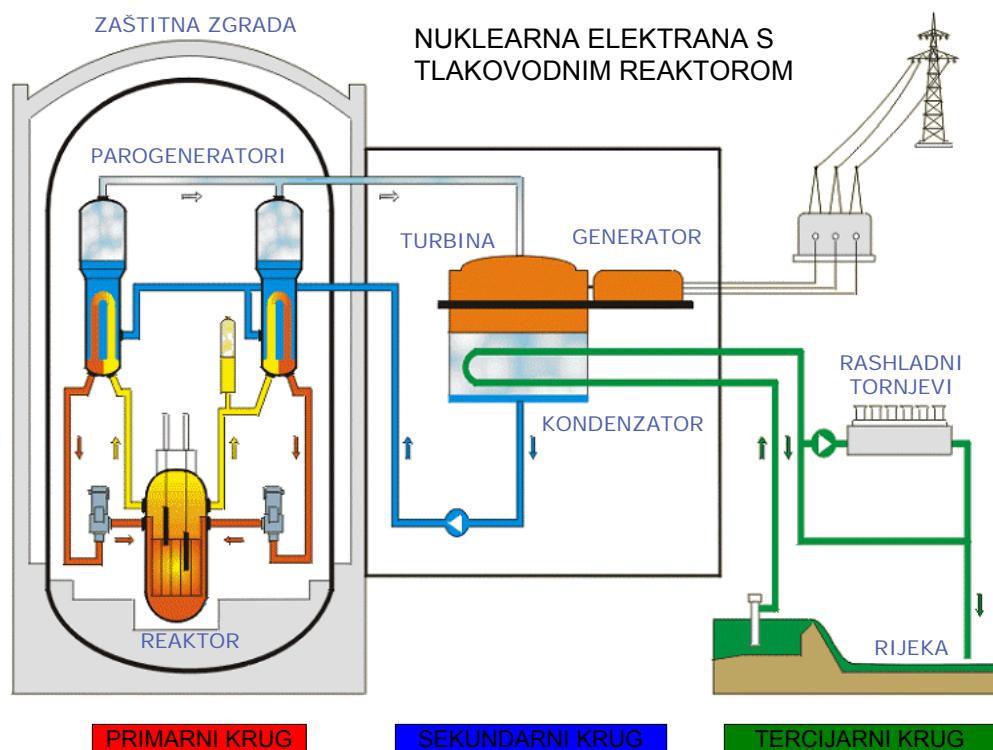


Slika 3-1 Shema pretvorbi oblika energije u električnu energiju u termoelektranama

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“ (tlakovodni reaktor s vodom pod tlakom)

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

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

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

(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, istice 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 fizijske pretvara u električnu energiju (ekserviju).

U današnjim se nuklearnim elektranama nuklearna energija fizijske pretvorbe u nuklearnim reaktorima, koji preuzimaju ulogu ložišta, a mogu i parnih kotlova, slično onima u „klasičnim“ termoelektranama, transformira prvo u unutrašnju kaloričku energiju produkata fizijske pretvorbe da bi se nakon toga odvijao proces pretvorbe u električnu energiju pomoću parnih turbina i sinkronih generatora istorijetan u potpunosti procesu u termoelektranama koje kemijsku energiju (ili unutrašnju kaloričku energiju) pretvaraju u električnu energiju. Prvo se, naime, unutrašnja kalorička energija produkata fizijske 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 struje u parnu turbinu. (Postoje i nuklearni reaktori u kojima se zagrijava plin umjesto vode (vodene pare) pa se u plinskoj turbi transformira unutrašnja kalorička energija (entalpija) u mehanički rad. / S energetskog stajališta nema (bitnih) razlika u radu parnih, plinskih i vodnih turbina./). U pari (fluidu) što struje pobranjen je, pokraj unutrašnje kaloričke energije, kinetičke i potencijalne energije, i „rad strujanja“ koji treba obaviti da bi para (fluid) strujala. Pohranjena je dakle, prema ranije rečenom, entalpija koja se zatim u parnoj turbi 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 fizijskom atomskom uranijom i plutonijem.

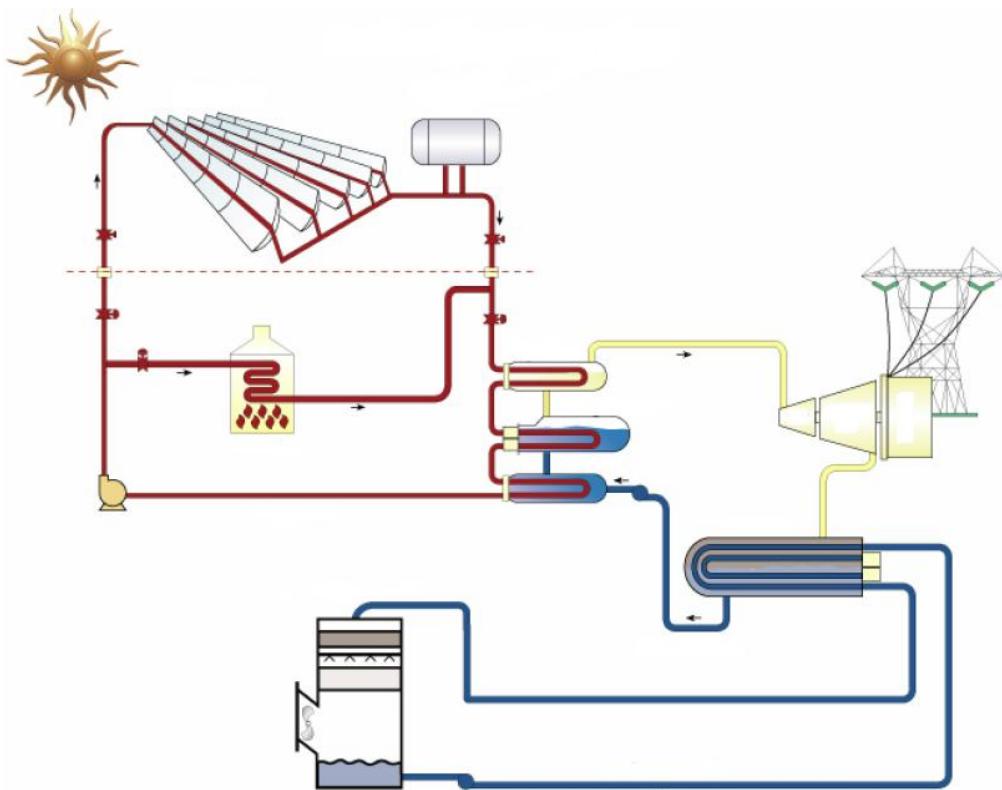
U solarnim se elektranama energija Sunčeva zračenja pretvara u električnu energiju. Dva su osnovna načina pretvorbe Sunčeve u električnu energiju. Prvi je izravna pretvorba u električnu energiju pomoću solarnih čelija (takva se transformacija naziva fotonaponskom (fotovoltaičnom) energetskom transformacijom, 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: Sunčeve se zrake koncentriraju pomoću pomoćnih zrcala što slijede gibanje Sunca na sustav za isparivanje vode /parni kotao/, Slika 3-4.



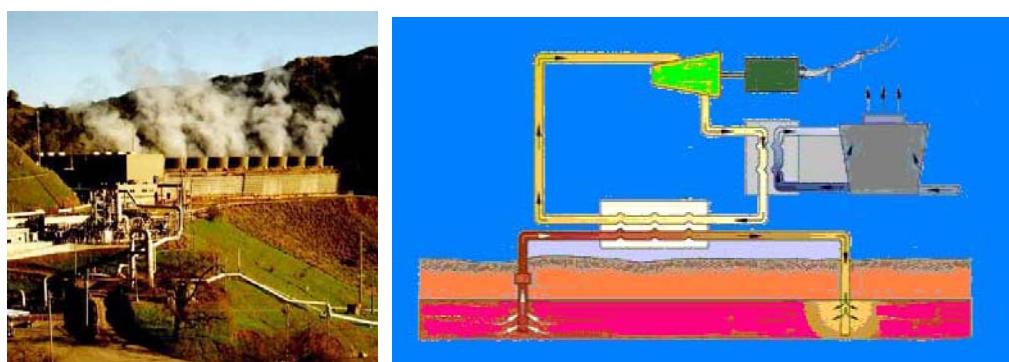
Slika 3-4 Solarna termoelektrana

Sunčev 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. Primjenjuju se, međutim, i druge izvedbe solarnih termoelektrana, Slika 3-5: 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)

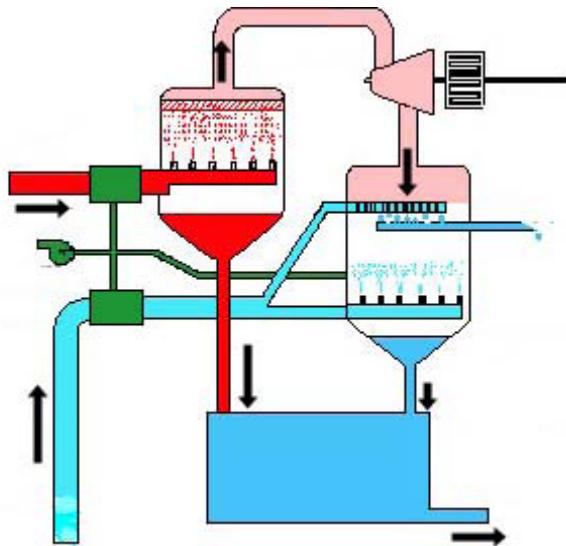
Geotermalna je pak elektrana, Slika 3-6, postrojenje u kojem se unutrašnja kalorička energija, nastala transformacijom nuklearne energije za vrijeme procesa polaganog prirodnog raspadanja radioaktivnih elemenata koji se nalaze u Zemljinoj kori (u prvom redu uranija, torija i kalija), i unutrašnja kalorička 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 turbinu veći od tlaka pare koja se kondenzira (ukapljuje) u kondenzatoru termoelektrane, Slika 3-7.

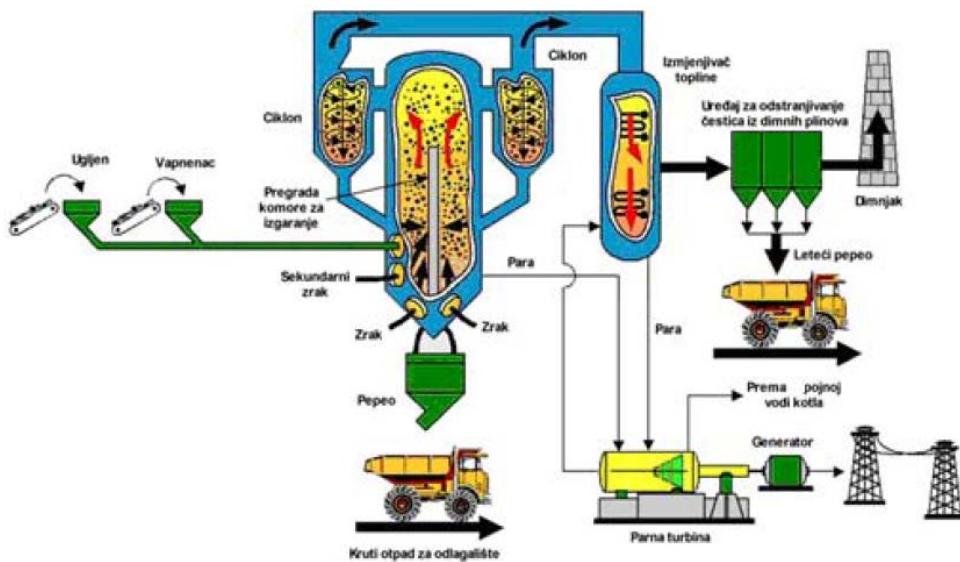


Slika 3-7 Pretvorna unutrašnje kaloričke energije mora u električnu energiju

Prvo je takvo postrojenje, snage 22 kW, izgrađeno 1930. godine na Kubi, potvrdilo tehničku mogućnost iskorištanja 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.

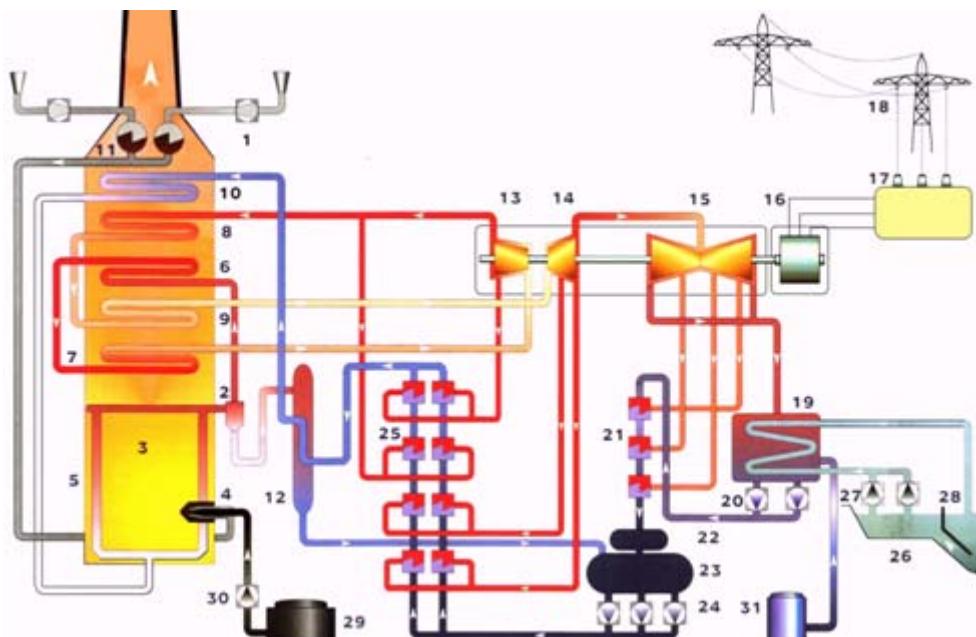


Slika 3-7 Shema termoelektrane ložene ugljenom

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 tijek 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.



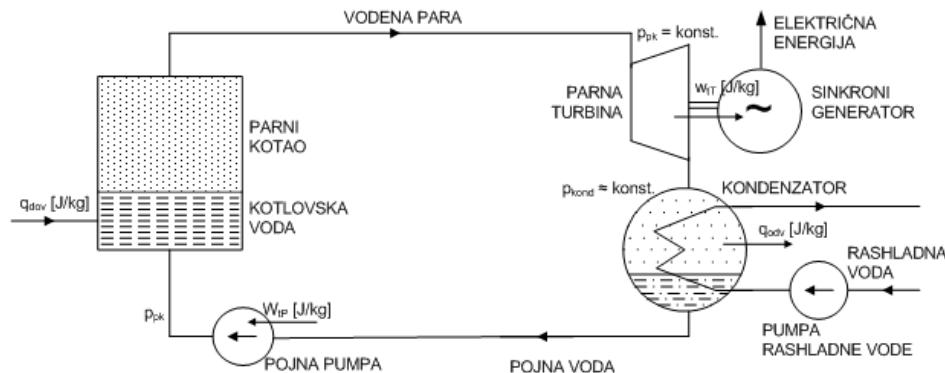
Slika 3-8 Shema termoelektrane ložene mazutom

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 izведен 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 odvode proizvedena vodena para, plinovi izgaranja i pepeo kao neizgoreni dio goriva.



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

Opisimo 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.)

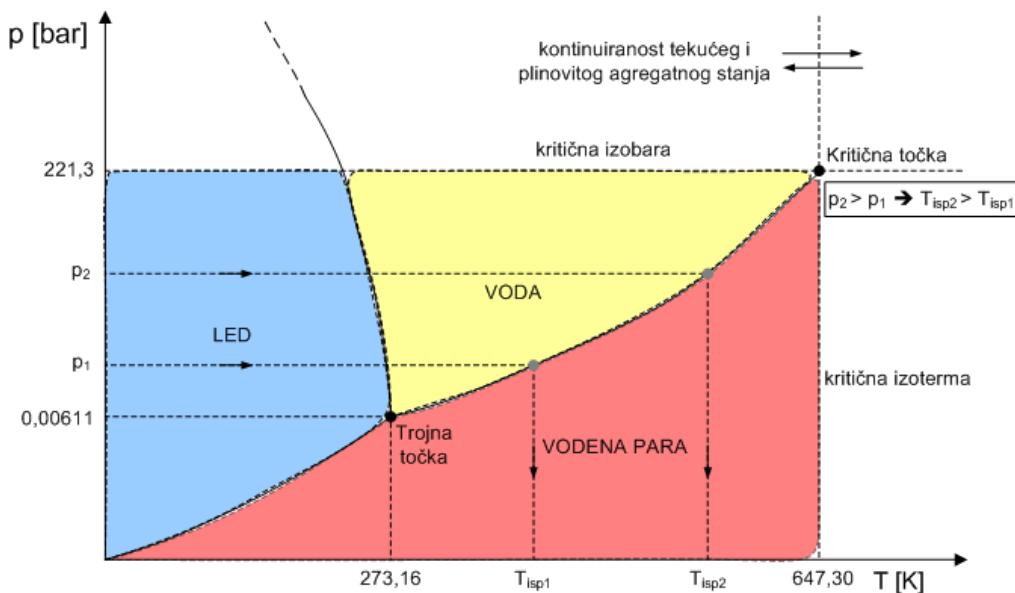
Promatrat ćemo što se događa s 1kg fluida: u termoelektrani s parnom turbinom: radi se o jednom kilogramu vode (prije nego li voda ispari u parnom kotlu odnosno jednom kilogramu vode nakon kondenzacije vodene pare u kondenzatoru termoelektrane) ili jednom kilogramu vodene pare (nakon što voda ispari 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, prikaze 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 translatorna 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, dovođenjem toplinske energije, započinje prijelaz iz kapljevitog u plinovito agregatno stanje, no, isto tako, odvođenjem toplinske energije, obratan proces: prelaženje plinovitog u kapljivo 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 dosta 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. Posljedice, 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, dovođenjem 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 termoelektranama, toj se pari najprije povisuje temperatura (količina akumulirane unutrašnje kaloričke energije) iznad temperature vrelišta, do granične temperature izdržljivosti materijala, dovođenjem toplinske energije koja se, sada međutim, nakon

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

(U najmodernejim se termoelektranama radi o temperaturi i tlaku vodene pare većim od $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ i 360 bara. ($1\text{ bar} = 10^5\text{ N/m}^2$) O kolikoj se temperaturi i tlaku radi bit će jasnije podsjetimo li da su **kritična temperatura i tlak vode** jednaki $374,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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:

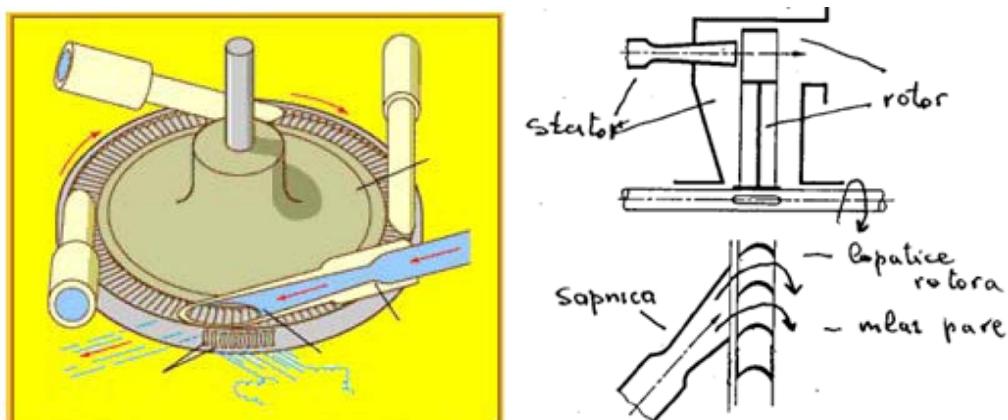
$$\begin{aligned} \text{entalpija je oblik energije pohranjen u fluidu što struji} \\ \text{a nije ni kinetička ni potencijalna energija.} \end{aligned}$$

Energija (sumarna) pohranjena u pari (stalni oblici energije) pretvara se zatim u parnoj turbinu u mehanički rad (prijezni 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.

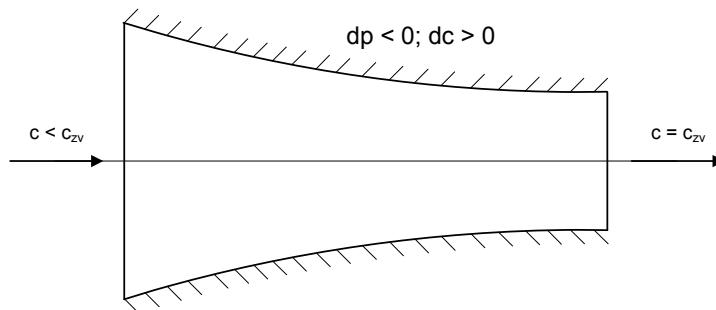
Prva je transformacija posljedica ekspanzije pare visokog tlaka i temperature u **neprekretnom** dijelu turbine, u **nepomičnim kanalima** ili **sapnicama**, odnosno **privodnom kolu** ili **statoru**. U statoru se para skreće s prvotnog smjera strujanja da bi se dovela pokretnom dijelu turbine: **okretnom 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? Pojednostavljeni, 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.



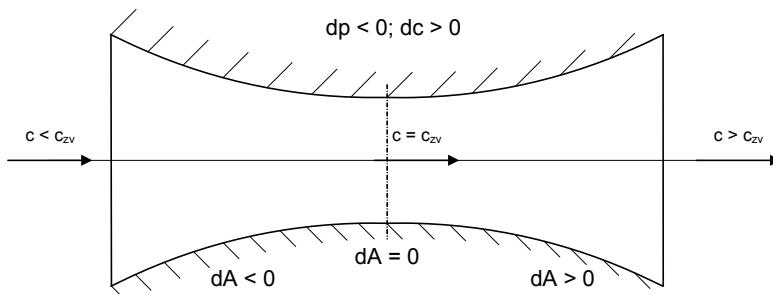
Slika 3-12 Skica najjednostavnije parne turbine

Sapnice su cijevi posebna oblika. Sužava li se presjek sapnice u smjeru strujanja vodene pare (smanjuje li se ploščina 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 jednak 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 premalenih (uvjetno premalenih) brzina strujanja pare. Problem je riješio švedski inženjer Gustav de Laval konstruirajući konvergentno-divergentnu sapnicu, Slika 3-14.

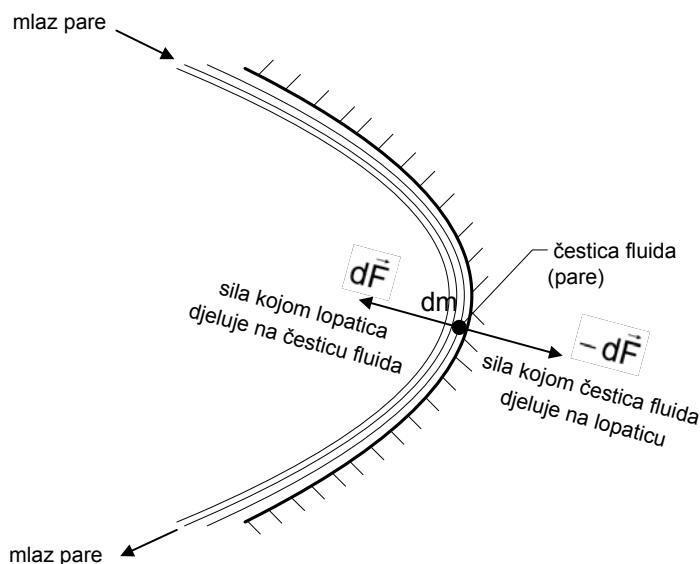


Slika 3-14 Oblik de Lavalove sapnice i odnosi u njoj

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 ekspandirala u sapnici, postigavši određenu brzinu, dovodi se među lopatice rotora, Slika 3-12. Para struji preko lopatica rotora, površina koje su konkavno 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 upravno razmijerna 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 • 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, $s = 2r\pi \cdot n/n = \text{broj okretaja vratila}/$, $W = F \cdot s = \frac{M}{r} \cdot 2r \cdot \pi \cdot n = 2\pi \cdot n \cdot M [J]$. 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/): $p_{ok} \approx 1 \text{ bar}$. Kako je to moguće? Jasno je zašto se tlak pare što struji kroz turbinu smanjuje: para

ekspandira a da joj se pritom ne dovodi toplinska energija. No kako ekspandira do tlaka manjeg od tlaka okolice (okolnog zraka)?

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

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

iz turbine, dovodi u posebno pripremljen uređaj, nazvan kondenzatorom, koji je zrakoprazan, i u kojemu se para što pristiže kondenzira (ukapljuje) 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 (vrelista na tom tlaku); temperature kod koje započinje proces kondenzacije: prijelaz plinovitog u tekuće (kapljivo) 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 ekservije i anergije. U procesima se pretvorbe jednih oblika energije u druge u termoelektranama zapravo odvaja ekservija energije od anergije energije: ekservija sudjeluje dalje u najrazličitijim energetskim transformacijama, a anergija se, u obliku toplinske energije (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 ekspandirala u okolicu, dakle, do tlaka okolnog zraka? Dakako, s tehničkog je stajališta posve svejedno do kojeg tlaka ekspandira 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 ubičajenih 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 okolini (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 okolini takva postrojenja: kiša bi ne prestajući padala poplavljajući okolinu. Konačno, postoji (barem) još jedan razlog zbog kojeg se spomenuta mogućnost ne realizira: vodu ispuštenu iz parnog kotla u obliku pare treba nadoknadivati kako bi se proces proizvodnje električne energije mogao kontinuirano odvijati. S obzirom na poplave u okolini 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-paru 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 otplinjača i iz (labilintnih) 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 odvodenjem toplinske energije u okolicu (ime izbjegavamo toplinsko opterećenje okoline), 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? Sjedni smo, jer se para sada ne kondenzira u kondenzatoru, u kondenzatoru bi vladao tlak (mnogo) viši od tlaka okoline te bismo, posledično, 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 (kapljervine), koja se u cilindru sa stапom nalazi na temperaturi okoline i pod tlakom od 1 bara, povisiti tlak na, recimo, 300 bara, i zatim jednom kilogramu zraka (plina) na temperaturi okoline i pod tlakom od 1 bara isto tako povisiti tlak na 300 bara, u kojem će 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 (stап) sustava, komprimirajući ga (povećavajući mu tlak / unutrašnju kaloričku energiju u koju se pretvara (pretrvoio) obavljeni rad/). Prejudiciramo, o tome ćemo detaljno govoriti, na sustavu obavljamo tzv. „mehanički rad promjene volumena“ koji je

proporcionalan izrazu $\int_{v_1}^{v_2} pdv$ 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, kapljervina) praktički je nestlačiva (nestišljiva, nekompresibilna): $v_2 - v_1 \approx 0$. Posledično, 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 plin povisio tlak jako, jako velik u usporedbi s radom utrošenim na kompresiju tekućine (kapljervine). Drugim riječima, rad koji bi se trošio na kompresiju pare bio bi toliki da se opisani proces ne bi isplatio. (Pritom bi u okolinu prelazila i velika količina toplinske energije.) Zbog toga se u termoelektrani para, koja je svu svoju eksnergiju (najveći dio) predala u parnoj turbini, kondenzira da bi pojnom pumpom bila vraćena u parni kotao. Pumpom se, uz utrošak mehaničkog rada, zanemariv prema količini mehaničkog rada koji dobarjava parna turbina, vodi (kondenzatu) pod niskim tlakom, što vlada u kondenzatoru, povisuje tlak do iznosa tlaka u parnom kotlu.

Prostor je kondenzatora zrakoprazan, no, zbog nemogućnosti potpunog brtljenja, 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, strujeći 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 kojem se para miješa s rashladnom vodom. (Takvi se kondenzatori planiraju za područja s malim količinama rashladne vode.)

Nije, međutim, kondenzatoru jedini zadatak osigurati kondenzaciju ekspandirane 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 ekspandirati 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 svježa voda iz vodotoka, jezera ili mora, to je **protočno hlađenje** koje se upotrebljava kad ima dovoljno vode. Naime, za današnje su snage termoelektrana 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, termoelektrana snage 1.000 MW treba od 25 do 100 m^3/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 najsušnjim 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 energetskim pretvorbama i procesima, pretvara konačno u anergiju koja u obliku toplinske energije prelazi u okolinu. Kad se promatraju pojedinačni energetski procesi, prihvatljivo je smatrati da je stanje okoline konstantno ($T_{ok} = \text{konst.}$, $p_{ok} = \text{konst.}$) ili, što ima isto značenje, da taj proces ne utječe na stanje okoline. 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 ugrozio 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 hlađi 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 dimenzijsama 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.*)



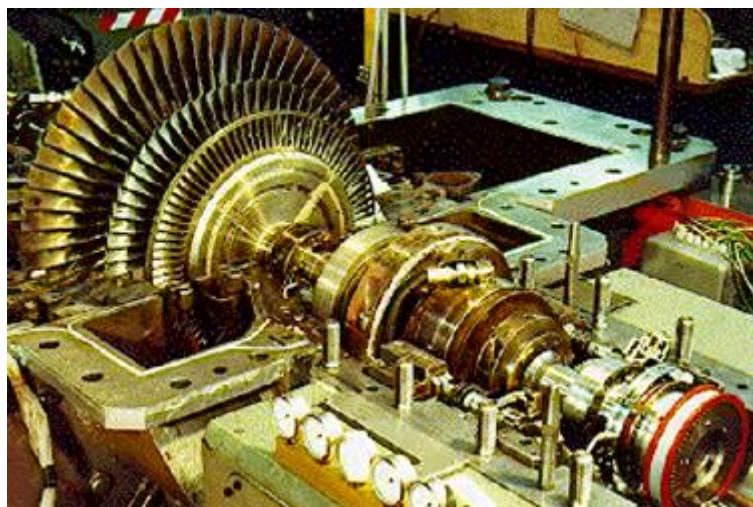
Slika 3-16 Nuklearna elektrana „Krško“

U prvim su se počecima termoelektrane koristile stapnimi 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 stupnog 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 stupnog stroja može stoga postići samo ukoliko je velike mase (sila je stupnog 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 turbostrojevima, 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 stupnim. Nedostatak im je što su dijelovi s lopaticama skupljci 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 stupni strojevi.

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

Glede stupnih 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 stupni 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 energetskih pretvorbi 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 čemo 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 čemo 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 uključi li se i strijanje fluida u razmatranju.*)
- (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 strijanje fluida.*)
- (3) analitički oblik principa očuvanja količine gibanja (*Postoji više analitičkih oblika principa: morat ćemo ih izvesti za strijanje fluida.*)
- (4) analitički oblik principa očuvanja momenta količine gibanja (*Postoji više analitičkih oblika principa: morat ćemo ih izvesti za strijanje 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 uključi li se i strijanje 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 prilagodi 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 ustrJAVA 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, smatrati 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 zatvoren sustav ili otvoreni sustav u kojemu se odvijaju jednodimenzionalni, stacionarni, strujni procesi. Te opće izraze množimo onda s masom promatranoog 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 termoelektranu možemo smatrati zatvorenim sustavom budući da zatvorení 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 zatvorení 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 energetskih pretvorbi 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 okolice?

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 zatvoren 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 fizičke slike događanja:

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

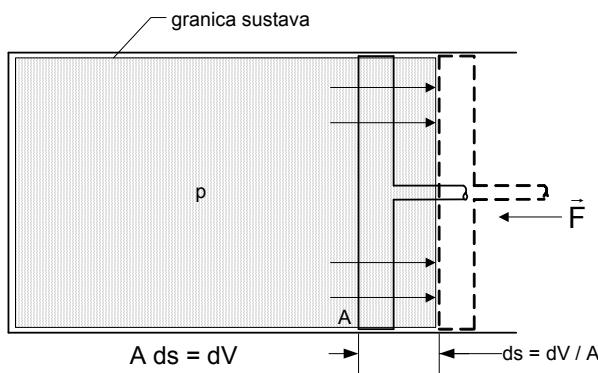
(Promatramo sustav čija je masa $m \text{ kg}$, a minus je predznak dogovoren.)

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 stupom, 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 hватиšte sile \vec{F} , što odgovara obavljanju rada:

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

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

(Pomak je hvatista sile u smjeru suprotnom smjeru gibanja hvatista 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 uvek kad je brzina stapa malena prema brzini zvuka u promatranoj 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 uvek ispunjen i u najbržim stapnim strojevima.)

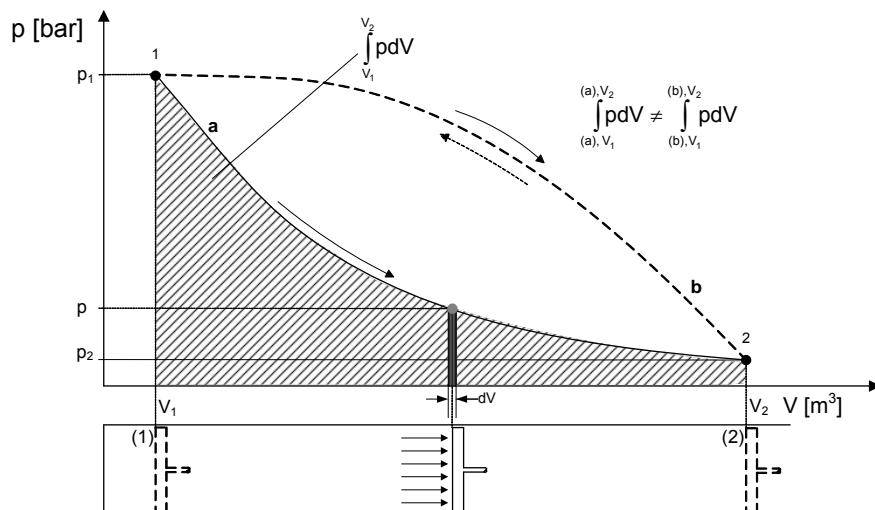
Uz poznatu ovisnost promjene tlaka o promjeni volumena, krivulja a Slika 3-20, moguće je integriranjem izraza [3.3] između početnog stanja 1 (trenutak kad sustav počinje svladavati silu na putu) i konačnog stanja 2 (trenutak kad sustav prestaje svladavati silu na putu), iz relacije

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

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:

$$\frac{W_{12}}{m} = w_{12} = \int_1^2 p \frac{dV}{m} = \int_1^2 pdv \equiv \int_{V_1}^{V_2} pdv \text{ [J/kg]} \quad [3.5]$$

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 stup 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, $dw = pdV$ 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 \ddot{d} . Trebali bismo dakle pisati δw ili $\ddot{d}w$. Budući da smo slovo δ već rezervirali, a slovo \ddot{d} „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 a kada ne radi o veličini stanja.

(Zbog istog razloga, brzinu ćemo označavati slovom c (\bar{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 prihvatile.)

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 rješiti 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 ($dV > 0$, odnosno $dv > 0$), govori se tada o ekspanziji plina pa one teku od 1 prema 2 i mehanički je rad pozitivan, sustav obavlja rad.

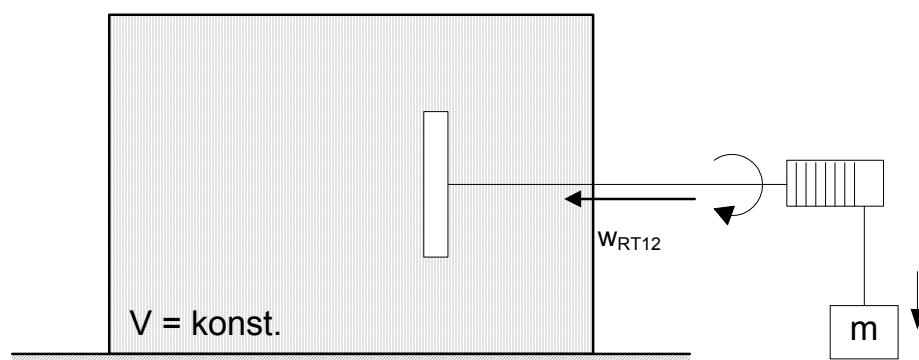
(Na račun kojeg (kojih) oblika energije? Sustav miruje, ne radi se, očito, ni o kinetičkoj ni potencijalnoj energiji.)

Proces se, međutim, može odvijati i uz smanjenje volumena, crtkana strjelica 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 zatvoren sustav miruje ne mijenjući svoj položaj u prostoru i ne mijenjući 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 zatvoren sustav nepomičnih stijenki (kruti spremnik) u kojemu se nalazi plin, Slika 3-21.



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

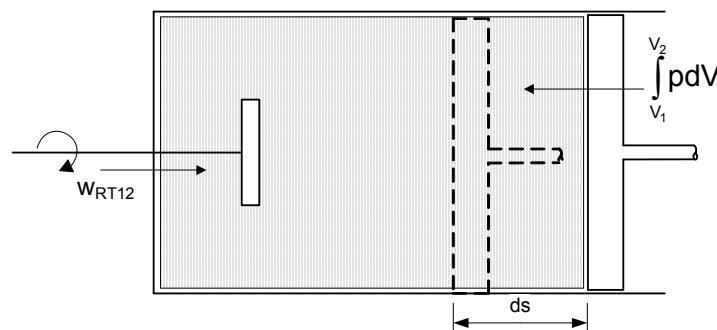
Uvedemo li u spremnik osovini s pričvršćenom pločicom, koja se okreće, u sustav će se dovoditi mehanički rad (tehnički rad) jer u svakom plinu (fluidu) nastaje trenje među molekulama koje se suprotstavlja okretanju pločice. Da bi se pločica okretala treba svladavati silu trenja na putu okretanja pločice, 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 mirujući 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:

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

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 mirujući zatvoreni sustav

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

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

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 dovoditi: 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]:

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

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

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

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 okoline, 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.

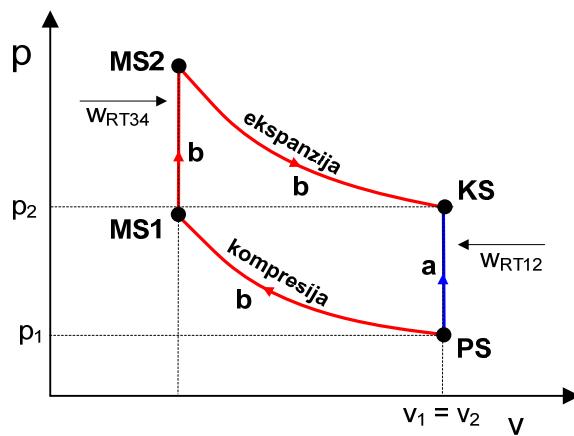
Pokazat ćemo, dovedeni se rad trenja transformira u unutrašnju kaloričku energiju sustava i pohranjuje u sustavu: samo dio se te unutrašnje kaloričke energije može pretvoriti u mehanički rad i predati u okolicu. Na taj se način, posredovanjem pretvorbe u unutrašnju kaloričku energiju, mehanički rad potrošen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

3.1.1.2.1 Prvi glavni stavak termodinamike za zatvorene sustave

Ustanovili smo da je u mirujući zatvoren sustav moguće dovoditi 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, pretpostaviti 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 ekspandirao (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 zatvoren 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 odabранo za predznaće mehaničkog rada koji se dovodi u sustav odnosno odvodi iz sustava. Toplinska je energija naime energija, za razliku od mehaničkog rada koji je ekservija. U posebnom se energetskom procesu kojem je podvrgnut sustav, kružnom procesu, dovedena toplinska energija pretvara u unutrašnju kaloričku energiju, koja se zatim razlaže na ekserviju i anergiju. Ekservija 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 (ekservija) u sinkronom generatoru pretvara u električnu energiju (ekservija).)

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):

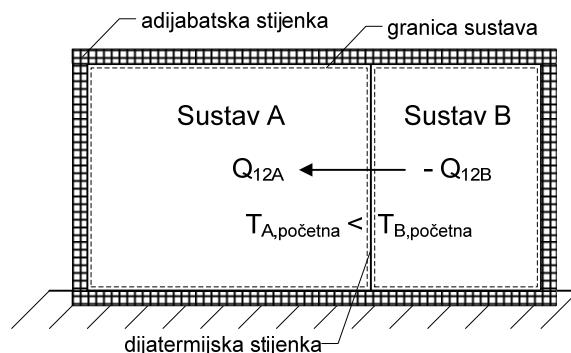
$$\int_1^2 dq \neq q_2 - q_1, \text{ nego je } \int_1^2 dq = q_{12}.$$

Drugim riječima, relaciju [3.14], bismo trebali ovako pisati: $\delta q = du + \delta w$ ili, možda, $\delta q = du + \delta w$, 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, samopotičajno, samoodržavajuće i nezaustavljivo čim postoji razlika između temperatura sustava (samo zbog razlike između temperatura).

Kako to znamo, i što se pritom događa?

Promatrajmo nepomični adijabatski sustav, krutih stijenki, sastavljen od dva parcijalna sustava A i B, Slika 3-24, odijeljenih međusobno stijenkama 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, $T_{A,\text{početna}}$, manja je od temperature sustava B, $T_{B,\text{početna}}$, $T_{A,\text{početna}} < T_{B,\text{početna}}$), nakon određenog vremena ustaliti 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 temperature: $T_{A,\text{konacna}} = T_{B,\text{konacna}}$*) Nakon toga, dokle god je sustav izoliran od okolice, 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 vjeke 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 (dvijetusučjetno i više) iskustvo upućuje naisto: 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 zbijanja. To je iskustvo sažeto u dva **ravnotežna postulata**. Prema prvom svako prirodno tijelo, ili svaki sustav prirodnih tijela teži konačnoj toplinskoj ravnoteži (izjednačenju temperature) iz koje se, kad je jednom ta ravnoteža postignuta, ne može pokrenuti samo od sebe, bez zahvata iz okolice. 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 „privi“ 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 cijelokupan adijabatski sustava 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 okoline; 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:

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

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) jednak 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

$$U_2 = U_1, \text{ možemo pisati:}$$

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

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

Dalje, budući da je

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

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

Zaključujemo: u adijabatskom sustavu kao cjelini, bez mogućnosti obavljanja mehaničkog rada, toplina (toplinska energija) koju predaje jedan njegov dio jednak 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 tijela postignu toplinsku ravnotežu?

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

Istaknimo ponovno, izjednačenje se temperatura između dva (ili više) tijela početno različitih temperatura tumač dijema iskustvenim postavkama. Prema prvoj svakoj 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 pojmom izjednačenja temperature ne bi slavio pogrešno: dva (ili više) tijela u međusobnoj težnji prema toplinskom uravnovešenju mijenjaju, doduše, pri tome svoju temperaturu, no nužno je naglasiti da je ovde izjednačenje temperatura samo vanjsko obilježje toplinskog uravnovešenja. Dokaz 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 temperature, odnosno toplinsko uravnovešenje, 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

$Q_{12} = m_1 c_1 (T_k - T_1) < 0$, 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 uravnovešenja:

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

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

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

Temperaturu smjese više tijela (krutih ili kugljevitih, $c_v = c_p = c$) nakon toplinskog uravnovešenja 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 uravnovešenja) možemo zanemariti

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

Zanemarimo li ohlađivanje 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:

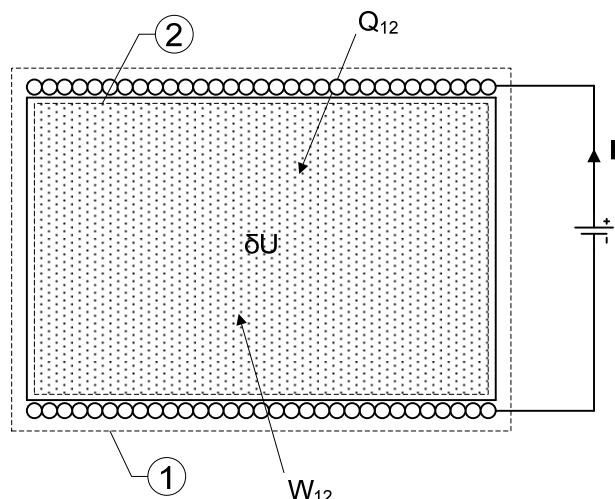
$$Q_{12} = H_2 - H_1 = c_p \delta T.$$

Kako je i entalpija funkcija samo temperature (idealnih tvari), dobivamo (zbog 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 (neizbjježno, nužno) uzrokuje porast temperature (može, no ne mora): za vrijeme se izotermnih procesa dovode (ili odvode) goleme količine toplinske energije, a temperatura se ne mijenja, nije „ono“ što je uvijek nazočno kad raste (kad se mijenja) temperatura. (Zamislimo 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:

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

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**.

Uvezši 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 c i s promjenom položaja z mijenja se kinetička, odnosno potencijalna energija sustava. Uvezši 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), eksnergijska. Ubrzava li se sustav, ili mijenja li mu se položaj djelovanjem sile (izmjenom mehaničkog rada) to nije u svezi s toplinskom energijom: toplinska se energija ne pretvara u kinetičku i potencijalnu energiju sustava. (*Primjerice, dovođenjem 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.

Primjenimo sada princip očuvanja energije, odnosno prvi glavni stavak termodinamike, na termoelektranu. Termoelektrana je zatvoren sustav (odnosno fluid u termoelektrani smatramo i promatramo kao zatvoren sustav) podvrgnut **kružnom procesu**.

Što je kružni proces, odnosno o kružnim procesima detaljno ćemo govoriti. Zasad kažimo samo ovo: kružni je proces svaki onaj koji sustav ponovo dovodi u početno stanje. U slučaju kružnog procesa koji se provodi u termoelektrani, 1 kg vode, koji smatramo sustavom (zatvorenim sustavom, ne mijenja mu se masa), uводи se u parni kotao, zagrijava, isparuje, para se odvodi u parnu turbinu, ekservija 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 povisuje tlak na tlak u parnom kotlu, vratio u parni kotao: krug je zatvoren, obavljen je kružni proces. Očito, kilogram vode sumarno ne pretrpuje nikakvu promjenu: vraćen je u početno stanje, na istu temperaturu i tlak. Bio je samo posrednik (medij) u energetskim procesima koji su se odvijali na njegovom (kružnom) putu (često se zato naziva djelatnim medijem ili djelatnom travi): preuzeo je energiju u parnom kotlu i pobranio je (unutrašnja kalorička energija, rad strijanja, kinetička i potencijalna energija), prenosio je parnim gjevodom do parne turbine, bio zatim posrednik u njezinoj pretvorbi u parnoj turbini da bi je konačno predao u parnoj turbini (mehanički rad / ekservija) 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 skustava s njima:

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

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 jednak 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] jednak:

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

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 naglaši, uzima se njena absolutna vrijednost koja se odbija od dovedene toplinske energije, [3.21].

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

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

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

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:

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

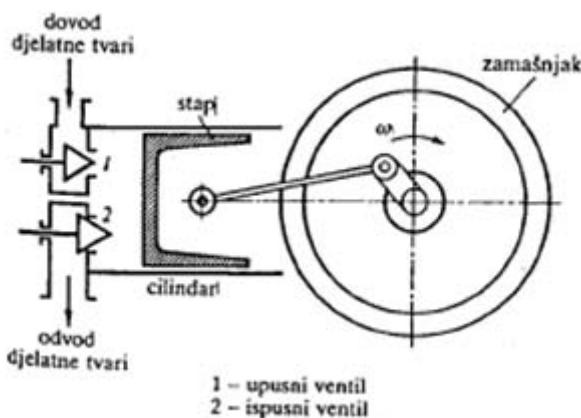
Dobivamo tako odgovor na pitanje što se događa s energijom u termoelektrani. Na pitanje međutim koliki su iznosi dovedene i odvedene toplinske energije, o čemu ovise, odnosno koliki je mehanički rad dobiven na osovini parne turbine, koliki je mehanički rad utrošen na pumpanje i sl., ne znamo (ne možemo) 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 prihvativ jer se uređaji i strojevi ne grade za jednokratno iskorišćavanje. 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 Skica 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 ekspandira obavljajući rad. Nakon ekspanzije otrara se, do tog trenutka zatvoren, ispusni ventil kroz koji se djelatna tvar istiskuje iz cilindra. Postupak se zatim ponavlja otvaranjem upusnog ventila. Zamašnjak, postavljen na osovinu stroja, osigurava da se ona jednolikо kreće. Svejedno, pokretni su dijelovi stapnog stroja izvrnuti velikim naprezanjima zbog promjene smjera kretanja te usporavanja i ubrzavanja koja se vrlo brzo smjenjuju. Takve promjene skraćuju i ograničuju vijek trajanja stапnih 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. (Granici 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 tensor drugog reda. Zašto, objasnit ćemo kasnije.)

Koji je proces „jednodimenzionalni“?

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

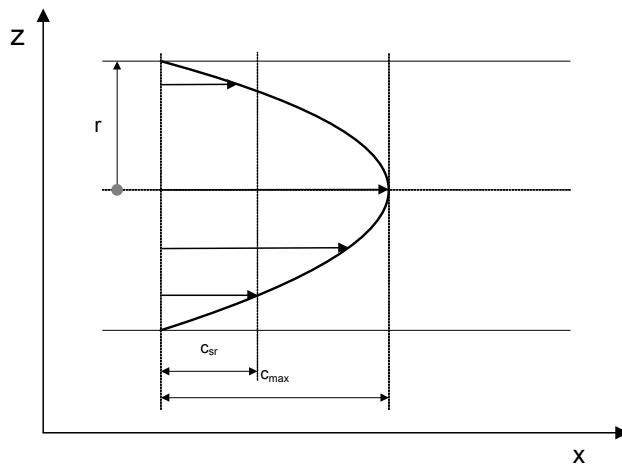
$$\vec{c} = c_x(x,y,z,t) \vec{i} + c_y(x,y,z,t) \vec{j} + c_z(x,y,z,t) \vec{k} = \vec{c}(\vec{r}, t).$$

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 točci presjeka, vrijednosti su promatrane fizikalne veličine (brzine, akceleracije, gustoće, tlaka, temperature itd.) jednake. Time bitno pojednostavljujemo 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:

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

Pojednostavljujemo 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 prostruiji kroz promatrani presjek s tom brzinom jednaku količini fluida u dvodimenzionalnom strujanju.)

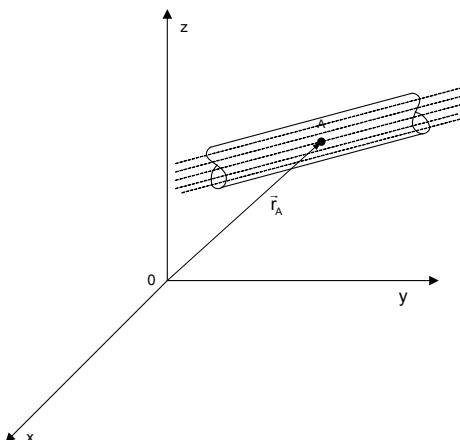
Što znači „stacionarni proces“?

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 točci 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 točci A, određenoj radij-vektorom \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 točci prostora ista svojstva kao čestice ispred njih što znači da se svojstva fluida u promatranoj točci 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, poslijedično, 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 otvoren 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 stavnog (parnog) stroja.

(U turbinama mlaz pare strui 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 (stavnih 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 energetskom 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 izade iz otvorenog sustava
mora biti jednakna 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:

$$\begin{aligned} & [\text{masa što je izšla iz otvorenog sustava}] - [\text{masa što je ušla u otvoreni sustav}] \\ & = - [\text{masa što se akumulira u otvorenom sustavu}]. \end{aligned}$$

Pogledajmo zadovoljava li ovakva formulacija princip očuvanja mase. Uđe li više mase u otvoreni sustav, nego što izade, 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 izade 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, izade li masa količinski jednakna ušloj u otvoreni sustav, lijeva je strana formulacije jednakna 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:

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

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 „fizikalnost“. Naglasili smo, promatramo energetske pretvorbe i procese u kojima je masa (tvar) posrednik (masa se pritom ne mijenja). Ona preuzima energiju iz okolice (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: „otvoren 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 otvoren 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 promatrana i analize, kontrolni je volumen odabrani volumen u prostoru kroz koji strui 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 iskorištava u nekim (teškim) problemima određivanja prijelaza toplinske energije. Zato i kažemo da je kontrolni volumen „matematički“ pojam.)

*Poput otvorenog sustava, 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 mjeriti; različitim brzinama i 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 **r** uz oznaku za brzinu, \dot{c}_r u [3.23], upućuje na to: radi se o relativnoj brzini s kojom fluid ustrujava u kontrolni volumen odnosno istrujava iz kontrolnog volumena. O toj brzini ovise količina fluida koja prelazi kontrolnu površinu i količina fluida u kontrolnom volumenu, a iznos te brzine ovise 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 (dohvatljivom) 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 energetskih procesa i transformacija oblika energije diferencijalne jednadžbe. Kako se pritom uglavnom gubi fizikalna slika, kad god je to moguće, služiti ćemo se nekim 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.

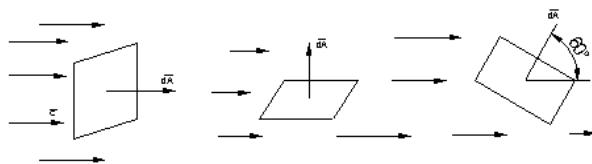
Zašto se međutim služimo integralima u matematičkom (analitičkom) predstavljanju principa očuvanja mase za otvoreni sustav (kontrolni volumen)? Zbog toga jer su realni procesi, što se odvijaju u otvorenim sustavima (kontrolnim volumnenima), trodimenzionalni i nestacionarni strujni procesi. Drugim riječima, 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 jednadžbu [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 volumna (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 volumnu dV , koji je toliko malog obujma da možemo pretpostaviti da se u tom volumnu ne mijenjaju svojstva fluida (da su jednakia u cijelom volumnu – kao da se radi o jednodimenzionalnom procesu u tom volumnu). Točnije, to je volumn čestice fluida koja, po definiciji, ima konstantnu masu: $dm = \rho dV$. Pritom se i 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 jednadžbi [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/):

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

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 (promatranoj 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) pojednostaviti 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:

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

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 protjeće 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 jednakna \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:

$$\begin{aligned} & \text{energija koja u jedinici vremena izlazi iz sustava} \\ & (\text{energija pohranjena u fluidu i prijelazni oblici energije}) \\ & - (\text{minus}) \text{ energija koja u jedinici vremena ulazi u sustav} \\ & (\text{energija pohranjena u fluidu i prijelazni oblici energije}) \\ & = (\text{jednaka je}) \\ & = - (\text{minus}) \text{ vremenskoj promjeni energije} \\ & \text{akumuliranoj u masi u otvorenom sustavu.} \end{aligned}$$

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

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

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).)

$$\begin{aligned} \iint_{KP} \left(u + pv + \frac{c^2}{2} + gz \right) \rho \vec{c}_r d\vec{A} &= \\ = \iint_{A_i} (u_i + p_i v_i + \frac{c_i^2}{2} + g z_i) \rho_i \vec{c}_{ri} d\vec{A}_i + \iint_{A_u} (u_u + p_u v_u + \frac{c_u^2}{2} + g z_u) \rho_u \vec{c}_{ru} d\vec{A}_u & [W] \end{aligned}$$

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, ustrJAVA u kontrolni volumen (otvoreni sustav),

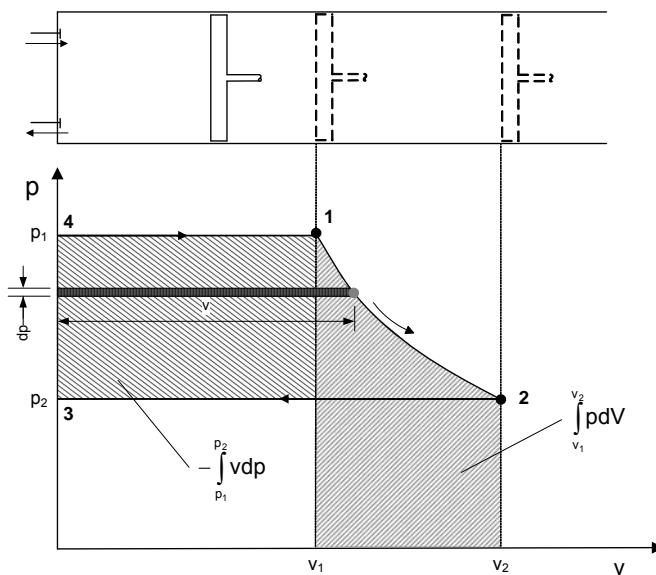
(*prije, pokazat ćemo, rad strujanja pobranjen u 1 kg fluida: $p_u v_u$ je rad strujanja pobranjen u fluidu koji ustrJAVA u kontrolni volumen, a p_v rad je strujanja pobranjen u fluidu koji istrujava iz kontrolnog volumena.*)

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 stavnog 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 ekspandira (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. Zanemarimo li 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:

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

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

$$\begin{aligned} \int_{v_4}^{v_1} pdv + \int_{v_1}^{v_2} pdv + \int_{v_2}^{v_3} pdv + \int_{v_3}^{v_4} pdv &= p_1(v_1 - v_4) + \int_{v_1}^{v_2} pdv + p_2(v_3 - v_2) + 0 = p_1v_1 + \\ &+ \int_{v_1}^{v_2} pdv - p_2v_2 = \text{površina 4-1-2-3-4}. \end{aligned}$$

Naime, u prvom je integralu $p = p_1$ = 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 jednak nuli. $p_1 v_1$ odgovara površini 4-1-v₁-0-4 u p,v-dijagramu. Odbijemo li od te površine površinu $p_2 v_2$ koja je jednak 3-2-v₂-0-3, 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:

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

što je lako provjeriti, Slika 3-30. No, integral $\int_{v_1}^{v_2} pdv$ jednak je mehaničkom radu zatvorenog sustava, zanemarimo li rad trenja, površina 1-2-v₂-v₁-1, pa je relacijom [3.32] određena veza između mehaničkog rada promjene volumena (mehaničkog rada zatvorenog sustava) i tehničkog rada (mehaničkog rada otvorenog sustava):

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

odnosno

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

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

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

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

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

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

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

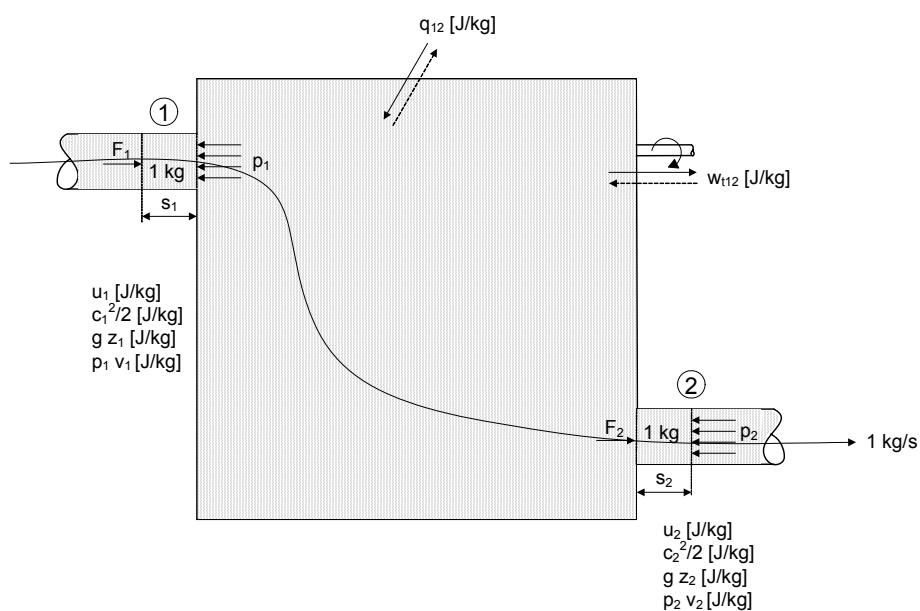
3.1.2.2.1 Prvi glavni stavak termodinamike za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava

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

energija koja ulazi u sustav
(energija pohranjena u fluidu i prijelazni oblici energije)
= (jednaka je)
= energiji koja izlazi iz sustava
(energija pohranjena u fluidu i prijelazni oblici energije).

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

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

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, pozitivnog je predznaka, stavljam ga na lijeru 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, pozitivnog je predznaka, stavljam ga na desnu stranu jednadžbe / ili na lijeru, s negativnim predznakom/.*)

u_1, u_2 unutrašnja je kalorička energija koja je akumulirana u kilogramu fluida što ustrujava u otvoreni sustav odnosno istrujava 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 ustrujava u otvoreni sustav odnosno istrujava iz otvorenog sustava s brzinom c_1 odnosno c_2 ,

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

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

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

$$p_1 A_r s_r = p_1 v_r \text{ [J/kg]} \quad [3.38]$$

gdje je $A_r s_r = v_r$ [m^3/kg] (specifični) volumen 1 kg fluida na ulazu u kontrolni volumen. Jer je rad strujanja mehanički rad (energija), ne može nestati, ostaje pobranjen u kilogramu fluida što ustrujava u kontrolni volumen.

Na izlazu iz otvorenog sustava da bi 1kg fluida izšao 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 sruđati 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 1kg fluida na izlazu iz kontrolnog volumena. Rad strujanja $p_2 v_2$ ostaje pobranjen u kilogramu fluida što istrijeva 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 strui 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 stupne strojeve tako i za turbostrojeve, za parne kotlove, pumpe, kompresore, kondenzatore itd. Provjerimo relaciju [3.37] primjenjujući je na turbinu i stupni 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 stupnog 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:

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

U tom slučaju dobivamo:

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

jer vrijedi relacija [3.36]:

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

Dobivamo dakle, kao što smo i morali (u protivnom bili bismo u ozbiljnim problemima), vrijedi li relacija (A), identične izraze: jednadžba 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, poslužit ćemo se definicijom entalpije, relacija [3.40]:

$$h = u + pv.$$

Diferencirajmo taj izraz. Dobivamo:

$$dh = du + pdv + vdp, \text{ odnosno, } du + pdv = dh - vdp.$$

Prema 1. glavnom stavku termodinamike za zatvorene sustave

$$du + pdv \text{ jednako je } dq \quad (du + pdv = dq).$$

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 pdv 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 jednadžbom 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 temperturnih razlika, u zatvorenom ili otvorenom sustavu, to ne utječe na izmjenu toplinske energije: ona ovisi samo o temperaturi sustava i njegove okoline.

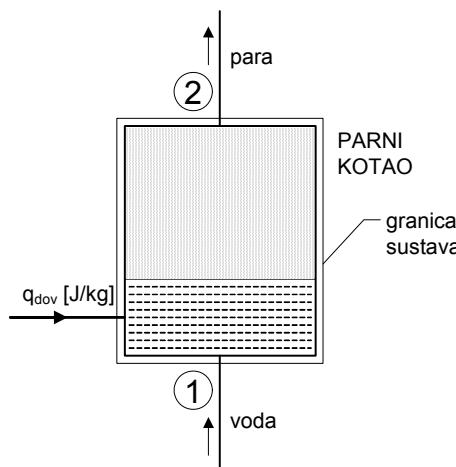
Analizirajmo sada jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese što se odvijaju u (nekim) otvorenim sustavima termoelektrana i hidroelektrana primjenjujući opći oblik prvog stavka termodinamike za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava. Jednadžbu [3.37]:

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

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 budući 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

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

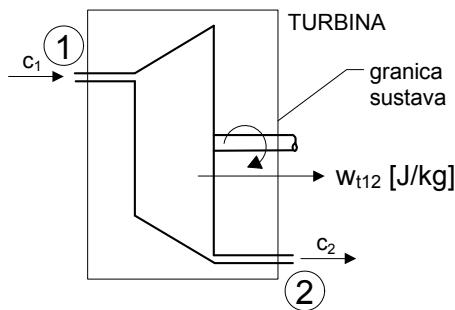
Prema [3.41] dobivamo.

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

h_2 je entalpija vodene pare na izlazi 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 turbinu ne dovodi (što je točno – ne loži se vatra ispod turbine) ni odvodi toplina.

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

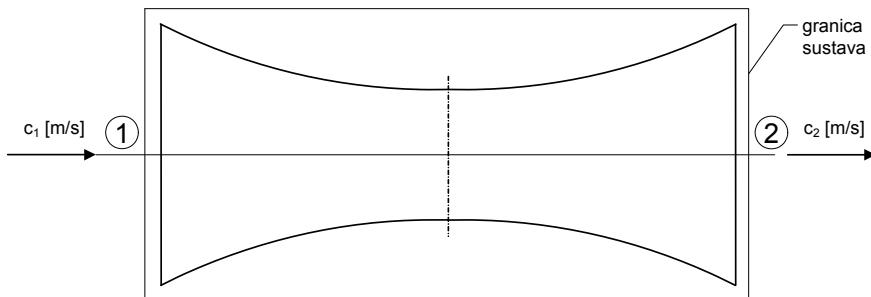
Dobivamo stoga.

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

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

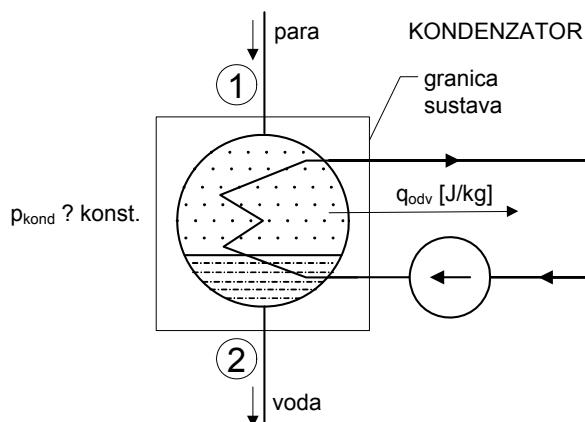
$$c_2^2 = 2(h_1 - h_2) + c_1^2.$$

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):

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

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

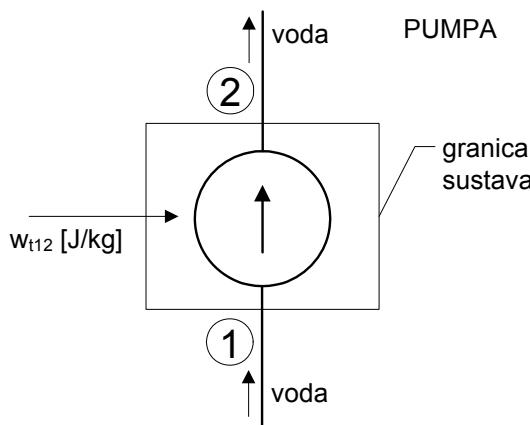
Proces je u kondenzatoru istovrstan s procesom u parnom kotlu. S jednom razlikom: u parnom se kotlu djelatnoj tvari dovodi toplina dok se u kondenzatoru odvodi. Međutim, ostalo je isto: $w_{tl2} = 0$, $\delta e_p = 0$ i $\delta e_k = 0$, tako da dobivamo:

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

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:

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

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 turbinii.



Slika 3-36 Shema procesa u pojnoj pumpi termoelektrane

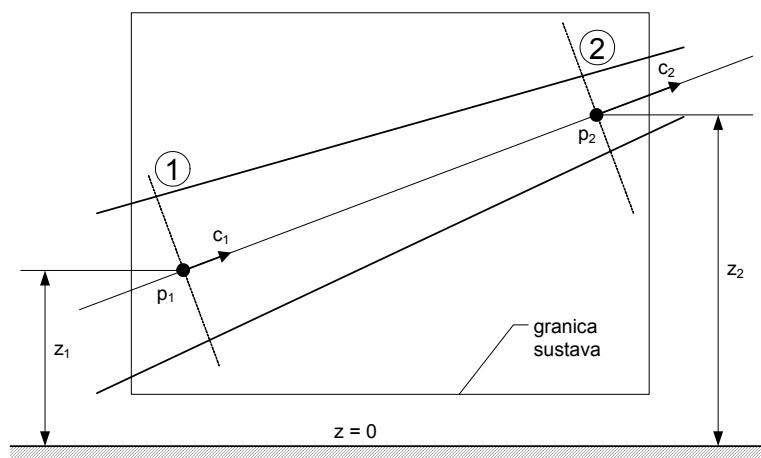
Dobivamo:

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

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 dva oblika energije.)

Promatrajmo sada strujanje vode u cjevovodu (otvoreni sustav) hidroelektrane. Vodu ćemo smatrati idealnom kapljevinom (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 $w_{t12} = 0$. 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,

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

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

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

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 jednadžba [3.51] mora vrijediti za svaki presjek cijevi. Možemo je stoga pisati u obliku [3.52].)

Jednadžba [3.52] naziva se Bernoullijevom. Očito, Bernoullijeva je jednadžba 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 jednadžbu [3.52] uvrsti gustoća $\rho = 1/v$ i zatim se jednadžba 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 $v_1 = v_2 = v = \text{konst.}$

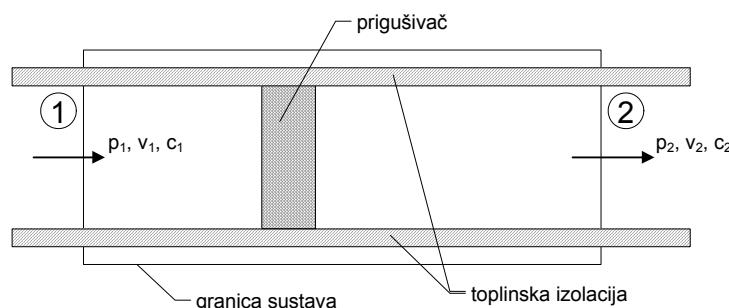
Jednadžba [3.55] potvrđuje zaključak o univerzalnosti jednadžbe [3.37]. Očita je jednakost ($v = \text{konst.}$):

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

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).

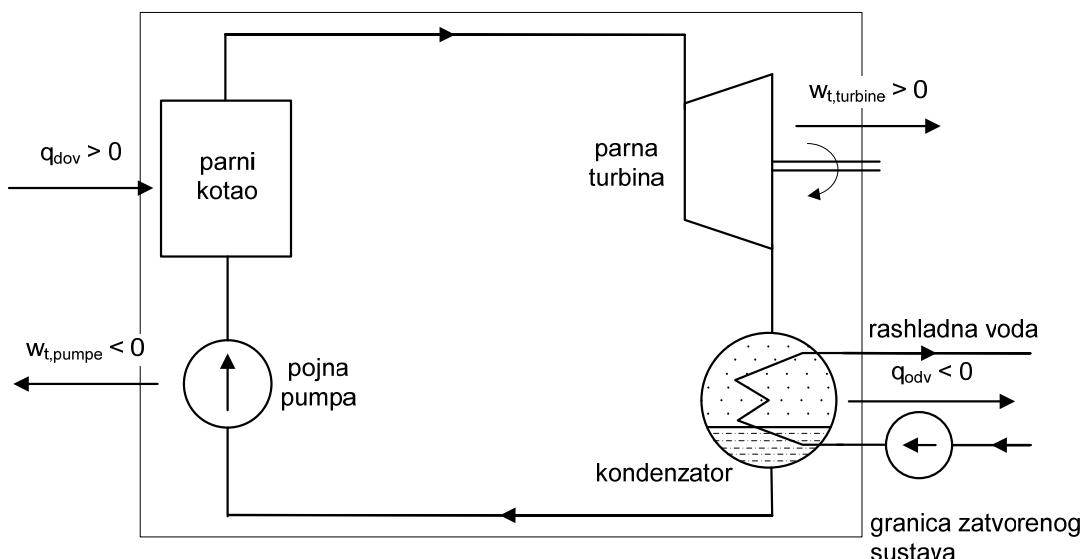
(Pod „dovoljno daleko“ misli se na takvu udaljenost na kojoj se mogu zanemariti smetnje jednodimenzionalnom i stacionarnom strujanju prouzrokovane prigušilom.)

Uvezši 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 i $z_1 = z_2$. 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, stacionarni, strujni procesi). Ustanovili smo da se u termoelektrani odvija kružni proces ostvaren energetskim 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 odvode iz termoelektrane, [3.21]:

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

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

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

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: $h = u + pv$?

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

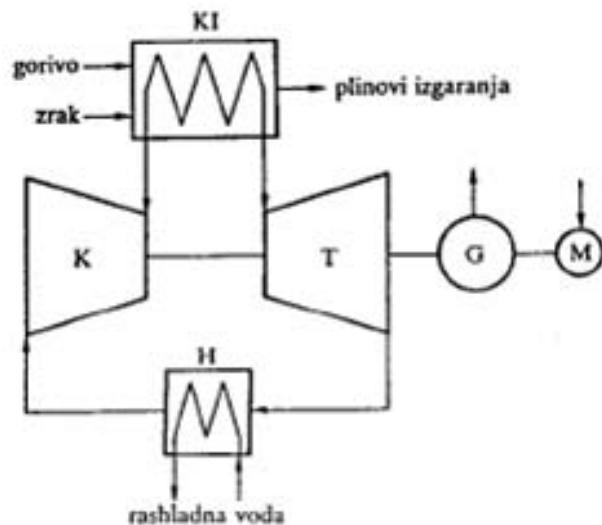
Dosad znamo ovo: što je veća količina akumulirane unutrašnje kaloričke energije u nekom sustavu konstantne mase, to je viša temperatura tog sustava. Očito, pomoću temperature sustava trebali bismo moći odrediti iznose (ili barem promjene) unutrašnje kaloričke energije. Kako? Da bismo odgovorili na ta 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: kapljevina i plinova.

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

3.2 Energetske pretvorbe u termoelektranama s plinskom turbinom

S energetskog 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 odvodi u okolicu, gdje se ohladi

predajući toplinu okolnom zraku, a za ponavljanje idućeg ciklusa kružnog procesa kompresor usisava potrebne količine zraka iz okolice.) Pritom komora za izgaranje s izmjenjivačem topline odgovara parnom kotlu, plinska turbina parnoj turbini, hladnjak kondenzatoru, a kompresor pojnoj 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 3-400 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 hlađi 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.)

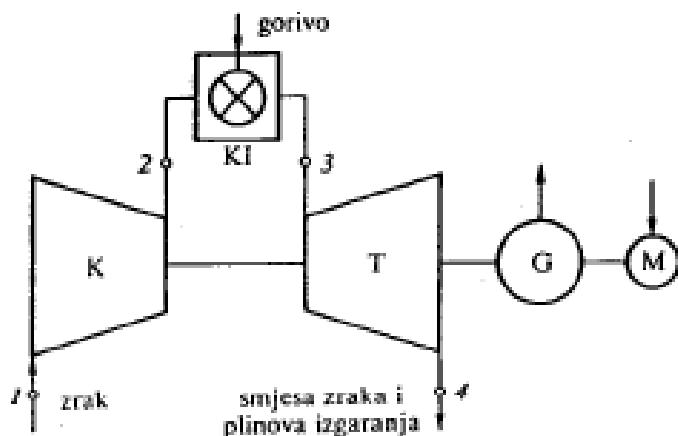
Sve rečeno o kondenzatoru termoelektrane s parnom turbinom vrijedi i za hladnjak termoelektrane s plinskom turbinom. Npr., kada se anergija (toplinska energija) ne bi odvodila u okolicu proces bi bio neprovodiv: komprimiranje bi neohlađenog zraka koji istrujava iz plinske turbine trošilo sav tehnički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

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

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.)

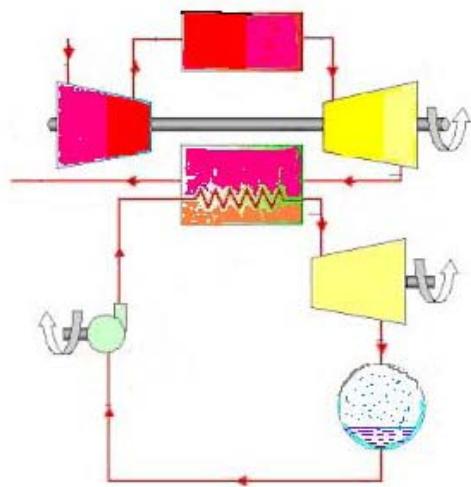
Prednost je zatvorenog procesa, u usporedbi s otvorenim, da za pogon postrojenja može poslužiti i kruto gorivo. U otvorenom procesu naime, Slika 3-411, gorivo izgara u zraku, koristeći kisik iz zraka, tako da smjesa zraka i plinova izgaranja struji kroz turbinu, pa bi krute čestice pepela vrlo brzo uništile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



Slika 3-411 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 kapljivo i plinovito gorivo. No, kako su termoelektrane s plinskom turbinom i zatvorenim procesom komplikiranija 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 3-422 Shema najjednostavnije izvedbe „spojnog procesa“ – kombinacije rada plinske i parne turbine u termoelektrani

Analiza je energetskih pretvorbi i procesa u termoelektranama s plinskom turbinom potpuno istovjetna analizi u termoelektranama s parnom turbinom.

4 O idealnom plinu

Obilježja idealnog plina

U idućim ćemo poglavljima govoriti detaljnije o „**idealnim** energetskim procesima“ koji zadovoljavajuće točno predstavljaju i predviđaju odvijanje realnih energetskih procesa omogućujući upravljanje njima u termoelektranama, hidroelektranama, geotermalnim, solarnim elektranama i vjetroelektranama.

Što su idealni energetski procesi?

Oni koji se odvijaju posredstvom „**idealnih fluida**“, odnosno, to su procesi koje ćemo promatrati i opisivati analizirajući ponašanje hipotetičke (zamišljene, nepostojeće) tvari (supstance) nazvane „**idealnim fluidom**“: „**idealnim plinom**“ odnosno „**idealnom kapljevinom** (tekućinom)“. Istdobno, idealizirajući njihovo ponašanje kadgod je to moguće, upoznavat ćemo postupno i prirodu realnih fluida. Početno govorit ćemo o idealnom plinu.

Zašto idealizacija? Što je idealni plin?

Idealizacija je jedan od najpraktičnijih postupaka provedivih u izgradnji matematičkih modela fizičkih događaja i događanja. Pojednostavnjuje matematičke modele omogućujući svejedno stjecanje spoznaja i dobivanje uporabljivih rezultata. Naime, mnogi su rezultati inženjerskih proračuna dostatno točni zamijenimo li ponašanja realnih fluida ponašanjima idealnih.

Idealni je plin (nepostojeća) tvar, u plinovitom agregatnom stanju, koja se ponaša prema našim matematičkim modelima. Drugim riječima, naši matematički modeli opisuju i predviđaju ponašanje idealnog plina.

Je li je smislen ovakav pristup? Da. Zašto?

Prvo, početni pokusi sa zrakom (vodom) rezultirali su zakonima koji danas opisuju ponašanje samo idealnog plina (kapljevine).

(To znači da se zrak (voda) ponaša gotovo poput idealnog plina (kapljevine), barem u većini svojih uobičajenih stanja, ali i da tadašnji pokusi nisu bili točni kao današnji. To isto vrijedi i za mnoge druge jednoatomske i dvoatomske plinove.)

Drugo, premda se niti jedan od realnih (stvarnih) plinova ne ponaša kao idealni plin, neki od njih svojim ponašanjem zadovoljavajuće proračune učinjene s idealnim plinom potvrđujući tako praktičnost uporabe pojma „idealni plin“.

(Dogada se međutim da za mnoge plinove (njihova stanja) moramo rabiti komplikiranije matematičke modele budući da zakoni idealnog plina ne daju zadovoljavajuće rezultate. O njima ne ćemo govoriti niti se njima služiti. Umjesto toga u tim ćemo slučajevima upotrebljavati specijalne tablice u kojima su pobranjene izmjerene i izračunate vrijednosti svojstava realnih (nesavršenih) plinova.)

Treće, ne postoji neka uočljivija granica između realnih i idealnog plina: sve se plinovite supstance mogu približiti ponašanju idealnog plina snizi li im se tlak kojem su izložene. Zbog toga smatramo da se plinovi na niskom tlaku ponašaju kao idealni plin. (*Uočimo, nulti tlak odgovara beskonačnom volumenu za konačnu količinu plinova.*) Međutim, potrebno je pritom definirati „niski tlak“ u svezi sa svojstvima razmatranih plinova. Npr., niski tlak za plinove poput vodika, helija, zraka i još neke može biti nekoliko stotina bara, a za vodenu paru tek 1 bar ili manje, ovisno o temperaturi. Pritom plinove koji su u stanjima bliskim onima u kojima započinje kondenzacija nazivamo **parama** a da ne postoji neka fizikalna razlika između plinova i para.

(*U kemiji se međutim, istaknimo to, odjeljuje pojam pare od pojma plina. Para se može pretvoriti u tekućinu djelovanjem tlaka, dok plin treba prvo pretvoriti u paru, reduciranjem njegove temperature ispod kritične temperature, kako bi ga se moglo pretvoriti u kapljevinu povišenjem tlaka.*)

I, konačno, četvrto, svi se ti razlozi dopunjaju s “inženjerskim“ kriterijem: zadovoljavaju li rezultati dobiveni na temelju promatranja idealnog plina, prihvaćaju se. U protivnom, traže se druga rješenja.

4.1 Jednadžba stanja idealnog plina

Homogeni sustav ima u svakom stanju termodinamičke ravnoteže (kraći naziv za mehaničku, toplinsku, kemijsku i nuklearnu ravnotežu /što to točno znači rastumačit ćemo kasnije/) stanovite vrijednosti veličina stanja (specifičnog volumena /v/, tlaka /p/ i temperature /T/) koje u cijelom sustavu moraju biti konstantne. Te veličine stanja proglašavamo koordinatama „**termodinamičkog sustava**“, pa se stanja mogu prikazati implicitnom relacijom:

$$f(p, v, T) = 0 \quad [4.1]$$

koja se naziva (**termodinamičkom**) „**jednadžbom stanja**“.

Radi li se o sustavu što sadrži idealni plin, pokazuje se, stanje je sustava određeno poznajemo li vrijednosti dvije (od tri) veličine stanja jer je vrijednost treće veličine stanja za svako ravnotežno stanje funkcija dviju veličina stanja. Drugim riječima, jednadžba se [4.1] može napisati u eksplisitnom obliku za bilo koju varijablu stanja koju određujemo:

$$v = f_1(p, T), p = f_2(v, T), T = f_3(p, v) \quad [4.2]$$

Znajući dakle dvije veličine stanja ukupno je stanje sustava što sadrži idealni plin jednoznačno određeno, pa su i sve veličine stanja sustava jednoznačno određene.

(*Naglasimo, jednadžba stanja vrijedi za homogeni sustav u termodinamičkoj ravnoteži. Nisu li ispunjeni ti uvjeti, sustav se razlaže na područja (podsustave) za koja se može smatrati da su u ravnoteži i da su homogena; za svako područje (podsustav) treba tada postaviti posebnu jednadžbu stanja.*)

Odredimo sada **jednadžbu stanja idealnog plina** odnosno **zakon ponašanja idealnog plina**.

Krenut ćemo od dva zakona ponašanja zraka, otkrivena u XVII. i XIX. stoljeću, i (jednostavnom) matematičkom dedukcijom izvesti jednadžbu stanja idealnog plina. U XVII. su stoljeću, neovisno jedan o drugome, Robert Boyle (Irac) i Edme Mariotte (Francuz) otkrili „**Boyle - Mariotteov zakon**“:

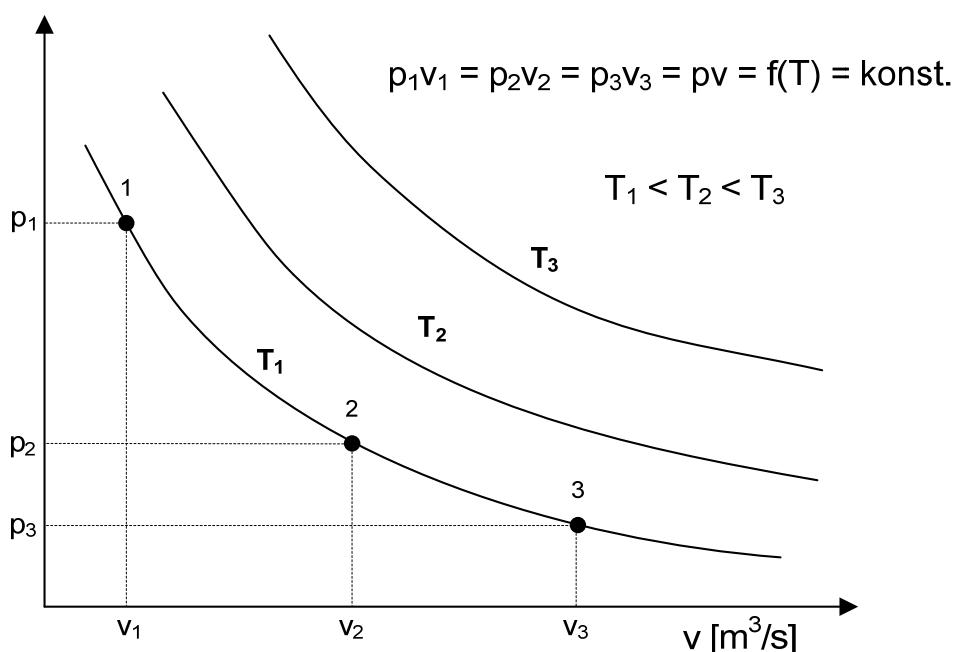
„prodot je tlaka i volumena zraka konstantan pri konstantnoj temperaturi“,

$$pv = f(T) = \text{konst. (za } T = \text{konst.)} \quad [4.3]$$

(Točnija su ispitivanja pokazala međutim da se niti jedan stvaran (realan) plin ne ponaša (točno) prema tom zakonu: Boyle- Mariotteov zakon definira stoga samo jednu od karakteristika (jedno od svojstava) idealnog plina.)

U p,v – dijagramu relaciju [4.3] predviđaju istostrane hiperbole kojima su asymptote koordinatne osi, Slika 4-1.

(Krivulje koje u termodinamičkim sustavima ($p,T; v,T; p,v; T,s; h,s$ itd.) pokazuju promjene tlaka, volumena, temperature, entropije, entalpije itd. zovu se „krivuljama promjene stanja“ ili „krivuljama procesa“.)



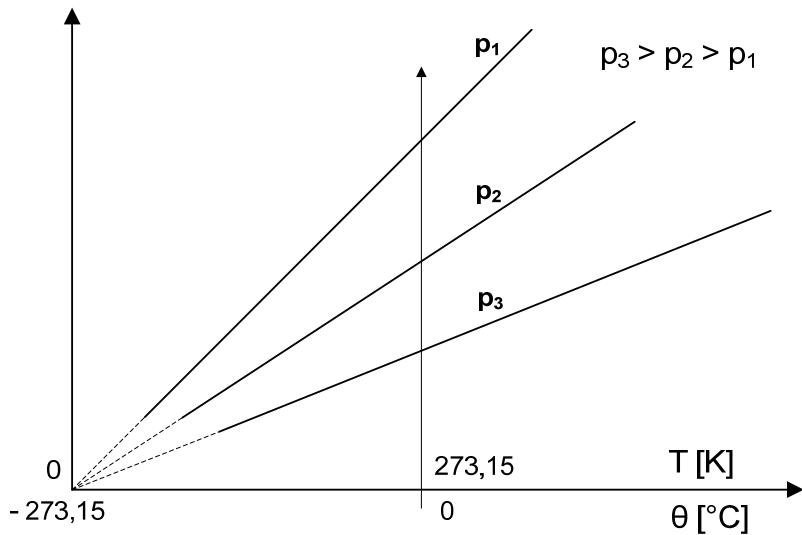
Slika 4-1 Ovisnost tlaka o volumenu idealnog plina (Boyle- Mariotteov zakon)

U XIX. je stoljeću Joseph Louis Gay-Lussac (Francuz) otkrio da je „specifični volumen plinova pri konstantnom tlaku proporcionalan temperaturi“ (Gay-Lussacov zakon):

$$v = \varphi(p) \cdot T = \text{konst.} \cdot T \quad (\text{za } p = \text{konst.}) \quad [4.4]$$

(Za Gay-Lussacov zakon vrijedi isto tako rečeno za Boyle- Mariotteov zakon. Relacija se [4.4] u anglosaksonskoj literaturi naziva (najčešće) Charlesovim zakonom.)

Jednadžba [4.4] prikazana je u v, θ – dijagramu snopom pravaca, Slika 4-2, koji se sijeku u točki $\theta = -273,15^{\circ}\text{C}$.



Slika 4-2 Ovisnost specifičnog volumena o temperaturi (Gay-Lussacov zakon)

(Tako se dolazi do termodinamičke temperature za koju se nul-točka nalazi kod $-273,15^{\circ}\text{C}$. Termodinamička je temperatura utemeljena na Carnotovom kružnom procesu, a znajući temperaturu u $^{\circ}\text{C}$ određuje se iz relacije:

$$T = 273,15 + \vartheta.$$

Jedinica je termodinamičke temperature definirana kao $273,16\text{-i dio temperature trojne točke vode (točke u kojoj se pojavljuju istodobno sva tri agregatna stanja vode), a naziva se kehin (K) s oznakom T (apsolutna temperatura). Budući da postoji razlika od $0,0100\text{ K}$ između temperature trojne točke vode i temperatu$ re ledišta vode te da se na ledište vode oslanja definicija Celzijevе termodinamičke temperature (oznaka ϑ), uvedena je temperatura ledišta vode $T_{\vartheta} = 273,15\text{ K}$. Za razlike temperature može se upotrijebiti kehin (K) i stupanj Celzija ($^{\circ}\text{C}$) jer je razlika od 1 K jednaka razlici od 1°C ($|1\text{ K}| = |1^{\circ}\text{C}|$). Međutim, u svim se drugim proračunima s fluidom mora računati s termodinamičkom temperaturom zbog potrebe da se vrijednosti temperature izražavaju pozitivnim.)

Kombinirajući relacije [4.3] i [4.4] dobivamo:

$$pv = p\varphi(p)T = f(T). \quad (\text{jer je } v = \varphi(p)T, \text{ a } pv = f(T)).$$

$p\varphi(p)$ je funkcija tlaka koju možemo ovako označiti:

$$p\varphi(p) = \Psi(p).$$

Dobivamo:

$$pv = \Psi(p)T = f(T).$$

Zaključujemo: $\Psi(p)T$ može biti jednako funkciji temperature, $\Psi(p)T = f(T)$, samo ako $\Psi(p)$ nije funkcija tlaka već neka konstanta. Označimo tu konstantu s R i nazovimo je **plinskom konstantom**.

Dobivamo relaciju:

$$pv = RT \text{ [J/kg]} \quad [4.5]$$

koja je **jednadžba stanja idealnog plina** za 1kg plina.

Za masu od m kg jednadžba će stanja biti

$$pV = mRT \text{ [J]} \quad (mv = V) \quad [4.6]$$

Jednadžba je stanja jednadžba površine u p, v, T prostoru (koordinatnom sustavu), a stanje je plina određeno točkom te površine.

Jednadžba opisuje i predviđa ponašanje plina kada se sve tri varijable, dakle sva tri svojstva odnosno veličine stanja, mijenjaju istodobno.

Fizikalno se značenje plinske konstante može uočiti iz njezine dimenzije:

$$[R] = \left[\frac{pv}{T} \right] = \frac{Nm^{-2}m^3kg^{-1}}{K} = \frac{Nm}{kgK} = \frac{J}{kgK} \quad [4.7]$$

Plinska je konstanta rad koji obavi 1kg (idealnog) plina kad mu se, kod konstantnog tlaka, temperatura promjeni za 1K.

(Dakako, formulacija „kod konstantnog tlaka“ nije vidljiva iz dimenzije plinske konstante. /Uvjerit ćemo se kasnije da je tumačenje fizikalnosti plinske konstante točno./ Moramo se poslužiti „Matematikom“ kako bismo potvrdili točnost iskaza što je plinska konstanta. Promatrajmo 1kg plina koji obavlja mehanički rad promjene volumena a da mu se pritom tlak ne mijenja:

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = p(v_2 - v_1) \quad (p = \text{konst.})$$

Jer je $pv = RT$ jednadžba stanja idealnog plina koja vrijedi za bilo koje stanje idealnog plina pa dakle i za neko „početno“ odnosno i za neko „konačno“ stanje, to imamo jednakost:

$$pv_2 - pv_1 = RT_2 - RT_1 = R(T_2 - T_1)$$

$$\text{Ako je } p = \text{konst}, \text{ a } \delta T = T_2 - T_1 = 1K, \text{ doista vrijedi } w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = R \cdot 1K \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Svaki (realni) plin ima svoju vlastitu plinsku konstantu. Tako, primjerice, plinska konstanta za kisik iznosi 259,8 J/kgK, za zrak 287,0 J/kgK, za ugljik-dioksid 188,9 J/kgK, a za helij 2077,0 J/kgK.

Međutim, jednadžba se stanja idealnog plina može svesti na još pogodniji oblik uzmememo li za masu plina μ kg umjesto jednog kilograma ($m = \mu$ kg) u jednadžbi $pmv = mRT$.

Što je μ , koliki je μ ?

μ je toliko kilograma plina kolika je relativna atomska ili molekularna masa plina. Ta se količina plina naziva kilomol (kmol):

$$1 \text{ kmol} = \mu \text{ kg} \quad [4.8]$$

1 kmol višekratnik je jedinice za **količinu tvari** Međunarodnog sustava jedinica (SI), mola:

$$1 \text{ kmol} = 10^3 \text{ mol.}$$

Mol je pak **količina tvari onog sustava koji sadrži toliko jedinki (elektrona, atoma, molekula, itd.) koliko ima atoma u 0,012 kg najlakšeg izotopa ugljika C-12.**

(*Taj ugljikov izotop ima šest neutrona, šest protona i šest elektrona, veoma je stabilan, pa je zbog toga odabran da se njime definira jedinica količine tvari mol / kmol/ kao i relativna atomska masa.*)

Posrednim je mjerjenjima utvrđeno da se 0,012 kg C-12 sastoji od $6,022 \cdot 10^{23}$ atoma (Avogadrovoj broj), pa dakle 12 kg C-12 (1 kmol C-12) sadrži $6,022 \cdot 10^{26}$ atoma. Dijeljenjem se mase od 0,012 kg C-12 Avogadrovim brojem dobiva masa atoma C-12.

Mase se atoma međutim izražavaju na poseban način (bilo bi nespretno računati s brojevima poput $1,675 \cdot 10^{-27}$ kg), kao relativne mase.

Relativnu atomsku masu definiramo kao broj (neimenovani broj) koji pokazuje koliko je puta masa nekog elementa veća od $\frac{1}{12}$ mase atoma ugljika C-12.

Posljedično, budući da se mol (kmol) svake tvari sastoji od $6,022 \cdot 10^{23}$ ($6,022 \cdot 10^{26}$) atoma, ili molekula, masa mola (kilomola) tvari iznosi upravo toliko grama (kilograma) koliko iznosi relativna atomska masa, ili relativna molekularna masa kad je riječ o molekulama. Na primjer, uzmemmo li 1kmol vode (H_2O), uzeli smo 18 kg vode. $1 \text{ kmol } CO_2 = 44 \text{ kg } CO_2$ itd. Drugim riječima uzmemmo li x kilomolova bilo kakve supstance, jer poznajemo relativne atomske mase i kemijsku strukturu supstance, znademo koliko smo kilograma uzeli. (*No, to nije jedini razlog zašto u naša razmatranja uvedimo kilomol kao jedinicu za količinu idealnog plina.*) Zatim, jer vrijedi **Avogadrovi zakon** (*taj zakon vrijedi samo za idealni plin, ne i za realne plinove*): „**isti volumeni različitih plinova pod istim tlakom i na istoj temperaturi sadrže isti broj čestica**“, to slijedi da će 1 kmol bilo kojeg plina pri jednakom tlaku i jednakoj temperaturi zauzimati isti volumen (jer sadrži isti broj čestica). Taj se volumen naziva **kilomolnim volumenom**, v_μ . Određen je mjerjenjima i za temperaturu 0°C (273,15 K) i tlak od 1 atm (1,01325 bar):

$$v_\mu = 22,4 \text{ m}^3/\text{kmol} \quad [4.9]$$

Konačno, napišu li se jednadžbe stanja za n različitih plinova mase 1 kmol, pri jednakim tlakovima i temperaturama, dobiva se:

$$p v_\mu = \mu_1 R_1; p v_\mu = \mu_2 R_2 T; \dots, p v_\mu = \mu_i R_i T, \dots, p v_\mu = \mu_n R_n T \quad [4.10]$$

Lijeve strane u svim jednadžbama imaju jednaku vrijednost, a na desnim se stranama pojavljuju jednake temperature, pa odatle izlazi da su produkti $\mu_i R_i$ za sve plinove međusobno jednaki:

$$\mu_1 R_1 = \mu_2 R_2 = \mu_3 R_3 = \dots = \mu_n R_n = R_\mu \quad [4.11]$$

Prema tome, uzmememo li 1 kmol bilo kojeg plina, R_μ je konstanta za sve plinove. To je **opća plinska konstanta**. Vrijednost joj je (kod temperature 0°C (273,15 K) i tlaka od 1 atm /1,01325 bar/) određena mjerjenjem:

$$R_\mu = 8314,3 \text{ J/kmol K} \quad [4.12]$$

Opća plinska konstanta jednaka je radu što ga obavi 1 kmol idealnog plina kad mu se kod konstantnog tlaka temperatura promijeni za 1K.

Dobivamo dakle da za 1kilomol bilo kojeg plina vrijedi jednadžba stanja u obliku:

$$pV_\mu = R_\mu T \text{ J/kmol] } \quad [4.13]$$

odnosno za n kilomolova

$$pV_\mu = pV_\mu = nR_\mu T \text{ J] } \quad [4.14]$$

Dijeljenjem opće plinske konstante R_μ Avogadrovim brojem za 1 kmol ($6,022 \cdot 10^{26}$) dobiva se opća plinska konstanta po molekuli koja iznosi:

$$k_B = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \quad [4.15]$$

a to je Boltzmannova konstanta; rad jedne molekule kada se temperatura okolice promijeni za 1K. (Energija je titranja atoma određena Boltzmannovom konstantom i temperaturom: $k_B T$.)

Pomoću kilomolnog volumena definira se još jedna jedinica za **količinu tvari, normalni ili normirani kubični metar (nm^3)**, relacijom:

$$1 \text{ nm}^3 = \frac{1}{22,4} \text{ kmol} = \frac{\mu}{22,4} \text{ kg} \quad [4.16]$$

Dakle je normalni (normirani) kubični metar količina plina koja zauzima volumen od jednog metra kubičnog (1 m^3) pri spomenutoj temperaturi i tlaku ($0^\circ\text{C} / 273,15 \text{ K} / 1,01325 \text{ bar}$).

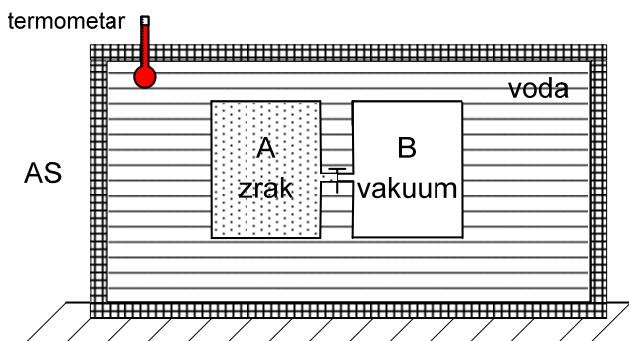
(*Naglasimo i upozorimo: normalni je kubični metar jedinica za količinu tvari pa su stoga naziv i oznaka jedinice nespretno i neadekvatno odabранe budući da je m^3 jedinica za volumen, a prefiks n (nano) znači višekratnik od 10^9 ; česta je zabuna tumačenje 1 nm^3 kao volumena veličine 10^9 m^3 .*)

Upoznajmo sada pobliže svojstva idealnog plina.

Odgovorimo prvo na pitanje o kojim fizikalnim veličinama ovisi unutrašnja kalorička energija idealnog plina?

4.2 Unutrašnja kalorička energija idealnog plina

Istražujući jednadžbu stanja (idealnih) plinova (u to se vrijeme nije znalo da postoje „idealni i neidealni /realni/“ plinovi) koristio se James Prescott Joule (Englez, XIX. stoljeće) pokusom zamišljenim od Gay-Lussaca. Dvije su jednake bakrene posude, posuda A i posuda B, spojene međusobno ventilom, smještene u zajedničkoj vodenoj kupelji u spremniku krutih stijenki toplinski izoliranom od okolice, *Slika 4-3*.



Slika 4-3 Jouleov pokus

U jednoj je od posuda (posudi A) zrak (recimo 1kg zraka) tlaka višeg dvadesetak puta od tlaka okolice (1bar), a druga je posuda (posuda B) zrakoprazna. Nakon što su svi dijelovi sustava (stijenke spremnika, voda u spremniku i posude) postigli toplinsku ravnotežu, otvara se ventil. (Termometrom se mjeri temperatura vode: kada se temperatura ustali, ne mijenja se više (radi se o adijabatskom sustavu), postignuto je stanje toplinske ravnoteže unutar sustava.) Zrak će iz posude A strujati u zrakoprazan prostor posude B do trenutka kada se cijela masa plina umiri na tlaku $P_{konačno} = \frac{1}{2}P_{početno}$. Pomoću tada postojećih instrumenata utvrdio je Joule da je temperatura vode ostala nepromijenjena i to (jednostavno) opažanje omogućilo mu je važnu spoznaju dedukcijom.

Radi se o nekoliko činjenica koje moramo uočiti.

Prvo, postoji trenutni protok, trenutno strujanje zraka koje uzrokuje vrlo komplikirane energetske odnose karakteristične za trodimenzionalno, nestacionarno strujanje fluida. Međutim, zrak je mirovao u početnom stanju (prije otvaranja ventila – prije početka odvijanja procesa prestrujavanja) i miruje i u konačnom stanju (nakon postizanja mehaničke ravnoteže /kada se ventil može zatvoriti/). Ta su stanja dakle u (termodinamičkoj) ravnoteži (uz mehaničku postignuta je i toplinska ravnoteža /radi se o adijabatskom sustavu/, a kemijska i nuklearna neravnoteža nije postojala), pa za njih vrijedi 1. glavni stavak termodinamike i jednadžba stanja (idealnog) plina.

Druge, budući da ne postoji uređaj (veza) preko kojeg bi energija mogla napustiti sustav (ili ući u sustav) kao mehanički rad, to je $w_{12} = 0$.

Treće, budući da je po definiciji toplinska energija (1. glavni stavak termodinamike za zatvoreni sustav: $q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12}$) energija što se izmjenjuje između sustava i okolice (a ne unutar sustava između njegovih dijelova koje ne promatramo kao sustav), to je, jer se radi o adijabatskom sustavu, i $q_{12} = 0$.

Četvrti, temperatuta se zraka u posudi A morala snižavati za vrijeme procesa strujanja jer je zrak ekspandirao obavljajući rad „guranjem“ određene količine zraka u posudu B i zatim komprimirajući je u posudi B. S druge strane pak temperatuta je zraka u posudi B morala rasti jer se rad obavljao na toj količini (ona se komprimirala). Na kraju je procesa strujanja temperatuta zraka u posudama morala biti jednaka.

(Postoji li razlika u trenutku postizanja mehaničke ravnoteže prije laska do izjednačenja temperatura. Zanimljivo, u trenutku je postizanja mehaničke ravnoteže (izjednačavanja tlakova u posudi A i B) temperatuta zraka u posudi B viša od temperature preostale količine zraka u posudi A. Zašto, odgovorit ćemo kasnije.)

Na temelju 1. glavnog stavka termodinamike za zatvoreni sustav zaključio je Joule da se za vrijeme opisanog procesa unutrašnja kalorička energija sustava ne mijenja, ostaje konstantnom:

$$\delta u = u_2 - u_1 = q_{12} - w_{12} = 0, \quad u = \text{konst},$$

premda se promijenio i tlak i volumen sustava. Posljedično, zaključio je Joule, unutrašnja kalorička energija zraka (plina) nije funkcija tlaka i volumena ($u \neq f(p,v)$):

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = 0 \quad \text{i} \quad \left(\frac{\partial u}{\partial p} \right)_T = 0 \quad [4.17]$$

Međutim, budući da se temperatuta nije promijenila, zaključio je Joule „da je unutrašnja kalorička energija (idealnih) plinova funkcija temperature“ (Jouleov zakon).

Ovu spoznaju možemo sažeti u oblik:

$$u = f(T) \quad [4.18]$$

No kako ova funkcija pobliže izgleda to nam opisani pokus ne može pokazati.

(Kod realnih se plinova opaža međutim da se temperatuta vodene kuglice nešto mijenja pri višim tlakovima. U tom je slučaju unutrašnja kalorička energija ovisna kako o temperaturi tako i o tlaku odnosno o gustoći (specifičnom volumenu) plina. Drugim riječima, kao i dosad spomenuti zakoni, Jouleov zakon vrijedi (posve točno) samo za idealni plin; realni se plinovi ponašaju prema Jouleovom zakonu to približnije što su niži tlakovi.)

4.3 Specifična toplina idealnog plina

Ovisnost se unutrašnje kaloričke energije o temperaturi mogla odrediti tek nakon uvođenjem pojma „specifična toplina“ ili „specifični toplinski kapacitet“.

(Za isti se pojam upotrebljavaju oba naziva. No, pokazat ćemo, niti jedan, kao ni definicija, ne opisuju žadovoljavajuće, barem ne u svim slučajevima, tu fizikalnu veličinu. Zbog toga ćemo, iz praktičkih razloga (kraćeg naziva), upotrebljavati termin „specifična toplina“, a kasnije i promijeniti definiciju.)

Specifična je toplina (c [J/kgK]) neke tvari, kako to definira „Fizika“, ona količina toplinske energije koju treba dovesti jednom kilogramu tvari kako bi joj se temperatuta povećala za jedan stupanj Kelvina:

$$c = \frac{dQ}{dT} = \frac{dq}{dT} \text{ [J/kgK]} \quad [4.19]$$

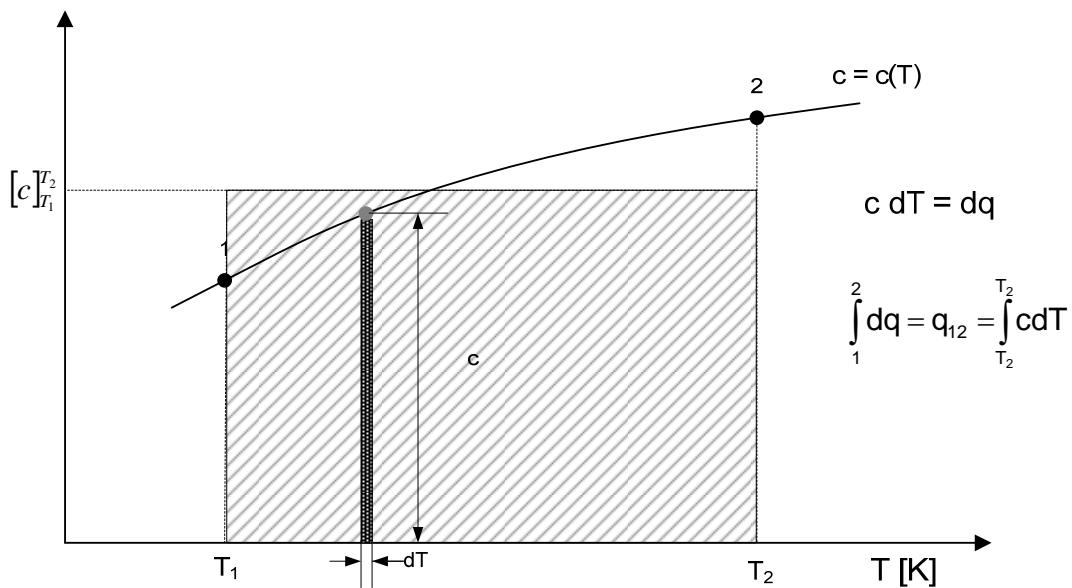
(Upozorimo, relacija [4.19] ne vrijedi za procese promjene agregatnih stanja.)

Definicija [4.19] opisuje činjenicu da tvari kojoj dovodimo toplinsku energiju obično (može i opadati ili ostati konstantnom) raste temperatura. Lako je utvrditi da je količina toplinske energije koju sustav primi proporcionalna njegovoj masi i razlici temperatura prije dovođenja i nakon prestanka dovođenja toplinske energije:

$$Q_{12} = k \cdot m \cdot (T_2 - T_1) = k \cdot m \cdot \delta T \text{ [J]} \quad [4.20]$$

Faktor proporcionalnosti k nazvan je specifična toplina.

Specifična toplina ovisi o svojstvima tvari (građi tvari), o temperaturi i o načinu dovođenja toplinske energije. Posebno je nezgodna ovisnost o temperaturi, Slika 4-4, budući da je nelinearna: takva bi funkcionalna ovisnost, uključena u proračune, znatno otežala energetske analize. Zbog toga se u svim proračunima računa s konstantnom **srednjom specifičnom toplinom** među temperaturama T_1 i T_2 , temperaturama između kojih se odvija promatrani proces.



Slika 4-4 Ovisnost specifične topline o temperaturi

Ta se srednja specifična toplina određuje iz poznate relacije kojom se određuje srednja vrijednost svake fizikalne veličine (iz jednakosti površina), *Slika 4-4*:

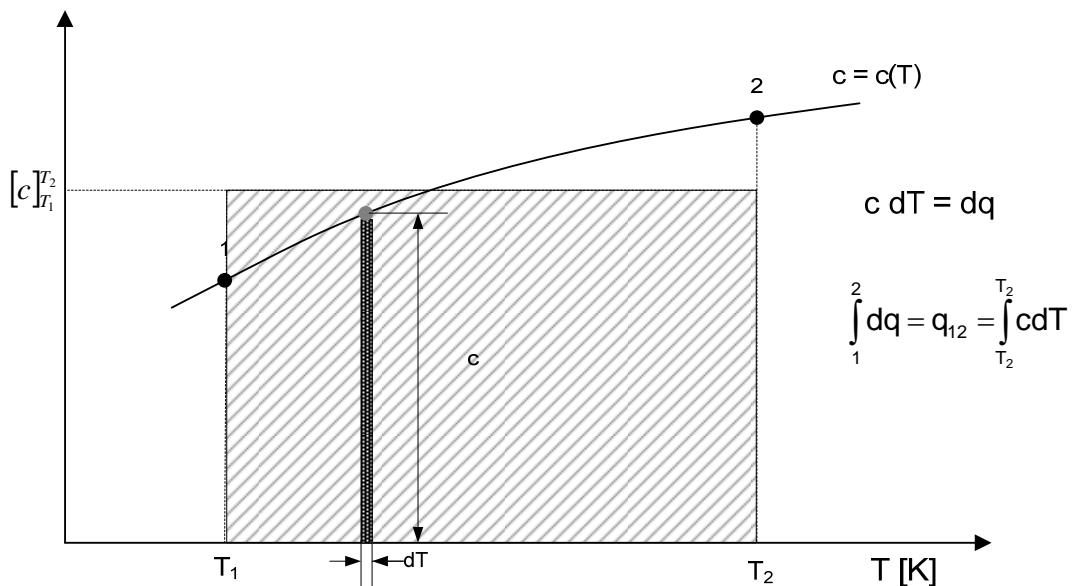
$$q_{12} = [c]_{T_1}^{T_2} [T_2 - T_1] = \int_{T_1}^{T_2} cdT \Rightarrow [c]_{T_1}^{T_2} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} cdT}{T_2 - T_1} \quad [4.21]$$

O IDEALNIM PLINOM

Ubuduće, u svim čemo našim razmatranjima šutke pretpostavljati da su sve specifične topline, s kojima računamo, srednje specifične topline unaprijed odredene, a umjesto oznake $[c]_{T_1}^{T_2}$ upotrebljavat ćemo jednostavniju: c .

(Odnosno, računamo li s idealnim plinom, to je specifična toplina po definiciji konstantna; radi se dakle o još jednom svojstvu koje posjeduje idealni plin.)

Dakako, bilo bi opterećujuće relacijom [4.21] određivati srednje specifične topline kad god to zahtijeva inženjerski problem. Zbog toga se vrijednosti dobivene prema [4.21] jednom izračunate za različite realne plinove pohranjuju u tablice odnosno memoriju računala. Jasno, praktički bilo bi nemoguće izračunati i pohraniti vrijednosti srednjih specifičnih toplina za sve moguće kombinacije temperatura T_1 i T_2 pa se stoga postupa ovako, Slika 4-5.



Slika 4-5 Određivanje srednje specifične topline $[c]_{g_1}^{g_2}$

U tablicama se naime daju vrijednosti srednjih specifičnih toplina do različitih temperatura ϑ_1 (ϑ_2) pri čemu je vrijednost ϑ_1 zadržana konstantnom i odabrana 0°C . ($T_2 - T_1 = \vartheta_2 - \vartheta_1$). U tablicama su dakle dane vrijednosti srednjih specifičnih toplina između temperatura 0°C i $\vartheta^\circ\text{C}$: $[c]_0^\vartheta$, dok najčešće trebamo srednju specifičnu toplinu između ϑ_1 (T_1) i ϑ_2 (T_2) gdje ϑ_1 nije 0°C . U tom slučaju potrebnu srednju specifičnu toplinu moramo izračunati. Pogledajmo Sliku 4-5. Vrijedi;

$$\int_{g_1}^{g_2} cd\vartheta = [c]_{g_1}^{g_2} (\vartheta_2 - \vartheta_1) = \int_0^{g_2} cd\vartheta - \int_0^{g_1} cd\vartheta$$

$$\int_0^{g_2} cd\vartheta = [c]_0^{g_2} (\vartheta_2 - 0); \int_0^{g_1} cd\vartheta = [c]_0^{g_1} (\vartheta_1 - 0),$$

pa dakle srednju specifičnu toplinu između temperatura ϑ_1 (T_1) i ϑ_2 (T_2) računamo iz relacije:

$$[c]_{g_1}^{g_2} = \frac{[c]_0^{g_2} g_2 - [c]_0^{g_1} g_1}{g_2 - g_1} \quad [4.22]$$

Što znači temperaturna ovisnost specifične topline prema Slici 4-4?

To znači da je za povišenje temperature sustava za $1K$ ($1^{\circ}C$) između temperatura, primjerice, $280K$ i $281K$ potrebno dovesti manje toplinske energije nego li ako isti sustav zagrijavamo za $1K$ ali između temperatura $1000K$ i $1001K$.

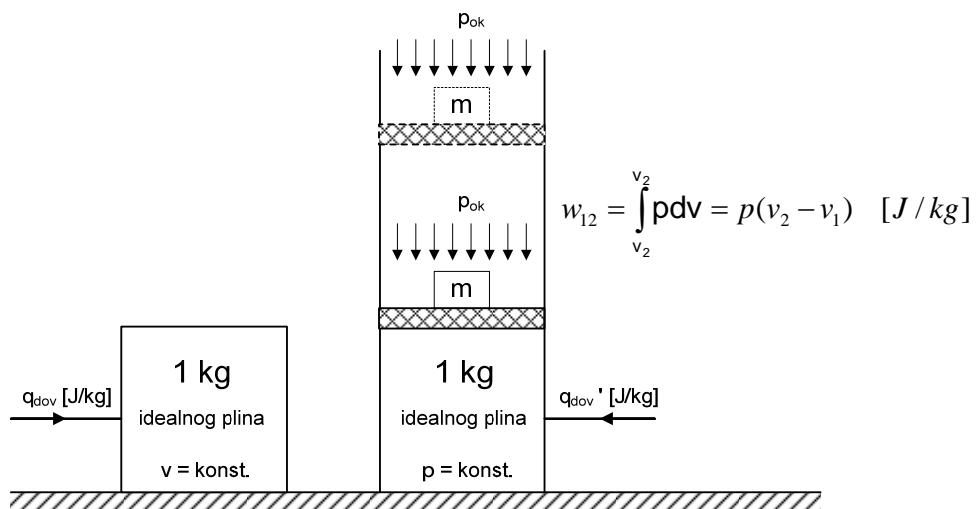
Zašto specifična toplina raste s temperaturom?

Unutrašnja je kalorička energija, kako smo to opetovano naglašavali, u općem slučaju suma translatorne energije molekula, energije rotacije i energije vibracije (titranja) atoma u molekulama. Kod visokih se temperatura energija vibracija (titranja) jako povećava, pa budući da se samo energija translacije mjeri temperaturom, specifična se toplina mora povećavati kako bi se objasnila apsorpcija energije za povećanje energije vibracija. (Jednoatomni plinovi imaju međutim konstantnu specifičnu toplinu jer se kod njih radi praktički samo o translatornoj energiji.)

U nekim je slučajevima pogodno računati s kilomolnim specifičnim toplinama, c_{μ} . One se određuju iz specifičnih toplina po kilogramu (c) iz relacije:

$$c_{\mu} = \mu \cdot c \text{ [J/kmolK]} \quad [4.23]$$

Relacija [4.19] kojom je definirana specifična toplina ne govori međutim ništa o uvjetima u kojima se dovodi toplinska energija. Ona se može naime, npr., dovoditi uz konstantni volumen ili uz konstantni tlak, Slika 4-6.



Slika 4-6 Dovođenje toplinske energije uz konstantni volumen i uz konstantni tlak

Budući da toplinska energija nije veličina stanja, to količina toplinske energije koja se dovodi u sustav ne ovisi samo o promjeni temperature sustava nego i o procesu dovođenja toplinske energije. Posljedično će i vrijednost specifične topline ovisiti o načinima dovođenja toplinske energije. Naime, vrijedi:

$$c = \frac{dq}{dT} \text{ i dalje, jer je } dq = du + pdv,$$

$$c = \frac{dq}{dT} = \frac{du}{dT} + \frac{pdv}{dT} \quad [4.24]$$

Ako se promatraju prilike uz konstantni volumen ($v = \text{konst}$, $dv = 0$), dobiva se (sa c_v označavamo specifičnu toplinu uz konstantni volumen /kod konstantnog volumena/):

$$c_v = \left(\frac{\partial q}{\partial T} \right)_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = \frac{du}{dT} \text{ [J/kgK]} \quad [4.25]$$

$\left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = \frac{du}{dT}$ jer je, za idealni plin, prema Jouleovom zakonu, unutrašnja kalorička energija funkcija samo temperature, $u = f(T)$, pa ne moramo pisati znakove parcijalne derivacije.

Nadēna je tako funkcionalna veza između unutrašnje kaloričke energije i temperature, odnosno kako se može izračunati promjena unutrašnje kaloričke energije:

$$du = c_v dT \text{ [J/kg]} \quad [4.26]$$

Ako se pak toplinska energija dovodi uz konstantni tlak ($p = \text{konst}$, $dp = 0$), dobiva se (sa c_p označavamo specifičnu toplinu uz konstantni tlak /kod konstantnog tlaka/):

$$c = \frac{dq}{dT} \text{ i dalje, jer možemo pisati da je } dq = dh - vdp,$$

$$c_p = \left(\frac{\partial q}{\partial T} \right)_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = \frac{dh}{dT} \text{ (} dp = 0 \text{)} \text{ [J/kgK]} \quad [4.27]$$

$\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = \frac{dh}{dT}$ jer je, za idealni plin, i entalpija funkcija samo temperature:

$$h = u + pv = u + RT = f(T) \text{ (} pv = RT, R = \text{konst.} \text{)} \quad [4.28]$$

Nadēna je tako i funkcionalna veza između entalpije i temperature, odnosno kako se može izračunati promjena entalpije:

$$dh = c_p dT \text{ [J/kg]} \quad [4.29]$$

Odredimo sada vezu između specifičnih toplina uz konstantni tlak i konstantni volumen. Dobivamo:

$$c_p = \frac{dh}{dT} = \frac{d}{dT}(u + pv) = \frac{d}{dT}(u + RT) = \frac{du}{dT} + R = c_v + R \quad [4.30]$$

Prema tome specifična je toplina uz konstantni tlak (c_p) veća od specifične topline uz konstantni volumen (c_v) upravo za plinsku konstantu R. Drugim riječima,

$$c_p - c_v = R, \quad [4.31]$$

što znači da za povećanje temperature sustava za 1K treba dovesti više toplinske energije dovodi li se ona uz konstantni tlak nego dovodimo li toplinsku energiju sustavu uz konstantni volumen, *Slika 4-6*. Naime, u prvom se slučaju, dovođenje toplinske energije uz konstantni volumen, sva dovedena toplinska energija pretvara samo u unutrašnju kaloričku energiju (zbog toga raste temperatura tvari), dok se u drugom slučaju samo dio toplinske energije pretvara u unutrašnju kaloričku energiju a dio u mehanički rad promjene volumena. Da bi, naime, porastom temperature tlak ostao konstantan,

$$p = \text{konst.} = \frac{RT}{v} \quad (\text{prema jednadžbi stanja idealnog plina, } pv = RT),$$

mora plin obaviti rad (potiskujući step kako bi se povećao (specifični) volumen i time tlak ostao konstantan), a taj je rad upravo jednak plinskoj konstanti (jer se temperatura povisuje za 1K). Dakle je doista plinska konstanta jednaka radu koji obavi 1kg (idealnog) plina kada mu se, kod konstantnog tlaka, temperatura promijeni za 1K.

Kako ćemo kasnije vidjeti, osim razlike specifičnih toplina, važan je i njihov omjer:

$$\frac{c_p}{c_v} = \kappa \quad [4.32]$$

Kombinirajući tu relaciju i odnos $c_p = c_v + R$, možemo specifične topline uz konstantni volumen i tlak i ovako izraziti:

$$c_v = \frac{R}{\kappa - 1} \quad [4.33]$$

$$c_p = \frac{\kappa R}{\kappa - 1} \quad [4.34]$$

Relacija $c_p = c_v + R$ vrijedi za 1kg plina. Na analogan način dobili bismo, kad bi se razmatranje provelo za 1kmol plina:

$$c_{\mu p} = c_{\mu v} + R_\mu, \quad [4.35]$$

odnosno

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_{\mu p}}{c_{\mu v}} \quad [4.36]$$

itd. (Analogno se, prema relacijama [4.33] i [4.34], dobivaju i kilomolne specifične topline ako se umjesto R_μ uvrsti R_ν)

Iskustvo pokazuje da specifične topline ovise o broju atoma u molekuli plina. Za plinove s jednoatomnim molekulama kilomolne specifične topline iznose

$$c_{pp} = \frac{5}{2} R_\mu \text{ i } c_{pv} = \frac{3}{2} R_\mu \quad [4.37]$$

s tim da ne ovise o temperaturi.

Za plinove s dvoatomnim molekulama, pri temperaturama između 0 i 200°C, kilomolne su specifične topline

$$c_{pp} = \frac{7}{2} R_\mu \text{ i } c_{pv} = \frac{5}{2} R_\mu \quad [4.38]$$

(Za dvoatomne je plinove navedeno temperaturno područje jer specifične topline ovise o temperaturi. Za plinove s većim brojem molekula ne vrijede tako jednostarne zakonitosti.)

Prema tome omjer κ [4.36] ovisi o broju atoma u molekulih, pa iznosi:

$$\text{za jednoatomne plinove } \kappa = 1,667 \quad [4.39]$$

$$\text{za dvoatomne plinove } \kappa = 1,400 \quad [4.40]$$

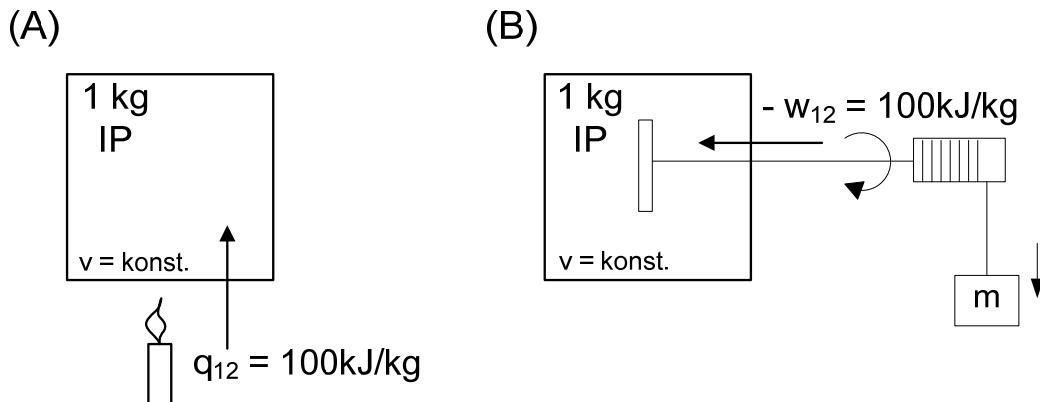
Za dvoatomne plinove vrijednost se κ odnosi samo na navedeno temperaturno područje; s porastom temperature ona opada.

Za troatomne plinove može se u prvoj aproksimaciji postaviti da je

$$\kappa = 1,3 \quad [4.41]$$

Za čvrste i kapljive tvari specifična toplina normalno raste s temperaturom, ali je razlika između c_p i c_v zanemariva.

Spomenuli smo da definicija specifične topline neodgovarajuće opisuje prirodu njezinog termodinamičkog svojstva. Zašto? Zato jer vrijednosti specifične topline mogu biti i negativne, $c<0$ (temperatura se tvari naime može snižavati premda joj se dovodi toplinska energija), specifična toplina može biti jednak nuli za vrijeme odvijanja nekih energetskih procesa, ali poprimiti i beskonačnu vrijednost za vrijeme odvijanja drugih, a katkada uporabom navedene definicije nije moguće odrediti vrijednosti specifične topline. Primjera radi razmotrimo ovakve slučajevе. Promatrajmo dva procesa s jednim kilogramom idealnog plina smještenim u spremniku krutih (čvrstih) stijenki, *Slika 4-7*.



Slika 4-7 Dovođenje toplinske energije i rada trenja 1kg idealnog plina

U prvom ćemo slučaju, (A), uz konstantni volumen, jednom kilogramu plina dovesti, recimo, 100 kJ toplinske energije, a u drugom, (B), 100 kJ rada trenja, *Slika 4-7*. Jer se u oba slučaja radi o (istom) zatvorenom sustavu, to prema 1. glavnom stavku termodinamike za zatvoreni sustav vrijedi:

slučaj (A):

$$q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12} \text{ pa jer je } w_{12} = 0 \text{ (mehanički se rad ne dovodi) dobivamo:}$$

$$q_{12} = u_2 - u_1 = 100 \text{ kJ/kg;}$$

slučaj (B):

$$q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12} \text{ pa jer je } q_{12} = 0 \text{ (toplinska se energija ne dovodi) dobivamo:}$$

$$-w_{12} = u_2 - u_1 = 100 \text{ kJ/kg.}$$

U oba je slučaja promjena unutrašnje kaloričke energije plina jednaka pa dakle i postignuta (konačna) temperatura ($dT = \frac{du}{c_v}$). No, jer se specifična toplina definira prijelazom toplinske

energije (količinom dovedene toplinske energije), dobit ćemo različite vrijednosti specifične topline plina (premda se radi o istom plinu i istim početnim i konačnim temperaturama tog plina) u promatranim slučajevima. Naime, u prvom je slučaju količina dovedene toplinske energije poznate i konačne vrijednosti, a u drugom je slučaju jednaka nuli. Zbog toga bilo bi dostatno, i najbolje, razmatrane specifične topline uz konstantni volumen i tlak (i sve ostale na sličan način) ovako definirati:

$$c_v \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad [4.42]$$

odnosno

$$c_p \equiv \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad [4.43]$$

(Parijalne derivacije upozoravaju da specifične topline realnih plinova, u promatranim slučajevima c_v i c_p , nisu samo funkcije temperature.)

Uvažavajući relacije [4.42] i [4.43] kao i relacije [4.33] i [4.34], specifične se topline mogu odrediti bez toplinskih mjerena, koja su komplikirana i manje točna, mjerenjem brzine zvuka i temperature (tlaka i specifičnog volumena), koja su jednostavnija i točnija, u plinu čije specifične topline određujemo:

$$c_{zvuka} = \sqrt{\kappa p v} = \sqrt{\kappa R T} \quad [4.44]$$

Iz relacije se [4.44] određuje κ , a zatim iz relacije [4.33] i [4.34], ili [4.36], specifična toplina uz konstantni volumen i tlak.

5 Energetski procesi s idealnim plinom

Procesi u zatvorenim i otvorenim sustavima, kružni procesi

Promatrati ćemo sada, izučavati i analizirati takve energetske procese s idealnim plinom koji su, u prvom približenju, odgovarajući procesima s realnim fluidom (plinom i vodenom parom) u termoelektranama. Ono što moramo pritom ustanoviti jest koliki se mehanički rad promjene volumena dobiva, ili ulaze, radi li se o energetskim procesima u zatvorenim sustavima, odnosno koliki se tehnički rad izmjenjuje, odvijaju li se takvi procesi u otvorenim sustavima, koliko se toplinske energije mora pritom dovoditi ili odvoditi, te koliki su tlakovi, temperature i specifični volumeni djelatne tvari (fluida), koja sudjeluje u procesima, i koji su odnosi među njima, kako bismo mogli provoditi i upravljati energetskim pretvorbama i procesima.

Svi se energetski procesi odvijaju dakako posredstvom realnih fluida, no, pokazuje se, uporabljive rezultate dobivamo i ako pojednostavimo promatranja idealizirajući zbivanja. Prihvaćamo tako da vrijedi princip očuvanja mase koji, radi li se o zatvorenim sustavima, glasi: $\frac{dm}{dt} = 0$. Radi li se o procesima u otvorenim sustavima pretpostavljamo zasad da se oni odvijaju kao jednodimenzionalni i stacionarni, karakterizirani dakle s konstantnim masenim protokom, $\frac{dm}{dt} = \dot{m} = \text{konst. } [\text{kg/s}]$, što je analitički oblik principa očuvanja mase za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava.

(U našim razmatranjima, naglasili smo, m će uvijek biti 1kg, a \dot{m} 1kg/s.)

Nadalje, ponašanje realnog fluida u plinovitom stanju predstavljamo ponašanjem idealnog plina, tj. zakonom $pv = RT$ koji nazivamo jednadžbom stanja. Jednadžba opisuje i predviđa ponašanje idealnog plina kada se istodobno mijenjaju i tlak i volumen i temperatura. Radi se o funkciji s dvije neovisne varijable, pa je prostorni koordinatni sustav potrebit za grafičko predstavljanje takve funkcije. Drugim riječima, jednadžba je stanja idealnog plina samo prividno jednostavna pa je stoga, kad god je to moguće, zamjenjujemo funkcijom s jednom neovisnom varijablom. Naime, to je moguće u svim slučajevima kada je jedna od neovisnih varijabli konstantna, ili je ovisna o drugoj, pa je za grafički prikaz procesa dosta ravnina. (Na taj način trodimenzionalni problem svodimo na dvodimenzionalni.) U većini se energetskih procesa proizvodnje električne energije, tijekom pretvorbi jednih oblika energije u druge (eksergiju), to normalno događa. Promjene se stanja idealnog plina dadu tada opisati jednadžbom

$$pv^n = \text{konst. } [\text{J/kg}]$$

[5.1]

i pokazati u ravninskom dijagramu. Pogodan je p,v-dijagram u kome su ploštine površina „ispod“ ili „iza“ krivulje procesa proporcionalne (jednake) izmijenjenom mehaničkom radu (mehaničkom radu promjene volumena /„ispod“ krivulje/ odnosno tehničkom radu /„iza“ krivulje/), T,s-dijagram u kojem ploštine površina „ispod“ krivulja procesa odgovaraju izmijenjenoj toplinskoj energiji, te h,s-dijagram u kojemu duljine dužina predstavljaju izmijenjeni tehnički rad i toplinsku energiju.

n u jednadžbi [5.1] nije fizikalna veličina. Poprima sve vrijednosti u rasponu od veće ili jednake nuli do manje ili jednakе beskonačnom u ovisnosti o tome kako se „gospodari“ s toplinskom energijom u energetskom procesu:

$$0 \leq n \leq \infty \quad [5.2]$$

Ovisno o vrijednosti koje poprini eksponent **n** u [5.1] razlikujemo nekoliko (pet) karakterističnih procesa:

- kad **n** poprini vrijednost nula ($n = 0 \Rightarrow p = \text{konst.}$), radi se o **izobarnom procesu** odnosno o promjeni stanja idealnog plina uz konstantni tlak,
- kad **n** poprini vrijednost jedan ($n = 1 \Rightarrow pV = \text{konst.}$) radi se o **izotermnom procesu** ($pV = RT = \text{konst.} \Rightarrow T = \text{konst.}$) odnosno o promjeni stanja idealnog plina uz konstantnu temperaturu,
- kad **n** poprini vrijednost κ ($n = \kappa = \frac{c_p}{c_v} \Rightarrow q_{12} = 0$), radi se o **adijabatskom procesu** odnosno o promjeni stanja idealnog plina bez dovođenja i odvođenja toplinske energije,
- kad **n** poprini vrijednost beskonačno ($n = \infty \Rightarrow V = \text{konst.}$) radi se o **izohornom procesu** odnosno o promjeni stanja idealnog plina uz konstantni volumen, i, konačno
- kad **n** poprini vrijednost n (bilo koju vrijednost između nule i beskonačnog a da to nije ni nula ni beskonačna vrijednost, odnosno ni jedinica ni kapa: $n = n \neq 0, 1, \kappa, \infty \Rightarrow pV^n = \text{konst.}$) radi se o **politropskom procesu** odnosno o promjeni stanja idealnog plina po politropama.

Te ćemo procese analizirati služeći se principima očuvanja mase i energije za zatvoreni i otvoreni sustav:

$$m = \text{konst.} = 1\text{kg} \text{ i } \dot{m} = \text{konst.} = 1\text{kg/s},$$

$$q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12} = u_2 - u_1 + \int_{v_1}^{v_2} pdv \text{ odnosno } dq = du + pdv \text{ i}$$

$$q_{12} + u_1 + p_1 v_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + gz_1 = w_{t12} + u_2 + p_2 v_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + gz_2 \text{ odnosno}$$

$$dq = dw_t + d(u + pv) + de_k + de_p = du + pdv = dh - vdp,$$

jednadžbom stanja idealnog plina

$$pv = RT [\text{J/kg}] \text{ odnosno } pV_\mu = R_\mu T [\text{J/kmol}],$$

relacijama kojima su određeni mehanički rad promjene volumena

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv \text{ odnosno } dw = pdv$$

i tehnički rad

$$w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} vdp - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \text{ odnosno } dw_t = -vdp - de_k - de_p,$$

relacijom koja povezuje integral $\int_{v_1}^{v_2} pdv$ i integral $\int_{p_1}^{p_2} vdp$:

$$\int_{v_1}^{v_2} pdv - (p_2 v_2 - p_1 v_1) = - \int_{p_1}^{p_2} vdp,$$

vezama između specifične topline idealnog plina i toplinske energije:

$$dq = cdT \text{ odnosno } c = \frac{dq}{dT} = \frac{du}{dT} + \frac{pdv}{dT} = \frac{dh}{dT} - \frac{vdp}{dT},$$

vezama između unutrašnje kaloričke energije i entalpije s temperaturom:

$$du = c_v dT \text{ i } dh = c_p dT,$$

kao vezama i između specifičnih toplina uz konstantni tlak i volumen:

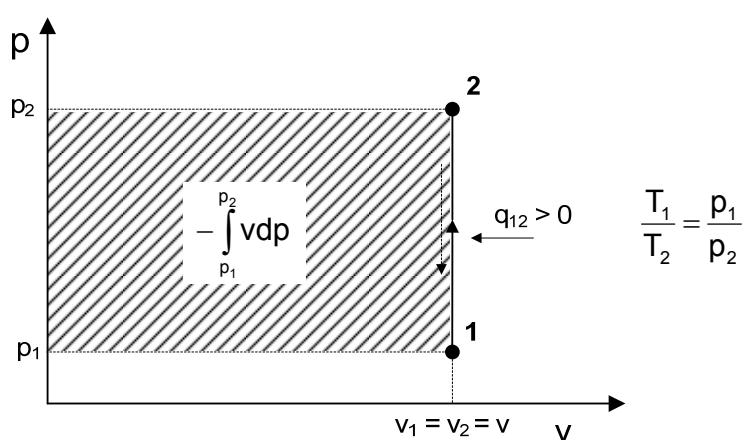
$$c_p = c_v + R, \kappa = \frac{c_p}{c_v}, c_v = \frac{R}{\kappa - 1} \text{ i } c_p = \frac{\kappa R}{\kappa - 1},$$

kako bismo razvili specijalne izraze što vrijede za navedene procese.

5.1 Izohorni proces

Ako se idealnom plinu koji se nalazi u posudi čvrstih stijenki dovodi ili odvodi toplinska energija, kaže se da je to promjena stanja uz konstantni volumen ($v = \text{konst.}$), odnosno izohorni proces, **Slika 5-1.** (Krivulja procesa je izohora.) Dovođenjem se toplinske energije plinu uz konstantni volumen povisuje tlak, a odvođenjem smanjuje.

(Srakji se energetski proces s (idealnim) plinom može odvijati kako u jednom smjeru ($1 \rightarrow 2$) tako i u drugom, suprotnom smjeru ($2 \rightarrow 1$), dovođenjem odnosno odvođenjem toplinske energije i/ili mehaničkog rada (mehaničkog rada promjene volumena, rada trenja ili tehničkog rada).)



Slika 5-1 Izohorni proces

Izohorni se proces odvija poprili eksponent n u jednadžbi $pv^n = \text{konst.}$ beskonačnu vrijednost. Vrijedi naime:

$$pv^n = p_1 v_1^n = p_2 v_2^n = \text{konst. i dalje } \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} = 1 \text{ (kada } n \rightarrow \infty \text{)} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} \rightarrow 1 \Rightarrow v_1 = v_2 = v$$

Budući da je sustav zatvoren, mehanički je rad promjene volumena jednak nuli:

$$dw = pdv = 0 \quad (dv = 0) \quad [5.3]$$

Radi li se međutim o izohornom strujanju idealnog plina (ili idealne kapljevine), mehanički je rad (tehnički rad) različit od nule:

$$w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} v dp - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) = -v(p_2 - p_1) - \delta e_k - \delta e_p \quad [5.4]$$

Izmijenjena se toplinska energija određuje iz relacije

$$dq = du + pdv \text{ ili } dq = dh - vdp$$

Dobivamo:

$$dq = c_v dT, \text{ dakle } q_{12} = c_v(T_2 - T_1) \quad [5.5]$$

ili

$$dq = c_p dT - vdp.$$

Diferenciramo li jednadžbu stanja idealnog plina, $pv = RT$, dobit ćemo:

$$pdv + vdp = RdT \quad [5.6]$$

Jer je $v = \text{konst.}$, to je $pdv = 0$, pa je vdp jednako RdT ($vdp = RdT$). Vrijedi dakle,

$$dq = c_p dT - vdp = c_p dT - RdT = (c_p - R)dT = c_v dT.$$

Dobili smo relaciju [5.5] potvrdivši da se izmijenjena toplinska energija može računati iz relacije $dq = du + pdv$ ili $dq = dh - vdp$.

Ako je $T_2 > T_1$, $q_{12} > 0$, toplinska se energija dovodi u sustav, raste temperatura i tlak budući da se volumen ne mijenja ($pv = RT$).

U obrnutom se slučaju, odvođenjem toplinske energije, smanjuju temperatura i tlak. Naime, budući da za bilo koje stanje vrijedi jednadžba stanja idealnog plina ($pv = RT$), to je veza između temperature, tlaka i volumena:

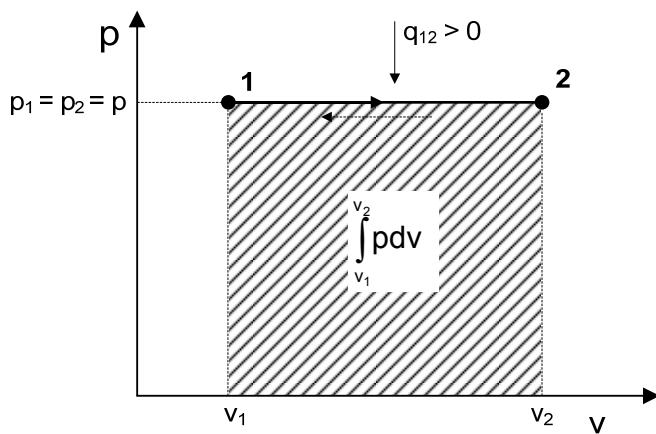
$$pv = RT = p_1 v_1 = RT_1 = p_2 v_2 = RT_2 = p_1 v = RT_1 = p_2 v = RT_2 \quad (v_1 = v_2 = v)$$

pa je omjer temperatura jednak omjeru tlakova (višoj temperaturi izohornog procesa odgovara viši tlak, nižoj niži tlak):

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{p_1}{p_2} \quad [5.7]$$

5.2 Izobarni proces

Poprimi li eksponent n u jednadžbi $pv^n = \text{konst.}$ vrijednost nula ($n = 0$), odvija se proces uz konstantni tlak, izobarni proces, **Slika 5-2.** (Krivulja procesa je izobara.)



Slika 5-2 Izobarni proces

Dovodi li se zatvorenom sustavu (idealnom plinu) toplinska energija uz održavanje konstantnog tlaka, povećat će mu se volumen ($pv = RT$, $T \uparrow \Rightarrow v \uparrow / p = \text{konst.}$).

Količina je izmijenjene toplinske energije (toplinska se energija može dovoditi ili odvoditi):

$$dq = c_p dT, q_{12} = c_p(T_2 - T_1) \quad [5.8]$$

a mehanički rad promjene volumena (ekspanzije ili kompresije):

$$dw = pdv \text{ odnosno } w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1) \quad [5.9]$$

Odvija li se izobarni proces u otvorenom sustavu, tehnički je rad jednak:

$$dw_t = -vd\bar{p} - de_k - de_p = -de_k - de_p \quad (\bar{p} = 0) \text{ odnosno}$$

$$w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} vdp - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) = - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \quad [5.10]$$

Tehnički se rad dobiva pretvorjom iz kinetičke i/ili potencijalne energije plina, odnosno dovedeni se tehnički rad sustavu transformira u kinetičku i/ili potencijalnu energiju plina.

Vezu između temperature, tlaka i volumena za vrijeme odvijanja izobarnog procesa određujemo iz jednadžbe stanja idealnog plina

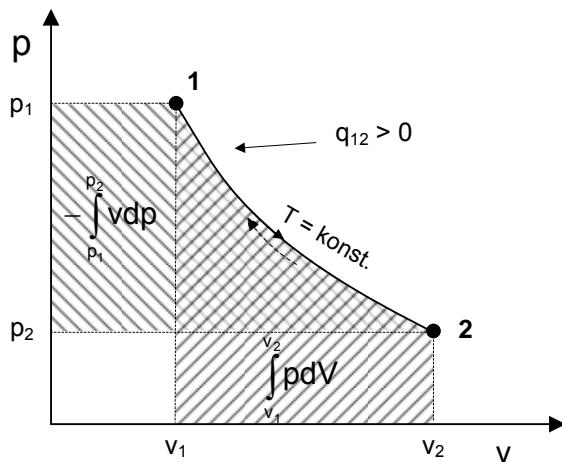
$T_1 = \frac{Pv_1}{R}$ i $T_2 = \frac{Pv_2}{R}$ pa će vrijediti (višoj temperaturu odgovara veći volumen, nižoj manji):

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad [5.11]$$

Dovodi li se toplinska energija ($q_{12} > 0$), povećava se temperatura [5.8] i volumen plina [5.11] uz istodobno dobivanje mehaničkog rada promjene volumena (ekspanzija plina). Odvija li se međutim proces u suprotnom smjeru (od 2 prema 1), potrebno je sustavu dovoditi mehanički rad (kompresija plina) uz istodobno odvođenje toplinske energije.

5.3 Izotermni proces

Poprimi li eksponent n u jednadžbi $PV^n = \text{konst.}$ vrijednost jedan ($n = 1$), odvija se proces uz konstantnu temperaturu, izotermni proces, **Slika 5-3.** (Krivulja procesa je izoterma.)



Slika 5-3 Izotermni proces

Jednadžba se izoterme dobiva iz jednadžbe stanja idealnog plina i jednaka je:

$$PV = RT = \text{konst.} \quad (\text{jer je } T = \text{konst.}) \quad [5.12]$$

Vrijedi pritom odnos (većem tlaku odgovara manji volumen, manjem veći):

$$PV = P_1V_1 = P_2V_2 \text{ odnosno } \frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad [5.13]$$

Izoterma je istostranična hiperbola (u p, V koordinatnom sustavu). Ploština je površine „ispod“ krivulje procesa jednak (zanemarimo li rad trenja) izmijenjenom mehaničkom radu promjene volumena, a ploština „iza“ krivulje procesa (zanemarimo li rad trenja te promjene kinetičke i potencijalne energije) izmijenjenom tehničkom radu. Uzmemo li u obzir da prema [5.12] odnosno [5.13] vrijedi

$$p = \frac{p_1 v_1}{v} = \frac{p_2 v_2}{v} = \frac{RT}{v} \quad [5.14]$$

dobivamo da je izmijenjeni mehanički rad promjene volumena (doveden ili odveden) jednak:

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = p_1 v_1 \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} \quad [5.15]$$

$$(p_1 v_1 = p_2 v_2 = RT)$$

a izmijenjeni tehnički rad:

$$w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} vdp - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \quad [5.16]$$

Naime integral $\int_{p_1}^{p_2} vdp$ mora biti jednak integralu $\int_{v_1}^{v_2} pdv$ budući da je izoterma istostrana hiperbola. I doista, diferenciramo li jednadžbu stanja idealnog plina, dobit ćemo: $pdv + vdp = RdT = 0$ ($dT = 0$, jer je $T = \text{konst.}$). Vrijedi dakle $pdv = -vdp$ odnosno $\int pdv = -\int vdp$.

Toplinsku energiju koja se izmjenjuje za vrijeme izotermnog procesa odredit ćemo iz 1.glavnog stavka termodinamike za zatvorene sustave:

$$dq = du + pdv = pdv = dw \quad (du = c_v dT = 0, T = \text{konst.}) \text{ odnosno}$$

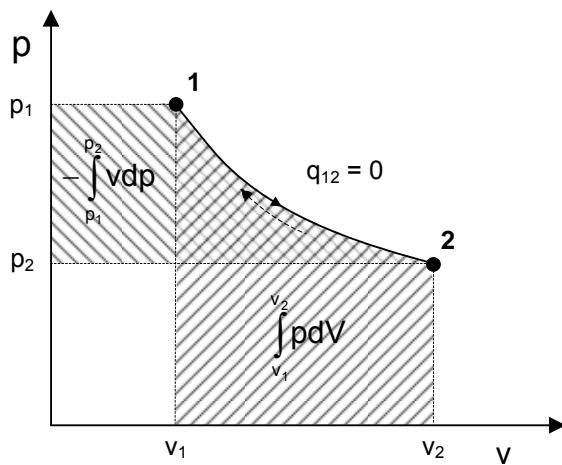
$$\begin{aligned} q_{12} = w_{12} &= \int_{v_1}^{v_2} pdv = p_1 v_1 \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} \\ &= p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} \end{aligned} \quad [5.17]$$

Uz izotermičku je ekspanziju plina obavljeni mehanički rad promjene volumena (rad predan u okolicu, $w_{12} > 0$) jednak dovedenoj toplinskoj energiji ($q_{12} > 0$), a za izotermičku kompresiju mora se dovoditi mehanički rad ($w_{12} < 0$) i odvoditi ista količina toplinske energije ($q_{12} < 0$). Ne smije se međutim zaključiti da se pritom sva dovedena toplinska energija pretvara u mehanički rad: mehanički se rad dobiva pretvorbom iz ekservije unutrašnje kaloričke energije plina, a dovedena toplinska energija, koja se pretvara u unutrašnju kaloričku energiju plina, omogućuje da se za vrijeme ekspanzije (energetskog procesa proizvodnje mehaničkog rada) ne smanjuje temperatura sustava (idealnog plina).

5.4 Adijabatski proces

Poprimi li eksponent n u jednadžbi $p v^n = \text{konst}$. vrijednost κ ($n = \kappa = \frac{c_p}{c_v}$), odvija se proces bez dovođenja i odvođenja toplinske energije, dakle proces uz potpunu toplinsku izolaciju ($q_{12} = 0$). Takav proces nazivamo adijabatskim, a krivulju procesa adijabatom, Slika 5-4.

(Kad je to povratljiva adijabata (o tome ćemo govoriti kasnije), proces se naziva izentropskim.)



Slika 5-4 Adijabatski proces

Pokažimo prvo da je energetski proces predstavljen relacijom

$$p v^\kappa = \text{konst.} \quad [5.18]$$

(hiperbolu u p,v koordinatnom sustavu) doista proces koji se odvija bez dovođenja i odvođenja toplinske energije (adijabatski proces).

Prema prvom je glavnom stavku termodinamike toplinska energija što se izmjenjuje između zatvorenih i otvorenih sustava i okoline određena ovim diferencijalnim jednadžbama:

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

Radi li se o adijabatskom procesu jednadžbe prelaze u oblik (jer se toplinska energija ne izmjenjuje / $q_{12} = 0$ /):

$$0 = du + pdv = dh - vdp \quad [5.19]$$

Relacija je dakle [5.19] diferencijalna jednadžba (diferencijalne jednadžbe) adijabatskog procesa. Rješenje te jednadžbe (tih jednadžbi) mora biti relacija [5.18].

Pišemo:

$$du + pdv = 0, \text{ odnosno } c_v dT = -pdv \quad (\text{I}), \text{ i } dh - vdp = 0, \text{ odnosno } c_p dT = vdp \quad (\text{II}).$$

Dijeljenjem (II) s (I) dobivamo:

$$\frac{c_p}{c_v} = \kappa = -\frac{vdp}{pdv} \quad (\text{III}).$$

Diferencijalnu jednadžbu (III) možemo odmah riješiti separacijom varijabli i integriranjem:

$$\kappa \frac{dv}{v} = - \frac{dp}{p}$$

$\int \kappa \frac{dv}{v} = - \int \frac{dp}{p} + C$. Radi se o elementarnim integralima ($\int \frac{dx}{x} = \ln x + C$) čija su rješenja:

$$\kappa \ln v = - \ln p + \ln \text{konst. } (C = \ln \text{konst.})$$

$$\ln v^{\kappa} + \ln p = \ln \text{konst, odnosno, } \ln(pv^{\kappa}) = \ln \text{konst.}$$

Rješenje je te logaritamske jednadžbe jednadžba adijabatskog procesa [5.18]:

$$pv^{\kappa} = \text{konst.}$$

Dakle je doista energetski proces predstavljen relacijom $pv^{\kappa} = \text{konst.}$ proces koji se odvija uz potpunu toplinsku izolaciju (bez dovodenja i odvođenja toplinske energije).

Ploština je površine „ispod“ krivulje adijabatskog procesa jednaka (zanemarimo li rad trenja) izmijenjenom mehaničkom radu promjene volumena, a ploština površine „iza“ krivulje procesa izmijenjenom tehničkom radu (zanemarimo li rad trenja te promjene kinetičke i potencijalne energije). Te radove možemo odmah dobiti rješenjem integrala:

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv \text{ i } w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} vdp - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1)$$

jer poznajemo funkcionalne odnose između volumena i tlaka iz jednadžbe [5.18].

Npr.,

$$p = \frac{p_1 v_1^{\kappa}}{v^{\kappa}} \quad (p_1 v_1^{\kappa} = \text{konst.}), \text{ pa je mehanički rad promjene volumena jednak:}$$

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = p_1 v_1^{\kappa} \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^{\kappa}} = \frac{p_1 v_1^{\kappa}}{\kappa - 1} \left(\frac{1}{v_1^{\kappa-1}} - \frac{1}{v_2^{\kappa-1}} \right) \quad [5.20]$$

Postupit ćemo međutim jednostavnije budući da se radi o „adijabatskom“ mehaničkim radu (mehaničkom radu koji se izmjenjuje između adijabatskog sustava i okolice). Takav je mehanički rad veličina stanja pa je njegova vrijednost određena samo početnim i konačnim stanjem sustava a ne i procesom između tih stanja. To slijedi izravno iz 1. glavnog stavka termodinamike primijenjenog na procese s adijabatskim sustavima:

$$dq = du + pdv = dh - vdp = 0 \quad [5.21]$$

pdv i $-vdp$ sada su totalni diferencijali (mehaničkog rada promjene volumen i tehničkog rada) jer je $pdv = -du$, a $vdp = dh$. Ukupne radove dobivamo integrirajući relacije [5.21] preko cijelog adijabatskog procesa:

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = - \int_{u_1}^{u_2} du = - \int_{T_1}^{T_2} c_v dT = c_v (T_1 - T_2) = \frac{R}{\kappa - 1} (T_1 - T_2) \quad [5.22]$$

i

$$- \int_{p_1}^{p_2} vdp = - \int_{h_1}^{h_2} dh = - \int_{T_1}^{T_2} cpdT = c_p (T_1 - T_2) = \frac{\kappa \cdot R}{\kappa - 1} (T_1 - T_2) \quad [5.23]$$

Dakle je izmijenjeni tehnički rad jednak:

$$w_{t12} = c_p (T_1 - T_2) - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \quad [5.24]$$

Odredimo sada odnose između tlakova, volumena i temperatura adijabatskih procesa. Krenimo od jednadžbe stanja idealnih plinova. Postupimo ovako. Napišimo prvo jednadžbu stanja za početno (1) i konačno stanje (2) adijabatskog procesa i zatim ih množimo kako je pokazano. Dobit ćemo relacije (A) i (B):

$$p_1 v_1 = RT_1 / \bullet v_1^{\kappa-1} \Rightarrow p_1 v_1^\kappa = RT_1 v_1^{\kappa-1} \quad (A)$$

$$p_2 v_2 = RT_2 / \bullet v_2^{\kappa-1} \Rightarrow p_2 v_2^\kappa = RT_2 v_2^{\kappa-1} \quad (B)$$

Budući da vrijedi: $p_1 v_1^\kappa = p_2 v_2^\kappa = pv^\kappa$, to su i desne strane relacija (A) i (B) jednake:

$RT_1 v_1^{\kappa-1} = RT_2 v_2^{\kappa-1}$, pa dakle postoji ovakav odnos između temperatura i specifičnih volumena za vrijeme adijabatskog procesa:

$$T_1 v_1^{\kappa-1} = T_2 v_2^{\kappa-1} \text{ ili } \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{\kappa-1} \quad [5.25]$$

Za vrijeme se adijabatske ekspanzije ($v_2 > v_1$, dobivanja mehaničkog rada), smanjuje temperatura, $T_2 < T_1$. Obratno vrijedi za proces kompresije, ulaganja (dovođenja) mehaničkog rada.

Jer vrijedi i odnos:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad [5.26]$$

to je relacija koja povezuje sve tri veličine stanja (tlak, temperaturu i volumen) za vrijeme odvijanja adijabatskog procesa jednaka.

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{\kappa-1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad [5.27]$$

Višoj temperaturi za vrijeme odvijanja adijabatskog procesa odgovara veći tlak i manji volumen., nižoj manji tlak i veći volumen.

5.5 Politropski proces

U realnim se strojevima međutim ne postižu ni izotermni ni adijabatski procesi već politropski procesi koji se mogu prikazati općim hiperbolama, tzv. politropama, kojima je jednadžba:

$$pv^n = \text{konst.} \quad [5.28]$$

(S iznimkom agregatnih pretvorbi, izotermni bi se procesi odvijali beskonačno sporo, a adijabatski se procesi u realnosti ne mogu odvijati budući da ne postoji savršena (potpuna) toplinska izolacija: u realnim se situacijama stoga uvijek izmjenjuju određene količine toplinske energije.)

Eksponent n poprima pritom vrijednosti $0 < n < \infty$ a da to nisu 1 ni ∞ . (Ako je $n = 1$ radi se o izoternom procesu, a kada je $n = \infty$ o adijabatskom procesu.)

Za razliku od adijabatskog procesa, pri politropskom se procesu izmjenjuje toplinska energija. Njezin čemo iznos odrediti rješenjem diferencijalne jednadžbe 1. glavnog stavka termodinamike:

$$dq = du + pdv \text{ ili } dq = dh - vdp.$$

Pišemo:

$$dq = du + pdv = c_v dT + pdv \quad [5.29]$$

Pritom je, relacija [5.28],

$$p = \frac{\text{konst.}}{v^n} \quad [5.30]$$

pa bismo uvrštenjem [5.30] u [5.29] dobili diferencijalnu jednadžbu koju možemo odmah riješiti integriranjem. Međutim, ne ćemo tako postupiti. Instruktivnije rješenje jednadžbe [5.29] dobit ćemo ako član pdv u toj jednadžbi izrazimo relacijom koja ima (odmah vidljivo) svojstvo totalnog diferencijala. Diferencirat ćemo stoga jednadžbu politropskog procesa, $pv^n = \text{konst.}$, i jednadžbu stanja idealnog plina, $pv = RT$, budući da ona vrijedi za bilo koji proces s idealnim plinom pa mora dakle vrijediti i za politropske procese. Dobit ćemo:

$$pv^n = \text{konst.} / \text{dif.} \Rightarrow v^n dp + npv^{n-1} dv = 0.$$

Podijelimo li jednadžbu $v^n dp + npv^{n-1} dv = 0$ s v^{n-1} dobit ćemo diferencijalnu jednadžbu politropskog procesa:

$$vdp + npdv = 0 \quad [5.31]$$

Diferencirajmo sada jednadžbu stanja idealnog plina. Dobivamo:

$$pv = RT / \text{dif.} \Rightarrow vdp + pdv = RdT \quad [5.32]$$

Odbijmo [5.32] od [5.31]:

$$vdp + npdv = 0$$

$$-vdp - pdv = -RdT$$

da bismo dobili

$$npdv - pdv = -RdT, \text{ pa je pdv jednako:}$$

$$pdv = -\frac{RdT}{n-1} \quad [5.33]$$

Uvrstimo li [5.33] u [5.29] dobivamo diferencijalnu jednadžbu koja određuje količine toplinske energije što se izmjenjuju za vrijeme politropskih procesa. Ta se jednadžba može odmah integrirati izrazimo li je u obliku ($R = c_p - c_v$, $\kappa = c_p/c_v$):

$$\begin{aligned} dq &= du + pdv = c_v dT + pdv = c_v dT - \frac{RdT}{n-1} \\ &= \left(c_v - \frac{c_p - c_v}{n-1} \right) dT = c_v \left(\frac{n-1}{n-1} - \frac{\kappa-1}{n-1} \right) dT = c_v \frac{n-\kappa}{n-1} dT \end{aligned} \quad [5.34]$$

Dakle je $dq = c_v \frac{n-\kappa}{n-1} dT$ toplinska energija koja se izmjenjuje s okolicom, dovodi ili odvodi, za vrijeme politropskih procesa. Uočavamo sličnost s izrazima koji određuju količine toplinske energije što se izmjenjuju za vrijeme odvijanja izohornih i izobarnih procesa:

$dq = c_v dT$ i $dq = c_p dT$. Nameće se zaključak da relacija $c_v \frac{n-\kappa}{n-1}$ mora biti „politropska specifična toplina“. Označit ćemo je s indeksom n :

$$c_n = c_v \frac{n-\kappa}{n-1} \quad [5.35]$$

n u [5.35] upućuje da postoji beskonačno mnogo specifičnih toplina budući da n poprima sve vrijednosti između nule (uključivo) i beskonačnog (uključivo): $0 \leq n \leq \infty$. I, doista, poprimi li n vrijednosti $0 \leq n \leq \infty$ dobivamo:

$n = 0 \Rightarrow c_n = c_p \cdot \kappa = c_p$ (izobarni proces, specifična toplina uz konstantni tlak),

$n = 1 \Rightarrow c_n = \infty = c_{\text{izotermna}}$ (izotermni proces, specifična toplina uz konstantnu temperaturu beskonačno je velika: toplinska se energija dovodi (odvodi) a da se pritom temperatura sustava ne mijenja),

$n = \kappa \Rightarrow c_n = 0 = c_{\text{adijabatska}}$ (adijabatski proces: adijabatska je specifična toplina jednaka nuli budući da se toplinska energija ne dovodi niti odvodi),

$n = \infty \Rightarrow c_n = c_v$ (izohorni proces, specifična toplina uz konstantni volumen), i, konačno

$$0 < n < \infty \quad (n \neq 0, 1, \kappa, \infty) \Rightarrow c_n = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} \quad (\text{politropska specifična toplina}).$$

Integrirajući diferencijalnu jednadžbu [5.34] dobivamo toplinsku energiju koja se izmjenjuje za vrijeme politropskog procesa:

$$q_{12} = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} (T_2 - T_1) \quad [5.36]$$

Poprimi li n vrijednosti između 1 i κ , $1 < n < \kappa$, politropska će specifična toplina biti negativna, $c_n < 0$, premda će se toplinska energija dovoditi ($q_{12} > 0$) u proces. Naime, dovodi li se toplinska energija i pritom dobiva mehanički rad (plin eksplandira), temperatura će T_2 biti manja od temperature T_1 , $T_2 < T_1$, pa će zbog toga biti $q_{12} > 0$.

I sada će, dakako, mehanički rad promjene volumena biti jednak ploštinu površine „ispod“ krivulje procesa, a tehnički proporcionalan onoj „iza“, te će ti radovi biti određeni izrazima analognim onima pomoću kojih se određuju radovi adijabatskog procesa, relacije [5.20], [5.22] i [5.24], s time da se indeks κ zamjenjuje u svim relacijama koje određuju mehaničke radove, indeksom n . Npr., relacija [5.20] postaje jednaka

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = p_1 v_1^n \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^n} = \frac{p_1 v_1^n}{n-1} \left(\frac{1}{v_1^{n-1}} - \frac{1}{v_2^{n-1}} \right) = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2)$$

a za tehnički rad politropskog procesa dobivamo, jer je

$$w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} vdp = - \int_{h_1}^{h_2} dh = - \int_{T_1}^{T_2} cpdT = c_p (T_1 - T_2) = \frac{\kappa \cdot R}{\kappa - 1} (T_1 - T_2), \text{ odnosno}$$

$$\begin{aligned} w_{t12} &= - \int_{p_1}^{p_2} vdp = \int_{v_1}^{v_2} pdv + p_1 v_1 - p_2 v_2 = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) + R (T_1 - T_2) = \\ &= \frac{nR}{n-1} (T_1 - T_2), \end{aligned}$$

ili

$$w_{t12} = \frac{nR}{n-1} (T_1 - T_2) - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \text{ ne možemo li zanemariti promjenu kinetičke i potencijalne energije.}$$

Isto vrijedi i za relacije koje povezuje tlak, temperaturu i volumen za vrijeme odvijanja adijabatskog procesa; da bismo dobili relacije koje vrijede za politropske procese zamjenjujemo κ s n :

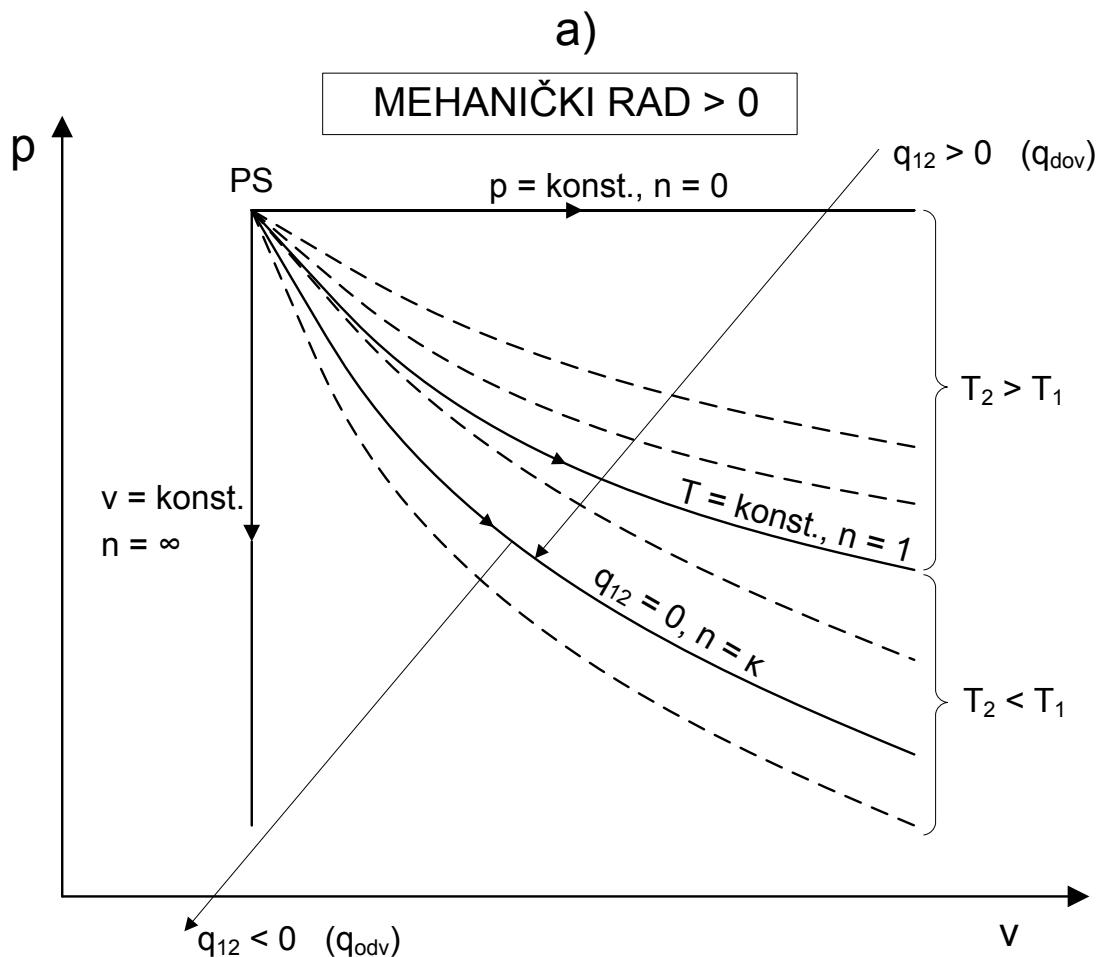
$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{n-1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad [5.37]$$

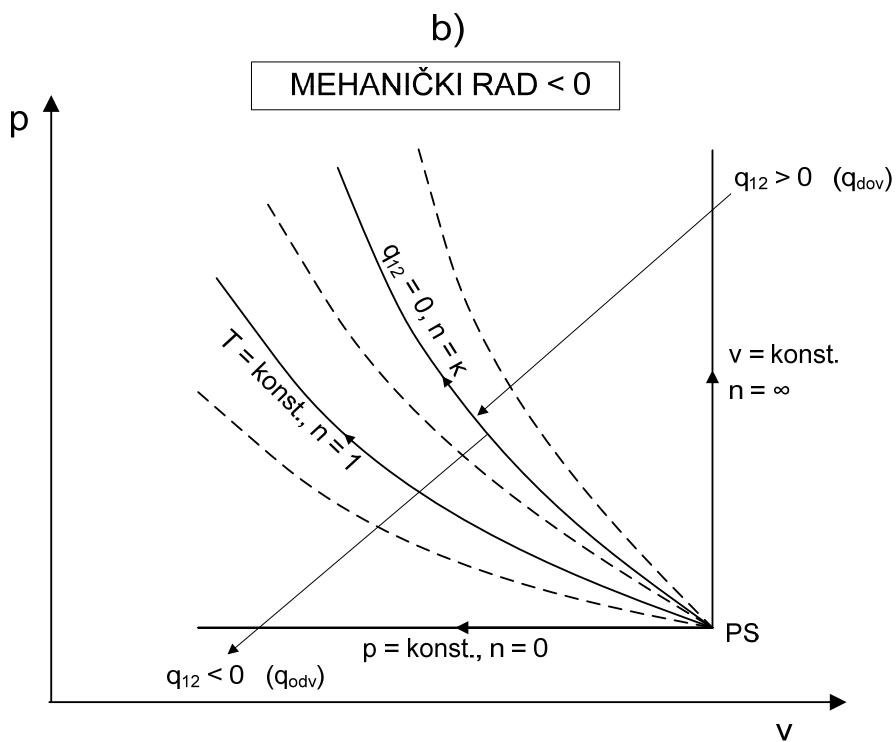
Očito se dakle za vrijeme promatrane politropske ekspanzije ($1 < n < \infty$) temperatura smanjuje, $T_2 < T_1$, jer je $n > 1$, a $v_2 > v_1$.

Što znači negativna politropska specifična toplina?

Za vrijeme se ekspanzije plina (dobivanja mehaničkog rada) toplinska energija dovodi u proces ($q_{12} > 0$) u svim slučajevima kad je $1 < n < \infty$ jer je razlomak u [5.36] tada negativan (negativna je politropska specifična toplina), a $T_2 < T_1$. Negativna specifična toplina znači da je ekservija toplinske energije, koja se dovodi u sustav (plinu), manja od dobivenog mehaničkog rada, a jer je energija (ekservija) nestvoriva, manjak ekservije nadoknađuje se ekservijom unutrašnje kaloričke energije plina kome se zbog toga smanjuje temperatura.

Očito, s energetskog su stajališta zbog toga prihvatljivi samo politropski procesi s vrijednosti eksponenta n između 1 i ∞ : $1 < n < \infty$, Slika 5-5 a). Procesi izvan tog područja energetski su neprihvatljivi; npr. politropski proces ekspanzije (dobivanje mehaničkog rada) kojeg, da bi se mogao odvijati, treba hladiti (odvoditi toplinsku energiju).





Slika 5-5 Politropski procesi pri ekspanziji (a) i pri kompresiji (b)

U slučaju ekspanzije (dobivanje mehaničkog rada), **Slika 5-5 a)**, ukoliko su vrijednosti eksponenta **n**:

$0 \leq n < \kappa$ toplinska se energija mora dovoditi u proces ($q_{12} = q_{dov} > 0$),

jedino kad je $n = \kappa$ toplinska se energija niti dovodi niti odvodi ($q_{12} = 0$, adijabatski proces), a ako je

$\kappa < n \leq \infty$ toplinska se energija mora odvoditi u proces ($q_{12} = q_{odv} < 0$).

Očito, valja izbjegavati područja $T_2 > T_1$ budući da se toplinska energija „troši“ i na zagrijavanje plina (povećanje unutrašnje kaloričke energije) a ne samo na dobivanje mehaničkog rada, kao i područja u kojima se toplinska energija mora odvoditi kako bi se dobivao mehanički rad. Dakle su uistinu najbolji politropski procesi dobivanja mehaničkog rada oni s vrijednostima $1 < n < \kappa$.

Uočimo i ove odnose (kasnije ćemo se pozvati na njih): ukoliko su krivulje politropskih procesa položitije od krivulje adijabatskog procesa u p,v-dijagramu, toplinska se energija mora dovoditi plinu za vrijeme procesa ekspanzije (dobivanje mehaničkog rada). Ukoliko su pak krivulje politropskih procesa strmije od krivulje adijabatskog procesa u p,v-dijagramu, toplinska se energija mora odvoditi plinu za vrijeme procesa ekspanzije (dobivanje mehaničkog rada).

Suprotno vrijedi u slučaju kompresije (obavljanje mehaničkog rada), **Slika 5-5 b)**. Ako su vrijednosti eksponenta **n**:

$\kappa < n \leq \infty$ toplinska se energija mora dovoditi u proces ($q_{12} = q_{dov} > 0$).

$n = \kappa$ toplinska se energija niti dovodi niti odvodi ($q_{12} = 0$, adijabatski proces),

$0 \leq n < \kappa$ toplinska se energija mora odvoditi iz procesa ($q_{12} = q_{\text{odv}} < 0$).

Sada vrijedi: ukoliko su krivulje politropskih procesa strmije od krivulje adijabatskog procesa u p,v-diagramu, toplinska se energija mora dovoditi plinu za vrijeme procesa kompresije (obavljanja mehaničkog rada), a ako su položitije od adijabate, toplinska se energija mora odvoditi.

5.6 Kružni procesi

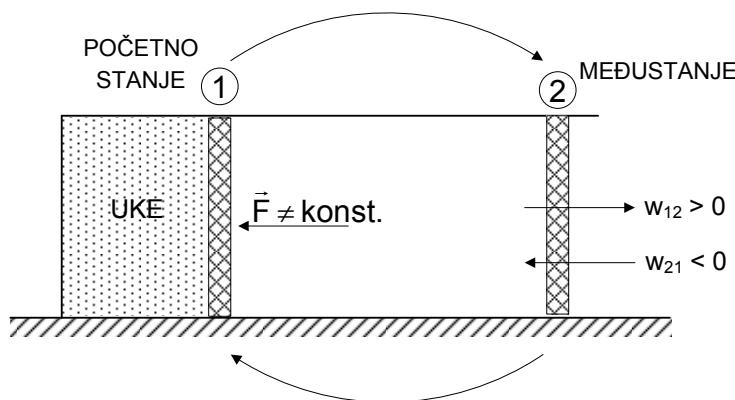
Govorit ćemo dalje o procesima s procesima. Najvažniji su od takvih procesa **kružni procesi**. Definirano je već dosad da se svaki proces /sklop procesa/ koji sustav /bilo kakav sustav/ dovodi ponovno u početno stanje naziva **kružnim procesom**. Pritom, nakon što je protekao kružni proces, sve veličine stanja, kao tlak, temperatura, volumen, unutrašnja kalorička energija, entalpija, itd, postižu početne vrijednosti i to vrijedi bez obzira je li je kružni proces sastavljen od povratljivih ili nepovratljivih procesa, odnosno radi li se o zatvorenom, otvorenem itd. sustavu.

5.6.1 Kružni procesi zatvorenih sustava

Kako je niknula ideja o uspostavljanju kružnih procesa?

Promatrajmo zatvoreni sustav i upitajmo se je li je moguće iz takvog sustava trajno dobivati mehanički rad a da ga ne „pretvorimo“ u otvoreni sustav?

Očito, da, uz određene uvjete, vratimo li zatvoren sustav, nakon što je obavio mehanički rad promjene volumena, $w_{12} [\text{J/kg}]$, (nekako) u početno stanje (1), Slika 5-6. Naime, da bi se iz zatvorenog sustava rad mogao neprestano dobivati, a ne samo jednokratno, nužno je zatvoren sustav podvrći procesu (procesima) koji će ga vratiti (vraćati) ponovno i ponovno u početno stanje kako bismo neprekidno mogli dobivati mehanički rad promjene volumena. Sustav će dakle „kružiti“, odatle naziv „kružni proces“, između početnog stanja (1) i, nazovimo to tako, (nekog) međustanja stanja (2), stanja kada je sva eksjerija zatvorenog sustava pretvorena u mehanički rad, a količina će dobivenog mehaničkog rada ovisiti tada samo o broju obavljenih kružnih procesa.

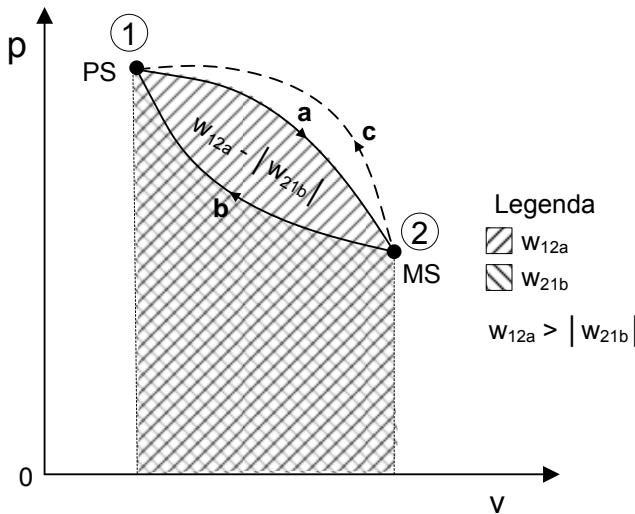


Slika 5-6 „Kruženje“ zatvorenog sustava između početnog stanja i međustanja

No, kako vratiti sustav u početno stanje? Kompresijom očito, dakle trošenjem mehaničkog rada, $w_{21} [\text{J/kg}] < 0$. Ima li to smisla? Da, uz uvjet da je dobiveni mehanički rad za vrijeme

ekspanzije zatvorenog sustava, w_{12} , veći od apsolutnog iznosa uloženog mehaničkog rada komprimiranja sustava (vraćanja u početno stanje), w_{21} , **Slika 5-7**:

$$w_{12} > |w_{21}|.$$



Slika 5-7 Ukupni mehanički rad promjene volumena zatvorenog sustava podvrgnutog kružnom procesu

Drugim riječima, zatvoren sustav **mora** biti podvrgnut procesima poput procesa **a i b**, **Slika 5-7**, između početnog stanja (PS) 1 i međustanja (MS) 2 kako bi ukupno dobiveni rad za vrijeme kružnog procesa bio pozitivan:

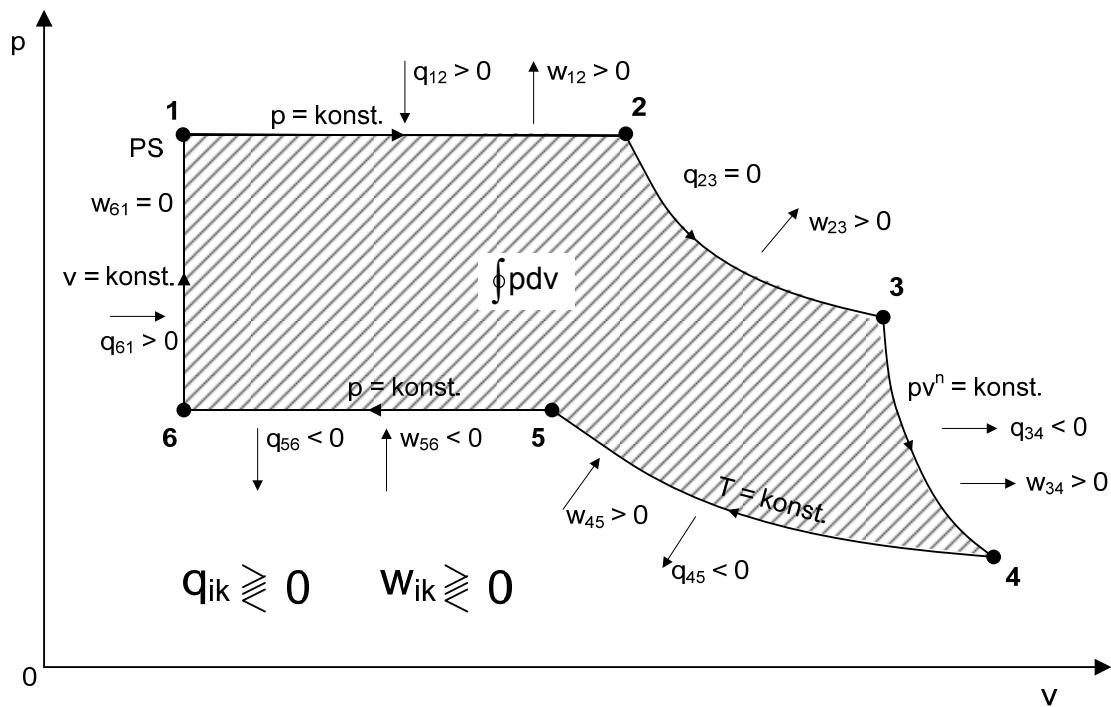
$$w_{12a} + w_{21b} = w_{12a} - |w_{21b}| = w_{KP_{ZS}} > 0.$$

(Vraćanje sustava u početno stanje procesom **c**, želimo li dobivati mehanički rad, bilo bi besmisleno jer bismo tada sumarno morali trošiti mehanički rad za odvijanje kružnog procesa umjesto da ga dobivamo:

$$w_{12a} + w_{21c} = w_{12a} - |w_{21c}| = w_{KP_{ZS}} < 0.)$$

Kako postići da vrijedi $w_{12a} > |w_{21b}|$? Kako je moguće vratiti sustav u početno stanje uz manji utrošak mehaničkog rada (ne narušavajući princip očuvanja energije)?

Pomoću toplinske energije! Oblika energije koja, poput mehaničkog rada, prelazi granice sustava nevezano uz tvar. Drugim riječima, zatvoreni ćemo sustav vratiti (vraćati) u početno stanje trošenjem mehaničkog rada ali i uz pomoć toplinske energije zadovoljavajući tako temeljni odnos u svijetu u kojem živimo: princip očuvanja energije. U protivnom, zamisao bi odvijanja kružnog procesa spadala u kategoriju nemogućih (neprovedivih) energetskih procesa. To će postati još uočljivije zamislimo li nekakav, bilo kakav, između beskonačnog broja mogućnosti odvijanja, kružni proces kojem ćemo podvrći zatvoren sustav, **Slika 5-8**.



Slika 5-8 Kružni proces zatvorenog sustava

Zaključujemo, na temelju poznавања одвијања pojedinačних процеса круžног процеса, да би се круžни процес затвореног система уопште могао одвијати треба доводити или одводити топлиску енергију и механички рад за vrijeme pojedinih дјелова круžног процеса, односно ни доводити ни одводити:

$$q_{ik} \leq 0; q_{ik} \geq 0; w_{ik} \leq 0; w_{ik} \geq 0$$

No, колики је укупни механички рад добiven из круžног процеса (дovedeni механички рад minus одведен), а колики је износ укупно изменjenе топлиске енергије (dovedena топлиска енергија minus одvedena топлиска енергија)? Што се догађа с механичким радом промјене volumena и топлиском енергијом за vrijeme pojedinačnih процеса круžног процеса?

Pогледајмо. Састоји ли се круžни процес од неколико процеса којима је подвргнут затворени систем, то за сваки pojedini процес vrijedi принцип очувања енергије (prvi главни ставак термодинамике за затворени систем, relacija [3.15]):

$$q_{12} = w_{12} + u_2 - u_1$$

$$q_{23} = w_{23} + u_3 - u_2$$

$$q_{34} = w_{34} + u_4 - u_3$$

...

$$q_{61} = w_{61} + u_1 - u_6$$

[5.38]

Pritom je q_{ik} toplinska energija što se izmjenjuje za vrijeme procesa koji se odvija između stanja i i k , $w_{ik} = \int_{v_i}^{v_k} pdv - |w_{RTik}|$ izmijenjeni mehanički rad promjene volumena između istih stanja, a $u_k - u_i$ promjena unutrašnje kaloričke energije zatvorenog sustava zbog izmjene toplinske energije i mehaničkog rada za vrijeme odvijanja promatranih procesa.

Zanemarimo li rad trenja koji se (sigurno) razvija za vrijeme realnih procesa, zbrajanjem (energija je skalarna veličina) dobivamo:

$$q_{12} + q_{23} + q_{34} + \dots + q_{61} = w_{12} + w_{23} + w_{34} + \dots + w_{61} \quad [5.39]$$

jer se vrijednosti unutrašnjih kaloričkih energija pojavljuju sa suprotnim predznakom.

(Rezultat je dakako očekivan: ukupna (sumarna) promjena unutrašnje kaloričke energije sustava podvrgnutog kružnom procesu mora biti jednaka nuli budući da se sustav vratio u početno stanje (PS), a unutrašnja je kalorička energija veličina stanja (veličina neovisna o procesu između promatranih stanja / duže totalni diferencijal/): $\delta u = u_{PS} - u_{PS} = 0$.)

Prema tome, kad zatvoreni sustav ostvari kružni proces, zbroj je mehaničkih radova pojedinih dijelova procesa, odvedenih ili dovedenih, jednak zbroju izmijenjenih toplinskih energija, dovedenih ili odvedenih, za vrijeme odvijanja pojedinih dijelova procesa:

$$w_{KPZS} = \sum w_{ik} = \sum q_{ik} \text{ J/kg} \quad [5.40]$$

Pritom treba mehaničke radove i toplinske energije uvrstiti s odgovarajućim predznacima.

Koliki je w_{KPZS} ?

Jer je $w_{ik} = \int_{v_i}^{v_k} pdv$ (zanemarujemo trenje), to je

$$w_{KPZS} = \sum w_{ik} = \int_{v_1}^{v_2} pdv + \int_{v_2}^{v_3} pdv + \dots + \int_{v_n}^{v_1} pdv = \oint pdv \quad [5.41]$$

Dakle je ploština površine unutar krivulja kružnog procesa (Slika 5-8) jednaka (proporcionalna računamo li s pojmom trenja) mehaničkom radu što prelazi granice sustava jer je:

$$\oint pdv = w_{KPZS} + \sum |w_{RTik}| \quad [5.42]$$

odnosno za mehanički povratljivi proces (ne postoji trenje):

$$w_{povKPZS} = \oint pdv \quad [5.43]$$

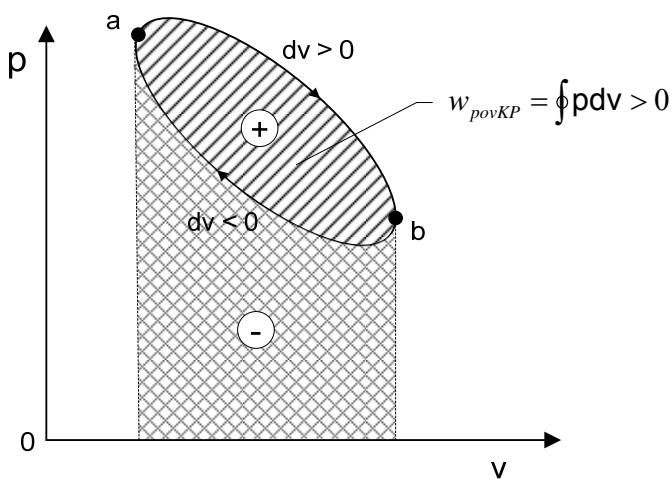
S druge je strane

$$\sum q_{ik} = \sum q_{ik_{dov}} + \sum q_{ik_{odv}} = q_{dov} + q_{odv} = q_{dov} - |q_{odv}| \quad [5.44]$$

pa, zanemarimo li trenje, dobiveni mehanički rad za vrijeme odvijanja kružnog procesa sa zatvorenim sustavom možemo računati na dva načina: sumirajući mehaničke radeove promjene volumena pojedinačnih procesa ili određujući razliku između ukupno dovedene i ukupno odvedene toplinske energije za vrijeme odvijanja kružnog procesa:

$$w_{povKP_{zs}} = \oint pdv = q_{dov} - |q_{odv}| \quad [5.45]$$

Uočimo sada još nešto. Realizirajući kružni proces kretali smo se u desnu stranu. U smjeru gibanja kazaljke na satu, **Slika 5-9**. Takav se kružni proces naziva **desnokretnim**.



Slika 5-9 Desnokretni kružni proces zatvorenog sustava

Zatvoreni sustav podvrgnut desnokretnom kružnom procesu predavat će mehanički rad u okolicu jer je vrijednost integrala u [5.42] pozitivna. Naime, za gornji je dio krivulje (između **a** i **b**) vrijednost integrala pozitivna jer specifični volumen raste (radi se o ekspanziji, $dv > 0$,

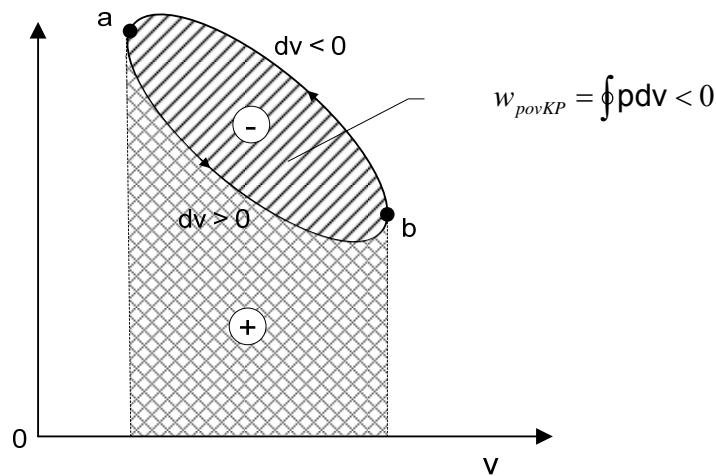
dobivanju mehaničkog rada: $\int_a^b pdv > 0$), a za donji će dio krivulje vrijednost integrala biti

negativna jer je $dv < 0$ (radi se o kompresiji, dovođenju mehaničkog rada u sustav: $\int_b^a pdv < 0$).

Ukupni je, međutim, izmjenjeni mehanički rad (dobiveni minus uloženi) za vrijeme odvijanja desnokretnog kružnog procesa zatvorenog sustava pozitivan; rad se dobiva iz

sustava i predaje u okolicu: $w_{DKP} = \int_a^b pdv - |\int_b^a pdv| > 0$ jer je $\int_a^b pdv > |\int_b^a pdv|$.

Zamislimo dalje da je moguća realizacija i **ljevkretnog kružnog procesa**, kružnog procesa koji će se odvijati suprotno kretanju kazaljke na satu, **Slika 5-10**.



Slika 5-10 Ljevokretni kružni proces zatvorenog sustava

Uočimo zasad samo činjenicu da će sada ukupno izmijenjeni mehanički rad biti negativan, što znači da se ljevokretni kružni proces može odvijati samo ako se dovodi (ulaže, troši) mehanički rad. ($w_{LJK} = \int_a^b pdv + \int_b^a pdv = \int_a^b pdv - |\int_b^a pdv| < 0$ jer je $\int_a^b pdv < |\int_b^a pdv|$)

Zašto je to (fizikalno gledajući) tako i čemu služe ljevokretni kružni procesi odgovorit ćemo kasnije.

Za naša su razmatranja međutim, razmatranja energetskih pretvorbi i procesa u elektroenergetici, mnogo važniji od kružnih procesa zatvorenih sustava kružni procesi koji se provode pomoću otvorenih sustava. Jedan od takvih procesa susrećemo u termoelektranama.

5.6.2 Kružni procesi otvorenih sustava

U termoelektranama fluid je sustav podvrgnut kružnom procesu koji je realiziran pomoću različitih procesa u otvorenim sustavima, Slika 3-40 Error! Reference source not found.. U takvom kružnom procesu fluid „kruži“, tjeran razlikom tlakova (pumpom), kroz parni kotao (izmjenjivač topline), turbinu, kondenzator (izmjenjivač topline) i pumpu vraćajući se ponovno u kotao. Koliki je ukupno dobiveni mehanički rad iz takvog desnokretnog kružnog procesa, $w_{KP_{OS}} \equiv w_{t_{KP}}$?

Pišemo li za svaki od procesa princip očuvanja energije (1. glavni stavak termodinamike za otvoreni sustav) dobit ćemo da je ukupno izmijenjeni mehanički rad (tehnički rad) za vrijeme odvijanja kružnog procesa jednak:

$$w_{KP_{OS}} \equiv w_{t_{KP}} = \sum w_{t_{ik}} = \sum q_{tik} \text{ J/kg} \quad [5.46]$$

Naime, zanemarimo li trenje (mehanički povratljivi procesi), to za svaki dio kružnog procesa, jer se radi o otvorenim sustavima, vrijedi relacija:

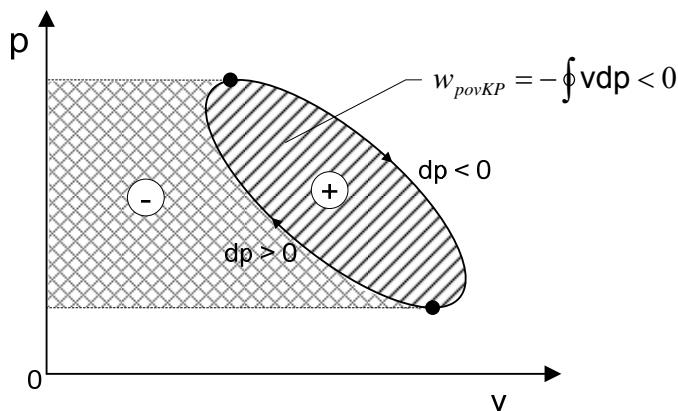
$$w_{tik} = - \int_{p_i}^{p_k} vdp - \frac{1}{2} (c_k^2 - c_i^2) - g(z_k - z_i) \quad [5.47]$$

pa zbrajanjem tehničkih radova za sve otvorene procese dobivamo:

$$\begin{aligned} w_{t_{kp}} &= - \oint vdp = \sum w_{tik} = w_{t_{turbine}} + w_{t_{pumpe}} = w_{t_{turbine}} - |w_{t_{pumpe}}| = \\ &= \sum q_{tik} [\text{J/kg}] \end{aligned} \quad [5.48]$$

jer se svи članovi u kojima se pojavljuju brzine **c** i visine **z** međusobno poništavaju.

Dakle i sada vrijedi, jer integral $-\oint vdp$ predstavlja u p,v-dijagramu površinu ograničenu krivuljama kružnog procesa, da je ploština površine kružnog procesa jednaka (proporcionalna ne zanemarimo li ukupan rad trenja) ukupnom tehničkom radu dobivenom iz kružnog procesa. Suglasno dosad rečenome tehnički će rad biti pozitivan, **Slika 5-11**, odvija li se kružni proces kao desnokretni, odnosno, negativan teče li proces kao ljevkretni.



Slika 5-11 Desnokretni kružni proces otvorenih sustava

Kolika je ukupno izmijenjena toplinska energija $\sum q_{tik}$?

Naglasili smo više puta, toplinska je energija oblik energije što prelazi granice sustava nevezano uz masu, što znači da je neovisna o tome odvija li se (istи) proces u zatvorenom ili otvorenom sustavu, pa mora stoga vrijediti:

$$\sum q_{tik} \equiv \sum q_{ik} = \sum q_{ik_{dov}} + \sum q_{ik_{odv}} = q_{dov} + q_{odv} = q_{dov} - |q_{odv}| \quad [5.49]$$

Jer vrijedi i da je

$$w_{t_{kp}} = \sum q_{tik} = \sum q_{ik}, \text{ a } w_{Kp_{zs}} = \sum q_{ik},$$

zaključujemo da je ukupni iznos izmijenjenog mehanički rada za vrijeme odvijanja kružnog procesa neovisan o tome provodi li se kružni proces sa zatvorenim sustavom ili otvorenim sustavima:

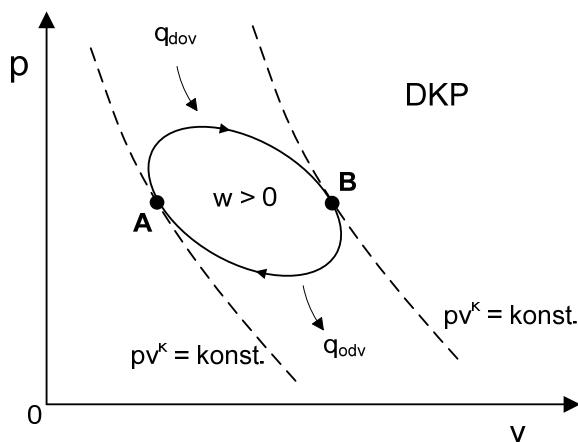
$$w_{KP_{zs}} = w_{t_{kp}} = w_{KP} = w = \oint pdv = - \oint vdp = q_{dov} + q_{odv} = q_{dov} - |q_{odv}| \quad [5.50]$$

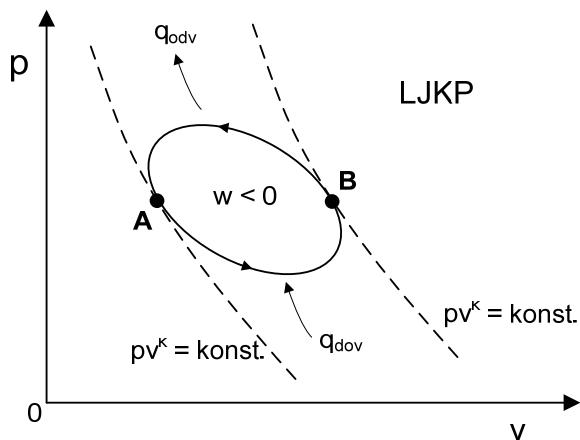
Drugim riječima, radi li se o količini mehaničkog rada koji se dovodi ili odvodi iz sustava podvrgnutih kružnim procesima ne treba razlikovati $w_{KP_{zs}}$ od $w_{KP_{os}}$ ($w_{t_{kp}}$): u oba je slučaja mehanički rad jednak ploštinu površine koju u p,v-dijagramu formira kružni proces, odnosno razlici ukupno dovedene i ukupno odvedene toplinske energije za vrijeme odvijanja kružnog procesa.

Zaključno konstatirajmo i razmotrimo i ovo. Ustanovili smo, analizirajući rad nekih općenitih desnokretnih i ljevkretnih kružnih procesa, da bi bilo moguće odvijanje kružnih procesa, a to vrijedi za kružne procese s bilo kakvim sustavima odnosno fluidom, treba, na pogodan način, dovoditi i odvoditi toplinsku energiju. Postavljamo pitanje je li je to i nužno ili nismo li samo dostatno domišljati i vještiti da provedemo kružni proces bez dovođenja ili, barem, odvođenja toplinske energije? „Intuitivno“ prihvaćamo nemogućnost odvijanja desnokretnog kružnog procesa bez dovođenja toplinske energije; u suprotnom radilo bi se o „perpetuum mobile prve vrste“: dobivanju mehaničkog rada (energije) bez utroška energije (bez transformacije iz nekog drugog oblika energije).

(Sigurno, takva se intuicija „današnjice“ temelji na znanju „jučerašnjice“: prihvatanju valjanosti principa očuvanja energije.)

Ali, zašto je potrebno odvoditi toplinsku energiju iz kružnog procesa kako bi se on mogao provoditi? Je li je moguća izvedba kružnog procesa bez odvođenja toplinske energije? „Matematička analiza“ odbacuje mogućnost odvijanja kružnog procesa bez dovođenja i odvođenja toplinske energije. Uvjerimo se u to razmatrajući rad bilo kakvog desnokretnog i ljevkretnog kružnog procesa u p,v-dijagramu, **Slika 5-12.**





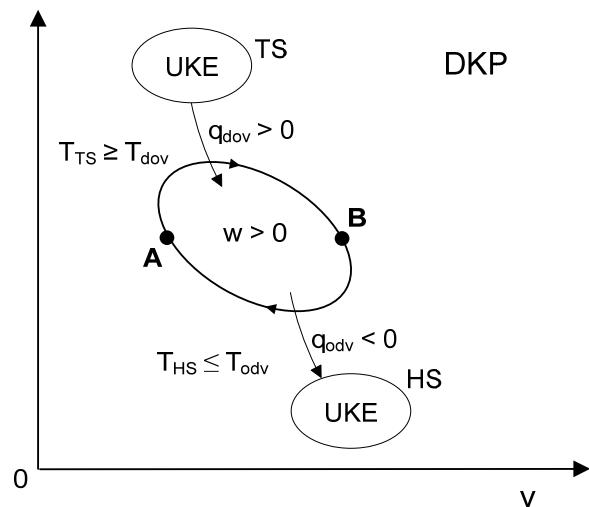
Slika 5-12 Dovođenje i odvođenje toplinske energije u desnokretnom i ljevokretnom kružnom procesu

Odijelimo dijelove procesa kojima se toplinska energija dovodi od onih kojima se ona odvodi polažeći dvije adijabate tako da dodiruju krivulje procesa kružnih procesa. U dodirnim točkama A i B krivulje se procesa podudaraju s adijabatama, što znači da se u kružni proces ne mora dovoditi ni odvoditi toplinska energija jedino kad se nalazi u tim stanjima. U svim se ostalim dijelovima procesa toplinska energija mora dovoditi ili odvoditi. U protivnom, kružni se proces ne bi mogao odvijati. Prema rečenome u 5.5. zaključujemo kada se toplinska energija mora dovoditi, a kada odvoditi iz kružnog procesa, Slika 5-12.

Spomenuli smo, „Matematika“ nije predviđena za ovakva dokazivanja. Uvjetno prihvatimo stoga, zasad bez dodatnih tumačenja, da nije moguće odvijanje kružnih procesa bez dovođenja i odvođenja toplinske energije.

Spomenuli smo isto tako dosad, isto tako zasad bez čvršćih argumenata, da se svaka energija sastoji od ekservije i anergije. Dovođenje toplinske energije u kružni proces predstavlja stoga dovođenje energije u procese transformacija oblika energije u kojima se ekservija toplinske energije pretvara u mehanički rad, a anergija se toplinske energije u obliku toplinske energije (priježan oblik energije) odvodi u okolicu. Drugim riječima, kružni proces omogućuje odvajanje ekservije (toplinske) energije od anergije (toplinske) energije. Ekservija (mehanički rad) pretvara se zatim u najrazličitijim uredajima u korisne oblike energije, a anergija se odvodi u okolicu – ne postoji druga mogućnost.

Sustav dakle ne može sam po sebi obaviti kružni proces jer mu u jednom dijelu procesa treba dovoditi toplinsku energiju, a u drugom dijelu odvoditi. Ako je to tako, moramo znači osigurati dovođenje i odvođenje toplinske energije. A to možemo samo pomoći, nazovimo ih tako, dva **toplinska spremnika**. Jednog, imenujmo ga **topljam spremnikom** (ogrjevnim spremnikom ili izvorom topline), koji će dobavljati toplinsku energiju potrebnu za odvijanje kružnog procesa transformacijom iz unutrašnje kaloričke energije, i drugog, **hladni spremnik** (rashladni spremnik ili ponor topline), koji će preuzimati toplinsku energiju (anergiju) odvedenu iz kružnog procesa, **Slika 5-13**, i u kojem će se ta toplinska energija pretvarati u unutrašnju kaloričku energiju.



Slika 5-13 Toplinski spremnici i prijelaz toploinske energije u i iz kružnog procesa

Pokazali smo, toploinska energija prelazi sa sustava na sustav samo zbog razlike u temperaturi. Zbog toga mora temperatura toplog spremnika, T_{TS} , biti veća, ili u graničnom slučaju jednaka, maksimalnoj temperaturi kružnog procesa, $T_{\max KP} \equiv T_{dov}$:

$$T_{TS} \geq T_{\max KP} \equiv T_{dov}, \quad [5.51]$$

a temperatura hladnog spremnika, T_{HS} , manja, ili u graničnom slučaju jednaka, minimalnoj temperaturi kružnog procesa, $T_{\min KP} \equiv T_{odev}$:

$$T_{HS} \leq T_{\min KP} \equiv T_{odev} \quad [5.52]$$

Dalje zaključujemo: dovođenje i odvođenje toploinske energije ne uzrokuje promjene u sustavu (fluidu); na kraju se procesa sustav vraća u početno stanje. Promjene međutim ostaju u toplinskim spremnicima jer se iz jednog odvodi a u drugi dovodi toploinska energija: u toplog spremniku nastaje zbog toga manjak, a u hladnom višak unutrašnje kaloričke energije. Prema tome prijelaz je toploinske energije iz toplog spremnika preko kružnog procesa u hladni spremnik pravi izvor mehaničkog rada (eksergije). Sustav je (fluid odnosno djelatna tvar) pritom samo posrednik: postojanje je toplog spremnika, kao dobavljača eksergije, i hladnog spremnika, kao preuzimatelja anergije, nezaobilazni preduvjet za odvijanje (svih) kružnih procesa. To postaje još očitije upitamo li se koje veličine kružnog procesa moramo smatrati zadanim. Primjerice, stanja 1, 2, 3 i 4 kružnog procesa, Slika 5-8, možemo odabrat po volji, ali samo tako da se pritom ne prekorače temperature toploinskih spremnika; u protivnom prijelaz bi toploinske energije u željenom smjeru bio nemoguć. Ako je to tako, definirajmo onda pokazatelj koji će odgovoriti na pitanje koliko je toploinske energije u kružnom procesu pretvoreno u mehanički rad (u eksergiju) i nazovimo ga **termičkim ili energetskim stupnjem djelovanja** i označimo grčkim slovom eta s indeksom t (termički): η_t .

5.6.3 Termički (energetski) stupanj djelovanja

U svakom se desnokretnom kružnom procesu dobiva mehanički rad transformacijom iz eksergije dovedene toplinske energije. Tehnički se sustav, u kojem je fluid (djelatna tvar) podvrgnut promjenama stanja u kružnom procesu, a usto mu se energija dovodi u obliku toplinske energije i on predaje mehanički rad, naziva (često) **toplinskim strojem**.

Za svaki toplinski stroj vrijedi relacija:

$$w = q_{dov} - |q_{odv}| \text{ [J/kg]}$$

gdje je w predani mehanički rad a q_{dov} i q_{odv} dovedena i odvedena toplinska energija po kg fluida (djelatne tvari).

Omjer se između w i q_{dov} naziva termički stupanj djelovanja, ili energetski stupanj djelovanja, jer je to omjer zahtijevanog (korisnog, dobivenog) oblika energije (mehaničkog rada) i upotrijebljene energije (toplinske energije u promatranom slučaju):

$$\eta_t = \frac{w}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} + q_{odv}}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} - |q_{odv}|}{q_{dov}} = 1 - \frac{|q_{odv}|}{q_{dov}} \quad [5.53]$$

Stupanj djelovanja η_t pokazuje koliki se dio dovedene toplinske energije (energije) pretvara u mehanički rad (eksergiju). Očito, da bi se postiglo da se sva dovedena toplinska energija (q_{dov}) pretvoriti u mehanički rad, mora q_{odv} biti jednaka nuli. Pokazali smo, međutim, „matematičkim dokazom“, da je vrijednost q_{odv} različita od nule.

(Kasnije ćemo se uvjeriti da kolika odvedene toplinske energije za svaki kružni proces ima neku minimalnu vrijednost, različitu od nule, ovisnu i o prirodnim uvjetima pa, po tome, η_t ne može nikada biti jednak jedan.)

Prirodno, postavlja se pitanje koliko je q_{odv} , koliko je $q_{odv_{\min}}$? Kako ostvariti najbolji mogući kružni proces, $\eta_{t_{\max}}$, i spoznati to kako bismo izbjegli skupo i bezuspješno traganje za još boljim kružnim procesom?

Odgovor je na to pitanje dao francuski inženjer Nicolas Léonard Sadi Carnot u prvoj četvrtini XIX. stoljeća analizirajući (zamišljeni) kružni proces njemu u počast nazvan **Carnotovim kružnim procesom**.

O stupnjevima djelovanja pretvorbi oblika energije u korisne oblike i poteškoćama proračuna ukupnog stupnja djelovanja transformacija

Najšire prihvaćena definicija **stupnja djelovanja** (naziva se još i korisnost, učinkovitost, djelotvornost, efikasnost, koeficijent iskorištenja, koeficijent korisnog djelovanja itd.) izriče da je to bezdimenzijski broj koji izražava omjer korisne energije dobivene od nekog stroja ili uređaja i dovedene (utrošene) energije potrebne da bi se dobila korisna energija transformacijom iz dovedene. Dakako da pritom za sve transformacije oblika energije mora vrijediti kako princip očuvanja energije tako i princip rasta entropije, odnosno drugi glavni

stavak termodinamike. Naime, ukupna energija dovedena u neki proces transformacije mora biti jednaka ukupnoj energiji koja se iz njega odvodi, bilo u onom (traženom, korisnom) obliku u koji se želi pretvoriti dovedena energija, bilo u nekim drugim oblicima koje možemo smatrati posljedicom nesavršenosti procesa ali i posljedicom prirodom ograničenih mogućnosti pretvorbe energije u željeni oblik. Omjer između količine energije E_{tr} (e_{tr}) koja se u nekom procesu transformacije dobiva u željenom (zahtijevanom, traženom, korisnom) obliku i količine energije E_{dov} (e_{dov}) koja se, u nekom drugom ili istom obliku, dovodi u proces transformacije zvat ćemo **stupnjem djelovanja transformacije** η_{tr} (dakle ne korisnošću, efikasnošću, učinkovitošću ili slično):

$$\eta_{tr} = \frac{E_{tr}[J]}{E_{dov}[J]} = \frac{e_{tr}[J/kg]}{e_{dov}[J/kg]} \quad [5.54]$$

Posebno, ukoliko je E_{tr} mehanički rad (dakle ekservija) a E_{dov} toplinska energija (dakle energija) stupanj djelovanja transformacije zvat ćemo **termičkim ili energetskim stupnjem djelovanja** η_t :

$$\eta_t = \frac{W[J]}{Q_{dov}[J]} = \frac{w[J/kg]}{q_{dov}[J/kg]} \quad [5.55]$$

Zbog gubitaka ekservije prigodom pretvaranja jednog oblika energije u drugi, odnosno zbog nemogućnosti da se bilo koji oblik energije u cijelosti pretvoriti u mehanički rad (ekserviju), termički je (energetski) stupanj djelovanja uvijek manji od idealne vrijednosti 1 ili 100% što, u nekim slučajevima, pokazat ćemo, može uzrokovati pogrešna zaključivanja. Zbog toga se, pokraj termičkog (energetskog) stupnja djelovanja, definira i tzv. **ekservijski stupanj djelovanja** označen grčkim slovom zeta (ζ) koji predstavlja omjer količine ekservije dobivene iz nekog procesa i količine ekservije dovedene u taj proces:

$$\zeta = \frac{\text{Ekservija}_{dob}[J]}{\text{Ekservija}_{dov}[J]} = \frac{\text{eks}_{dob}[J/kg]}{\text{eks}_{dov}[J/kg]} \quad [5.56]$$

(Termički (energetski) stupanj djelovanja osniva se na prvom glavnom stavku, a ekservijski, pokazat ćemo, na drugom glavnom stavku termodinamike.)

Už te se stupnjeve djelovanja, koji u potpunosti opisuju sve moguće energetske transformacije, rabe, zbog što kraćeg i jednostavnijeg opisa transformacija, i brojni stupnjevi djelovanja (pojedinih) uređaja i procesa. Primjerice: stupanj djelovanja ložišta, parnog kotla, parovoda; unutrašnji, efektivni i mehanički stupanj djelovanja turbine; stupanj djelovanja sinkronog generatora, vlastitog potroška, elektrane na pragu; stupanj djelovanja procesa s međupregrijanjem pare, sa zagrijavanjem kondenzata, s oduzimanjem kondenzata; stupanj djelovanja kogeneracije, spojnog procesa itd, itd.

Sve su te podjele stupnjeva djelovanja nužne budući da stupanj djelovanja transformacije ovisi s jedne strane o transformiranim i dovedenim oblicima energije, a s druge strane o upotrijebljenim procesima za transformaciju (tipovima procesa i parametrima procesa) i o kvaliteti postrojenja u kojima se provode pretvorbe oblika energije.

(To je ujedno i razlog zašto smo prisiljeni izbjegavati kraće, no nedostatno precizne, terminе poput korisnost, učinkovitost, djelotvornost, efikasnost,...)

Naime, govorili smo o tome, potrošačima je potrebna energija u jednom od sljedećih oblika: mehanički rad, toplinska, kemijska ili rasvjetna energija, odnosno dva ili više korisnih oblika energije istodobno. Poteškoće nastupaju jer se potrebe za korisnim oblicima energije mogu zadovoljiti na najrazličitije načine. Primjerice, toplinska se energija može potrošačima osigurati transformacijom iz unutrašnje kaloričke energije vrele vode ili vodene pare, miješanjem vodene pare ili vrele vode s kapljevinom koju treba ugrijati, izgaranjem drveta i fosilnih goriva u ložištima (pojedinačnim ložištima, kotlovima za centralna grijanja, parnim kotlovima, tehnološkim pećima i sl.), ali i transformacijom iz električne energije u otpornim i induksijskim pećima. Slično vrijedi i za opskrbu mehaničkim radom. Radi li se o potrošačima koji su s obzirom na smještaj stabilni danas dolazi u obzir praktički samo električna energija (električni motori). Znatan je dio mehaničkog rada međutim potreban za transport, dakle pokretne potrošače. Tada se mehanički rad proizvodi pomoću motora s unutrašnjim izgaranjem (cestovni i zračni promet), dok se za željeznički i brodski promet upotrebljavaju uz motore s unutrašnjim izgaranjem i parni kotlovi s parnim turbinama ali i pogoni s plinskim turbinama. Za željeznički i gradski promet uobičajeno se rabi i električna energija. Stabilni se potrošači mogu opskrbiti mehaničkim radom i neposredno, pomoću bilo kojeg pogonskog stroja (parna, plinska, vodna turbina, motor s unutrašnjim izgaranjem), bez međutransformacije u električnu energiju.

(To obično nije pogodno zbog komplikiranog održavanja u pogonu (vođenje pogona, dopremanje goriva, održavanje postrojenja), ali i zbog toga što je racionalnije proizvesti električnu energiju u velikim elektranama i zatim je pomoću električne mreže dovesti do električnih motora u kojima će biti pretvorena u mehanički rad.)

Električna energija često je i posrednik u transformacijama u mehanički rad. Pritom mislimo na procese u kojima se mehanički rad pogonskih strojeva prvo pretvara u električnu energiju a ova ponovno u mehanički rad (dizelsko-električne lokomotive, brodski pogoni).

Za opskrbu potrošača rasvjetnom energijom danas se pretežito upotrebljava električna energija, odnosno jedino električna energija u društima koja njome raspolažu. *(Nešto malo manje od drije milijarde ljudi ne raspolaže još uvijek s električnom energijom.)* Ta je energija također nezamjenjiva za elektrokomunikacijske uređaje (telefon. radio, televizija) i za „procesiranje znanja“.

Za reduksijske peći, visoke peći za proizvodnju sirovog željeza, lučne peći za proizvodnju karbida i ferolegura i dr., i za elektrolize, koje se temelje na kemijskim procesima, potreban je ili koks, ili električna energija, ili istodobno i koks i električna energija. U visokim se pećima pritom sve više koks djelomično zamjenjuje prirodnim plinom ili teškim loživim uljem. U prvom je redu dakle kemijska energija korisni oblik energije u reduksijskim pećima i u elektrolizama, ali se tu pojavljuje i toplinska energija kao korisni oblik energije.

Stupnjevi se djelovanja transformacija stoga mogu međusobno toliko znatno razlikovati da izrada energetske bilance, pomoću koje bi se mogle usporediti ukupne potrebe energije s ukupnim primarnim oblicima energije, nije moguća pa ni uz uvjet da se svakome primarnom obliku energije prida neki nepromjenljivi i opći stupanj djelovanja transformacije. Takva energetska balanca naime ne bi vodila računa o potrebnim oblicima korisne energije, a prema tome ni o nužnim energetskim transformacijama, a baš o ta dva čimbenika ovise potrebne količine primarnih energetskih oblika.

Energetske bilance obuhvaćaju tokove (tijekove) svih oblika energije u nekoj državi ili užem području da bi se na prikladan način prikazalo iskorištenje primarnih oblika energije,

energetske transformacije, uvoz i izvoz primarnih i transformiranih oblika energije, uporaba oblika energije za opskrbu potrošača (industrija, promet, mali potrošači, kućanstva), te korisni oblici energije u koje se transformiraju svi oblici energije predani potrošačima. Energetska je bilanca zapravo energetska statistika posebna oblika koja prati tokove energije od njezine pojave u energetskom gospodarstvu države ili područja do prijelaza ukupne energije u anergiju. Energetska bilanca služi kao osnova za prognoziranje razvoja kako bi se pravodobnim zahvatima osigurala opskrba potrošača odnosno kao podloga za eliminaciju negativnih i stimuliranje pozitivnih pojava u proizvodnji i opskrbi energijom.

Ilustrirajmo rečeno ograničavajući se na problem različitih stupnjeva djelovanja u onim slučajevima kada se radi o oblicima energije koji se mogu međusobno supstituirati, odnosno na slučajeve kada razlika između stupnjeva djelovanja transformacija, izazvana različitim načinima dobivanja istog korisnog oblika energije, utječe na rezultate energetske bilance.

(Postoje naime i neke potrebe koje se ne mogu zadovoljiti na različite načine već samo određenim, nezamjenjivim oblicima energije: cestovni i zračni promet primjerice.)

Na primjer, za grijanje se prostorija može upotrijebiti ugljen neposredno, ložeći ga u pojedinačnim ložištima, ali i posredno, pretvorbom kemijske energije ugljena najprije u električnu energiju i zatim električne energije u toplinsku. U prvom slučaju, da se dobije korisna količina toplinske energije za grijanje prostorija u iznosu od 1MJ, koliko je potrebno da peć za grijanje predaje zraku u sobi, trebaju 2MJ toplinske energije oslobođene izgaranjem ugljena računamo li sa stupnjem djelovanja transformacije kemijske energije ugljena u korisnu toplinsku energiju u peći. U drugom slučaju, stupanj će djelovanja transformacije kemijske energije ugljena u električnu energiju iznositi u prosjeku oko, primjerice, 0,30, a stupanj djelovanja prijenosa i raspodjele električne energije oko 0,85. Prema tome ukupni stupanj djelovanja transformacije kemijske u električnu energiju do mjesta potrošnje je $0,30 \cdot 0,85 = 0,255$. Dakle za grijanje iste prostorije električnom energijom potrebno je nešto manje od 4MW energije u ugljenu. Naravno da se prostorije mogu grijati i na druge načine: npr. vrelom vodom iz toplana, centralnim grijanjem loženim ugljenom, loživim uljem, prirodnim plinom itd. Općenito, postižu se više ili manje različiti stupnjevi djelovanja, pa istoj količini korisne energije odgovaraju različite količine energije u primarnom ili u transformiranom obliku.

Sličan je zaključak promatraju li se pretvorbe u električnu energiju. U termoelektranama su za proizvodnju 1 kWh električne energije potrebna oko 3 kWh (10,8 MJ), a u hidroelektranama za istu količinu električne energije oko 1,3 kWh (4,68 MJ) potencijalne energije vode. Prema tome potrebna količina primarnih, odnosno transformiranih oblika energije ne ovisi samo o potrebnoj količini električne energije, već i o obliku energije koja se transformira u električnu energiju.

(Jasno, u termoelektranama se energija (kemijska, nuklearna, Sunčeva zračenja ili unutrašnja kalorička energija) transformira u električnu energiju (eksergiju), a u hidroelektranama se ekservija (potencijalna energija vode) transformira u električnu energiju koja je ekservija.)

Tako će biti i s potrebama energije za željeznički transport. Stupanj djelovanja parnog stroja (parne lokomotive) znatno je niži od stupnja djelovanja dizelskog motora (dizelske lokomotive), a pogotovo od stupnja djelovanja električnog motora (električne lokomotive). Pri razmatranju potreba energije za željeznički transport valja još uzeti u obzir i činjenicu da se iz sirove nafte može dobiti samo određeni postotak goriva za dizelske motore te da je stupanj djelovanja transformacije u električnu energiju ovisan i o vrsti elektrana.

Tehnički napredak, osim toga, znatno utječe na ostvarivanje stupnjeva djelovanja. Usporedba različitih transformacija ovisi dakle i o vremenu. Tako se u pregledima korištenja energetskih oblika računa da je u 1940-tim godinama bilo potrebno više od 23 MJ za proizvodnju 1 kWh (3,6 MJ) električne energije u termoelektranama, u 1950-im više od 17 MJ, u 1960-im oko 12 MJ, a danas manje od 11 MJ.

Prema tome ne može se pronaći neka zajednička mjera za energiju kojom bi se omogućila izrada takvih energetskih bilanci koje bi u sebi uključivale sve energetske aspekte iskorištavanja oblika energije.

(1 MJ energije u gorivu upotrijebljen za proizvodnju električne energije ne daje isti efekt kao 1 MJ potencijalne energije vode budući da se u prvom slučaju radi o energiji koju transformiramo u eksergiju (i zatim u korisni / traženi/ oblik energije) a u drugom je slučaju riječ o eksergiji koja se transformira u električnu energiju (ekserviju odnosno u koristan / traženi/ oblik energije). Zbog toga se ta dva oblika energije s obzirom na potrebne količine ne mogu međusobno zamjeniti.)

Još su veće poteškoće uključimo li u energetske bilance i ekonomski aspekte budući da se troškovi iskorištavanja primarnih oblika energije po jedinici količine energije međusobno znatno razlikuju, a to vrijedi i za transformacije. Osim toga troškovi iskorištavanja istih primarnih oblika i troškovi za iste transformacije znatno ovise o proizvodnim uvjetima (npr., način proizvodnje nuklearnog goriva ili ugljena, dubina nalazišta, izdašnost itd.)

Na slične su poteškoće, pa i nepremostive, naišli i pokušaji da se odredi ukupni konačni stupanj djelovanja korištenja energije na nekom području. Pritom valja postaviti pitanje što je to konačni stupanj djelovanja korištenja energije? Da se pokaže nemogućnost precizne definicije, razmotrit ćemo dva slučaja.

U prvom primjeru promatrajmo željeznički transport. Možemo točno odrediti stupanj djelovanja na osovini pogonskog stroja, odnosno na osovini kotača lokomotive. Međusobnim djelovanjem kotača i tračnice lokomotiva i vagoni kreću se naprijed, ali ta je snaga (energija) manja od snage (energije) na osovini. Pri kretanju lokomotiva mora svladati otpor zraka i sve otpore koji se protive kretanju cijelog vlaka. Zbog čega bi te otpore trebalo promatrati drukčije nego otpor lokomotive? Što, međutim, kako postupiti, nastavimo li tako i u slučaju ako se vlak, nakon što je svladao neki uspon, spusti na istu razinu s koje je pošao: kako odrediti rad koji je obavila lokomotiva?

Drugi primjer odnosi se na uporabu električne energije za rasvjetu. Od ukupne električne energije kod žarulje sa žarnom niti oko 10% zračenja pojavljuje se u vidljivom dijelu spektra, na koje je osjetljivo ljudsko oko, oko 70% zračenja je u infracrvenom području, a ostatak se odvodi u obliku toplinske energije u okolicu. Je li je međutim sva energija u vidljivom području spektra stvarno iskoristiva? Najveći dio pada na predmete koje nitko ne gleda, pa bi se taj dio energije rasvjete mogao smatrati gubitkom. Osim toga, samo dio svjetlosti koji pada na promatrane predmete dolazi u promatračevo oko, pa bi se samo taj dio mogao smatrati stvarno konačnim korisnim dijelom upotrijebljene energije. On je međutim vrlo malen u usporedbi s emitiranim zračenjem u vidljivom dijelu spektra. *(Kao ilustracija neka posluži podatak da je ljudsko oko osjetljivo na snagu zračenja od $10^{15} W$.)*

Zbog toga konačni stupanj djelovanja većinom nema smisla (i za druge slučajeve vrijede slični zaključci) pa on ne može poslužiti kao osnova ni za energetske ni za ekonomski analize. To međutim ne znači da nema nekog smisla određivanje stupnja djelovanja energetskih transformacija ili određivanje stupnja djelovanja energetskih procesa i sustava.

Istaknuli smo, stupanj je djelovanja energetskih transformacija omjer energije proizvedenih transformiranih oblika i energije utrošene za te transformacije. Taj stupanj djelovanja može npr. biti vrlo visok ako se sve energetske potrebe, osim električne energije, zadovoljavaju derivatima nafte, a potrebna se električna energija proizvodi u hidroelektranama. Tada se postiže vrlo povoljno iskorištenje energije upotrijebljene za energetske transformacije, jer i rafinerije nafte i hidroelektrane imaju visoki energetski stupanj djelovanja. Nasuprot tome, stupanj djelovanja energetskih transformacija bit će vrlo nepovoljan ako se najveći dio potreba zadovoljava električnom energijom proizvedenom u termoelektranama budući da su procesi u termoelektranama energetske transformacije s vrlo lošim energetskim stupnjem djelovanja. (Ne i s eksergijskim!)

(Međutim, ni te konstatacije nisu (ne moraju biti) odlučujuće: prvi sustav (najta + hidroelektrane) naime, i uz vrlo povoljan stupanj djelovanja energetskih transformacija, može biti ekonomski vrlo nepovoljan zbog visoke cijene nafte i relativno velikih investicija potrebnih za gradnju hidroelektrana.)

Stupanj djelovanja energetskog sustava definiran je omjerom ukupno predane energije potrošačima i ukupno utrošene energije u energetskom sustavu. Stupanj djelovanja energetskog sustava ovisi u znatnoj mjeri o stupnju djelovanja energetskih transformacija, pa je najpovoljnije da se što više primarnih oblika energije preda potrošačima u svojem prirodnom stanju.

(Ta direktna predaja, međutim, može izazvati veliku potrošnju energije: razvoženje ugljena, primjerice, do potrošača.)

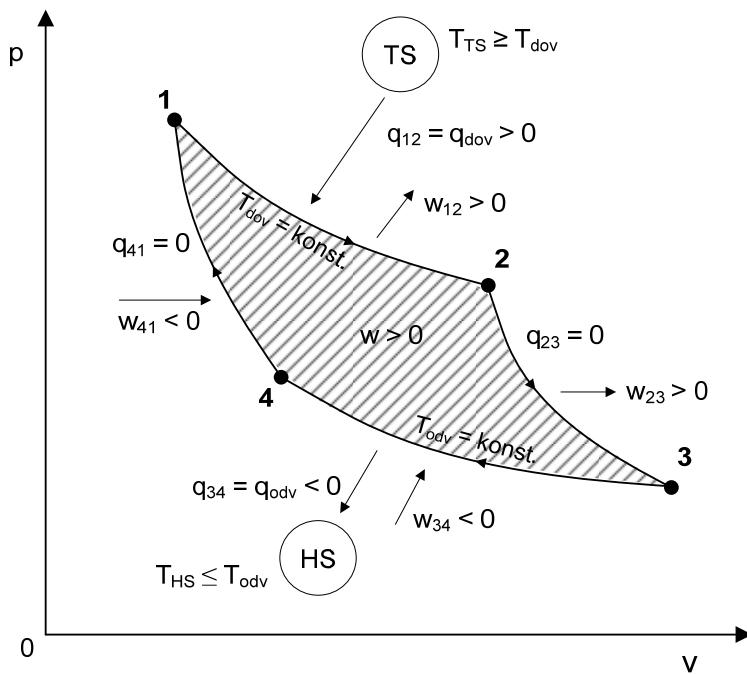
Osim toga na stupanj djelovanja energetskog sustava djeluju gubici u prijenosnim i razdjelnim mrežama (električne, plinske i toplinske mreže). Ako takvih mreža nema, ili ako se mali dio od ukupne energije prenosi i razdjeljuje tim mrežama, bit će povoljniji stupanj djelovanja energetskog sustava. Drugo je pitanje tada hoće li takav energetski sustav, s relativno visokim stupnjem djelovanja, uopće moći zadovoljiti potrebe potrošača; između ostalog to će ovisiti i o strukturi potrošača ali i o njihovim željama s obzirom na udobnost opskrbe energijom.

U stupnju djelovanja energetskog sustava nisu međutim uključeni gubici u postrojenjima i uređajima potrošača za transformacije u korisnu energiju. Takav stupanj djelovanja praktički nije ni moguće odrediti jer se radi o golemom broju postrojenja, uređaja i trošila često vrlo različitih energetskih karakteristika.

Zbog svega je toga nemoguće uspoređivati energetske sustave međusobno, ali je moguće pratiti razvoj pojedinačnih energetskih sustava kako bi se utvrstile tendencije razvoja i provele eventualne korekcije energetske politike.

5.6.4 Carnotov kružni proces

Proučavajući rad stапnih parnih strojeva, dvadesetak godina prije vremena koje se („službeno“) prihvata kao vrijeme postavljanja 1. glavnog stavka termodinamike, zamislio je S. Carnot desnokretni kružni proces, neprovediv u praksi, ali od presudne važnosti za teorijske usporedbe, **Slika 5-14**.



Slika 5-14 Carnotov desnokretni kružni proces

Carnotov se desnokretni kružni proces sastoji od četiri (povratljiva) procesa: dvije izoterme, kada se u kružni proces dovodi toplinska energija (eksergija) i iz kružnog procesa odvodi toplinska energija (anergija), dobiva mehanički rad za vrijeme ekspanzije i ulaze za vrijeme kompresije, i dvije adijabate (dobivanje i ulaganje mehaničkog rada).

Analizirajući rad Carnotovog kružnog procesa zanimat će nas, kao i kod svakog kružnog procesa, količina dobivenog ili utrošenog mehaničkog rada, dovedene i odvedene toplinske energije, temperature, tlakovi i volumeni za vrijeme odvijanja kružnog procesa, te termički stupanj djelovanja.

Izmijenjeni mehanički rad računat ćemo prema jednom od izraza relacije [5.50]:

$$w = \oint pdv = - \oint vdp = q_{dov} + q_{odv} = q_{dov} - |q_{odv}| \text{ J/kg}$$

Primjerice, odredimo dobiveni rad iz Carnotovog desnokretnog kružnog procesa kao razliku dovedene i odvedene toplinske energije. Budući da se toplinska energija i dovodi i odvodi za vrijeme izoternog procesa to vrijedi, prema [5.17]:

$$q_{12} = RT_{dov} \ln \frac{v_2}{v_1} = q_{dov} > 0,$$

odnosno,

$$q_{34} = RT_{odv} \ln \frac{v_4}{v_3} = -RT_{odv} \ln \frac{v_3}{v_4} = q_{odv} < 0.$$

Procesi se između stanja 2 i 3 i stanja 4 i 1 odvijaju kao adijabatski pa vrijedi stoga relacija [5.26]:

$$\frac{T_{dov}}{T_{odv}} = \left(\frac{v_3}{v_2} \right)^{\kappa-1} = \left(\frac{v_4}{v_1} \right)^{\kappa-1}$$

odnosno, za Carnotov kružni proces vrijedi odnos između specifičnih volumena procesa

$$\frac{v_3}{v_2} = \frac{v_4}{v_1} \text{ ili } v_1 v_3 = v_2 v_4 \quad [5.57]$$

pa je dobiveni mehanički rad ($T_{dov} > T_{odv}, w > 0$) jednak razlici između količine dovedene toplinske energije za vrijeme izotermne ekspanzije (između stanja 1 i 2) i odvedene toplinske energije za vrijeme izotermne kompresije (između stanja 3 i 4):

$$w = q_{dov} - |q_{odv}| = RT_{dov} \ln \frac{v_2}{v_1} - RT_{odv} \ln \frac{v_3}{v_4} = R(T_{dov} - T_{odv}) \ln \frac{v_2}{v_1} \text{ J/kg} > 0 \quad [5.58]$$

Zaključujemo da rad dobiven za vrijeme adijabatske ekspanzije (između stanja 2 i 3) mora biti jednak radu uloženom za odvijanje adijabatske kompresije (između stanja 4 i 1). Provjerimo to određujući rad kružnog procesa sumirajući radove pojedinih dijelova procesa. Dobivamo:

$$\begin{aligned} w &= \oint pdv = \int_{v_1}^{v_2} pdv + \int_{v_2}^{v_3} pdv + \int_{v_3}^{v_4} pdv + \int_{v_4}^{v_1} pdv = \\ &= RT_{dov} \ln \frac{v_2}{v_1} + c_v(T_{dov} - T_{odv}) + RT_{odv} \ln \frac{v_4}{v_3} + c_v(T_{odv} - T_{dov}) = R(T_{dov} - T_{odv}) \ln \frac{v_2}{v_1} \end{aligned}$$

Dakako, isti bismo rezultat dobili računamo li rad kružnog procesa i prema izrazu $w = - \oint vdp$. Jedina bi razlika bila, računali bismo sa specifičnom toplinom uz konstantni tlak, c_p , računajući radove adijabatskih procesa u otvorenim sustavima, [5.23].

Odnos tlakova i volumena za vrijeme izotermnih procesa određujemo relacijom [5.13], a termički stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa relacijom [5.53]. Dobivamo:

$$\eta_{tCKP} = \frac{w}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} + q_{odv}}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} - |q_{odv}|}{q_{dov}} = 1 - \frac{|q_{odv}|}{q_{dov}} = 1 - \frac{T_{odv}}{T_{dov}} \quad [5.59]$$

Prema tome je količina toplinske energije koja se u Carnotovom desnokretnom kružnom procesu pretvara u mehanički rad jednaka:

$$w = \eta_{tCKP} q_{dov} = \left(1 - \frac{T_{odv}}{T_{dov}}\right) q_{dov} \text{ J/kg} \quad [5.60]$$

Termički stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa, [5.59], ovisi dakle samo o temperaturama procesa, $\eta_{tCKP} = f(T)$. Je li je to iznenađujući rezultat? Ne. Sustav za vrijeme kružnog procesa ne pretrpljuje nikakve promjene, za razliku od toplinskih spremnika. Logično je stoga da temperature toplinskih spremnika (uz mehaničku i toplinsku izdržljivost

materijala) određuju valjanost (odvajanje eksergije od anergije) odvijanja kružnog procesa. Kružni proces može biti bilo kakav, no da bi se mogao odvijati moraju biti zadovoljeni zahtjevi [5.51] i [5.52]:

$$T_{TS} \geq T_{\max_{KP}} \equiv T_{dov} \text{ i } T_{HS} \leq T_{\min_{KP}} \equiv T_{odv}.$$

Pokazat ćemo kasnije, Carnotov je desnokretni kružni proces najbolji mogući kružni proces, proces s najvećim termičkim stupnjem djelovanja, pa je dakle mjera za sve kružne procese. Drugim riječima, q_{odv} Carnotovog kružnog procesa je q_{odvmin} , minimalna toplinska energija koju se **mora** iz kružnog procesa (Carnotovog kružnog procesa) odvesti u okolicu, pa jer je $|q_{odvmin}| > 0$, termički stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa ne može biti jednak jedan ($\eta_{tCKP} = 1 - \frac{|q_{odv}|}{q_{dov}} = 1 - \frac{T_{odv}}{T_{dov}}$). To slijedi i iz ovakve analize. Vrijedi naime da je uvijek

$T_{odv} \gg 0 \text{ K}$, pa je stoga i termodynamički stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa uvijek manji od 1, $\eta_{tCKP} < 1$. Zašto je $T_{odv} \gg 0 \text{ K}$? T_{odv} mora biti viša od temperature hladnog spremnika, koja pak ne može biti niža od najniže temperature u okolini (temperature zraka, vode ili tla), ne ulaže li se, kao što ćemo pokazati, mehanički rad, jer bi u protivnom toplinska energija iz okoline (sustava okolice) prelazila na hladni spremnik i kružni proces povisujući temperaturu hladnog spremnika i T_{odv} , najnižu temperaturu koju poprima sustav (fluid) podvrgnut kružnom procesu, na temperaturu okoline. T_{odv} je dakle, kao i temperatura hladnog spremnika, ograničena i određena temperaturom okoline, T_{ok} .

(Pretpostavljamo da temperaturu okolice, barem ne u kraćem vremenskom intervalu, ne mijenjamo provodeći energetske procese: $T_{ok} = \text{konst.}$)

Priprema tolog spremnika (ogrjevnog spremnika) košta: radi se o korištenju goriva (fosilnog i nuklearnog), skupljanju Sunčevog zračenja i sl. Poželjno je stoga da je hladni spremnik što jeftiniji, „besplatan“ po mogućnosti. Hladnim spremnikom odabiremo stoga jedan, ili više, od sustava okolice: zrak, vodu ili tlo u okolini.

(Dakako, i to košta: hladni spremnik, zbog dugoročnog (nepovoljnog) toplinskog, kemijskog i radioaktivnog utjecaja na okoliš, nije besplatan.)

Je li je moguće, teoretski barem, postići $\eta_{tCKP} = 1$? Ne, jer nije moguće ostvariti $T_{dov} = \infty$, kao ni, što izriče 3. glavni stavak termodinamike, $T_{HS} (T_{odv}) = 0$ (pa ni uz ulaganje mehaničkog rada).

Zašto se Carnotov kružni proces ne provodi u tehničkoj praksi? U termoelektranama s parnim turbinama, pokazat ćemo, nije praktički moguće ostvariti Carnotov kružni proces, a u termoelektranama s plinskim turbinama ne provodi se (nije ga moguće provesti) jer valja postići vrlo visoke omjere tlakova $p_{\max}/p_{\min} = p_1/p_3$ da bi se ostvario dovoljno visok termički stupanj djelovanja. Naime, taj omjer tlakova traži vrijednosti koje nije moguće ostvariti jer bi se pritom uspostavile temperature koje materijali ne mogu izdržati. Provjerimo tvrdnju. Izrazimo dovedenu i odvedenu toplinsku energiju pomoću pripadajućih vrijednosti tlaka prema relaciji [5.13]:

$$q_{dov} = RT_{dov} \ln \frac{v_2}{v_1} = RT_{dov} \ln \frac{p_1}{p_2} \text{ i } q_{odv} = -RT_{odv} \ln \frac{v_3}{v_4} = -RT_{odv} \ln \frac{p_4}{p_3}.$$

Dobit ćemo.

$$w = R(T_{dov} - T_{odv}) \ln \frac{v_2}{v_1} = R(T_{dov} - T_{odv}) \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Jer vrijedi:

$$\frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{p_2}{p_3} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \text{ odnosno } \frac{p_3}{p_2} = \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} = \left(\frac{T_2}{T_3} \right)^{\frac{-\kappa}{\kappa-1}},$$

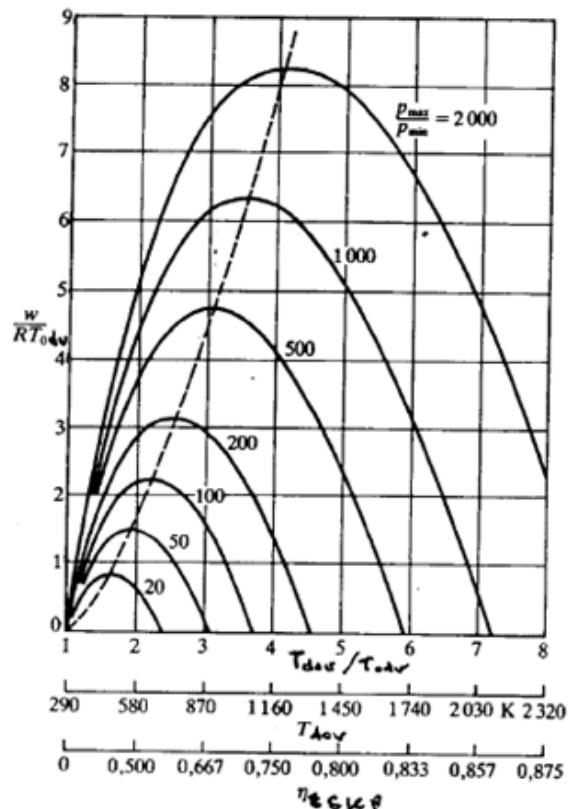
to je

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{p_1}{p_3} \cdot \frac{p_3}{p_2} = \frac{p_{\max}}{p_{\min}} \cdot \left(\frac{T_{dov}}{T_{odv}} \right)^{\frac{-\kappa}{\kappa-1}},$$

pa dobiveni rad Carnotovog kružnog procesa možemo i ovako izraziti:

$$w = R(T_{dov} - T_{odv}) \ln \frac{p_1}{p_2} = RT_{odv} \left(\frac{T_{dov}}{T_{odv}} - 1 \right) \left[\ln \frac{p_{\max}}{p_{\min}} - \frac{\kappa}{\kappa-1} \ln \frac{T_{dov}}{T_{odv}} \right] \quad [5.61]$$

Iz [5.61] može se odrediti ovisnost w/T_{odv} o omjeru temperatura T_{dov}/T_{odv} i o omjeru tlakova p_{\max}/p_{\min} , **Slika 5-15**.



Slika 5-15 Ovisnost omjera w/T_{odv} Carnotovog procesa o omjeru temperatura T_{dov}/T_{odv} za različite omjere tlakova p_{\max}/p_{\min}

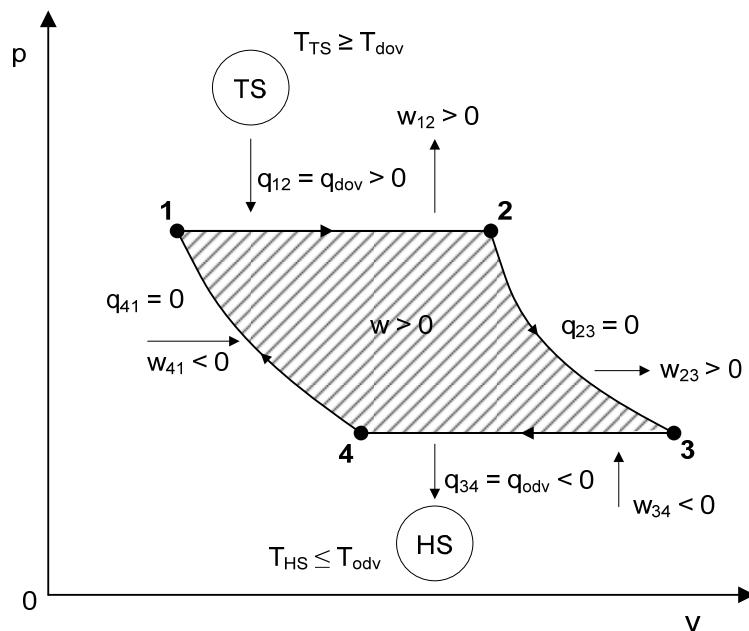
Za svaki se omjer tlakova postiže neka maksimalna vrijednost omjera w/T_{odv} . To ipak ne znači da se za maksimum omjera w/T_{odv} postiže i maksimalni termički stupanj djelovanja, jer on ovisi samo o omjeru temperatura [5.59], ali se za maksimalni omjer w/T_{odv} dobiva takav kružni proces kojim se postiže maksimalni mehanički rad, a to je posljedica činjenice da se ne mogu slobodno odabrati tlakovi p_2 i p_4 kad su zadani tlakovi p_1 i p_3 te temperature T_{dov} i T_{odv} . Ako se dakle želi ostvariti maksimalni mehanički rad, potrebno je za svaki omjer temperatura odabrati odgovarajući omjer p_{\max}/p_{\min} . **Slika 5-15** crtkanom linijom spaja maksimalne vrijednosti krivulja. Tako se može očitati da je za temperaturu $T_{\text{dov}} = 900 \text{ K}$ ($T_{\text{odv}} = 290 \text{ K}$) potreban omjer tlakova $p_{\max}/p_{\min} = 500$ i da se tada postiže termički stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa jednak 0,678.

Pokušaji da se ostvari toplinski stroj s (idealnim) plinom prema Carnotovom desnokretnom kružnom procesu nisu uspjeli pa on danas ima samo teorijsku važnost za usporedbu s tehnički izvedivim procesima.

5.6.5 Joulov kružni proces

Za tehničku je praksi primjenjiv kružni proces sastavljen od dviju izobara i dviju adijabata, **Slika 5-16**. To je proces među stalnim (konstantnim) tlakovima ili Joulov kružni proces.

(U američkoj se literaturi i praksi naziva Braytonovim kružnim procesom).



Slika 5-16 Joulov kružni proces

Dobiveni je rad za vrijeme odvijanja desnokretnog Joulovog kružnog procesa jednak:

$$w = q_{\text{dov}} - |q_{\text{odv}}| = c_p (T_2 - T_1) - c_p (T_3 - T_4) [\text{J/kg}] \quad [5.62]$$

a termički stupanj djelovanja

$$\eta_{\text{JJKP}} = \frac{w}{q_{\text{dov}}} = 1 - \frac{|q_{\text{odv}}|}{q_{\text{dov}}} = 1 - \frac{T_3 - T_4}{T_2 - T_1} = 1 - \frac{T_4}{T_1} \frac{\left(\frac{T_3}{T_4} - 1\right)}{\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)} = 1 - \frac{T_4}{T_1} \quad [5.63]$$

Za Joulov kružni proces vrijedi ovaj odnos između temperatura procesa:

$$T_1 T_3 = T_2 T_4 \quad [5.64]$$

pa je razlomak $\frac{\left(\frac{T_3}{T_4} - 1\right)}{\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)}$ jednak 1.

Naime, procesi su između stanja **2** i **3** i stanja **4** i **1** adijabatski tako da vrijedi relacija [5.26]:

$$\frac{T_1}{T_4} = \left(\frac{p_v}{p_n} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{p_v}{p_n} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \Rightarrow \frac{T_1}{T_4} = \frac{T_2}{T_3} \Rightarrow T_1 T_3 = T_2 T_4$$

Usporedimo sada termičke stupnjeve djelovanja Carnotovog i Joulovog kružnog procesa. Dakako, oba se procesa moraju odvijati u istim okolnostima. Drugim riječima, budući da toplinski spremnici određuju termičke stupnjeve djelovanja kružnih procesa, mora vrijediti:

$T_{\text{maxCKP}} = T_{\text{maxJKP}} = T_{\text{max}}$ i $T_{\text{minCKP}} = T_{\text{minJKP}} = T_{\text{min}}$. No, $T_{\text{maxCKP}} = T_{\text{dov}}$, a $T_{\text{maxJKP}} = T_2$. Slično, $T_{\text{minCKP}} = T_{\text{odv}}$, a $T_{\text{minJKP}} = T_4$, **Slika 5-16**.

Vrijedi dakle:

$$\eta_{\text{tCKP}} = 1 - \frac{T_{\text{odv}}}{T_{\text{dov}}} = 1 - \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} \quad \text{i} \quad \eta_{\text{JJKP}} = \frac{w}{q_{\text{dov}}} = 1 - \frac{T_4}{T_1} = 1 - \frac{T_{\text{min}}}{T_1}.$$

Jer temperatura T_1 nije najviša temperatura u Joulovom kružnom procesu, $T_1 < T_{\text{maxJKP}} = T_2$, to je termički stupanj djelovanja Joulovog kružnog procesa manji od termičkog stupnja djelovanja Carnotovog kružnog procesa: $\eta_{\text{JJKP}} < \eta_{\text{tCKP}}$.

Dvije su najvažnije primjene Joulovog kružnog procesa u termoelektranama s plinskim turbinama, odnosno u termoelektranama sa spojnim procesima, i za pogon reaktivnih (mlaznih) motora velikih zrakoplova.

U termoelektranama s plinskim turbinama Joulov se kružni proces ostvaruje prema slikama 3-41 i 3-42 s time da se toplinska energija što se dovodi u kružni proces dobiva transformacijom iz kemijske energije goriva ili nuklearne energije nuklearnog goriva. U zatvorenom se procesu djelatna tvar (plin) i niži tlak, p_n , mogu odabrati prema potrebi, a u otvorenom je procesu djelatna tvar okolni zrak pa je dakle $p_n = p_{\text{ok}}$.

Plinska se turbina međutim u otvorenom procesu upotrebljava učestalije za pogon zrakoplova (reaktivnog motora) nego li kao dio stacionarnog postrojenja u kojemu se proizvodi električna energija ili za neposredni pogon nekog stroja. Pritom u turbini smjesa

plinova izgaranja i zraka ekspandira samo djelomično do nekog tlaka, koji je viši od onog u okolini, jer treba proizvesti samo onoliku snagu kolika je potrebna za pogon kompresora. Preostali se dio entalpije, uz ekspanziju do tlaka okoline, transformira u kinetičku energiju u izlaznoj sapnici (to može biti i de Lavalova sapnica) tako da plinovi izgaranja izlaze brzinom (mnogo) većom od brzine zrakoplova. Zbog toga se pojavljuje „sila reakcije“ (o toj ćemo sili kasnije detaljno govoriti) koja omogućuje let zrakoplova. Ta je sila (zadovoljavajuće) približno jednaka (točnu silu odredit ćemo kasnije; radi se naime o gibanju sustava s promjenljivom masom):

$$\vec{F} \approx -\dot{m}(\vec{c}_{izplinova} + \vec{c}_{zrakoplova}) [N].$$

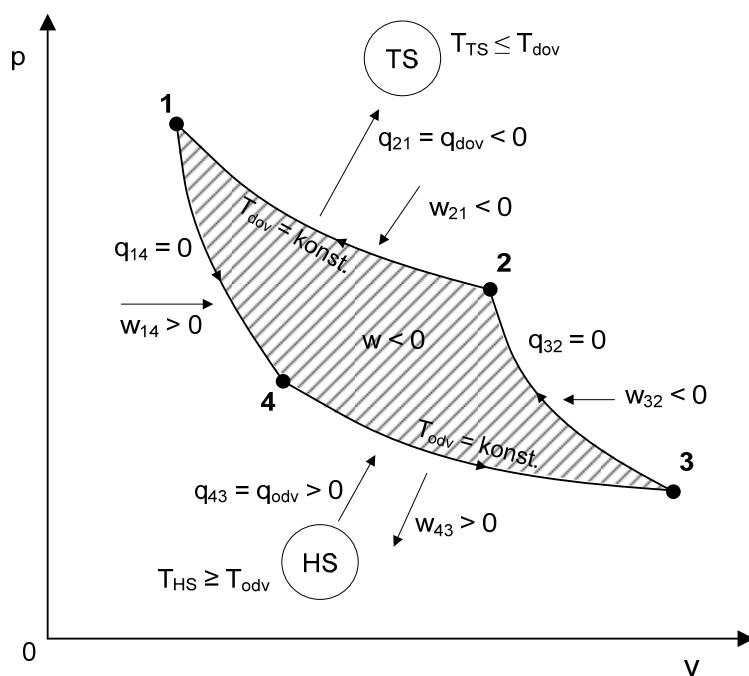
Predznak minus naznačuje da je smjer sile suprotan smjeru vektorskog zbroja brzina.

(Brzine dakako, jer se radi o vektorima, moramo zbrajati vektorski; u promatranom slučaju one su suprotnog smjera.)

Očito, što je veća izlazna brzina plinova, to zrakoplov (raketa) može uz istu potrošnju goriva, \dot{m} [kg/s], brže letjeti i dalje doletjeti. otuda i velika važnost konstrukcije i izvedbe de Lavalove sapnice.

5.6.6 Ljevokretni kružni procesi

Razmotrimo sada mogućnosti provođenja ljevokretnih kružnih procesa i njihovu uporabu. U načelu svaki se desnokretni kružni proces može odvijati i kao ljevokretni; nužan će uvjet i sada biti postojanje dvaju toplinskih spremnika. Ilustracije radi, promatrajmo realizaciju ljevokretnog Carnotovog kružnog procesa, **Slika 5-17**. Zadržat ćemo (namjerno) oznake i parametre tog kružnog procesa jednake onima desnokretnog Carnotovog kružnog procesa, **Slika 5-14**; bit će kasnije jasno zašto.



Slika 5-17 Ljevokretni Carnotov kružni proces

Početno stanje kružnog procesa neka je stanje **1**. I dok desnokretni kružni proces započinje s izotermnom ekspanzijom između stanja **1** i **2**, ljevokretni će započeti adijabatskom ekspanzijom između stanja **1** i **4**. Za vrijeme tog procesa dobiva se mehanički rad. (*U slučaju desnokretnog kružnog procesa odvijala se adijabatska kompresija između stanja **4** i **1**, dakle dovodenje mehaničkog rada u kružni proces.*) Nakon toga se u ljevokretnom kružnom procesu odvija izotermna ekspanzija (dobivanje mehaničkog rada) na temperaturi T_{odv} . Da bi takav proces bio moguć, mora se u kružni proces dovoditi toplinska energija. Budući da je proces zamišljen tako da se toplinska energija dovodi iz hladnog spremnika, tj., toplinskog spremnika niže temperature, mora temperatura T_{odv} biti niža od temperature hladnog spremnika, odnosno u graničnom slučaju jednaka: $T_{\text{odv}} \leq T_{\text{HS}}$. Toplinska se energija dovodi u kružni proces, ona je dakle pozitivnog predznaka, i trebali bismo je označiti s q_{dov} . No, jer smo, kada smo razmatrali desnokretnе kružne procese, toplinsku energiju koja se izmjenjuje između kružnog procesa i hladnog spremnika označili s q_{odv} , a onu koja se izmjenjuje između kružnog spremnika i toplog spremnika s q_{dov} , zadržat ćemo te oznake i u slučaju odvijanja ljevokretnog kružnog procesa znajući da se sada, u slučaju ljevokretnog kružnog procesa, q_{odv} dovodi u kružni proces.

(*Zašto postupamo tako? Jer ćemo u tom slučaju, pokazat ćemo, iste izraze moći rabiti kako za desnokretnе tako i za ljevokretnе kružne procese.*)

Nakon izotermne ekspanzije slijedi adijabatska kompresija, ulaganjem mehaničkog rada, između stanja **3** i **2**, da bi se izotermnom kompresijom, temperature T_{dov} , između stanja **2** i **1**, ljevokretni kružni proces vratio u početno stanje. Izotermna je kompresija moguća samo odvodi li se toplinska energija iznosa q_{dov} iz procesa. Tu toplinsku energiju mora preuzeti topni spremnik, toplinski spremnik više temperature, pa dakle mora vrijediti ovaj odnos između temperatura: $T_{\text{dov}} \geq T_{\text{TS}}$. Predznak je međutim te toplinske energije negativan, ona se odvodi iz procesa uz istodobno ulaganje mehaničkog rada kompresije. Budući da se radovi adijabatskih procesa međusobno poništavaju, mehanički je rad ljevokretnog kružnog procesa očito negativan i jednak razlici dobivenog mehaničkog rada za vrijeme izotermne ekspanzije i utrošenog mehaničkog rada za vrijeme odvijanja izotermne kompresije:

$$\begin{aligned} w &= \oint pdv = - \oint vdp = q_{\text{dov}} + q_{\text{odv}} = q_{\text{odv}} - |q_{\text{dov}}| = = RT_{\text{odv}} \ln \frac{v_3}{v_4} - RT_{\text{dov}} \ln \frac{v_2}{v_1} \\ &= R(T_{\text{odv}} - T_{\text{dov}}) \ln \frac{v_2}{v_1} \quad [\text{J/kg}] \end{aligned} \quad [5.65]$$

Jer je $T_{\text{dov}} > T_{\text{odv}}$, to je $w < 0$, ali je i sada mehanički rad utrošen na odvijanje ljevokretnog kružnog procesa jednak (proporcionalan) ploštinu površine kružnog procesa u p,v-dijagramu. Da bi se dakle mogao provoditi ljevokretni kružni proces nužno je prema rečenome raspolagati s mehaničkim radom i toplinskim spremnicima temperatura koje određuju temperature u ljevokretnom kružnom procesu: $T_{\text{HS}} \geq T_{\text{odv}}$ i $T_{\text{TS}} \leq T_{\text{dov}}$. Rezultat je odvijanja ljevokretnog kružnog procesa manjak unutrašnje kaloričke energije u hladnom a višak u toplog spremniku: ljevokretnim kružnim procesom „dižemo“ toplinsku energiju s niže temperature hladnog spremnika na višu temperaturu toplog spremnika što nije prirodan smjer strujanja toplinske energije. Uređaji u kojima se provodi ljevokretni kružni proces nazivaju se stoga rashladnim strojevima (hladnjacima) jer oduzimajući toplinsku energiju jednom (hladnom) toplinskom spremniku snižavamo njegovu temperaturu, odnosno i dizalicama topline (toplinskim pumpama) jer predajući toplinsku energiju drugom (toplom)

toplinskom spremniku povisujemo njegovu temperaturu. Naime, temperature se T_{odv} i T_{dov} kod takvih uređaja, prilagođene izboru hladnog i toplog spremnika, postavljaju odgovarajući potrebama. U slučaju hladnjaka hladni je spremnik unutrašnjost hladnjaka, a topli spremnik okolica. Utroškom mehaničkog rada smanjujemo količinu (gustoću) unutrašnje kaloričke energije u hladnjaku (odvođenjem toplinske energije u okolicu) i zbog toga se snižava temperatura u hladnjaku. Možemo međutim, što je s energetskog stajališta zanimljiviji ljevokretni kružni proces, podići temperaturnu razinu tako da je okolica hladni spremnik, a topli će nam spremnik onda biti prostorija (prostorije) koju (koje) treba grijati. U tom ćemo slučaju „dizati“ toplinsku energiju iz okolice (toplinsku energiju nastalu transformacijom iz unutrašnje kaloričke energije okolice) predajući je u unutrašnjost grijanih prostorija. Način rada takvog uređaja (kružnog procesa), „dizalice topline“, ne razlikuje se od rada nekog rashladnog stroja samo što je smještaj temperatura viši, a toplinska se energija ne predaje okolici nego se oduzima od nje. Npr., zamislimo zimski dan s niskom temperaturom, - 20°C; jezero pokraj kuće „okovano“ je debelim ledom. No, ispod leda, dostupna voda neka je temperature 2°C. Raspolažemo s dizalicom topline i želimo temperaturu prostorija kuće održavati na 20°C. Dakle je: $T_{odv} = 275,15$ K, a $T_{dov} = 293,15$ K. Zanima nas utrošak mehaničkog rada (električne energije) i količina toplinske energije kojom ćemo grijati kuću. U idealnom slučaju (promatramo Carnotov ljevokretni kružni proces) dobivamo, jer vrijedi za Carnotov kružni proces $\frac{w}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} + q_{odv}}{q_{dov}} = \frac{T_{dov} - T_{odv}}{T_{dov}}$, zanimaju li nas samo absolutne vrijednosti izmijenjenih energija:

$$|q_{dov}| = |w| \frac{T_{dov}}{T_{dov} - T_{odv}} \text{ odnosno}$$

$$\frac{|q_{dov}|}{|w|} = \frac{T_{dov}}{T_{dov} - T_{odv}} = \frac{293,15}{293,15 - 275,15} \approx 16,29. \quad [5.66]$$

Drugim riječima, utroškom 1 kWh električne energije (eksergije) za pogon dizalice topline kuću bismo grijali sa 16,29 kWh toplinske energije. (Jasno, neposrednim grijanjem električnim otpornikom (električnom peći), dobili bismo samo 1 kWh toplinske energije.)

Omjer se $\frac{|q_{dov}|}{|w|}$ (često) naziva faktorom preobrazbe.

Dakako, razmatrali smo idealni slučaj; u realnosti postižu se (najveći) omjeri $\frac{|q_{dov}|}{|w|}$ oko 7, 8.

(Postavlja se pitanje zašto se dizalice topline ne rabe više. Zato jer se još uvijek radi, ne može li se iskorištavati geotermalna energija, u usporedbi s cijenom energije, o preskupim uređajima čije je održavanje isto tako skupo. Iskorištava li se međutim geotermalna energija, dizalice topline mogu biti isplative. U tom slučaju naime faktor se preobrazbe enormno povećava budući da je razlika između temperatura T_{dov} i T_{odv} bliska nuli pa omjer $\frac{|q_{dov}|}{|w|} = \frac{T_{dov}}{T_{dov} - T_{odv}}$ teži prema beskonačnom.)

Obrazložimo sada zašto smo inzistirali na zadržavanju istih oznaka bez obzira radi li se o desnokretnom ili ljevokretnom kružnom procesu, odnosno zašto smo q_{dov} povezivali s

toplom spremnikom, bez obzira dovodi li mu se ili odvodi toplinska energija, a q_{odv} s hladnim spremnikom, bez obzira na stvarni smjer prijelaza toplinske energije. Razlog je jer u tom slučaju (ista) relacija, $w = q_{dov} + q_{odv}$, vrijedi i za desnokretni i za ljevokretni kružni proces.

(U suprotnom morali bismo rabiti dva izraza, ovisno o tome koji kružni proces analiziramo.)

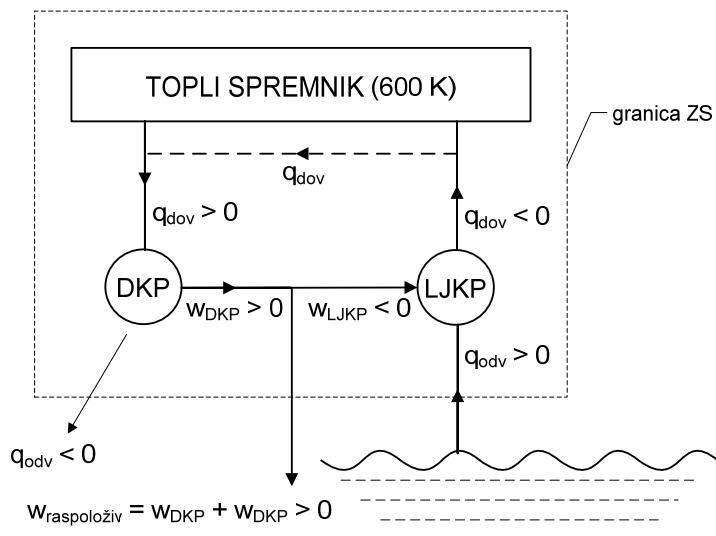
Naime, u slučaju desnokretnog kružnog procesa vrijedi: $w = q_{dov} + q_{odv} > 0$ budući da je $q_{dov} > 0$ pa je i $w > 0$, mada je $q_{odv} < 0$, jer je $q_{dov} > |q_{odv}|$, **Slika 5-14**. Radi li se o ljevokretnom kružnom procesu, to je $w = q_{dov} + q_{odv} < 0$ jer je sada $q_{dov} < 0$ pa je i $w < 0$, mada je sada $q_{odv} > 0$, jer i u slučaju ljevokretnog kružnog procesa vrijedi relacija $|q_{dov}| > q_{odv}$, **Slika 5-17**.

6 Ograničenja pretvorbama oblika energije u ekserviju (mehanički rad)

Drugi glavni stavak termodinamike, entropija, gubici mehaničkog rada, ekservija oblika energije, određivanje ekservije

S uspostavljanjem se ljevkretnog kružnog procesa, činilo se, ostvaruje san inženjera: raspolaganje s praktički beskonačnim, ako već ne besplatnim, a ono vrlo jeftinim količinama energije (unutrašnje kaloričke energije) akumulirane u okolini (zraku, vodama i tlu okoline), na temperaturi i tlaku okolice, koja se uz to još i neprekidno obnavlja i nadoknađuje dozračivanjem golemih količina Sunčeve energije i radioaktivnim raspadanjem u unutrašnjosti Zemlje. Treba se samo poslužiti njome i svi će strojevi raditi crpeći tu energiju: brodovi će ploviti morima koristeći se, izvan svake sumnje, bezmalo neiscrpnim količinama akumulirane unutrašnje kaloričke energije mora, zrakoplovi će na isti način letjeti zrakom, vlakovi, automobili crpit će tu energiju iz tla ili zraka, kao i svi ostali nebrojeni uređaji i strojevi. Valja samo povezati rad dvaju kružnih procesa: ljevkretnog i desnokretnog, Slika 6-1.

(I ne samo to. Nastupanjem zime, kao što to svatko zna, oslobadaju se nepregledne količine energije („latentna toplina“) smrzavanjem voda mora, jezera, rijeka i potoka: 334 kJ po 1 kg smržnute vode. Zašto je ne iskoristiti za pogon elektrana koje bi, izgradene na obali, recimo Norveškog mora, u kružnom procesu iskoristavale tu energiju pretvarajući je u električnu energiju?)



Slika 6-1 Perpetuum mobile druge vrste

Toplinskom ćemo pumpom (ljevkretnim kružnim procesom) unutrašnju kaloričku energiju mora (hladnog spremnika) pretvarati u toplinsku energiju koju ćemo zatim odvoditi (predavati) u neki topli spremnik (ili izravno u desnokretni kružni proces, Slika 6-1). U toplom će se spremniku dovedena toplinska energija pretvarati u unutrašnju kaloričku energiju održavajući temperaturu spremnika konstantnom, npr., 600 K. Izvan svake je sumnje, takav je ljevkretni kružni proces i moguć i ostvariv; jedino, dakako, za pogon

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

toplinske pumpe (ljevokretnog kružnog procesa) treba raspolagati s mehaničkim radom. No, taj će nam rad osiguravati desnokretni kružni proces koji će unutrašnju kaloričku energiju toplog spremnika, pretvorenu ponovno u toplinsku energiju, pretvarati u mehanički rad. Dio će se tog rada iskoristiti za pogon toplinske pumpe, a dio će nam ostati na slobodnom raspaganju. Koliki dio? Pretpostavimo li da se u desnokretnom kružnom procesu sva toplinska energija pretvara u mehanički rad (*princip očuvanja energije, 1. glavni stavak termodinamike, ne osporava takvu mogućnost: $q_{12} = q_{dov} = w_{12} + \delta u = w_{12} / \delta u = 0$ – radi se o kružnom procesu/*), taj će dio biti, budući da vrijede relacije (sada je vidljivo zašto smo inzistirali na istim oznakama za ljevokretni i desnokretni kružni proces)

$$w_{IJKP} = q_{dov} + q_{odv} < 0 \quad [6.1]$$

(pritom je $q_{dov} < 0$, a $q_{odv} > 0$; radi se o ljevokretnom kružnom procesu: q_{dov} je toplinska energija odvedena iz hladnog spremnika (mora) i dovedena u ljevokretni kružni proces, a q_{odv} je toplinska energija koja se odvodi iz ljevokretnog kružnog procesa i predaje toplom spremniku /desnokretnom kružnom procesu/)

$$w_{DKP} = q_{dov} > 0, \quad [6.2]$$

(sada je $q_{dov} > 0$ budući da se radi o desnokretnom kružnom procesu: to je toplinska energija dovedena iz toplog spremnika, ili direktno iz ljevokretnog kružnog procesa /toplinske pumpe/, u desnokretni kružni proces),

bit će ukupno dobiveni rad (raspoloživi rad):

$$w_{raspoloziv} = w_{DKP} + w_{IJKP} = q_{odv} > 0. \quad [6.3]$$

w_{raspoloziv} je pozitivan, jer je $q_{odv} > 0$, što znači da bismo iz kombiniranog pogona ljevokretnog i desnokretnog kružnog procesa mogli dobivati mehanički rad.

Odnosno, mehaničkog bismo rada trebali moći dobivati u količinama po želji velikim pretvaranjem iz unutrašnje kaloričke energije mora ne morajući pritom kupovati i trošiti (skupo) gorivo. Naime, kombinaciju ljevokretnog i desnokretnog kružnog procesa možemo smatrati zatvorenim sustavom, Slika 6-1: granice tog sustava očito ne prelazi masa (gorivo) za vrijeme opisanog procesa.

No, govorili smo o tome, izgleda da nije moguće svu toplinsku energiju (u kružnom procesu) pretvoriti u mehanički rad. Ništa zato. I nadalje će se zajednički rad kružnih procesa i više nego li isplatiti: i nadalje ne ćemo morati trošiti nikakve druge energente (goriva) tako dugo dok je ispunjena nejednakost:

$$q_{odv} > |q'_{odv}|. \quad [6.4]$$

Pritom je q_{odv} , kao i dosad, toplinska energija koja se dovodi u ljevokretni kružni proces ($q_{odv} > 0$), a q'_{odv} toplinska energija što se iz desnokretnog kružnog procesa odvodi u okolicu ($q'_{odv} < 0$).

Vrijedit će naime sada:

$$w_{IJKP} = q_{dov} + q_{odv} \text{ i } w_{DKP} = q_{dov} + q'_{odv}, \text{ odnosno,}$$

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

$$W_{\text{raspoloživ}} = W_{\text{DKP}} + W_{\text{IJKP}} = q_{\text{odv}} + q'_{\text{odv}} = q_{\text{odv}} - |q'_{\text{odv}}| > 0. \quad [6.5]$$

Nažalost, do danas, takvi uređaji, strojevi koji bi kombinirali rad ljevkretnog i desnokretnog kružnog procesa i pretvarali unutrašnju kaloričku energiju okoline u mehanički rad, odnosno elektrane koje bi energiju oslobođenu smrzavanjem voda pretvarale u električnu energiju, nisu izgrađeni. (Pokušaji njihovih ostvarenja nazvani su „perpetuum mobile druge vrste“.)

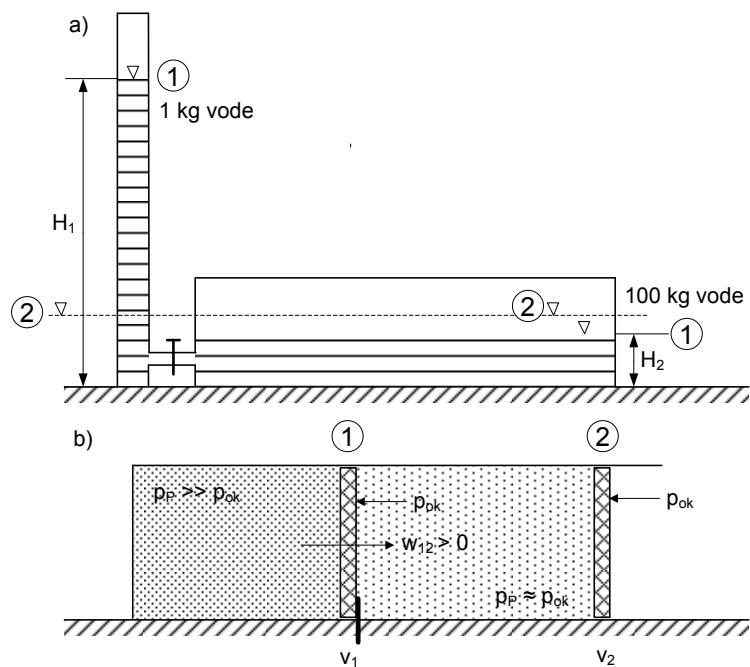
Nameće se dakako pitanje: zašto? Je li je razlog nedostatan tehnički odnosno tehnološki razvoj ili se radi o nekom od osnovnih principa (zakona) prirode koji onemogućuju materijalizaciju opisanih ideja? Da bismo odgovorili na postavljena pitanja, odgovorimo prvo na pitanje kada je uopće moguće energiju akumuliranu u nekom sustavu pretvoriti u mehanički rad (eksergiju)?

6.1 O mogućnostima pretvorbi oblika energije u mehanički rad (eksergiju)

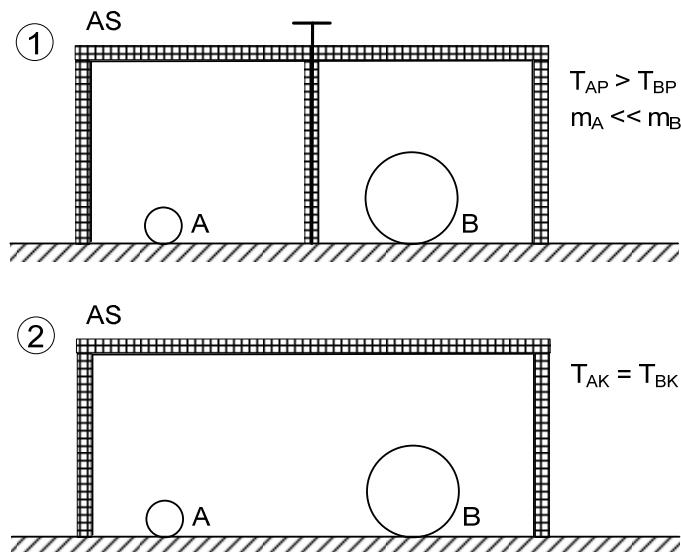
Razmotrimo tri procesa (događanja) koja su nam iskustveno dobro poznata, Slika 6-2. U prvom, Slika 6-2 a), promatramo dvije posude povezane pri dnu s vodoravnom cijevi u koju je ugrađen ventil koji prekida ili omogućuje vezu između posuda. Početno ventil je zatvoren, a razina je vode u posudama označena brojkom 1 (početno stanje sustava koji izgrađuju dvije spojene posude).

U drugom primjeru, Slika 6-2 b), promatrajmo cilindar s početno zakočenim stапом, stanje 1. U cilindru se nalazi plin pod tlakom većim od tlaka okoline: $p_p > p_{\text{ok}}$.

I, konačno, u trećem primjeru promatramo adijabatski spremnik krutih stijenki podijeljen u dva dijela adijabatskom pregradom. U jednom se dijelu nalazi kuglica A, temperature T_{Ap} , a u drugom kugla B, temperature T_{Bp} , Slika 6-2 c). Pritom neka vrijedi odnos: $T_{Ap} > T_{Bp}$, stanje 1.



**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**



Slika 6-2 Izjednačavanje početno nejednolike raspodjele gustoće energije

Što će se dogoditi otvorimo li ventil, otkočimo li stap, odnosno uklonimo li adijabatsku pregradu?

Istog će trenutka voda započeti teći iz lijeve u desnu posudu i teći će do trenutka izjednačavanja razine vode u obje posude, stanje 2, stap će se pomicati u desno do položaja 2 (kada će tlak u spremniku postati jednak tlaku okoline, p_{ok}) i zatim se zaustaviti, dok će se temperatura kuglice A snizavati, do neke temperature T_{Ak} , koja se zatim više ne će mijenjati, a temperatura će kugle B rasti do temperature T_{Bk} koja se isto tako više ne će mijenjati; lako je ustanoviti da su te temperature jednake: $T_{Ak} = T_{Bk} = T_k$.

Opisani su nam procesi (događanja) toliko dobro poznati da nitko, tko ima i najmanjeg iskustva sa svijetom, ne će posumnjati da je svjedočio spontanim i neizbjegivim procesima (događanjima). Primjerice, kad bismo otvorili ventil i voda ne bi potekla iz lijeve u desnu posudu, zaključili bismo da su ventil ili cijev ili oboje začepljeni. Ukoliko bi pak voda iz desne posude počela prelaziti u lijevu, zaključili bismo da je morala biti upotrijebljena pumpa. Kad bi ventil i cijev bili neosporno otvoreni i kad bi bilo jasno da nema nikakve pumpe, a voda ne bi potekla iz lijeve u desnu posudu ili, još više zbumujuće, kad bi potekla u suprotnom smjeru, prepoznali bismo zbivanje čuda.

(Da na filmu gledamo takav tijek rode, bili bismo sigurni da se film prikazuje unatrag.)

O sličnom bi se čudu radilo i kad bi se stap u cilindru počeo sam od sebe pomicati s položaja 2 u 1 komprimirajući plin, odnosno ukoliko bi se, u adijabatskom sustavu, kugla B, temperature T_k , sama od sebe počela hladiti a kuglica A, temperature T_k , zagrijavati, ili obratno; u analima čovječanstva međutim ne postoje svjedočanstva ma i o jednom takvom čudu.

Što je zajedničko opisanim procesima (događanjima)?

Početno nejednolika raspodjela gustoće energije akumulirane u posudama, u cilindru sa stапом i okolicu (okolnom zraku), kao i u kuglici i kugli, i zatim spontani (samonikli, samopotičajni, samopokretni, samoodržavajući) proces promjene, uklone li se ograničenja poput zatvorenog ventila, zakočenog stapa ili adijabatske pregrade, nejednolike raspodjele

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

gustoće energije u jednoliku. I zapravo sva se zbivanja, svi procesi koji se odvijaju u našem svijetu, odvijaju samo zbog početno nejednolike raspodjele gustoće energije, a odvijaju se tako da se transformacijama i zatim strujanjem energije (prijelazom energije) izjednačuju gustoće energije najrazličitijih sustava ili prostora. U svijetu kojem živimo energija struji samo zbog postojećih razlika u gustoći pokrećući pritom sva, doslovce sva, zbivanja i sve promjene sudjelujući i sama u tim promjenama.

(Energija je stoga najvažnije svojstvo koje svijet (svemir) posjeduje pa mnogi smatraju da je princip očuvanja energije najosnovniji princip (zakon) prirode.)

Djelići energije struje od jednog mjesta na drugo, od jednog sustava (tijela) do drugog, mijenjajući pritom oblik. To znači da se moramo zapitati što je to što pokreće energiju da se ponaša na ovaj ili onaj način? Uzrok je, očito, u tome što je energija rasprostranjena na Zemlji (u svemiru) nejednoliko; na nekim je mjestima koncentriranija, na drugim manje koncentrirana. Cijeli se tijek dijelova energije od jednog mjesta na drugo, od jednog sustava (tijela) do drugog, transformacija iz jednog u drugi oblik, odvija tako da se zadovolji tendencija izjednačavanja početno nejednolike raspodjele gustoće energije. (*Dakako, postavlja se odmah pitanje zašto je energija nejednoliko raspoređena i zašto postoji tendencija izjednačavanja raspodjele gustoće energije? Odgovorit ćemo ubrzano na ta pitanja.*) Upravo se samo i jedino tijek energije (strujanje, prijelaz energije), koji nejednoliku raspodjelu gustoće energije pretvara u jednoliku, može upotrijebiti za obavljanje (mehaničkog) rada i izazivanja svih promjena koje vidimo da se događaju; svih promjena koje povezujemo sa Zemljom, sa životom, s razumom, sa svemirom kakvoga poznajemo.

Očito, radi se o nejednolikoj raspodjeli **gustoće** oblika energije a ne o **ukupnim količinama** energije; u lijevoj je posudi naime pohranjena manja količina gravitacijske potencijalne energije nego li u desnoj:

$$m_{\text{lijeva}} \cdot g \cdot \frac{H_1}{2} = 1 \text{ kg} \cdot g \cdot \frac{H_1}{2} < m_{\text{desna}} \cdot g \cdot \frac{H_2}{2} = 100 \text{ kg} \cdot g \cdot \frac{H_2}{2},$$

no gustoća je gravitacijske potencijalne energije u lijevoj posudi veća od gustoće u desnoj posudi:

$$g \cdot \frac{H_1}{2} > g \cdot \frac{H_2}{2}.$$

Isto vrijedi i za ostala dva promatrana događaja: količina je unutrašnje kaloričke energije akumulirane u okolici, $U_{\text{ok}} = m_{\text{ok}} \cdot u_{\text{ok}} = m_{\text{ok}} \cdot c_v \cdot T_{\text{ok}}$, odnosno u kugli B, $U_B = m_B \cdot u_B = m_B \cdot c \cdot T_{Bp}$, (neusporedivo) veća od količine unutrašnje kaloričke energije akumulirane u cilindru sa stapom ($m_{\text{ok}} >> m_{\text{plina}}$ u cilindru) odnosno unutrašnje kaloričke energije akumulirane u kuglici A, $U_A = m_A \cdot u_A = m_A \cdot c \cdot T_{Ap}$ ($m_B >> m_A$), no gustoća je unutrašnje kaloričke energije akumulirana u cilindru veća od gustoće unutrašnje kaloričke energije akumulirane u okolici ($m_{\text{ok}} >> m_{\text{plina}}$; $m_{\text{ok}} \approx \infty$), kao i gustoća unutrašnje kaloričke energije akumulirane u kuglici A u odnosu na kuglu B:

$$u_A = \frac{U_A}{m_A} = c \cdot T_{Ap} > u_B = \frac{U_B}{m_B} = c \cdot T_{Bp}, \text{ jer } T_{Ap} > T_{Bp},$$

pa zbog toga energija struji iz lijeve u desnu posudu, iz cilindra u okolicu, odnosno iz kuglice A u kuglu B, sve do trenutka izjednačenja gustoće energije u posudama, cilindru i okolicu,

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

odnosno u kuglici i kugli. Nakon izjednačenja gustoća energije prestaje strujanje (prijelaz) energije, prestaje svako zbijanje, svaka promjena, sustavi se ponašaju kao da su zamrznuti u prostoru i vremenu.

Procesi su izjednačavanja gustoća energije, čini se, jednosmjerni: odvijaju se, samopotičajno i samoodržavajuće, iskustvo to potvrđuje, samo u jednom smjeru, ne i u obratnom. Energija strui, sama od sebe, odnosno energetski se procesi odvijaju samo tako da se (sumarno) izjednačuju početno nejednolike raspodjele gustoće energije. U makroskopskim (energetskim) sustavima do dana današnjeg nije zabilježen suprotan proces: samoodvijajući proces koji bi rezultirao povećanjem gustoće energije pojedinih sustava, ili dijelova sustava, na račun smanjenja gustoće energije drugih.

Procesi su izjednačavanja nepovratljivi (nepovratni, ireverzibilni). Što to znači? Nepovratljivost (nepovratnost, ireverzibilnost) ne znači da sustav ne možemo vratiti u početno stanje već da ćemo, vraćajući sustav u početno stanje (primjerice vodu u lijevu posudu, stap u početni položaj, kuglicu i kuglu na početne temperature), odnosno uspostavljući početnu nejednoliku raspodjelu gustoće energije, uzrokovati trajnu i zabilježivu promjenu u sustavu ili okolini, odnosno i u sustavu i okolini. Naime, da bismo isteklu vodu vratili u lijevu posudu, da bismo stap vratili u početni položaj, moramo obaviti mehanički rad: svladavati silu težu odnosno silu tlaka. Potrebni mehanički rad osigurat će nam odvijanje desnokretnog kružnog procesa koje će, međutim, uzrokovati i trajnu, zabilježivu promjenu u okolini (sustavima u okolini): manjak unutrašnje kaloričke energije u toplojem spremniku i višak u hladnom. Slično, da bismo kuglicu A zagrijali na njezinu početnu temperaturu, i pritom kuglu B ohladili na njezinu početnu temperaturu, morat ćeće oduzimati toplinsku energiju, nastalu transformacijom unutrašnje kaloričke energije, kugli B i predavati je kuglici A. Za to će nam biti nužno potreban ljevokretni kružni proces, dakle i mehanički rad kojeg ćemo i opet morati osigurati desnokretnim kružnim procesom izazivajući opisane promjene.

Što, međutim, postavimo li u cijev između posuda vodnu turbinu, osiguramo li da stap prilikom ekspanzije plina u cilindru obavi rad svladavajući neku (promjenljivu) silu (uz konstantnu silu tlaka okoline kojom okolni zrak djeluje na stap), odnosno postavimo li u struju toplinske energije između kuglice A i kugle B desnokretni kružni proces?

U tim bismo slučajevima onda, ispunjenjem određenih uvjeta (povratljivim procesima), o kojima ćemo govoriti, dobili mehanički rad, pretvorbom iz ekservije struje energije kojom se uravnotežuje početno nejednolika raspodjela gustoće energije, količina dostatnih da istu količinu vode, kojom je izjednačena razina u posudama, vratimo u lijevu posudu, na početni položaj, da komprimiramo plin vraćajući stap u početni položaj, odnosno da pogoneći ljevokretni kružni proces uspostavimo početne temperature kuglice A i kugle B. Pritom u okolini, kao i u sustavima, ne bismo uzrokovali nikakve promjene; bilo bi nemoguće utvrditi jesu li se, bezbroj puta, ili uopće ne, odvijali opisani procesi: izjednačavanje početno nejednolike raspodjele gustoće energije i zatim uspostava početnog stanja. Uz koji uvjet? Takvi bi procesi morali biti povratljivi (povratni), reverzibilni procesi: procesi u kojima se ne bi ni najmanji dio ekservije (mehaničkog rada) pretvorio u anergiju. Bili bi to onda procesi koji bi se mogli odvijati kako u jednom tako i u drugom, suprotnom smjeru ne uzrokujući nikakve promjene u okolini (i sustavima). U svijetu kojem živimo međutim, nažalost, golema većina procesa nisu povratljivi (povratni) već nepovratljivi (nepovratni): u promatranim slučajevima, zbog pojave trenja (nepovratljivi proces, pokazat ćemo) u prva dva slučaja, odnosno zbog „nepovratljivog prijelaza“ toplinske energije (što to znači pokazat ćemo

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

kasnije), dio će se ekservije (dobivenog mehaničkog rada) pretvoriti u anergiju; bez nadoknađivanja tog dijela (provodenja desnokretnih kružnih procesa, time i uzrokovanja promjena u okolini) početno se stanje ne može uspostaviti: nedostaje nam mehaničkog rada da svu vodu koja je prešla u desnu posudu vratimo u lijevu, da komprimiramo plin na početni tlak, odnosno da pomoći ljevokretnog kružnog procesa postignemo početne temperature kuglice i kugle. Zaostaju dakle trajne, uočljive i zabilježive promjene u sustavima. Želimo li pak otkloniti te promjene, mehanički rad što nam nedostaje morat ćemo nadoknaditi desnokretnim kružnim procesom uzrokujući zbog toga neopozive promjene u toplinskim spremnicima (u okolini sustava). Drugim riječima, procesi su uspostavljanja jednolike raspodjele gustoće energije, a to su zapravo (i isključivo) jedini procesi što se odvijaju u našem makroskopskom svijetu, nepovratljivi procesi: procesi koji uzrokuju smanjivanje raspoloživih količina ekservije.

No, zašto se u našem svijetu neprestano odvijaju (energetski) procesi uspostavljanja jednolike raspodjele gustoće energije?

Zbog toga jer je stanje jednolike raspodjele gustoće energije stanje veće vjerojatnosti od stanja nejednolike raspodjele gustoće energije.

Kako to pokazati?

Lako je shvatiti zašto se voda u dvije posude ponaša točno onako kako nam je to iskustvom duboko uvriježeno: reagira na nejednako djelovanje sile teže u dvije posude. Kada u obje posude voda dosegne istu razinu, djelovanje je sile teže u njima jednak i više nema dalnjeg gibanja. Slično se ponaša i stап: na početku postoji mehanička neravnoteža. Sila je što djeluje na lijevu stranu stapa veća od sile na desnu; stap se zbog toga pomiče u desno do trenutka izjednačavanja jakosti sile.

Ali što to, analogno djelovanju sile, djeluje na toplinsku energiju uzrokujući njezin prijelaz s toplijeg na hladnije tijelo?

Razlika u gustoćama unutrašnje kaloričke energije.

U svakom se plinu njegovi atomi ili molekule kreću najrazličitijim brzinama, no, u toplijim je plinovima prosječna brzina veća nego u hladnijim. (*Zapravo ono što nazivamo temperaturom odgovara prosječnoj brzini čestica od kojih je sastavljen plin. Pritom spominjemo plin (plinovito agregatno stanje tvari) samo zbog očitosti zbiranja. Isto vrijedi i za tekućine (kapljevine) i kruta tijela, osim što u krutim tijelima sastavne čestice titraju oko nekog srednjeg položaja umjesto stvarnog kretanja.*)

Kako bismo pojednostavnili promatranje, pretpostavimo da se u svakom uzorku materije, pri određenoj temperaturi, sve čestice, od kojih je ona sastavljena, kreću (ili titraju) prosječnom brzinom karakterističnom za tu temperaturu. Što će se dogoditi omogućimo li dodir toplijeg i hladnijeg tijela? Čestice uz rub toplijeg tijela sudarit će se s onima uz rub hladnijeg; brza će se čestica toplijeg tijela sudariti sa sporijom hladnijeg i odbiti jedna od druge. Ukupna će količina gibanja dviju čestica ostati ista, ali može doći do prijenosa količine gibanja s jedne čestice na drugu. Drugim riječima, dvije se čestice nakon sudara (radi se o elastičnom srazu) mogu odvojiti brzinama različitim (po apsolutnom iznosu) od onih kojima su se približile. Moguće je da brža čestica preda nešto od svoje količine gibanja sporijoj, pa će se brža čestica, nakon odvajanja, kretati sporije, dok će se sporija čestica nakon odvajanja kretati brže. Moguće je, međutim, također da sporija čestica preda nešto svoje količine gibanja bržoj tako da će se sada sporija čestica odvojiti još sporije, a brža čestica još brže. Samo slučajnost određuje u kojem će se smjeru odvijati prijenos količine gibanja, ali je vjerojatnije da će se

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBILKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

količina gibanja prenijeti od brže na sporiju; da će se brža čestica odvojiti sporije, a sporija brže. Zašto je to tako? Zato što je broj načina na koji se količina gibanja može prenijeti s brže na sporiju česticu veći od broja načina na koji se količina gibanja može prenijeti sa sporije na bržu česticu. Ako su svi različiti načini jednakoj vjerovatnosti, tada postoji bolja prilika (veća vjerovatnost) da to bude jedan od mnogih (brojnih) mogućih prijenosa s brže na sporiju česticu, a ne jedan od nekoliko mogućih prijenosa sa sporije na bržu. Da bismo jasno uvidjeli zašto je to tako zamislimo pedeset potpuno jednakih (veličinom i na osjet dodira) kuglica, obilježenih brojevima od 1 do 50, u nekoj posudi. Nasumce odabiremo jednu od njih; neka je to kuglica s brojem 49. To je veliki broj koji predstavlja česticu što se brzo kreće. Stavite kuglicu 49 natrag u posudu (to predstavlja sudar) i uzmite ponovno nasumce kuglicu iz posude (to predstavlja brzinu pri odbijanju). Mogli ste opet uzeti kuglicu 49 i odbiti se istom brzinom kojom ste se sudarili. Ili ste mogli uzeti kuglicu 50 i odbiti se brzinom većom od brzine kojom se sudarate. Ili ste mogli izvući kuglicu bilo kojeg broja između (uključivo) 48 i 1, četrdesetom različitih mogućnosti, i u svakom se slučaju odbiti sporije nego što ste se sudarili. Uvezši na početku kuglicu 49, šansa je za odbijanje pri višoj brzini samo 1 prema 50, dok je šansa odbijanja s manjom brzinom 48 prema 50. Situacija bi bila obrnuta da ste najprije izvukli kuglicu s brojem 2. To bi predstavljalo vrlo malu brzinu. Kad biste tu kuglicu bacili natrag u kutiju i uzeli drugu, imali biste samo jednu mogućnost prema 50 da uzmete kuglicu 1 i odbijete se još sporije nego što ste se sudarili, dok bi vaša šansa bila 48 prema 50 da ćete izvući bilo koji broj (kuglicu) između 3 i 50 uključivo te da ćete se odbiti brže nego što ste se sudarili.

Ako zamislimo sada deset ljudi od kojih svaki uzima kuglicu 49 iz posude i svaki je baca natrag da ponovno iskuša sreću, vjerovatnost bi da svaki od njih izvadi kuglicu 50, i da se tako odbije brže nego što se sudario, bila reda veličine 10^{-17} . Ista bi se stvar dogodila obratno ako zamislimo da je deset ljudi izvuklo kuglicu s brojem 2 i pokušalo izvući zatim kuglicu s brojem 1.

Dakako, svi ljudi ne moraju izvući isti broj. Recimo da velik broj ljudi uzima kuglice i dobiva najrazličitije brojeve, ali da je prosjek tih brojeva dosta visok. Ako ponovno pokušaju, mnogo je vjerovatnije da će prosjek biti niži, a ne još viši. Isto vrijedi i ako mnogo ljudi uzima kuglice te nalazi da je prosječna vrijednost niska. U drugom je pokušaju vrlo vjerovatno da će se prosjek povećati. Što je više ljudi, to je vjerovatnije da će prosjek porasti.

U svakom tijelu (sustavu) dostatno velikom da omogućuje eksperimentiranje u laboratoriju, broj atoma ili molekula u njemu nije deset ili pedeset ili čak milijun, već milijarde bilijuna. Ako te milijarde bilijuna čestica u toplom tijelu imaju veliku prosječnu brzinu, i ako milijarde bilijuna čestica u hladnom tijelu imaju malu prosječnu brzinu, tada postoji golema vjerovatnost da će slučajni sudari među mnoštvom od njih smanjiti prosječnu brzinu čestica u toplom tijelu i povećati prosjek u hladnom tijelu. Kad prosječna brzina čestica u oba tijela postane ista, tada je prijenos količine gibanja u jednom ili drugom smjeru posve jednak vjerovatan. Pojedine će se čestice kretati sad brže sad sporije, ali će prosječna brzina (pa prema tome i temperatura: gustoća unutrašnje kaloričke energije) ostati ista.

To nam daje odgovor na pitanje zašto toplina prelazi s toplijeg na hladnije tijelo i zašto oba tijela postižu istu prosječnu temperaturu (istu gustoću energije) koja takvom i ostaje. Radi se jednostavno o zakonu vjerovatnosti, o prirodnom ostvarivanju neizvjesne mogućnosti. Zapravo, baš se zbog toga, u svijetu kojem živimo, izjednačuju početno nejednolike raspodjele gustoće energije. Postoji toliko mnogo, mnogo više načina da se zbiju promjene koje će izjednačiti raspodjelu gustoće energije, od onih koji je čine još nejednolikijom, pa je

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

zato golema vjerojatnost da će se promjena (promjene) kretati u smjeru izjednačavanja raspodjele gustoće energije već zbog same puke i čiste slučajnosti. Svi se oblici energije, svjedoci smo, čekamo li (dovoljno dugo), konačno pretvaraju u unutrašnju kaloričku energiju, koja se zatim pretvara u toplinsku energiju kako bi se izjednačile gustoće unutrašnje kaloričke energije. Nakon toga prestaju transformacije i strujanje (prijelaz) energije, prestaje svako zbivanje, nestaje život. Međutim, ne tvrdimo pritom da se opisano mora uvijek događati, već samo opisujemo ono što će se događati s golemom vjerojatnošću. U tome je bitna razlika. Suprotan će se događaj, ma kako malo bio vjerojatan, s protokom vremena, konačno ipak dogoditi; mora se dogoditi kad-tad. Zamislimo golemo mnoštvo čestica, možda bez granica, uključenih u stalnu igru sudara i odbijanja, gdje se pojedine čestice kreću brže ili sporije, ali prosjek im brzina ostaje isti. U jednom trenutku, u jednom dijelu prostora, čestice među sobom razvijaju višu prosječnu brzinu, dok je na nekom drugom mjestu ta brzina niža. Sveukupni prosjek brzina nije izmijenjen, no ta razlika u gustoćama energije može obaviti neki rad tako dugo dok se gustoće energije ne izjednače. Ponekad će se, nakon dugih razdoblja, stvoriti veća nejednolikost u gustoći energije izazvana tim slučajnim sudarima, a u još većim razmacima, još veća nejednolikost. Mogli bismo zamisliti da se nakon biljuna bilijuna bilijuna godina stvorila toliko velika nejednolikost u toliko velikom prostoru da će trebati mnogo godina, biljun ili više, da se ponovo izjednači nejednolika raspodjela gustoće energije. Možda se to dogodilo s nama u nama poznatom svemiru. U beskrajnom prostranstvu jednolike raspodjele gustoće energije, djelovanjem puke vjerojatnosti i slučajnosti, stvorila se nejednolika raspodjela gustoće energije a njen izjednačavanje omogućilo stvaranje galaksija, zvijezda i planeta, stvaranje života, razvijanje razuma i nas koji se trudimo proniknuti u sve to.

Možemo li na temelju promatranja i eksperimentiranja obavljenih kroz manje od dva stoljeća, u uvjetima koji vladaju na planetu Zemlja, dokučiti što se događalo (što će se dogadati) u galaksijama udaljenim milijunima svjetlosnih godina, u nezamislivim prostranstvima svemira, ili tu, „neposredno“ kraj nas, pod uvjetima koji su toliko različiti od naših poput onih u, recimo, središtu Sunca?

Ne, vrlo vjerojatno, ne možemo. Možemo reći samo to da se u našem svijetu nikada do sada, ni pod kojim uvjetima, nisu zbulili događaji koji bi spriječili ili opovrgnuli spontano, samopotičajno i samoodržavajuće odvijanje procesa izjednačavanja početno nejednolike raspodjele gustoće energije u jednoliku (stvore li se za to uvjeti), ili dali naslutiti da bi se to moglo dogoditi. Zbog toga, možda, smijemo pretpostaviti (jer nedostaje dokaza za suprotno) da se

***spontana promjena nejednolike u jednoliku raspodjelu gustoće energije
odvija u cijelom prostoru (svemiru) i vremenu i pod svim uvjetima.***

Formulacija se „spontana promjena nejednolike u jednoliku raspodjelu gustoće energije“ naziva „drugim glavnim stavkom termodinamike“.

6.2 Drugi glavni stavak termodinamike

U svijetu koji nastanjujemo neprestano se odvija jedan te isti proces. Taj je proces spontani, samonikli, samopotičajni, samopokretački, samoodržavajući i, u golemoj većini slučajeva, jednosmjeren: odvija se sam od sebe samo u jednom smjeru. On je i nepovratljiv (nepovratan), ireverzibilan: odvijajući se ostavlja iza sebe promjene koje su uočljive, mjerljive i zabilježive i koje se ne mogu ukloniti a da ne izazovu slične (iste, istovrsne) promjene u

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBILKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

svijetu kojeg obitavamo. Radi se o procesu izjednačavanja nejednolike raspodjele gustoće energije u jednoliku, o postizanju termodinamičke ravnoteže. Pritom energija, ne postoje li ograničenja (zapreke) slične opisanim (radi se i o kemijskim i nuklearnim vezama koje zadržavaju i otklanjaju, barem kroz neko vrijeme, odvijanje procesa), transformirajući se u prijelazne oblike, struji (prelazi) iz sustava (prostora) veće gustoće energije u sustave (prostora) manje tako dugo dok se gustoće ne izjednače. Nakon toga prestaje svako zbivanje, nestaje život i razum (koji inače nastaju samo u toku (tijeku, struji, strujanju, prijelazu) energije). Ljudsko je biće spoznalo bit odvijanja tog procesa iskorištavajući tijek energije što sa Sunca dopire do Zemlje, iskorištavajući slične procese na Zemljii (vjetar, strujanje vode, prijelaz topline) naučivši s vremenom kako ih pokrenuti pokrećući kemijske (izgaranje) i nuklearne procese (fisija i fuzija) izjednačavanja gustoće energije, gradeci brane stvarajući velike vodne rezervoare povećavajući tako gustoću potencijalne energije dostupne vode, ili fokusirajući s istim ciljem Sunčevu zračenje, povećavajući tako snagu tijeka izjednačavanja gustoće energije.

Stečena iskustva, spoznaje i logička razmišljanja o mogućnostima iskorištavanja tijeka energije za svoje potrebe, tražeći odgovore na pitanja poput „**kako to da postoji problem opskrbe energijom ako je energija nestvoriva i neuništiva (oduvijek je bila „tu“ i uvijek će biti), je li je moguće provoditi kružni proces sa samo jednim toplinskim spremnikom, je li je moguće svu toplinsku energiju dovedenu u kružni proces, ili neki sličan proces odnosno procese, trajno pretvarati u mehanički rad, je li je moguće unutrašnju kaloričku energiju akumulirana u okolini (u podsustavima okoline: zraku vodi i tlu) pretvoriti u mehanički rad i slična (zašto se betonski blok može podići uvis raspolaze li se s mehaničkim radom a ne može ložimo li vatru ispod njega itd.)**““, čovjek je sažeo i formulirao u niz izjava (više od stotinu) koja je nazvao drugim glavnim stavkom termodinamike. Primjerice, zamisao ostvarenja desnokretnog kružnog procesa sa samo jednim toplinskim spremnikom, Slika 6-1, nije nimalo „bedasta“. Prvo, usporedbom s jednostavnom mogućnošću pretvorbe mehaničkog rada u toplinsku energiju, na primjer trenjem, koja se zatim privodi nekom toplinskom spremniku, jednom jedinom (okolini), to bi trebalo biti moguće. (Što je provedivo s jednim oblikom energije, zašto bi bilo neprovedivo s drugim?) Drugo, princip se očuvanja energije (prvi glavni stavak termodinamike) ne protivi tome. Treće, u tom bi slučaju taj toplinski spremnik morala nužno biti okolina (u protivnom imali bismo dva toplinska spremnika: okolicu i toplinski spremnik koji nije okolina, odnosno, „sa samo jednim toplinskim spremnikom“ znači da su i kružni proces i njegova okolina na istoj temperaturi kao i toplinski spremnik), pa bi „problem opskrbe energijom“, prema rečenome u 6, bio zauvijek riješen.

(U okolini su, naime, pobranjene toliko goleme količine (besplatne) energije da bi uređaj koji prikazuje Slika 6-1. (prevorba toplinske energije u mehanički rad pomoći jednog toplinskog spremnika) za čovječanstvo bio od praktički iste važnosti kao i „običan“ perpetuum mobile (perpetuum mobile prve vrste). Zbog toga je takru zamisao (odvijanje kružnog procesa sa samo jednim toplinskim spremnikom) i uređaj koji bi je trebao omogućiti (materijalizirati) W.Oswald nazvao „perpetuum mobile druge vrste“.)

Nažalost, iskorištavanje se energije pohranjene u okolini protivi stečenim i sažetim iskustvima, drugom glavnom stavku termodinamike (*danas razumijemo zašto je to tako: sva je energija akumulirana u okolini anergija*), koji se, prema R.Clausiusu ovako formulira: „**Toplina ne može sama od sebe prijeći od hladnjeg tijela na toplice, i to ni neposredno ni posredno**“ Težište je na riječima „sama od sebe“, što znači da takav prijelaz nije moguć neovisno i izolirano tako da se ograniči samo na ta dva tijela. Takav je prijelaz međutim

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

moguć ako se dopusti promjena na ostalim tijelima okoline. To se npr. događa u rashladnim strojevima i dizalicama topline u kojima se mora upotrijebiti mehanički rad (iz nekog drugog procesa) da bi se toplinska energija „digla“ na višu temperaturu. Drugi se glavni stavak termodinamike formulira i ovako, prema W.Thompsonu: „*Nije moguće izgraditi periodički stroj koji ne bi proizvodio ništa drugo do dizanja nekog tereta (mehanički rad) uz odgovarajuće ohlađivanje jednog toplinskog spremnika*“ (Takva formulacija izriče da je nemoguće ostvariti perpetuum mobile druge vrste.)

Navedene su formulacije istoznačne: jedna nužno slijedi iz druge. Nasuprot tome, prvi i drugi glavni stavak termodinamike međusobno su neovisni; neuspješni su bili svi pokušaji da se izvede jedan iz drugog. Oba su stavka stoga, čini se, prirodni zakoni što se, kao i većina prirodnih zakona, oslanjaju na vrlo bogato životno i laboratorijsko iskustvo.

Nadalje, drugi glavni stavak odriče nedvosmisleno mogućnost trajne pretvorbe **sve** toplinske energije (odnosno i nekoliko drugih oblika energije) u mehanički rad razlikujući tri oblika (vrste, grupe) energije s obzirom na mogućnost pretvorbe u mehanički rad:

- **eksergiju:** to su oblici energije poput mehaničke i električne energije koji se, u povratljivim (povratnim, reverzibilnim) procesima, mogu u potpunosti i neograničeno pretvarati u mehanički rad odnosno međusobno ili u bilo koji drugi oblik energije. (Dakle, i mehanički je rad eksersija, uz mehaničku i električnu energiju, jer se u potpunosti pretvara u sve druge oblike energije.);
- **energiju:** to su oblici energije poput nuklearne, kemijske, unutrašnje kaloričke i toplinske energije i rada trenja koji se, zbog prirodnih ograničenja, ne mogu u potpunosti pretvoriti u mehanički rad odnosno u eksersiju; i
- **anergiju:** to su oblici energije koji se, i opet zbog prirodnih ograničenja, ne mogu pretvoriti u mehanički rad niti u bilo koji drugi oblik energije. To su unutrašnja kalorička energija akumulirana u okolini, točnije u podsustavima okoline: tlu, vodi i zraku, na temperaturi i tlaku okoline, i energija svih sustava u termodinamičkoj ravnoteži (nuklearnoj, kemijskoj, toplinskoj i mehaničkoj) s okolicom.

Temeljem uočavanja takvih razlika između oblika energije, drugi se glavni stavak termodinamike može i ovako formulirati: „*Svaka se energija sastoji od eksersije i anergije od kojih jedna može imati vrijednost nula*“.

S obzirom na vladanje eksersije i anergije u povratljivim i nepovratljivim procesima vrijedi sljedeće:

- a) **u svim se nepovratljivim (nepovratnim) procesima pretvara eksersija u anergiju** (to bi ujedno mogla biti definicija nepovratljivih procesa: procesi u kojima se eksersija pretvara u anergiju);
- b) **samo u povratljivim (povratnim) procesima ostaje eksersija konstantna** (moguća definicija povratljivih procesa: procesi u kojima se eksersija ne pretvara u anergiju);
- c) **nemoguće je anergiju pretvoriti u eksersiju; proces u kojem bi se anergija pretvarala u eksersiju je nemoguć.**

Da bi se pokazala točnost tvrdnji a) i b), zamislimo neki povratljivi proces u kojemu eksersija ne ostaje konstantna. U tom slučaju dio se eksersije pretvara u anergiju. Ako se obrne smjer povratljivog procesa, svi sustavi koji su sudjelovali u procesu (i okolina) morali bi doći u

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

početno stanje, prema definiciji povratljivih procesa. Zbog toga bi se morala i anergija koja je nastala pretvorbom ekservije ponovno pretvoriti u ekserviju, što prema c) nije moguće. Prepostavka dakle da postoji povratljivi proces u kojemu ekservija nije konstantna dovodi do proturječja. Pretvara li se u nekom procesu ekservija u anergiju taj se proces ne da obrnuti – on je nepovratljivi proces.

Zaključno utvrđujemo ovo:

- prema prvom glavnou stavku termodinamike (principu očuvanja energije) energija se ne može ni stvoriti ni uništiti, pa postoji samo mogućnost njezine pretvorbe iz jednog oblika u drugi;
- za pretvorbe energije vrijede bilance energije prema prvom glavnom stavku (*„u svim procesima ostaje zbroj svih oblika energije konstantan“*), ali se u njemu međutim ništa ne govori o tome je li je neka pretvorka oblika energije moguća ili ne;
- o mogućim smjerovima pretvorbi energije i odvijanja energetskih procesa govori drugi glavni stavak termodinamike;
- kao što postoje ograničenja u odvijanju procesa (kružni se proces ne može odvijati ne raspolaže li se s dva toplinska spremnika različitih temperatura), tako su prema drugom glavnom stavku ograničene mogućnosti pretvorbi oblika energije:
- svaka se energija (svaki se oblik energije) ne može transformirati u po volji drugi oblik energije;
- drugi glavni stavak termodinamike pritom:
 - sažima iskustva i logička razmišljanja;
 - nije zakon jer ne može direktnim argumentima ništa potvrditi ili dokazati;
 - u osnovi odgovara na pitanje kako to da postoji problem opskrbe energijom kad se energija ne može ni stvoriti ni uništiti;
 - ne tvrdi da je nešto nemoguće već samo jako, jako, jako malo vjerojatno.

Prema prvom glavnou stavku termodinamike energija će (koju svemir sadrži) uvijek biti tu u točnoj istoj količini kao i sada, kao što je i uvijek bila (svemir je dakle besmrstan), no, prema drugom glavnou stavku termodinamike, vrijede li dakako njegove postavke, jednoga dana ta energija, premda i dalje nazvana u istoj količini, ne će više omogućavati promjene, ni kretanja, ni rad, ni život, ni inteligenciju; drugi glavni stavak termodinamike kao da ukazuje na bezvrijednost besmrtnosti svemira.

6.3 Entropija i drugi glavni stavak termodinamike

Drugi glavni stavak termodinamike govori o odvijanju (smjeru odvijanja) energetskih pretvorbi i procesa (o promjeni nejednolike u jednoliku raspodjelu gustoće energije) razlikujući pritom povratljive (povratne), nepovratljive (nepovratne) i nemoguće procese. Da bi se ti odnosi mogli i kvantificirati (odgovoriti na pitanja poput kada će neki proces biti povratljiv, nepovratljiv odnosno nemoguć, koliko će se ekservije u nepovratljivom procesu pretvoriti u anergiju, koliki je dio neke energije ekservija i na još neka pitanja o kojima ćemo kasnije govoriti), potrebno je bilo pronaći matematičku formulaciju drugog glavnog stavka

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

termodinamike. Budući da je u svim procesima definirano konačno i početno stanje kao stanje ravnoteže, valjalo je pronaći neku **veličinu stanja** koja ima takve promjene da se na osnovi njih može zaključiti je li je riječ o povratljivom, nepovratljivom ili nemogućem procesu. Ta veličina stanja mora osim toga biti tako određena kako bi se iz poznavanja početnog i konačnog stanja moglo reći je li proces povratljiv, nepovratljiv ili nemoguć. Tako određena nova veličina stanja, koja daje osnovu za matematičku formulaciju drugog glavnog stavka termodinamike pomoću jednadžbi ili nejednadžbi, nazvana je **entropija** (R.J.E.Clausius, 1822.-1888.) i definirana ovom matematičkom relacijom:

$$\begin{aligned} ds &= \frac{dq}{T} + \frac{d}{T} (\text{anergija nastala u nepovratljivim procesima}) = \\ &= \frac{dq}{T} + ds_{\text{proizvedena}} \text{ [J/kgK]} \end{aligned} \quad [6.6]$$

Diferencijalnom je jednadžbom [6.6] određena promjena entropije sustava mase 1 kg koji, podvrgnut nekom realnom (nepovratljivom) procesu, izmjenjuje toplinsku energiju s okolicom (drugim sustavima).

Radi li se o sustavu mase m kg, jednadžba glasi

$$dS = \frac{dQ}{T} + ds_{\text{proizvedena}} \text{ [J/K]} \quad [6.7]$$

Sa S [J/K], odnosno sa s [J/kgK] označena je **entropija**, fizikalna veličina koja je veličina stanja a jednaka je omjeru ukupne količine toplinske energije izmijenjene između sustava i okoline i temperature pri kojoj se to događa.

Promjena se entropije pritom dijeli na strujanje entropije ($\frac{dq}{T}$) i na proizvodnju entropije ($ds_{\text{proizvedena}}$) koju uzrokuju nepovratljivi procesi poput: neelastična deformacija, mehanički procesi s pojavom trenja (trenje krutina – krutina), strujanje viskoznih fluida, histereza, uključivanje električnog otpora u strjni krug, udarni valovi, unutrašnje prigušenje vibrirajućeg sustava, nekontrolirana ekspanzija plina (bez obavljanja mehaničkog rada), prigušivanje fluida, spontane kemijske reakcije, miješanje različitih plinova i kapljevinu, osmoza, miješanje istih kapljevinu početno različitih temperatura i tlakova, izmjena toplinske energije pri konačnim temperaturnim razlikama, ...

Drugi je član (proizvodnja entropije) uvijek veći od nule, a predznak prvog člana ovisi o predznaku toplinske energije. Dovodi li se toplinska energija sustavu, povećava se entropija sustava; u njega struji entropija. Obratno vrijedi istrujava li toplinska energija iz sustava: entropija se sustava smanjuje, struja entropije napušta sustav.

Jednadžba [6.6] nije rezultat neke komplikirane teorije ili matematičkih jednadžbi: rezultat je intuicije R.J.E. Clausiusa, njemačkog fizičara i matematičara, kojem se, tijekom razmatranja tijekova (i gubitaka) toplinske energije u kružnim procesima te pretvorbe u mehanički rad, učinilo pogodnjim u razmatranja uvesti veličinu koja će pokazivati kako se mijenja omjer toplinske energije i temperature za vrijeme energetskih procesa, Q/T . Nazvao ju je „**entropija**“ koristeći se grčkom riječi **τροπή (trope)**, transformacija (preobrazba), sa željom da nađe riječ koja će biti što sličnija riječi „energija“. Naime, uočio je da je u energetskim

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

procesima svojstvo te veličine da uvijek i stalno raste te da što je toplinska energija koja se iskorišćuje na nižoj temperaturi, to se od nje može dobiti manje mehaničkog rada, a entropija je veća. S vremenom ideja je evoluirala u oblik [6.6] koji je danas analitički oblik (jedan od analitičkih oblika) drugog glavnog stavka termodinamike. Pokazalo se da se na temelju promjene entropije može nedvosmisleno odrediti vrsta procesa:

- ostaje li entropija adijabatskog sustava (AS) konstantna (dakle promjena, prirast entropije jednak nuli, $ds_{AS} = 0$) za vrijeme energetskih procesa (izjednačavanja početno nejednolike raspodjele gustoće energije u adijabatskom sustavu, odnosno pretvorbi ekservije u korisne oblike energije) radi se o odvijanju povratljivih procesa, idealnih procesa: sva ekservija (raspoloživih oblika energije) ostaje sačuvana, ništa se ekservije ne pretvara u anergiju;
- raste li entropija adijabatskog sustava, $ds_{AS} > 0$, radi se o nepovratljivim, realnim procesima (izjednačavanja početno nejednolike raspodjele gustoće energije u adijabatskom sustavu, odnosno pretvorbi ekservije u korisne oblike energije). Sto je veći porast entropije, to je promatrani proces lošiji, dalje od povratljivog: više se ekservije (raspoloživih oblika energije) pretvara u anergiju;
- smanjuje li se entropija adijabatskog sustava, $ds_{AS} < 0$, radi se o nemogućim procesima: pokušajima pretvaranja anergije u ekserviju (perpetuum mobile druge vrste), odnosno o pokušajima da energija struji sa sustava (iz prostora) s manjom gustoćom energije na sustave (u prostor) s većom gustoćom energije.

Adijabatski sustav grade sustav (sustavi) u kojem (kojima) se odvijaju energetski procesi i okolica.

Zašto promatramo zbivanja u adijabatskom sustavu?

Jer odabirući adijabatski sustav sprječavamo ustrujavanje i istrujavanje entropije (povezane s prijelazom toplinske energije) u sustav, pa je promjena entropije adijabatskog sustava posljedica samo (nepovratljivih) procesa koji se odvijaju u adijabatskom sustavu. Nadalje, i jer se odabirom adijabatskog sustava mogu zadovoljiti postavljeni zahtjevi s obzirom na definiciju entropije, [6.6], i s obzirom na tražene promjene entropije za vrijeme odvijanja povratljivih, nepovratljivih, odnosno nemogućih procesa. Naime, promjena entropije adijabatskog sustava može biti jednaka nuli ($ds_{AS} = 0$) samo ako se unutar adijabatskog sustava ne odvijaju nepovratljivi procesi tj. procesi koji uzrokuju proizvodnju (porast) entropije poput, npr., trenja ili prijelaza toplinske energije pri konačnim temperaturnim razlikama. U protivnom, promjena je entropije adijabatskog sustava veće od nule. Npr., nije li rad trenja jednak nuli, vrijedi:

$$ds_{AS} = \frac{dq}{T} + \frac{|dw_{trenja}|}{T} > 0 \quad [6.8]$$

jer je $|dw_{trenja}| > 0$ a član $\frac{dq}{T}$ jednak nuli (dq je toplinska energija koja prelazi granice sustava: u promatranom je slučaju jednaka nuli - radi se o adijabatskom sustavu.).

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**

(Budući da je rad je trenja uvijek negativan, može se samo dovoditi u sustav, uzimamo stoga njegovu apsolutnu vrijednost. Rad trenja, naime, povećava entropiju sustava jer se, nakon pretvorbe u unutrašnju kaloričku energiju, u obliku toplinske energije dovodi sustavu.)

Odnosno, drugim riječima iskazano, porast će entropije adijabatskog sustava biti jednak nuli (sva će ekservija biti sačuvana) samo ukoliko se unutar adijabatskog sustava odvijaju povratljivi procesi izjednačavanja početno nejednolike raspodjele gustoće energije (npr. „prijelaz toplinske energije na povratljivi način“, mehanički povratljivi procesi ($dW_{trenja} = 0$), ekspanzija uz obavljanje mehaničkog rada, itd.) odnosno povratljivi procesi preobrazbi oblika energije. U tom se slučaju jednadžba [6.6] reducira u oblik:

$$ds_{pov} = \frac{dq_{povratljivo}}{T} \equiv \left(\frac{dq}{T} \right)_{povratljivo} \quad [6.9]$$

a jednadžba [6.8] postaje $ds_{AS} = 0$.

(O uvjetu koji mora biti ispunjen da bi toplinska energija „prelaziла na povratljivi način“ govorit ćemo uskoro.)

Nadalje, budući da je entropija **veličina stanja** (tako je definirana), u što ćemo se uvjeriti, to onda promjenu entropije sustava podvrgnutog nekom realnom (nepovratljivom) procesu možemo najjednostavnije (pokazat ćemo) izračunati tako da između početnog i konačnog stanja sustava, podvrgnutog nekom, naglašavamo, realnom, dakle nepovratljivom energetskom procesu, zamislimo povratljivi (reverzibilni) proces i pomoću njega, primjenom jednadžbe [6.9] izračunamo promjenu entropije sustava.

(Kako se ta promjena izračunava, odnosno što energetski znači promjena (porast) entropije sustava podvrgnutog energetskom procesu, uskoro ćemo pokazati.)

Drugim riječima, promjenu entropije određivat ćemo (isključivo) pomoću izraza [6.9] koji, naglasimo ponovno, vrijedi samo za povratljive procese. Ne računamo li s povratljivim procesom, promjena se entropije određuje izrazom [6.6].

Primjenjujući jednadžbu [6.9] pojednostavnit ćemo pisanje: umjesto $dq_{povratljivo}$, odnosno $\left(\frac{dq}{T} \right)_{povratljivo}$, pisat ćemo dq ($\frac{dq}{T}$) znajući da se radi o povratljivim procesima:

$$ds = \frac{dq}{T} \quad [6.10]$$

Jednadžbu kojom se određuje promjena entropije adijabatskog sustava u kojem se odvijaju energetski procesi možemo kraće predstaviti nejednadžbom:

$$ds_{AS} \geq 0 \quad [6.11]$$

Znak jednakosti odnosi se pritom na povratljive, a nejednakosti na nepovratljive procese koji se odvijaju u adijabatskom sustavu.

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

Nejednadžba [6.11] samo je još jedna od formulacija drugog glavnog stavka termodinamike; naziva se **principom rasta entropije**. Ukazuje na činjenicu da algebarska suma promjena entropije svih dijelova adijabatskog sustava ne može postati negativna. Izriče se na dva načina:

„*Svi su prirodni procesi nepovratljivi. Povratljivi su procesi samo idealizirani granični slučajevi nepovratljivih procesa.*“ ili

„*Entropija adijabatskog sustava raste s vremenom dosežući svoju maksimalnu vrijednost.*“

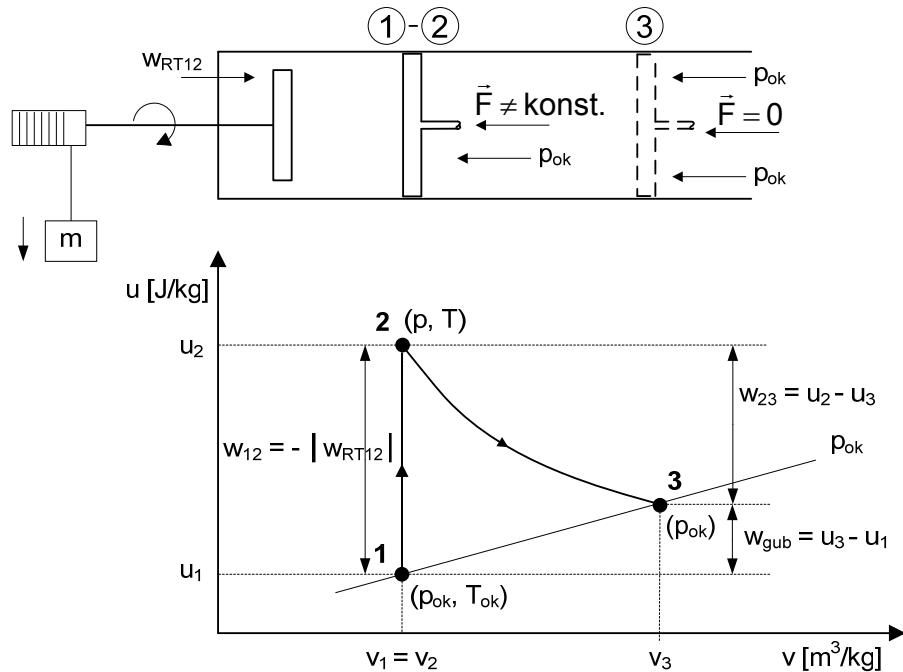
Time se entropija povezuje s raspodjelom gustoće energije i s procesom izjednačavanja početno nejednolike raspodjele gustoće energije u adijabatskom sustavu. Što je, naime, vrijednost entropije nekog adijabatskog sustava manja (izolirani je sustav po definiciji isto i adijabatski sustav), to je raspodjela energije u tom sustavu nejednolikija. Budući da je spontana tendencija (odvijanje spontanih procesa izjednačavanja gustoće energije) usmjerena uvijek prema promjeni nejednolike raspodjele gustoće energije u jednoliku, ta spontana tendencija, čini se, vrijedi i za entropiju: promjenu entropije od malih prema velikim iznosima. Naime, jer je unutrašnja kalorička energija najslabije organizirani oblik energije, oblik koji se, posredovanjem toplinske energije, najlakše prepusta jednolikom rasprostiranju, to se svi oblici energije, koji nisu unutrašnja kalorička energija, ne postoje li ograničenja (koja pak s vremenom slabe i nestaju), spontano pretvaraju u unutrašnju kaloričku energiju kako bi se (nepovratljivim) prijelazom toplinske energije (što uzrokuje porast entropije) izjednačile početno nejednolike raspodjele gustoće energije. Kod maksimalne entropije svi oblici energije, koji se mogu pretvoriti u unutrašnju kaloričku energiju, bit će pretvoreni u unutrašnju kaloričku energiju da bi se zatim prijelazom (strujanjem) toplinske energije postiglo da svi dijelovi adijabatskog sustava imaju istu temperaturu (jednaku gustoću unutrašnje kaloričke energije). Nakon toga prestaje svako strujanje energije u adijabatskom sustavu, prestaje svako zbivanje, iščezava život i razum, sustav postaje (beživotna) statua, što se ponekad naziva „toplinskog smrću“ adijabatskog sustava (svemira) budući da takav može biti neumoljiv i neizbjegljiv kraj?

6.4 Entropija i nepovratljivost

Pokažimo sada zašto pojava trenja pretvara mehanički proces u nepovratljivi, odnosno uz koje će uvjete prijelaz toplinske energije biti povratljivi proces?

Za pretvorbu mehaničkog rada u unutrašnju kaloričku energiju nema ograničenja. Primjerice, u svakom se procesu, za vrijeme kojega se u sustav dovodi rad trenja, mehanički rad utrošen na svladavanje sila trenja u potpunosti pretvara, posredstvom toplinske energije, u unutrašnju kaloričku energiju. Obrnemo li proces, tako dobivena unutrašnja kalorička energija ne može se u potpunosti pretvoriti u mehanički rad iznosa jednakog utrošenom na svladavanju sila trenja. Proces je dakle nepovratljiv. Pokažimo to razmatrajući pobliže proces dovođenja rada trenja u zatvorenim sustav, kao i pretvorbu unutrašnje kaloričke energije u mehanički rad, obrnemo li proces vraćajući sustav u početno stanje podizanjem utega mehaničkim radom promjene volumena, Slika 6-3.

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**



Slika 6-3 Ilustracija nepovratljivosti procesa s trenjem

Okretanjem pločice, spuštanjem utega mase m , dovodiće se mehanički rad (rad trenja) zatvorenom sustavu (plinu) pa će se povećavati unutrašnja kalorička energija plina i tlak do stanja 2:

$$q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12} = u_2 - u_1 - |w_{RT12}| = 0$$

$q_{12} = 0$ budući da se za vrijeme procesa između stanja 1 i 2 toplinska energija ne dovodi u sustav, a mehanički je rad w_{12} (rad trenja) manji od nule (jer se dovodi u sustav):

$$w_{12} = -|w_{RT12}| < 0$$

Dobivamo

$$|w_{RT12}| = u_2 - u_1;$$

sav se rad trenja pretvara u unutrašnju kaloričku energiju. To, dakako, nije iznenadnje budući da se radi o transformiranom mehaničkom radu koji je pak eksergija: oblik energije koji se u potpunosti pretvara u bilo koji drugi oblik energije.

Za vrijeme dovodenja mehaničkog rada (rada trenja) step je zakoćen, a kad se postigne stanje 2, počinje adijabatska (povratljiva) ekspanzija. (*Proces se odvija tolikom brzinom da nema vremena za prijelaz toplinske energije u okolicu.*) Proses se odvija, uz dobivanje mehaničkog rada promjene volumena, sve do stanja 3 kad se postiže ponovno tlak okoline, p_{ok} , odnosno kad nastaje mehanička ravnoteža s okolicom, pa zbog toga prestaje ekspanzija plina (kretanje stapa). Dobiveni je mehanički rad pritom iznosa, Slika 6-3:

$$w_{23} = u_2 - u_3$$

budući da prema prvom glavnom stavku termodinamike za proces između stanja 2 i 3 zatvorenog sustava vrijedi odnos:

$$q_{23} = u_3 - u_2 + w_{23} = 0 \quad (q_{23} = 0 \text{ jer se radi o adijabatskom procesu.})$$

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

Prema tome samo se dio rada trenja (w_{RT12}) dovedenog plinu (sustavu) može transformirati u mehanički rad i to dio w_{23} . Dio $u_3 - u_1$ predstavlja gubitak mehaničkog rada (eksergije): $w_{\text{gubitak}} = u_3 - u_1$. Opisani je proces dakle nepovratljiv: dio eksergije pretvoren je u anergiju; s dobivenim mehaničkim radom ne bismo mogli uteg podignuti u početni položaj.

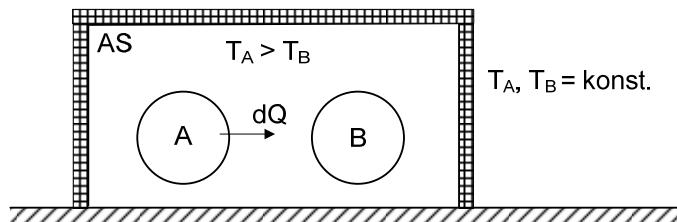
Isto se razmatranje može provesti i za otvoreni sustav; rezultat razmatranja bio bi istovjetan.

Jedan je od uvjeta odvijanja povratljivog procesa stoga: sile trenja moraju biti jednake nuli.

Ustanovimo dalje uz koji se uvjet (uvjete) ostvaruje povratljivi prijelaz toplinske energije: prijelaz koji ne će uzrokovati gubitak eksergije?

Promatrajmo dva sustava, A i B, različitih temperatura, $T_A > T_B$, smještena u adijabatskom sustavu, Slika 6-4.

(Razmatranje odgovara prilikama u našem svijetu. Promatramo prijelaz topline između dva tijela koja, zajedno s okolicom, oblikuju adijabatski sustav budući da dozračivanje Sunčeve energije (toplinske energije) ne utječe na promatrana zbiljanja.)



Slika 6-4 Prijelaz toplinske energije unutar adijabatskog sustava

Iz sustava A s višom temperaturom (većom gustoćom unutrašnje kaloričke energije) prenosi se energija u obliku toplinske energije (prijelazan oblik energije) u sustav B s nižom temperaturom ($T_B < T_A$, manjom gustoćom unutrašnje kaloričke energije).

Pritom je količina toplinske energije $-dQ_A$ (negativnog iznosa jer se toplinska energija odvodi iz sustava A) jednak toplinskoj energiji dQ_B koja se dovodi u sustav B (prijelaz se toplinske energije odvija u adijabatskom sustavu), koja je zbog toga pozitivna, pa vrijedi:

$$-dQ_A = dQ_B = dQ.$$

No, kako svaki prijelaz toplinske energije preko granica sustava prati i strujanje entropije, to se entropija sustava A smanjuje, a sustava B povećava:

$$dS_A = \frac{dQ_A}{T_A} = - \frac{dQ}{T_A} < 0, \quad dS_B = \frac{dQ_B}{T_B} = \frac{dQ}{T_B} > 0.$$

Kolika je, međutim, promjena entropije adijabatskog sustava (ukupna promjena entropije) uzrokovanja prijelazom toplinske energije unutar adijabatskog sustava?

Očito (entropija je skalarna veličina):

$$dS_{AS} = dS_A + dS_B = \frac{T_A - T_B}{T_A T_B} dQ \quad [6.12]$$

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

Jer je $T_A > T_B$, to je $dS_{AS} > 0$ što znači da se u adijabatskom sustavu odvija nepovratljivi proces (prijelaz toplinske energije preko konačnih razlika temperatura), proces koji uzrokuje gubitak eksergije: pretvorbu eksergije u anergiju.

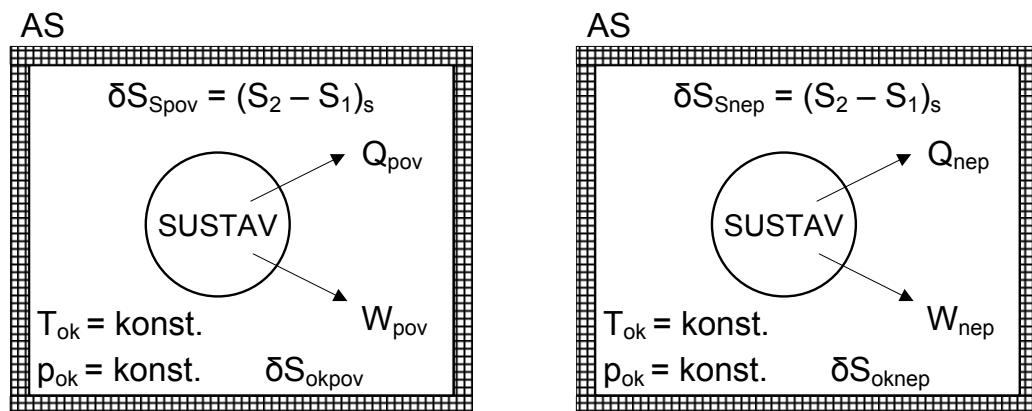
U kojem će slučaju proces biti povratljiv? Samo ako je $dS_{AS} = 0$. Drugim riječima, samo ako su temperature sustava između kojih se izmjenjuje toplinska energija jednake: $T_A = T_B$.

Prema tome, prijelaz će se toplinske energije odvijati na povratljiv način samo ako toplinska energija prelazi preko temperaturnih razlika jednakih nuli ($\delta T = 0$).

Dakako, takav je proces neprovodiv u praksi: odvijao bi se beskonačno sporo, pa je svaki (realni) prijelaz toplinske energije nepovratljivi proces, proces što uzrokuje porast entropije odnosno gubitak eksergije (pretvorbu eksergije u anergiju).

Koliki je taj gubitak? Što s energetskog stajališta predstavlja (znači) porast entropije izazvan nepovratljivim procesima? Koliki je gubitak mehaničkog rada izjednačuje li se (u adijabatskom sustavu) nejednolika raspodjela gustoće energije pomoću nepovratljivih procesa, odnosno, odvijaju li se nepovratljivi procesi pretvorbi oblika energije?

Da bismo odgovorili na ta pitanja, promatrajmo neki, bilo kakav sustav, primjerice, zatvoreni sustav, koji, zajedno sa svojom okolicom, izgrađuje adijabatski sustav. Znademo, entropija će adijabatskog sustava rasti odvijaju li se u adijabatskom sustavu nepovratljivi procesi izjednačavanja raspodjele gustoće energije (procesi bez dobivanja mehaničkog rada primjerice) odnosno nepovratljivi procesi energetskih transformacija (primjerice procesi za vrijeme kojih se javlja trenje, toplinska energija prelazi preko konačnih temperaturnih razlika, itd.). Zbog toga ćemo zamisliti ovo: jedanput neka sustav obavi, između istih početnih i konačnih stanja, neki povratljiv (idealni), a drugi puta nepovratljiv (realni) proces, Slika 6-5. (To može biti i kružni proces.) Za vrijeme procesa sustav izmjenjuje toplinsku energiju i mehanički rad s okolicom (Q_{pov} i W_{pov} odvija li se proces kao povratljiv, odnosno Q_{nep} i W_{nep} u slučaju nepovratljivog procesa).



Slika 6-5 Usporedba povratljivog i nepovratljivog procesa

U oba će se slučaja entropija sustava promijeniti za isti iznos:

$$\delta S_{Spov} = (S_2 - S_1)_S = \delta S_{Snep} = \delta S_S \quad [6.13]$$

budući da je entropija veličina stanja pa njezina promjena ovisi samo o početnom i konačnom stanju a neovisna je o tome dolazi li se iz početnog u konačno stanje povratljivim

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBILKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**

ili nepovratljivim procesom. Međutim, budući da pri toj promjeni sudjeluje i okolica, njena se entropija pri povratljivom procesu mijenja za iznos δS_{okpov} , a nepovratljivom δS_{oknep} jer se u okolicu odvodi toplinska energija Q_{pov} odnosno Q_{nep} :

$$\delta S_{okpov} = \frac{Q_{pov}}{T_{ok}} \text{ i } \delta S_{oknep} = \frac{Q_{nep}}{T_{ok}} \quad [6.14]$$

(Prepostavlja se da se temperatura okolice ne mijenja ($T_{ok} = \text{konst.}$) bez obzira na dovedene ili odvedene količine toplinske energije ($m_{ok} \approx \infty$), pa je [6.14] algebarska jednadžba. U protivnom, promjenu bismo entropije okolice morali određivati pomoću diferencijalne jednadžbe.)

Vrijedit će dakle:

u slučaju povratljivog procesa entropija adijabatskog sustava ostaje konstantna (promjena entropije jednaka nuli):

$$\delta S_{ASpov} = \delta S_s + \delta S_{okpov} = (S_2 - S_1)_s + \delta S_{okpov} = 0 \quad [6.15]$$

budući da se promjena entropije adijabatskog sustava sastoji iz promjene entropije sustava i promjene entropije okolice,

dok u slučaju nepovratljivog procesa entropija adijabatskog sustava raste (promjena entropije veća je od nule):

$$\delta S_{ASnep} = \delta S_s + \delta S_{oknep} = (S_2 - S_1)_s + \delta S_{oknep} = \delta S_{uk} > 0 \quad [6.16]$$

δS_{uk} prirast je entropije adijabatskog sustava zbog nepovratljivosti, pa taj prirast može poslužiti kao mjera nepovratljivosti.

Iz [6.15] dobivamo: $(S_2 - S_1)_s = -\delta S_{okpov}$, i dalje, zamjenom u [6.16], da je promjena entropije adijabatskog sustava zbog odvijanja nepovratljivog procesa u tom sustavu jednaka:

$$\delta S_{uk} = \delta S_{oknep} - \delta S_{okpov} \quad [6.17]$$

Kako se u adijabatski sustav ne dovodi izvana toplinska energija, mehanički rad i toplinska energija koji se odvode u okolicu dobivaju se pretvorjom iz unutrašnje kaloričke energije sustava, odnosno energije akumulirane u sustavu, tako da mora vrijediti:

$$\text{za povratljivi proces: } U_1 - U_2 (E_1 - E_2) = Q_{pov} + W_{pov}, \quad [6.18]$$

$$\text{odnosno za nepovratljivi proces: } U_1 - U_2 (E_1 - E_2) = Q_{nep} + W_{nep} \quad [6.19]$$

budući da je unutrašnja kalorička energija (odnosno energija akumulirana u sustavu) veličina stanja.

Iz [6.18] i [6.19] dobivamo:

$$Q_{pov} + W_{pov} = Q_{nep} + W_{nep} \text{ i dalje } W_{pov} - W_{nep} = Q_{nep} - Q_{pov} \quad [6.20]$$

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

Izrazimo li konačno Q_{pov} i Q_{nep} pomoću promjena entropije okolice, relacija [6.14], dobit ćemo:

$$W_{\text{pov}} - W_{\text{nep}} = T_{\text{ok}} (\delta S_{\text{oknep}} - \delta S_{\text{okpov}}) = T_{\text{ok}} [\delta S_{\text{oknep}} + (S_2 - S_1)_s] \quad [6.21]$$

Dakle nepovratljivost u adijabatskom sustavu uzrokuje porast entropije u adijabatskom sustavu i gubitak mehaničkog rada (pretvaranje ekservije u anergiju) koji možemo odrediti poznavajući promjenu entropije adijabatskog sustava ($\delta S_{\text{AS}} \equiv \delta S_{\text{uk}}$) i temperaturu okolice:

$$W_{\text{pov}} - W_{\text{nep}} = W_{\text{gubitak}} = T_{\text{ok}} \cdot \delta S_{\text{uk}} > 0 \quad [6.22]$$

δS_{uk} promjena je entropije, naglasimo, adijabatskog sustava, a sastoji se iz promjene entropije okolice (za vrijeme odvijanja nepovratljivog procesa) i promjene entropije sustava:

$$\delta S_{\text{uk}} = \delta S_{\text{oknep}} + \delta S_s = \frac{Q_{\text{nep}}}{T_{\text{ok}}} + (S_2 - S_1)_s \quad [6.23]$$

Pritom je Q_{nep} ukupno izmijenjena toplinska energija između sustava i okolice za vrijeme odvijanja (nepovratljivog, realnog) procesa, pa je dakle izrazom $\frac{Q_{\text{nep}}}{T_{\text{ok}}}$ određena promjena entropije okolice, dok se promjena entropije sustava,

$(S_2 - S_1)_s$, određuje rješenjem (integriranjem) diferencijalne jednadžbe [6.10], $ds = \frac{dq}{T}$, promatramo li sustav mase 1 kg, odnosno jednadžbe:

$$ds = \frac{dQ}{T} \quad [6.24]$$

promatramo li sustav mase m kg.

I sada će vrijediti da, od slučaja do slučaja, u ovisnosti o procesu, promjena entropije sustava može biti veća, manja ili jednaka nuli, no promjena će entropije adijabatskog sustava biti uvijek veća od nule radi li se o odvijanju nepovratljivih, dakle realnih procesa. Zamislimo li idealni, dakle povratljivi proces, promjena će entropije adijabatskog sustava biti jednaka nuli. Smanji li se entropija adijabatskog sustava, dobijemo li proračunom negativnu vrijednost promjene entropije adijabatskog sustava, zamislili smo nemogući proces; proces koji se, vrijede li postavke drugog glavnog stavka termodinamike, ne može realizirati.

Kako se rješava diferencijalna jednadžba [6.10], odnosno [6.24], pokazat ćemo u idućem poglavlju.

6.5 Promjena entropije sustava (idealnog plina, kapljevine i krutine)

U našim je razmatranjima energetskih pretvorbi i procesa, što se odvijaju u postrojenjima za proizvodnju električne energije, sustav fluid koji, kao posrednik, sudjelujući u pretvorbama i procesima preuzimajući, pohranjujući, prenoseći, preobražavajući i predajući energiju kroz dijelove procesa omogućava odvijanje energetskih procesa i pretvorbi najrazličitijih oblika

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**

energije u električnu energiju (eksergiju). Promjena entropije takvog sustava, podvrgnutog realnim, nepovratljivim procesima određuje se, prema rečenom, kao da je podvrgnut idealnim, povratljivim procesima između istih početnih i konačnih stanja realnih procesa. Posljeđično, realne fluide možemo smatrati idealnim, pa jednadžbu [6.10] rabimo u obliku:

$$ds_s \equiv ds = \frac{dq}{T} = \frac{du + pdv}{T} = \frac{dh - vdp}{T}, \quad [6.25]$$

radi li se o sustavu u plinovitom agregatnom stanju, odnosno u obliku:

$$ds = \frac{dq}{T} = c \frac{dT}{T}, \quad [6.26]$$

radi li se o sustavu u kapljevitom odnosno krutom agregatnom stanju.

Naime, za idealni plin vrijede relacije:

$$du = c_v dT; dh = c_p dT + pv = RT \quad [6.27]$$

a za idealnu kapljevinu, odnosno krutinu:

$$c_v = c_p = c \quad [6.28]$$

budući da se radi o nestlačivim (nekompresibilnim) tvarima ($v = \frac{1}{\rho} = \text{konst.}$).

Služeći se relacijama [6.27] diferencijalne se jednadžbe [6.25] svode na oblik koji se može integrirati:

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v} = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} \quad [6.29]$$

Radi se o elementarnim integralima, a ds je totalni diferencijal:

$$\int_{s_1}^{s_2} ds = c_v \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} + R \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = c_p \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} - R \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} \quad [6.30]$$

Integrirajući diferencijalne jednadžbe [6.30] dobivamo izraze pomoću kojih određujemo promjenu entropije sustava u plinovitom agregatnom stanju podvrgnutog procesu, bilo kakvom povratljivom procesu, između nekog početnog stanja (1) i konačnog stanja (2):

$$(s_2 - s_1)_s \equiv s_2 - s_1 = \delta s_s \equiv \delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad [6.31]$$

odnosno, integrirajući diferencijalnu jednadžbu [6.26] dobivamo izraz pomoću kojeg određujemo promjenu entropije sustava u kapljevitom ili krutom agregatnom stanju podvrgnutog procesu između nekog početnog stanja (1) i konačnog stanja (2):

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**

$$(s_2 - s_1)_s \equiv s_2 - s_1 = \delta s_s \equiv \delta s = c \ln \frac{T_2}{T_1} \quad [6.32]$$

Posebice, ukoliko je sustav u plinovitom agregatnom stanju podvrgnut jednom od (posebnih) procesa koje smo razmatrali, određivanje se promjene entropije još više pojednostavljuje. Vrijedi tako:

$$\text{za izohorni proces: } ds_v = c_v \frac{dT}{T} \text{ i } \delta s_v = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} \quad [6.33]$$

$$\text{za izobarni proces: } ds_p = c_p \frac{dT}{T} \text{ i } \delta s_p = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} \quad [6.34]$$

$$\text{za izotermni proces: } ds_T = R \frac{dv}{v} = -R \frac{dp}{p} \text{ i } \delta s_T = R \ln \frac{v_2}{v_1} = -R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad [6.35]$$

$$\text{za adijabatski povratljivi proces – naziva se **izentropskim** procesom: } ds = 0 \quad [6.36]$$

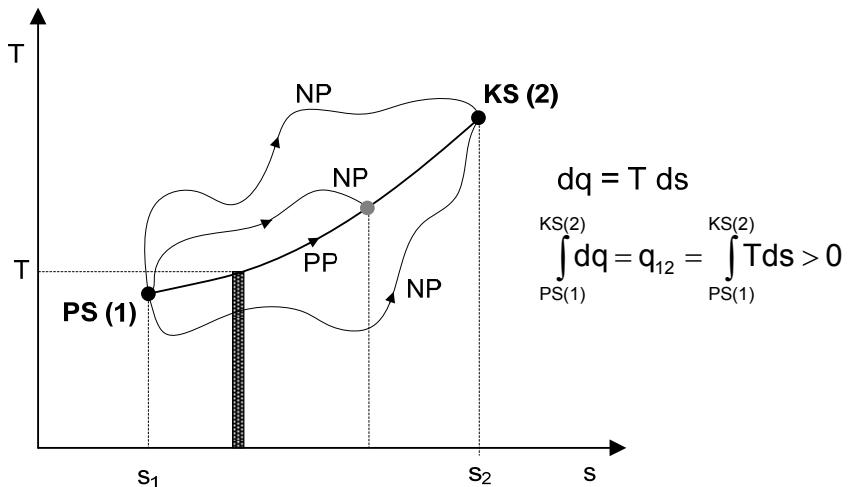
$$\text{za politropski proces: } ds_n = c_n \frac{dT}{T} \text{ i } \delta s_n = c_n \ln \frac{T_2}{T_1} \quad [6.37]$$

$$\text{gdje je } c_n = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1}.$$

6.6 T,s – dijagram

Definiranje entropije omogućuje definiranje (uspostavljanje) vrlo uporabljivog termodinamičkog koordinatnog sustava, T,s – dijagrama. Naime, p,v je dijagram, koji bismo mogli nazvati „mehaničkim“, jer njegove su koordinate veličine stanja čiji umnožak daje mehanički rad (ploština površine „ispod“ krivulje procesa odgovara (jednaka je) izmjenjenom mehaničkom radu promjene volumena, ona „iza“ krivulje tehničkom radu, dok je rad kružnog procesa, predstavljenog u p,v – dijagramu, jednak (proporcionalan) ploštini površine kružnog procesa), nepodoban u slučajevima kad su zanimljive količine toplinske energije što se izmjenjuju između sustava i okoline; u takvim se slučajevima upotrebljava T,s – dijagram, Slika 6-6.

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**



Slika 6-6 T,s – dijagram, „toplinski dijagram“

T,s je dijagram vrlo dobro zamišljen. Osnovni je i jedini uvjet prijelaza toplinske energije razlika temperatura, dakle i osnovni uvjet pretvorbe toplinske energije u kružnom procesu u mehanički rad, a entropija govori o tome kako se odvijaju energetski procesi i o gubicima mehaničkog rada (pretvorbama eksergije u anergiju). Pritom vrijedi (za povratljive procese):

$$dq = Tds [J/kgK],$$

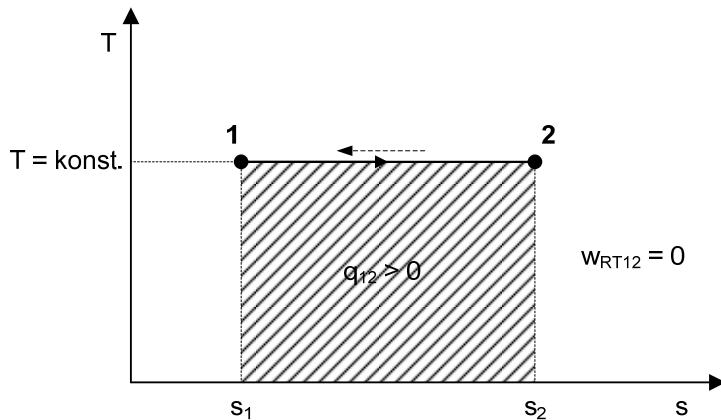
pa je dakle ploština površine „ispod“ krivulje procesa jednaka izmjenjenoj toplinskoj energiji, Slika 6-6: raste li entropija toplinska se energija dovodi u sustav ($q_{12} > 0$), smanjuju li se vrijednosti entropije, toplinska se energija odvodi iz sustava ($q_{12} < 0$).

Očito, Slika 6-76, entropija je veličina stanja: njezina promjena ne ovisi o procesu između početnog (1) i konačnog stanja (2) odvijanja procesa. Posljedično, realni, nepovratljivi proces, koji može biti iznimno komplikiran, zamjenjujemo u našim energetskim proračunima (poznatim) idealnim, povratljivim procesom: to ne utječe na promjenu entropije ali je, dakako, pritom količina izmjenjene toplinske energije različita pa dakle i promjena entropije okoline (i tako u krajnjoj konsekvenci „sve štima“).

Razmotrimo sada povratljive procese s idealnim plinom prikazujući ih u T,s –dijagramu.

6.6.1 T,s – dijagrami procesa s idealnim plinom

Izotermni proces



Slika 6-7 Izotermni proces

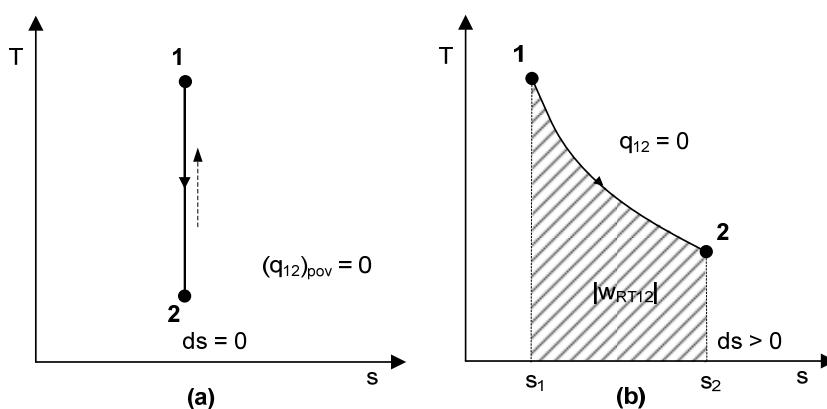
Na koordinatnoj osi T,s – dijagrama napišite su veličine temperature pa je izoterna vodoravni pravac. Ekspanzija teče od 1 do 2, pa budući da je $s_2 > s_1$, toplinska se energija dovodi plinu. Promjena se stanja od 2 do 1 (kompresija) odvija uz smanjenje entropije što znači da se toplinska energija odvodi u okolicu. Izmijenjena je međutim toplinska energija u jednom i drugom slučaju predviđena površinom ispod pravca promjene stanja.

Promjenu entropije δs računamo prema izrazu [6.35]:

$$\delta s_T = R \ln \frac{v_2}{v_1} = -R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Izentropski i adijabatski proces

Izentropski je proces povratljivi adijabatski proces, Slika 6-8 a. Naime, u adijabatskom je sustavu ($q_{12} = 0$) moguć povratljivi (izentropski, mjesto jednake entropije) i nepovratljivi proces (realni adijabatski).



Slika 6-8 Povratljivi (a) i nepovratljivi (b) adijabatski proces (ekspanzija)

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**

U prvom slučaju entropija ostaje konstantna ($ds_{pov} = \frac{dq_{povratljivo}}{T} = 0$ jer $q_{12} = 0$), proces se odvija po izentropi, a u drugome entropija raste jer je prema [6.8] tada

$$|w_{RT12}| = \int_1^2 T ds \quad [6.38]$$

$$\text{a promjena entropije } ds = \frac{|dw_{trenja}|}{T}.$$

Pri promjeni stanja od 1 prema 2 (izentropska proces) temperatura pada, pa prema 1. glavnom stavku termodinamike to znači da se rad obavlja na račun unutrašnje kaloričke energije odnosno da je to ekspanzijski proces ($dw > 0$). Obrnuto, u smjeru 2 prema 1 temperatura raste što znači da se plin komprimira; rad se dovodi u sustav ($dw < 0$) pa je promjena unutrašnje kaloričke energije pozitivna (povećava se njezina gustoća, posljedično raste temperatura). U slučaju adijabatske ekspanzije (b) dio se mehaničkog rada troši na svladavanje sile trenja i u obliku toplinske energije dovodi u sustav; zbog toga raste entropija adijabatskog sustava. Isto vrijedi i za adijabatsku kompresiju: raste temperatura sustava uz istodobno povećanje entropije.

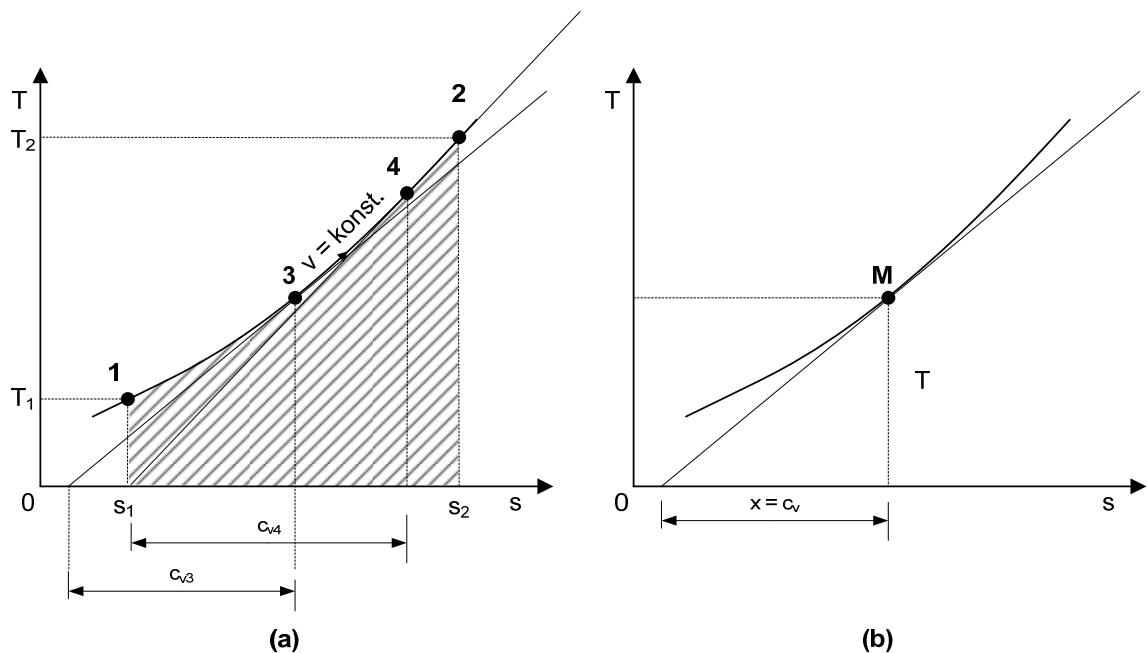
Izohorni proces, određivanje specifične topline pomoću T,s - dijagrama

Krivulja je izohornog procesa u T,s – dijagramu određena njenom jednadžbom koju nalazimo iz izraza za promjenu entropije izohornog procesa, [6.33],

$$ds_v = c_v \frac{dT}{T} : s_v = c_v \ln T + s_{v0} \quad [6.39]$$

Očito, izohorni su procesi u T,s – dijagramu predstavljeni familijom logaritamskih krivulja; toplinska je energija koja se izmjenjuje za vrijeme takvih procesa i sada je predočena površinom ispod krivulja procesa. Za vrijeme promjene stanja od 1 prema 2 temperatura raste pa se toplinska energija dovodi plinu, Slika 6-9 a, $q_{12} > 0$. Posljedično povećava se i entropija. U protivnom smjeru plin se hlađi (q_{12} se odvodi) pa temperatura pada ($T_1 < T_2$).

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**



Slika 6-9 Izohorni proces, specifična toplina pri konstantnom volumenu

Pokažimo sada još jedno svojstvo toplinskog dijagrama. Subtangenta na neku točku krivulje procesa jednaka je specifičnoj toplini pri toj temperaturi.

Povucimo u točki M tangentu na krivulju izohorne promjene stanja, Slika 6-9 b. Subtangentu na slici označimo s x pa je

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{T}{x} = \frac{dT}{ds} = \text{koeficijent smjera pravca (tangente) u } T,s - \text{koordinatnom sustavu.}$$

Dakle je $Tds = xdT$. S druge je strane $Tds = dq$, pa vrijedi:

$dq = Tds = xdT$. Jer je $dq = c_v dT$ toplinska energija što se izmjenjuje za vrijeme izohornog procesa, zaključujemo da je $x = c_v$.

Slika 6-9 a prikazuje specifične topline stanja 1 i 2 predočene suptangentama c_{v1} i c_{v2} . c_{v1} je manja od c_{v2} kako to mora biti jer je $T_2 > T_1$ a specifična toplina raste s temperaturom (s iznimkom jednoatomskih plinova).

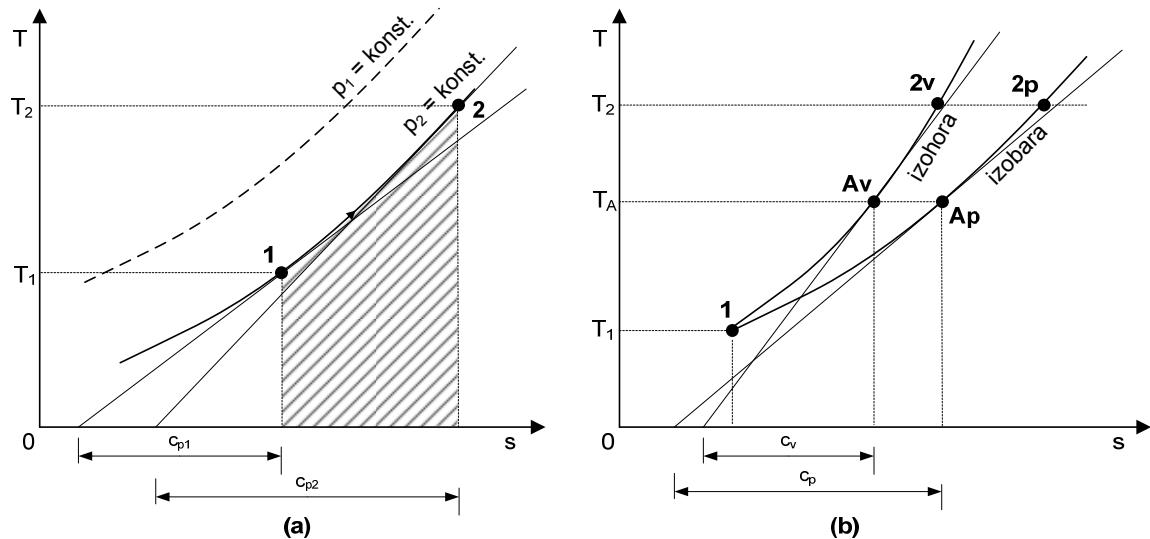
Izobarni proces

Iz izraza za promjenu entropije izobarnog procesa, [6.34], proizlazi jednadžba izobare u T,s – dijagramu:

$$s_p = c_p \ln T + s_{p0} \quad [6.40]$$

Kao i kod izohore i jednadžba izobare je logaritamska krivulja. Zbog konstante kao pribrojnika u jednadžbama [6.39] i [6.40] krivulje se za različite tlakove p , Slika 6-10 a, odnosno za izohore v , pomiču usporedno u smjeru apscisne osi.

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**



Slika 6-10 Izobarni proces

Sličnim razmatranjima kao i pri izohornom procesu zaključujemo da su tangentne na krivulju procesa predočuju odgovarajuće specifične toplice (c_p).

Površina ispod krivulje procesa i ovdje prikazuje izmjenjenu toplinsku energiju. Dovođenjem toplinske energije pri stalnom tlaku znamo da temperatura raste pri čemu plin ekspandira (proces u smjeru od 1 prema 2). U protivnom smjeru (2 – 1) hlađenje je plina pri stalnom tlaku uz smanjenje volumena (kompresija).

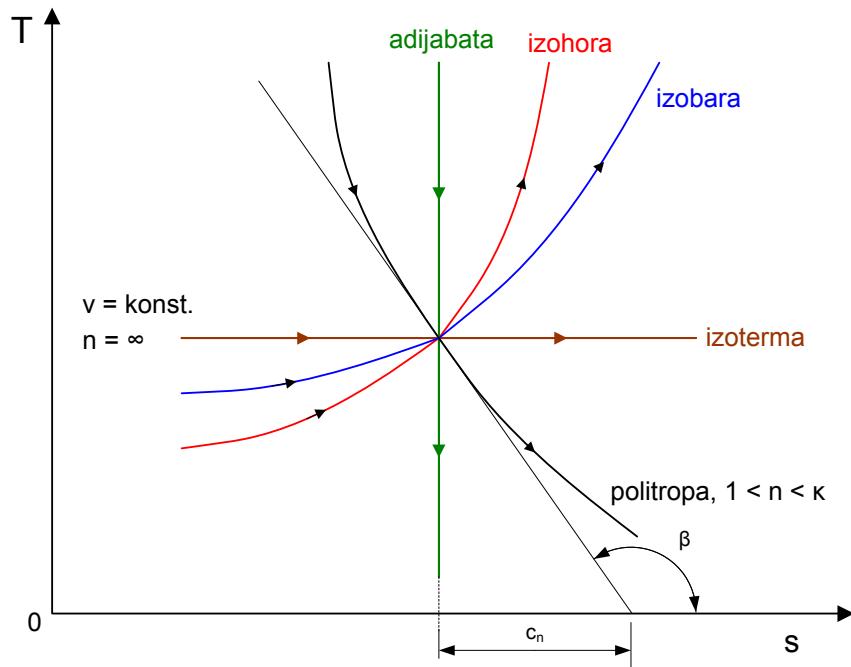
Razmotrimo dalje kakav je međusobni položaj krivulja izohore i izobare. Pri izohornom procesu dovedena se toplinska energija troši samo na povećanje unutrašnje kaloričke energije. Dovođenjem toplinske energije pri stalnom tlaku, osim povećanja unutrašnje kaloričke energije, obavlja se i mehanički rad. Za istu količinu dovedene toplinske energije pri izohornom procesu temperatura raste brže; njegova krivulja mora dakle teći strmije, Slika 6-10 b. Na slici su iz točke 1 (početnog stanja) crtana oba procesa do iste temperature T_2 (konačnog stanja); pri stalnom tlaku veći je prirast entropije (veća dovedena količina toplinske energije).

Povucimo u tom dijagramu bilo koju izotermu T . U točkama A_v i A_p istih temperatura povucimo tangente na pripadne krivulje. Tangenta je na izohoru strmija što ukazuje da pri stalnom volumenu temperatura raste brže. Odredimo li i subtangente tih točaka zapažamo da je $c_p > c_v$ što potvrđuje ispravnost dosadašnjih zaključaka.

Politropski proces ($1 < n < \kappa \Rightarrow c_n < 0$)

Položaj je krivulje politropskog procesa u T,s – dijagramu prikazan u odnosu prema ostalim procesima, Slika 6-11.

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**



Slika 6-11 Politropski proces, $1 < n < \kappa \Rightarrow c_n < 0$

Nagib je krivulje obrnut od nagiba izohore i izobare što proizlazi i iz prijašnjih razmatranja. Pri politropskoj ekspanziji, s vrijednostima n : $1 < n < \kappa$, toplinska se energija dovodi u manjoj količini negoli pri izotermnoj, $n = 1$, pa iako entropija raste ($ds > 0$ jer je $dq > 0$) temperatura svejedno pada. Pri kompresiji je obrnuto: toplinska se energija odvodi ($dq < 0$), entropija se stoga smanjuje ($ds < 0$), a temperatura ipak raste. To proizlazi i iz jednadžbe politrope koju možemo postaviti na sličan način kao i pri ostalim procesima. Dobivamo prema [6.37]:

$$s_n = c_n \ln T + s_{n0} \quad [6.41]$$

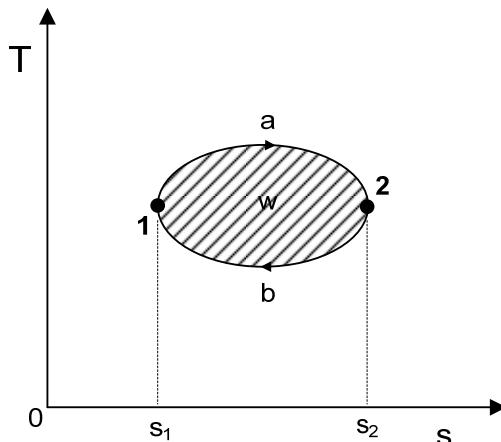
Kako je $c_n = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1}$ za $1 < n < \kappa$ uvijek negativno, to kazuje da je kut tangente na krivulji

politure β veći od 90° . Dakako, i sada vrijedi da suptangentna u nekoj točki krivulje predočuje odgovarajuću specifičnu toplinu: u ovom slučaju c_n .

Kružni proces

Analogno vrijedi i za kružni proces prikazan u T,s – dijagramu, Slika 6-12.

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**

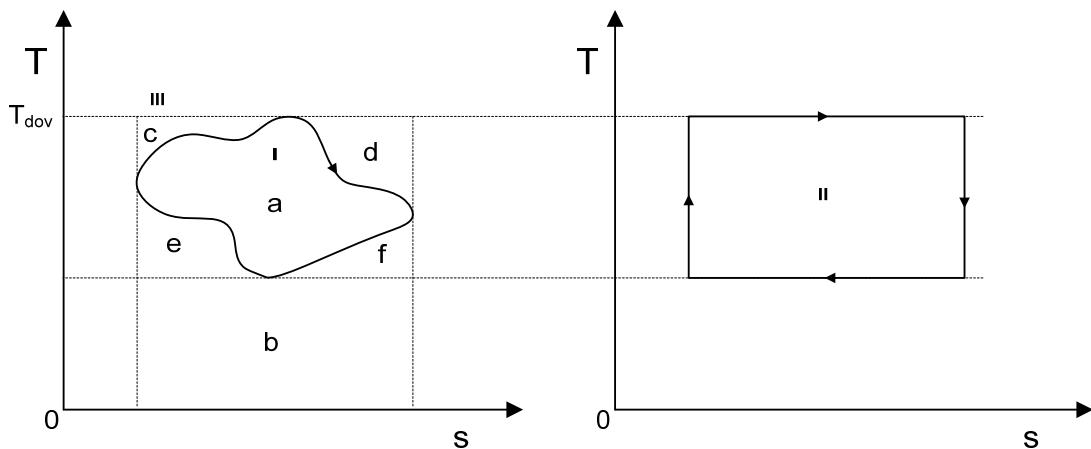


Slika 6-12 Prikaz desnokretnog kružnog procesa u T,s - dijagramu

Ploščina površine ispod krivulje a (A , 1, a, 2, B) proporcionalna je (jednaka) dovedenoj toplinskoj energiji, a ploščina površine ispod krivulje b (B, 2, b, 1, A) odvedenoj, pa je ploščina površine omeđene krivuljama a i b proporcionalna (jednaka) mehaničkom radu dobivenom iz kružnog procesa; dolazimo do istih odnosa koji postoje kad kružni proces promatramo u p,v – dijagramu.

6.6.2 Usporedba termičkih stupnjeva djelovanja

Pokažimo sada da je termički stupanj djelovanja Carnotovog (desnokretnog) kružnog procesa veći od bilo kojeg (svakog) kružnog procesa; da je Carnotov kružni proces najbolji mogući kružni proces. Nacrtajmo neki, bilo koji, najbolji mogući kružni proces i označimo ga s rimskom brojkom I, Slika 6-13. Nacrtajmo zatim Carnotov kružni proces, II. Dakako, oba se kružna procesa moraju odvijati u istim okolnostima: između istih toplinskih spremnika. Nakon toga nacrtajmo još jedan Carnotov kružni proces i označimo ga s brojkom III. I on se mora odvijati u uvjetima rada drugih dvaju procesa, Slika 6-13.



Slika 6-13 Usporedba termičkih stupnjeva djelovanja

Jer vrijede relacije:

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

$$\eta_{tCKP}^{II} = \eta_{tCKP}^{III} = \frac{T_{dov} - T_{odv}}{T_{dov}} = 1 - \frac{|Q_{odv}^{III}|}{Q_{dov}^{III}} = 1 - \frac{b}{a+b+c+d+e+f}$$

i

$$\eta_t^I = 1 - \frac{|Q_{odv}^I|}{Q_{dov}^I} = 1 - \frac{b+e+f}{a+b+e+f}$$

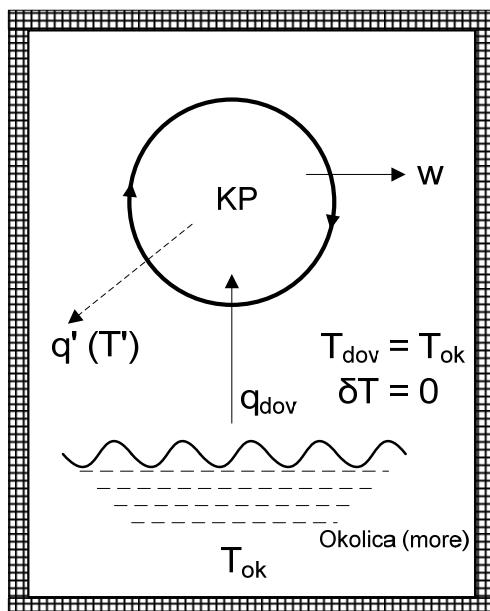
to slijedi da je termički stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa veći od termičkog stupnja djelovanja tog, bilo kojeg kružnog procesa,

$$\eta_{tCKP} > \eta_t,$$

odnosno da je Carnotov kružni proces najbolji (mogući) kružni proces.

6.7 Primjena 2. glavnog stavka termodinamike

Okolica je golemi spremnik unutrašnje kaloričke energije. Iskorištavanju se te energije međutim, kako smo spomenuli, protivi 2. glavni stavak termodinamike. Pogledajmo zašto. Zamislimo povratljivi kružni proces, dakle najbolji mogući proces, koji će uzimati toplinsku energiju, dobivenu transformacijom iz unutrašnje kaloričke energije okolice, npr. iz mora, i barem je djelomično pretvarati u mehanički rad, Slika 6-14.



Slika 6-14 Shema kružnog procesa koji uzima toplinsku energiju iz okolice

Takov kružni proces nije, naglasili smo, u suprotnosti s 1. glavnim stavkom termodinamike (principom očuvanja energije) budući da pretvara dovedenu toplinsku energiju u mehanički rad i da pritom vrijedi $w = q$; ne radi se dakle o „perpetuum mobile 1. vrste“ (o dobivanju mehaničkog rada bez ulaganja energije). No, što „kaže“ 2. glavni stavak termodinamike? Ukupna promjena entropije adijabatskog sustav mora biti jednaka nuli budući da se u adijabatskom sustavu odvija povratljivi kružni proces: trenje je jednako nuli, a toplinska

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

energija prelazi u kružni proces preko temperaturne razlike jednake nuli, relacije [6.8] i [6.12]. Budući da kružni proces i okolica čine adijabatski sustav, mora vrijediti:

$$\delta s_{AS} \equiv \delta s_{uk} = \delta s_{KP} + \delta s_{ok} = 0,$$

gdje je δs_{KP} promjena entropije kružnog procesa (točnije fluida podvrgnutog kružnom procesu; fluid je sustav), a δs_{ok} je promjena entropije okolice.

Promjena je entropija kružnog procesa jednaka nuli, Slika 6-12, a okolice:

$$\delta s_{ok} = \frac{q_{dov}}{T_{ok}} < 0,$$

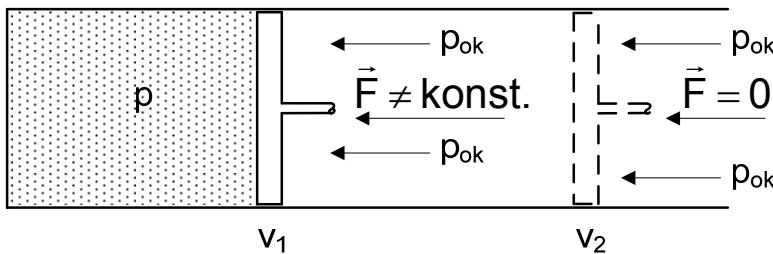
budući da se toplina odvodi iz okolice pa ima negativan predznak ($-|q_{dov}|$). Zajedno sa strujom toplinske energije i entropija napušta okolicu, smanjuje se ukupan iznos entropije okolice, pa je $\delta s_{ok} < 0$ jer je uvijek $T_{ok} > 0$. To znači da će se entropija u cijelom adijabatskom sustavu (kružni proces + okolina) smanjivati, što je u suprotnosti s 2. glavnim stavkom termodinamike, pa takav kružni proces ne može raditi; radi se o nemogućem procesu. On je nemoguć jer nije moguće anergiju (energiju akumuliranu u okolini (sustavima okoline) u obliku unutrašnje kaloričke energije) pretvoriti u eksjerziju (mehanički rad) ili, drugim riječima, nije provediv rad kružnog procesa sa samo jednim toplinskim spremnikom.

Možemo zamisliti međutim da se jedan dio, q' , od toplinske energije dovedene u kružni proces odvodi iz kružnog procesa s temperaturom T' , koja je veća, ili u graničnom slučaju jednak temperature T_{ok} (povratljivi proces prijelaza toplinske energije), jer je T_{ok} najniža moguća temperatura, i predaje u okolicu povećavajući entropiju okolice. Tada se promjena entropije okolice određuje iz relacije:

$$\delta s_{ok} = \frac{q'}{T_{ok}} - \frac{|q_{dov}|}{T_{ok}}.$$

I sada će u svim slučajevima biti $\delta s_{ok} < 0$, posljedično i $\delta s_{AS} < 0$, jer je $q' < |q_{dov}|$.

Zaključujemo dalje i ovo. Promatramo li mirujući zatvoreni sustav koji nije u mehaničkoj ravnoteži s okolinom, $p >> p_{ok}$, Slika 6-15, mehanički je rad koji se može iskoristiti jednak:



Slika 6-15 Shema zatvorenog sustava

$$w_{12\text{korisni}} = \int_{v_1}^{v_2} pdv - p_{ok}(v_2 - v_1) = \int_{v_1}^{v_2} (p - p_{ok})dv, \quad [6.42]$$

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

gdje je $\int_{v_1}^{v_2} pdv = w_{plina}$ rad koji obavi plin. Čitav taj rad međutim ne možemo iskoristiti budući da se stap giba i protiv sile kojom okolina, zbog tlaka atmosfere, p_{ok} , djeluje na stap na putu promjene volumena od veličine v_1 do veličine v_2 . Taj je rad jednak $p_{ok}(v_2 - v_1)$ i naziva se radom potiskivanja okoline.

Zaključujemo da, relacija [6.42], kada je sustav na tlaku okolice, p_{ok} , i, prema prijašnjem razmatranju kružnog procesa, temperaturi okolice, T_{ok} , on je u mehaničkoj i toplinskoj ravnoteži s okolicom i tada nije više moguće unutrašnju kaloričku energiju sustava transformirati u mehanički rad. Takvo se stanje naziva „mrtvim“. Obično se kaže za sustav koji se nalazi u ravnoteži s okolicom da je u „stanju okolice“. U stanju okolice energija je sustava izgubila sposobnost transformacije u druge energetske oblike, ona je anergija. U općem slučaju ravnoteža obuhvaća ne samo temperaturu i tlak okolice već i kemijsku (izgaranje) i nuklearnu ravnotežu. Kad se promatra sustav koji se kreće, on je u ravnoteži s okolicom kad s obzirom na nju miruje i kad je na razini okolice; u stanju okolice kinetička i potencijalna energija imaju vrijednost nula. Ovakva se sveukupna ravnoteža (mehanička, toplinska, kemijska i nuklearna) naziva termodinamičkom ravnotežom.

6.7.1 Određivanje eksergije i anergije

Zanimat će nas sada odgovor na ova pitanja:

- Kada možemo iz nekog sustava dobiti (dobivati) mehanički rad, odnosno, istovjetno pitanje, kada možemo iz neke energije dobiti eksergiju?
- Koliko maksimalno (korisnog) rada možemo dobiti iz takvog sustava? (Kolika je eksergija energije?)
- Kako se mora odvijati proces da iz takvog sustava dobijemo maksimalni (korisni) rad (ekserviju)?

Kvalitativne odgovore na pitanja znamo već, kvantitativan odgovor na drugo pitanje morat ćemo tek potražiti.

Odgovorimo na prvo pitanje. Rad možemo dobiti (dobivati) samo od takvog sustava koji još nije u termodinamičkoj ravnoteži (mehaničkoj, toplinskoj, kemijskoj i nuklearnoj) s barem jednim sustavom iz svoje okolice, dakle, tako dugo dok postoji nejednolika raspodjela gustoće energije.

U razdoblju „prve naftne krize“ razmatala se mogućnost da se s ledenjaka (glečera) dopremi u dolinu gromade leda i iskoriste za odvijanje kružnog procesa: led bi predstavljao hladni, a okolica (zbog različitog termodinamičkog stanja u dolini) topli spremnik. Između okolice i leda postoji razlika u gustoći energije koja će se iskoristiti za dobivanje mehaničkog rada (ekservije).

Naime, samo u takvim slučajevima (različita gustoća energije sustava i okolice) još je moguća promjena stanja sustava (moguće je strujanje energije) bez koje se ne može obavljati mehanički rad; u ravnoteži, naime, sve miruje i nema povoda koji bi mogao izazvati promjene u sustavu (strujanje energije).

Kvalitativni nam je odgovor na drugo pitanje poznat. Iskoristimo ga kako bismo imali osnovu koja će nam omogućiti dobivanje kvantitativnih odgovora na pitanje: koliko? Prema

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

2. glavnom stavku termodinamike svaka se energija sastoji od ekservije i anergije (od kojih jedna može imati vrijednost nula). Ekservija je oblik energije koji se može u potpunosti (u povratljivim procesima) pretvoriti u druge oblike energije, pa dakle i u mehanički rad. Prema tome maksimalni (korisni) rad koji možemo dobiti od nekog sustava odgovara (jednak je) ekserviji energije pohranjene u sustavu. U tom slučaju, da bismo mogli iskoristiti svu ekserviju sustava, sustav mora, u procesu dobivanja mehaničkog rada, biti podvrgnut povratljivom procesu izjednačavanja početno nejednolike raspodjele gustoće energije s gustoćom energije u okolini (okolina je sustav s najmanjom gustoćom energije) budući da jedino za vrijeme povratljivog procesa izjednačavanja raspodjele gustoće energija sva ekservija energije ostaje sačuvana. Pritom tijek energije između sustav i okoline omogućuje dobivanje mehaničkog rada (odvajanje ekservije energije od anergije energije). To je ujedno odgovor na treće pitanje.

Odgovorimo sada na pitanja poput: koliko maksimalno (korisnog) mehaničkog rada (ekservije, električne energije) možemo dobiti iz neke (poznate) količine goriva (biomase, fosilnog odnosno nuklearnog goriva)? Drugim riječima, kolika je ekservija unutrašnje energije i o čemu ovisi? (Pritom se radi o kemijskoj, unutrašnjoj kaloričkoj i nuklearnoj energiji budući da su gravitacijska potencijalna i kinetička energija ekservija.) Uočavamo da se pitanje svodi na upit: kolika je ekservija toplinske energije? Naime i kemijska se energija goriva i nuklearna energija u „našim“ procesima dobivanja mehaničkog rada (električne energije, ekservije) pretvaraju prvo u unutrašnju kaloričku energiju a ova zatim u toplinsku energiju (prijelazni oblik energije) kako bi se, za vrijeme strujanja (prijelaza energije) mogao odvijati proces odvajanja ekservije od anergije. Kolika je dakle ekservija toplinske energije?

6.7.1.1 Ekservija toplinske energije (unutrašnje energije)

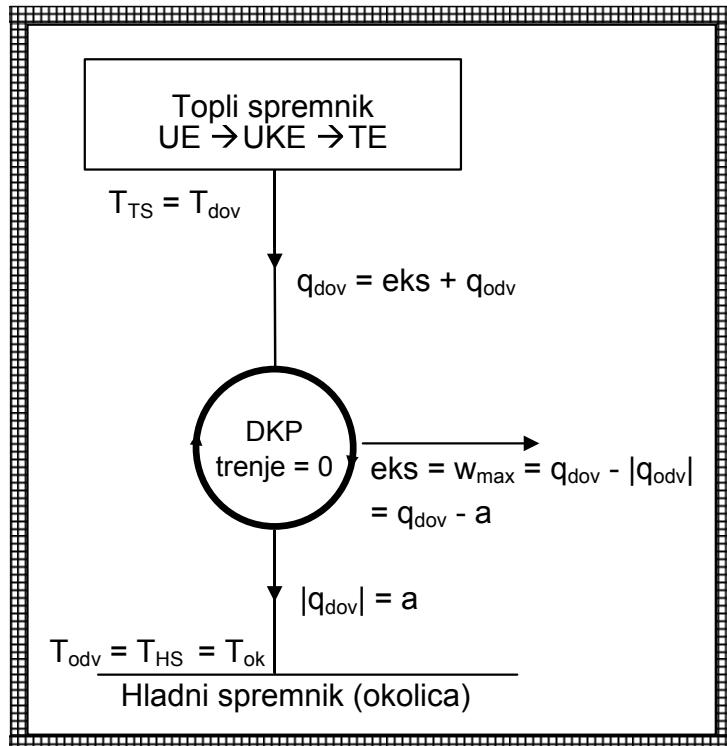
Ekservija je toplinske energije (ekservija prenesena toplinskom energijom) njezin dio koji se može transformirati u drugi oblik energije, pa dakle i u mehanički rad. Prema sadašnjem stanju razvoja energetskih (energijskih) tehnologija, najpogodniji je za takvu transformaciju kružni proces. Zamislimo li dakle da toplinsku energiju dovodimo djelatnoj tvari (fluidu), koja je podvrgнутa kružnom procesu; ekservija će se odrediti kao mehanički rad, a anergija kao toplinska energija odvedena iz kružnog procesa u okolicu. Mehanički će rad dobiven iz kružnog procesa biti maksimalni (jednak ekserviji) samo onda kad je kružni proces povratljiv; ako to nije postignuto, pretvorit će se dio ekservije u anergiju, pa će dobiveni mehanički rad biti manji od raspoložive ekservije. Uvjete odvijanja povratljivog kružnog procesa poznajemo: moramo eliminirati trenje (proces mora biti mehanički povratljiv) i toplinska energija mora prelaziti između toplinskih spremnika i kružnog procesa preko temperaturnih razlika jednakih nuli, Slika 6-16.

(Fizikalno to je sada jasno: postoji li razlika u temperaturama toplinskih spremnika i kružnog procesa mogli bismo tada između kružnog procesa (koji sada preuzima ulogu toplinskog spremnika) i toplinskih spremnika postaviti kružne procese. Rad dobiven iz tih kružnih procesa bio bi točno jednak gubičku ekserviju izazvanom nepovratljivošću procesa prijelaza toplinske energije u i iz kružnog procesa preko konačnih razlika temperature.)

No, to ujedno znači i da odvođenje toplinske energije iz kružnog procesa mora biti na temperaturi okoline jer se jedino tada odvedene energije sastoji samo od anergije i ona je točno jednaka anergiji dovedene topline /anergiji unutrašnje energije (kemijske ili nuklearne energije) pretvorene u unutrašnju kaloričku energiju pohranjenu u toplom spremniku/.)

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**

AS



Slika 6-16 Određivanje eksergije i anergije toplinske energije

Budući da je zamišljeni proces povratljiv, promjena entropije adijabatskog sustava (čine ga topli spremnik (TS), kružni proces (KP) i okolica /koja je ujedno i hladni spremnik/) mora biti jednaka nuli:

$$\delta s_{AS} = \delta s_{TS} + \delta s_{KP} + \delta s_{ok} \quad [6.43]$$

Jer je promjena entropije kružnog procesa jednaka nuli ($\delta s_{KP} = 0$), dobivamo:

$$\delta s_{TS} + \delta s_{ok} = 0, \text{ odnosno} \quad -\delta s_{TS} = \delta s_{ok} \quad [6.44]$$

(Za koliko se smanjila eksergija toplog spremnika, za toliko se povećala entropija okolice, odnosno, ukupna je promjena entropije adijabatskog sustava nula budući da se odvija povratljivi proces izjednačavanja nejednolike raspodjele gustoće energije između toplog spremnika i okolice /hladnog spremnika/.)

Entropija se toplog spremnika smanjuje jer toplinska energija prelazi s toplog spremnika na kružni proces. To je smanjenje jednako::

$$\delta s_{TS} = - \int_{PS(1)}^{KS(2)} \frac{dq_{dov}}{T_{dov}} < 0 \quad [6.45]$$

Predznakom minus ispred integrala naglašeno je smanjivanje entropije toplog spremnika. Minus je nužan budući da se toplinska energija koja napušta toplinski spremnik (pa je prema

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

tome negativna) označava pozitivnom jer se sva ta toplinska energija dovodi kružnom procesu i u odnosu na taj smjer prijelaza toplinske energije (u odnosu na kružni proces) određuje se njezin predznak. Ukupni iznos toplinske energije izmijenjene između toplog spremnika i kružnog procesa možemo, u najopćenitijem slučaju, odrediti samo integriranjem budući da se zbog prijelaza toplinske energije može smanjivati temperatura toplog spremnika. (Toplinskog se spremniku smanjuje gustoća unutrašnje kaloričke energije i zbog toga i temperatura.)

Istodobno povećava se entropija okolice budući da se toplinska energija (u povratljivom procesu ona je sva anergija) iznosa q_{odv} dovodi okolici. q_{odv} negativnog je iznosa, jer se predznak određuje u odnosu prema kružnom procesu, no, jer se predaje u okolicu, u odnosu na okolicu ona je pozitivna, povećava stoga iznos entropije akumulirane u okolicu. Naglašavamo to navođenjem apsolutnog iznosa q_{odv} u jednadžbi kojom je određena promjena entropije okolice:

$$\delta S_{ok} = \frac{|q_{od}|}{T_{ok}} = \frac{a}{T_{ok}} > 0 \quad [6.46]$$

Ponovimo, govorili smo o tome, živimo u okolini na čije stanje, prema našim matematičkim modelima, ne utječemo (barem ne trenutačno) našim energetskim procesima. Ta pretpostavka vrlo dobro opisuje realnost budući da je okolina, koju čine atmosfera (zrak), voda, tlo, toplinski spremnik (hladni spremnik) golema razmjera kojega su temperatura T_{ok} i tlak p_{ok} (praktički) neovisni o nama i o vrsti i količini tehničkih i tehnoloških procesa koje provodimo. Okolici možemo dovoditi, za naše pojmove, goleme količine toplinske energije pa da svejedno ne ćemo temperaturu okolice značajno promijeniti; prihvaćanjem se takve postavke razmatranja energetskih procesa bitno olakšavaju. Prvo, u svim su proračunima temperatura i tlak okolice konstantni ($T_{ok} = \text{konst}$, $p_{ok} = \text{konst}$), što znatno pojednostavljuje proračune, i, drugo, da bismo dobili rad transformirajući unutrašnju energiju (unutrašnju kaloričku energiju), moramo se pobrinuti samo za jedan toplinski spremnik, koji se po temperaturi ili tlaku ili inače razlikuje od okolice, budući da je okolina drugi, prirodnim okolnostima zadani, toplinski spremnik. Iz ta dva toplinska spremnika možemo mehanički rad dobivati tako dugo dok između njih postoji neravnoteža, tako dugo dok postoji nejednolika raspodjela gustoće energije. Kako je stanje okolice neovisno o tijeku tehničkih procesa, mehanički će se rad dobivati tako dugo dok se tlak i temperatura odabranog toplinskog spremnika ne izjednače s tlakom i temperaturom okolice. Još općenitije promatrano, iz nekog će se sustava (sustav može biti bilo što) moći tako dugo dobivati mehanički rad dok se gustoća energije sustava ne izjednači s gustoćom energije okolice. Pritom se to izjednačenje proširuje na sve oblike energije, odnosno na postizanje termodinamičke ravnoteže. (Sa slovom „a“ označena je anergija.)

Prema relaciji [6.44] dobivamo:

$$\int_{PS(1)}^{KS(2)} \frac{dq_{dov}}{T_{dov}} = \frac{a}{T_{ok}} \text{ odnosno } a = T_{ok} \int_{PS(1)}^{KS(2)} \frac{dq_{dov}}{T_{dov}} \quad [6.47]$$

Jer je eksergija jednaka energija minus anergija, dobivamo konačno:

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**

$$eks = w_{\max} = q_{dov} - a = q_{dov} - T_{ok} \int_{PS(1)}^{KS(2)} \frac{dq_{dov}}{T_{dov}} = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_{ok}}{T_{dov}} \right) dq_{dov} \quad [6.48]$$

Ako je $T_{dov} = \text{konst.}$ (tj. ako je temperatura toplog spremnika konstantna), kao što je to slučaj u termoelektranama budući da se unutrašnja kalorička energija, što se pretvara u toplinsku energiju i odvodi u kružni proces, kontinuirano obnavlja procesom izgaranja ili fisije, dobivamo:

$$eks = w_{\max} = \left(1 - \frac{T_{ok}}{T_{dov}} \right) q_{dov} = \eta_{tCKP} q_{dov} \quad [6.49]$$

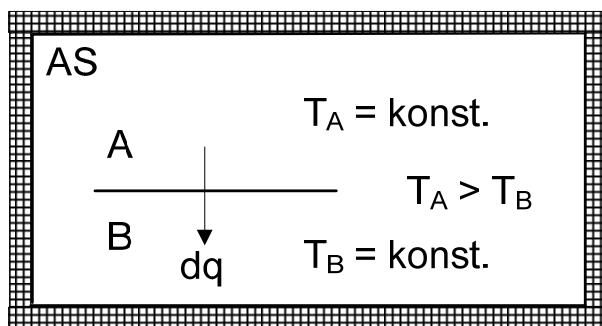
Drugim riječima, eksergiju ćemo toplinske energije (unutrašnje energije) odrediti pretpostavljajući da se između toplog spremnika (temperatura toplog spremnika ovisi o mehaničkoj i toplinskoj izdržljivosti materijala i o upotrijebljenom gorivu odnosno procesu) i okoline odvija Carnotov kružni proces.

(Rezultat je logičan, Carnotov je kružni proces najbolji kružni proces, a kružni je proces najbolji način dobavljanja (velikih količina) eksergije unutrašnjih oblika energije.)

Eksergija je toplinske energije to veća što je temperatura T_{dov} viša. Budući da je eksergija uvijek manja od dovedene toplinske energije, jer je $T_{ok} < T_{dov}$ i $T_{ok} > 0$, nema nijednog kružnog procesa koji bi mogao svu dovedenu toplinsku energiju transformirati u mehanički rad. Mora se najmanje anergija odvesti kao toplinska energija u okolicu. U nepovratljivim procesima bit će dio dovedene eksergije pretvoren u anergiju, pa će mehanički rad i termički stupanj djelovanja biti manji, a u okolicu odvedena količina toplinske energije veća negoli u povratljivim procesima.

Određivanje eksergije toplinske energije omogućuje određivanje i gubitaka eksergije pri prijelazu toplinske energije preko konačnih razlika temperatura.

Promatrajmo sustave A i B, temperatura $T_A = \text{konst.}$ i $T_B = \text{konst.}$, $T_A - T_B > 0$, odijeljene stijenkom koja provodi toplinsku energiju, Slika 6-17.



Slika 6-17 Prijenos topline iz sustava A u sustav B

Toplinska energija dq prelazi sa sustava A na sustav B. Eksergija je te toplinske energije u trenutku kad napušta sustav A prema [6.48] jednaka:

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**

$$deks_A = \left(1 - \frac{T_{ok}}{T_A}\right) dq, \text{ dok je eksergija te iste toplinske energije kad ulazi u sustav B}$$

$$deks_B = \left(1 - \frac{T_{ok}}{T_B}\right) dq.$$

Jer je $T_B < T_A$ slijedi da je eksergija toplinske energije što ulazi u sustav B manja od eksergije toplinske energije koja sa sustava A prelazi na sustav B: $deks_B < deks_A$. Gubitak je eksergije, dakle i mehaničkog rada, pritom:

$$deks_{gub} = dw_{gub} = deks_A - deks_B = T_{ok} \frac{T_A - T_B}{T_A T_B} dq = T_{ok} ds_{uk} \quad [6.50]$$

čime smo potvrdili prijašnje dobivene rezultate, relacije [6.12] i [6.22]: prirast entropije adijabatskog sustava u kome se odvijaju prijelazi toplinske energije preko konačnih razlika temperatura:

$ds_{AS} = ds_A + ds_B = \frac{T_A - T_B}{T_A T_B} dq$, odnosno da je gubitak eksergije izazvan nepovratljivostima u adijabatskom sustavu jednak produktu temperature okolice i prirasta entropije adijabatskog sustava:

$$w_{gubitak} = T_{ok} \cdot ds_{uk}.$$

Prema [6.50] gubitak eksergije ne ovisi samo o razlici temperatura $T_A - T_B$ već i o njihovu produktu koji se nalazi u nazivniku. Gubitak eksergije bit će dakle uz konstantnu razliku temperatura (o kojoj ovisi brzina prijenosa toplinske energije) to manji što se prijenos toplinske energije događa pri višim temperaturama. Pritom se može dopustiti i veća razlika temperatura nego pri nižim temperaturama a da gubitak eksergije ostaje isti.

Eksergija je toplinske energije to veća što kod više temperature sustava sustav predaje toplinsku energiju, [6.49]. Prijenosom se međutim toplinske energije između sustava različitih temperatura prenosi samo dio eksergije, a dio se u stijenci (prostoru) između sustava pretvara u anergiju. Taj je dio to veći što su razlike između temperatura sustava veće, a temperature sustava niže.

Prijenos je toplinske energije sa stajališta 1. glavnog stavka termodinamike stupnja djelovanja jednakog 1. (Svu toplinsku energiju koja napušta sustav A prihvata sustav B.) Za razliku od tog procesa, prijenosa toplinske energije, stupanj je djelovanja najboljeg kružnog procesa, Carnotovog kružnog procesa, manji od 1. Ako, međutim, te procese promatramo sa stajališta transformacije toplinske energije u mehanički rad, dakle sa stajališta 2. glavnog stavka termodinamike, Carnotov kružni proces najbolji je mogući proces, i pokraj toga što ima relativno mali stupanj djelovanja sa stajališta 1. glavnog stavka termodinamike, dok je prijenos toplinske energije najlošiji proces – ni najmanji se dio toplinske energije ne pretvara u mehanički rad i pokraj toga što ima idealni stupanj djelovanja sa stajališta 1. glavnog stavka termodinamike. Očito, ovakav stupanj djelovanja ne daje dovoljno točnu sliku o energetskim procesima. Zbog toga se pokraj energetskog (termičkog) stupnja djelovanja, koji se osniva na 1. glavnom stavku termodinamike, definira i eksersetski (eksergijski) stupanja, temeljen na 2.

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

glavnom stavku termodinamike, koji uspoređuje dobivenu eksergiju (u slučaju Carnotovog kružnog procesa to je mehanički rad) i dovedenu eksergiju:

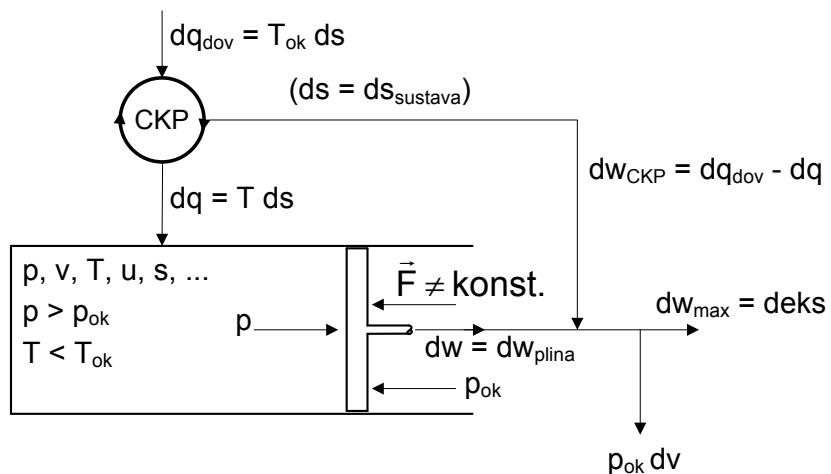
$$\zeta = \frac{w}{eks} \quad [6.51]$$

Za sve je povratljive procese (Carnotov kružni proces primjerice) eksergijski stupanj djelovanja jednak jedan, dok je za nepovratljive procese $\zeta < 1$. Razlika $1 - \zeta$ mjeri je nepovratljivosti jer čim je veća ta razlika, nepovratljivost je veća.

Ako se radi o energijama koje su potpuno pretvorljive u druge oblike energije (dakle radi se o eksergiji), $\zeta = \eta$. U slučaju međutim kad se radi o energijama koje su samo djelomično pretvorljive u druge oblike energije, $\zeta \neq \eta$.

6.7.1.2 Eksergija unutrašnje kaloričke energije (zatvorenog sustava)

Zanimat će nas sada koliko maksimalno (korisnog) mehaničkog rada možemo dobiti iz unutrašnje kaloričke energije nekog plina: (vrućih) plinova koji se stvaraju u nekom ložištu primjerice? Pritom se neće rabiti kružni proces već će se rad dobiti iz sustava (zatvorenog sustava) u koji će se uvesti plinovi, Slika 6-18.



Slika 6-18 Određivanje eksergije unutrašnje kaloričke energije (zatvorenog sustava)

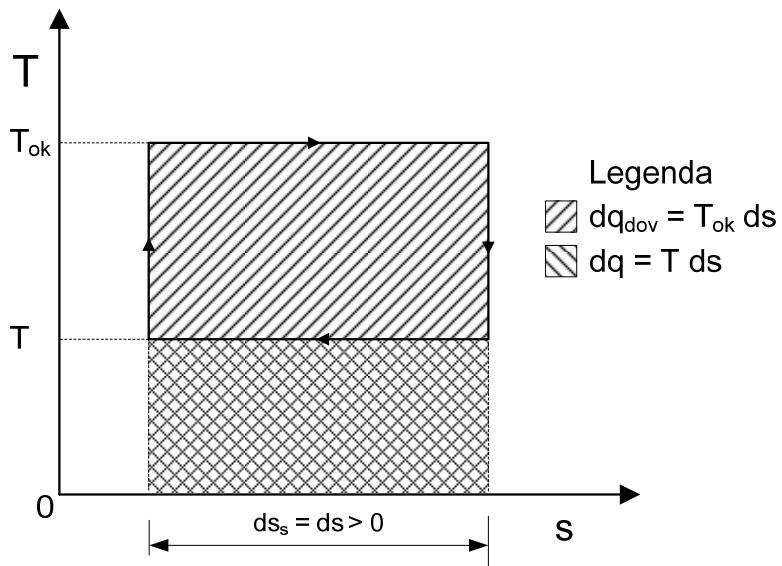
Početno je plin (zatvoren sustav) u mehaničkoj i toplinskoj neravnoteži s okolicom. Stanje je sustava (početno stanje) određeno fizičkim veličinama koje ćemo navoditi bez indeksa: p , T , v , u , s , ... Da bismo dobili maksimalni (korisni) rad iz takvog sustava mora se proces izjednačavanja gustoće energije sustava (u ovom slučaju unutrašnje kaloričke energije) s gustoćom energije okolice odvijati kao povratljiv; moramo na povratljivi način „prevesti“ sustav u stanje okolice. U stanju će okolice fizičke veličine sustava biti jednake onima okolice. Tlak će sustava biti jednak tlaku okolice, temperatura temperaturi okolice itd: p_{ok} , T_{ok} , u_{ok} , v_{ok} , s_{ok} , ... (S v_{ok} i s_{ok} označavamo specifični volumen i entropiju sustava u stanju okolice, u stanju termodinamičke ravnoteže s okolicom.)

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

Da bi proces izjednačavanja početno različitih gustoća energije sustava i okoline bio povratljiv, ne smije se pojaviti sila trenja, a toplinska se energija mora izmjenjivati između sustava i okoline preko temperaturnih razlika jednakih nuli. Trenje lako eliminiramo u mislima (riječ je o matematičkom modelu povratljivog procesa), no kako izmjenjivati toplinsku energiju preko temperaturne razlike jednake nuli? Naime, sasvim općenito, početna će se temperatura sustava (bitno) razlikovati od temperature okoline; u slučaju plinova dobivenih u procesu pretvorbe kemijske energije goriva u unutrašnju kaloričku energiju, primjerice, bit će $T >> T_{ok}$.

(U „našoj“ ilustraciji određivanja eksergije unutrašnje kaloričke energije promatrati ćemo neuobičajeniji slučaj: $T < T_{ok}$. Dakako, pitanje odnosa tih temperatura ne utječe ni na način razmatranja ni na rezultat.)

Kako bismo spriječili izmjenu toplinske energije preko konačnih temperaturnih razlika, zamislit ćemo da je između sustava i okoline, kao toplinskih spremnika, smješten desnokretni Carnotov kružni proces preko kojeg će toplinska energija prelaziti s okoline na sustav (ili obrnuto ako je temperatura sustava viša od temperature okoline), Slika 6-18. Carnotov će kružni proces pritom obaviti beskonačni broj ciklusa za vrijeme izjednačavanja temperature sustava s temperaturom okoline. Naime, u prvom ciklusu, Slika 6-19, dovest će se u sustav infinitezimalna količina toplinske energije dq , pa će se temperatura sustava povisiti na iznos $T + dT = T'$. U drugom ponovno za dT itd, sve dok se ne postigne temperatura T_{ok} .



Slika 6-19 Prvi ciklus Carnotovog kružnog procesa

Pritom je temperatura toplog spremnika Carnotovog kružnog spremnika konstantna, T_{ok} , jer okolina je u ovom slučaju topli spremnik, a temperatura se hladnog spremnika mijenja na opisani način (zatvoreni je sustav hladni spremnik). Budući da se radi o desnokretnom kružnom procesu, iz svakog će se ciklusa dobivati mehanički rad: $dw_{CKP} = dq_{dov} - dq$. dq_{dov} toplinska je energija koja se iz okoline (toplog spremnika) dovodi u Carnotov kružni proces (zato je pozitivnog predznaka), a dq anergija je te toplinske energije koja se u obliku toplinske energije odvodi iz Carnotovog kružnog procesa, zato je negativnog predznaka, u zatvoreni sustav (hladni spremnik).

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

Maksimalni (korisni) rad zatvorenog sustava (eksergija unutrašnje kaloričke energije) dobiven za vrijeme odvijanja jednog ciklusa Carnotovog kružnog procesa bit će stoga jednak radu (dw) koji obavi plin zatvoren u spremnik plus rad Carnotovog kružnog procesa (dw_{CKP}) umanjen za rad potiskivanja oklice ($p_{ok}dv$):

$$\begin{aligned} deks &= dw_{max} = dw + dw_{CKP} - p_{ok}dv = dw + dq_{dov} - dq - p_{ok}dv \\ &= dw + T_{ok}ds - dq - p_{ok}dv \end{aligned} \quad [6.52]$$

budući da je dq_{dov} jednaka $T_{ok}ds$, Slika 6-19: ds je pritom porast entropije sustava uzrokovani dovođenjem toplinske energije iznosa dq u sustav.

Ukupni ćemo korisni maksimalni rad odrediti integrirajući jednadžbu [6.52] preko cijelog procesa izjednačavanja gustoća energija (sumirajući infinitezimalne radove dobivene za vrijeme odvijanja beskonačnog broja ciklusa Carnotovog kružnog procesa): od početnog do konačnog stanja sustava (stanja oklice, stanja ravnoteže s okolicom). Prije toga prilagodimo diferencijalnu jednadžbu [6.52] kako bismo je mogli odmah integrirati. Naime dw i dq nisu totalni diferencijali, pa bi ta činjenica otežala integriranje. Jer vrijedi međutim $dq = dw + du$ (1. glavni stavak termodinamike), to je $-dq + dw = -du$, pa jednadžbu [6.52] možemo pisati u ovom obliku:

$$deks = dw_{max} = - (du - T_{ok}ds + p_{ok}dv) \quad [6.53]$$

i odmah je integrirati:

$$\int_{PS}^{KS} deks = \int_{PS}^{KS} dw_{max} = - \int_{PS}^{KS} (du - T_{ok}ds + p_{ok}dv) = \int_{KS}^{PS} (du - T_{ok}ds + p_{ok}dv) \quad [6.54]$$

Dobivamo:

$$eks = w_{max} = u - u_{ok} - T_{ok}(s - s_{ok}) + p_{ok}(v - v_{ok}) \quad [J/kg] \quad [6.55]$$

Relacijom [6.55] određen je dakle maksimalni korisni mehanički rad (eksergija) koji može dobiti iz unutrašnje kaloričke energije sustava. Vrijede li postavke 2. glavnog stavka termodinamike, nikakvom domisljatošću, nikakvim naporom, ne možemo dobiti više rada. Sasvim suprotno, zbog nepovratljivosti naših realnih energetskih procesa dobit ćemo uvijek manje rada. Drugim riječima, jednadžba [6.55] daje nam gornju granicu, kojoj se možemo samo približiti, upućujući da moramo uklanjati razloge (nepovratljivosti) gubitka eksergije: osigurati prijelaz toplinske energije preko što manjih (relativno, jednadžba [6.50]) razlika temperatura i smanjivati rad trenja (eksergiju što se troši na svladavanje sile trenja):

$$deks_{RT} = T_{ok} \frac{|dw_{RT}|}{T}. \quad [6.56]$$

I sada vrijedi analogan zaključak (onome kad smo razmatrali smanjenje gubitka eksergije za vrijeme prijenosa toplinske energije preko konačnih temperturnih razlika): ne možemo li

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

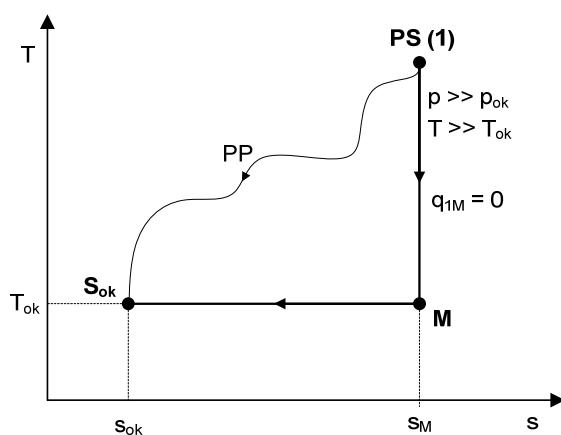
potpuno eliminirati trenje, gubitak će eksergije biti to manji što se na višim temperaturama svladava sila trenja ($\frac{|dw_{RT}|}{T}$).

Sasvim općenito, relaciju [6.55] možemo ovako protumačiti. Budući da je eksergija je jednaka energija minus anergija, to je, jer se radi o unutrašnjoj kaloričkoj energiji, energija jednaka u $-u_{ok} = c_v(T - T_{ok})$, dok je anergija te energije jednaka $T_{ok}(s - s_{ok})$. Naime, anergija se u okolicu odvodi u obliku toplinske energije, koja je sva anergija samo ako je na temperaturi okolice. Jer ta toplinska energija uzrokuje porast entropije okolice, za koliko se smanji entropija zatvorenog sustava jer ta toplinska energija napušta sustav, za toliko se poveća entropija okolice jer je sva ta toplinska energija dovedena okolici, mora vrijediti: $a = T_{ok}(s - s_{ok})$. ($s - s_{ok}$ određujemo kao promjenu entropije sustava.) Konačno, jer se radi o mehaničkom radu promjene volumena zatvorenog sustava (ekspanziji), to sav taj rad ne možemo iskoristiti: korisni rad dobivamo kad od rada sustava (plina) oduzmemos rad potiskivanja okolice: $p_{ok}(v - v_{ok})$.

Ukoliko, međutim, konačno stanje (2) nije u termodinamičkoj ravnoteži s okolicom, tada je maksimalni rad koji se može dobiti procesom između početnog stanja, označimo ga s 1, i konačnog stanja jednak (taj se rad (uobičajeno) naziva „povratljivim radom“):

$$w_{pov} = u_1 - u_2 - T_{ok}(s_1 - s_2) + p_{ok}(v_1 - v_2) \quad [6.57a]$$

Uočimo sada još nešto. U izrazima se [6.53] i [6.55] ne pojavljuje toplinska energija (dq), koja s Carnotovog kružnog procesa prelazi na zatvoren i sustav, što upućuje na nužan način odvijanja realnog procesa kako bismo dobili što veći iznos mehaničkog rada. Naime, jasno je, zamišljeni je Carnotov kružni proces nemoguće praktički realizirati, no, činjenica da se u konačnom izrazu za eksergiju (maksimalni korisni mehanički rad) ne pojavljuje toplinska energija koja prelazi granicu zatvorenog sustava, upućuje da se proces u sustavu, u prvoj fazi, dok se ne postigne $T = T_{ok}$, mora odvijati kao adijabatski (izentropski), Slika 6-20, dakle toplinski izoliran od okolice ili/i velikom brzinom. („Velika brzina“ odvijanja procesa, „nema vremena“ da se izmijene znatnije količine toplinske energije između sustava i okolice.) To je pogotovo jasno jer je u većini energetskih transformacija $T \gg T_{ok}$ pa bi toplinska energija prelazila u okolicu preko velikih razlika temperatura što bi izazivalo velike gubitke eksergije.



Slika 6-20 Povratljivi proces izjednačavanja gustoća energije

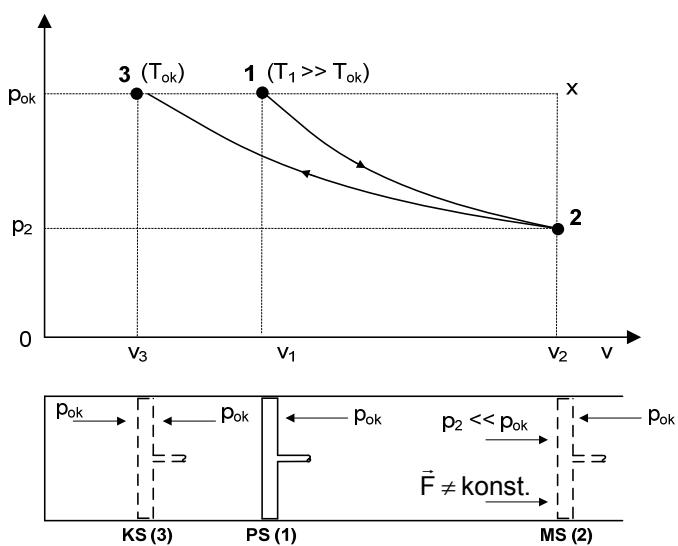
OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

Proces se sa Slike 6-20 primjenjuje u jednom dijelu kružnog procesa u termoelektrani. Početno stanje (1) stanje je vodene pare na ulazu u turbinu. Određenu količinu pare, što će proći kroz turbinu i kondenzirati se u kondenzatoru, možemo promatrati kao zatvoreni sustav koji treba povratljivim procesom prevesti u stanje okolice. Učinit ćemo to tako da se prvo izentropskom ekspanzijom (koja se odvija u turbini) promjeni temperatura pare na temperaturu okolice. Nakon toga, izotermnim se procesom u kondenzatoru postiže stanje okolice; vodena se para pretvara u vodu. (U stanju okolice vodena para je voda.) Toplinska je energija, koja se pritom odvodi u kondenzatoru, anergija budući da je na temperaturi okolice. U praksi takav je proces u kondenzatoru neprovediv, toplinska energija prelazi bi beskonačno sporo u okolicu. Zbog toga mora temperatura pare u kondenzatoru biti viša od temperature okolice, pa je gubitak eksergije u kondenzatoru, prema relaciji [6.50], jednak:

$$\text{deks}_{\text{gub}} = T_{\text{ok}} \frac{T_{\text{odv}} - T_{\text{ok}}}{T_{\text{odv}} T_{\text{ok}}} dq = \left(1 - \frac{T_{\text{ok}}}{T_{\text{odv}}} \right) dq \quad [6.58]$$

Gubici su eksergije u kondenzatoru, zbog malih razlika temperatura T_{odv} i T_{ok} , maleni, posve zanemarivi prema (velikim) gubicima eksergije u parnom kotlu termoelektrane. Naime, temperatura je plinova izgaranja mnogo veća od temperature vode (pare) u parnom kotlu budući da današnji materijali ne mogu izdržati visoke temperature izgaranja. Drugim riječima, mogućnosti su poboljšanja energetskih procesa u termoelektrani povezani s tehnologijom materijala, s materijalima otpornim na temperature postizive u procesu izgaranja, a ne s procesom odvođenja toplinske energije (anergije) u okolicu. (Sasvim suprotno od laičkog poimanja rješenja temeljenog na zahtjeru „učinimo nešto s otpadnom toplinom termoelektrane“. Pritom su inženjeri već dawno rješili pitanje energetskog poboljšanja procesa temeljenog na „otpadnoj toplini“ u svim slučajevima kad „otpadna toplina“ nekome treba: protutlačne parne turbine u procesu istodobne proizvodnje električne i toplinske energije ili parne turbine s oduzimanjem pare, poglavlje 7, kao i „spojni proces“ koji smo opisali u 3.2.)

Razmotrimo sada (teoretsku) mogućnost iskorištavanja unutrašnje kaloričke energije plinova izgaranja, dakle prilike kad izvor mehaničkog rada nije u razlikama tlakova prema okolici, nego u razlikama temperature. Upoznajmo proces različit od kružnog procesa u termoelektrani, Slika 6-21.



Slika 6-21 Maksimalni rad iz vrućih plinova

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBILKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

Neka je količina plinova izgaranja v_1 [m^3/kg], a njihov tlak jednak tlaku okolice, p_{ok} . (Plinovi obično nastaju u ložištu pri okolnom tlaku.) Polazeći od stanja 1, Slika 6-21, ekspandirat ćemo plinove na tako nizak tlak p_2 da se ohlade na temperaturu okolice, T_{ok} . Pritom se, naravno, mora obaviti rad spram tlaka okolice: taj je rad predočen površinom $1-x-v_2-v_1-1$. ($1-2-v_2-v_1-1$ rad je koji obave plinovi, a $1-x-2-1$ je vanjski rad koji treba uložiti.) Pošto smo u stanju 2 postigli temperaturu okolice na povratljivi način, treba plinove ponovno prevesti na tlak okolice i tako postići stanje okolice (p_{ok} , T_{ok}). Komprimirat ćemo stoga izotermno ($\Gamma = \text{konst.} = T_{ok}$), dakle povratljivo, plinove na tlak okolice. Pritom će toplinska energija prelaziti u okolicu, no ona je sva energija jer se nalazi na temperaturi okolice. Kompresiju obavlja okolni zrak jer je $p_{ok} > p_2$. Rad koji obavi zrak (okolica) za vrijeme procesa između stanja 2 i 3 predočen je površinom $3-x-v_2-v_3-3$. Pritom je rad potreban za komprimiranje plinova od tlaka p_2 na tlak okolice, p_{ok} , predočen površinom $2-v_2-v_3-3-2$, pa je sveukupni raspoloživi rad, ujedno i maksimalni rad, dobiven ovakvim procesom izjednačavanja gustoća energije, jednak ploštinu površine $1-2-3-1$. Rad je jednak, prema relaciji [6.55]:

$$\text{eks} = w_{\max} = u_1 - u_3 - T_{ok}(s_1 - s_3) + p_{ok}(v_1 - v_3) \quad [\text{J/kg}]$$

budući da smo početno stanje označili indeksom 1, a konačno, stanje okolice indeksom 3.

Pritom je

$$u_1 - u_3 = c_v(T_1 - T_{ok}), \quad s_1 - s_3 = c_p \ln \frac{T_1}{T_{ok}}, \quad \text{a } p_{ok}(v_1 - v_3) = R(T_1 - T_{ok}).$$

Isti bismo rad dobili i zbrajajući radove promjene volumena pojedinačnih odsječaka prikazanog procesa.

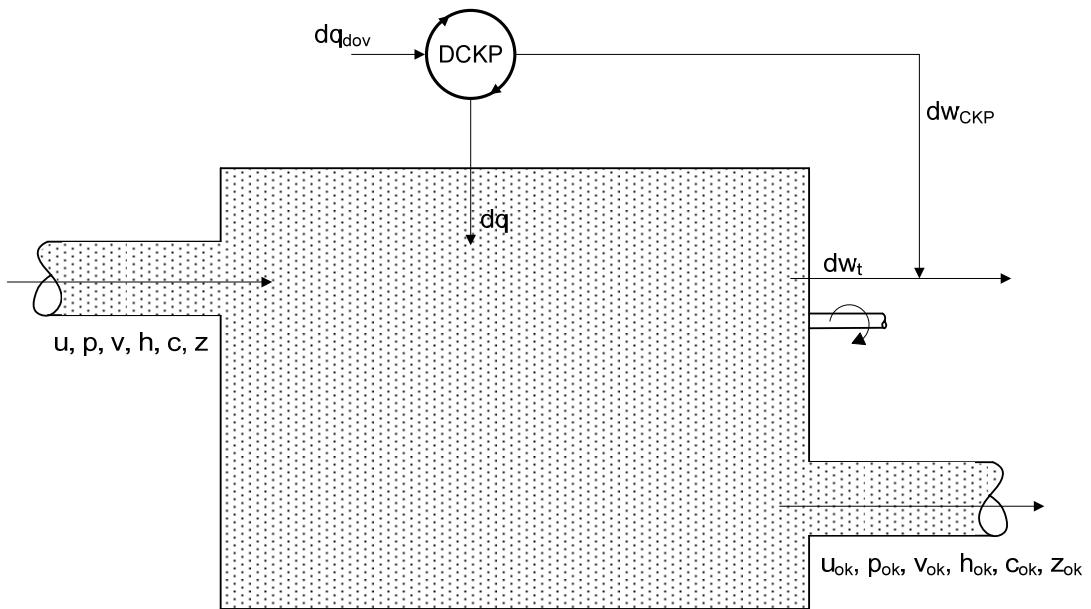
Opisani je proces međutim neprovediv u praksi, odnosno praktički se teško može provesti, zbog visokih temperatura plinova, što štetno djeluje na obrađene dijelove strojeva, kao i zbog velikog obujma plinova (cilindar sa stapom bi morao biti golemih dimenzija) pri vrlo niskom konačnom tlaku ekspanzije, p_2 .

6.7.1.3 Eksergija entalpije (otvorenog sustava)

Odredimo sada maksimalni korisni rad koji možemo dobiti iz otvorenog sustava u kojem se odvija neki jednodimenzionalni, stacionarni, strujni proces.

Maksimalni ćemo rad odrediti na način analogan razmatranju provedenom u slučaju zatvorenog sustava, Slika 6-22.

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**



Slika 6-22 Određivanje eksergije entalpije (otvorenog sustava)

$$dw_{\max} = deks = dw_t + dw_{CKP} = dw_t + T_{ok}ds - dq = - (dq - dw_t - T_{ok}ds) \quad [6.59]$$

No, budući da prema 1. glavnom stavku termodinamike za otvorene sustave vrijedi:

$$dq - dw_t = dh$$

to relaciju [6.52] možemo pisati u obliku koji se odmah može integrirati:

$$\int_{PS}^{KS} dw_{\max} = \int_{PS}^{KS} deks = - \int_{PS}^{KS} (dh - T_{ok}ds) = \int_{KS}^{PS} (dh - T_{ok}ds) = w_{\max} \quad [6.60]$$

$$w_{\max} = eks = h - h_{ok} - T_{ok}(s - s_{ok})$$

Zaključak je isti. Relacijom [6.60] određen je maksimalni (tehnički) rad (eksergija) koji se može dobiti iz entalpije otvorenog sustava; nikakvom domišljatošću, nikakvim naporom, ne možemo dobiti više rada.

Određujemo li pak ekserviju plina koji se dovodi u otvoreni sustav, i pritom ne zanemarujuemo njegovu kinetičku i potencijalnu energiju, relacija se [6.59] modificira u oblik:

$$w_{\max} = eks = h - h_{ok} - T_{ok}(s - s_{ok}) + \frac{c^2}{2} + gz \quad [6.61a]$$

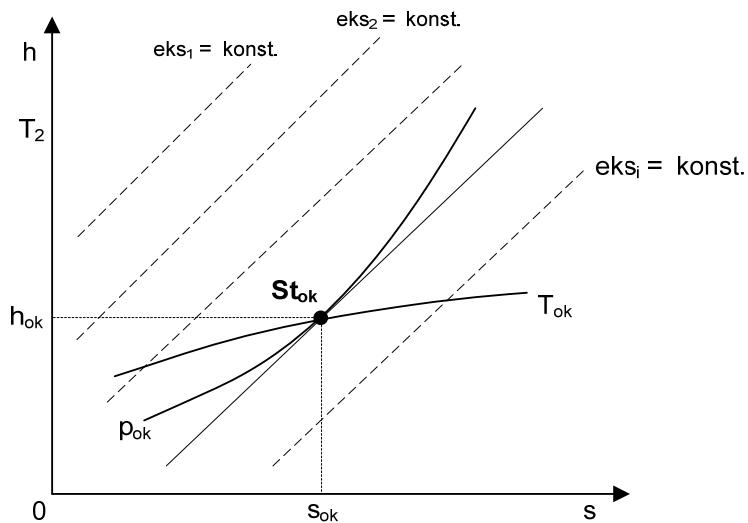
budući da su i kinetička i potencijalna energija ekservija.

I sada vrijedi, nije li konačno stanje (2) u termodinamičkoj ravnoteži s okolicom, tada je maksimalni rad (povratljivi rad) koji se može dobiti procesom između početnog stanja (1) i konačnog stanja (2) jednak:

$$w_{pov} = h_1 - h_2 - T_{ok} (s_1 - s_2) \quad [6.62b]$$

6.7.1.4 Određivanje eksergije pomoću h,s - dijagrama

Relacija [6.60] omogućuje jednostavno određivanje eksergije pomoću h,s – dijagrama. Kako? Nađimo prvo stanje okolice u h,s – dijagramu, tj. stanje određeno entropijom i entalpijom okolice. Kako? Stanje će okolice, St_{ok} , biti određeno presjecištem izoterme i izobare okolice, Slika 6-23.



Slika 6-23 Određivanje eksergije iz h,s - dijagrama

Naime, s obzirom da se i temperatura i tlak okolice tijekom dana mijenjaju u nekim određenim granicama, trenutačno je stanje okolice određeno njihovim presjecištem. Povucimo sada tangentu na izobaru okolice u točki stanja okolice. To je pravac kroz jednu točku, pa je jednadžba tog pravca u h,s – koordinatnom sustavu jednaka:

$$h - h_{ok} = k(s - s_{ok}) = T_{ok}(s - s_{ok}) \quad [6.63]$$

Pritom je koeficijent smjera pravca jednak temperaturi okolice ($k = T_{ok}$). Zašto? Koeficijent je smjera pravca određen činjenicom da je pravac tangenta na izobaru okolice. Naime, kombinirajući relacije 1. i 2. glavnog stavka termodinamike vrijede ovi odnosi:

$$dq = Tds = dh - vdp = dh \quad (vdp = 0 \text{ budući da promatramo stanje konstantnog tlaka})$$

Dakle je $dq_p = dh = Tds$ (toplinska energija izmijenjena za vrijeme izobarnog procesa), pa je

$$\left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)_{p=konst.} = T. \quad (\text{Promatramo promjenu entalpije kad se mijenja entropija a tlak je pritom konstantan; zato parcijalna derivacija.})$$

No, ako je $p = p_{ok} = \text{konst}$, to je (tlaku okolice odgovara temperatura okolice)

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**

$$\left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)_{p_{ok}=kons.} = T_{ok} = k, \quad [6.64]$$

jer je koeficijent smjera pravca u h,s – koordinatnom sustavu jednak $\frac{dh}{ds}$.

Što smo dobili relacijom [6.63]: $h - h_{ok} = T_{ok}(s - s_{ok})$?

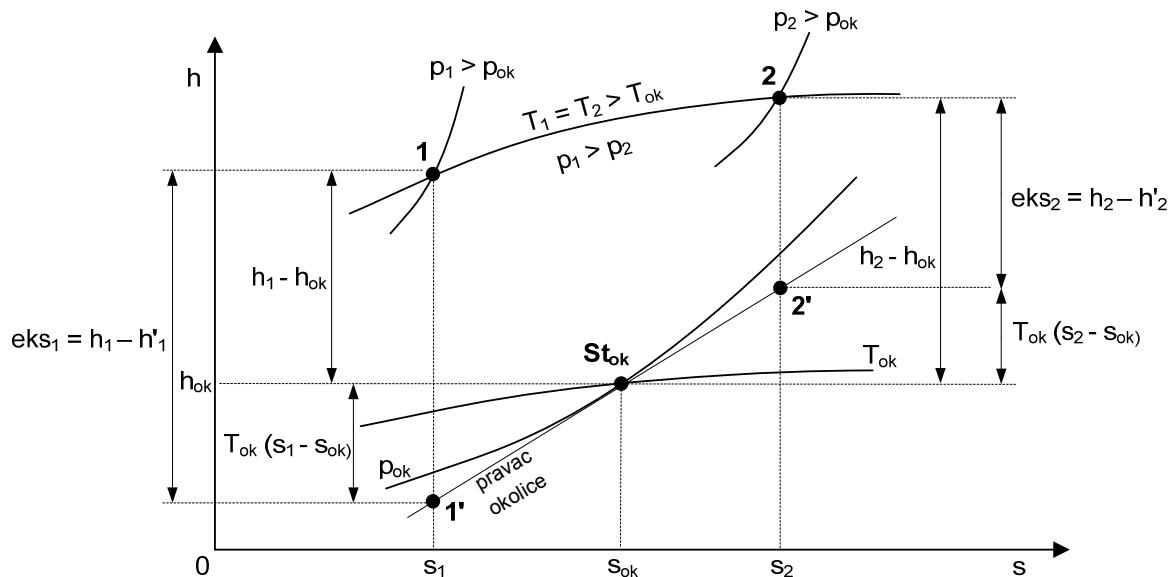
Ako se u relaciju [6.60], $eks = h - h_{ok} - T_{ok}(s - s_{ok})$, postavi $eks = 0$ (eksergija je jednaka nuli), dobiva se relacija $h - h_{ok} = T_{ok}(s - s_{ok})$ što znači da je tangenta na izobaru $p_{ok} = \text{konst.}$ u točki stanja okolice pravac koji spaja sve točke (sva stanja) s vrijednošću eksergije jednakom nuli. (Sva je energija tih stanja anergija, stanja su u stanju okolice.) Taj je pravac nazvan pravcem okolice. Sve su linije za $eks = \text{konst.}$ (sva stanja određene vrijednosti eksergije) u h,s – dijagramu prema tome pravci koji su paralelni s pravcem okolice. Moguće je dakle u h,s – dijagramu nacrtati pravce $eks = \text{konst.}$ i vrijednost eksergije za svako stanje odrediti sruštanjem okomice ($s = \text{konst.}$, time simuliramo povratljivi proces izjednačavanja sa stanjem okolice) na pravac okolice i zatim mjerenjem duljine dužine između promatranog stanja i pravca okolice: iznos je duljine jednak vrijednosti eksergije promatranog stanja.

6.7.1.4.1 Eksergija plina

Zanimat će nas sada kolika je eksergija energije plina koja se u termoelektranama i nuklearnim elektranama s plinskim turbinama pretvara u električnu energiju. (Odnosno, dakako, i kolika je eksergija energije akumulirane u vodenoj pari koja se u termoelektranama i nuklearnim elektranama s parnim turbinama pretvara u električnu energiju.) Pritom, međutim, moramo još nešto uočiti. U prva dva slučaja fluid (plin), posrednik u energetskim transformacijama, ne mijenja agregatno stanje. U slučaju termoelektrana i nuklearnih elektrana s parnim turbinama mijenja se međutim agregatno stanje fluida (plin – kapljevina).

Analizirajmo prvo prvi slučaj, Slika 6-24.

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**



Slika 6-24 Određivanje eksergije iz h,s – dijagrama za plinovito područje

Na slici su ucrtane vrijednosti eksergije za stanja 1 i 2, eks₁ i eks₂:

eks₁ = h₁ - h'₁, eks₂ = h₂ - h'₂. U stanju 1' i 2' sva je energija sustava (1 kg plina) anergija (stanja se nalaze na pravcu okolice), no, ta stanju nisu stanje okolice (sustav još nije u stanju okolice, St_{ok} na slici). Zbog toga će, u prvom slučaju, toplinska energija, koja je sva anergija, strujati iz okolice u sustav do trenutka kada se postigne stanje okolice, tlak i temperatura okolice. Naime, prema [6.60], dobivamo (početno je stanje označeno s indeksom 1):

$$\text{eks}_1 = h_1 - h_{\text{ok}} - T_{\text{ok}}(s_1 - s_{\text{ok}}) = h_1 - h'_1. \quad [6.65]$$

Jer je s₁ < s_{ok}, to je drugi član desne strane jednadžbe [6.65] pozitivan što znači da se u sustav dovodi toplinska energija (iz okolice). Sva je ta energija međutim, istaknimo ponovno, anergija (transformirana unutrašnja kalorička energija okolice) koja se pretvara u unutrašnju kaloričku energiju sustava kako bi se ona izjednačila (gustoća) s unutrašnjom kaloričkom energijom okolice (energijom najmanje gustoće).

U drugom slučaju, suprotno, toplinska energija, koja je anergija, strujat će sa sustava u okolicu do trenutka kada se postigne stanje okolice, tlak i temperatura okolice:

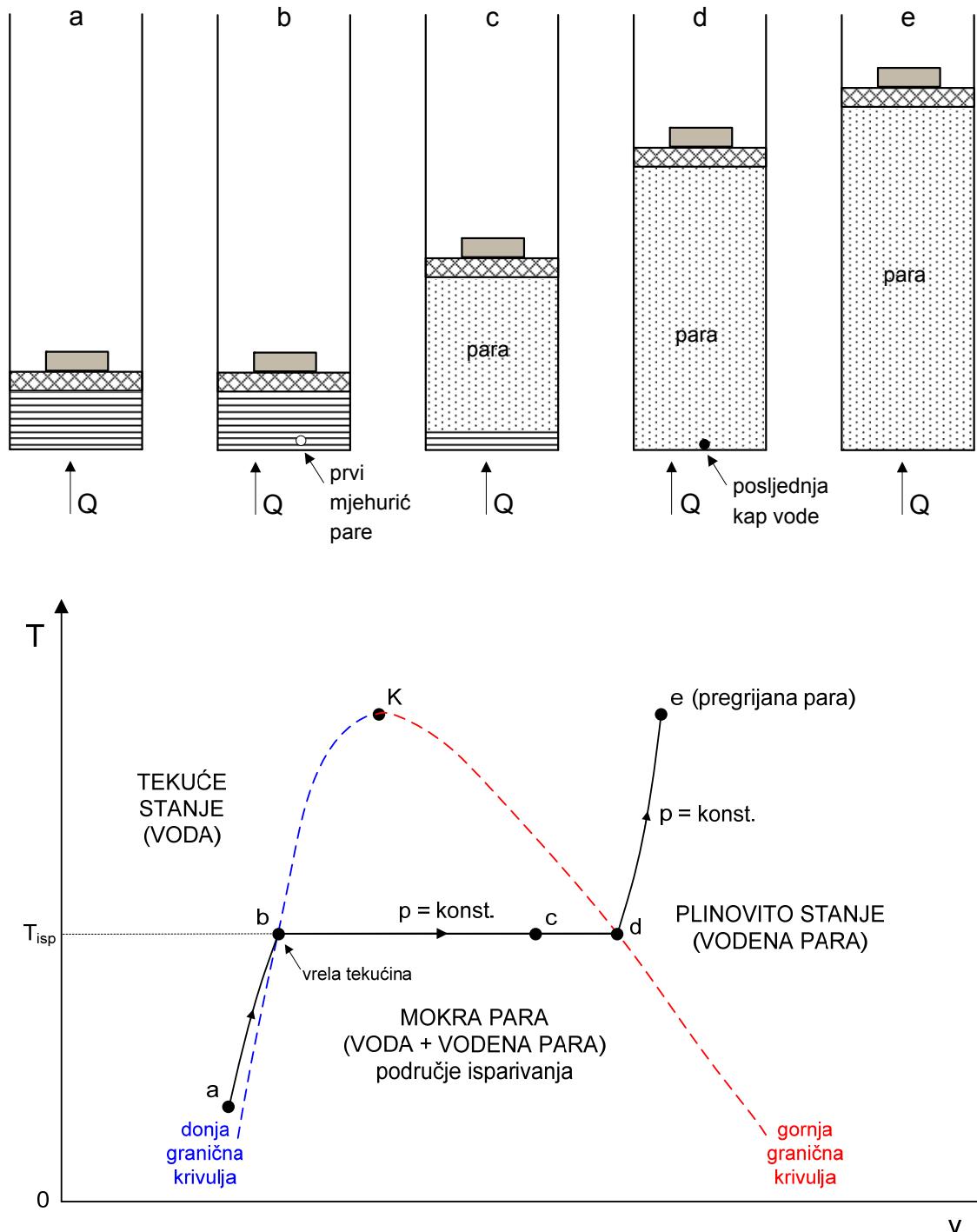
$$\text{eks}_2 = h_2 - h_{\text{ok}} - T_{\text{ok}}(s_2 - s_{\text{ok}}) = h_2 - h'_2. \quad [6.66]$$

Sada, jer je s₂ > s_{ok}, to je drugi član desne strane jednadžbe [6.66] negativan što znači da se toplinska energija (anergija) odvodi iz sustava u okolicu: smanjuje se zbog toga gustoća unutrašnje kaloričke energije sustava sve do izjednačenja s gustoćom unutrašnje kaloričke energije okolice.

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**

6.7.1.4.2 Eksergija vodene pare

U stanju je okolice vodena para (plin) voda (kapljevina, tekućina). Podsjetimo se stoga procesa isparivanja vode i pregrijavanja vodene pare, odnosno kondenzacije vodene pare, Slika 6-25.



Slika 6-25 Isparivanje vode i pregrijavanje vodene pare uz konstantni tlak

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

Proces ćemo prikazati stanjima fluida (vode i vodene pare) u posudi zatvorenoj stupom s konstantnim opterećenjem da bi se osigurao konstantan tlak.

(Na isti se način proces odvija u prirodi odnosno u tehničkim sustavima: agregatna se stanja mijenjaju dovođenjem ili odvođenjem toplinske energije uz konstantni tlak. Tehnički takav je proces jednostavno ostvariti, što je važno, budući da je takav proces, s energetskog stajališta, ujedno i najbolji proces aggregatnih pretvorbi.)

Početno je stanje vode prikazano stanjem **a** u posudi i u T,v – dijagramu u kojemu ćemo isto pratiti promjene stanja za vrijeme zagrijavanja i isparivanja vode i pregrijavanja vodene pare. U stanju **a** voda je na temperaturi okolice, no na tlaku većem od tlaka okolice. Da bi započelo isparivanje treba vodu dovođenjem toplinske energije ugrijati na temperaturu vrelišta (isparivanja, zasićenja) koja odgovara tlaku pod kojim se voda nalazi, Slika 3-12.

(Dovođenjem toplinske energije jedva se zamjetljivo povećava volumen; zbog zornosti nacrtat ćemo to povećanje prenaglašeno.)

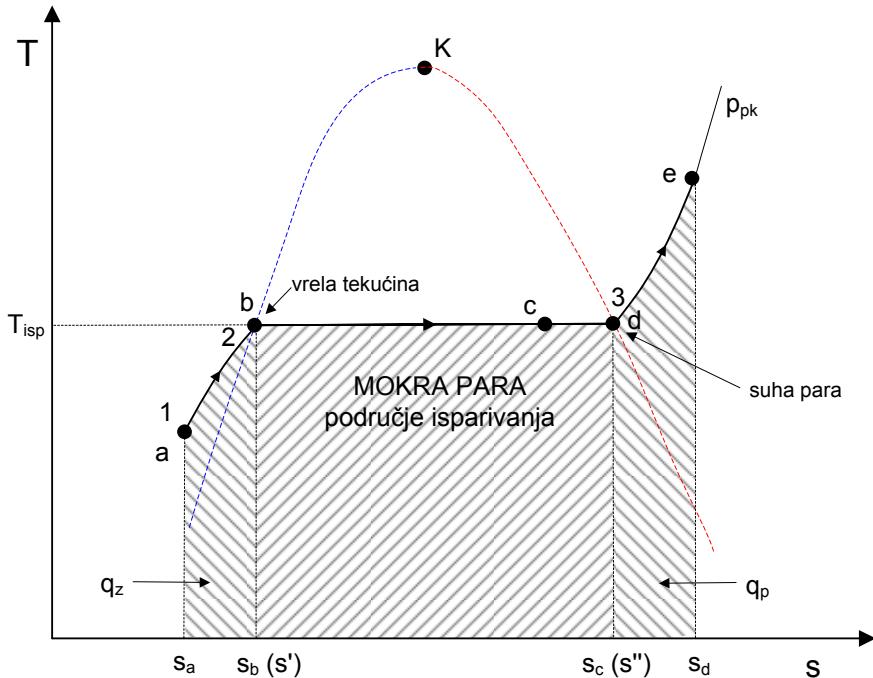
Isparivanje započinje dakle kad je voda dosegla stanje **b** na slici pa se tada pojavljuju prvi mjeđurići (vodene) pare (plina). Kapljevina (voda) na temperaturi vrelišta naziva se **vrela (kipuća)** ili **zasićena kapljevina (tekućina, voda)**. Proizvedena para ima istu temperaturu kao i vrela kapljevina (tekućina). Dalnjim dovođenjem toplinske energije sve više vode isparuje, volumen se naglo povećava, ali temperatura ostaje nepromijenjena. (Sva se toplinska energija troši na svladavanje međumolekularnih sila.) Između stanja **b** i **d** postoji dakle smjesa vrele vode koja isparuje i pare koja je nastala isparivanjem vode. Voda i para u termodinamičkoj su ravnoteži budući da imaju isti tlak i temperaturu. Ta se smjesa naziva **mokrom parom**. Tek kad ispari i posljednja kap vode (stanje **d**), mokra para prelazi u stanje **suhe (zasićene ili suhozasićene) pare**. Nakon toga moguće je uz daljnje dovođenje toplinske energije, a uz konstantni tlak, povisiti temperaturu pare (stanje **e**). Takva se para naziva **pregrijanom parom**.

Proces je moguće obrnuti. Odvođenjem toplinske energije pregrijana će para unatrag prelazi sva stanja do vode stanja **a**. Povisujemo li i snižavamo tlak u posudi, stanja će **b** i **d** opisivati zvonoliku krivulju s tijekom u stanju **K**, slika. Stanje **K** u kojem se sastaju krivulja isparivanja (krivulja stanja **b** koja se naziva i **donjom graničnom krivuljom**) i krivulja kondenzacije (rosišta, krivulja stanja **d** u kojem započinje kondenziranje pare ako se odvodi toplinska energija i koja se naziva i **gornjom graničnom krivuljom**) naziva se **kritičnim stanjem (kritičnom točkom)**. Izoterna i izobara koje prolaze kroz kritičnu točku nazvane su **kritična temperatura** ($T = T_k$) i **kritična izobara** ($p = p_k$). Samo pri temperaturama nižima od kritične temperature moguće je ravnotežno stanje tekućega i plinovitog agregatnog stanja, odnosno, isparivanje i kondenzacija mogući su samo pri temperaturama $T < T_k$. Iznad te temperature i kritičnog stanja nema granice između ta dva stanja, Slika 3-12: tekućina (kapljevina) se pretvara (i obrnuto) u plin a da se ne prolazi kroz područje isparivanja (kondenzacije); ne postoji mokra para.

Proces smo isparivanja vode i pregrijavanja vodene pare uz konstantni tlak promatrali u T,v – dijagramu, Dakako, možemo se poslužiti i bilo kojim drugim termodinamičkim koordinatnim sustavom: p,v, T,s ili h,s primjerice. Dobili bismo vrlo slične (iste) slike s jednom iznimkom: u h,s – dijagramu kritična se točka ne nalazi u tijeku zvonolike krivulje koja odvaja dva agregatna stanja vode: kapljivo (tekuće) i plinovito. Promatramo li opisani proces u T,s – dijagramu, Slika 6-26, površina je ispod krivulje konstantnog tlaka

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**

zagrijavanja i isparivanja vode i pregrijavanja pare jednaka količinama dovedene toplinske energije potrebne za odvijanje tih procesa.



Slika 6-26 Promjene stanja vode i vodene pare za vrijeme zagrijavanja, isparivanja i pregrijavanja

Dakle je ukupno izmjenjena (u ovom slučaju dovedena) toplinska energija jednaka zbroju pojedinačnih toplinskih energija:

$$q_{ae} = q_z + r + q_p \quad [6.67]$$

pri čemu q_z označava toplinsku energiju potrebnu za zagrijavanje vode do temperature isparivanja, sa slovom se r uobičajeno označava toplina isparivanja, toplinska energija koju treba dovesti jednom kilogramu vrele kapljevine da bismo je pri konstantnom tlaku, a ujedno i konstantnoj temperaturi T_{isp} , doveli u stanje suhe (suhozasićene) pare. Veličina q_p predstavlja toplinu pregrijavanja; toplinsku energiju koju moramo dovesti jednom kilogramu suhe pare da bismo je preveli u stanje pregrijanosti.

Plinovite tvari kojih je stanje blizu gornje granične krivulje nazivaju se pregrijanim parama. Pregrijana se para po svojim svojstvima ne razlikuje od nekog „pravog“ plina; odaberemo li dosta niske tlakove svaka će se pregrijana para vladati kao idealni plin, a sve gušće pregrijane pare (sa sve manjim specifičnim volumenom) odstupaju sve više od idealnog ponašanja. (Kaže se da se guste pare ponašaju kao realni plinovi.) No uvriježilo se plin koji se nalazi blizu stanja suhe (suhozasićene) pare nazivati parom. Pritom možemo svaki plin prikladnim izborom tlaka i temperature prevest u stanje zasićenosti. Između područja pare i područja plina nema nikakve fizikalne granice. Zbog toga je naziv stanja u plinovitom području više stvar običaja nego definicije. Tako se voda u plinovitom stanju naziva vodenom parom bez obzira na udaljenost od gornje granične krivulje. Nasuprot tome, npr., za helij se uvijek govoriti o plinu, pa i onda kad je riječ o stanju u blizini gornje granične krivulje.

OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU (MEHANIČKI RAD)

Za idealne se plinove iz jednadžbe stanja dobiva $\frac{pv}{RT} = 1$, a za realne plinove i za pregrijanu paru taj se omjer više ili manje razlikuje od jedinice: $\frac{pv}{RT} = k \neq 1$, gdje je k faktor realnosti.

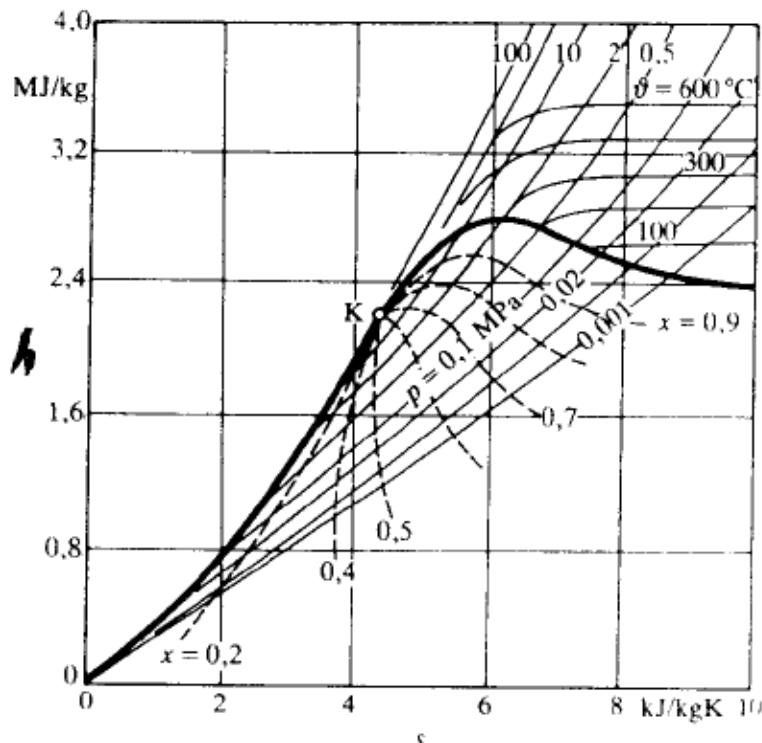
Što se faktor realnosti manje razlikuje od jedinice, to se ponašanje realnog plina više približava idealnom plinu.

Na gornjoj graničnoj krivulji svojstva vodene pare najviše odstupaju od svojstava idealnog plina, a ta su odstupanja to manja što je viša temperatura pregrijane pare u odnosu prema temperaturi isparivanja (vrelišta). Pregrijana se vodena para sve više približava idealnim plinovima što je tlak niži. Budući da postoji kontinuirani prijelaz između suhe pare i stanja idealnog plina, moraju, teorijski gledano, postojati jednadžbe stanja koje obuhvaćaju cijelo područje plinovitog stanja. Takve jednadžbe stanja moraju u krajnjim stanjima prijeći u oblik $pv = RT$. Ima više empiričkih jednadžbi stanja (Van der Waals, Callendar, Mollier), koje više ili manje vjerno opisuju promjene stanja vodene pare, no njihova je upotreba otežana jer su to relacije s većim brojem članova pa se za praktične proračune upotrebljavaju parne tablice i dijagrami.

U parnim su tablicama navedeni podaci o pojedinim vrijednostima veličina stanja. Standardne tablice imaju tri dijela: dva se odnose na zasićenu vodenu paru (mokru paru), a treći na područje pregrijane pare. Takve su tablice izrađene za sve tvari kojima se koristimo u tehničkim procesima. Npr., jedna od tablica za vodenu paru daje vrijednosti ovisno o temperaturi, a druga ovisno o tlaku. Polazi se od temperatura u °C ili K uz koje se daju odgovarajući tlakovi u barima. U tablici su podaci o gustoći (ρ kg/m³), o specifičnim volumenima (v m³/kg), o specifičnim entalpijama (h kJ/kg), o entalpiji isparivanja (r kJ/kg) i o specifičnim entropijama (s kJ/kg). U svim su slučajevima navedene vrijednosti za gustoću, volumen, entalpiju i entropiju za vrelu vodu (oznaka crticom ') i za suhu paru (oznaka dvjema crticama ''). Druga tablica sadrži iste podatke ali, polazeći od tlakova, daju se odgovarajuće temperature i zatim ostali podaci navedeni za prvu tablicu. Tablica pak za pregrijanu paru sastoji se od niza tablica koja je svaka za određeni tlak. Npr., u njima su podaci za tlakove od 0,001 do 95,0 MPa. Svaka se tablica sastoji od dva dijela: jednog u kojemu se nalaze podaci za kapljivo stanje i drugog s podacima za područje pregrijane pare. Granicu između ta dva dijela čini temperatura isparivanja, a može se zapaziti jer se pojavljuju znatne razlike svih veličina stanja. Takva granica međutim ne postoji kad su to tlakovi iznad kritičnog tlaka.

Od dijagraama najviše se upotrebljava dijagram u koordinatnom sustavu entalpija-entropija (h,s – dijagram), koji se po svom autoru naziva i Mollierov dijagram, a koji ima znatne praktične prednosti. U njemu su naime entalpije prikazane dužinama pa je te veličine stanja koje se pojavljuju u formulaciji prvog glavnog stavka termodinamike za otvorene sustave [3.41] moguće neposredno odčitati. Zbog toga je h,s – dijagram postao jedan od najvažnijih i najčešće upotrebljavanih dijagrama veličina stanja, Slika 6-27.

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**

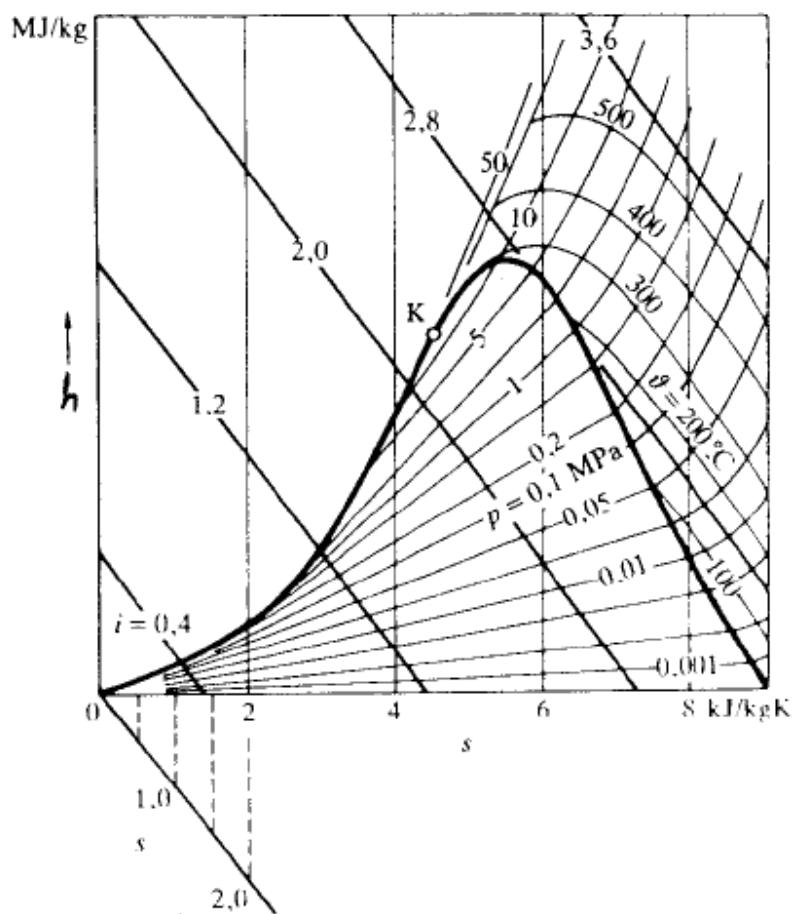


Slika 6-27 h,s – dijagram za vodu

Na dijagramu su pokazane gornja i donja granična krivulja, kritična točka, izobare ($p = \text{konst.}$), izoterme ($T = \text{konst.}$) i krivulje konstantnog sadržaja pare ($x = \text{konst.}$) o kojima će kasnije biti govora. Izobare su u plinovitom području malo zakrivljene, a njihov je nagib, kako smo pokazali, određen relacijom $\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_p = T$. U području mokre pare izobare su pravci

jer je uz $p = \text{konst.}$ također $i T = \text{konst.}$ Takvi su pravci sve strmiji što je tlak viši jer je tada i temperatura viša. Izobara za kritični tlak dodiruje granične krivulje u najstrmijem dijelu gdje se nalazi i kritična točka. U području mokre pare izoterme su istodobno i izobare. Na gornjoj se graničnoj krivulji pojavljuje lom, pa su u području pregrijane pare izoterme položenije od izobara. Na nekoj udaljenosti od gornje granične krivulje izoterme prelaze u vodoravne pravce jer se zbog pada tlaka pregrijana para po svojim svojstvima sve više približava idealnom plinu. Osim toga entalpija je idealnog plina samo funkcija temperature jer je pv u relaciji $h = u + pv$ za idealne plinove proporcionalan temperaturi ($pv = RT$). Zbog toga su izoterme istodobno i izentalpe (krivulje konstantne entalpije). Da bi se uz istu površinu dijagrama dobilo veće mjerilo za entalpiju, često se h,s – dijagram crta u kosokutnom koordinatnom sustavu, Slika 6-28, u kojemu se obično izoterna za 0°C postavlja horizontalno.

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**



Slika 6-28 Kosokutni h,s – dijagram za vodu

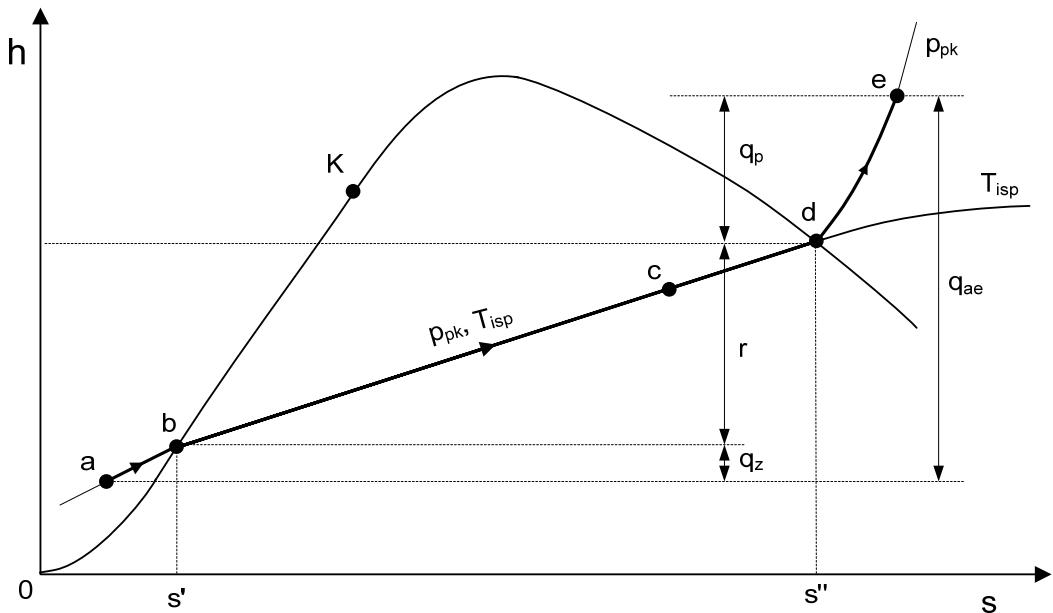
Kako je cijelokupni promatrani proces zagrijavanja i isparivanja vode i pregrijavanja vodene pare izobarni, pojedine se topline, odnosno ukupna toplina mogu računati prema jednadžbi $dq = dh - vdp = dh$ ($dp = 0$)

pa se često nazivaju entalpijama: entalpija zagrijavanja, isparivanja i pregrijavanja

$$q_{ac} = q_z + r + q_p = (h_b - h_a) + (h_d - h_b) + (h_e - h_d)$$

a koje se u h,s – dijagramu, Slika 6-29, prikazuju kao razlike ordinata, tj. kao duljine.

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**



Slika 6-29 Određivanje entalpija zagrijavanja, isparivanja i pregrijavanja iz h,s - dijagrama

Razlika specifičnih entalpija ($h_b - h_a$) predstavlja razliku specifičnih toplina vode pa se može izračunati i ovako:

$$h_b - h_a = h' - h_a = c(T_{isp} - T_a) \quad [6.68]$$

(Dogovorno se sve fizičke veličine koje pripadaju stanju vrele vode (one na donjoj graničnoj krivulji) označavaju s jednom crticom ('), a one koje pripadaju stanju suhe pare (stanjima na gornjoj graničnoj krivulji s dvije crtice ('').)

Isto tako, član ($h_e - h_d$) označava razliku specifičnih entalpija pregrijane i suhe pare (jednofazna kompresibilna tvar), pa se može izračunati pomoću relacije:

$$h_e - h_d = h_e - h'' = c_p(T_e - T_{isp}) \quad [6.69]$$

Toplinu isparivanja r , odnosno razliku specifičnih entalpija, ne možemo računati prema jednadžbi analognoj gornjima, jer je tijekom procesa isparivanja razlika temperatura $T_d - T_b = T'' - T' = 0$

($T'' = T' = T_{isp}$), pa za područje isparivanja (mokre pare) dobivamo:

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_p \approx \frac{r}{\delta T = 0} \rightarrow \infty \quad [6.70]$$

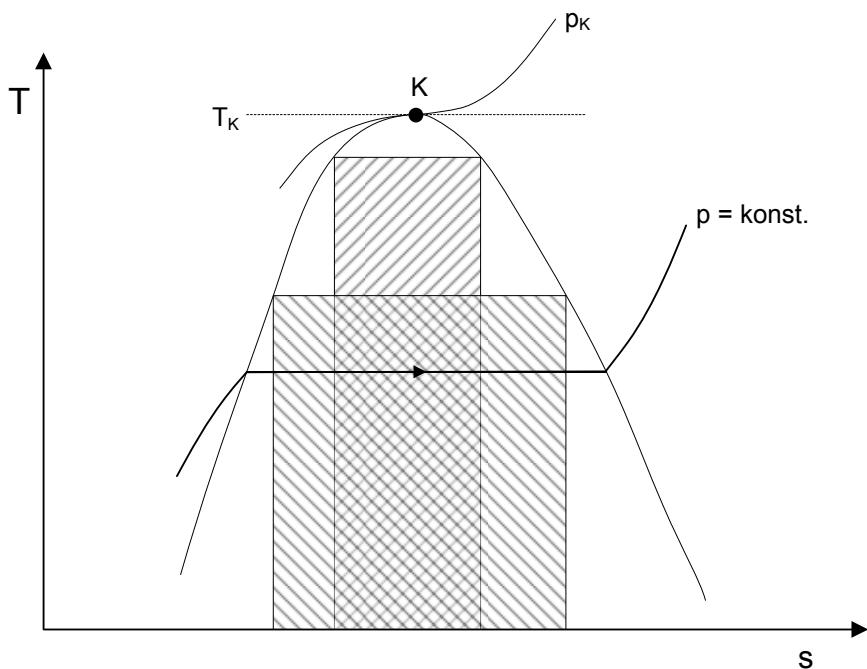
odnosno da je specifična toplina mokre pare pri konstantnom tlaku beskonačno velika. (Dovodi se toplinska energija, pri konstantnom tlaku, a temperatura mokre pare ostaje konstantna. Specifična toplina pri konstantnom volumenu, c_v , ima međutim u čitavom području mokre pare konstantnu vrijednost.) Zbog toga se u području mokre pare i u blizini gornje granične krivulje, do tlakova oko 25 bar, uzima da je $\nu = 1,135$. (To ne vrijedi za

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**

pregrijano područje.) Radi se o empiričkoj veličini bez fizikalnog značenja. Odnosno, toplina se isparivanja r računa kao razlika specifičnih entalpija suhe pare i vrele kapljevine:

$$r = h_d - h_b = h'' - h' = u'' - u' + p(v'' - v') \quad [6.71]$$

Prema tome entalpija se isparivanja sastoji od povećanja unutrašnje kaloričke energije ($u'' - u'$) i obavljenog rada zbog povećanja volumena $p(v'' - v')$. Unatoč tome što isparivanjem znatno raste volumen, drugi član u izrazu [6.71] samo je mali dio energije potrebne za isparivanje. Entalpija je isparivanja sve manja što je temperatura viša, a to se može vidjeti i iz površina u T,s – dijagramu, Slika 6-30.



Slika 6-30 Entalpija isparivanja u T,s – dijagramu

Za kritičnu temperaturu entalpija isparivanja postaje jednaka nuli jer tada obje granične krivulje padaju u istu točku.

Međutim, ploštine površina u T,s – dijagramu možemo izračunati i pomoću vrijednosti entropija:

$$q_{ae} = q_z + r + q_p = \int_{s_a}^{s_b} T ds + \int_{s_b}^{s_d} T ds + \int_{s_d}^{s_e} T ds \quad [6.72]$$

U gornjoj se jednadžbi može najlakše integrirati član

$$r = \int_{s_b}^{s_d} T ds = T'(s_d - s_b) = T'(s'' - s') \quad [6.73]$$

**OGRANIČENJA PRETVORBAMA OBЛИKA ENERGIJE U EKSERGIJU
(MEHANIČKI RAD)**

jer je unutar područja mokre pare temperatura konstantna i jednaka temperaturi isparivanja: $T' = T_{\text{isp}}$.

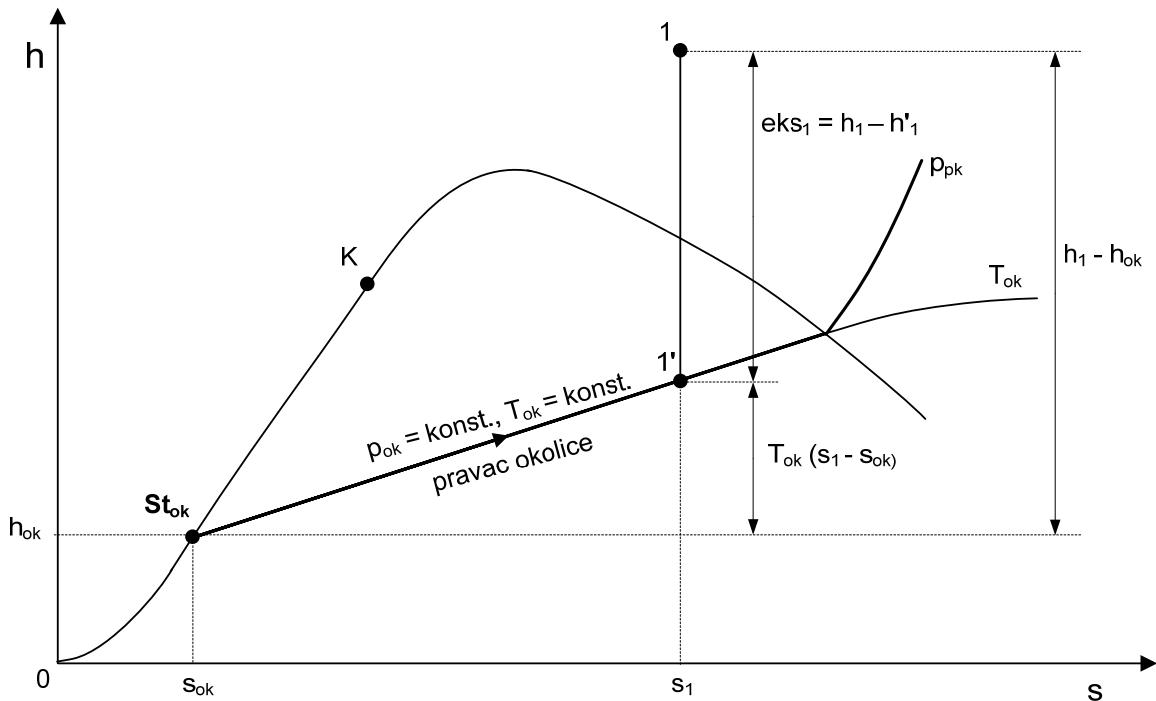
Zbog konstantnog tlaka lako je odrediti i bilo pojedinačni bilo sveukupni mehanički rad promjene volumena (zbog ekspanzije vode odnosno vodene pare) tijekom cijelokupnog procesa od **a** do **e**:

$$w_{ae} = \int_{v_a}^{v'} p dv + \int_{v'}^{v''} p dv + \int_{v''}^{v_e} p dv = p(v' - v_a) + p(v'' - v') + p(v_e - v'') = p(v_e - v_a) \quad [6.74]$$

Promjena se pak unutrašnje kaloričke energije tijekom cijelog procesa može odrediti iz relacije:

$$u_e - u_a = q_{ae} - w_{ae} = h_e - h_a - p(v_e - v_a) \quad [6.75]$$

U h,s – dijagramu, u kojemu se pojavljuje područje isparivanja, dakle stanja između donje i gornje granične krivulje, Slika 6-31, tlak i temperatura, kao i u svim ostalim dijagramima, padaju zajedno u isti pravac pa je stanje okolice stanje s tlakom p_{ok} i temperaturom T_{ok} na donjoj graničnoj krivulji: voda se nalazi u kapljevitom agregatnom stanju koje je najniže energetsko stanje vode.



Slika 6-31 Određivanje eksergije vodene pare iz h,s – dijagrama

Eksergija je vodene pare stanja 1 prema tome jednaka:

$$\text{eks}_1 = h_1 - h_1' = h_1 - h_{\text{ok}} - T_{\text{ok}}(s_1 - s_{\text{ok}}) \quad [6.76]$$

$T_{\text{ok}}(s_1 - s_{\text{ok}})$ anergija je toplinske energije koja se u obliku toplinske energije odvodi u okolicu.

9 Energijeske pretvorbe i procesi u hidroelektranama

9.1 Uvodna razmatranja

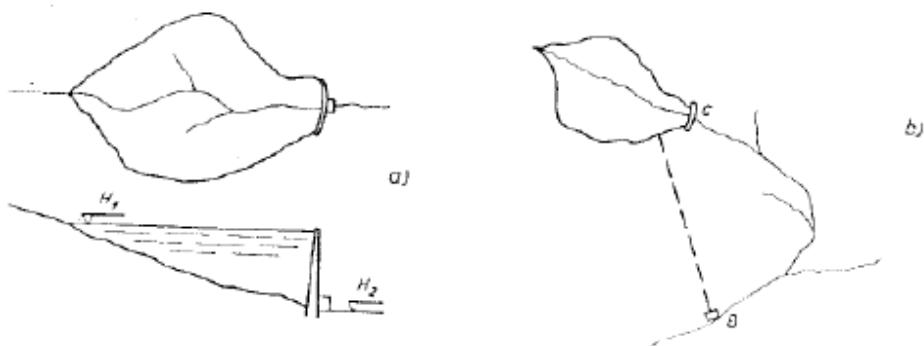
Hidroelektranama nazivamo postrojenja u kojima se gravitacijska potencijalna energija (kraće, potencijalna energija ili energija položaja) vode, pomoću rotacijskih strojeva (turbina, elisa) i električnih generatora (sinkronih i asinkronih), pretvara u električnu energiju bez obzira na to radi li se o energiji Sunčeva zračenja transformiranoj u potencijalnu energiju vode ili o potencijalnoj energiji vodenih masa nastaloj uzajamnim gravitacijskim djelovanjem Sunca i Mjeseca, ali i rotacije Zemlje, energiji plime i oseke. (*S druge strane međutim, energija valova, u konačnosti također preobražena energija Sunčeva zračenja, ne pretvara se u hidroelektranama u električnu energiju; zasad ne postoje takve hidroelektrane.*) Takvo je iskorištavanje energije vode ekonomski konkurentno proizvodnji električne energije iz fosilnog i nuklearnog goriva, te je stoga hidroenergija (energija vode) najvažniji obnovljivi izvor energije. U posljednjih je tridesetak godina proizvodnja u hidroelektranama utrostručena, a njezin udio povećan za 50 %. U istom je razdoblju proizvodnja u nuklearnim elektranama povećana 100 puta, a udio oko 80 puta. Ti podaci pokazuju da se proizvodnja u hidroelektranama brzo povećava, ali i da zaostaje za proizvodnjom u nuklearnim elektranama i, pogotovo, klasičnim termoelektranama. Razlog je tomu činjenica da iskorištavanje potencijalne energije vode otežavaju (brojnija) tehnička (pogonski zahtjevi), prirodna ali i „životna“ ograničenja. Primjerice, jedno je od ograničenje nužnost raspolažanja s obilnim (golemim) količinama vode, kako bi se raspolažalo s traženom količinom potencijalne energije kada se to zahtijeva, pa je stoga na vodotocima (rijekama) potrebno izgraditi brane i akumulacije (akumulacijska jezera). Njihovom se izgradnjom, ukoliko to uopće omogućuju prirodne okolnosti (topografski i geološki uvjeti), remeti „prirodni“ život rijeke, povećavaju troškovi izgradnje hidroelektrane i negativni utjecaji na okoliš, te i pojavljuje nova (velika) opasnost: mogućnost razaranja brane prirodnim (potresi) ili ljudskim djelovanjem (rat, terorizam). Spominjući „životna“ ograničenja mislimo pritom na hidroenergetsko iskorištavanje vodotoka (rijeka) ograničeno potrebama drugih korisnika rijeke: faune i flore u rijeci, odvijanja prometa (plovidbe) rijekom, migracije riba, potrebama poljoprivrede (natapanje, odvodnjavanje) i opskrbe vodom (za piće, napajanje stoke), ribarstva i ekologije, očuvanje i održavanje ekosustava i prirodnih ljepota (ugroženih potapanjem velikih površina) i dr. Gradnju hidroelektrane, izbor njezinog tipa, nemoguće je unificirati zbog toga; svaki konkretni slučaj traži specifično rješenje. Naime, svaka se hidroelektrana gradi na određenom potezu rijeke kako bi iskorištavala energiju tog dijela vodotoka, koja pak ovisi o količini vode koja protjeće koritom rijeke (protok $Q \text{ m}^3/\text{s}$) i o visinskoj razlici između dovoda vode u hidroelektranu i odvoda vode iz hidroelektrane ($H \text{ m}$), a koja bi se inače, u prirodnim uvjetima, utrošila u koritu rijeke najvećim dijelom za svladavanje otpora trenja, za razaranje dna i obala, te za prijenos proizvoda toga razaranja. Hidroelektrane moraju stoga sadržavati uređaje i objekte (građevine) poput brana i akumulacija (akumulacijskih jezera) koje će usporavati vodu (podizati razinu vode) i regulirati protok, kanala, tunela i tlačnih cijevi koji će dovoditi vodu u i odvoditi vodu iz hidroelektrane i strojarnice s rotacijskim strojevima, u kojima će se potencijalna energija vode transformirati u mehanički rad, i električnim generatorima u kojima će se mehanički rad pretvarati u električnu energiju. Pritom, najjednostavnije, razina se vode podiže gradnjom brane u koritu rijeke gdje su obale dosta visoke, [slika 9-1](#). Ako su obale relativno niske, moraju se graditi zaštitni nasipi uzduž korita, da se ne poplave velike površine zemljišta. Takva shema energetskog iskorištavanja vodotoka odgovara pribranskoj

hidroelektrani. Naime, s obzirom na izvedbu, možemo hidroelektrane podijeliti u dvije velike grupe: pribranske i derivacijske.



Slika 9-1 Brana hidroelektrane "Hoover Dam"

U prvu grupu spadaju hidroelektrane koje imaju strojarnicu smještenu uz branu ili unutar brane ili je strojarnica izvedena kao dio brane, [slika 9-2 a\)](#). Tada je (teoretski) moguće upotrijebiti sav dotok koji dolazi do mjesta gdje je izgrađena hidroelektrana. Obično radi se o hidroelektranama na velikim rijekama sa širokim koritom, velikim količinama vode, i relativno malim padovima. Ako je pad veći, normalno se gradi derivacijska hidroelektrana, [slika 9-2 b\)](#), u kojoj se voda kanalom ili tunelom dovodi strojarnici (turbinama) smještenim u poziciji B. Tada, međutim, ostaje neiskorišteni dotok koji se pojavljuje između brane (C) i postrojenja (B), na potezu CB na [slici 9-2 b\)](#).

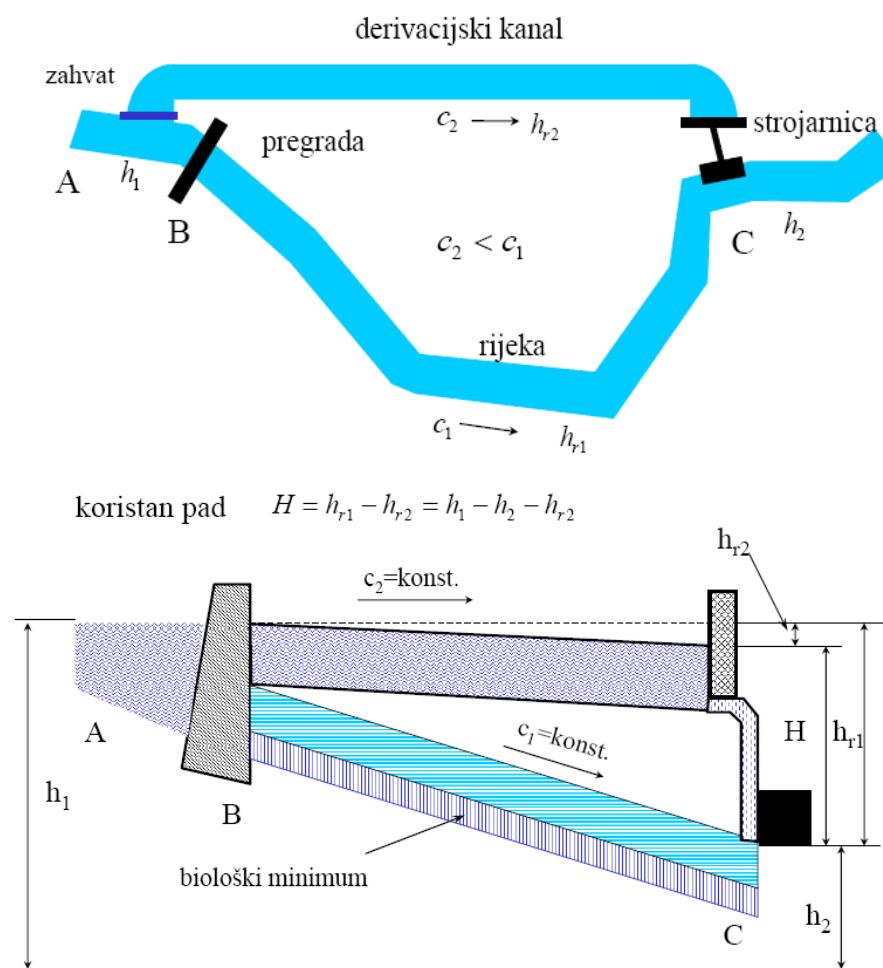


Slika 9-2 Tipovi hidroelektrana: a) – pribranska hidroelektrana, b) – derivacijska hidroelektrana

Derivacijske se hidroelektrane grade, osim u brdovitim predjelima, i u ravnici kad se samo gradnjom brane, a zbog nepovoljnih topografskih uvjeta, ne ostvaruje ekonomična

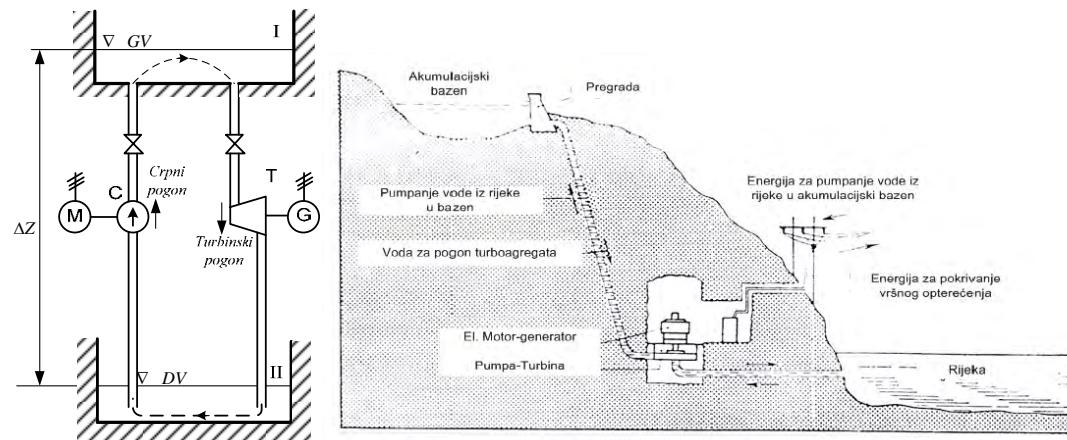
koncentracija pada. Tada se voda dovodi hidroelektrani tunelom ili umjetnim koritom, crtkana linija na slici 9-2 b), uz manje gubitke, zbog tehničke dorađenosti dovoda, nego u prirodnom koritu, pa je nagib umjetnog korita manji od prirodnog, [slika 9-3](#).

Derivacijske hidroelektrane mogu biti „gravitacijske“ ili „tlačne“. (Što to znači, razjasnit ćemo kasnije.) U njima se najveći dio koncentracije pada postiže tunelima ili kanalima, a samo manji branama. Kad se znatan dio pada ostvaruje branom, govorи se o kombiniranoj hidroelektrani (kombinacija pribranske i derivacijske). U gravitacijskoj elektrani voda se dovodi turbinama kanalom ili gravitacijskim tunelom. Iz strojarnice se voda vraća u korito rijeke odvodnim kanalom.



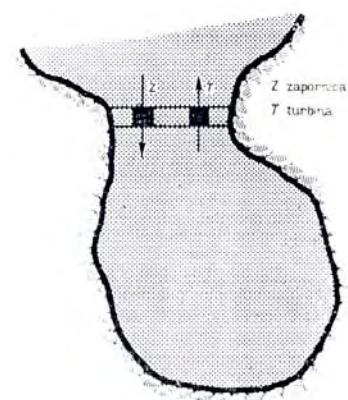
[Slika 9-3](#) Shema „nizinske“ derivacijske elektrane: h_{r2} – dio potencijalne energije vode kojom se svladava trenje u derivacijskom kanalu (omogućuje strujanje vode); h_{r1} – dio potencijalne energije koji omogućuje strujanje vode u prirodnom koritu rijeke; H – potencijalna energija vode u derivacijskom kanalu (veći dio koјe će u strojarnici biti preobražen u električnu energiju): određena je, u što ćemo se uvjeriti, raspoloživim padom (visinskom razlikom između dovoda vode u hidroelektranu i odvoda vode iz hidroelektrane, (H m) i količinom raspoložive vode ($Q \text{ m}^3$))

Poseban tip su crpno-akumulacijske (reverzibilne) hidroelektrane i hidroelektrane na plimu i oseku. U prvima se razlika razine vode stvara crpljenjem (pumpanjem) vode iz donjeg u gornji bazen (akumulaciju), [slika 9-4](#), obično tijekom noći kada elektrane koje proizvode „temeljnju“ električnu energiju raspolažu s viškom energije. Tako podignuta voda iskorištava se u razdoblju „vršnog“ opterećenja za proizvodnju skuplje „varijabilne“ električne energije. Razlika u vrijednosti tih električnih energija čini pothvat rentabilnim, iako se za crpljenje (pumpanje) vode troši, približno, 40% više električne energije nego što se može s njom proizvesti.



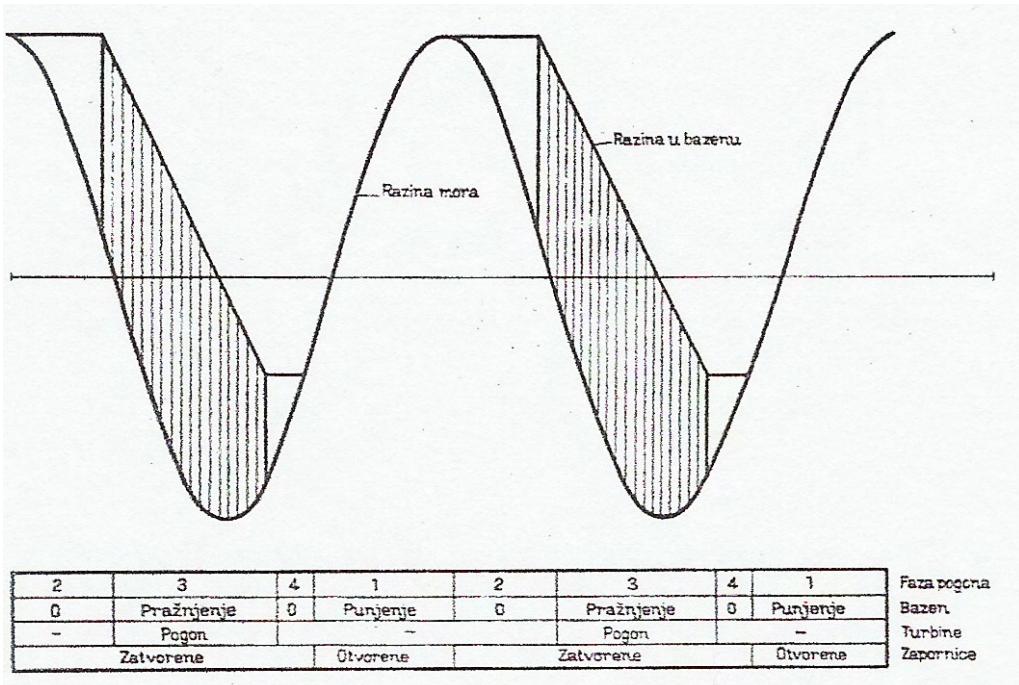
[Slika 9-4](#) Shema crpno-akumulacijske hidroelektrane: *I* - gornji akumulacijski bazen, GV – gornja voda, M – električni motor; C – crpka, T – vodna turbina, G – sinkroni generator, *II* - donji akumulacijski bazen, DV – donja voda

Za energetsko iskorištavanje plime i oseke potrebno je odabrati pogodno mjesto na morskoj obali na kojem je velika amplituda plime i na kojem postoji mogućnost, izgradnjom brane (pregrade), izolirati dio morske površine radi stvaranja bazena. Najjednostavniji se način korištenja energije plime i oseke ostvaruje sustavom jednog bazena s turbinama koje rade samo u jednom smjeru strujanja, [slika 9-5](#). U tom se slučaju bazen puni za vrijeme plime kroz zapornice, a prazni za vrijeme oseke kroz turbine. Drugim riječima, energetsko se korištenje razlike razina vode bazena i mora provodi za vrijeme oseke.



[Slika 9-5](#) Shema korištenja energije plime i oseke sustava jednog bazena s turbinama koje iskorištavaju strujanje samo u jednom smjeru

Dakako, moguć je i zrcalni pogon: za vrijeme plime puni se bazen prolazom vode kroz turbine, a prazni za vrijeme oseke kroz zapornice. Međutim, budući da obale bazena nisu okomite, to je energetsko korištenje razlike razina voda povoljnije za vrijeme oseke nego li za vrijeme plime jer, uz istu količinu vode, turbine kroz dulje vrijeme rade s većim padom u slučaju korištenja za vrijeme oseke. Naime, razlikuju se četiri faze pogona, [slika 9-6](#).

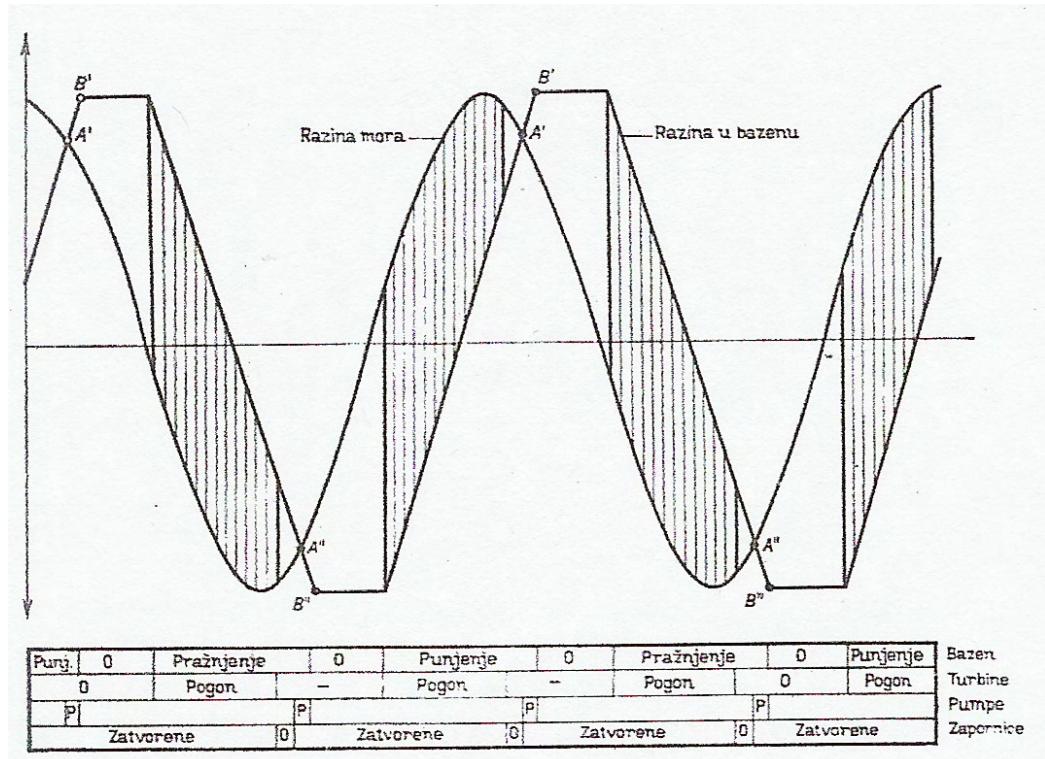


[Slika 9-6](#) Iskorištavanje energije plime i oseke turbinom koja radi u jednim smjeru strujanja vode

U prvoj fazi, za vrijeme plime, bazen se puni kroz zapornice. Nakon što je postignuta maksimalna razina u akumulacijskom bazenu, zatvaraju se zapornice i kroz izvjesno vrijeme održava se baten pun (druga faza). U trećoj fazi pogona stavljuju se u pogon turbine, voda kroz njih otjeće iz bazena u more dok se ne postigne minimalni pad uz koji još mogu raditi turbine. Nakon toga pogon turbine se obustavlja (četvrta faza), zapornice još ostaju zatvorene dok se ne izjednači razina u bazenu s razinom mora, a onda ponovo počinje punjenje bazena.

Radi produljenja trajanja pogona, kao i da bi se bolje iskoristila energija plime i oseke, može se korištenje protegnuti i na vrijeme plime i oseke. Takav pogon može se postići i s jednim bazenom, ali postavljanjem turbine koje mogu iskoristiti strujanje vode u oba smjera. U tom se slučaju međutim voda eksplotira na nižem padu, jer je razina u bazenu niža, i posljedično smanjuje efekt postavljanja turbine s dva smjera strujanja. Ako bi se naime željela postići ona kota vode u bazenu koja odgovara amplitudi plime ili amplitudi oseke, moralo bi se skratiti trajanje pogona turbine, što bi uzrokovalo smanjenje iskorištavanja potencijalne energije vode. Da bi se ta manja dvostrukog korištenja smanjila, rješenje je tako konstruirana turbina koja može raditi ne samo s dva smjera strujanja, nego i kao pumpa bilo za prebacivanje vode iz bazena u more, bilo iz mora u baten. Takva turbina-pumpa omogućuje realizirane pogona prikazanog na [slici 9-7](#).

turbina se upotrebljava istodobno i za pumpanje. U tom slučaju turbine počinju raditi kao pumpe (crpke) u trenutku kad je izjednačena razina vode u bazenu s razinom mora (točka A' na [slici 9-7](#)) i pumpanje traje sve dok se ne postigne unaprijed utvrđena razina, koja ne mora biti jednaka s maksimumom plime ili oseke.



[Slika 9-7](#) Iskorišćavanje energije plime i oseke turbinom koja radi kao turbina i kao pumpa u oba smjera strujanja vode

Za vrijeme razdoblja pumpanja pumpa povisuje razinu u bazenu ($A' - B'$), a za vrijeme pražnjenja sniže razinu u bazenu ($A'' - B''$). Za takav pogon potrebni su agregati koji mogu raditi i kao dvosmrjerne turbine i kao dvosmrjerne pumpe.

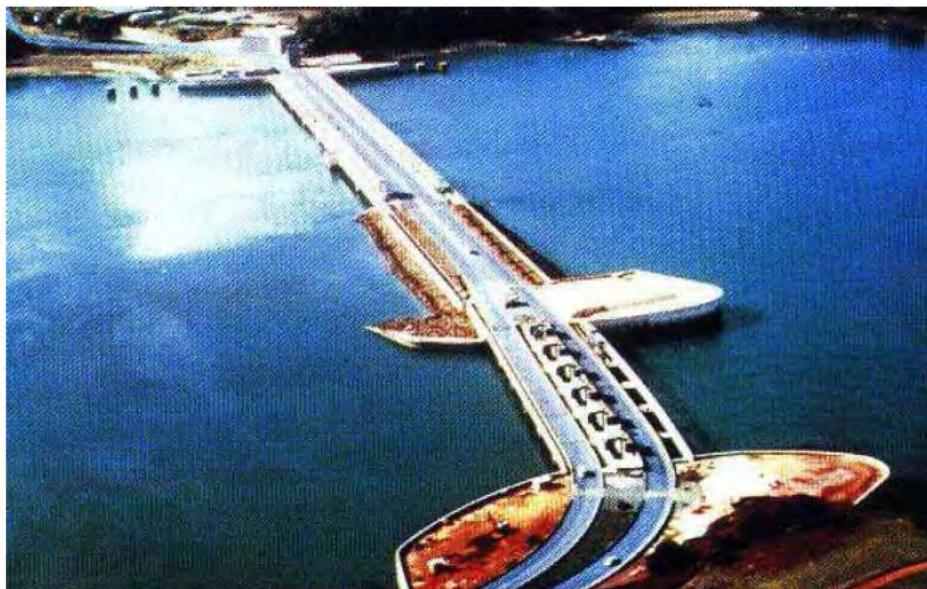
Pumpanje u bazu moguće je primijeniti i u slučaju jednostrukog korištenja, [sliku 9-5](#). U tom slučaju s pumpanjem se počinje kad razina u bazenu postigne najveću moguću kotu s obzirom na razinu mora. Takvo je korištenje aggregata energetski isplativo jer se pumpa pri malim razlikama razina dok se tako akumulirana voda koristi na većem padu, odnosno, pumpanjem na maloj visini postiže se sniženje razine u bazenu, pa se i na taj način povećava pad korištenja vode.

Pri jednostrukom korištenju moguće je skratiti obustavu proizvodnje energije time što će se izgraditi dva postrojenja, koja mogu biti jedno od drugog udaljena, ali će raditi u istom elektroenergetskom sustavu; jedno će radi za vrijeme plime, a drugo za vrijeme oseke. Međutim, kakav god sustav za iskorišćavanje energije plime i oseke odabrali, ne će biti moguće postići proizvodnju s konstantnom snagom, i bez prekida pogona; za zadovoljavanje su potreba potrošača pokraj takvih elektrana potrebne i dopunske elektrane.

Proizvodnja je električne energije u elektranama, koje se koriste plimom i osekom, proporcionalna površini bazena, koji se dobiva izgradnjom brane, i kvadratu amplitude plime.

Pritom najveći dio troškova za izgradnju takve elektrane otpada na branu. Ekonomična će izgradnja takvih elektrana biti moguća stoga samo na obalama na kojima će se utroškom relativno malih sredstava moći pregraditi zaljev ili uvala dostačno velike površine.

Prvo takvo postrojenje izgrađeno je na ušću rijeke La Rance kod St. Maloa u Francuskoj, slika 9-7a.



Slika 9-7a Iskorištavanje energije plime i oseke: hidroelektrana na ušću rijeke La Rance

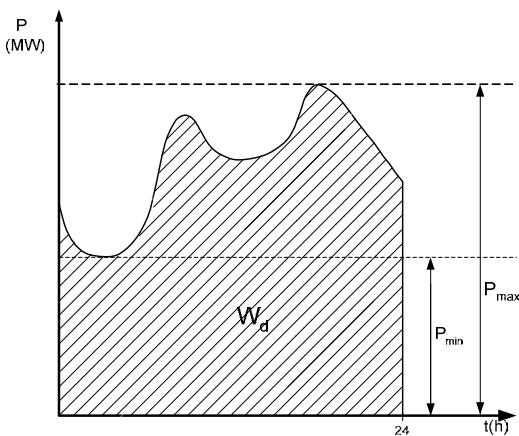
Najveća amplituda plime na mjestu brane iznosi 11,1 m. Postavljeno je 38 agregata po 9 MW, a godišnja proizvodnja iznosi 590 GWh. Turbine su izrađene za dva smjera strujanja vode, a mogu raditi i kao pumpe također za dva smjera strujanja. Turbine mogu raditi s padovima od 11 do 5,5 m i koristiti se protokom od 100-270 m³/s svaka. Maksimalna visina dizanja vode, za vrijeme pumpanja, iznosi 6 m.

9.2 Značajke proizvodnje električne energije

U elektroenergetskom sustavu postoji veliki broj potrošača koji troše električnu energiju na način, u količinama i u doba dana kako to najbolje odgovara njihovim potrebama. Radi toga se i potražnja tijekom dana mijenja i tu promjenu prikazujemo „dnevnim dijagramom potražnje“ ili „dnevnim dijagramom opterećenja“. Govorimo o dnevnom dijagramu potražnje kada promatramo promjenu sa strane potrošača (trošila), a o dnevnom dijagramu opterećenja kada gledamo sa strane elektrana, rasklopnih postrojenja ili vodova. Osim dnevnih promjena potražnje ili dnevnih promjena opterećenja postoje i tjedne promjene, jer ni svi dnevni dijagrami opterećenja unutar tjedna nisu međusobno jednaki. Primjerice, nedjeljni dijagram opterećenja znatno se razlikuje od dijagrama opterećenja radnog dana. Postoje nadalje i razlike između dijagrama opterećenja radnih dana, razlike uvjetovane godišnjim dobima, razlike uzrokovane vrstama potrošača u elektroenergetskom sustavu, kao i odnosom između pojedinih vrsta potrošača. U svim je slučajevima međutim dnevni dijagram opterećenja osnova za upoznavanje zahtjeva potrošača, pa prema tome i polazna točku za projektiranje, izgradnju i pogon (proizvodnju) elektrana.

Na dnevnom dijagramu opterećenja (slika 9-8) uočavamo dva karakteristična opterećenja: „maksimalno opterećenje“ (P_{\max}) i „minimalno opterećenje“ (P_{\min}). Površina ispod krivulje predstavlja tijekom dana proizvedenu energiju (W_d). Pomoću ovih triju veličina mogu se odrediti dvije veličine koje karakteriziraju dnevni dijagram opterećenja: „(dnevni) faktor opterećenja“ (m), definiran kao omjer između energije W_d i energije koja bi se mogla proizvesti snagom P_{\max} tijekom 24 sata:

$$m = \frac{W_d}{24P_{\max}} \quad [9.1]$$



Slika 9-8 Dnevni dijagram opterećenja

i omjer minimalnog i maksimalnog opterećenja (m_0):

$$m_0 = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad [9.2]$$

Faktor opterećenja možemo definirati i kao omjer između srednjeg opterećenja tijekom dana:

$$P_{sr} = \frac{W_d}{24} \quad [9.3]$$

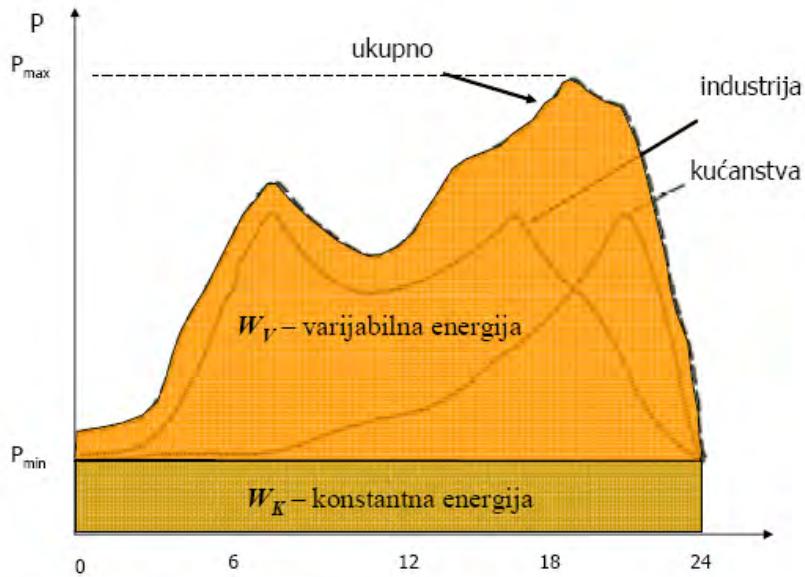
i maksimalnog opterećenja, pa je

$$m = \frac{P_{sr}}{P_{\max}} \quad [9.4]$$

U dnevnom dijagramu opterećenja razlikujemo „konstantnu“ i „varijabilnu energiju“, slika 9-9. Konstantnom energijom nazivamo onaj dio energije koja se može proizvesti snagom koja je jednaka minimalnom opterećenju, dok za proizvodnju varijabilne energije moramo upotrijebiti snagu jednaku razlici između P_{\max} i P_{\min} , slika 9-8. Vrijedi pritom:

$$W_K = 24 P_{\min} \quad [9.5]$$

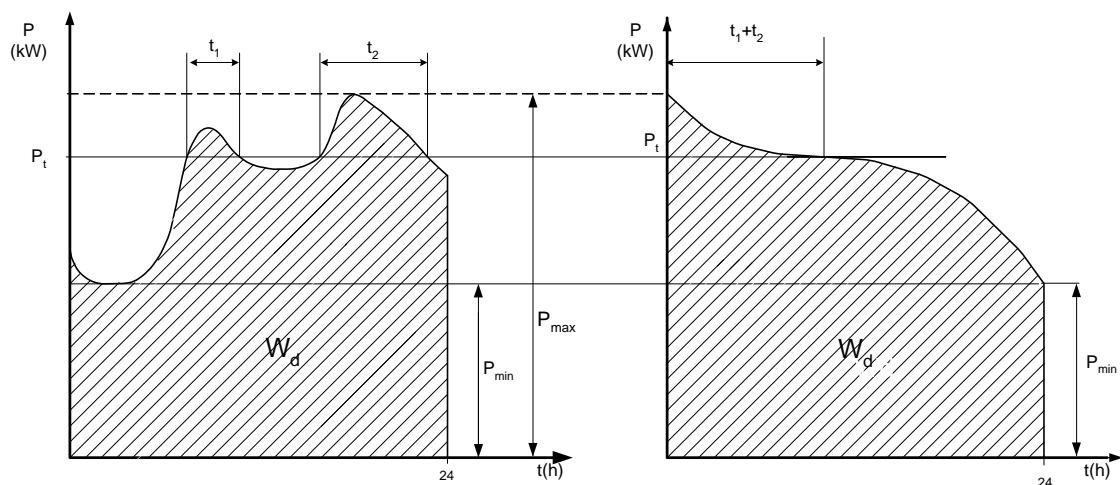
$W_V = W_d - W_K$	[9.6]
-------------------	-------



Slika 9-9 Podjela dijagrama opterećenja na konstantnu i varijabilnu energiju

Elektrane koje zadovoljavaju potrošnju u gornjem dijelu dnevnog dijagrama opterećenja nazivaju se „vršnim elektranama“, a one koje imaju zadatak da rade za potrošnju u donjem dijelu dijagrama, „temeljnim elektranama“.

Radi nepogodnog oblika dnevnog dijagrama opterećenja u analizama se najčešće taj dijagram zamjenjuje „krivuljom trajanja opterećenja“, slika 9-10, u kojoj su opterećenja poredana po veličini, a ne po kronološkom redu kao u dijagramu opterećenja, pa je uporaba te krivulje opravdana u svim slučajevima kad nas zanima samo trajanje i veličina pojedinih opterećenja, a ne i njihov vremenski raspored.

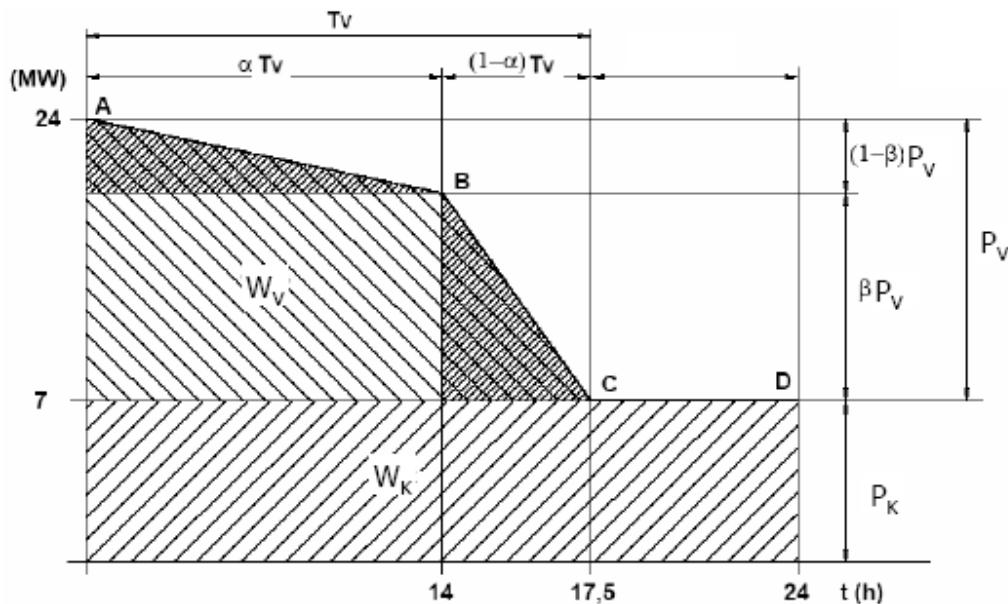


Slika 9-10 Konstrukcija dnevne krivulje trajanja opterećenja iz dnevnog dijagrama opterećenja

U elektroenergetskim analizama krivulja trajanja često se aproksimira (nekim) analitičkim izrazom, npr.:

$$P = P_{\max} \left[1 - (1-m_0) \cdot \left(\frac{t}{24} \right)^{\frac{m-m_0}{1-m}} \right] \quad [9.7]$$

ili se, još češće, aproksimira trima pravcima, slika 9-11, tako da ploština površine ispod aproksimirane krivulje odgovara stvarnim potrebama energije, u promatranom razdoblju, i to posebno potrebama varijabilne, a posebno potrebama konstantne energije. Isto tako podaci za maksimalnu, konstantnu i varijabilnu snagu u krivulji trajanja odgovaraju stvarnim snagama u dijagramu opterećenja.



Slika 9-11 Aproksimacija dnevne krivulje opterećenja s tri pravca

Polazeći od konstrukcije prikazane na slici 9-11, uvažavajući spomenuti uvjet da količina varijabilne energije u aproksimiranoj krivulji trajanja opterećenja bude jednaka količini te energije u stvarnoj krivulji trajanja opterećenja, uvodimo bezdimenzijske faktore α i β kojima određujemo položaj točke B, odnosno odnos između koeficijenata α i β :

$$W_v = [(1-\beta) P_v \cdot \alpha \cdot T_v + \beta \cdot P_v \cdot (1-\alpha) \cdot T_v] / 2 + \alpha \cdot T_v \cdot \beta \cdot P_v, \text{ ili}$$

$$W_v = [(1-\beta) \cdot P_v \cdot \alpha \cdot T_v - \beta \cdot P_v \cdot (1-\alpha) \cdot T_v] / 2 + \beta \cdot T_v \cdot P_v$$

Sređivanjem dobivamo:

$\alpha + \beta = \frac{2W_v}{T_v P_v}$ $0 \leq \alpha \leq 1; 0 \leq \beta \leq 1; 0 \leq (\alpha + \beta) \leq 2;$	[9.8]
--	-------

gdje su α i β veličine kojima je određen položaj točke B, a njome i oblik aproksimirane krivulje trajanja opterećenja. Postavljajući da je faktor opterećenja

$m = \frac{W_v + W_k}{24(P_k + P_v)}$	[9.9]
---------------------------------------	-------

i da je

$k = \frac{P_k}{P_{\max}}$	[9.10]
----------------------------	--------

možemo [9.8] pisati u obliku

$\alpha + \beta = 2 \cdot \frac{24}{T_v} \cdot \frac{m - k}{1 - k}$	[9.11]
---	--------

Neka je $T_v = 17,5$ sati/dan, a $\alpha T_v = 14$ sati/dan, [slika 9-11](#), α je onda 0,80. Iz [9.11], znajući m i k , ili iz [9.8], može se odrediti i veličina β : $\beta = 0,65$.

Iznos varijabilne snage određujemo određujući prvo jednadžbu pravca kroz dvije točke (jednadžbe dvaju pravaca):

- pravac kroz točke A i B i
- pravac kroz točke B i C.

Jednadžba je pravca kroz dvije točke:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1),$$

pa za prvi dio krivulje trajanja, dužina AB, vrijedi:

$$y = P(t), x = t; 0 \leq t \leq \alpha T_v;$$

točka A: $(x_1, y_1) = (0, P_k + P_v)$; točka B: $(x_2, y_2) = (\alpha T_v, P_k + \beta P_v)$.

Dobivamo da su vrijednosti varijabilne snage, u tom dijelu krivulje trajanja opterećenja, jednake:

$P(t) - (P_k + P_v) = \frac{(P_k + \beta P_v) - (P_k + P_v)}{\alpha T_v - 0} (t - 0) \Rightarrow$ $P(t) = P_k + P_v + \frac{P_v(\beta - 1)}{\lambda T_v}$	[9.12]
---	--------

Za drugi dio krivulje trajanja, dužina BC, vrijedi:

$$y = P(t), x = t; \alpha T_v \leq t \leq T_v;$$

točka B: $(x_1, y_1) = (\alpha T_v, P_k + \beta P_v)$; točka C: $(x_2, y_2) = (T_v, P_k)$.

Dobivamo da su vrijednosti varijabilne snage jednake:

$P(t) - (P_k + \beta P_v) = \frac{P_k - (P_k + \beta P_v)}{T_v - \alpha T_v} (t - \alpha T_v) \Rightarrow$ $P(t) = P_k + \beta P_v + \frac{\beta P_v}{T_v - \alpha T_v} (t - \alpha T_v)$	[9.13]
---	--------

Konačno, za posljednji dio krivulje trajanja, dužina CD, vrijedi:

$$T_v \leq t \leq 24 ;$$

$P(t) = P_k = \text{konst.}$	[9.14]
------------------------------	--------

Uloga i režim rada pojedine elektrane u elektroenergetskom sustavu ovise o sposobnosti elektrane da se prilagodi brzim promjenama opterećenja (najbolje se mogu prilagoditi akumulacijske hidroelektrane i termoelektrane s plinskim turbinama), te o ispunjenju zahtjeva da se potrebna energija proizvede uz što niže troškove (maksimalno iskorištenje raspoložive vode, što veća proizvodnja u termoelektranama s malim specifičnim troškovima za gorivo). Uloga hidroelektrana pritom nije unaprijed čvrsto određena. U kišnom razdoblju godine velika većina hidroelektrana (osim onih s vrlo velikim akumulacijama) rade kao temeljne elektrane, a termoelektrane se što je moguće više koriste kao vršne elektrane. U sušnom razdoblju uloge se zamjenjuju. Osim toga, uloga elektrana mijenja se i s razvojem sustava. Starije termoelektrane rade sve više kao vršne (jer imaju veće specifične troškove za gorivo), a nove termoelektrane preuzimaju ulogu temeljnih.

9.3 Energetske (energijske) značajke elektrana

Instalirana snaga osnovna je značajka svake elektrane. Ona se definira kao aritmetička suma nazivnih snaga generatora (u MVA), odnosno kao aritmetička suma snaga turbina, mjerenih na stezaljkama generatora (u MW). Instalirana je snaga, dakle, nazivna snaga elektrane.

Maksimalna snaga najveća je snaga koju elektrana kao cjelina može proizvesti uz pretpostavku da su svi njezini dijelovi sposobni za pogon. Za hidroelektranu se uz ovo pretpostavlja i da su protok i pad optimalni, a za termoelektranu da joj stoji na raspolaganju dostatna količina ugljena određene kvalitete i dostatna količina vode normalne temperature i čistoće za hlađenje kondenzatora. Pri određivanju maksimalne snage ne postavlja se zahtjev da se postigne optimalni stupanj djelovanja, ali se uzimaju u obzir utjecaji svih dijelova postrojenja: dimenzije dovoda, tlачnog cjevovoda, odvoda i slično u hidroelektranama, kapacitet dopreme i mljevenja ugljena, učin kotlova, kapacitet odvoda pepela, dovoda vode i slično u termoelektranama. Razlikuje se maksimalna snaga na stezaljkama generatora (maksimalna bruto-snaga) i maksimalna snaga na pragu elektrane (maksimalna neto-snaga).

Raspoloživa snaga najveća je snaga koju elektrana može proizvesti u nekom trenutku, polazeći od stvarnog stanja u elektrani (kvarovi, popravci i pregledi), a uz pretpostavku da nema ograničenja zbog proizvodnje jalove snage. Pri određivanju raspoložive snage treba

kod hidroelektrane uzeti u obzir raspoloživi dotok i pad, a kod termoelektrane kvalitetu ugljena, količinu i temperaturu vode. I ovdje se razlikuje raspoloživa snaga na stezaljkama generatora i na pragu elektrane.

Maksimalno i minimalno godišnje opterećenje elektrane određuje se iz pogonskih podataka elektrane ili iz konstruirane godišnje krivulje trajanja opterećenja. U većini praktičkih slučajeva – za elektrane koje rade u većim elektroenergetskim sustavima – maksimalno je godišnje opterećenje jednako ili skoro jednakomaksimalnoj snazi, dok je minimalno opterećenje jednako nuli (zbog godišnjeg pregleda). Dakle, odnos između minimalnog i maksimalnog opterećenja za elektrane nema značenja, ali zanimljivo je poznavati faktor opterećenja elektrane (m) i faktor iskorištenja elektrane (n).

Faktor opterećenja elektrane m definiran je kao omjer električne energije proizvedene u promatranoj godini i električne energije koja bi se proizvela da je elektrana kroz cijelu tu godinu bila pod maksimalnim opterećenjem. Ako se s $P_{g,\max}$ označi maksimalno opterećenje elektrane u tijeku promatrane godine u megavatima, a s W_g godišnja proizvodnja elektrane u megavatsatima u istom razdoblju, faktor opterećenja elektrane izračunava se po formuli:

$$m = \frac{W_g}{8760P_{g,\max}} \quad [9.15]$$

jer godina ima 8760 sati.

Faktor iskorištenja n dobiva se iz analognog izraza ako se umjesto maksimalnog opterećenja $P_{g,\max}$ u formulu [9.15] uvrsti maksimalna snaga elektrane ($P_{e,\max}$):

$$n = \frac{W_g}{8760P_{e,\max}} \quad [9.16]$$

Trajanje korištenja. Opterećivanje odnosno iskorištavanje elektrane često se karakterizira trajanjem korištenja maksimalnog godišnjeg opterećenja ($t_{g,\max}$) i trajanjem korištenja maksimalne snage ($t_{e,\max}$). Ove dvije veličine (dva trajanja) mogu se definirati kao vrijeme potrebno da se snagom $P_{g,\max}$, odnosno snagom $P_{e,\max}$ proizvede energija W_g . Veličine $t_{g,\max}$ i $t_{e,\max}$ mogu se (u satima) izračunati prema formulama:

$$t_{g,\max} = \frac{W_g}{P_{g,\max}} \quad [9.17]$$

$$t_{e,\max} = \frac{W_g}{P_{e,\max}} \quad [9.18]$$

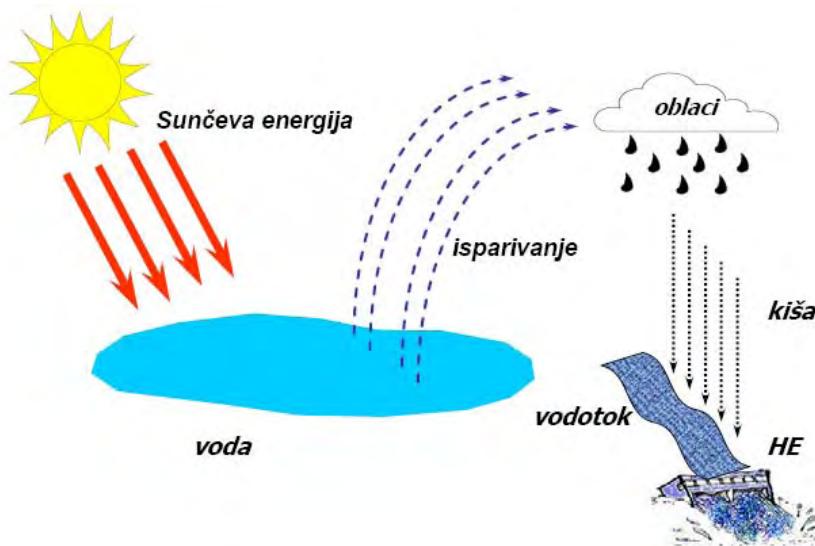
Treba naglasiti da ni $t_{g,\max}$ ni $t_{e,\max}$ ne predstavljaju stvarno trajanje pogona elektrane, već samo vrijeme koje bi bilo potrebno da se uz maksimalno opterećenje, odnosno snagu, proizvede količina energije W_g . Trajanje korištenja akumulacijskih hidroelektrana je 2000 –

3000 h/god, protočnih i do 6000 h/god, a termoelektrana između 1000 (stare) i 6500 h/god (nove).

Faktori trajanja korištenja mogu se odrediti prema snazi ili opterećenju na priključnicama generatora ili na pragu elektrane. U prvom slučaju treba u izraze [9.17] i [9.18] uvrstiti godišnju proizvodnju na priključnicama generatora, a u drugom slučaju godišnju proizvodnju na pragu elektrane.

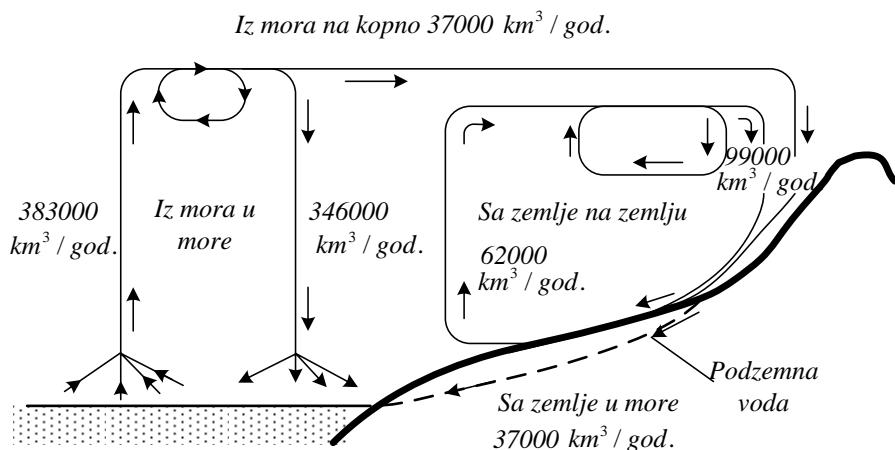
9.4 Gravitacijska potencijalna energija vode i iskorištavanje energije vodotoka

Sunčeva energija, koja dopire do Zemljine površine, izaziva isparivanje vode na površinama oceana, jezera i rijeka, ali i na površini tla i iz biljaka, [slika 9-12](#).



[Slika 9-12](#) Isparivanje vode i korištenje gravitacijske potencijalne energije vode (vodotoka)

Ta se voda podiže u obliku vodene pare od koje se u visinama formiraju oblaci. Iz oblaka pada kiša na tlo pa i ta voda ima (gravitacijsku) potencijalnu energiju u odnosu prema morskoj razini. Međutim, samo se manji njezin dio može energetski iskoristiti jer je potrebna određena koncentracija vode, a to se ostvaruje u vodotocima (rijeke, potoci), [slika 9-13](#).



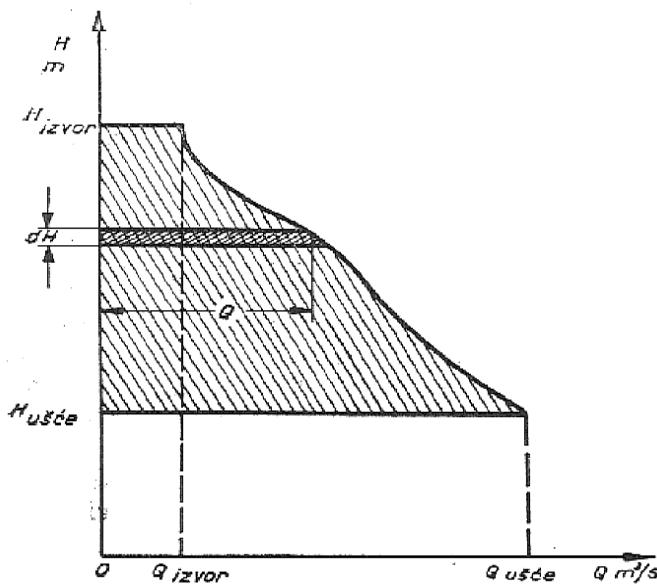
Slika 9-13 Procijenjeni prirodni kružni proces vode

Naime, samo dio padalina stiže u vodotoke, a ostalo preuzimaju biljke ili se neposredno isparuje, a velik dio odlazi u unutrašnjost tla pa se s većim ili manjim vremenskim zakašnjenjem javlja na površini u nekom vodotoku.

Za svaku točku vodotoka (profil vodotoka) određuje se, na osnovi topografije zemljишta, površina zemljишta (oborinsko područje) s kojega voda dotječe u vodotok. Omjer količine vode koja se tijekom godine pojavljuje u vodotoku (na promatranom profilu) i količine padaline na oborinsko područje (koje odgovara promatranom profilu) naziva se „faktorom otjecanja“. Faktor otjecanja ovisi o topografskim, geološkim i klimatskim uvjetima. Kreće se u širokim granicama (od 0,25 do 0,95); u strmim područjima, a pogotovo u hladnim razdobljima godine, faktor otjecanja može se približiti vrijednosti 1, dok u nizinskim predjelima u toplim razdobljima postiže i vrlo niske vrijednosti.

Količina vode, koja protječe vodotokom u jedinici vremena (protok, m^3/s), nije prema tome konstantna već ovisi o vremenskom rasporedu padalina (oborina), o temperaturi (topljenju snijega, isparivanju), o pritocima, o količini vode koja podzemnim putovima dotječe vodotoku, o vlažnosti pojedinih godina itd., pa, da bi se odredile energetske mogućnosti iskorištavanja vodotoka, valja uzeti u obzir protoke u nizu godina kako bi se u izračunavanje uključile sve situacije koje se mogu pojaviti. To je pogotovo važno kad se radi o hidroelektranama koje rade u istom elektroenergetskom sustavu i koje su izgrađene na vodotocima različitih hidroloških karakteristika.

Idući od izvora prema ušću vodotoka, prosječni višegodišnji protok sve više raste, jer sve više raste oborinsko područje, pa su i količine vode od oborina koje gravitiraju vodotoku sve veće. Istodobno, od izvora prema ušću, kota razine vode postaje sve manja. Svakom profilu vodotoka odgovara stoga određena kota H (visina iznad površine mora u metrima) i određeni srednji višegodišnji protok Q (m^3/s), pa se svaki vodotok može prikazati Q, H – dijagramom vodotoka, [slika 9-14](#).



Slika 9-14 Primjer Q,H – dijagrama vodotoka

Kad se iskorištava gravitacijska potencijalna energija vode (vodotoka) između dvije (bilo koje) kote, govorimo o korištenju vode na padu koji je jednak razlici kota. Snagu vodotoka možemo onda odrediti ovako. Gravitacijska je potencijalna energija je vode mase m (kg) na padu dH (m) jednaka:

$$dW = mgdH \left[kg \frac{m}{s^2} m \equiv Nm \equiv J \right] \quad [9.19]$$

Podijelimo li tu energiju s vremenom, dobivamo snagu:

$$\begin{aligned} \frac{dW}{t} &= dP = \dot{m}gdH \left[\frac{kg}{s} \frac{m}{s^2} m \equiv \frac{J}{s} \equiv W \right] = 9,81QdH \text{ [kW]}; g \approx 9,81 \frac{m^2}{s} \\ \frac{m}{t} &= \dot{m} \left[\frac{kg}{s} \right] = \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right]; \rho_{vode} \approx \text{konst.} = 1000 \frac{kg}{m^3}; kW = 1000W \end{aligned} \quad [9.20]$$

uvrsti li se Q u m^3/s , a H u m. Integriranjem u granicama između kote ušća (H_u) i kote izvora (H_i), dobiva se snaga vodotoka:

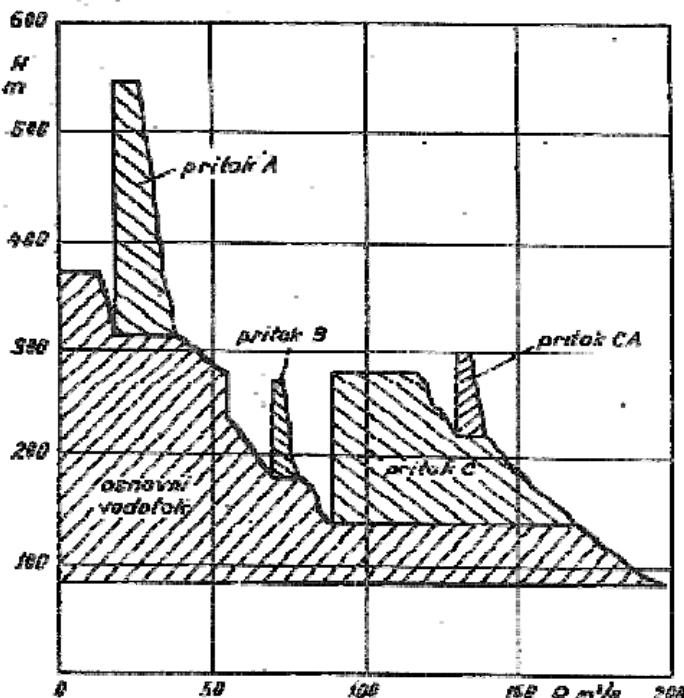
$$P = 9,81 \int_{H_u}^{H_i} Q(H) dH \text{ [kW]} \quad [9.21]$$

Ovako određena snaga srednja je snaga koju ima voda u promatranom vodotoku jer je račun proveden sa srednjim višegodišnjim protokom. Vjerojatna je dakle (moguća) godišnja energija vodotoka:

$$W = 8760 P \text{ [kW·h]} \quad [9.22]$$

gdje je 8760 broj sati u godini. Prema tome i srednja snaga i godišnja energija vodotoka proporcionalne su ploštini površine u Q, H – dijagramu, određenoj apscisama H_i i H_u , osi ordinata i krivuljom, [slika 9.14](#), a ukupna moguća energija ovisi i o stalnosti prepostavljenog protoka i raspoloživosti prepostavljenog pada vode.

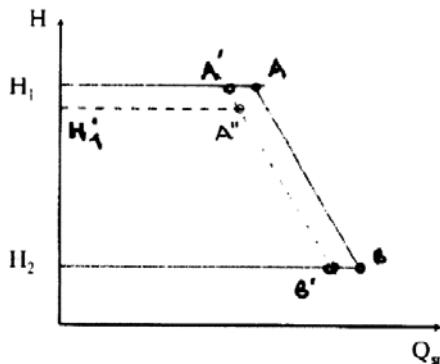
Pomoću Q, H – dijagraama mogu se pokazati i vodotoci s pritocima, [slika 9-15](#).



[Slika 9-15](#) Primjer Q, H – dijagraama za vodotok s pritocima

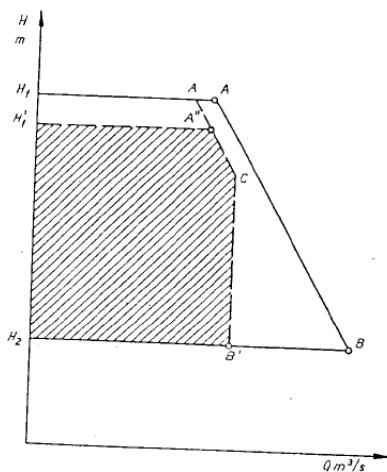
Tako se određena količina energije naziva brutoenergija vodotoka, odnosno bruto vodne snage kad se količina energije odnosi na neko područje.

Pri utvrđivanju srednje snage i godišnje energije vodotoka u Q, H – dijagramu prepostavljen je da je sva voda energetski iskoristiva, od izvora do ušća, u jednoj hidroelektrani ili u više njih, te da se potencijalna energija vode transformira u električnu energiju bez gubitaka. Osim toga kad se određuju bruto vodne snage nekog područja, računa se i na gornji dio toka gdje su, normalno, male količine vode, s velikim oscilacijama protoka, i na donji dio vodotoka gdje se, pogotovo u nizinskim rijekama, prepostavljaju mogućnosti iskorištavanja malih padova. U praktičnom iskorištenju potencijalne energije vode nije međutim ispunjena nijedna od prepostavki. Protok je vrlo promjenljiv, pa se praktički nikada ne gradi hidroelektrana tolikog kapaciteta koja bi mogla iskoristiti svu vodu i u razdobljima vrlo velikih protoka, jer u ostalim razdobljima strojevi ne bi mogli raditi punom snagom. Zbog toga je i količina vode koja služi za dobivanje električne energije manja od količine vode koja protjeće vodotokom, pa je i srednji iskoristivi protok manji od srednjega višegodišnjeg protoka. Srednji se iskoristivi protok može unijeti u Q, H – dijagram, [slika 9-16](#). Ako je AB dio Q, H – dijagraama između kota H_1 i H_2 , među kojima se iskorištava potencijalna energija vodotoka, smanjenjem apscisa za količinu neiskoristene vode dobiva se korigirani Q, H – dijagram ($A'B'$ na [slici 9-16](#)).

Slika 9-16 Tehnički iskoristiva energija vodotoka $H_1'A''B'H_2$

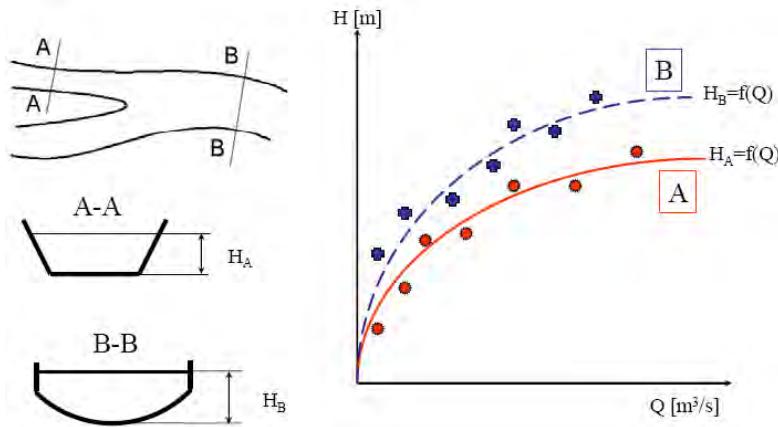
To što se ne može upotrijebiti sva voda vrijedi i za cijeli raspoloživi pad zbog gubitaka energije (svladavanje sila trenja) u različitim dovodima vode do hidroelektrane; te gubitke, u što ćemo se uvjeriti, možemo predstaviti gubicima pada. Zbog toga valja računati da se voda iskorištava na padu između kota H_1 i H_2 umjesto između kota H_1 i H_2 . Uvezvi sve to u obzir, iskoristiva je energija proporcionalna površini $H_1'A''B'H_2$ u Q,H – dijagramu. Tako definirana energija naziva se „tehnički iskoristivom energijom“, a promatrajući cijeli vodotok – „tehnički iskoristivom energijom vodotoka“. Zbroj tehnički iskoristivih energija vodotoka na nekom području daje njegove „tehničke iskoristive vodne snage“.

Prikaz na [slici 9-16](#) vrijedi samo kad se potencijalna energija vode iskorištava u pribranskoj hidroelektrani.. Radi li se o derivacijskoj hidroelektrani, prema rečenome, valja korigirati Q,H – dijagram budući da ostaje neiskorišteni dotok koji se pojavljuje na potezu CB: između kote smještaja brane i strojarnice hidroelektrane, [slika 9-17](#). Za derivacijski tip hidroelektrane još je veća dakle razlika između tehnički iskoristive i brutoenergije vodotoka.

Slika 9-17 Tehnički iskoristiva energija vodotoka između kota H_1 i H_2 za derivacijski tip hidroelektrane

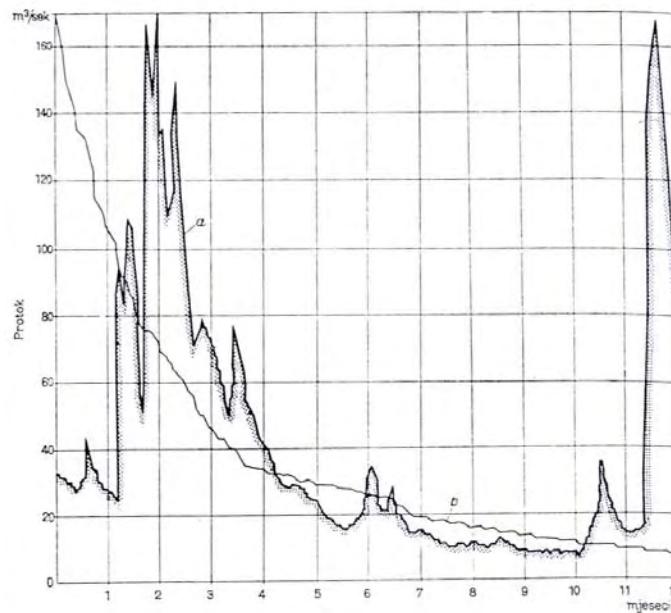
Količina vode u vodotoku, kao i vremenski raspored vode u vodotoku, ovisi o nizu utjecaja (o oborinama, sastavu i topografiji zemljista, temperaturi zraka, biljnom pokrivaču i dr.), pa kao osnova za utvrđivanje količine voda mogu poslužiti samo svakodnevna mjerjenja količine vode. Mjerjenja se provode pomoću „vodokaza“, na kojima se očitava visina razine vode. Ta

se visina naziva „vodostaj“. Pomoću poznate visine vodostaja može se iz tzv. „konsumcijske krivulje“ očitati protok vode (Q u m^3/s). Konsumcijske krivulje, [slika 9-18](#), konstruiraju se na temelju mjerjenja, a ovise o obliku korita na mjestu vodokaza.

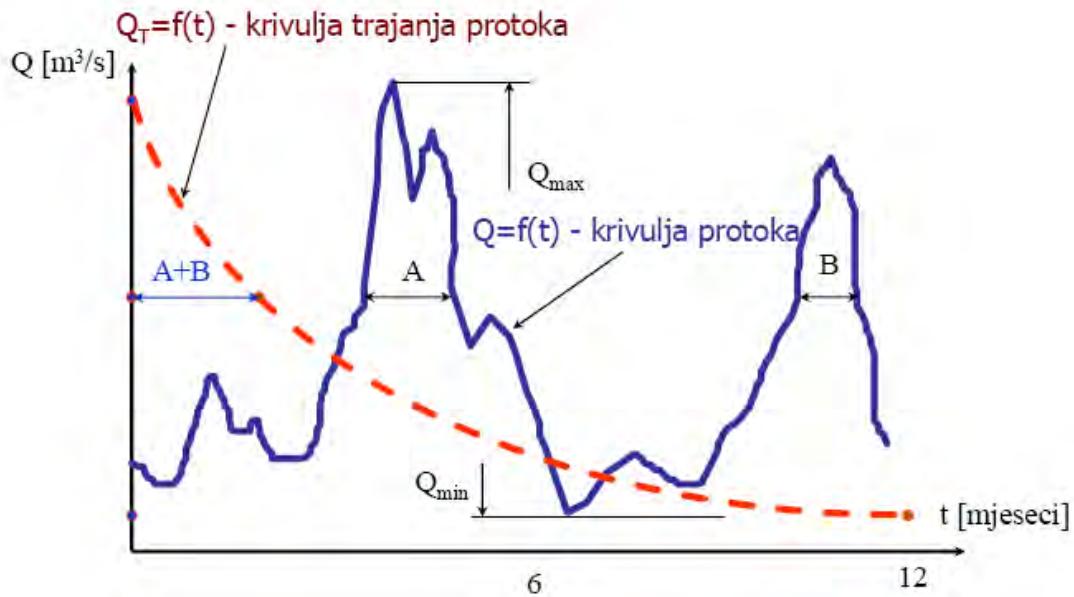


[Slika 9-18](#) Konsumcijske krivulje za dva profila

Na osnovi srednjih dnevnih protoka može se nacrtati godišnji dijagram protoka, [slika 9-19](#), krivulja a, u kojem su kronološki poredani protoci. Pomoću podataka o dnevnim protocima mogu se odrediti srednji desetodnevni protoci (dekadni protoci), srednji mjesečni protoci i, konačno, srednji godišnji protok. Svi ti srednji protoci određuju se kao aritmetičke sredine dnevnih protoka u promatranom razdoblju.



[Slika 9-19](#) Godišnji dijagram protoka rijeke: a) krivulja protoka; b) krivulja trajanja protoka
Ako se nacrti i dijagram u kojem su dnevni protoci uneseni redom po veličini od najvećeg do najmanjeg, [slika 9-20](#), dobiva se krivulja trajanja protoka, ([slika 9-19](#), krivulja b).



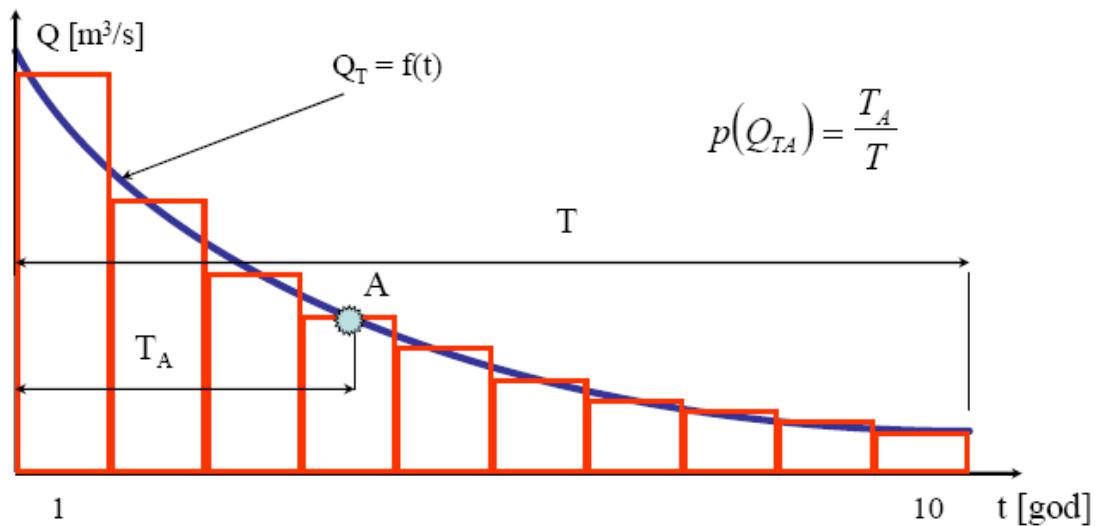
Slika 9-20 Konstrukcija krivulje trajanja protoka

Integriranjem godišnjeg dijagrama protoka ili krivulje trajanja protoka (što daje isti rezultat) dobiva se volumen vode (V_0) koji je protekao kroz promatrani profil u promatranoj godini. Pri tome kao apscisu treba uzeti protekli broj sekunda. Srednji je godišnji protok jednak:

$$V_0 = \int_0^{12} Q(t) dt [m^3] \quad Q_{sr} = \frac{V_0}{31,54 \cdot 10^6} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad [9.23]$$

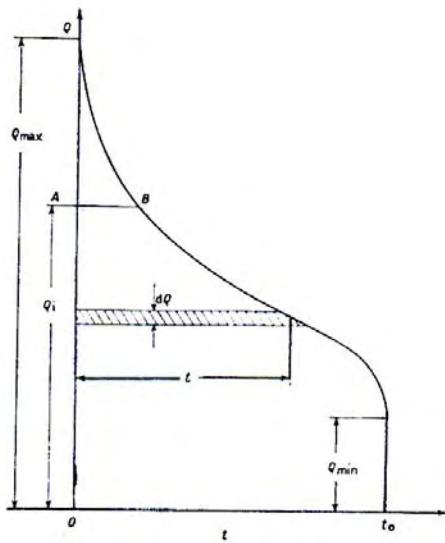
gdje je V_0 volumen u m^3 , a $31,54 \cdot 10^6$ broj sekunda u godini.

Promatranje protoka u samo jednoj godini može dovesti do krivih zaključaka o količinama i rasporedu voda u promatranoj vodotoku, pa je potrebno promatranje protegnuti na dulje vremensko razdoblje. Tako možemo za svaku od promatranih godina odrediti srednji godišnji protok, pa prema tome možemo klasificirati godine i po vlažnosti. Osim krivulja trajanja protoka u kojima su uneseni podaci cijele godine, mogu se nacrtati krivulje trajanja protoka za pojedina razdoblja u godini (zima i ljeto, ili sušno i kišno razdoblje), ili krivulja trajanja za pojedine mjeseca. Želi li se, npr., nacrtati krivulja trajanja za mjesec siječanj, uvažit će se podaci za sve siječnje u promatranoj razdoblju. Poznavajući takve podatke za dulji niz godina određuje se, koristeći se nekom od brojnijih razvijenih statističkih (vjerojatnosnih) metoda, vjerovatnost pojave određenog protoka. Najjednostavnija među metodama, kojom ćemo se služiti u našim razmatranjima, jest određivanje vjerovatnosti pojave protoka pomoću krivulje trajanja srednjeg višegodišnjeg protoka, slika 9-21, budući da ta vjerovatnost odgovara relativnom trajanju protoka; točnost je to veća što je dulje razdoblje kroz koje su prikupljeni podaci o stvarnim protocima.



Slika 9-21 Krivulja trajanja srednjeg višegodišnjeg protoka predstavlja ujedno i vjerojatnosnu krivulju: vjerojatnost pojave protoka Q_{TA} jednaka je omjeru vremena T_A i ukupnog vremena promatranja (na apscisu možemo nainjeti pripadajuće vjerojatnosti)

S obzirom da je protok u vodotocima vrlo promjenljiv, hidroelektrane se grade za ograničenu propusnu moć dovodnih organa i turbina određenu energetsko-ekonomskim analizama. Najveći protok koji se može iskoristiti u turbinama nazvan je „instaliranim protokom“ (ili „veličinom izgradnje“), Q_i , slika 9-22. Kako je instalirani protok obično manji od maksimalnog, pri velikim vodama (vodostajima) preljeva se neiskorištena voda preko brane i sva se energija vodotoka ne iskoristiava. Da bi se smanjili ili izbjegli preljevi, grade se akumulacijska jezera koja zadržavaju vodu pri velikim protocima a ona se iskoristiava u hidroelektranama za vrijeme suše. Da bi se ustanovili svi parametri nužni za određivanje instaliranog protoka, potrebno je pratiti hidrološki režim vodotoka kroz 30-40 godina, jer su rasporedi protoka unutar godine i srednji godišnji protoci znatno ovisni o vlažnosti godine.



Slika 9-22 Veličina izgradnje hidroelektrane

Dakle je iskorištenje vode vodotoka ograničeno veličinom izgradnje hidroelektrane Q_i kojoj odgovara, nazovimo to tako, iskoristivi volumen vode V_i

$$V_i = \int_0^{Q_i} t dQ \quad [9.24]$$

prikazan površinom OAB_{t₀} na [slici 9-22](#).

Kada se poznaje iskoristivi volumen (V_i), moguće je odrediti i srednji iskoristivi protok:

$$Q_{si} = \frac{V_i}{t_0} = \frac{V_i}{31,54 \cdot 10^6} \left[\frac{m^3}{s} \right]. \quad [9.25]$$

Srednji iskoristivi protok (Q_{si}) manji je od srednjeg protoka vodotoka (Q_{sr}), a njihov omjer α daje „stupanj iskorištenja vode vodotoka“.

$$\alpha = \frac{Q_{si}}{Q_{sr}} = \frac{V_i}{V_0} \quad [9.26]$$

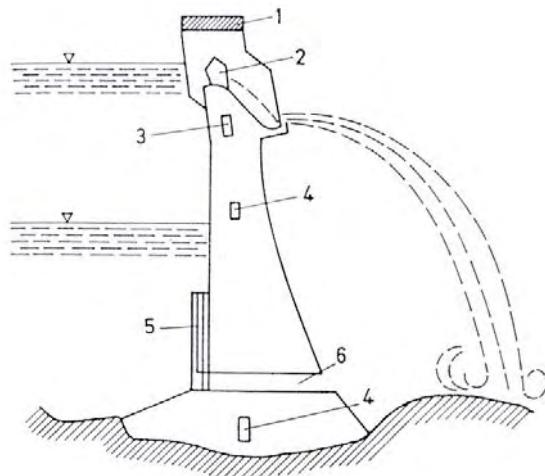
Instalirani protok za protočne i derivacijske hidroelektrane uobičajeno se uzima unutar granica $1,5Q_{sr} < Q_i < 2,5Q_{sr}$, a za akumulacijske i vršne hidroelektrane unutar granica $2Q_{sr} < Q_i < 4Q_{sr}$. (Razvijene zemlje imaju i veće instalirane protoke.)

9.5 Osnovni dijelovi i podjela hidroelektrana

Osnovni su dijelovi hidroelektrana ovi: brana ili pregrada, zahvat i dovod vode, vodna komora ili vodostan, tlačni cjevovod, strojarnica (turbinе, generatori) i odvod vode. Prema tipu hidroelektrane neki od ovih dijelova mogu potpuno izostati, a u drugim slučajevima može isti dio preuzeti više funkcija.

Brane ili **pregrade** su građevine koje imaju višestruku namjenu: da skrenu vodu s njezinog prirodnog toka prema zahvatu hidroelektrane, da povise razinu vode povećavajući tako gustoću gravitacijske potencijalne energije, i da omoguće akumuliranje vode. Naime, većina se (velikih) hidroelektrana opskrbljuje vodom iz akumulacijskih jezera koja su pritom često ujedno i rekreativska jezera. Sastavni su dijelovi pregrade (brane): tijelo pregrade i elementi za regulaciju vodenog toka ([tijeka](#)) (preljevi, ispusti, preljevna polja (zapornice) i temeljni ispust). Dva su osnovna tipa brana - niske i visoke. Visoke su brane one čija je visina, od temelja do krune (vrha brane), veća od 15 m, te brane više od 10 m, ali s krunom duljom od 500 m. Sve ostale brane su niske. Odluka o tome koja će se vrsta brana graditi ovisi o geološkom sastavu terena i o veličini brane. Brane mogu biti masivne i nasute, ovisno o materijalu od kojega se grade.

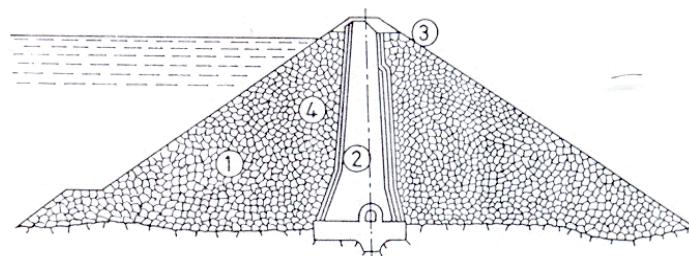
Masivne brane grade se od kamena, a češće od armiranog betona. Prema konstrukciji, masivne se brane mogu podijeliti na gravitacijske, lučne i raščlanjene. Gravitacijske brane odupiru se opterećenju vode i drugim silama vlastitom težinom. Lučne brane su zakrivljene ploče preko kojih se opterećenje dijeli na temelje, dno i bokove. Ponekad imaju neke elemente gravitacijske brane, pa se zovu lučno-gravitacijske, [slika 9-23](#).



Slika 9-23 Lučno-gravitacijska brana: 1 - kruna brane, 2 - preljev, 3 - kontrolni hodnik, 4 - kontrolne prostorije, 5 – zapornica (djeluje poput ventila), 6 - temeljni isput

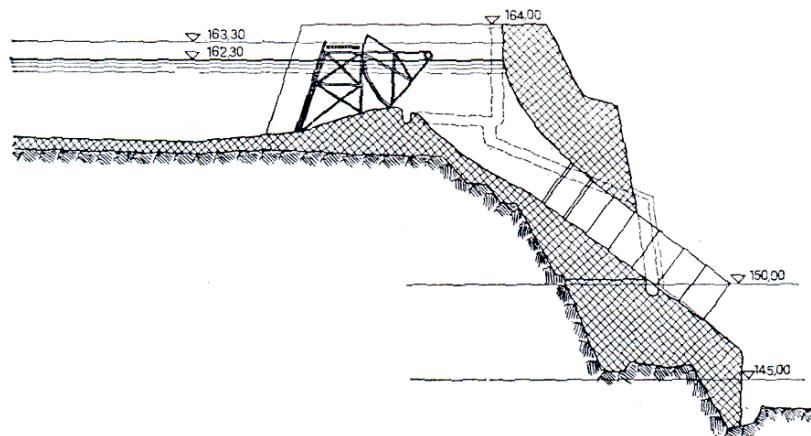
Lučne brane ponekad se izvode kao dijelovi rotacijskih tijela, i zovu se ljuškaste ili kupolne brane.

Raščlanjene brane čini više elemenata, odnosno stupova ili potpora na koje se naslanjaju betonske ploče ili svodovi. Nasute brane su zemljane, a grade se od homogenog ili nehomogenog materijala. U homogene materijale ubrajaju se lapor, zemlja i pijesak s 15-25% gline. Češće se grade brane od nehomogenog materijala u slojevima od gline do kamenog nasipa, [slika 9-24](#).



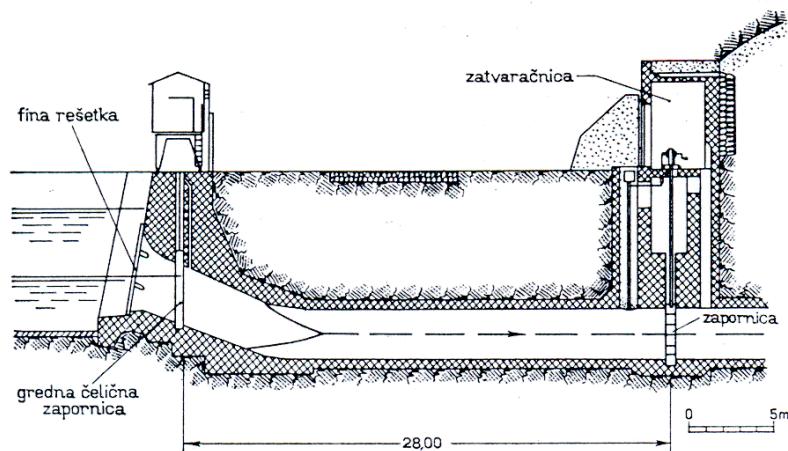
Slika 9-24 Nasuta brana: 1- kameni nasip, 2 - glinena jezgra, 3 - završni nasip, 4 – filterski slojevi

Zahvat vodu zaustavljenu pregradom (branom) usmjerava prema dovodu (strojarnici hidroelektrane). Razlikuju se dva osnovna tipa zahvata: zahvat na površini i zahvat ispod površine vode. Zahvat na površini vode, [slika 9-25](#) izvodi se kada je pregrada niska pa je razina vode iza pregrade praktički konstantna. Prolaz vode kroz zahvat regulira se **zapornicama**.



Slika 9-25 Zahvat na površini (derivacijska, protočna HE „Kraljevac“)

Zahvat ispod površine vode, i to na najnižoj mogućoj razini, razini do koje će se spuštati voda, [slika 9-26](#), izvodi se kada se količina vode tijekom godine mijenja (akumuliranje vode u kišnom i njezino iskorištavanje u sušnom razdoblju).

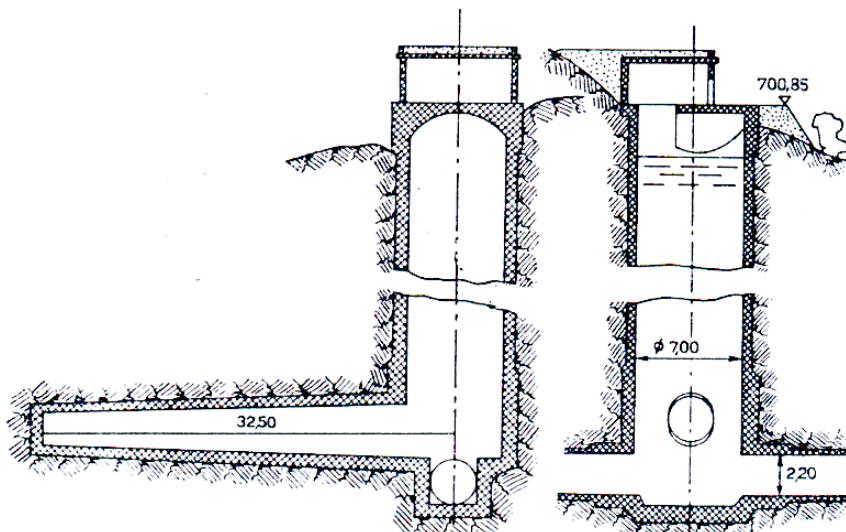
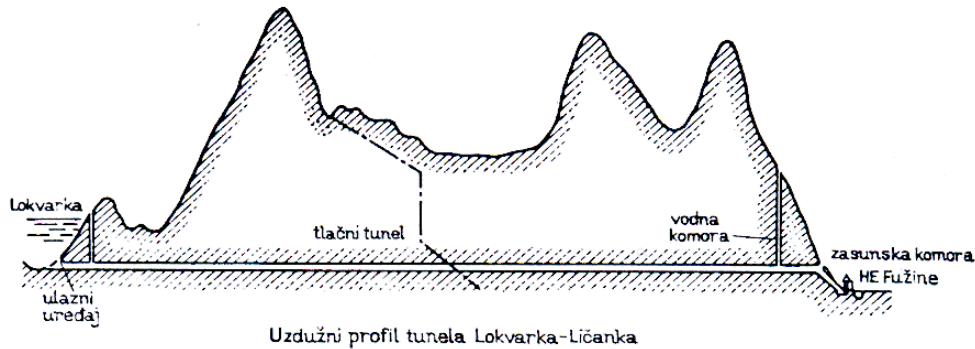


Slika 9-26 Zahvat ispod površine vode, ulazni uređaj (jezero Bajer za visokotlačnu, akumulacijsku, derivacijsku HE „Vinodol“)

Dovod vode spaja zahvat s vodostanom, odnosno s vodenom komorom. Izgrađuje se kao otvoren (**kanal**) ili kao zatvoren (**tunel**, koji može biti gravitacijski ili tlačni), ovisno o topografiji terena kojim prolazi ali i o pogonskim zahtjevima koji se postavljaju hidroelektrani. **Gravitacijski tunel** nije posve ispunjen vodom pa je za promjenu protoka vode potrebno mijenjati visinu zahvata i otvor na zahvatu. U slučaju **tlačnog tunela** voda ispunja cijeli profil tunela i za promjenu dotjecanja vode nije potrebno nikakvo djelovanje na zahvatu. Hidroelektrane su tada znatno elastičnije u pogonu jer se opterećenje mijenja mijenjanjem otvora ispred turbine.

Vodostan ili vodna komora nalazi se na kraju dovoda, a služi za ublažavanje posljedica naglih promjena opterećenja. Kad je dovod gravitacijski, potreban je vodostan odgovarajućeg obujma kako bi se u njemu moglo pohraniti veće količine vode u slučaju naglih promjena

opterećenja hidroelektrane. Ako hidroelektrana ima tlačni dovod, proširenje na kraju tog dovoda mora se izvesti kao vodna komora takvih dimenzija da, nakon promjene opterećenja, tlak u dovodu ne poraste iznad dopuštene granice, odnosno da se razina vode ne spusti ispod najviše kote ulaza u tlačni cjevovod. Dimenzioniranje vodne komore ima velik utjecaj na rad hidroelektrane. [Slika 9-27](#) prikazuje primjer izvedbe vodne komore.

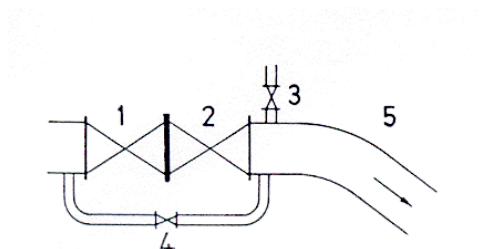


[Slika 9-27](#) Vodna komora

Tlačni cjevovod služi za dovođenje vode iz vodostana ili vodne komore do turbina. U pravilu izrađen je od čelika, a za manje padove i od betona. Prema svom smještaju tlačni cjevovod može biti položen po površini ili u tunelu. Cjevovod u tunelu može biti slobodno položen, kada tunel služi samo kao prostor za smještaj cjevovoda, ili prilijegati uz stijene tunela, i to tako da naprezanja preuzima samo stjenka cjevovoda ili tako da ih preuzima djelomično i okolna stijena.

Na ulazu u cjevovod uvijek postoji **zaporni organ**, [slika 9-28](#), čija izvedba ovisi o tlaku koji vlada na početku cjevovoda. Najvažniji je sigurnosni zaporni organ koji ima zadatak da automatski sprječe daljnje dotjecanje vode u cjevovod ako iz bilo kakvih razloga pukne cijev. Ispred sigurnosnog zapornog organa postavlja se pomoći zaporni organ koji omogućuje

pregled i popravke na sigurnosnom organu bez pražnjenja dovodnog tunela ili dovodnog kanala.

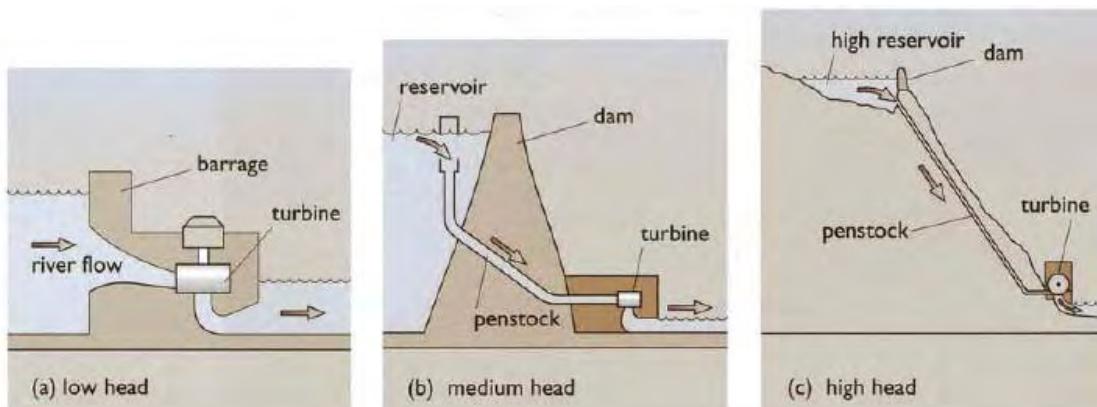


Slika 9-28 Priključak tlačnog cjevovoda: 1 – pomoćna zapornica, 2 – sigurnosna zapornica, 3 – ventil za zrak, 4 – obilazni cjevovod, 5 – tlačni cjevovod

Postavljanje zapornih organa na dnu tlačnog cjevovoda ovisi o broju turbina koje su spojene na jedan cjevovod i o pogonskim zahtjevima koji se postavljaju hidroelektrani. Obilazni cjevovod se nalazi na početku glavnog cjevovoda. Predviđen je za postupno punjenje glavnog cjevovoda te ima mnogo manji promjer od glavnog jer se, radi sprečavanja oštećenja, cjevovod puni samo s $1/20$ protoka u normalnom pogonu. Osim toga, zadatak je obilaznog cjevovoda da omogući izjednačavanje tlakova ispred i iza zapornog organa na ulazu u cjevovod jer bi bez toga izjednačenja bila potrebna vrlo velika snaga za otvaranje zapornog organa.

Hidroelektrane se mogu podijeliti prema **raspoloživom padu**, prema **načinu korištenja vode**, prema **obujmu akumulacijskog bazena** i prema **smještaju strojarnice**.

Prema **visini pada** razlikuju se „**niskotlačne**“ (pad do 25 metara), „**srednjotlačne**“ (od 25 do 200 m) i „**visokotlačne**“ (iznad 200 m) hidroelektrane, [slika 9-29](#).



Slika 9-29 Osnovne izvedbe HE ovisno o raspoloživom padu vode

Niskotlačne su hidroelektrane riječne, [slika 9-30](#), pribranske i derivacijske.



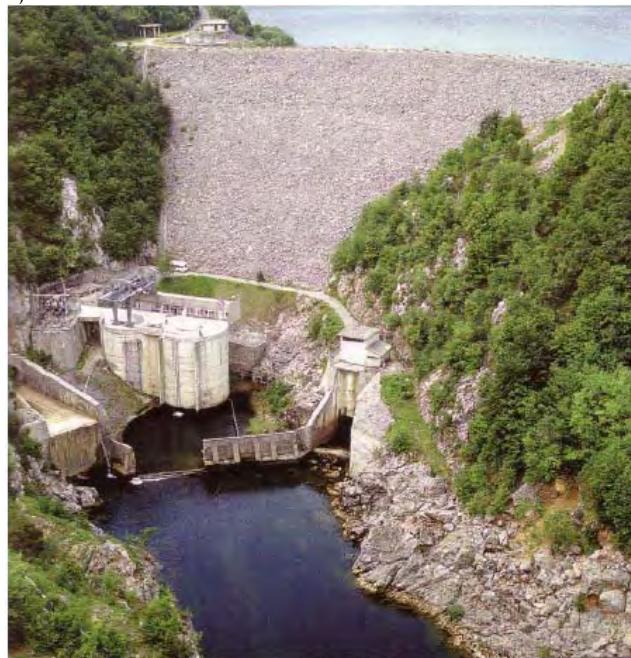
Slika 9-30 Niskotlačna, protočna HE „Ozalj“ na rijeci Kupi (pad 9,2 m, snaga 5 MW /3 x 1,1 + 2 x 1,1/)

Grade se za specifične padove do 1 m/km. Pri tome je karakteristično da im cijelokupni pad stoji na raspolaganju neposredno kod elektrane, bez potrebe za tlačnim dovodima i cjevovodima. Primjerice, na rijeci Dravi izgrađene su tri niskotlačne, derivacijske hidroelektrane: HE Varaždin (1975. godine), 86 MW, HE Čakovec (1982. godine), 80,6 MW, slika 9-31, i HE Dubrava (1989. godine) 80,6 MW. One su višenamjenske budući da, osim što proizvode električnu energiju, omogućuju opskrbu vodom, obranu od poplava, zaštitu zemljišta od izjedanja (erozije), navodnjavanje, odvodnju i promet. Te su hidroelektrane derivacijske i s akumulacijama za potpuno dnevno i djelomično tjedno izravnanje. Radom hidroelektrana upravlja se daljinski iz jednog središta, iz tzv. Komande lanca smještenog u Varaždinu, čime se ostvaruje povećanje proizvodnje električne energije optimizacijom korištenja voda, povećanje pogonske spremnosti agregata planiranjem termina i trajanja poslova održavanja i sigurno provođenje velikih vodnih valova kroz sustav HE.



Slika 9-31 Niskotlačna, derivacijska HE „Čakovec“ s akumulacijom za dnevno i djelomično tjedno uređenje dotoka (pad 17,5 m, snaga 76 /2x38/ MW)

Srednjotlačne hidroelektrane mogu biti pribranske, [slika 9-32](#), i derivacijske, [slika 9-33](#), koje se najčešće grade na mjestima gdje rijeka stvara zavoj koji se tada presiječe kanalom ili cjevovodom.



Slika 9-32 Srednjotlačna, pribranska HE „Sklope“ na Rijeci Liki (pad 60 m, snaga: 22,5 MW



Slika 9-33 Srednjotlačna, derivacijska HE

Visokotlačne hidroelektrane mogu biti pribranske i derivacijske. Radi li se o pribranskim elektranama, s obzirom na veličinu uspora, ove su hidroelektrane ujedno obično i akumulacijske s djelomičnom ili potpunom godišnjom regulacijom protoka i mogućnošću vršnog rada u tijeku dana.

Najčešće su međutim visokotlačne hidroelektrane derivacijske budući da su zahvat i strojarnica prostorno odijeljeni; voda se naime dovodi do turbina cjevovodom dugačkim i više kilometara, [slika 9-34](#). Grade se u brdovitim krajevima za padove veće od 5 m/km.



Slika 9-34 Visokotlačna, akumulacijska, derivacijska HE „Vinodol“ (pad 623 m, snaga 94,5 MW (3 agregata x 2 turbine x 15,75 MW)

Hidroenergetski sustav „Vinodol“ koristi se vodnom snagom sa slivnih područja Lokvarke (s Križ potokom) i Ličanke (akumulacija Bajer, Lepenica i Potkoš) te još nekoliko manjih potoka. Premda nije riječ o velikom slivnom području, približno 80 km², specifična je snaga slivnog područja znatna budući da se nalazi na visini većoj od 700 m pa je, primjerice, bruto pad na HE „Vinodol“ 658 m, što je jedan od najviših padova u hidroenergetskim postrojenjima u Europi. Gradnja hidroelektrane „Vinodol“ započela je 1939., a u pogonu je od 1952. godine. Kako bi se povećala proizvodnju u hidroenergetski je sustav „Vinodol“ 1985. uključena i crpno-akumulacijska HE „Lepenica“, [slika 9-35](#).



[Slika 9-35 Crpno-akumulacijska HE „Lepenica“](#)

S obzirom na **način korištenja vode** postoje **protočne hidroelektrane**, u kojima se voda iskorištava onako kako dotječe i **akumulacijske hidroelektrane**, u kojima se dio vode akumulira, da bi se mogla iskoristiti kad se pojavi potreba.

Prema **veličini akumulacijskog bazena** razlikuju se hidroelektrane s **dnevnom akumulacijom** (punjenje akumulacije noću, a pražnjenje danju), sa **sezonskom akumulacijom** (punjenje u kišnom, a pražnjenje u sušnom razdoblju) te s **godišnjom akumulacijom** (punjenje u kišnim, a pražnjenje u sušnim godinama).

Prema **smještaju strojarnice** dijele se hidroelektrane na **pribranske** (strojarnica smještena neposredno uz branu) i **derivacijske**.

Konačno, crpno-akumulacijske, [slika 9-36](#), i hidroelektrane koje iskorištavaju plimu i oseku izdvajaju se iz spomenute podjele hidroelektrana.



Slika 9-36 Crpno-akumulacijska (reverzibilna) HE „Velebit“ na rijeci Zrmanji (pad 517 m u turbinskom radu, 559 m u crpnom radu, snaga turbina 276 MW (2x138), crpki 240 MW (2x120))

9.6 Karakteristike akumulacije i pada

Karakteristike akumulacije i pada jesu: volumen akumulacijskog bazena, njegova energetska vrijednost i pad.

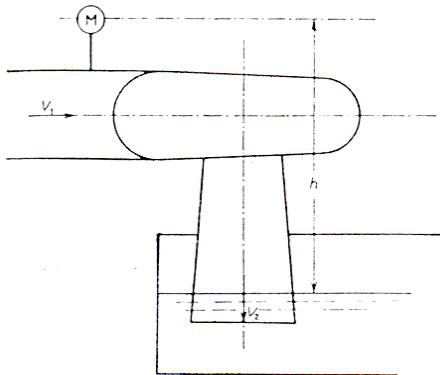
Razlikuje se geometrijski i korisni volumen akumulacijskog bazena. Geometrijski volumen akumulacijskog bazena je ukupni volumen vode koji se može spremiti između tla na dnu i najviše razine vode u akumulacijskom bazenu. Normalno se ne koristi sav raspoloživi volumen akumulacije, jer se za male volumene akumulirane vode naglo smanjuje pad, pa to dovodi do znatnog smanjenja snage, a s time i proizvodnje, pa je šteta od toga veća nego dobitak od iskorištenja tog malog volumena akumulirane vode. Korisni volumen akumulacijskog bazena je volumen vode koji se može spremiti između najviše i najniže razine u normalnom pogonu; to je i volumen koji se koristi u normalnom pogonu. Najniža razina pri tom ne mora biti jednaka najnižoj razini za slučaj pražnjenja radi pregleda i popravaka. Za energetska razmatranja najvažniji je korisni volumen akumulacijskog bazena budući da samo taj volumen utječe na reguliranje protoka.

Da bi se karakterizirao korisni volumen s obzirom na hidroelektranu, uvodi se vrijeme trajanja pražnjenja akumulacijskog bazena. To je minimalno vrijeme potrebno da korisni volumen istječe kroz turbine, pretpostavljajući da za to vrijeme nema dotoka u akumulaciju. Protočnom hidroelektranom smatra se hidroelektrana čiji se akumulacijski bazen može isprazniti za manje dva sata, za pražnjenje bazena hidroelektrane s dnevnom akumulacijom potrebno je od 2 sata do 400 sati, a za pražnjenje bazena hidroelektrane sa sezonskom akumulacijom potrebno je više od 400 sati.

Korisni volumen može se prikazati i kao relativni volumen u odnosu na ukupni volumen vode koji tijekom godine dotjeće u akumulaciju.

Pokraj toga, akumulacijski se bazen karakterizira energetskom vrijednošću. Pod njom se razumijeva količina električne energije koja bi se proizvela u promatranoj hidroelektrani, i u svim nizvodnim hidroelektranama, kad bi se ispraznio korisni volumen bez dotoka vode u bazu i bez gubitka vode.

U hidroelektrani razlikuju se „prirodni“ ili „bruto-pad“ i „korisni“ ili „neto-pad“. Prirodnim ili bruto-padom H_b naziva se razlika između razine vode na zahvatu („**gornje vode**“) i razine vode nakon povratka u korito ili na kraju odvoda („**donje vode**“). To je, dakle, pad koji nam pruža priroda. Zbog gubitaka u zahvatu, dovodu, tlačnom cjevovodu i odvodu na ulazu u turbinu stoji na raspolaganju tlak koji je, mјeren u metrima stupca vode (m. s. v.), manji od prirodnog (bruto) pada. Tlak na ulazu u turbinu može se izmjeriti manometrom (M na [slici 9-37](#)).



[Slika 9-37 Određivanje neto-pada u hidroelektrani s tlačnim cjevovodom](#)

Kako manometar pokazuje samo statički tlak (h_m u m s. v.) treba još uvažiti i visine brzine na ulazu (c_1) i na izlazu (c_2) turbine. Osim toga treba uračunati i položaj manometra (h) iznad razine vode na izlazu iz turbine. Poznavajući sve te veličine može se odrediti tlak, koji vlada na ulazu u turbinu, izražen u metrima stupca vode (padom H_n /taj se pad naziva neto-padom/) zamijenimo li u jednadžbi [9.2] varijablu ζ s b :

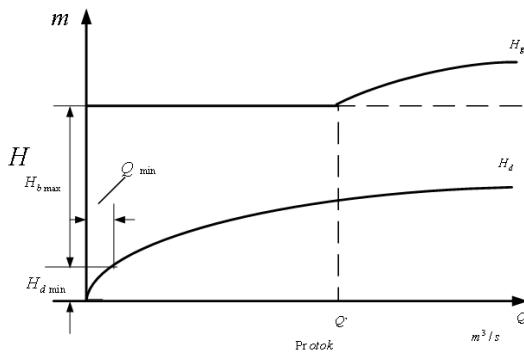
$H_n = h_m + h + \frac{c_1^2}{2g} - \frac{c_2^2}{2g} \quad [\text{ms.v.}]$	[9.27]
--	--------

Dakle, tlakom (visinom) H_n određen je neto-pad u hidroelektrani.

Izraz [9.27] vrijedi za reakcijske turbine (Francisovu, Kaplanovu i propelernu turbinu). Za akcijske turbine (Peltonove), b je položaj manometra iznad srednje razine sapnica, a za brzinu na izlazu postavlja se $c_2 = 0$.

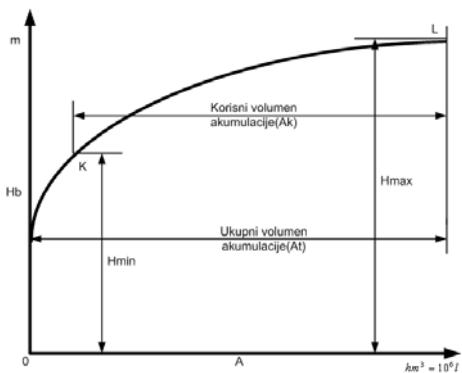
Ni bruto-pad ni neto-pad nisu konstantni. Na prvi utječu promjene razina donje i gornje vode, a na drugi osim promjena razina još i promjena gubitaka.

Promjene razina gornje vode mogu nastati zbog preljeva velikih voda preko brane, do čega dolazi kad se sva suvišna voda ne može propustiti kroz ispuste. U tom slučaju razina gornje vode ovisi o protoku ([slika 9-38](#)), ali samo za protoke koji su veći od protoka Q' koji ovisi o kapacitetu ispusta i o veličini izgradnje hidroelektrane.



Slika 9-38 Ovisnost razina gornje vode H_g i razina donje vode H_d o protoku Q

U pribranskim hidroelektranama, i u akumulacijskim hidroelektranama s tlačnim dovodom, bruto-pad, a prema tomu i neto-pad, ovisi o volumenu akumulirane vode (A). Ta se ovisnost prikazuje krivuljom $H_b = f(A)$, slika 9-39.



Slika 9-39 Ovisnost bruto-pada H_b o volumenu akumulirane vode A

Za promatranu hidroeletranu maksimalan bruto-pad određen je ukupnim volumenom akumulacije, a minimalni bruto-pad korisnim volumenom akumulacije.

Promjene razina donje vode ovisne su o količini vode koja protječe koritom rijeke na kraju odvoda, i to bez obzira na to dotjeće li voda koritom pokraj hidroelektrane ili kroz turbine hidroelektrane. Razina donje vode raste s povećanjem protoka (slika 9-36), a oblik krivulje ovisi o profilu korita.

Razlikom razina određen je bruto pad. Najveći bruto pad pojavljuje se u doba najmanjih protoka (Q_{\min}), dakle onda kad je razina donje vode najniža.

Promjena pada ima veliki utjecaj na snagu i moguću proizvodnju hidroelektrana s malim padom (do oko 50 m), dok se u hidroelektranama s većim padom ta promjena često može zanemariti.

Da bi se odredio neto-pad, treba od bruto pada odbiti gubitke u svim dovodima. (O tome ćemo detaljnije govoriti kasnije.) Gubici pada približno su proporcionalni kvadratu protoka; to su veći što je duljina dovoda veća i što je površina njihovih presjeka manja. Budući da su dovodi u hidroelektranama s malim padom kratki, u tim hidroelektranama odlučan utjecaj na promjenu neto-pada ima promjena bruto-pada, dok u hidroelektranama s velikim padom (dugim dovodima) promjenu neto-pada u najvećoj mjeri određuju gubici u dovodima.

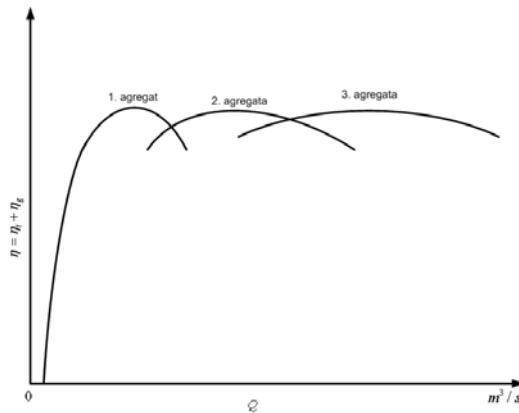
9.7 Snaga i moguća proizvodnja hidroelektrana

Snaga je koju hidroelektrana daje na priključcima generatora jednaka:

$$P = g \cdot Q \cdot H_n \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \rho [kW]; g = 9,81 \frac{m}{s^2}; \rho = 1000 \frac{kg}{m^3} \quad [9.28]$$

gdje je Q protok koji protječe kroz turbinu, H_n neto-pad koji stoji na raspolažanju, a η_t i η_g stupnjevi su djelovanja turbine i generatora.

Stupnjevi djelovanja i turbine i generatora ovise o opterećenju i broju agregata u pogonu. Slika 9-40 prikazuje promjenu stupnja djelovanja u ovisnosti o protoku.



Slika 9-40 Stupanj djelovanja hidroelektrane

Stupanj djelovanja pri optimalnom opterećenju u modernim hidroelektranama iznosi i do 90 %. Prosječan je stupanj djelovanja korištenja potencijalne energije vode niži i iznosi za veća postrojenja približno 80%, a za manja postrojenja približno 75%.

Za određivanje snage kad nisu poznati stupnjevi djelovanja upotrebjava se približna formula:

$$P = k Q H_n [kW] \quad [9.29]$$

Vrijednost parametra k ovisi o snazi agregata u hidroelektrani. Za veće hidroelektrane s agregatima snage $P \geq 10$ MW, aproksimativni izraz glasi:

$$P = 8 Q H_n [kW] \quad [9.30]$$

a za hidroelektrane s agregatima manje snage je $k < 8$. Veličina parametra k obično se određuju linearnom interpolacijom uz pretpostavku da je $k = 7,5$ za elektrane s agregatima snage 1 MW.

U slučajevima kad se radi o manjim relativnim promjenama bruto-pada može se mjesto stvarnog neto-pada u [9.30] uvrstiti srednji neto-pad koji se određuje relacijom:

$$H_{nsr} = \frac{2}{3} H_n' + \frac{1}{3} H_n'' \quad [9.31]$$

gdje je H_n' neto-pad kod punog opterećenja, a H_n'' neto-pad uz srednje opterećenje odnosno uz srednji iskoristivi protok. (U oba se slučaja pretpostavlja da je volumen akumulirane vode jednak polovici korisnog volumena akumulacije. Snaga određena izrazom [9.29] manja je od snaga koje se postiže prigodom ispitivanja agregata, no vrlo dobro aproksimira vrijednosti koje se postižu u stvarnom pogonu.)

Mogućom dnevnom ili godišnjom proizvodnjom hidroelektrane naziva se ona količina energije koju bi hidroelektrana mogla proizvesti s obzirom na protoke, pad, stupanj djelovanja i veličinu izgradnje. Pokraj toga hidroelektrana se karakterizira i mogućom srednjom godišnjom proizvodnjom (GWh) koja je određena kao aritmetička sredina mogućih godišnjih proizvodnja u promatranom, što duljem, nizu godina. Prigodom određivanju raspoloživog dotoka vode treba uzeti u obzir postojanje bilo vlastite akumulacije bilo akumulacije u uzvodnim hidroelektranama, kao i eventualne potrebe vode za plovidbu, poljoprivredu i sl. Pritom treba pretpostaviti da su svi dijelovi hidroelektrane sposobni za pogon, da ne postoje ograničenja u mogućnosti preuzimanja proizvedene električne energije, da ne postoje ograničenja proizvodnje zbog utjecaja mreže (rezerva, proizvodnja jalove snage, regulacija frekvencije i sl.) budući da je stvarna proizvodnja hidroelektrane normalno niža od moguće proizvodnje uglavnom radi promjena potražnje potrošača odnosno radi, u nekim razdobljima godine i dana, veće mogućnosti proizvodnje od potražnje potrošača.

Određivanje je moguće proizvodnje najzgodnije provesti pomoću krivulje trajanja (ili krivulje vjerojatnosti) protoka. Površina ispod krivulje trajanja prikazuje volumen vode V koji стоји

$$\text{na raspolaganju, jednadžba [9.24]: } V = \int_0^Q t dQ, \text{ gdje je } t \text{ trajanje protoka, slika 9-22.}$$

Iskorištenje je vode pritom ograničeno veličinom izgradnje hidroelektrane. Određenoj veličini izgradnje Q_i naime odgovara iskoristivi volumen vode V_i , [9.24], $V_i = \int_0^{Q_i} t \cdot dQ$, koji

je prikazan površinom OABt₀, slika 9-22. Kada se poznaje iskoristivi volumen (V_i), moguće je odrediti i srednji iskoristivi protok, [9.25], $Q_{si} = \frac{V_i}{t_0} = \frac{V_i}{31,54 \cdot 10^6} \left[\frac{m^3}{s} \right]$ koji je, pokazali smo, manji je od srednjeg protoka vodotoka (Q_s), a njihov omjer α daje stupanj iskorištenja vode vodotoka $\alpha = \frac{Q_{si}}{Q_s} = \frac{V_i}{V_0}$.

Kao prvu aproksimaciju moguću proizvodnju možemo odrediti, uz pretpostavku konstantnog stupnja djelovanja, pomoću veličine k u relaciji [9.29], i konstantnog neto pada. Tada je srednja snaga hidroelektrane:

$$P_s = k \cdot Q_{si} \cdot H_n [kW]$$

[9.32]

a moguća godišnja proizvodnja:

$$W = 8760 \cdot k \cdot Q_{si} \cdot H_n [kWh]$$

[9.33]

Moguća proizvodnja može se odrediti i pomoću iskoristivog volumena. Koristeći se jednadžbom [9.25] dobije se:

$$W = \frac{k \cdot H_n \cdot V_i}{3600} [\text{kWh}]$$

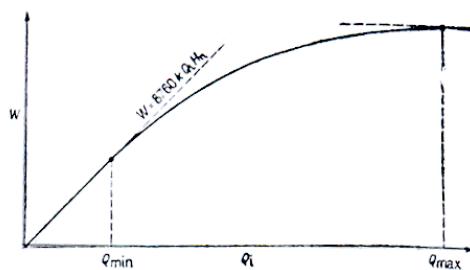
[9.34]

odnosno za $k = 8$:

$$W = \frac{H_n \cdot V_i}{450} [\text{kWh}]$$

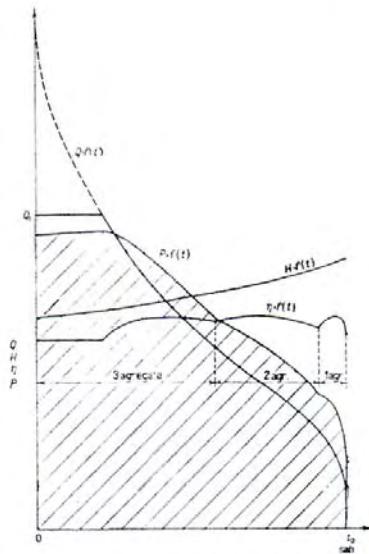
[9.35]

Za promatrano postrojenje moguća proizvodnja, uz zadani način korištenja hidroelektrane, ovisi samo o veličini izgradnje. Povećanjem veličine izgradnje raste i moguća proizvodnja, ali to sporije što je veličina izgradnje veća, slika 9-41.



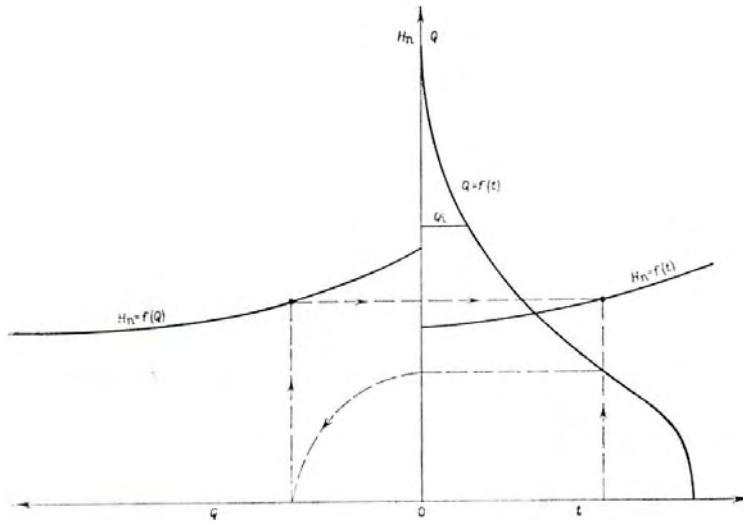
Slika 9-41 Ovisnost moguće proizvodnje W o veličini izgradnje Q_i hidroelektrane

Ako je potrebno točnije odrediti moguću proizvodnju, može se upotrijebiti grafička metoda prikazana na slici 9-42. Ucrtavanjem krivulja $H_n = f(t)$ i $\eta = f(t)$ u isti dijagram s krivuljom trajanja $Q = f(t)$, te množenjem tih krivulja dobivamo, pomoću izraza [9.28], krivulju $P = f(t)$ koja predstavlja krivulju snage. Planimetrijom ploštine površine ispod krivulje $P = f(t)$ dobivamo moguću proizvodnju.



Slika 9-42 Određivanje moguće proizvodnje hidroelektrane

Sada je moguće konstruirati krivulju $W = f(Q)$, slika 9-43, ali za svaku promjenu veličine izgradnje treba ponovno konstruirati krivulju $H_n = f(t)$ i $\eta = f(t)$. Pad i stupanj djelovanja obično su poznati u ovisnosti o protoku, dakle poznate su funkcije $H_n = f(Q)$ i $\eta = f(Q)$. Konstrukcijom prema slici 9-43 možemo pomoću krivulje $H_n = f(Q)$, a preko krivulje $Q = f(t)$, odrediti krivulju $H_n = f(t)$. Analognim postupkom može se konstruirati krivulja ovisnosti $\eta = f(t)$.



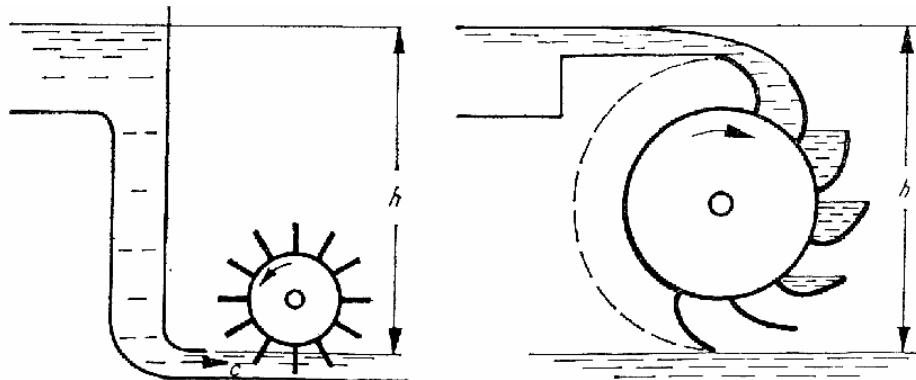
Slika 9-43 Konstrukcija krivulje $H_n = f(t)$ pomoću krivulje $Q = f(t)$ a prema krivulji $H_n = f(Q)$

Tako određena moguća proizvodnja predstavlja srednju moguću godišnju proizvodnju, tj. proizvodnju koja se može u prosjeku očekivati u duljem nizu godina. Na isti je način moguće odrediti i moguću proizvodnju u pojedinim godinama, ako se račun provede prema krivuljama trajanja za pojedine godine, a ne prema krivuljama trajanja za niz godina.

9.8 Pretvorba energije vode u mehanički rad – osnovna podjela vodnih turbina

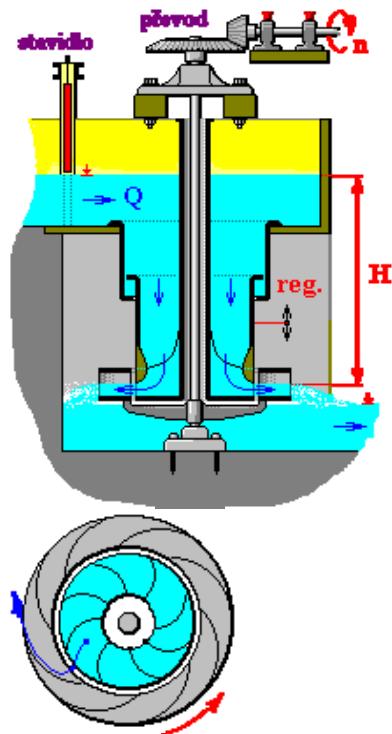
Pokazali smo u 3.1.2.2.1 da se energija koju ima neka kapljevina, u našim razmatranjima voda, što struji nekom brzinom, sastoji se od energije tlaka, potencijalne i kinetičke energije. Svaka od tih energija može se pretvoriti na pogodan način u drugi oblik, koji se pomoću strojeva transformira u mehanički rad.

Najjednostavniji su takvi strojevi vodenička kola, a ona se izvode za iskorištavanje kinetičke energije, slika 9-44a, ili su tjerana pomoću potencijalne energije, slika 9-44b. Takva su vodenička kola upotrebljavana već u najdavnijim vremenima, a danas služe za pogon malih mlinova. Osim toga, moguće je ostvariti i stupni stroj tjeran vodom kao djelatnom tvari, u kojem se iskorištava energija tlaka. Snage koje se postižu takvim strojevima vrlo su male, a i stupanj je djelovanja vrlo slab. Iznimka je vodeničko kolo koje iskorištava potencijalnu energiju, slika 9-44b, jer ono može imati vrlo dobar stupanj djelovanja ako je pogodno konstruirano.



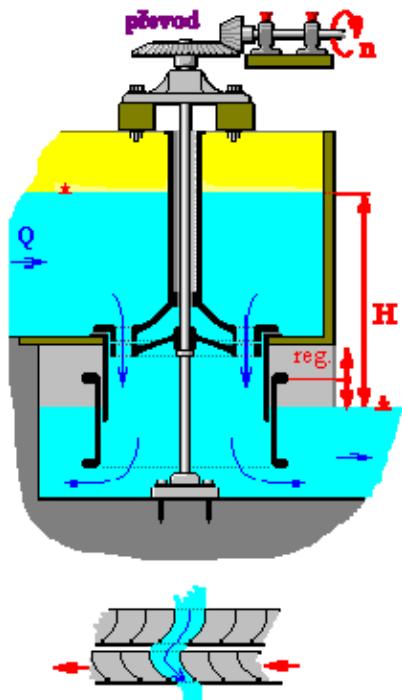
Slika 9-44 Skice vodeničnih kola: a) iskorištanje kinetičke energije, b) iskorištanje potencijalne energije

Prva vodna turbina u današnjem smislu postavljena je 1837. godine u Francuskoj. To je Fourneyronova turbina (slika 9-45), nazvana po njezinom konstruktoru. Snaga joj je bila oko 60 KS (44,7 kW). Fourneyronova turbina spada u red tzv. radikalnih turbina (voda struji od osovine prema obodu rotora /radikalno strujanje/) centrifugalnog smisla. Voda iz nekog potoka ili rijeke, dovedena na primjer derivacijskim kanalom, dotječe u komoru K, iz koje, prolazeći kroz mirujući dio turbine (stator), ulazi u rotor R na njegovom unutarnjem obodu a izlazi na vanjskom (odakle i naziv: centrifugalna turbina). Stator izgrađuju lopatice koje vodi, prije ulaza u rotor, daju propisani smjer, a zatim se posredstvom djelovanja rotorskih lopatica, koji imaju svršishodni oblik, njihovim okretanjem, energija vode transformira u mehanički rad.



Slika 9-44 Fourneyronova vodna turbina: S –stator, R - rotor

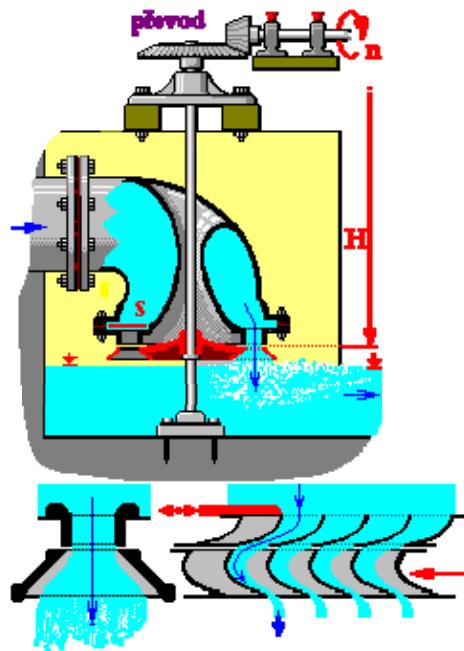
Nešto kasnije pojavila se Jonvalova turbina koja pripada tzv. aksijalnom tipu turbine. Prolazeći kroz rotor, slika 9-45, voda se uglavnom giba po plaštu valjka koaksijalnog s turbinom, paralelno s osovinom turbine, te nema radijalne komponente. Jonvalova turbina radi na istom principu kao Fourneyronova, novost je valjkasta cijev, tzv. aspirator, kroz koju voda struji nakon izlaska iz rotora. Aspirator je potpuno ispunjen vodom, a rotor je bitno podignut iznad razine donje vode.



Slika 9-45 Jonvalova turbina

Aspirator omogućuje, što ćemo pokazati kasnije, iskorištavanje, u granicama savršenosti turbine, cijelog raspoloživog pada između gornje i donje vode (iako je turbina podignuta iznad donje razine vode), što inače (bez aspiratora) ne bi bilo moguće. Prednost je hidroelektrane s aspiratorom osim navedenog i u mogućnosti obavljanja montažnih i drugih radova na subom, te i u neovisnosti o promjenama donje razine vode za vrijeme visokih voda (velikih protoka). Dok se spomenuta prednost postižava već s valjkastom aspiratorom, izvedba aspiratora u obliku cijevi koja se proširuje (difuzor) ima još dodatnu ulogu o kojoj ćemo govoriti kasnije; zasad samo istaknimo da je difuzor omogućio izgradnju suvremenih brzobodnih tipova turbine.

Daljnji je tip turbine, iz tog doba, Girardova turbina, koja također spada u red aksijalnih turbina, s tom razlikom prema Jonvalovoj turbini, što kod nje prostor između lopatica rotora nije potpuno ispunjen vodom. Turbina u tu svrhu mora biti postavljena iznad donje vode, a presjeci kanala između lopatica rotora moraju, na izlazu, biti prošireni, slika 9-45. Girardova turbina stoga spada u red „turbina slobodnog mlaza“ ili u tzv. „akcijskih turbina“.

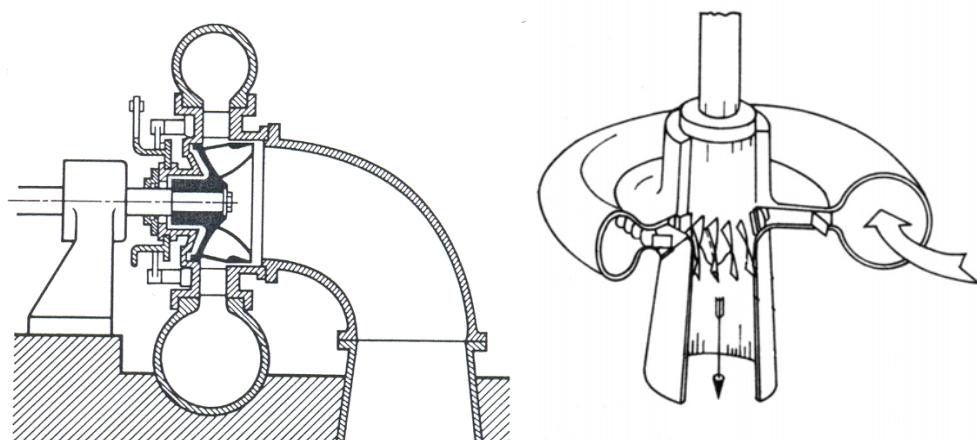


Slika 9-45 Girardova turbina

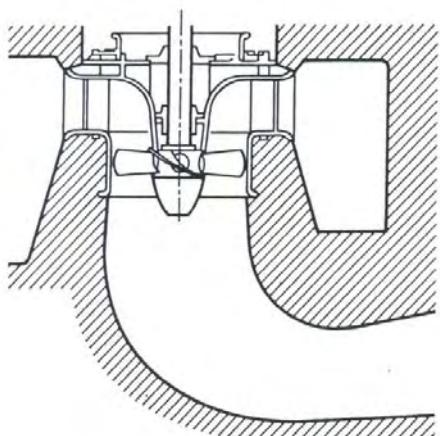
Gradnja je opisanih turbinu međutim u današnje vrijeme napuštena, jer se u suvremenim turbinama postiže bolji stupanj djelovanja. Danas se u osnovi grade dva tipa vodnih turbina: „pretlačne“ (ili „reakcijske“) i turbine slobodnog mlaza (ili akcijske turbine).

Pretlačnim turbinama nazivaju se vodne turbine u kojima je tlak na ulazu u rotor veći od onoga na njegovom izlazu, što odgovara reakcijskim parnim turbinama. U pretlačnim turbinama, naime, dio se energije tlaka transformira u kinetičku energiju u statoru, a dio u rotoru. U turbinama slobodnog mlaza tlak je na ulazu u rotor jednak kao i na njegovom izlazu, što odgovara akcijskim parnim turbinama, jer se sva energija tlaka transformira u kinetičku energiju vode u statoru.

Izvode se dva tipa pretlačnih vodnih turbina: Francisova, [slika 9-46](#), i Kaplanova (propelerna) turbina, [slika 9-47](#). Prvu je konstruirao Amerikanac Francis (1847), a drugu Čeh Kaplan (1922). Ponekad se izvodi i propelerna turbina, u principu Kaplanova, ali s nepomičnim rotorskim lopaticama. (U Kaplanovojoj se turbinu rotorske lopatice mogu pomicati da bi se bolje prilagodile uvjetima strujanja. Micanjem lopatica mijenja se njihov nagib i time se stupanj djelovanja održava na povoljnoj razini u širokom području rada.) Propelerna je turbina (Kaplanova turbina) nastala razvojem Francisove turbine. To je aksijalna turbina s vrlo malim brojem lopatica rotora koji je građen u obliku propeler-a. Između statora i rotora postoji relativno veliki međuprostor kroz koji se voda giba slobodno. Francisova turbina je radikalna, odnosno radikalno-aksijalna turbina, centripetalnog smisla utjecanja vode u rotor (voda ulazi u rotor na njegovom vanjskom a izlazi na unutarnjem obodu), redovito opskrbljena difuzorom. Raniji tipovi Francisove turbine bili su gotovo sasvim radikalni, no, kod suvremenih tipova, voda na izlazu iz rotora ima znatnu aksijalnu komponentu strujanja.

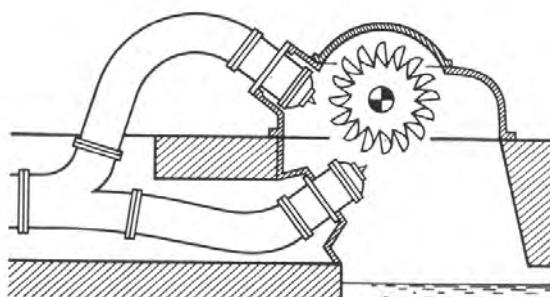


Slika 9-46 Skica Francisove turbine s horizontalnom i vertikalnom osovinom



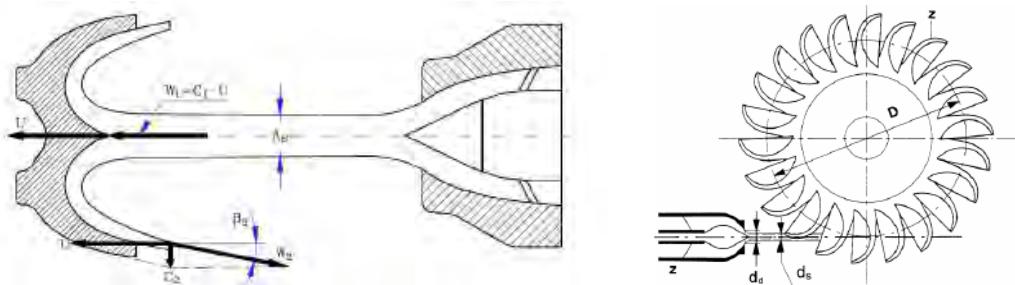
Slika 9-47 Skica Kaplanove turbine

Peltonova je turbina, [slika 9-48](#), jedini tip vodne turbine slobodnog mlaza koji se danas izvodi. Konstruirao ju je 1878. godine Amerikanac Pelton. Ova se turbina izvodi s jednom ili s više mlaznicama (sapnica): slobodni mlaz tangencijalno udara u lopatice rotora, koje skreću mlaz, i time se proizvodi moment vrtnje. (Tumačenje uz sliku 9-2.)



Slika 9-48 Skica Peltonove turbine s dvije mlaznice

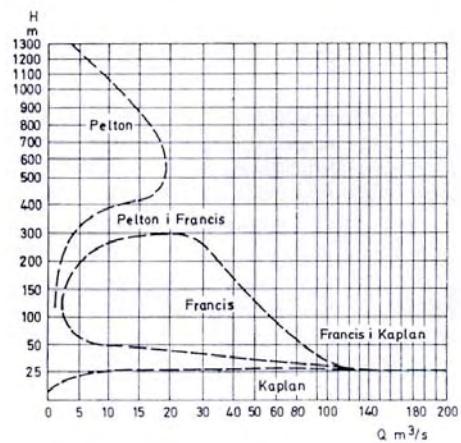
Naime, stator u Peltonovoj turbini jest sapnica, nazvana još mlaznicom, u koju se dovodi voda iz cjevovoda i u kojoj se sva energija vode transformira u kinetičku energiju. Mlaz vode, izlazeći iz sapnice, udara u lopaticu, koja je oštrim brdom podijeljena u dva jednaka ovalna udubljenja, [slika 9-49](#). Lopatice su smještene na obodu rotora, koji se okreće zbog djelovanja mlaza. Pojedine lopatice dolaze stoga samo povremeno u dodir s mlazom, a za vrijeme dodira nagib im se s obzirom na mlaz stalno mijenja.



Slika 9-49 Princip rada Peltonove turbine

Rotor se Peltonove turbine okreće u zraku, pa zbog toga mora mlaz biti podignut na neku visinu h iznad donje vode uvjetovanu prirodnim kolebanjem razine donje vode. Brzina je vode na izlazu iz mlaznice (sapnice) $\sqrt{2g(H-h)}$, pa prema tome visina h predstavlja nužno izgubljenu kinetičku energiju po 1 kg vode.

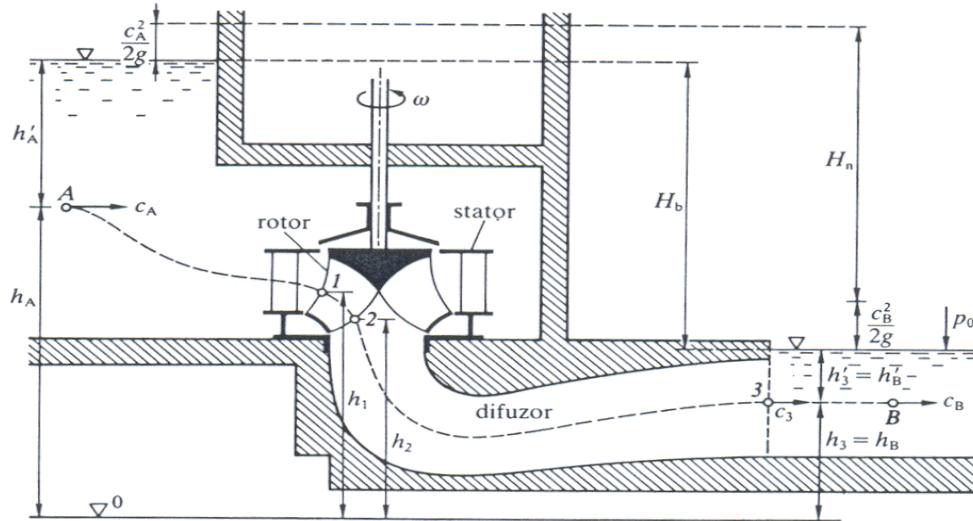
Tri osnovna, suvremena tipa turbina najčešće ne predstavljaju konkureniju jedan drugom, odnosno, u većini se slučajeva ne ćemo morati kolebatи prigodom izbora turbine pri zadanim okolnostima s obzirom na raspoloživi pad, količinu vode i broj okretaja, te i s obzirom na uvjete opterećenja i promjenljivost pada i količine vode. Naime, najopćenitije, Pelton turbinu iskorištava energiju vodotoka karakteriziranih visokim padom i relativno malom količinom vode, Francisova dolazi uglavnom u obzir za iskorištavanje srednjih padova i odgovarajućih količina vode, dok je Kaplanova (propelerna) turbina najprikladnija za iskorištavanje energije velikih količina vode i malih padova. Prema tome, Peltonova će se turbina najčešće naći u visokim gorskim predjelima, Francisova u nižim brdskim područjima, a Kaplanova (propelerna) u nizinama. Drugim riječima, tek na ograničenim područjima mogu se primjene turbina preklapati, [slika 9-50](#).



Slika 9-50 Područje primjene vodnih turbina

9.9 Energetske (energijske) prilike u hidroelektrani

Vodne turbine u hidroelektranama služe kao strojevi za pogon električnih generatora. Da se dobije slika o energetskim (energijskim) prilikama u hidroelektrani, razmotrit ćemo najprije prilike u hidroelektrani s malim padom, [slika 9-51](#).



[Slika 9-51](#) Presjek kroz vodnu turbinu u hidroelektrani s malim padom

Promatrajmo maseni protok vode od 1 kg/s koji se kreće od točke A do točke B. Snaga masenog protoka u točki A pred ulazom u turbinu je:

$$P_A = \frac{p_A}{\rho} + \frac{c_A^2}{2} + gh_A \left[\frac{J}{kg s} \equiv W \right] \quad [9.36]$$

Snaga tlaka p_A/ρ posljedica je stupca vode b'_A iznad točke A i tlaka okolice p_o pa je:

$$P_A = \frac{p_o}{\rho} + \frac{c_A^2}{2} + gh_A + gh'_A [W] \quad [9.37]$$

S druge strane, nakon izlaska iz hidroelektrane u odvodni kanal, maseni protok u točki B ima snagu:

$$P_B = \frac{p_B}{\rho} + \frac{c_B^2}{2} + gh_B [W] \quad [9.38]$$

Uvezši i sada u račun stupac vode iznad točke B (b'_B) i tlak okolice (p_o) na površinu vode u odvodnom kanalu može se jednadžba [9.38] napisati u obliku:

$$P_B = \frac{p_o}{\rho} + \frac{c_B^2}{2} + gh_B + gh'_B [W] \quad [9.39]$$

Razlika između P_A i P_B je snaga masenog protoka koja se iskorištava u turbini:

$$P = P_A - P_B = g \left(h_A + h'_A + \frac{c_A^2}{2g} \right) - g \left(h_B + h'_B + \frac{c_B^2}{2g} \right) \left[\frac{k\text{gm}^2}{\text{s}^3} = W \right] \quad [9.40]$$

Razlika između razina vode na strani dovoda (gornja voda) i na strani odvoda (donja voda) naziva se brutopadom hidroelektrane (H_b). Određen je relacijom:

$$H_b = (h_A + h'_A) - (h_B + h'_B) \quad [m] \quad [9.41]$$

pa je jedinična iskoristiva snaga masenog protoka u vodnoj turbini:

$$P = g \left(H_b + \frac{c_A^2}{2g} - \frac{c_B^2}{2g} \right) [W] \quad [9.42]$$

Drugi i treći član u zagradi izraza [9.42] imaju dimenziju duljine (m) i takvi se članovi nazivaju „visine brzine“. Drugi je član visina brzine na dovodnoj, a treći visina brzine na odvodnoj strani. Naime, kvadrat brzine podijeljen dvostrukim ubrzanjem Zemljine sile teže jednako djeluje kao i stupac vode visok onoliko kolika je visina brzine.

Izraz u zagradi jednadžbe [9.42] raspoloživi je ili netopad (H_n), pa je snaga masenog protoka:

$$P = gH_n \left[\frac{k\text{gm}^2}{\text{s}^3} = W \right] \quad [9.43]$$

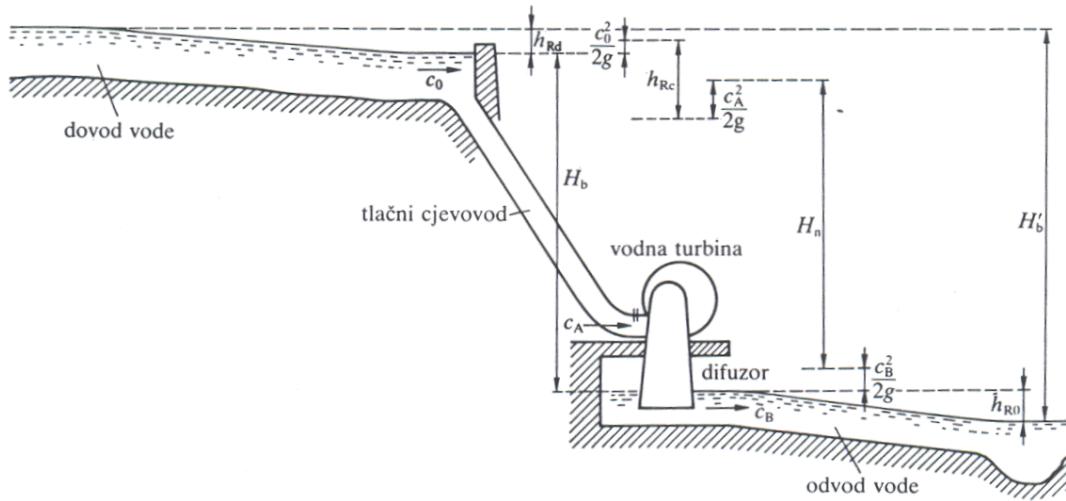
Množi li se ta snaga s ukupnim masenim protokom vode \dot{m} (kgs^{-1}), koju možemo prikazati kao produkt gustoće ρ (kg/m^3) i protoka Q (m^3/s), raspoloživa će snaga turbine biti:

$$P_t = \dot{m}P = \rho g Q H_n \left[\frac{k\text{gm}^2}{\text{s}^3} = W \right] \quad [9.44]$$

S obzirom da je za vodu koja služi za pogon vodnih turbin dopušteno uz vrlo veliku točnost uzeti da je $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, raspoloživa se snaga u praksi određuje iz izraza:

$$P_t = g Q H_n \quad [\text{kW}] \quad [9.45]$$

Na [slici 9-51](#) prikazan je smještaj vodne turbine u hidroelektrani u kojoj se voda iskorištava na malom bruto-padu H_b , pa su u proračunu netopada zanemareni gubici pri dovodu vode turbini, što je i dopustivo u takvim prilikama. Raspoloživi li su veći padovi, voda se turbini dovodi kanalom, ili tunelom, pa zatim cjevovodom, gubitci u odvodu i dovodu uzimaju se obzir prigodom određivanja netopada; promatra li se hidroelektrana s većim padom, [slika 9-52](#), treba razlikovati prirodni brutopad H'_b od iskoristivog brutopada H_b .



slika 9-52 Skica hidroelektrane s velikim padom

Oni se međusobno razlikuju za gubitke pada u dovodu vode h_{Rd} od vodotoka iz kojeg se uzima voda za energetsko iskorištanje i za gubitke pada h_{Ro} od hidroelektrane do mjesta u vodotoku gdje se vraća energetski iskorištena voda. Prema tome je:

$$H_b = H'_b - h_{Rd} - h_{Ro} \quad [m] \quad [9.46]$$

Gubici pada nisu ništa drugo nego mjera za gubitke energije, odnosno snage vode pri strujanju dovodnim i odvodnim kanalom ili tunelom, jer su gubici energije određeni relacijama $w_{Rd} = gh_{Rd}$ odnosno $w_{Ro} = gh_{Ro}$.

Da bi se odredio netopad iskoristiv u vodnoj turbinu, treba dakle poći od brutopada H_b . Postupimo li na opisani način, relacija je za netopad

$$H_n = H_b + \frac{c_0^2}{2g} + \frac{c_A^2}{2g} - \frac{c_B^2}{2g} - h_{Rc} \quad [m] \quad [9.47]$$

Tu su:

- c_0 – brzina vode na ulazu u cjevovod,
- c_A – brzina vode na ulazu u turbinu,
- c_B – brzina vode na izlazu iz difuzora turbine,
- h_{Rc} – visina gubitaka u cjevovodu.

Kako je već naglašeno, gubici u cjevovodu su mjera za gubitke energije, odnosno snage u cjevovodu ($w_{Rc} = gh_{Rc}$). Obično je dopustivo zanemariti visinu brzine c_0 , pa se dobiva:

$$H_n = H_b + \frac{c_A^2}{2g} - \frac{c_B^2}{2g} - h_{Rc} \quad [m] \quad [9.48]$$

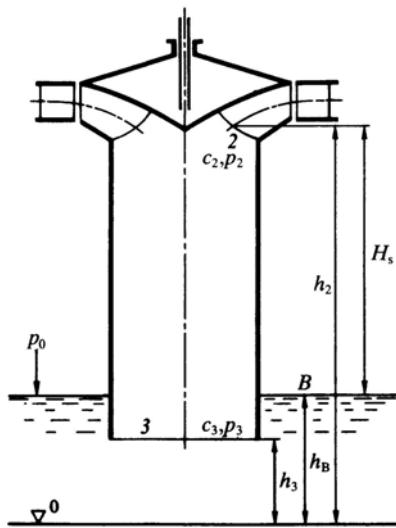
Iskoristiva se snaga i sada određuje prema izrazu [9.44], odnosno [9.45].

9.10 Smanjenje izlaznih gubitaka pretlačnih turbina

Kad voda u slobodnom mlazu izlazi iz turbine, pojavljuju se gubici zbog neiskorištenе kinetičke energije koju ona ima na izlazu iz turbine i zbog neiskorištenе potencijalne energije vode koja je proporcionalna razlici razine vode na izlazu iz turbine i razine donje vode.

9.10.1 Aspirator

Promotrit će se najprije prilike na izlazu iz rotora turbine ako voda istječe u slobodnom mlazu, dakle kad ne bi postojala cilindrična (valjkasta) cijevi (aspirator), [slika 9-51](#).



[Slika 9-53](#) Turbina s aspiratorom

Prepostavlja se da se izlazni presjek turbine nalazi $H_s = h_2 - h_B$ iznad razine donje vode. Ako se usporedi prema nekoj nultoj razine, snaga će vode u presjeku 2 biti (s p_0 označen je tlak okolice):

$$P_2 = \frac{p_0}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + g \cdot h_2 \quad [9.49]$$

a na razine donje vode :

$$P_B = \frac{p_0}{\rho} + g \cdot h_B \quad [9.50]$$

U oba slučaja za tlak je uvedena oznaka p_0 jer u oba presjeka djeluje tlak okolice, a brzina je u odvodnom kanalu zanemarena, kao znatno manja od c_2 . Razlika između P_2 i P_B jesu gubici energije, koji iznose:

$$\delta P = P_2 - P_B = \frac{c_2^2}{2} + g(h_2 - h_B) = \frac{c_2^2}{2} + gH_s \quad [9.51]$$

Prema tome, kad voda u slobodnom mlazu izlazi iz turbine, pojavljuju se gubici zbog neiskorištene kinetičke energije koju ona ima na izlazu iz turbine i zbog neiskorištene potencijalne energije vode proporcionalne razini vode na izlazu iz turbine i razine donje vode. Kad bi bilo moguće izlaz turbine smjestiti neposredno na razinu donje vode, nestao bi drugi član na desnoj strani relacije [9.51], pa bi gubici nastajali samo zbog neiskorištene kinetičke energije. Pokazuje se, međutim, postavi li se na izlaz iz turbine cilindrična cijev, [slika 9-53](#), koja se naziva aspiratorom, prilike se mijenjaju. Da bi se to utvrdilo, promotrit će se presjek 3 na izlazu iz aspiratora i presjek B na razini donje vode. Energija koju ima voda na izlaznom presjeku aspiratora, uz pretpostavku da je $c_3 = c_2$ (cijev konstantnog presjeka), iznosi:

$$P_3 = \frac{p_3}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + g \cdot h_3 \quad [9.52]$$

Za presjek B vrijedi relacija [9.51], pa je gubitak energije:

$$\delta P = P_3 - P_B = \frac{p_3}{\rho} - \frac{p_0}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} - g(h_B - h_3) \quad [9.53]$$

Za vrijeme strujanja kroz aspirator potencijalna se energija vode transformirala u energiju tlaka.

Osim toga, mogu se, uz pretpostavku da je brzina u odvodnom kanalu zanemarivo mala, postaviti Bernoullieve jednažbe za presjek neposredno na izlazu iz aspiratora, kad je već brzina strujanja zanemarivo malena, i za presjek na razini donje vode. Tad je:

$$\frac{p_3}{\rho} + gh_3 = \frac{p_0}{\rho} + gh_B \quad [9.54]$$

Iskoristimo li jednadžbu [9.54] u [9.53] dobit ćemo da su gubici jednaki

$$\delta P = \frac{c_2^2}{2} \quad [9.55]$$

Prema tome, postavi li se aspirator, gubici se na izlazu smanjuju na iznos koji odgovara smještaju izlaza turbine na razini donje vode. Međutim, da bi se spriječila pojava kavitacije, visina aspiratora ne smije biti veća od $8m$. Naime, padne li tlak na bilo kojem mjestu za vrijeme strujanja kapljevinе do tlaka isparivanja, kaplevina će na tom mjestu ispariti stvarajući mjehuriće i tako će biti spriječiti dalji pad tlaka. U početku će nastati mali mjehurići pare, koji će se postupno pretvarati u veće. (Ta pojava može čak prekinuti strujanje.) Kad tako stvoreni mjehurići pare strujanjem dođu u područje višeg tlaka, nastaje nagla kondenzacija, pa se oni brzo ispunjavaju kaplevinom. Ta se pojava naziva **kavitacija**, a praćena je više ili manje jakim šumom i naglim porastom tlaka, i do 100 MPa. Pri duljem pogonu postrojenja kavitacija može uzrokovati znatna oštećenja, pa se zbog toga lokalna smanjenja tlaka, koja izazivaju pojavu kavitacije, moraju bezuvjetno spriječiti. U slučaju aspiratora, tlak p_2 na izlazu iz rotora turbine, koji je jednak $p_o - g\rho H_s$, mora biti veći od tlaka

isparivanja vode (koji ovisi o temperaturi vode) jer će se inače pojaviti kavitacija. Drugim riječima, mora biti zadovoljena nejednadžba

$$p_s \leq p_o - \rho g H_s \quad [9.56]$$

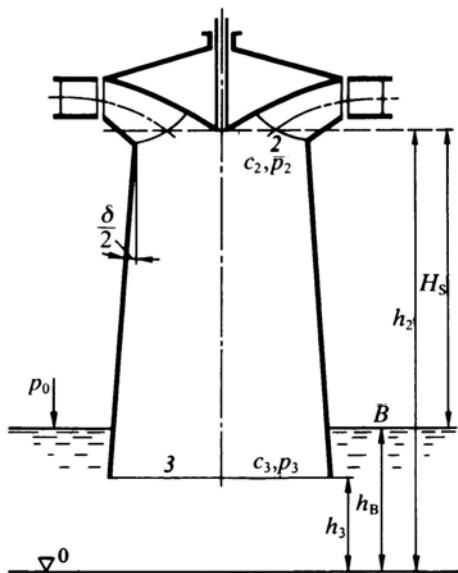
odnosno nejednadžba

$$H_s \leq \frac{p_o}{\rho g} - \frac{p_s}{\rho g} \quad [9.57]$$

To znači da se mora izlazni presjek turbine iznad razine donje vode smjestiti tako da bude zadovoljena nejednadžba [9.57]. Uzme li se da je tlak okoline približno 1 bar, gustoća vode 1000 kg/m^3 , a $g=9,81 \text{ m/s}^2$, dobiva se dovoljno točno da je $p_o/\rho g = 10 \text{ m}$. Normalno se uzima da drugi član u [9.57] mora zbog sigurnosti iznositi 2 m, pa je $H_s \leq 8 \text{ m}$.

9.10.2 Difuzor

Kako bi se smanjili gubici kinetičke energije, koji su posljedica činjenice da voda iz vodne turbine izlazi brzinom znatno većom od nule, umjesto aspiratora upotrebljava se difuzor, cijev koja se proširuje, pa na izlazu iz njega voda ima manju brzinu c_3 nego na izlazu iz turbine c_2 ,



Slika 9-54 Turbina s difuzorom

Ako se uračunaju i gubici snage u difuzoru $g \cdot h_{Rd}$, snaga vode na njegovu kraju (u presjeku 3) iznosi:

$$P_3 = \frac{p_3}{\rho} + \frac{c_3^2}{2} + g \cdot h_3 + g \cdot h_{Rd} \quad [W] \quad [9.58]$$

a snaga vode na razini donje vode određena je relacijom:

$$P_B = \frac{p_0}{\rho} + g \cdot h_B \quad [9.50]$$

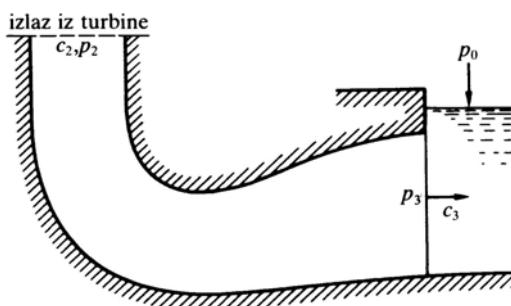
Uzevši u obzir relaciju

$$\frac{p_3}{\rho} + gh_3 = \frac{p_0}{\rho} + gh_B \quad [9.54]$$

gubici su na izlazu:

$$\delta P = \frac{c_3^2}{2} + g \cdot h_{Rd} [W] \quad [9.59]$$

Prema tome, znatno smanjivši brzinu na izlazu iz turbine daju se gotovo potpuno eliminirati gubici kinetičke energije ($c_3^2/2$), ali je za to potrebno veliko proširenje difuzora. Ono se može ostvariti ili povećavanjem duljine difuzora ili uz veliki kut proširenja. U prvom slučaju valja turbinu smjestiti visoko iznad donje vode, što se ne može zbog pojave kavitacije. Osim toga, s duljinom difuzora povećavaju se gubici energije $g \cdot h_{Rd}$. S druge strane pak, veliki kut proširenja izaziva odvajanje strujanja, što stvara dodatne gubitke. Zbog toga se izvodi difuzor u obliku zavoja, [slika 9-55](#).



[Slika 9-55](#) Difuzor u obliku zavoja

Sve relacije za konični difuzor, [slika 9-54](#), vrijede i za difuzor u obliku zavoja, [slika 9-55](#), uz napomenu da pri određivanju gubitaka u difuzoru, $g \cdot h_{Rd}$, valja uračunati i gubitke zbog promjene smjera strujanja vode. Nadalje, budući da je u difuzoru $c_2 > c_3$, pri njegovoj upotrebi valja izlaz iz turbine smjestiti niže nego za aspirator.

9.11 Strujanja i preljevi vode

Strujanja i preljeve vode promatramo kao jednodimenzionalno, stacionarno strujanje idealne kapljive, [3.1.2.2.1](#), primjenjujući pritom jednadžbu kontinuiteta i 1. glavni stavak termodinamike za otvorene sustave (princip očuvanja energije – Bernoullievu jednadžbu). Činjenicu da se u procesima u hidroelektranama voda ponaša kao realni fluid uzimamo u

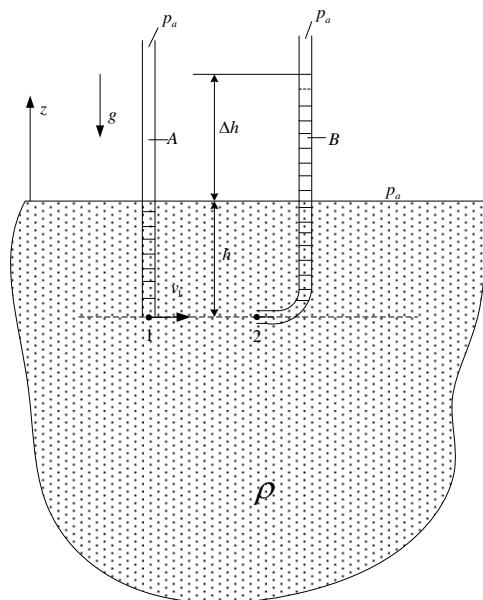
obzir (kompenziramo), kad je to moguće, različitim, ovisno o potrebama, (empirijski određenim) faktorima.

9.11.1 Brzina strujanja

Bernoullievom jednadžbom analiziramo strujanje idealne kapljevine (duž jedne strujnice) u svim slučajevima kad, sa zadovoljavajućom točnošću, možemo objasniti i ponašanje realnih pojava i realnih djelovanja uređaja. Primjerice, zadovoljavajući se rezultati primjene Bernoullieve jednadžbe dobivaju prigodom određivanja parametara (brzine i protoka) strujanja u riječnim tokovima i cijevima odaberemo li kao karakterističnu strujnicu onu koja prolazi simetralom cjevovoda i duž koje se, zbog kratkih udaljenosti, može zanemariti utjecaj viskoznosti.

9.11.1.1 Određivanje brzine strujanja vode u otvorenim tokovima

Slika 9-56 objašnjava princip određivanje brzine strujanja vode u rijeci. U otvoreni tok u kojem su strujnice vodoravne i pravocrtnе uronjene su dvije cjevčice: ravna, cjevčica A (piezometrička cijev), i zakriviljena, cjevčica B (Pitotova cijev), u obliku slova J, koja je otvorom okrenuta strujanju. S obzirom da su strujnice horizontalne i ravne, raspodjela tlaka u okomitom smjeru na smjer strujnice je ista kao u fluida u mirovanju, te će tlak u točki 1 biti $p_1 = p_a + \rho gh$, a razina fluida u cjevčici A bit će u razini slobodne površine, mjereći tako statički tlak u točki 1. Nasuprot tome, na ulazu u cjevčicu B, u točki 2, brzina mora biti jednaka nuli, jer fluid u cjevčici B miruje, što znači da je točka 2 točka zastoja.



Slika 9-56 Mjerenje brzine vode u otvorenom toku

Bernoullieva jednadžba postavljena duž vodoravne strujnice od točke 1 do točke 2 glasi

$p_1 + \frac{1}{2} \rho c_1^2 = p_2$	[9.60]
--------------------------------------	--------

iz koje je očito da je tlak u točki 2 veći od tlaka u točki 1 za vrijednost kinetičke energije čestice fluida izražene po jedinici volumena, što se naziva dinamičkim tlakom $\left[\frac{N}{m^2} \equiv \frac{N \cdot m}{m^2 \cdot m} \equiv \frac{J}{m^3} \right]$. U općenito napisanoj Bernoullievoj jednadžbi pojedinim se članovima dakle mogu pridijeliti ova značenja:

$$\underbrace{p}_{\text{statički tlak}} + \underbrace{\frac{1}{2} \rho c^2}_{\text{dinamički tlak}} + \underbrace{\rho g z}_{\text{hidrostatski tlak}} = \text{konst. duž strujnice}$$

[9.61]

$\underbrace{\qquad\qquad\qquad}_{\text{zaustavni tlak}} \qquad\qquad \underbrace{\qquad\qquad\qquad}_{\text{ukupni tlak}}$

Bernoullieva bi se jednadžba [9.60] mogla dakle promatrati i u svjetlu činjenice da ukupni tlak duž strujnice ostaje konstantan. Izrazimo li, prema [slici 9-56](#), tlak p_2 ovako

$$p_2 = p_o + \rho g (h + \Delta h) \quad [9.62]$$

uvrštenjem [9.62] u [9.60] dobivamo

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 = \rho g \Delta h \quad [9.63]$$

budući da je tlak p_1 jednak $p_o + \rho g h$, odnosno

$$c_1 = \sqrt{2g \Delta h} \quad [9.64]$$

Prema tome $\rho g \Delta h$ mjeri dinamički tlak, a visina Δh pokazuje visinu brzine c . Očito, mjerimo li brzine u otvorenom toku, dostatno je uroniti samo Pitotovu cijev (cjevčicu B), piezometrička cijev (cjevčica A) nije potrebna. Mjerimo li, međutim, brzinu u zatvorenim cjevovodima, mjerjenje je statičkog tlaka nužno.

9.11.1.2 Određivanje brzine strujanja vode u cjevima

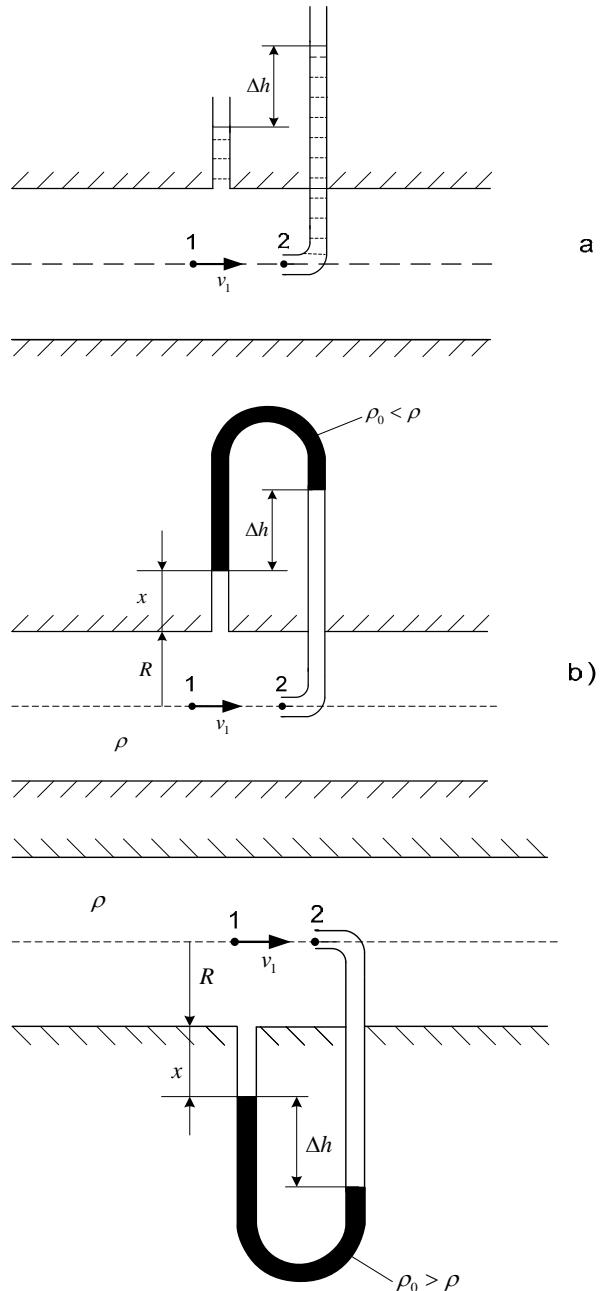
[Slika 9-57a](#)) ilustrira mjerjenje brzine s odvojenim mjerjenjima statičkog i dinamičkog tlaka. Takvo se mjerjenje može obaviti nije li dinamički tlak u cijevi suviše velik, odnosno, kad se može izmjeriti stupcem tekućine. S obzirom da je za određivanje brzine potrebno znati samo razliku tlakova (a ne i njihove absolutne vrijednosti), bolji je način mjerjenja njihove razlike pomoću diferencijalnog manometra ispunjenog fluidom gustoće ρ_0 . Razlikujemo pritom dvije mogućnosti: [slika 9-57b](#)) - gustoća je ρ_0 manja od gustoće vode ρ , ili, [slika 9-57c](#)), gustoća je ρ_0 veća od gustoće vode ρ .

Jednadžba manometra od točke 2 do točke 1, prema [slici 9-57b](#)), glasi

$$p_2 - \rho g (R + x + \Delta h) + \rho_0 g \Delta h + \rho g (R + x) = p_1 \quad [9.65]$$

što uvršteno u Bernoullievu jednadžbu, [9.60], daje izraz za brzinu c :

$c_1 = \sqrt{2g\Delta h \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)}$	[9.66]
--	--------



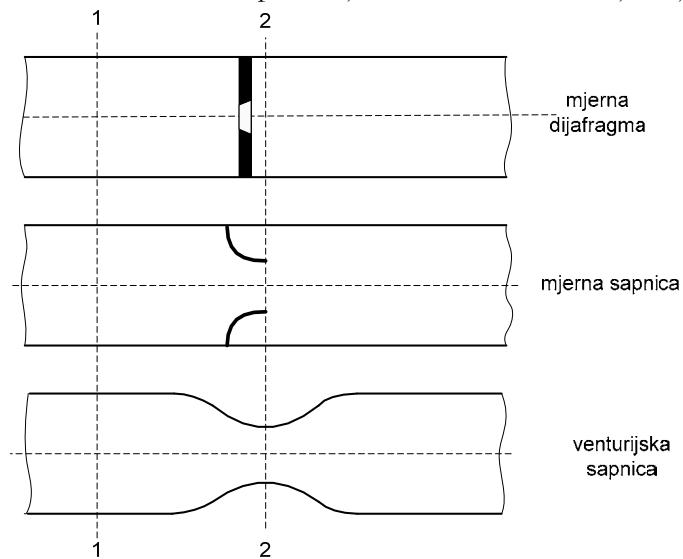
Slika 9-57 Mjerenje brzine u cijevima

Slično, ukoliko je $\rho_0 > \rho$, prema [slici 9-57c](#) i jednadžbi [9.60] dobivamo izraz

$c_1 = \sqrt{2g\Delta h \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)}$	[9.67]
--	--------

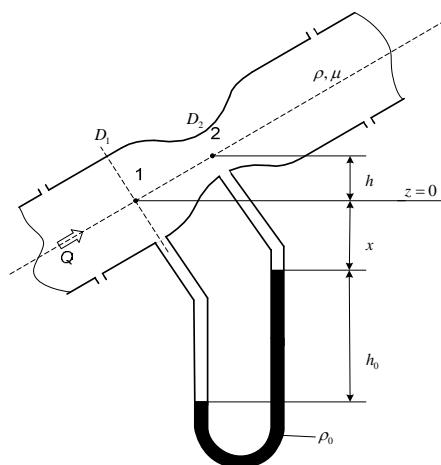
9.11.3. Mjerenje protoka pomoću venturijske sapnice

Slika 9-58 shematski prikazuje tri instrumenta za mjerjenje veličine protoka kroz cijev.



Slika 9-58 Instrumenti za mjerjenje protoka

Kod svih je instrumenata princip rada isti. Sužavanjem presjeka strujanja dolazi do pada tlaka koji je razmjeran protoku Q . U svim instrumentima se zbog toga mjerjenjem razlike tlakova u dva presjeka (na slici 9-58 su to presjeci 1 i 2) može odrediti protok. Primjena mjerne dijafragme zahtijeva najmanje prostora za ugradnju, ali su pri strujanju kroz dijafragmu gubitci eksergije najveći. S druge strane, primjenom venturijske sapnice (venturijskom sapnicom naziva se cijev kojoj se smanjuje promjer), gubi se najmanje eksergije, ali je zato potrebna dulja dionica cijevi za ugradnju takvog instrumenta.



Slika 9-59 Primjer strujanja kroz venturijsku sapnicu

Slika 9-59 shematski prikazuje venturijsku sapnicu ugrađenu u koso postavljeni cjevovod. Diferencijalni manometar mjeri razliku tlakova u presjecima 1 (promjera D_1) i 2 (promjera D_2). U užem je presjeku brzina strujanja veća pa je u njemu tlak niži, te manometar pokazuje otklon kao na slici. Jednadžba kontinuiteta za strujanje kroz venturijsku sapnicu glasi

$$Q = c_1 \frac{D_1^2 \pi}{4} = c_2 \frac{D_2^2 \pi}{4} \quad [9.68]$$

a Bernoullieva je jednadžba od točke 1 do točke 2

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{c_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{c_2^2}{2g} + h \quad [9.69]$$

Jednadžba je pak manometra oblika

$$p_1 + \rho g(x + h_0) - \rho_0 g h_0 - \rho g(x + h) = p_2 \quad [9.70]$$

Kombinirajući relacije [9.68], [9.69] i [9.70] dobivamo relaciju kojom je određen protok Q_{id} :

$$Q_{id} = \frac{D_2^2 \pi}{4} \sqrt{\frac{2gh_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)}{1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4}} \quad [9.71]$$

(Indeks „id“ upozorava da se radi o veličini protoka idealnog fluida.)

Očito, visinska razlika h između presjeka 1 i 2 ne utječe na protok Q_{id} ; mjeranjem je visine h_0 , koju pokazuje diferencijalni manometar, moguće odrediti protok. Stvarni protok treba korigirati „koeficijentom brzine φ “ kojim se uzima u obzir viskoznost fluida i „koeficijentom kontrakcije mlaza Ψ “ kojim se uzima u obzir suženje mlaza u najužem presjeku sapnice. Stvarni je protok Q dakle određen izrazom:

$$Q = \varphi \cdot \Psi \cdot \frac{D_2^2 \pi}{4} \sqrt{\frac{2gh_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)}{1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4}} = \varphi \cdot \Psi \cdot Q_{id} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad [9.72]$$

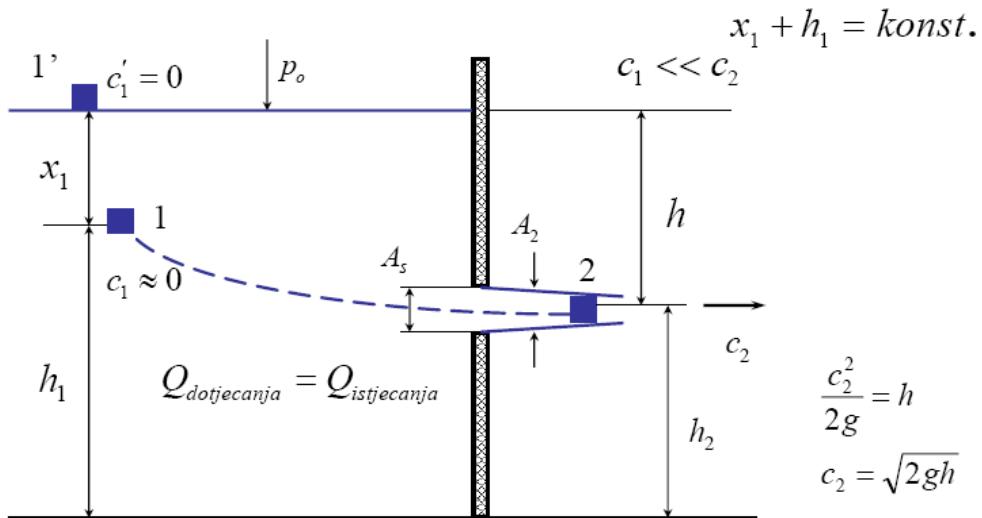
Radi li se o pomno izrađenoj venturijskoj sapnici, koeficijent je kontrakcije jednak jedan, a koeficijent brzine φ ovisi o brzini strujanja kapljevine (o tzv. Reynoldsovom broju: $Re = \rho c_1 D_1 / \mu$). Za „uobičajene“ izvedbe sapnice i „uobičajene“ brzine strujanja, kada je Reynoldsov broj veći od $2 \cdot 10^5$, koeficijent je brzine konstantan i iznosi približno 0,984. Određuje se na osnovi pokusa.

Izračunamo li ploštine presjeka u 1 i 2, A_1 i A_2 , jednadžba kojom se određuje protok pomoću venturijske sapnice poprima poznatiji oblik:

$$Q = \varphi \cdot \Psi \cdot \sqrt{\frac{2gh_0}{\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}}} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad [9.72a]$$

9.11.4. Istjecanje kroz mali otvor

Za istjecanje kroz mali otvor, slika 9-60, također vrijedi Bernoullieva jednadžba.



Slika 9-60 Primjer istjecanja iz velikog spremnika kroz mali otvor

Promotrit ćemo najprije strujanje vode od točke 1 u spremniku, u kojem se održava konstantna razina tekućine dotjecanjem upravo onolike količine koliko istječe kroz sapnicu (mali otvor) na stijenci spremnika do točke 2 u mlazu istjecanja.

Za tu strujnicu Bernoullijeva jednadžba glasi

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}c_1^2 + gh_1 = \frac{p_o}{\rho} + \frac{1}{2}c_2^2 + gh_2 \quad [9.73]$$

jer na mlaz (vodu koja je istekla iz spremnika) djeluje tlak okoline p_o . Analogna jednadžba može se postaviti za strujanje od 1' do 1, pa je

$$\frac{p_o}{\rho} + \frac{1}{2}c_{1'}^2 + g(h_1 + x_1) = \frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}c_1^2 + gh_2 \quad [9.74]$$

Brzina je $c_{1'} = 0$ jer se razina vode održava konstantnom, a brzina je c_1 približno jednak nuli zbog relativno velikog spremnika u usporedbi s otvorom sapnice. Prema tome, energija bi tlaka u točki 1 bila

$$\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_o}{\rho} + gx_1$$

[9.75]

što odgovara prilikama kad tekućina miruje ($c_1 = 0$).

Uvrsti li se izraz [9.75] u [9.74], te uzme u obzir da je $c_1 = 0$, dobiva se

$$\frac{1}{2}c_2^2 = g(h_1 + x_1 - h_2) = gh$$

[9.76]

Na desnoj strani jednadžbe h je razlika između razine tekućine u spremniku i simetrale otvora na njegovoj stijenci. Iz relacije [9.76] određuje se brzina istjecanja; dibivamo već poznati nam odnos:

$$c_2 = \sqrt{2gh} \left[\frac{m}{s} \right]$$

[9.77]

Ako je ploština presjeka mlaza A_2 , protok Q' koji istječe bit će

$$Q' = A_2 c_2 = A_2 \sqrt{2gh} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

[9.78]

Budući da nastaje kontrakcija mlaza (kao posljedica principa očuvanja mase), ploština presjeka mlaza A_2 manja je od ploštine presjeka sapnice A_s , što je definirano koeficijentom kontrakcije

$$\Psi = \frac{A_2}{A_s}$$

[9.79]

Osim toga, da bi se unijelo i trenje (viskoznost) vode, zbog kojeg je brzina istjecanja nešto manja od određene izrazom [9.77], uvodi se koeficijent brzine φ , pa se stvarni (realni) protok određuje iz relacije

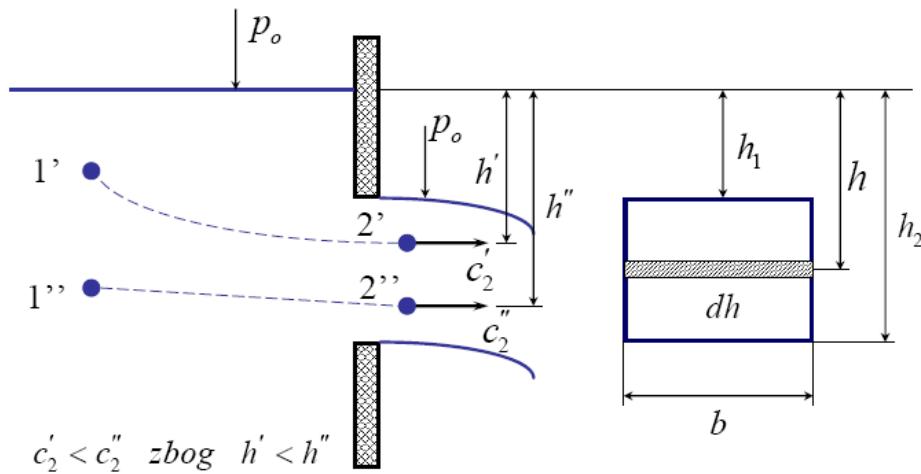
$$Q = \Psi \varphi A_s \sqrt{2gh} \left[\frac{m^3}{s} \right] = \mu A_s \sqrt{2gh} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

[9.80]

gdje je $\mu = \psi\varphi$ „koeficijent istjecanja“. Taj se koeficijent određuje eksperimentalno, a ovisi o svojstvima tekućine, o obliku otvora, o položaju otvora s obzirom na dno spremnika (posude) itd. Koeficijent brzine za vodu iznosi približno 0,97, a koeficijentu kontrakcije vrijednosti su od 0,60 do 0,65; vrijednost mu je manja uz veću površinu otvora i kad je otvor više udaljen od površine vode (jer je tada brzina istjecanja veća).

9.11.5. Istjecanje kroz velike otvore

Radi li se o velikim otvorima u stijenci spremnika (ili brane), valja uočiti da će pojedine strujnice biti različito udaljene od razine površine vode, pa će se zato i bitno razlikovati brzine strujanja u pojedinim visinama presjeka mlaza, [Slika 9-61](#). Te su se razlike u brzinama pri istjecanju kroz male otvore mogle zanemariti.



Slika 9-61 Primjer istjecanja kroz veliki otvor

Ako se napišu Bernoullieve jednadžbe npr. za strujnice 1'-2' i 1"-2", pa se uzme u obzir da je $c_1' = 0$ i $c_1'' = 0$, kako je pretpostavljeno kad se razmatralo istjecanje kroz mali otvor, te budući da u presjeku mlaza u točkama 2' i 2" vlada tlak okoline p_o , brzine su u točkama 2' i 2"

$$c_2' = \sqrt{2gh'} \left[\frac{m}{s} \right]; c_2'' = \sqrt{2gh''} \left[\frac{m}{s} \right] \quad [9.81]$$

s tim da je $c_2'' > c_2'$ jer je $h'' > h'$.

Uračunavši koeficijent istjecanja μ , a promatrajući diferencijalnu površinu presjeka širine b i visine dh , koja je na okomitoj udaljenosti h od razine površine vode u spremniku (akumulacijskom jezeru), diferencijalni je protok kroz diferencijalnu površinu određen jednadžbom

$$dQ = \mu \cdot c \cdot dA = \mu \cdot \sqrt{2gh} \cdot b \cdot dh \cdot \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad [9.82]$$

koja odgovara relaciji [9.80]. Ukupni se protok kroz otvor dobiva integrirajući relaciju [9.82] u granicama h_1 i h_2 , pa je

$$Q = \mu b \sqrt{2g} \int_{h_1}^{h_2} \sqrt{h} dh \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} \left(\sqrt{h_2^3} - \sqrt{h_1^3} \right) \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad [9.83]$$

Ne smijemo li zanemariti brzinu dotoka tekućine u spremniku (akumulacijskom jezeru), ili ako se radi o kanalu, tada, u dovoljnoj udaljenosti od stijenke u kojoj se nalazi otvor, možemo pretpostaviti da će se voda po cijelom presjeku gibati istom brzinom c_o , paralelno dnu (spremnika, jezera, kanala). Za koju god strujnicu, npr. od 1' do 2', slika 9-61, vrijedi

$$\frac{p_{1'}}{\rho} + \frac{1}{2} c_0^2 + h_{12'} = \frac{p_o}{\rho} + \frac{1}{2} c_o^2 \quad [9.84]$$

gdje je s $h_{12''}$ označena razlika razina između 1' i 2'.

Budući da je strujanje jednoliko, zakon se hidrostatskog tlaka ne će mijenjati (jer je težina elementa fluida uravnotežena samo prirastom tlaka), pa je

$$\frac{p_1'}{\rho} = \frac{p_o}{\rho} + h_1' \quad [9.85]$$

(S h_1' označena je visina stupca tekućine iznad 1').

Uzevši u obzir da je da je $h_1' + h_{12''} = h'$ (slika 9-61) slijedi

$$\frac{c_0^2}{2} + h' = \frac{c_2^2}{2} \Rightarrow c_2' = \sqrt{2gh' + c_0^2} \quad [9.86]$$

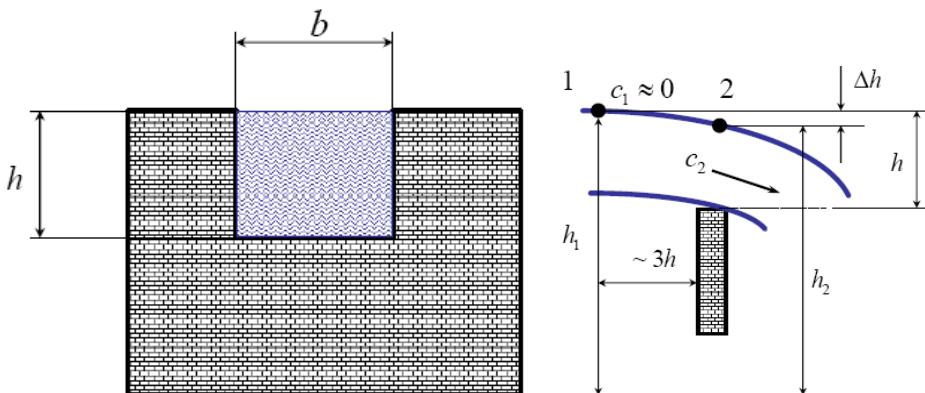
Količina vode koja istječe bila bi sada za promatrani otvor

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} \left(\sqrt{\left(h_2 + \frac{c_0^2}{2} \right)^3} - \sqrt{\left(h_1 + \frac{c_0^2}{2} \right)^3} \right) \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad [9.87]$$

9.11.6. Istjecanje preko preljeva

Analogno se razmatranje provodi i za istjecanje preko preljeva, slika 9-62. Tada se može postaviti daje $h_1 = 0$ i $h_2 = h$, pa izraz [9.83] prelazi u

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} \int_0^h \sqrt{h} dh \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{2}{3} \mu b h \sqrt{2gh^3} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad [9.88]$$



Slika 9-62 Primjer istjecanja preko preljeva

Mjerodavna se visina h određuje se na dovoljno velikoj udaljenosti od preljeva (oko $3h$) jer se razina vode u blizini otvora spušta za iznos koji odgovara povećanju brzine u profilu preljeva. To se sniženje razine također izračunava pomoću Bernoullieve jednadžbe, koja za točke 1 i 2 glasi

$$\frac{p_0}{\rho} + gh_1 = \frac{p_0}{\rho} + \frac{1}{2} c_1^2 + gh_2$$

[9.89]

Prepostavljen je naime da je $c_1 = 0$. Sniženje je razine vode stoga

$$h_1 - h_2 = h = \frac{c_1^2}{2g} [m]$$

[9.90]

Koefficijent istjecanja μ ustanovljuje se pokusom. U priručnicima su različite formule za njegovo određivanje (to vrijedi i za istjecanje kroz velike otvore). Pri upotrebi tih formula valja se pridržavati ograničenja unutar kojih one vrijede.

Ne možemo li zanemariti brzinu dotoka vode, prema rečenome u 9.11.5., količina vode što se preljeva iznosit će

$$Q = \frac{2}{3} \mu b h \sqrt{2g} \left(\sqrt{\left(h + \frac{c_0^2}{2} \right)^3} - \sqrt{\left(\frac{c_0^2}{2} \right)^3} \right) \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

[9.91]

9.11.7. Istjecanje pod vodom

Bernoullieva jednadžba za strujnicu od 1 do 2 glasi, uvezši kao razinu usporedbe donju razinu vode, [slika 9-63](#),

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} c_1^2 + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} c_2^2 - gh_2$$

[9.92]

Budući da element vode na izlazu struji pravocrtno, a ne u obliku parabole kao kod istjecanja u atmosferu, jer je njegova težina uravnovežena uzgonom, za tlak p_2 važi zakon hidrostatskog tlaka

$$\frac{p_2}{\rho} = \frac{p_o}{\rho} + h_2$$

[9.93]

Vrijedi li prepostavka da je $c_1 = 0$, te budući da je

$$\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_o}{\rho} + h_1$$

[9.94]

dobivamo

$$\frac{p_0}{\rho} + h_1 + h_1 = \frac{p_o}{\rho} + h_2 + \frac{c_2^2}{2} - h_2$$

[9.95]

Jer je $h_1' + h_1 = h$, vrijedi

$$c_2 = \sqrt{2gh} \left[\frac{m}{s} \right]$$

[9.96]

za svaku strujnicu.

[Slika 9-63](#) Primjer istjecanja pod vodom

Istjecanje je iz otvora na priključeni kanal, [slika 9-64](#), poseban slučaj promatranog istjecanja. Uz dovoljno dug kanal, i jednoliku brzinu u njemu, možemo pisati Bernoullievu jednadžbu s istim pretpostavkama. Dobit ćemo da je brzina konstantna po cijelom presjeku kanala, a njena je veličina određena relacijom [9.96].

[Slika 9-64](#) Primjer stjecanje je iz otvora na priključeni kanal

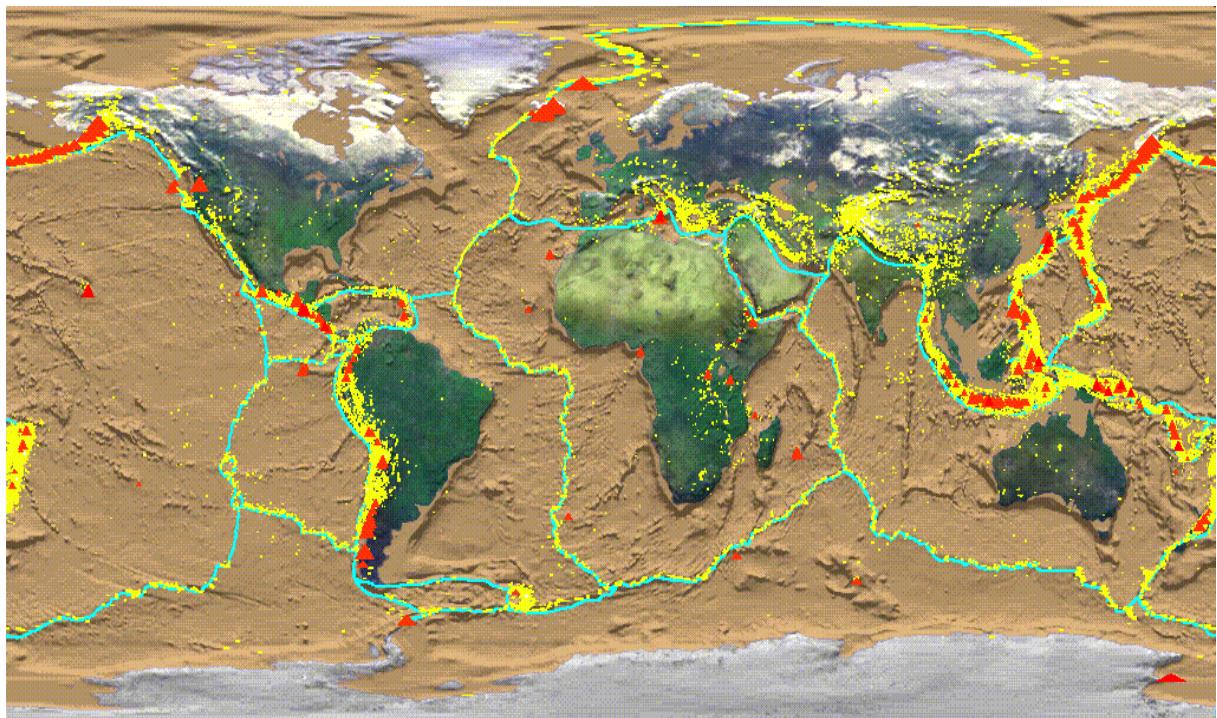
7. GEOTERMALNA ENERGIJA

Svrstavanje geotermalne energije u obnovljive izvore opravdano je u širem smislu. Energija unutrašnjosti Zemlje nije obnovljiva, ali je ima toliko da za praktične primjene njen eventualno iscrpljivanje nije važno. Povezanost geotermalne energije sa krutim, tekućim i plinovitim štetnim tvarima zahtjeva zatvoreni pristup korištenju da bi se osigurao relativno mali štetni utjecaj na okoliš.

Nastavak sadrži objašnjenje prirode i porijekla geotermalne energije. Slijedi procjena geotermalnih resursa. Nakon toga opisani su načini korištenja geotermalne energije: direktno zagrijavanje i proizvodnja električne energije. Poseban osvrt je dan na specifičnosti vezane za postrojenja u kojima se proizvodi električna energija. Navedena je i procjena resursa te stanje korištenja kako za svijet općenito tako za Hrvatsku specifično.

7.1 Porijeklo i priroda geotermalne energije

Gravitaciona energija i zaostala toplina od formiranja Zemlje te radioaktivni raspad rezultirali su enormnom unutrašnjom kaloričkom energijom Zemlje. Procijenjena temperatura unutrašnje jezgre od oko 4000°C , na dubini od 6370 km, postupno opada do samo nekoliko stupnjeva na površini zemlje (uz značajan doprinos Sunčeve energije). Zemljina kora debljine oko 30 km pliva na omotaču oko vanjske i unutrašnje jezgre. Ponašanje unutar jezgri je relevantno za magnetske polove Zemlje, a dinamika omotača utječe na vulkanske erupcije i velike potrese. Za korištenje geotermalne energije od važnosti je samo Zemljina kora i to posebno na mjestima gdje se dodiruju tzv. tektonske ploče. To je stoga što ne postoji tehnička mogućnost pristupa većim dubinama. Granice tektonskih ploča predstavljaju mjesta velikog rizika od aktivnih vulkana, potresa i dobar potencijal za korištenje geotermalne energije.

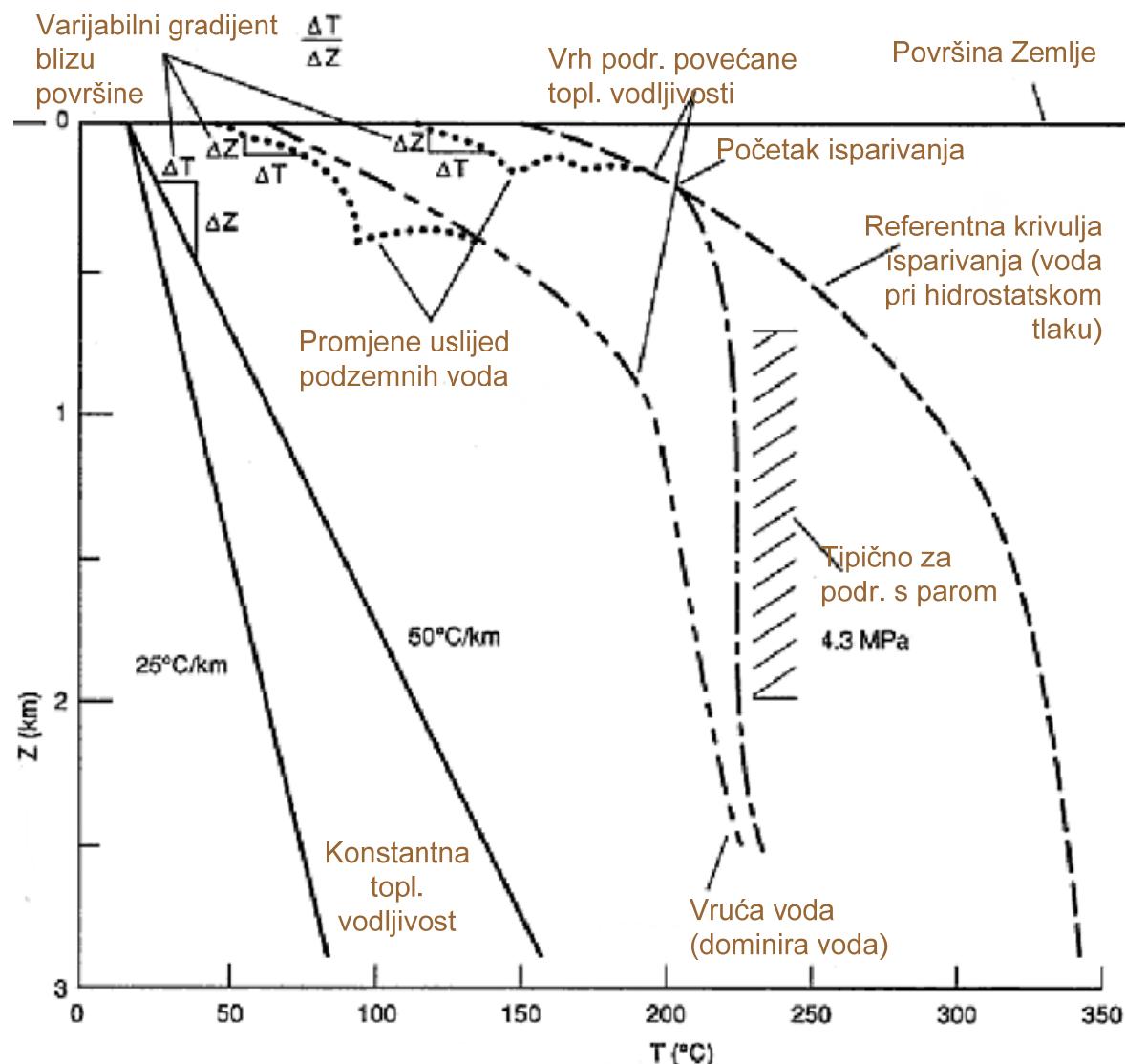


Slika 7.1. Tektonske ploče, aktivni vulkani i geotermalni izvori (UiB, *Institutt for geovitenskap*)

Potencijal nekog područja za korištenje geotermalne energije grubo se može ocijeniti preko temperaturnog gradijenta ispod površine zemlje. Prosječan porast temperature iznosi manje od 30 stupnjeva Celzijevih na 1 km. Područje sa posebno dobrom potencijalom za korištenje geotermalne energije ima porast temperature oko 100 °C na 1 km. Međutim, kod dobrih izvora gdje se geotermalna energija i koristi porast temperature može biti i viši. Temperaturni gradijent služi samo za pojednostavljeni prikaz jer je stvarno kretanje temperature ovisno o prirodi geotermalnog izvora i sastavu tla.

Potencijal za korištenje geotermalne energije ovisi o dubini na koju treba bušiti, sastavu tla i prisutnosti te stanju vode.

Kapacitetom unutrašnje kaloričke energije prednjače najteže iskoristive **suhe vruće stijene**. Dostupne temperature se kreću između 150 i 300 °C na dubinama od 2,5 do 6 km. Najveći problem korištenju predstavlja preuzimanje toplinske energije. Da bi se preuzeila toplina potrebno je dovesti medij (npr. vodu) i ostvariti kontakt sa vrućim stijenjem. Postoje razne ideje o stvaranju pukotina, ali sve je još uvijek u istraživanju.



Slika 7.1.a Porast srednje temperature u ovisnosti o dubini prema [23]

Na drugom mjestu po kapacitetu i potencijalu korištenja su geotermalni izvori na velikim dubinama sa **vodom pod velikim tlakom**. Na dubinama od 2,5 do 9 km dostupne su temperature od oko 160 °C sa tlakovima preko 100 MPa. Pored problema sa velikim tlakom smetnju predstavlja i velika slanost (4-10%). Potencijal za kombinirano korištenje predstavlja zasićenost prirodnim plinom - volumno pet puta više plina (najviše metana). Za iskorištavanje ovog potencijala još uvijek nedostaju tehnološka rješenja.

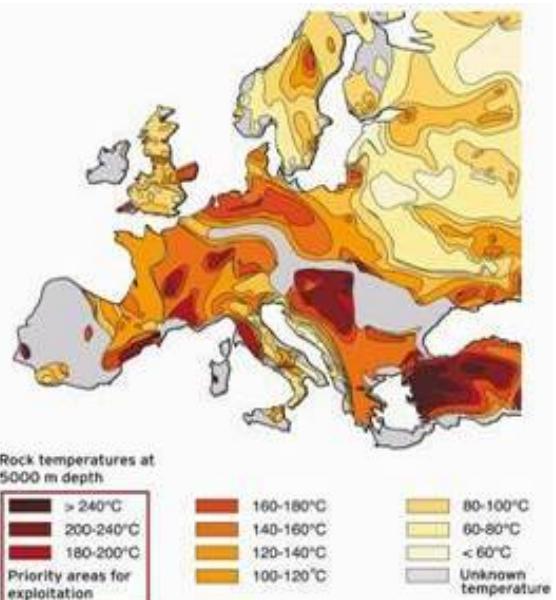
Trenutno se koriste samo izvori do dubina od 5 km sa **parom ili vodom na manjim tlakovima** (do 0,8 MPa). Temperature su u rasponu od 90 pa sve do preko 300 °C. Veće vrijednosti su rijede. Najpoželjniji su rijedi isključivo parni izvori (npr. Geysers SAD i Larderello Italija) gdje para izlazi na temperaturi od oko 200 °C. Brojniji su izvori vode gdje voda izlazi sama ili se mora pumpati. Korištenje izvora vode i pare na nižim tlakovima ne zahtjeva posebnu tehnologiju za bušenje. Ipak, postrojenja moraju raditi u uvjetima velikih koncentracija otopina (i preko 25000 ppm).

7.2 Geotermalni resursi

Korištenjem podataka dobivenih bušenjem, satelitskim snimanjem i modeliranjem moguće je procijeniti geotermalne resurse. Pri tome najvažniji su podatci o temperaturama, količini vode/pare te o sastavu tla na nekom području.

Geotermalne se resurse može klasificirati prema temperaturi: nisko temperturni (ispod 90 °C), visoko temperturni (preko 150 °C), a srednje temperturni između. Temperature određuju mogućnosti korištenja i načine primjene. Samo visoko temperturni izvori se smatraju ekonomičnim i praktičnim za proizvodnju električne energije.

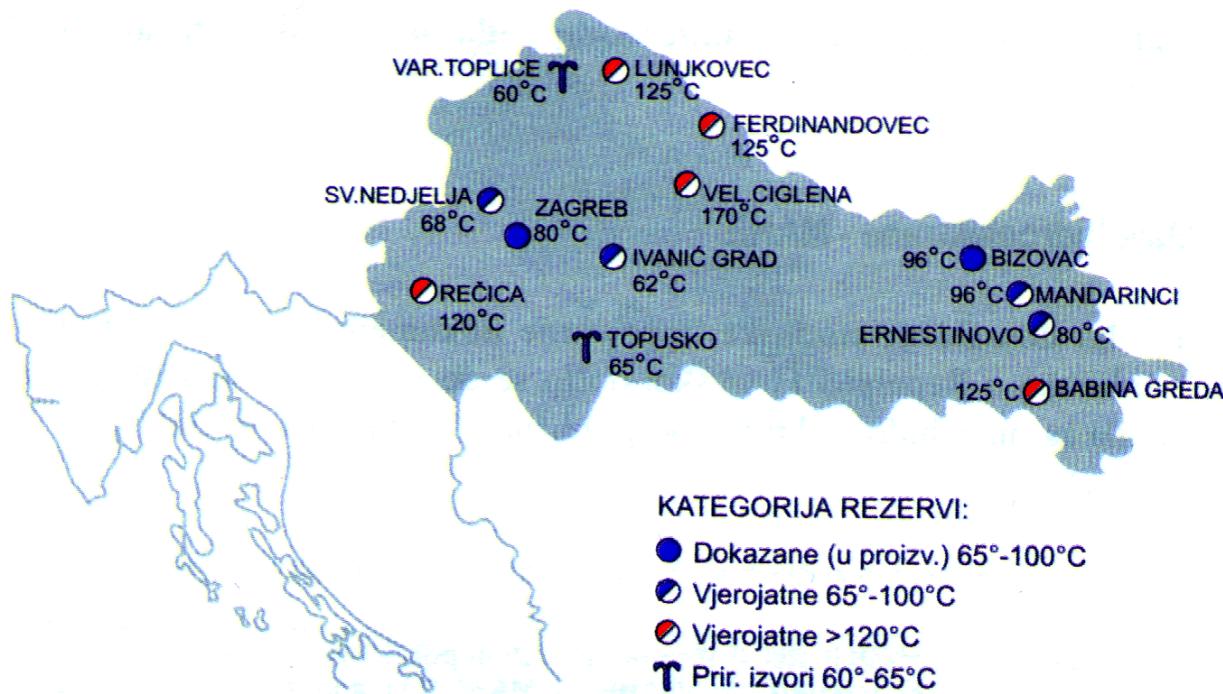
Procjena resursa se uobičajeno posebno iznosi za proizvodnju električne energije i za direktno korištenje toplinske energije. Dodatno se uzima u obzir sadašnje stanje tehnologije i predvidivo unapredivanje. Slike 7.3 i 7.3a koje slijede ilustriraju podloge za procjenu geotermalnih resursa u Europi i Hrvatskoj. Procjene su rezultat kombiniranja podataka dobivenih stvarnim bušnjima i modeliranjem uz prepostavke o sastavu tla.



Slika 7.2. EU geotermalni potencijal (za suhe vruće stijene na 5 km dubine)

Najkonzervativnija procjena svjetskih resursa geotermalne energije prema (Cataldi 1999 [10]) iznosi 5000 EJ, od toga se smatra 10% potencijalno iskoristivim za 100 godina. Uz prepostavku da je 75% ekonomski iskoristivo i da je 33% visoko temperturnih izvora dobije se potencijal od 670 EJ godišnje za direktnu primjenu i 1,2 EJ godišnje za proizvodnju električne energije (uz faktor opterećenja od 82% to je 46 GWe snage).

Puno optimističnija procjena prema (Stefansson 2002 [11]) polazi od iste procjene geotermalnih resursa, ali bez prepostavke o iscrpljivanju. Uz slične ostale prepostavke, bez umanjivanja od 25% za ekonomsku neiskoristivost, dobije se više od 125 puta veća procjena za proizvodnju električne energije i direktno korištenje.



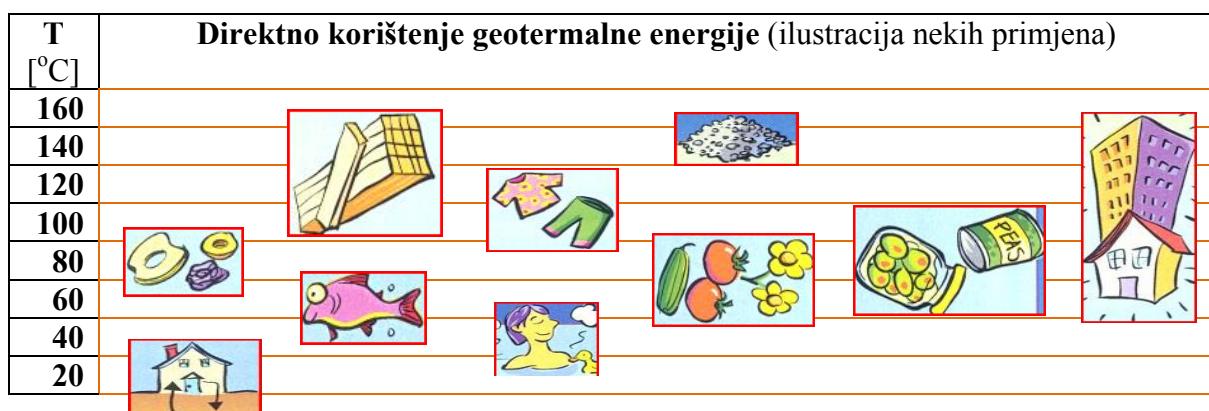
Slika 7.3. Geotermalni potencijal u Hrvatskoj

Za Republiku Hrvatsku najprije treba naglasiti da pola zemlje nema nikakav geotermalni potencijal dok pola predstavlja potencijal. Tako, dok južni dio zemlje ima ispodprosječni temperaturni gradijent (manje od 20°C/km) na sjeveru je temperaturni gradijent iznad prosjeka (oko 50°C/km sa varijacijama na posebnim lokacijama). Na temelju podataka iz stvarnih bušotina (oko 50 napravila INA) na dubinama od nekoliko km poznato je da potencijalni izvori imaju temperature vode od 40 do 170°C . Prema tome se procjenjuje da je ukupni potencijal za proizvodnju električne energije skoro 50 MWe i direktno korištenje preko 800 MWt. Uz prepostavku o faktoru opterećenja za proizvodnju el. en.od 80% to predstavlja potencijal za 0,35 TWh godišnje. Za direktno korištenje to je potencijal od oko 7 TJ godišnje.

7.3. Direktno korištenje geotermalne energije za grijanje

Najjednostavniji i najperspektivniji način iskorištavanja geotermalne energije predstavlja direktno korištenje toplinske energije za različite namjene u turizmu, poljoprivredi, industriji i komunalnom grijanju. Direktno korištenje može biti samostalno ili kombinirano. Kombinirati se može sa drugim (konvencionalnim) načinima proizvodnje toplinske energije ili sa proizvodnjom el. en. iz geotermalnog izvora. Tablica ispod ilustrira neke moguće direktnе primjene geotermalne energije. Dodatni primjeri za direktnu primjenu su npr.: prerada mesa (od 60 do 95 °C), proizvodnja sira (od 40 do 95 °C) i sušenje žitarica (od 50 do 150 °C).

Tablica 7.1 Direktne mogućnosti korištenja geotermalne energije prema temperaturi izvora



Svjetski kapaciteti za direktno korištenje geotermalne energije procjenjuju se na 15 GWt instalirane snage i 191 PJ korištene topline godišnje (2000.). EU je u 2006. direktno iskoristila skoro 90 PJ (uključujući toplinske pumpe) s 9 GWt instaliranih kapaciteta.

Direktna primjena je najveća za grijanje i odmah potom slijede kupališta, staklenici, ribogojstvo te industrija. Svaka zemlja ima svoje specifičnosti ovisno ne samo o geotermalnom potencijalu već i o brojnim drugim faktorima. Island je poseban primjer stoga što za ukupne potrebe primarne energije koristi oko 55% geotermalnu energiju (121 PJ, 2005.). Na prvom mjestu je grijanje (oko 60% ukupne korištene GE), a zanimljivo je korištenje za otapanje snijega i leda u naseljima.

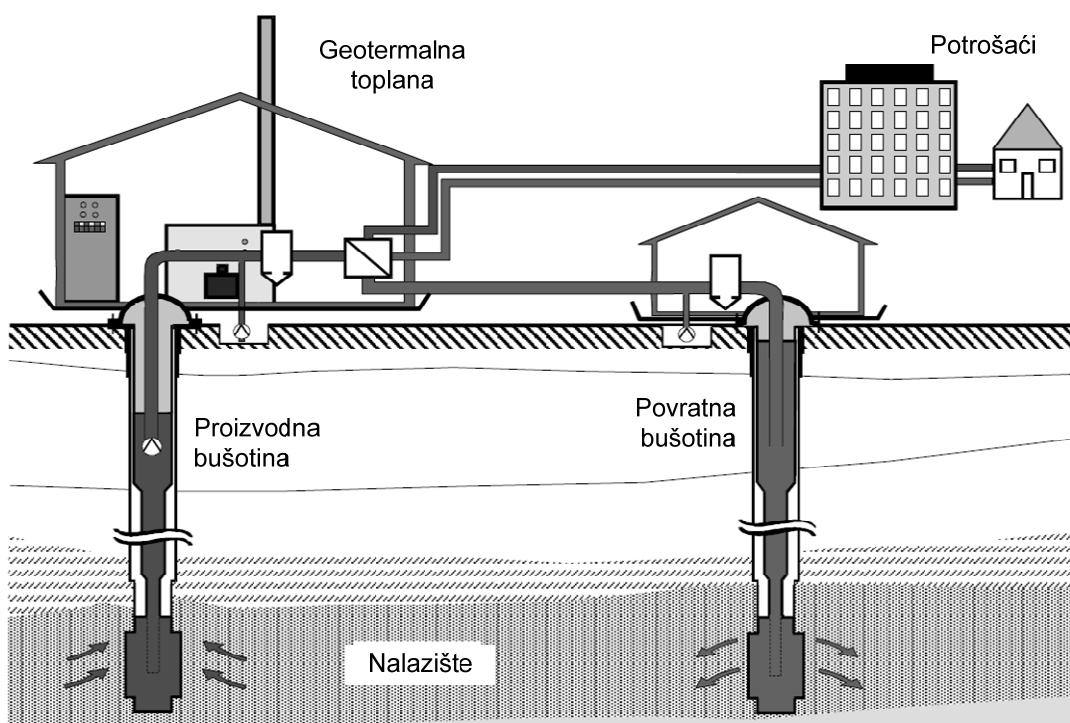
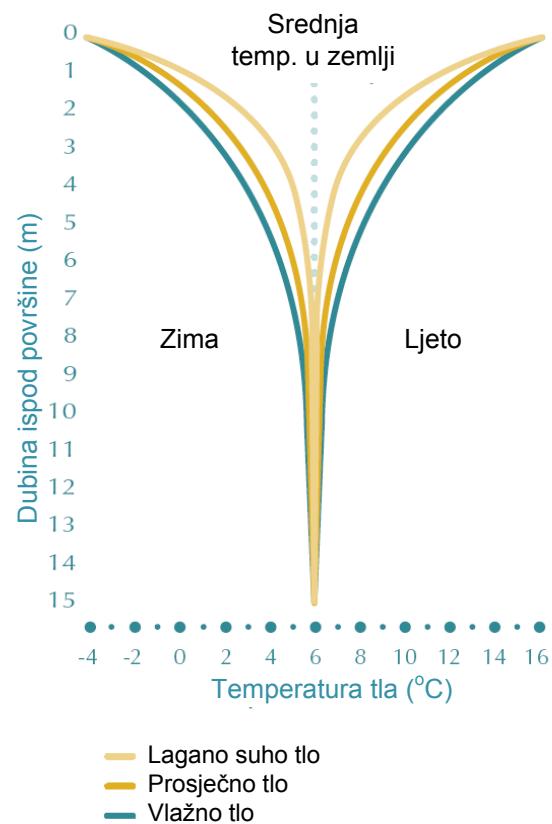
Hrvatska najviše direktno koristi geotermalnu energiju za toplice i lječilišta (oko 114 MWt instaliranih kapaciteta), a manji dio za zagrijavanje (oko 37 MWt). Potencijal je značajan za povećavanje korištenja za toplice i komunalno grijanje. Veliki je potencijal za Hrvatsku primjena u poljoprivredi (proizvodnja u staklenicima), uzgoju riba te industriji (posebno prehrambenoj). Potencijalno važno iskustvo u ovom smjeru će predstavljati izgradnja i korištenje lokacija Velika Ciglena i Lunjkovec-Kutnjak gdje se planira, uz zdravstvenu i turističku namjenu, direktno koristiti toplinu za sušare, proizvodnju povrća, uzgoj ukrasnog bilja, komunalno grijanje te jednim dijelom i proizvodnju električne energije.

Mogućnost „pumpanja“ topline iz okoline korištenjem lijevokretnog kružnog termodinamičkog procesa često se primjenjuje za grijanje (i hlađenje) u razvijenom svijetu. Tzv. toplinske pumpe često se spominju zajedno sa geotermalnim izvorom energije. Dok se vanjska prosječna mjesecna temperatura zraka, za naše kontinentalno područje, kreće u rasponu od -5 do +25 °C temperatura tla ostaje približno konstantna (ovisno o podneblju od 6 do 8 °C) tijekom cijele godine već na dubini od 8 do 10 m. Razlika prema zraku je

iskoristiva i na dubini od 2 m gdje je godišnji raspon od 3 do 10 °C za suho tlo i par stupnjeva šire za vlažno tlo. Takav odnos temperatura u tlu i potrebne unutrašnje temperature u kući ili zgradi predstavlja potencijal za isplativo i racionalno zagrijavanje (hlađenje) s koeficijentom djelovanja od 3 do 6 (omjer dobivene toplinske energije i uložene el. en.). Ukupna djelotvornost ovisi pokraj konstantne manje razlike temperature i o korištenoj tehnologiji a posebno o konkretnoj izvedbi (horizontalno, vertikalno, podzemne vode i drugo).

Korištenje toplinskih pumpi u razvijenom svijetu na daleko je većoj razini od situacije u Hrvatskoj. To se najprije odnosi na pojavu jeftinijih klima uređaja sa mogućnošću crpljenja topline iz zraka koje imaju relativno mali koeficijent djelotvornosti. No, faktor preobrazbe je konstantniji i bitno bolji kod primjena sa korištenjem toplinskog spremnika u zemlje (nekoliko metara ispod površine). Faktor prebrazbe, omjera dobavljene topline i uloženog rada q_{dov}/w_t , iznoso oko 50% idealnog Carnotovog (od 3 do 5), ovisno o uvjetima primjene.

Slika 7.4 Tipična varijacija temperature tla [24]



Slika 7.5 Osnovni izgled geotermalnog postrojenja za komunalno grijanje [21]

7.4. Korištenje geotermalne energije za proizvodnju električne energije

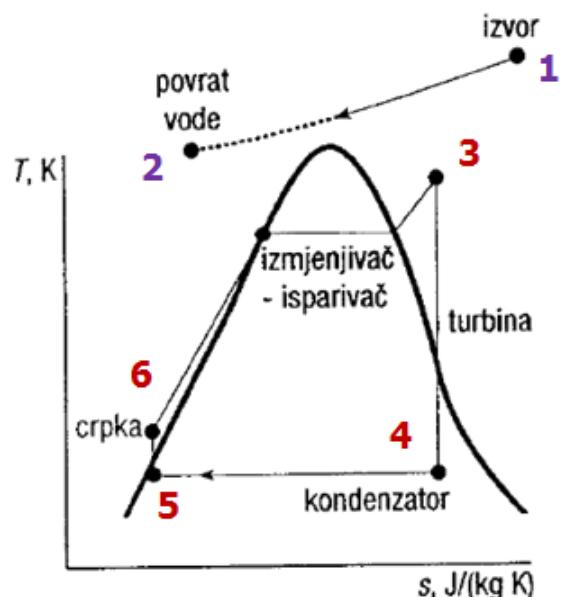
Proizvodnja električne energije korištenjem geotermalnog izvora u principu je slična klasičnoj konverziji unutrašnje kaloričke energije iz uobičajenih izvora toplinske energije (npr. ugljen). Sličnost prestaje kada je riječ o činjenici da treba otkriti dobro geotermalno nalazište i da je za to potrebno napraviti buštinu (ili više njih) od nekoliko km. Dodatno, kod geotermalnih izvora vrlo su rijetki sa parametrima medija blizu parametara klasične termoelektrane.

Trenutno se u svijetu koristi skoro 9 GWe¹ instalirane snage geotermalnih elektrana (2005.) što predstavlja 0,2% ukupnih svjetskih kapaciteta za proizvodnju el. en. Prosječni faktor opterećenja iznosio je preko 70% i te su elektrane proizvele skoro 55 TWh el. en.. Europska unija ima ukupno 870 MWe instalirane snage geotermalnih elektrana (2007.) koje proizvode više od 9 TWh el. en. (prosječni faktor opterećenja 77%).

Najkvalitetniji geotermalni izvori daju suhu paru visoke entalpije (temperature oko 240 °C) na ulazu u postrojenje. Takva postrojenja se po svojoj izvedbi i snazi (reda 100 MW) ne razlikuju značajno od klasičnih termoelektrana. Specifičnost su centrifugalni separator nečistoća prije turbine i parni ejektor za uklanjanje nekondezibilnih plinova (do 10% mase; CO₂, NH₄ i H₂S) iz kondenzatora. Za smanjivanje potrebnog rashladnog protoka tlak u kondenzatoru je relativno visok (~135 kPa) i to, uz relativno male temperature, dodatno umanjuje termički stupanj djelovanja prema klasičnim postrojenjima. Na svijetu ima malo primjera koji koriste izvore suhe pare (Lardarello² u Italiji, Matsukawa u Japanu, Geysers u SAD i Kamojang na Javi). Cijena ovakvih postrojenja sa buštinama dvostruko je iznad cijene konvencionalnih (oko 2000 €/kW).

Srednje dobri i najčešće korišteni geotermalni izvori daju na izlazu mokru paru. Temperatura fluida je preko 200 °C s velikim salinitetom (do 280e3 ppm). Separiranje pare se odvija u jednom, dva i rjeđe tri stupnja. Broj stupnjeva se povećava za bolji ukupni stupanj djelovanja kod lošijih izvora. Kombinirani proces proizvođenje el. en. i topline se koristi umjesto trostrukе separacije pare. Cijena ovakvih postrojenja otprilike je 30% veća od onih sa suhom parom. Elektrane sa mokrom parom su manjih snaga (10-50 MWe) i koriste se u SAD, Japanu, Novom Zelandu, Meksiku i na Islandu.

Ponajbolja nalazišta u Hrvatskoj dovoljno su dobra samo za korištenje najmanje djelotvornih i najsukupljih postrojenja za konverziju geotermalne energije u el. en. s binarnim ciklusom. Ta se postrojenja služe Rankineovim kružnim procesom, s organskim medijem (npr. amonijak, propan, izobutan ili freon 12), a toplina iz bušotine prenosi se preko izmjenjivača u kružni proces.

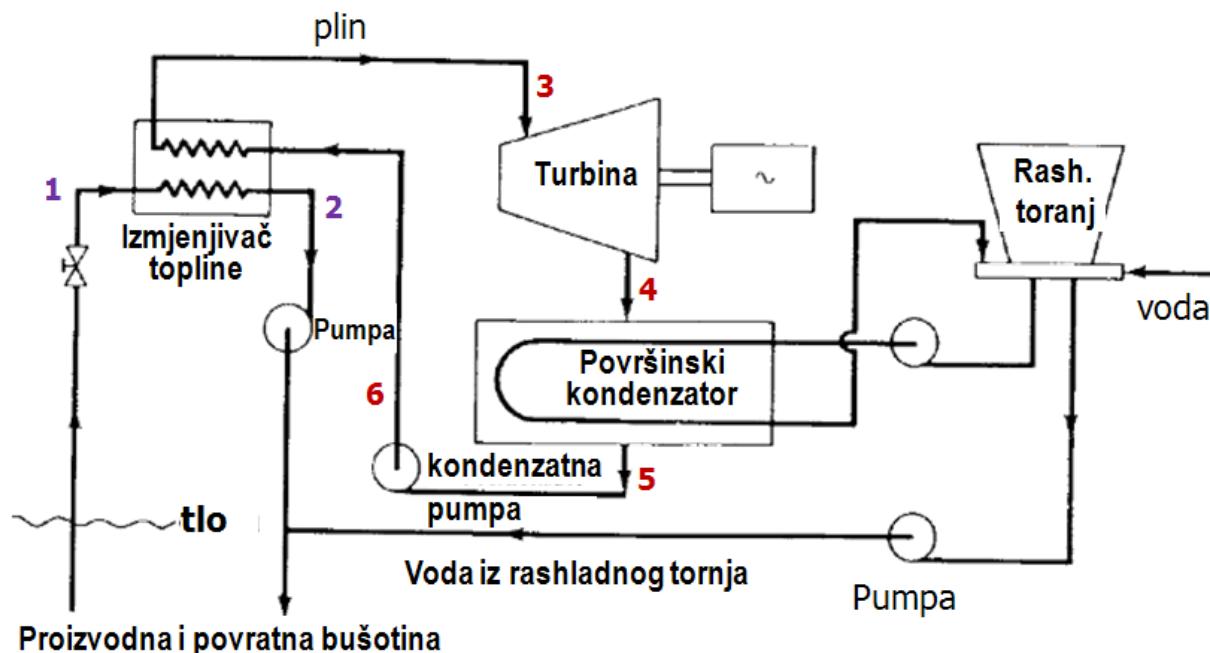


Slika 7.6. Organski Rankineov kružni proces

¹ Od ukupno 23 zemlje koje proizvode el. en. iz geotermalne energije vodeći su Filipini (1900 MWe), SAD (1850 MWe), Meksiko (1000 MWe), Italija (700 MWe), Japan (600 MWe), Novi Zeland (400 MWe), Island (200 MWe) i Costa Rica (150 MWe)

² Prva termoelektrana na geotermalnom izvoru sagrađena je u Larderellu u Toskani 1904.

Binarni ciklus se koristi za bušotine koje daju medij na temperaturi od 100 do 200 °C. Radni medij stoga mora imati nisku temperaturu isparivanja. Ovakva postrojenja imaju najmanje snage (do 10 MW). Njihova prednost je u odvajanju turbineskog dijela (kružnog procesa) od medija iz izvora i time smanjivanje korozije i taloženja. Uobičajeno za ovakve primjene su potrebne pumpe u proizvodnoj bušotini (za sprečavanje isparivanja medija u nalazištu). Cijena binarnih geotermalnih postrojenja sa buštinama se procjenjuje na oko 3000 €/kW. Njihova termodinamička efikasnost iznosi oko 8% (kod boljih rješenja i parametara nalazišta i do 15%). Slike 7.6 i 7.7 prikazuju Rankineov kružni proces i shemu postrojenja s binarnim ciklusom s organskim medijem.



Slika 7.7. Shematski prikaz binarne geotermalne elektrane

Na spomenutoj lokaciji Lunjkovec-Kutnjak planira se izgraditi binarno postrojenje koje će koristiti mješavinu vode i amonijaka u turbineskom krugu. Temperatura geotermalne vode je 140 °C, a protok od 53 do 70 l/s. Na povratku temperatura vode bit će manja od 70 °C. Snaga elektrane na pragu će iznositi od 1,85 do 2,47 MW ovisno o protoku. Očekivana efikasnost, uz faktor opterećenja 90%, je 13%. Ovako visok stupanj djelovanja za tako nisku temperaturu nalazišta ostvaruje se tzv. Kalina ciklusom. Slika 7.7 prikazuje prednost Kalina ciklusa sa mješavinom vode i nisko-temperaturno hlapljivog medija u usporedbi sa ciklусом koji koristi jedan medij (Rankineov). Mješavina isparava na promjenjivoj temperaturi i to osigurava bolji prijenos toplinske energije, u izmjenjivaču topline između turbineske strane i strane geotermalnog izvora, što rezultira boljom efikasnošću.

Postoje i kombinirana rješenja sa dvije turbine gdje jedna radi na separiranu paru, a druga na organski medij. Npr. elektrana Puna na Hawaii-ma snage 30 MWe ima 10 modula na kombinirani ciklus spojenih na jedan generator (315 °C na 0,1 MPa).

Na kraju za povećavanje snage i poboljšavanje termodinamičkog stupnja djelovanja zanimljiva su hibridna rješenja. Dodatni izvor toplinske energije predstavljaju fosilna goriva ili biomasa. Jedno rješenje je da se geotermalnom toplinom pregrijava pojna voda ispred generatora pare. Drugo rješenje koristi konvencionalno gorivo (ili biomasu) za pregrijavanje pare prije ulaska u turbinu.

Za ekonomičnost geotermalne elektrane iznimno je važna dugotrajna iskoristivost nalazišta. Stečena iskustva i proučavanje pokazuju da se može računati na 50 do 100 godina eksploatacije. Cijena korištenja se smanjuje i blizu je konkurentnosti fosilnim gorivima (4-8 €c/kWh) dijelom i standardizacijom i modularnošću korištene opreme.

7.4. Zaključno

Sastav vode/pare koja dolazi iz geotermalnog nalazišta zasićen je agresivnim plinovima i tvarima koje stvaraju naslage na dijelovima postrojenja i potencijalno predstavlja prijetnju okolišu. Razvoj tehnologije smanjuje cijenu rješavanja navedenih problema, a primjena zatvorenog ciklusa čuva okoliš. Važan uvjet za to je vraćanje iskorištenog medija u nalazište. Ukoliko se sve opasne tvari vrati u nalazište ili na drugi način zbrinu jedini problem po okoliš ostaju staklenički plinovi. To se primarno odnosi na CO₂, metan i slično. Ispuštanja CO₂ su skoro 10 puta manja u odnosu na konvencionalnu termoelektranu na ugljen (100 kg CO₂/MWh). Metan i drugi slični plinovi se mogu koristiti ili spaljivati.

Prema svemu izgleda da je geotermalna energija obnovljivi izvor koji nema problema sa nestalnošću. Ograničenje predstavlja činjenica da se može koristiti samo na mjestu gdje je nalazište. Ovo je veliki problem za direktno korištenje i potencijalno problem za mjesta koja nisu u blizini el. en. mreže.

Trenutna razina korištenja geotermalne energije u raskoraku je sa potencijalom. Glavna prepreka je u relativno velikim kapitalnim ulaganjima (istraživanje nalazišta košta i preko 20% investicije). Za pretpostaviti je da će daljnje poskupljenje fosilnih goriva i nastojanje da se smanje ukupne emisije stakleničkih plinova povećati korištenje geotermalne energije. Zemlja poput Hrvatske sigurno ne može riješiti pitanje proizvodnje el. en. korištenjem geotermalne energije, ali može potražiti mogućnost za dodatne ekonomske efekte posebno u direktnoj primjeni.

Literatura:

- [1] European Commission, Directorate-General for Energy and Transport: „COM 2001/77/EC: Directive on Electricity Production from Renewable Energy Sources”, 2001.
- [2] EUrObserver ER 2006, EUrObserver ER 2007
- [3] EU RES Export Masterplan 2002
- [4] <http://data.ecmwf.int/data>
- [5] <http://www.inhabitat.com>
- [6] <http://www.volker-quaschning.de/articles>
- [7] <http://www.wbdg.org>
- [8] Gjengedal, T., Henriksen, M., "Large scale integration of wind power and the impact on power systems", CIGRE, Paris, 2004., C1-206,
- [9] Jenkins, N., Allan, R., Crossley, P., Kirschen, D., Strbac, G., "Embedded generation", The Institution of Electrical Engineers, London, 2000.
- [10] CATALDI, R., Geothermal energy development in Europe to year 2020: prospects or hopes? Technica Poszukiwan Geologicznyhc, 4-5, 1999, 48-59.
- [11] STEFANSSON, V., Global perspective on geothermal energy. Submitted to IEEE, 2002.
- [12] Zakon o energiji, Narodne novine 68/01, Zagreb, 2001.
- [13] Zakon o tržištu električne energije, Narodne novine 68/01, Zagreb, 2001.
- [14] Strategija energetskog razvijatka Republike Hrvatske (NN 38/2002)
- [15] Nacionalna strategija zaštite okoliša (NN 46/2002),
- [16] Uredba o minimalnom udjelu električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije čija se proizvodnja potiče (NN 33/2007)
- [17] Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije (NN 33/2007)
- [18] Pravilnik o korištenju obnovljivih izvora energije i kogeneracije (NN 33/2007)
- [19] Uredba o naknadama za poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora i kogeneracije (NN 33/2007)
- [20] Nacionalni energetski programi, Uvodna knjiga, Energetski institut "Hrvoje Požar", Zagreb, 1998.
- [21] M. Kaltschmitt, W. Streicher, A. Wiese, Renewable Energi – Technology, Economics and Environment, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [22] EIHP, Energija u Hrvatskoj 2006, Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva 2007.
- [23] Wohletz, Kenneth, and Grant Heiken. *Volcanology and Geothermal Energy*. Berkeley: University of California Press, 1992. <http://ark.cdlib.org/ark:/13030/ft6v19p151/>
- [24] Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering & Cases, Natural Resources Canada, 2005

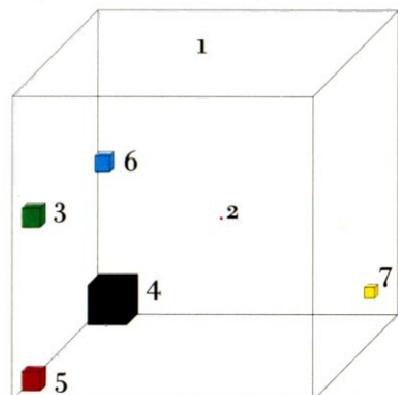
10. ENERGIJA SUNČEVOG ZRAČENJA

Energija Sunca osnovni je pokretač svih klimatskih i životnih ciklusa na Zemljji. Stoga je Sunce predstavljalo centar pravjerovanja brojnih civilizacija. Danas Sunce doživljavamo kao izvor ugode i kao enormni neiskorišteni potencijal za podmirivanje energetskih potreba uz minimalan utjecaj na globalno zagrijavanje. Nastavak poglavljia opisuje kako se određuje potencijal Sunčeva zračenja. Potom slijedi opis korištenja Sunčeva zračenja u toplinskim i primjenama za proizvodnju električne energije.

10.1 Potencijal Sunčeva zračenja

Energija Sunčeva zračenja kontinuirano pristiže na Zemlju koja se okreće oko svoje osi i oko Sunca. Posljedično imamo dnevne i sezonske mijene snage Sunčeva zračenja koje stiže do površine Zemlje. Snaga Sunčeva zračenja na ulazu u Zemljinu atmosferu, pri srednjoj udaljenosti od Sunca, iznosi 1370^1 W/m^2 . Do površine Zemlje stiže otprilike pola. Ukupno Sunčev zračenje koje dođe na Zemlju vratiti se natrag u svemir². Snaga koju stvarno na površini imamo značajno ovisi o prilikama u atmosferi i o oblacima. Za grubu ocjenu prosječne snage Sunčeva zračenja na površini zemlje tijekom cijele godine se može uzeti vrijednost od skoro 200 W/m^2 .

Jednostavni račun s površinom Zemlje okrenutom Suncu može ocijeniti godišnje dozračenu energiju. Slika sa strane uspoređuje preko volumena kocke energiju Sunca dozračenu na Zemlju (1) s rezervama primarnih izvora energije i ukupnom svjetskom potrošnjom energije (7). Nedvojbeno je da se radi o enormnim količinama energije mnogostruko većim od svih rezervi ugljena (4), prirodnog plina (3), nafte (5) i urana (6) zajedno. Iznos trenutno korištene Sunčeve energije prikazuje najsitnija kocka broj 2.

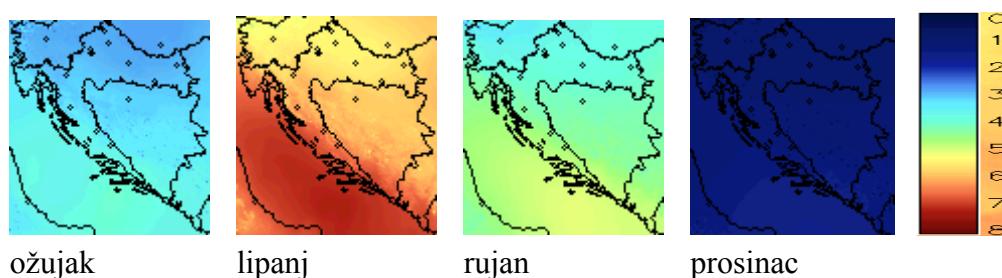


Za neku određenu lokaciju potencijal Sunčeva zračenja se određuje mjeranjem i analitički. Mjeriti se može lokalno ili satelitski. Analitički pristup daje zadovoljavajuće rezultate ukoliko je poznat tzv. indeks prozračnosti (K_t – određuje koliko zračenja dođe do površine). Piranometrom (termičkim ili poluvodičkim) se mjeri globalna (ukupna), direktna i difuzna (raspršena) ozračenost na horizontalnu površinu (gustoća energije - $H \text{ Wh/m}^2$). Daljnja analitička procjena je nužna zbog toga što su rezultati mjerjenja najčešće dostupni samo za ukupnu ozračenost i jer se konverzija Sunčeva zračenja odvija pod određenim kutom (β) u odnosu na horizontalnu površinu, a difuzno i direktno zračenje također ovise o tom kutu i o indeksu prozračnosti. Dodatno treba voditi računa i o reflektiranoj komponenti koja ovisi o direktnoj komponenti, kutu β i specifičnoj konfiguraciji terena.

¹ Uslijed blage ekscentričnosti putanje Zemlje oko Sunca i različite udaljenosti tijekom godine vrijednost Solarne konstante varira $\pm 3,5\%$. To se može zanemariti prema ostalim varijabilnim utjecajima.

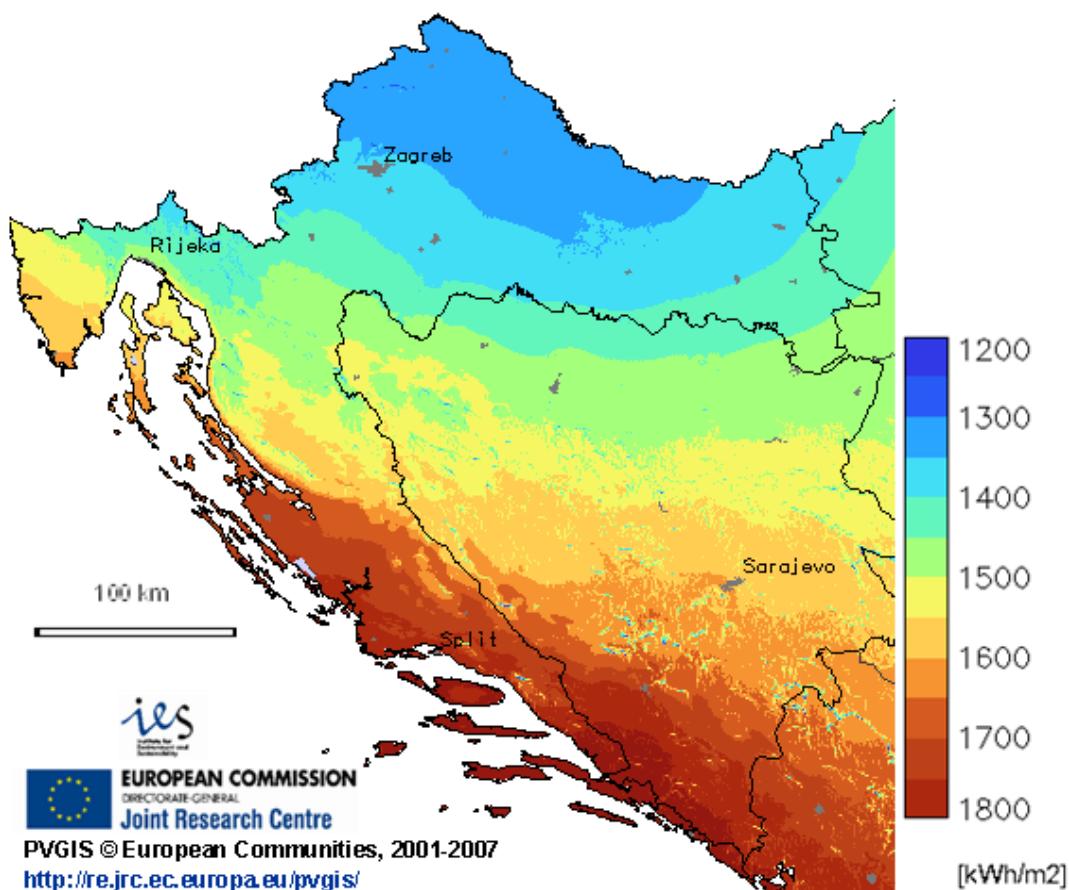
² Na putu do površine Zemlje oko 30% direktno se odbija natrag u svemir (od atmosfere 6%, od oblaka 20% i od zemlje 4%), oko 19 % apsorbira se u atmosferi (oblaci 3%, atmosfera iznad 16%), a ostatak upije kopno i more. Iz zemlje i oceana sve se vraća natrag: zagrijavanjem zraka 7%, isparivanjem vode 23% i infracrvenim zračenjem 21%. Uz prethodne izmjene u oblacima i atmosferi Zemlju na kraju napušta infracrvenim zračenjem 70% Sunčeve energije.

Obrađeni podatci su dostupni od različitih institucija koje integriraju mjerena meteoroloških postaja i satelita s analitičkom obradom za višegodišnja razdoblja i različite rezolucije. Svi izvori koji nisu rezultat posebnih mjerena za konkretnu lokaciju imaju neodređenost koja može biti i do 30%. Varijabilnost uslijed lokalnih vremenskih prilika još je veća. Neodređenost je manja na razini procjene za ukupnu godišnju ozračenost. Primjer izvora podataka koje je moguće kupiti je *European Centre for Medium Range Weather Forecast* ($2,5 \times 2,5^\circ$ i preciznije, data.ecmwf.int/data). Postoje i podaci koji su slobodno dostupni, npr.: NASA Surface Meteorology and Solar Energy za razdoblje od 1983-19993 u rezoluciji od 1° , i *Photovoltaic Geographical Information System* (PVGIS) za mrežu od 1 do 2 km. Slika 10.1 prikazuje ilustraciju PVGIS podataka za horizontalnu površinu.



Slika 5.1. Prosječna dnevna ozračenost na ravnu površinu [kWh/m^2]

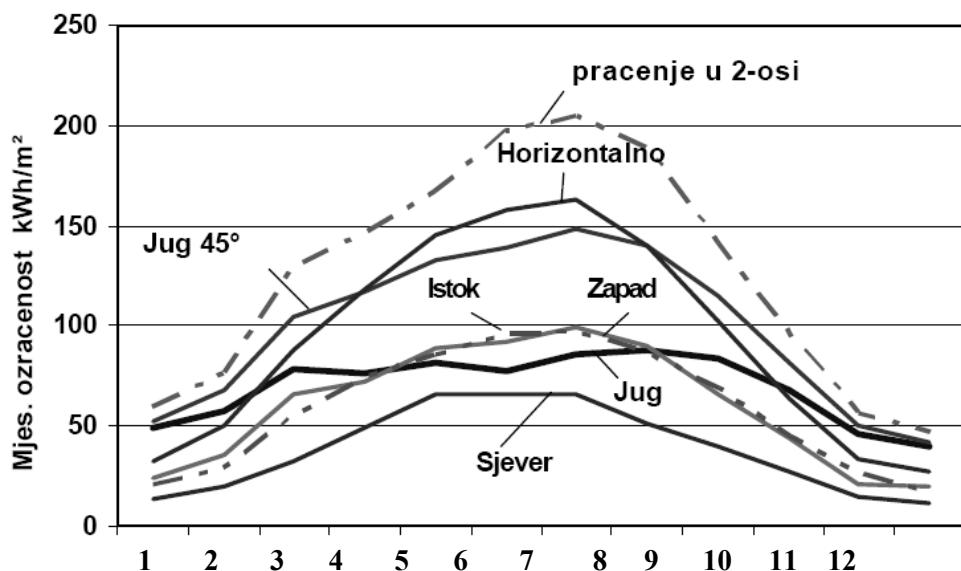
Slika 10.2 prikazuje PVGIS podatke sumarno za cijelu godinu uz optimalni kut. Optimalni kut se također treba odrediti za svaku lokaciju.



Slika 10.2. Ukupna godišnja ozračenost [kWh/m^2] za površinu pod optimalnim kutom

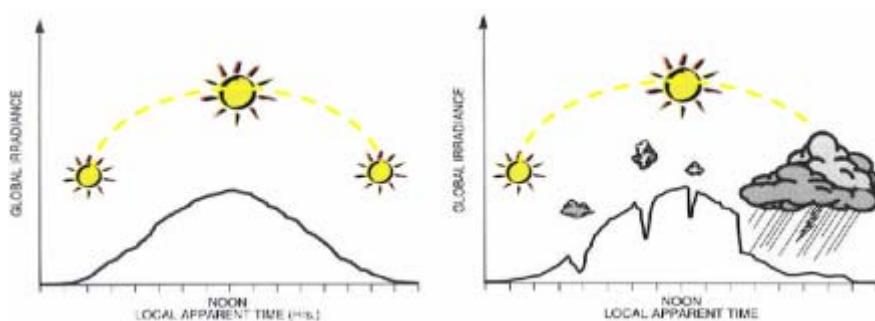
Prema PVGIS podatcima optimalni kut se za područje RH kreće od 33° na sjeveru do 37° na jugu. Valja imati na umu da se optimalni kut mijenja tijekom godine zbog prividnog kretanja sunca³. Kod fiksnih instalacija je potrebno odabrati optimalni kut za maksimalnu godišnju energiju ili za maksimalnu energiju tijekom slabijih sunčanih dana.

Najbolje je rješenje koje prati kretanje sunca. Time se može povećati dobivena energija za 25-40% - više se postiže na praćenje Sunca u dvije osi i za sunčanje lokacije (Slika 10.3).



Slika 10.3. Globalno ozračenje tijekom godine za razne nagibe i za 2-osno praćenje za centralnu Europu [43]

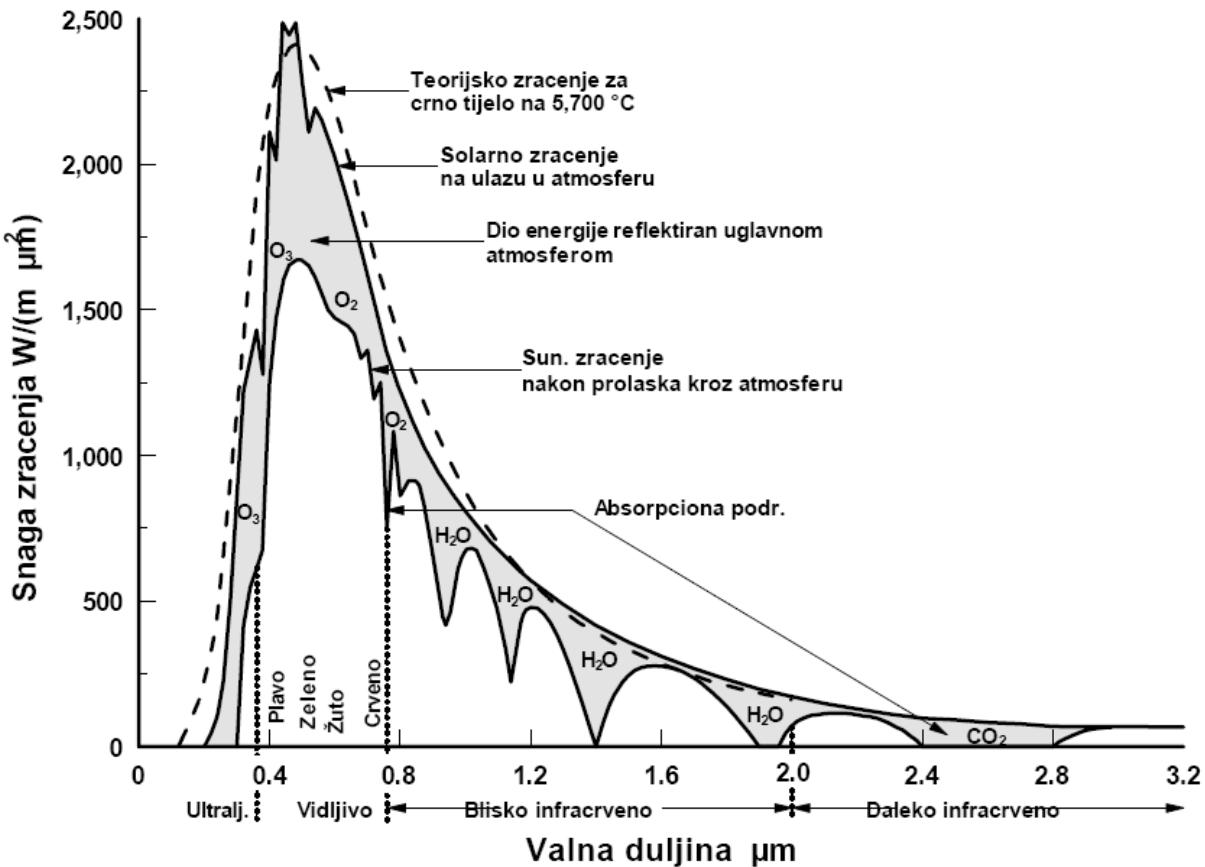
Spektar svjetlosti koja obasjava FN ćeliju ovisi o debljini i sastavu atmosfere kroz koju prolazi. Slika 10.4. ilustrira utjecaj stanja u atmosferi (smog i oblaci) na intenzitet.



Slika 10.4. Utjecaj stanja u atmosferi i na oblake na intenzitet Sunčeva zračenja tijekom dana

³ Prema PVGIS npr. za Zadar optimalni kut na nivou godine je 36° , a za pojedine mjesecce: 45° u ožujku, 10° u lipnju, 41° u rujnu i 66° u prosincu.

Ovisno o dobu dana, zemljopisnoj širini i godišnjem dobu svjetlost do neke točke na površini Zemlje putuje kroz deblji ili tanji sloj atmosfere. Koliki je taj put u odnosu na najkraći izražava se kao omjer mase zraka (AM)⁴. Slika 10.5 prikazuje spektar Sunčeva zračenja na ulazu u atmosferu i na tlu nakon direktnog prolaza.



Slika 10.5. Spektar Sunčeva zračenja na ulasku u atmosferu i na površini Zemlje [43]

Za procjenu potencijala korištenja Sunčeva zračenja i preliminarne analize primjene dovoljni su i ovako relativno grubi podatci. Ograničenje za korištenje Sunčeve energije u podnebljima poput našega sigurno nije primarno u dostupnim podatcima o potencijalu. Vodeća Europska zemlja u korištenju Solarne energije je Njemačka gdje je godišnja prosječna ozračenost na optimalnu površinu ispod 1000 kWh/m².

⁴ AM ' Air Mass, po konvenciji se površina atmosfere označava sa AM=0.

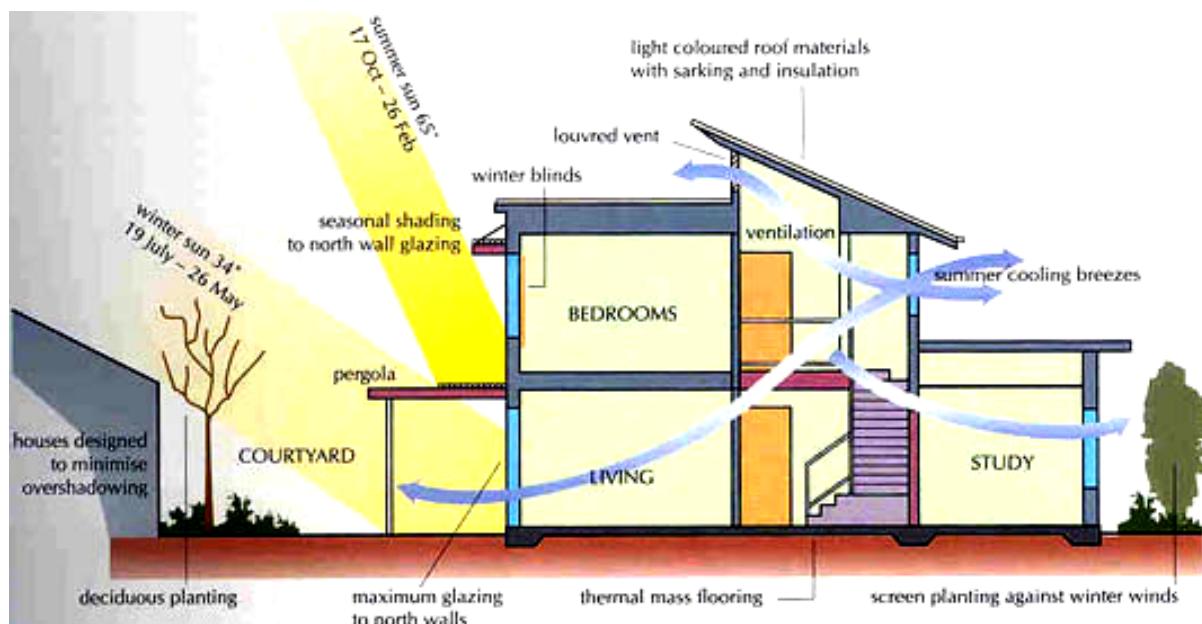
10.2 Toplinska primjena

Pod toplinskim korištenjem Sunčeva zračenja podrazumijeva se direktna primjena za zagrijavanje objekata, grijanje vode ili u novije vrijeme korištenje u rashladnim uređajima. Toplinska primjena se dijeli još na pasivnu i aktivnu.

10.2.1. Pasivna arhitektura

Najstariji oblik korištenja energije Sunčeva zračenja je u pasivnoj arhitekturi. Pasivna gradnja ponajprije znači da se stambene cjeline i objekti grade tako da se čim više zagrijavaju kada je tijekom godine hladno i da se što manje zagrijavaju kada je toplije godišnje doba. Ovo je moguće postići zahvaljujući činjenici da je kut (deklinacija) pod kojim se Sunce, u krajevima sjeverno od ekvatora, nalazi tijekom ljeta veći od onoga preko zime. Pasivno rješenje predstavlja nadstrešnica na južnom dijelu nastambe. Ljudi ovo koriste već više od dva milenija. Pasivna gradnja dodatno može biti u dobroj izolaciji objekta; zidovima i podovima koji imaju dodatnu masu za akumuliranje topline (akumulacija preko dana za noćne potrebe); odgovarajućom izvedbom prozora; dodatnim izvorom svjetla iz posebnih kanala. Postoje i rješenja koja strogo gledano nisu pasivna gdje se može npr. pomicati pokrov ili dio fasade. Kontrolirana ventilacija također doprinosi učinkovitosti i komforu.

Prepostavka pasivnoj gradnji je značajna južna površina i da nema zasjenjivanja okolnih objekata. Dodatno treba planirati uređenje oko objekta raslinjem za stvaranje sjene zelenilom preko ljeta i osiguravanjem zaklona od vjetra preko zime. Slika 10.6 ilustrira dio navedenih mjeru.



Slika 10.6. Primjer pasivne arhitekture (www.inhabitat.com) Green Building)

Europska unija planira primjenom pasivne gradnje nadomjestiti 35 Mtoe energije za grijanje objekata (potrebe za oko 1,5 milijuna domova). Ovo se nastoji ostvariti kroz definiranje standarda pasivne gradnje, edukacijom i povezano sa poticanjem učinkovitosti. Premda kompletne učinke pasivne gradnje nije jednostavno valorizirati one nedvojbeno predstavljaju najjednostavniji, najdjelotvorniji i ekonomičan način korištenja energije Sunca.

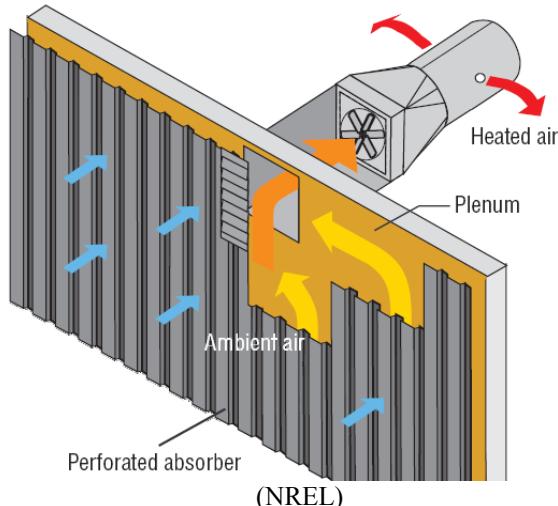
10.2.2. Toplinski kolektori

Korištenje energije Sunca preko toplinskih kolektora malo je složenije od pasivnih rješenja ali zato sigurno najisplativije. Rješenja mogu biti sa i bez aktivnih komponenti te mogu koristiti zrak ili vodu kao radni medij. Dalje se mogu razlikovati po temperaturi koju postiže radni medij, tako imamo: nisko, srednje i visoko temperaturne primjene.

Najjednostavnija nisko temperaturna rješenja se koriste za grijanje bazena ili industrijskih objekata. Izvode se sa cijevima bez pokrova ili sa fasadama koje imaju zračne prolaze. Najbolji su za temperature do 10 °C iznad okolišne (slika 10.7.).

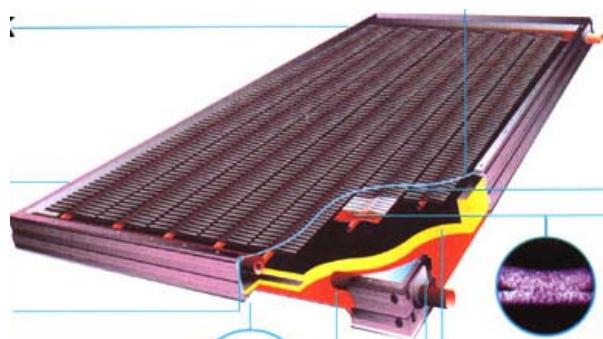


www.re-solutions.org

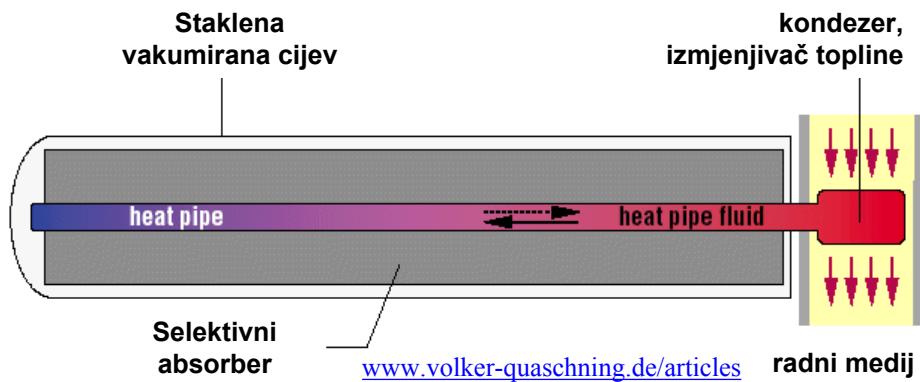


Slika 10.7. Nisko temperaturni kolektori za grijanje vode u bazenima i za grijanje prostora

Nešto složeniji srednje temperaturni kolektori imaju pokrov od stakla te posebne premaze koji pospješuju apsorpciju uz minimalnu emisiju. Koriste se za grijanje objekata i tople vode. Najbolji stupanj djelovanja imaju za temperature medija do 50 °C iznad okolišne.



Visoko temperaturni kolektori su najsloženiji jer zahtijevaju vakumirane staklene cijevi i dobru izolaciju. Prednost im je što omogućavaju postizanje temperature iznad 50 °C, a u posebnim izvedbama i preko 100 °C. Slika 10.8. prikazuje presjek vakumirane cijevi visoko temperaturnog kolektora.



Slika 10.8. Presjek evakuirane staklene cijevi visoko temperaturnog kolektora

Na kraju 2005. u svijetu je bilo ukupno instalirano 111^5 GWt kapaciteta solarnih kolektora. Kina⁶ sa 52 GWt instaliranih kapaciteta neprikošnoveni vodi, drugi SAD ima malo više od 20 GWt, potom slijede Turska Njemačka i Japan sa oko 5 GWt, Australija i Izrael imaju oko 3 GWt i na kraju vrijedno spomena je da Grčka, Austrija i Brazil imaju oko 2 GWt instaliranih solarnih kolektora. Pored ogromne razlike u instaliranim kapacitetima jednako je velika razlika u relativnom udjelu pojedinih vrsta kolektora. Tako Kina jedina ima preko 90% instalirane visoko temperaturne kolektore sa evakuiranim cijevima. Potom SAD ima preko 90% nisko temperaturnih kolektora bez pokrova (primarno za grijanje bazena) i tome je slično stanje samo u Australiji. Sve ostale zemlje (uključujući Europu) imaju primarno instalirane srednje temperaturne kolektore sa pokrovom.

EU trenutno ima instalirano preko 10 GWt, ali polovica od toga u Njemačkoj koja ima dvije trećine instalacija zajedno sa Grčkom i Austrijom. Planovi⁷ su do 2010 ostvariti 100 milijuna m². Stope rasta koje se ostvaruju potvrđuju realnost potencijala ovakvog korištenja Solarne energije.

Modeliranje rada solarnog kolektora se može promatrati pojednostavljenom modelom koji preuzetu toplinu u mediju (npr. voda) izražava proporcionalno transmitivnosti pokrova (τ) i apsorptivnosti (α) apsorbera, a gubitke proporcionalno koeficijentu ukupnih gubitaka (k W/m²K) i razlici temperature medija prema okolišu (ΔT). Pojednostavljeno obje topline su proporcionalne faktoru (F) prijenosa topline između apsorbera i vode. Za kolektor površine A dobivena toplina Q_k u vremenu Δt ovisi o ozračenosti prema izrazu 10.1.

$$Q_k = F \cdot A [\tau \cdot \alpha \cdot H - k \cdot \Delta T \cdot \Delta t] \quad (10.1)$$

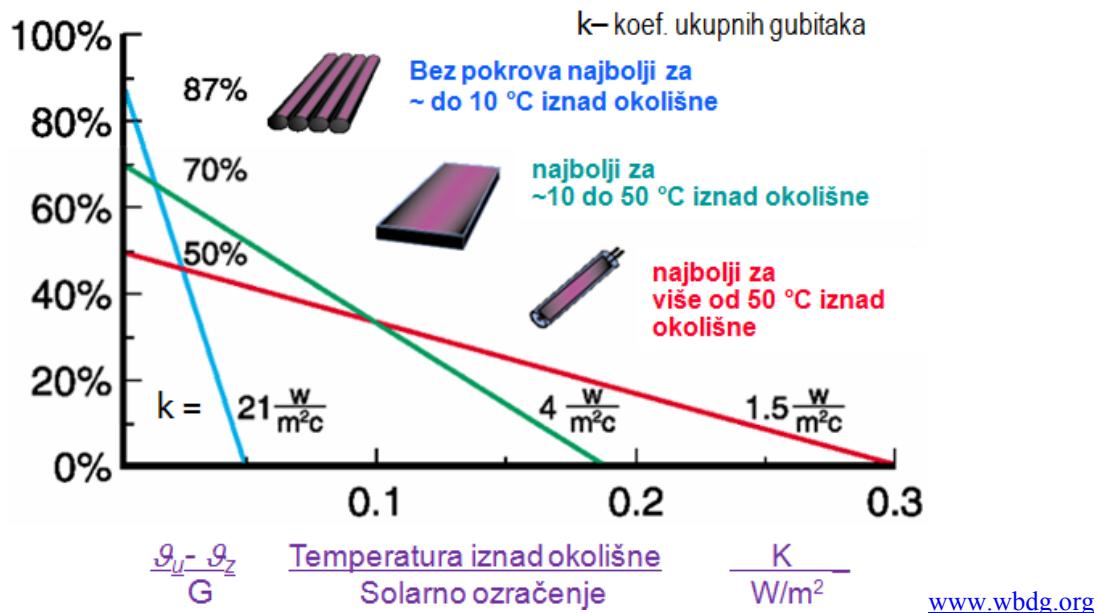
Efikasnost kolektora predstavlja omjer dobivene topline i dozračene energije Sunca. Često se efikasnost kolektora prikazuje u funkciji omjera razlike temperature medija i okolnog zraka prema iznosu ozračenosti. Slika 10.9. prikazuje kretanje efikasnosti tri različite vrste kolektora.

⁵ Prema AEE Intec *Solar Heat Worldwide*

⁶ Kina ima plan da do 2015. sa preko 1500 GWt osigura da oko 25% stanovništva koristi Solarne kolektore.

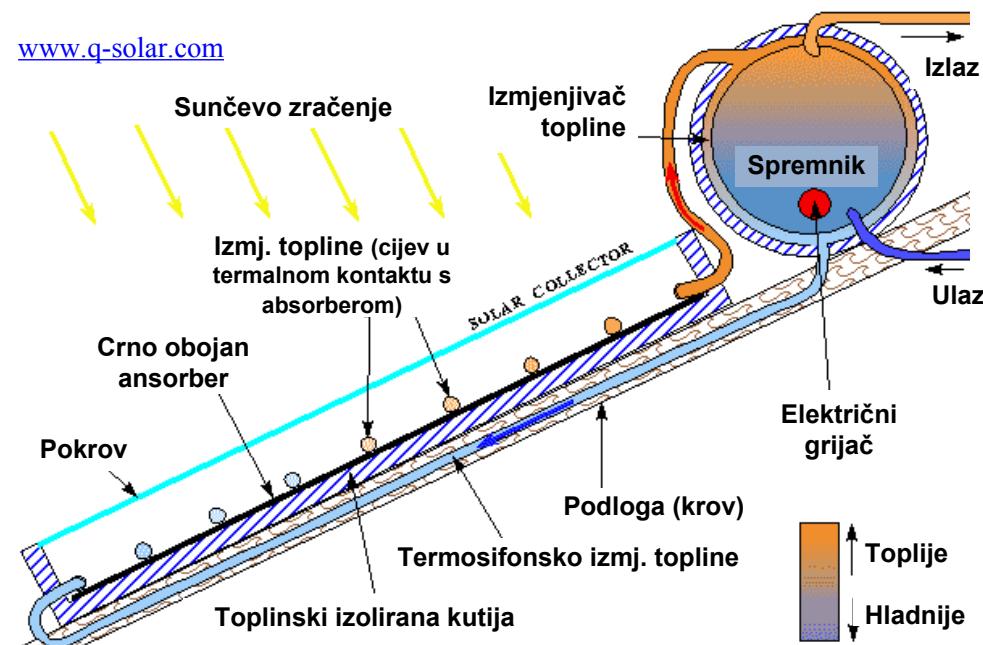
⁷ Pojednostavljeno se uzima da 1 m² ima potencijal za 0,7 kWh na dan (oko 250 kWh godišnje).

Efikasnost = % iskorištenog Solarnog ozračenja

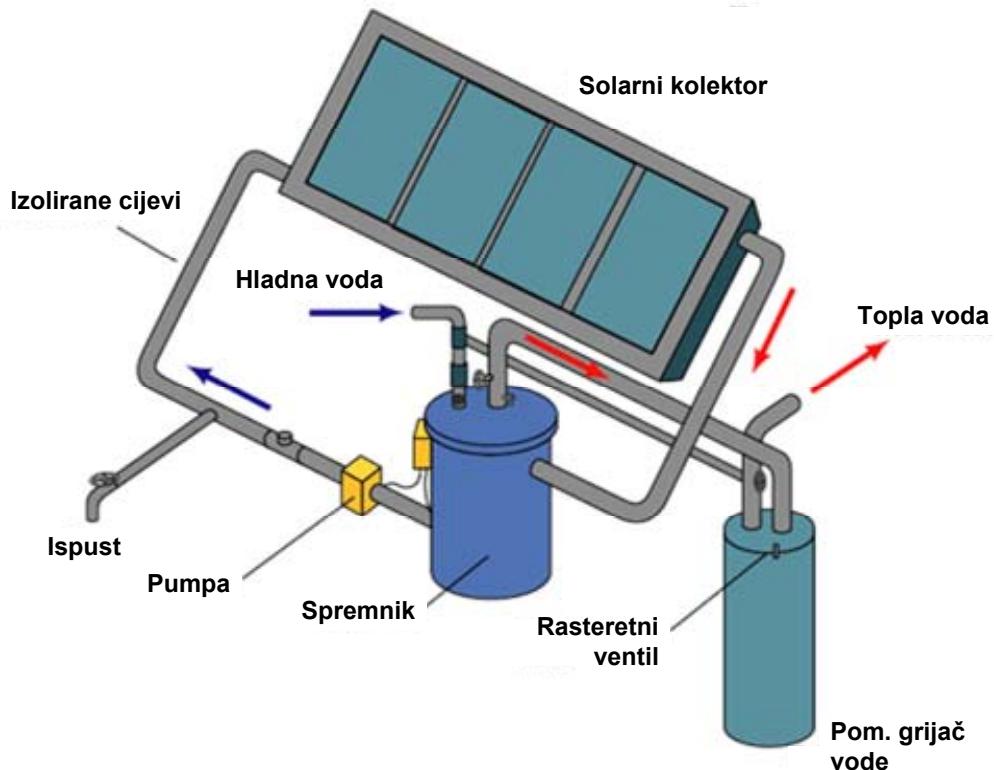


Slika 10.9. Efikasnost različitih izvedbi kolektora u ovisnosti o ΔT i ozračenja

Slike 10.10. i 10.11. prikazuju najčešći način korištenja solarnih kolektora: pasivno i aktivno. Pasivna rješenja su popularnija, a i primjerena za sunčanija podneblja.



Slika 10.10. Najjednostavnija popularna primjena pasivnog kolektora



Slika 10.11. Aktivna izvedba solarnog kolektora

10.2.3. Hlađenje

Sve su brojniji projekti koji demonstriraju direktnu primjenu Solarne energije za hlađenje. Za kompletну dostatnost se razmatraju kombinirana rješenja sa bojlerima na biomasu. Stanje razvoja je pred uvođenjem na tržište i značajno smanjenje cijene se očekuje u idućim godinama. Važnost primjene Solarne energije za hlađenje je u sve većim potrebama za električnom energijom u ljetnim mjesecima i maksimalnom poklapanju sa njenom dostupnosti.

Solarno hlađenje radi tako da zamjenjuje kompresor, pogonjen el. en., procesom koji koristi medij za preuzimanje topline s vrlo niskom točkom ključanja (ispod 0 °C). Uredaj se sastoji od bojlera, kondenzatora, evaporatora i absorbera. Može se koristiti amonijak pod tlakom tako da je tekuć na sobnoj temperaturi, a potrebni su još vodik i voda. Razvijaju se i rješenja s litij bromidom i vodom.

Hlađenje bez korištenja mehaničke energije poznato je još od početka prošlog stoljeća kada je bilo popularno jer el. en. nije bila dovoljno dostupna za razliku od izvora ostatne topline. Ovakav način rashlađivanja se izvodi na apsorpcijski i adsorpcijki načine.

10.3 Proizvodnja električne energije

Električna energija se proizvodi iz energije Sunca na dva različita načina: posredno preko toplinskog kružnog procesa i direktno korištenjem fotoefekta. Prvi je pristup znatno bliže ekonomičnosti, ali za drugi pristup postoji veći poticaj i brže se razvija.

10.3.1. Termoelektrane na Sunčevu energiju

Termoelektrane na Sunčevu energiju se ne razlikuju u osnovi od ostalih termoelektrana u dijelu koji pretvara toplinsku energiju u električnu. Uvijek se primjenjuje desnokretni toplinski kružni proces koji preko turbine ili nekog drugog toplinskog stroja pretvara toplinsku energiju u mehaničku i električnu preko generatora.

Tri su različita rješenja Solarnih termoelektrana relevantna prema iskustvu i potencijalu za ekonomičnu primjenu: parabolična protočna, Solarni toranj i parabolični tanjur. Sve ove termoelektrane koriste primarno direktnu komponentu Solarnog zračenja i za dostatnu učinkovitost moraju pratiti kretanje Sunca. Pokraj navedenih rješenja zanimljivo je spomenuti i tzv. Solarni dimnjak koji se bazira na solarnim kolektorima i zračnim turboagregatima. Postoje eksperimentalna rješenja, ali njihov potencijal za sada izgleda manji od solarnih termoelektrana. Potrebno je oko 200 m^2 površine za 1 kWe.



Parabolična protočna solarna termoelektrana

Rješenje solarne termoelektrane (STE) s poljem cijevi u fokusu polja linearnih paraboličnih koncentratora ima najveći potencijal za posve komercijalno korištenje. Kumulativno iskustvo i ukupne probne instalacije daleko premašuju sva ostala rješenja solarnih TE. Veliko iskustvo sa ovim rješenjem dolazi od 354 MWe instalacija u Mojave pustinji u Californiji još prije 20 godina čini parabolične protoče STE najrazvijenijom tehnologijom. Relativni zastoj u aktivnostima se mijenja u zadnje vrijeme izgradnjom postrojenja u Španjolskoj, Izraelu i drugdje, ali uz zastoje i nejasnu kratkoročnu budućnost.

Koncentracijom Sunčeva zračenja od 75x postižu se temperature radnog medija i do 400°C . Ukupna efikasnost ovisi o specifičnoj izvedbi, ali se kreće oko 12%.

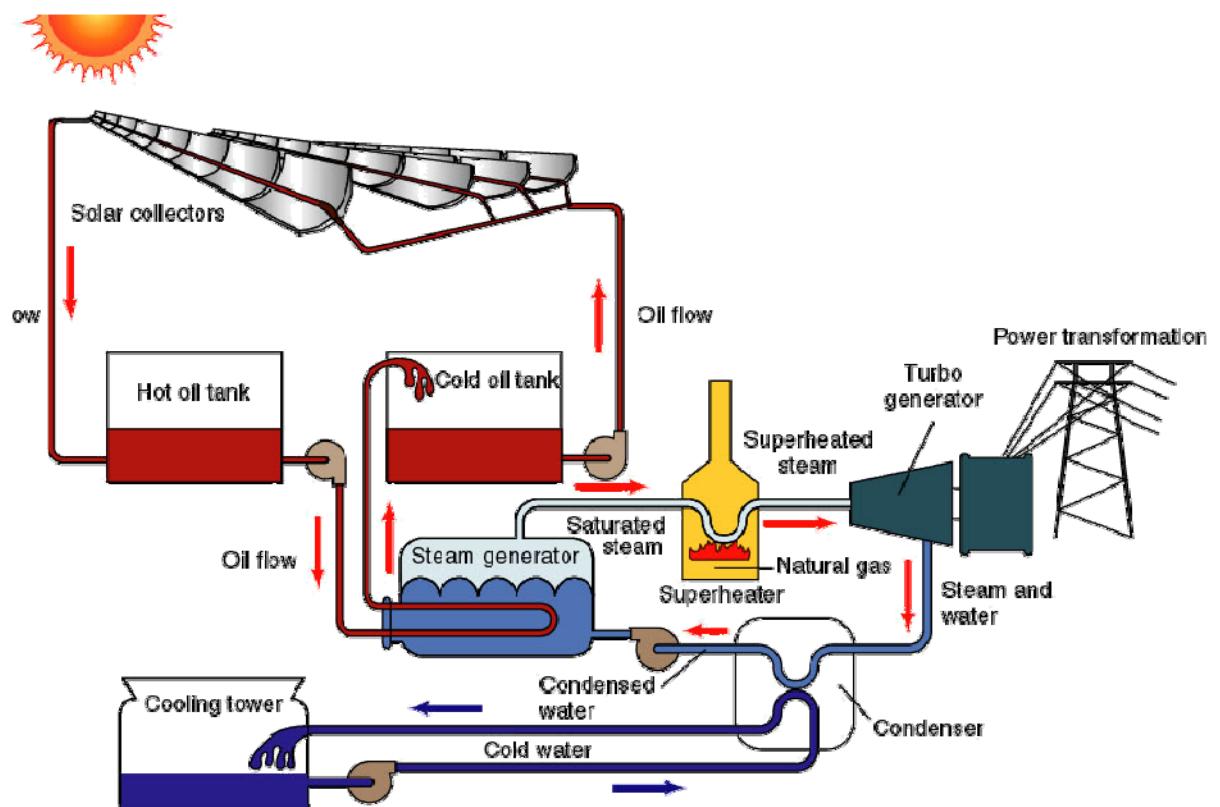
Solarni koncentratori mogu pratiti Sunce samo u jednoj osi i to je obično istok-zapad. Kao kružni proces se uobičajeno koristi Rankineov direktni ili posredni. Usklađivanje dostupnosti energije Sunca i potrošnje se rješava toplinskim spremnicima velikog kapaciteta (otopljene soli). Optimalna snaga postrojenja se računa na oko 200 MWe (najviše zbog površine).

Slika 10.12. ilustrira pilot postrojenje parabolične protočne STE i cijevi kroz koju prolazi medij za preuzimanje topline. Potrebno je oko 20 m^2 površine za 1 kWe.



Slika 10.12. Parabolična protočna solarna TE 30 MWe Kramer Junction, California

Slika 10.13. prikazuje ilustraciju sheme jednog rješenja cijele parabolične protočne STE. Prikazano rješenje nema spremnik toplinske energije, ali ima dodatni izvor topline iz klasičnog goriva za povećavanje ukupnog stupnja djelovanja i osiguravanje rada u trenucima kada nema Sunca.



Slika 10.13. Shema primjera izvedbe parabolične protočne Solarne TE s dogrijavanjem

Solarna termoelektrana sa solarnim tornjem

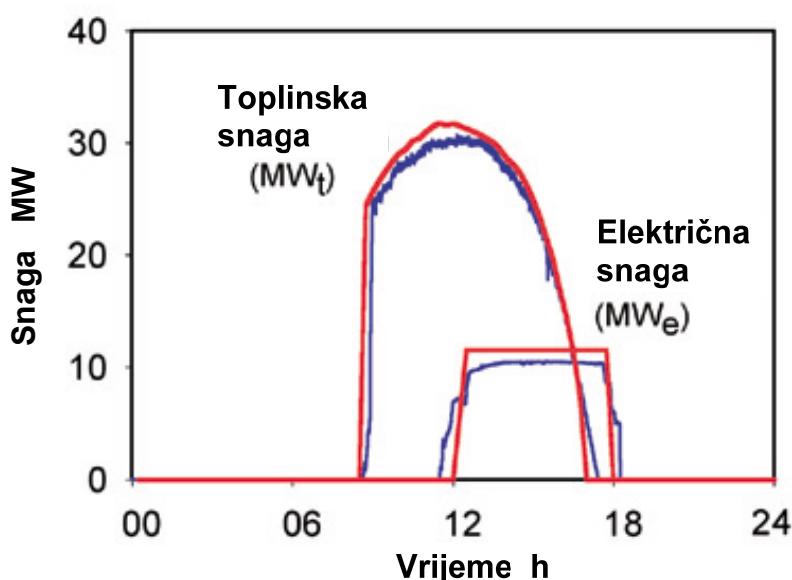
Rješenje STE sa centralnim tornjem prema kome su usmjerena reflektirajuća zrcala vrlo je slično rješeno u ostaku postrojenja paraboličnoj protočnoj izvedbi. Tehnologija sa centralnim tornjem je nešto slabije razvijena.

Ovdje se postižu koncentracije Sunčevih zraka do 800x i temperature u tornju do 560 °C (istopljena dušična sol, organske kapljevine ili zrak). Optimalna snaga se procjenjuje u rasponu od 100 do 100 MWe. Potrebno je oko 20 m^2 površine za 1 kWe. Slika 10.14. ilustrira pilot postrojenja STE sa solarnim tornjem.



Slika 10.14. Solarni toranj 11 MWe (Španjolska, 600 ogledala) i Solar II 10 MWe California (2000 ogledala, 100 m tornj, 40 M\$)

Slika 10.15. prikazuje pozitivan utjecaj toplinskog spremnika na mogućnost pomicanja proizvodnje el. en. prema potrebama. Važnost toplinskog spremnika je identična kao i kod protočnih paraboličnih STE. Kod oba rješenja najveći utjecaj na ukupnu efikasnost imaju refleksija sunčevih zraka i termodinamička pretvorba.



Slika 10.15. Utjecaj spremnika topline na pomak dostupne el. en.

Solarna termoelektrana sa paraboličnim tanjurom

Najmanje razvijena od tri opisane STE je izvedba sa paraboličnim tanjurima (slika 10.13.). Ove STE najmanje izgledaju kao uobičajene termoelektrane jer jedna jedinica ima snagu od 10 do 25 kWe. Kompletan toplinski stroj i generator se nalaze smješteni u fokusu tanjura promjera oko 10 m. Uobičajena izvedba je sa Stirlingovim toplinskim strojem (postoje izvedbe sa 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 STE Sunčeva svjetlost se koncentriira više od 3000x što predstavlja izazov kod realizacije (skupo). STE sa paraboličnim tanjurom karakterizira velika gustoća snage (oko 55 kW/l). Medij u toplinskom stroju postiže temperature od preko 750 °C.

Značajna razlika STE sa paraboličnim tanjurom u odnosu na ostale izvedbe u jediničnoj snazi određuje i potencijal za primjenu kao distribuirani izvor el. en. za izdvojene lokacije i sl.

Trenutno u svijetu postoji više MWe ukupno instaliranih jedinica u svrhe razvoja i probnog rada. Postoje planovi za stotine MWe instalacija.



Slika 10.16. Ilustracija izvedbi STE sa paraboličnim tanjurom

10.3.2. Fotonaponske čelije

Pojavu da svjetlost određene valne dužine kada obasjava neki metal (npr. cink ili natrij) iz njega izbije elektron otkrio je još Becquerel 1939. Objašnjenje ove kvantomehaničke pojave, kojom se može proizvoditi električnu energiju, dao je Einstein 1905. Prva moderna izvedba fotonaponske čelije, koja iskorištava opisani efekt, ostvarena je 1954. u Bell Labs.

Prema podatcima za 2006. u svijetu ima 8400 MWe instalirane snage fotonaponskih čelija. EU ima instalirano preko 40% ukupnog svjetskog kapaciteta, a preko 90% toga je instalirano u Njemačkoj.

Fotonaponsko korištenje Sunčeve energije sa svojim eksponencijalnim rastom od 40% godišnje predstavlja trenutno najbrže rastući novi izvor. Ovako veliki rast predstavlja potencijalni izvor za poremećaje sa dobavom osnovnih sirovina (npr. silicija i indija).

Razvoj i pojavljivanje na tržištu novih tehnologija poput tankog-filma, uz solidan stupanj djelovanja od 10 i više postotaka, predstavlja nadu da će se potrebe za osnovnim sirovinama barem dijelom relaksirati.

Najveći proizvođači fotonaponskih čelija su redom u Japanu, Europi, Kini i SAD-u. Vodeća tri proizvođača su Sharp (JP), Q-Cells (DE) i Kyocera (JP).

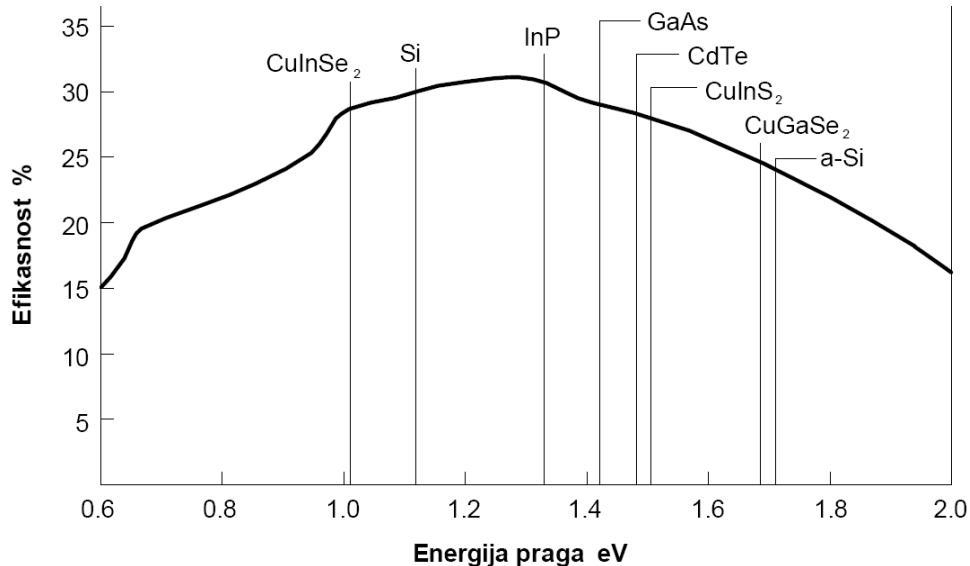


Slika 10. 17. Najveća FN elektrana sa tankim filmom otvorena 2007. u Njemačkoj
(6 MWp, 90000 modula površine 66775 m²)

Fotoefekt kojim se može proizvoditi električna energije nastaje kada foton dovoljne energije pogodi elektron u neutralnom p-n poluvodičkom spoju. Poluvodič p-tipa ima slobodne elektrone i nastaje kada se kristal silicija (4 valentna elektrona) dopira 3-valentnim elementom, npr. borom, a n-tip ima slobodne šupljine (manjak elektrona) i nastaje dopiranjem silicija 5-valentnim elementom, npr. fosforom. Na spoju ova dva tipa poluvodiča, rekombinacijom elektrona i šupljina, nastaje neutralno područje sa električnim poljem. Da bi foton u sudaru prebacio elektron kroz to polje treba dobiti najmanje energiju jednaku tom polju. To praktično znači da svi fotoni koji imaju energiju manju od potrebne ne mogu ostvariti fotoefekt, a svi elektroni koji imaju veću energiju od potrebne ostvaruju izbacivanje samo jednog elektrona. Različiti materijali imaju određeni iznos energije praga ili zabranjenog pojasa.

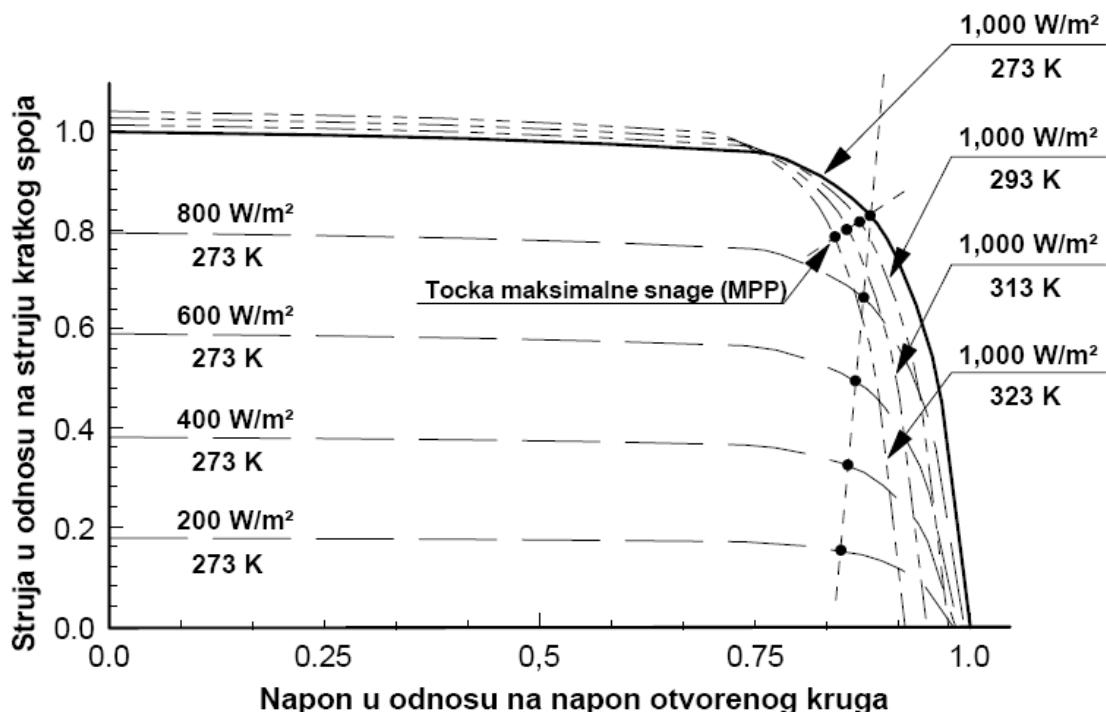
Teorijska iskoristivost Sunčeve svjetlosti za proizvodnju električne energije u fotonaponskoj čeliji sa jednim p-n spojem ograničena je energijom praga kristala i nizom efekata gdje se gubi energija (npr. zagrijavanje i parazitne struje ovisno o temperaturi). Od teorijskog

maksimuma za silicij od 28% na 0 °C u laboratoriju je ostvareno 25%. Praktično se može postići stupanj djelovanja i preko 50% kombiniranjem više p-n spojeva zajedno i drugim naprednim rješenjima (npr. kvantne točke i udubljenja) koja iskorištavaju potpunije spektar Sunčeva zračenja. Napon i maksimalna efikasnost na fotonaponskoj ćeliji ovise o energiji praga poluvodiča (Slika 10.18.).



Slika 10.18. Teorijska efikasnost za razne poluvodičke materijale i prosječne uvjete [43]

Strujno naponska karakteristika FN ćelije je slična onoj poluvodičke diode, ali kao izvor el. en. Za praktične primjene dobro je gledati I-U karakteristiku na nivou modula u koji se FN ćelije spajaju. Način povezivanja FN ćelija u module ovisi o željenom izlaznom naponu i snazi koje se želi postići. Slika 10.19. prikazuje I-U karakteristiku za Si FN ćeliju.



Slika 10.19. Strujno naponska karakteristika FN ćelije u ovisnosti o snazi Sunčeva zračenja i temperaturi [43]

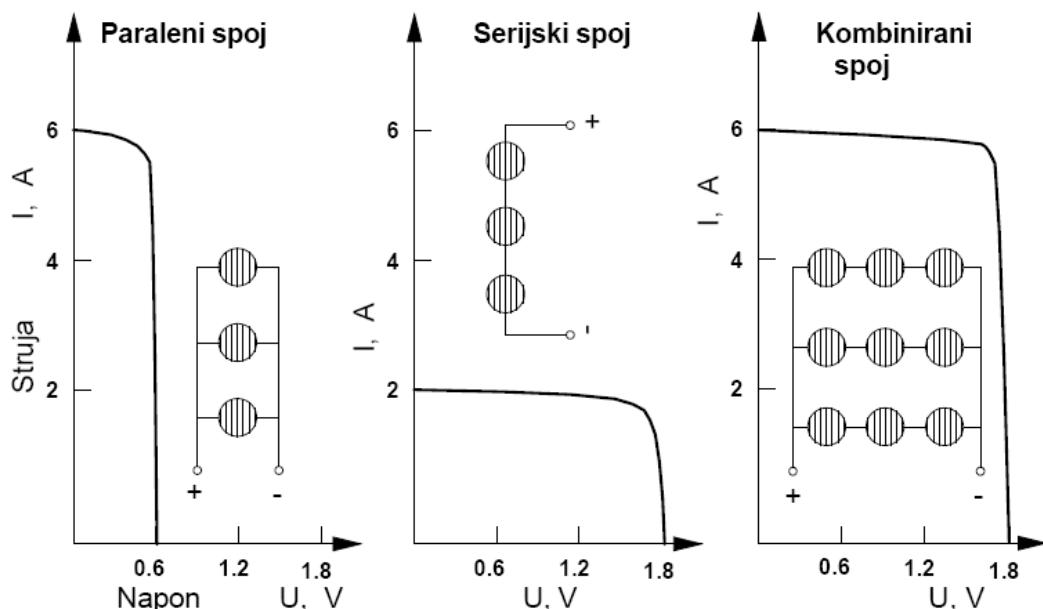
Praktične izvedbe FN celija karakterizira napon otvorenog kruga, struja kratkog spoja te stupanj djelovanja. Kod instalacije FN modula treba paziti na to da stupanj djelovanja FN celije pada sa porastom temperature (skoro 0,5% za $+1^{\circ}\text{C}$), Slika 10.19.

Važna je činjenica da izgled karakteristike FN diode određuju unutrašnji otpori i da se maksimalna snaga na trošilu postiže samo u jednoj točki. Slika 10.19. ilustrira pomicanje točke maksimalne snage ovisno o Sunčevu zračenju i temperaturi. Tablica 10.1 ilustrira osnovne podatke za razne vrste FN celija.

Tablica 10.1 Osnovni parametri za odabrane FN celije

Vrsta celije	$U_{ok} \text{ V}$	$J_{ks} / (\text{mA cm}^{-2})$	$\eta \%$	Proizvodnja
Monokristalična-Si	0,65	30	14- 18	masovna
Polikristalična-Si	0,60	26	~14	masovna
Amorfna-Si	0,85	15	8	masovna
Amorfna-Si, 2 sloja, tanki film			8,8	manje količine
Cd S / Cu ₂ S	0,5	20	12	manje količine
Cd S / Cd Te	0,7	15	10,7	manje količine
Ga In PAs / Ga As	1	25	21	manje količine

Moderne instalacije za FN primjene uključuju uređaje za praćenje točke maksimalne snage ovisno o promjeni opterećenja i promjeni snage Sunčeva zračenja.



Slika 10.20. U-I karakteristika za različita spajanja fotonaponskih celija [43]

Kod primjene FN celija razlikujemo tri segmenta: potrošački proizvodi, otočna proizvodnja i rad na mreži. Daleko najveći⁸ dio primjene je u neekonomičnim instalacijama spojenima na mrežu. Sve ostale primjene su ekonomične. Potrošački proizvodi poput satova i najrazličitijih uređaja imaju svoju dodatnu vrijednost koja opravdava ugradnju FN celija. Samostalne

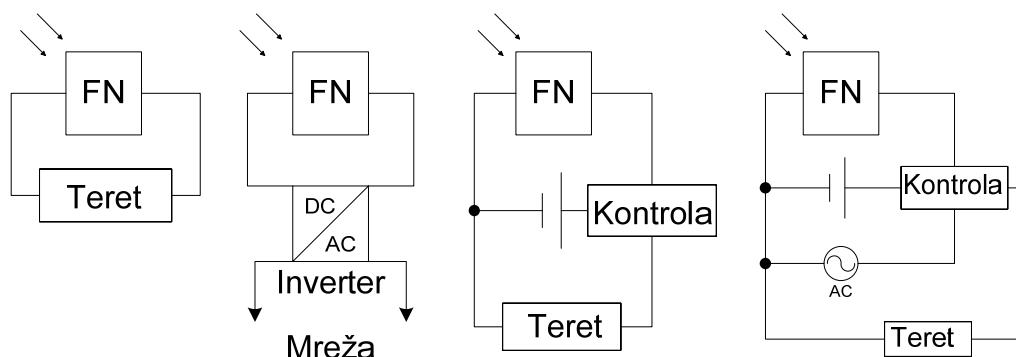
⁸ Preko 70% FN instalacija godišnje bilo spajano na mrežu 2002. Danas je to vjerojatno oko 90%.

instalacije zbog izdvojenosti mogu imati ekonomsku opravdanost bilo u industrijskim primjenama ili u elektrifikaciji udaljenih naselja.

Poticajnim mjerama se stimulira neekonomične FN primjene sa ekološkim i razvojnim argumentima. Djelovanje ekonomije velikih brojeva ima svoj učinak i cijena FN ćelija stabilno se smanjuje. Ovo je posebno izraženo sa ambicioznim uključivanjem Kine u proizvodnju i primjenu FN ćelija. Referentna cijena FN ćelije se obično izražava po vršnoj snazi⁹. Za proizvodnju el. en. iz fotonaponskih ćelija, koja bi bila blizu ekonomičnosti, potrebno je višestruko smanjenje cijene vršne snage (otrpilike 4x na ispod 1 €/W za cijenu od 0,1 €/kWh).

Uobičajeno samostalna primjena FN panela uključuje i uređaj za kontrolu punjenja i pražnjenja baterije za optimalni rad i produljenje životnog vijeka baterije.

Za primjene spojene na mreži akumulatori nisu nužni, osim u hibridnom radu, ali je zato nužan pretvarač istosmjernog u izmjenični napon. Ovisno o propisima za mrežni priključak potrebno je zadovoljiti još neke dodatne kriterije. Npr. FN instalacija ne smije napajati mrežu kada ostane bez glavnog napajanja. Slika 10.21. ilustrira spoj FN sistema na mrežu.

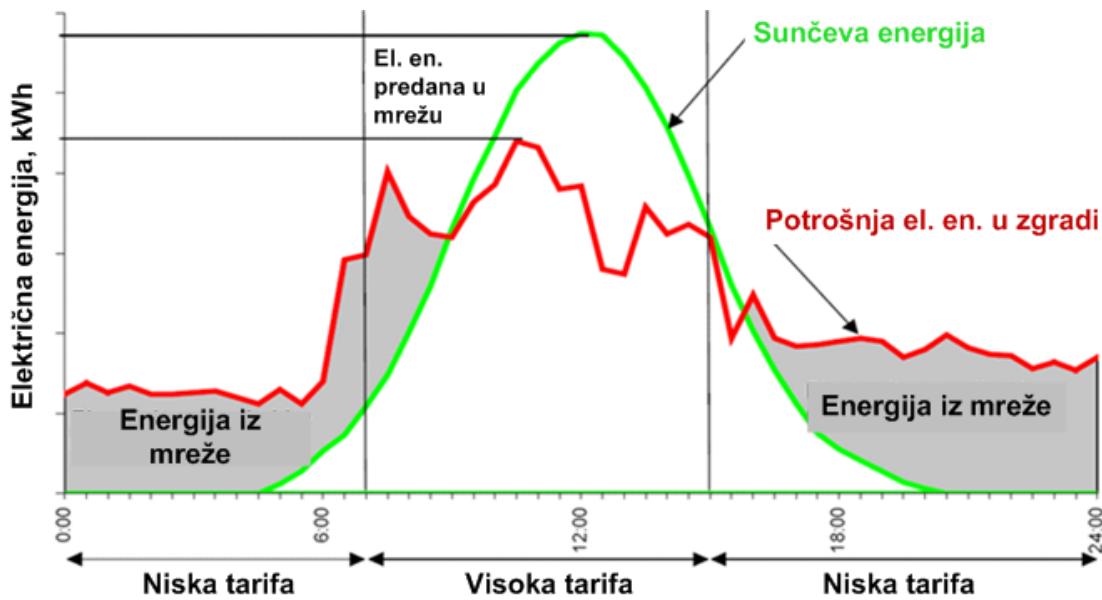


Slika 10.21. Shema priključivanja FN sistema za različite primjene

Pokraj razvoja proizvodnje veliki potencijal za postizanje ekonomičnosti proizvodnje el. en. iz FN instalacija ima internaliziranje eksternih troškova konvencionalnih fosilnih izvora i preciznije valoriziranje cijene el. en. u različitim trenutcima. Slika 10.22. ilustrira profil dostupne Solarne energije i profil potrebe za el. en. tijekom dana.

FN ćelije predstavljaju jedno od najdinamičnijih područja kada je riječ zajedno o istraživanju, razvoju, proizvodnji i primjeni novih izvora energije.

⁹ Vrijednost za 2006. je u razvijenom svijetu blizu 4€/W, a u Kini ispod 3 €/W.



Slika 10.22. Podudarnost Sunčeve energije i potreba za el. en. tijekom dana

10.4. Zaključno

Energija Sunca pokraj toga što je u osnovi većine drugih izvora energije ima i najraznolikije mogućnosti za korištenje. Tu je najprije najrasprostranjenija jednostavna pasivna gradnja i solarni kolektori za ekonomično zagrijavanje. Slijede Solarne termoelektrane sa iskustvom i razvijenošću blizu po ekonomičnosti konvencionalnim izvorima. Na kraju dolaze fotonaponske čelije sa mogućnošću direktnе proizvodnje električne energije. Eksponencijalni rast proizvodnje FN čelija, uz sve veće uključivanje utjecaja na okoliš u cijenu električne energije i razvoj tržišta električne energije predstavljaju podlogu za dugoročnu sve bolju perspektivu korištenja energije Sunca.

Kod korištenja energije Sunca treba uzimati u obzir i vrijednosti za povećavanje energetske sigurnosti te podsticanje ekonomskih aktivnosti uz sve indirektne koristi (zapošljavanje, manji uvoz energije i dr.).

Skladištenje energije

Pojam „skladištenje energije“ odnosi se na transformaciju nekog prijelaznog oblika energije (električna energija, toplinska energija, mehanički rad) u oblik pogodan za pohranu i kasniju povratnu transformaciju. Na taj je način omogućeno korištenje prijelaznog oblika energije kad se za njim ukaže potreba. Ovdje se razmatraju načini transformacije koje posredno omogućavaju pohranu električne i mehaničke energije u svrhu kasnijeg dobivanja električne energije, dok je problematika skladištenja toplinske energije izostavljena iz razmatranja.

Iako se prijelazni oblici energije ne mogu skladištiti, ovdje se transformacija električne energije u neki oblik pogodan za skladištenje i povratna transformacija u električnu energiju pojednostavljeno naziva „skladištenje električne energije“.

Zašto skladištiti energiju?

Postoji niz razloga iz kojih se električna energija skladišti, a moguće ih je razložiti na dva osnovna:

- istovremenost potrošnje i proizvodnje električne energije i
- povremena nedostupnost pojedinih enerenata.

Potreba za trenutnim namirenjem potreba potrošača električne energije predstavlja osnovni uzrok složenosti elektroenergetskog sustava. Naime, veća odstupanja proizvodnje od potrošnje električne energije dovode u pitanje stabilnost rada sustava. U slučajevima kada je potrošnja radne energije znatno odstupa od njezine proizvodnje, dolazi do odstupanja iznosa napona kod potrošača. U slučajevima kad potrošnja jalove energije znatno odstupa od proizvodnje, dolazi do odstupanja iznosa frekvencije.

Povezano s neispunjavanjem uvjeta istovremenosti proizvodnje i potrošnje električne energije javljaju se sljedeći problemi – odstupanje napona, odstupanje frekvencije, stabilnost prijenosnih vodova te stabilnost sustava u cjelini.

Kada se govori o problemu nedostupnosti pojedinih enerenata, prvenstveno se misli na obnovljive izvore energije od kojih je neke nemoguće skladištiti u njihovom primarnom obliku (sunčev zračenje, vjetar, morske mijene....). Kako njihova uloga u elektroenergetskom sustavu raste, potrebno je posvetiti veću pažnju načinima skladištenja energije.

Osnovne značajke spremnika energije

Za izbor odgovarajućeg načina skladištenja energije potrebno je poznavati osnovne značajke spremnika energije, a to su:

- gustoća energije
 - masena gustoća energije: $e_m = E_s / m$ [J/kg]
 - volumna gustoća energije: $e_v = E_s / V$ [J/m³]
 - gdje je E_s [J] količina uskladištene energije
 - m [kg] masa tvari u kojoj se energija skladišti
 - V [m³] volumen tvari u kojoj se energija skladišti
- brzina punjenja E_c (*c* - *charge*) i pražnjenja E_d (*d*- *discharge*);
 - $E_c = dE_s / dt$ [W]

- $E_d = dE_s / dt$ [W]
- trajanje ciklusa skladištenja τ ;
 - $\tau = \tau_c + \tau_s + \tau_d$
 - gdje je τ_c trajanje punjenja
 - τ_s trajanje uskladištenja
 - τ_d trajanje pražnjenja
 - učinkovitost skladištenja $\eta = E_d/E_c = 1 - E_l/E_c$.
 - gdje su E_l [J] gubici prilikom punjenja, uskladištenja i pražnjenja skladišta.

Podjela spremnika energije

Navedene značajke dakako ovise o načinu skladištenja energije. Prema vrsti energije koju skladištim, razlikujemo sljedeće spremnike energije:

- spremnici elektromagnetske potencijalne energije;
- spremnici mehaničke energije;
- spremnici unutrašnje kaloričke energije.

Spremnici elektromagnetske potencijalne energije

Elektromagnetska potencijalna energija rezultat je djelovanja elektromagnetskih sila. Ove spremnike možemo podijeliti na

- elektrokemijske spremnike (akumulatori i punjive baterije),
- spremnike magnetske energije (supravodiči) i
- spremnike kemijske energije (električne potencijalne energije na razini molekula, npr. vodik).

Elektrokemijski spremnici

U elektrokemijskim spremnicima kemijska energija neposredno se transformira u električnu energiju, i obratno. To su galvanski članci kojima je elektrokemijsko djelovanje reverzibilno.

Spremnik se sastoji od kemijskih tvari sposobnih za proizvodnju električne struje sve dok traju reakcije koje izazivaju kemijske promjene. Nakon što se aktivne tvari sadržane u spremniku „potroše“ u kemijskim reakcijama, spremnik se dovodi u početno stanje pomoću električne struje koja za vrijeme regeneracije teče u smjeru suprotnom od struje proizvedene u spremniku.

Elektrokemijske spremnike dijelimo na akumulatore i punjive baterije. Potrebno je spomenuti da se na engleskom jeziku i akumulator i baterija nazivaju *battery* zbog čega nekad dolazi do nejasnoća u prijevodima na hrvatski jezik.

Akumulator

Iako konstruiran još 1859. godine, olovni akumulator je i danas najzastupljeniji tip akumulatora. Osnovni mu je nedostatak velika težina pa razvoj akumulatora danas ide u smjeru smanjenja težine.

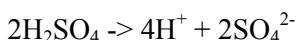
Kako svi akumulatori rade na istom principu, ovdje je prikazan rad olovnog akumulatora, kao najrasprostranjenijeg.

Olovni se akumulator sastoji od

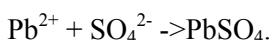
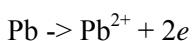
- pozitivne elektrode kojoj je aktivna masa olovni dioksid PbO_2 ,
- negativne elektrode kojoj je aktivna masa spužvasto olovo Pb i
- elektrolita – sumporne kiseline H_2SO_4 , razrijedene destiliranom vodom.

Prilikom pražnjenja, na obje elektrode nastaje olovni sulfat PbSO_4 .

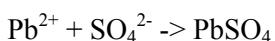
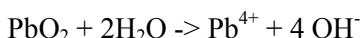
U elektrolitu je sumporna kiselina ionizirana



Na negativnoj elektrodi se olovo ionizira (oksidira) predajući dva negativna naboja i onda se taloži kao olovni sulfat:



Na pozitivnoj elektrodi olovni dioksid ide u otopinu dajući četverovalentni ion olova, koji se reducira na dvovalentni primajući dva negativna naboja i onda se taloži kao olovni sulfat:



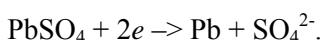
Kao rezultat, na objema elektrodama je nastao olovni sulfat, a dva električna naboja prešla su kroz članak od pozitivne na negativnu elektrodu.

Pri punjenju se zbivaju obrnute reakcije i električni se naboji prenose u pozitivnom smjeru.

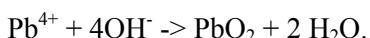
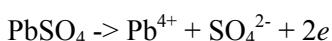
U elektrolitu nalaze se OH^- ioni uslijed ionizacije vode



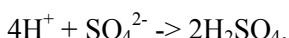
Na negativnoj elektrodi se primljenim električnim nabojima iz olovnog sulfata reducira olovo



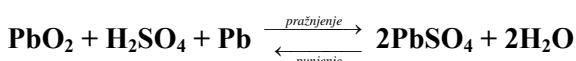
Na pozitivnoj elektrodi se olovo oksidira u četverovalentni ion i konačno daje olovni dioksid:



Na objema se elektrodama stvara sumporna kiselina

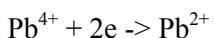
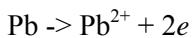


Navedene jednadžbe za punjenje i pražnjenje daju reverzibilnu jednadžbu punjenja i pražnjenja olovnog akumulatora



Iz te se jednadžbe vidi da se pri pražnjenju akumulatora troši sumporna kiselina iz elektrolita i oslobađa voda koja ulazi u elektrolit, zato se elektrolit razrjeđuje. Pri punjenju se gustoća elektrolita stalno povećava zbog trošenja vode i oslobađanja sumporne kiseline.

Iz jednadžbi elektrodnih procesa



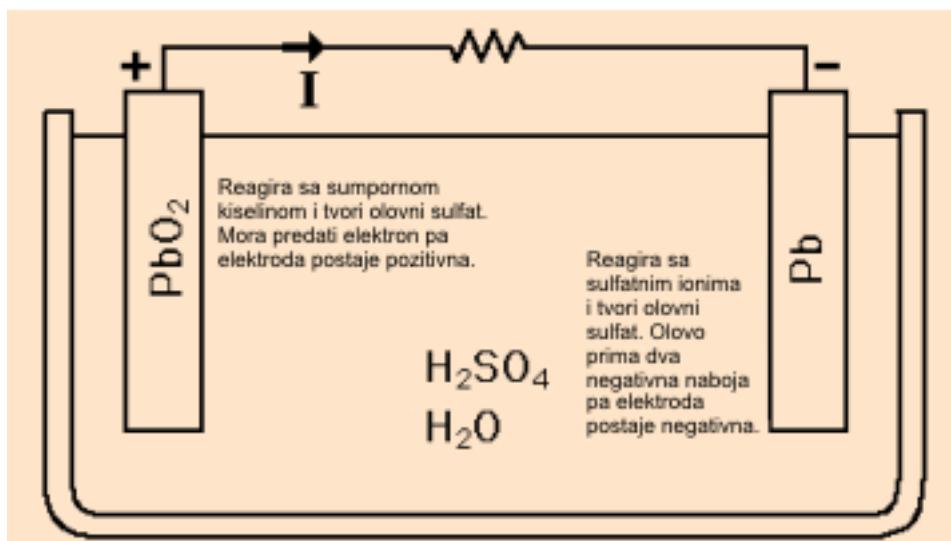
vidi se da se prenose dva električna naboja za dva atoma Pb odnosno molekulu PbO_2 . Struja koju daje akumulator iznosi:

$$I = n F [A],$$

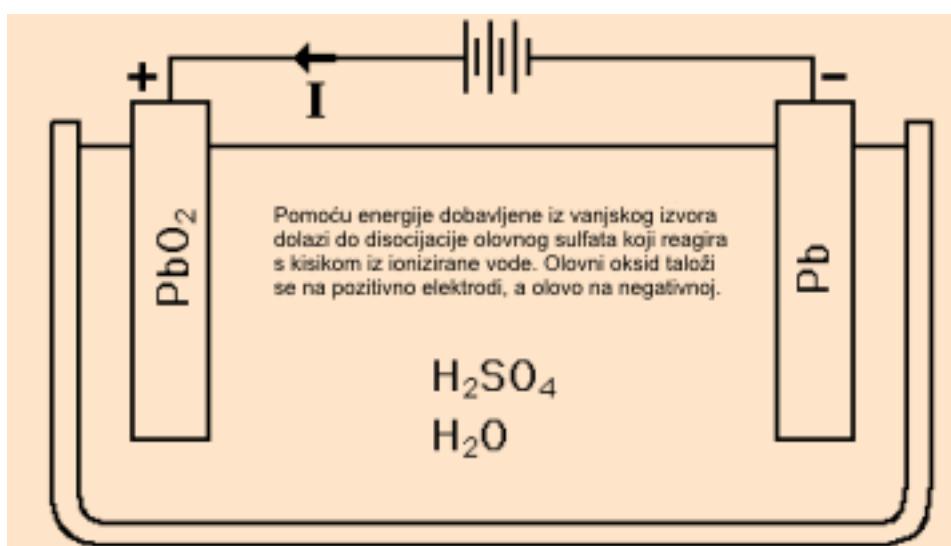
gdje je n broj molova elektrona po molu sumporne kiseline ($=1$),

F – Faradayeva konstanta (naboj sadržan u molu elektrona, $N_A e = 96487 \text{ C/mol}$).

Pojednostavljen prikaz pražnjenja i punjenja akumulatora daju Slika 1 i Slika 2.



Slika 1 Pražnjenje olovnog akumulatora



Slika 2 Punjenje olovnog akumulatora

Zadatak 1

Olovni akumulator izlaznog napona 12 V daje struju jakosti 60 A. Izračunajte trenutnu snagu koju akumulator može dati trošilu i masenu potrošnju sumporne kiseline.

$$U = 12 \text{ V}$$

$$I = 60 \text{ A}$$

$$P = 12 \times 60 = 720 \text{ W}$$

Struja I koju daje akumulator jednaka je $I = nF = F$.

Broj molova sumporne kiseline koja se troši na katodi dvostruko je manji od broja molova elektrona. Za svaki mol reagirale sumporne kiseline, iz katode se ispušta se 1 mol elektrona.

$$N_{\text{H}_2\text{SO}_4\text{-katoda}} = N_{\text{elektrona}} = (I/F)/2 = I/2F$$

Potrošnja sumporne kiseline na anodi jednaka je potrošnji na katodi pa je ukupna potrošnja sumporne kiseline dvostruko veća od potrošnje na jednoj elektrodi.

$$N_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 2 N_{\text{H}_2\text{SO}_4\text{-katoda}} = N_{\text{elektrona}} = I/F = 60 \text{ A}/(6,022e23 \times 1,6E-19) = 6,23 \text{ mol/s}$$

$$m_{\text{H}_2\text{SO}_4} = N_{\text{H}_2\text{SO}_4} \times M_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 6,23 \times (2+32+4 \times 16) = 610,5 \text{ g/s}$$

Punjive baterije

Princip rada punjivih baterija isti je kao i kod olovnog akumulatora. U kemijskim reakcijama unutar napunjene baterije priključene spojene na trošilo oslobađaju se elektroni, što traje dok se aktivna tvar ne istroši. Priključivanjem baterije na vanjski izvor električne energije, elektroni teku u suprotnom smjeru i omogućavaju odvijanje kemijskih reakcija u kojima se aktivna tvar regenerira.

Danas su najčešće sljedeće baterije:

Nikal - kadmijska	katoda: nikal anoda: kadmij najveći broj punjenja i pražnjenja (više od 1500 ciklusa), niska gustoća energije memorijski efekt, ali smanjen zahvaljujući razvoju kadmij je otrovan, pa predstavlja opasnost po okoliš
Nikal-metal hidridna	slične NiCd, ali je anoda hidridna legura, pa je manje štetna po okoliš može imati nekoliko puta veći kapacitet od NiCd baterije iste veličine manje izražen memorijski efekt koristi se u hibridnim vozilima (npr. Toyota Prius) i potrošačkoj elektronici
Litij-ionska baterija	velika gustoća energije posve uklonjen memorijski efekt katoda: LiCoO ₂ , LiMn ₂ O ₄ , LiNiO ₂ ili Li-Ph anoda: ugljik primjena: laptop, mobitel, MP3 playeri, automobili (npr. Tesla Motors)

Spremnici magnetske energije

U ovakvim je spremnicima energija pohranjena u magnetskom polju uzrokovanim tokom istosmjerne struje kroz supravodljivu zavojnicu. Supravodiči su materijali koji na niskim temperaturama gube električni otpor i pritom iz svoje unutrašnjosti istiskuju magnetsko polje.

Naime, električni otpor posljedica je raspršenja elektrona u gibanju na primjesama i drugim defektima kristalne rešetke. Na niskim se temperaturama elektroni povezuju u parove (tzv. Cooperove parove), zahvaljujući čemu raspršenje postaje nedjelotvorno i javlja se supravodljivost. Zbog pada električnog otpora na nulu, električna struja može bez gubitaka teći supravodljivim krugom tijekom neodređeno dugog vremena.

Ograničenja su

- temperatura – potrebno je čitavo vrijeme održavati nisku temperaturu,
- magnetsko polje – ne smije premašiti kritičan iznos,
- struja – ne smije premašiti kritičan iznos i
- frekvencija - ne smije premašiti kritičan iznos.

Energija pohranjena u magnetskom polju zadana je formulom

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad L = \mu \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l}$$

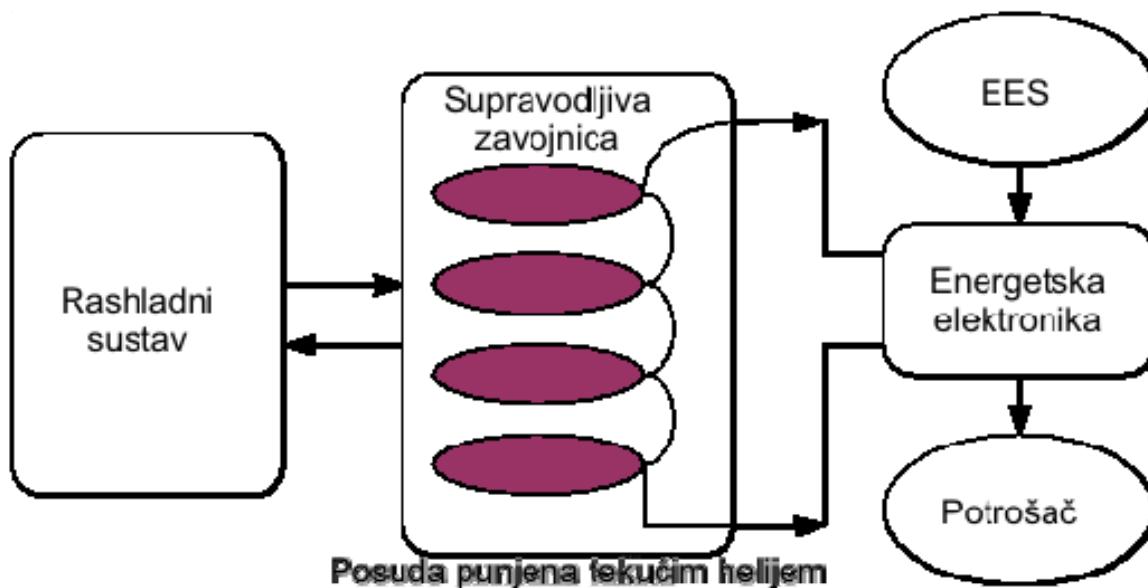
gdje je I struja [A]

L magnetska indukcija [H] ovisi o magnetskom toku za feromagnetske materijale

μ produkt relativne permeabilnosti i permabilnosti praznog prostora

Sustav za skladištenje energije sastoji se od tri dijela (Slika 3):

- supravodljiva zavojnica
- energetska elektronika
- hladioc.



Slika 3 Sustav za skladištenje energije pomoću supravodljive zavojnice

Energetska elektronika sastoji se od ispravljača i izmjenjivača u kojima gubici iznose 2-3%.

Prednosti ovakvog sustava su sljedeće:

- električna energija je gotovo trenutno raspoloživa
- visoka učinkovitost, veća od 95%
- nepokretni dijelovi => pouzdanost.

Spremnici kemijske energije

Kemijska energija je oblik unutrašnje energije akumuliran u tvari na razini atoma. To je u stvari električna potencijalna energija akumulirana u rasporedu atoma u molekuli. Prilikom pohrane, u kemijskim pretvorbama nastaju molekule u čijem je rasporedu atoma akumulirana veća električna potencijalna energija negoli u molekulama koje ulaze u reakciju. Kada se govori o spremnicima kemijske energije prvenstveno se misli na vodik.

Potrebno je istaknuti da vodik ne predstavlja izvor energije (osim u kontekstu nuklearne fuzije, čime se ovdje ne bavimo), već je on spremnik odnosno nositelj energije.

Proizvodnja vodika u razdobljima kad se javlja „višak“ nekog oblika energije tehnološki je riješena. Mogućnost skladištenja vodika, transporta do mjesta potrošnje, neškodljivost uporabe po okoliš te širok spektar mogućih primjena (u proizvodnji toplinske i električne energije te u transportu) mogli bi u budućnosti osigurati puno važniji položaj vodika no što je današnji. Zagovornici uporabe vodika ističu da vodik u potpunosti može zamijeniti fosilna goriva te na taj način preuzeti njihovu današnju ulogu i postati osnovni pokretač gospodarstva i razvoja u cjelini. Takav scenarij često se naziva i „vodikovo gospodarstvo“ (eng. hydrogen economy).

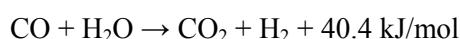
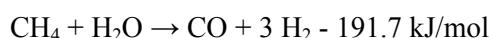
Ako se zanemare tehnološke zapreke koje su po svojoj prirodi rješive (npr. još uvijek preskupe gorivne ćelije), osnovna zapreka prijelazu na vodikovo gospodarstvo su postojeći energetski sustav koji zadovoljava energetske potrebe svojih korisnika te ogromna ulaganja koja su potrebna za uspostavu novog energetskog sustava temeljenog na uporabi vodika.

Neovisno o projekcijama uloge vodika u budućnosti, ovdje je opisana proizvodnja vodika u smislu skladištenja energije. Vodik se danas proizvodi iz ugljikovodika, najbolje prirodnog plina, ili iz vode - elektrolizom.

Ono o čemu valja voditi računa je činjenica da je za proizvodnju vodika potrebna energija. Kada se razmatra utjecaj uporabe vodika na okoliš, ne smije se zanemariti porijeklo energije korištene u njegovoj proizvodnji i onečišćenje nastalo prilikom dobivanja te energije. Dakle, iako je uporaba vodika kao goriva posve u skladu s okolišem (u reakciji vodika s kisikom oslobođa se energija i vodena para), ako prilikom njegove proizvodnje dolazi do ispuštanja onečišćujućih tvari, uporaba vodika ipak predstavlja opterećenje okolišu.

Proizvodnja vodika iz ugljikovodika

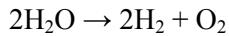
Vodik se danas često proizvodi iz prirodnog plina, u sljedećim kemijskim reakcijama:



Osnovni problem koji se tu javlja je problem ispuštanja CO₂ iz proizvodnog procesa. Također, prirodni plin predstavlja emergent kojeg je moguće skladištiti, te proizvodnja vodika kao nosioca energije zbog toga nije opravdana osim u smislu zaštite okoliša.

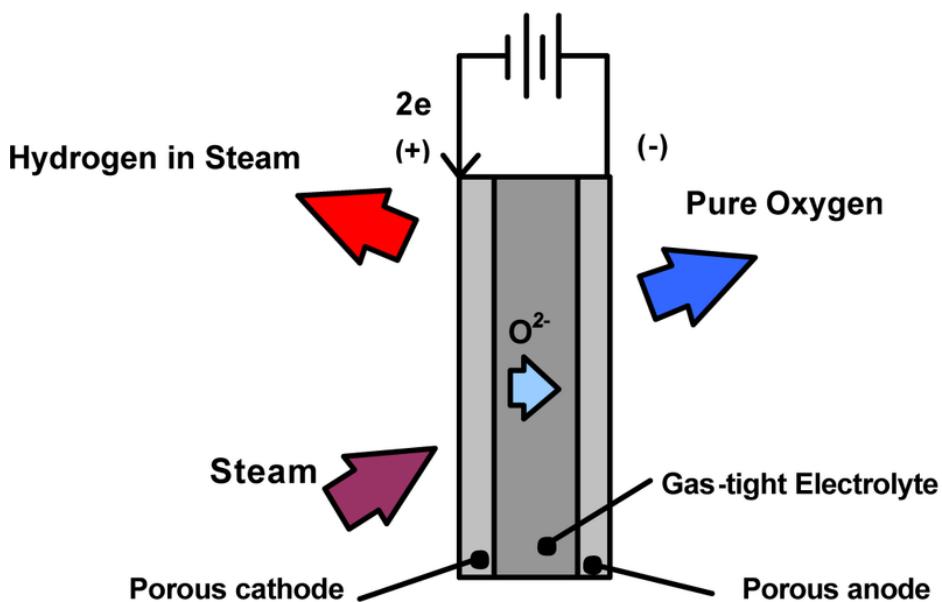
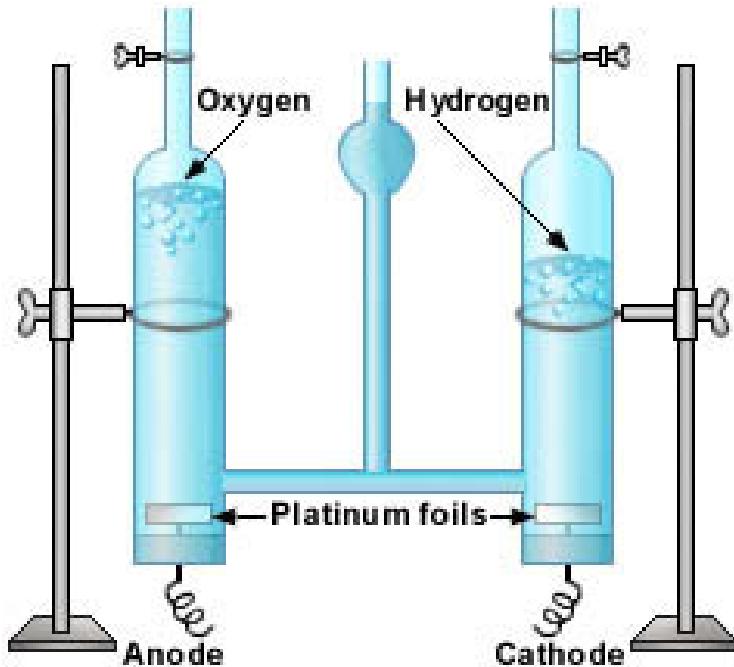
Proizvodnja vodika iz vode

Postupak elektrolize ilustriran na slici omogućava proizvodnju vodika, prema sljedećoj reakciji:



pri čemu je voda u tekućem stanju, a vodik i kisik u plinovitom. Međutim, električna energija potrebna za odvijanje reakcije skuplja je od tako proizvedenog vodika.

Učinkovitiji proces od kojeg se više očekuje je tzv. visokotemperaturna elektroliza, ilustrirana na donjoj slici. Takav je postupak efikasniji jer se dio energije potrebne za elektrolizu dobiva iz toplinske energije (na 2500°C dolazi do cijepanja vode bez potrebe za električnom energijom). Danas se ovaj proces razmatra u kombinaciji s nuklearnim izvorom toplinske i električne energije. Prednost takve opcije je mogućnost reguliranja proizvodnje u nuklearnoj elektrani prebacivanjem na proizvodnju vodika u doba niske potrošnje električne energije.



Spremniči mehaničke energije

Spremniči mehaničke energije možemo podijeliti na kinetičke i gravitacijske. Kinetički spremniči pohranjuju energiju kretanja, a u gravitacijskim spremnicima pohranjena je gravitacijska potencijalna energija mase u mirovanju.

Kinetički spremniči

U svakom tijelu u pokretu pohranjena je kinetička energija ovisna o njegovoj masi i brzini. Za skladištenje energije koriste se spremniči koji se temelje na rotacijskom gibanju, tzv. zamašnjaci.

Sustav za pohranu energije radi tako da vanjski izvor energije predaje svoju energiju zamašnjaku, koji ubrzava do svoje maksimalne brzine. Energija pohranjena u zamašnjaku dana je izrazom

$$E = \frac{I\omega^2}{2} \quad I = \int r^2 \rho dV$$

gdje je I moment inercije zamašnjaka, a ω kutna brzina.

Ako se sustav napaja električnom energijom, električni motor pokreće zamašnjak u kojem se akumulira energija rotacije. Ako motor izgubi napajanje, prebacuje se u generatorski režim rada i napaja potrošače električnom energijom. Pritom zamašnjak pokreće rotor generatora.

Komercijalni sustavi za skladištenje energije pomoću zamašnjaka koriste se za besprekidno napajanje i za održavanje kvalitete električne energije u sustavima s obnovljivim izvorima energije. Broj okretaja obično iznosi do 4000 okr/min. U pravilu su napravljeni od metala.

Napredni sustavi izrađuju se od ugljičnih vlakana, a broj okretaja kreće se od 20 000 do 100 000 okr/min. Da bi se gubici zbog trenja sveli na najmanju moguću mjeru, zamašnjak rotira u vakuumu, na magnetskim ležajevima. Brzo punjenje obično traje manje od 15 minuta.

Razvoj zamašnjaka kreće se u dva smjera – eksperimentiranje s oblicima i razvoj novih materijala.

Učinkovitost ovakvih sustava obično iznosi do 90%.

Spremniči gravitacijske potencijalne energije

Ovi se spremniči zasnivaju na pohrani energije položaja u gravitacijskom polju, koja je proporcionalna masi tereta i visini na kojoj se teret nalazi. S obzirom da je gustoća energije vrlo niska (dizanjem tereta od 1 t na visinu od 10m, potencijalna energija iznosila bi samo 0,0273 kWh), jasno je da se mora raditi o velikoj masi tvari jednostavne za rukovanje. Ukratko, radi se o skladipštenju gravitacijske potencijalne energije vode i njezinom iskorištavanju u hidroelektrani.

U tu se svrhu moraju koristiti dva bazena – donji i gornji. U razdobljima visoke potrošnje električne energije, kad je njezina cijena visoka, postrojenje radi kao hidroelektrana: voda se spušta iz gornjeg spremnika u donji, a na svom putu pokreće turbinu i generator. U razdobljima kad je cijena električne energije niska, generator se prebacuje u motorski režim rada (pokretan električnom energijom iz mreže), turbina služi kao pumpa, i voda se prebacuje iz donjeg u gornji spremnik.

Ukupna učinkovitost skladištenja gravitacijske potencijalne energije vode iznosi do 80%. Gubici energije koji se javljaju u procesu punjenja i pražnjenja spremnika nastaju jer voda isparava iz bazena, dio vode zaobilazi lopatice turbine te zbog trenja.

Prednosti leže u tome što se radi o posve poznatoj i razvijenoj tehnologiji visoke pouzdanosti i niske cijene održavanja, te što ovakav spremnik omogućava brzi start (do 3 minute).

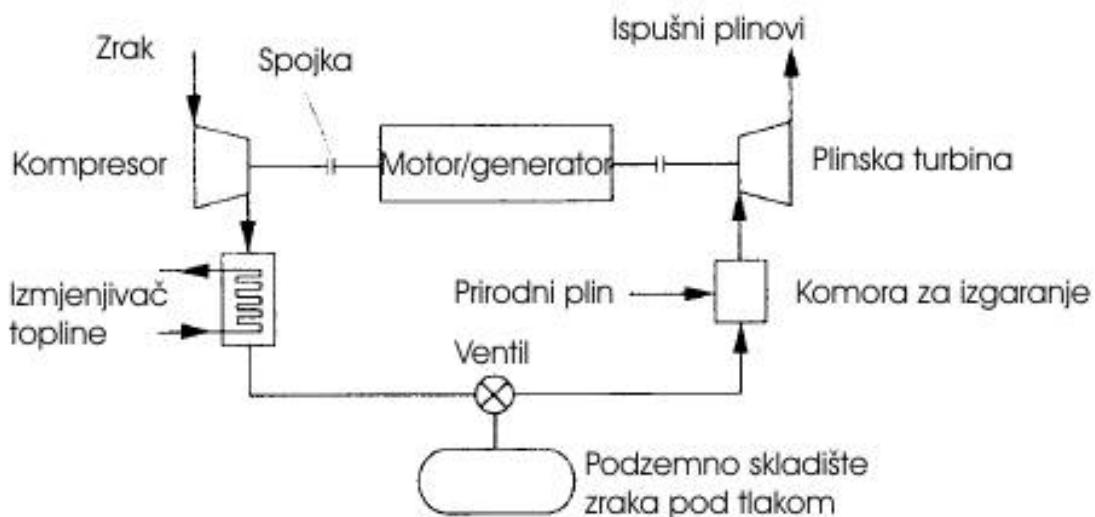
Nedostaci su veliko zauzeće zemljišta (zbog niske gustoće gravitacijske potencijalne energije) i dugotrajna izgradnja.

Spremnići unutrašnje kaloričke energije

Skladištenje unutrašnje kaloričke energije temelji se na skladištenju velikih količina zraka pod tlakom. Zrak se pohranjuje u podzemne spremnike, koji mogu biti prirodni (podzemni džepovi) ili umjetni (najčešće rudnici).

U razdobljima niske potrošnje električne energije, a povezano s time i njezine niske cijene, zrak se kompresorom tlači u podzemni spremnik. Energija predana zraku pohranjuje se u obliku njegove unutrašnje kaloričke energije.

Najčešće se koristi rješenje prema kojem se zrak koji izlazi iz turbine pohranjuje u spremnik pod tlakom i, kad je potrebno, vraća se u turbinu (Slika 4). Na taj se način postiže bolje iskorištenje goriva.



Slika 4 Sladištenje energije kompresijom zraka

Trenutno u komercijalnom pogonu postoje dva ovakva sustava – u Njemačkoj, snage 290 MW, i u SAD, snage 100 MW.

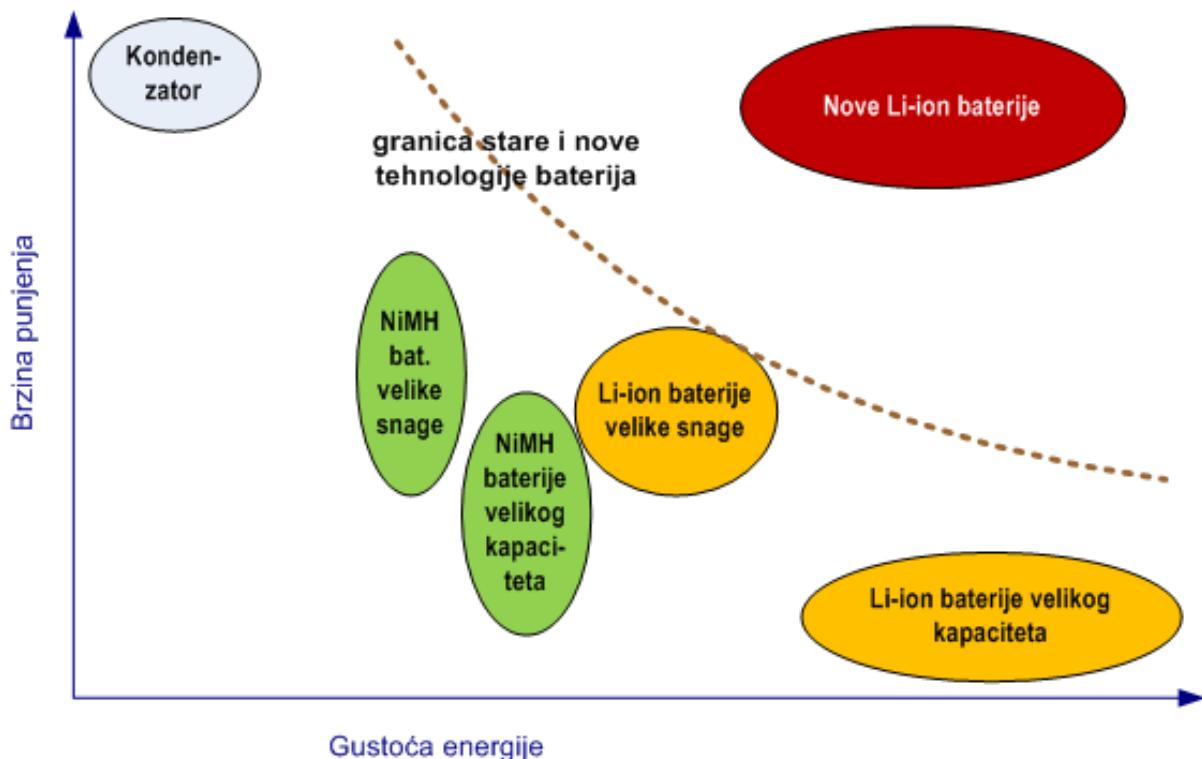
Zaključak

Danas postoje različiti načini skladištenja elektrokemijske, mehaničke i unutrašnje kaloričke energije, u različitim fazama razvoja i komercijalizacije. Svaki način ima svoje prednosti i nedostatke, te područje primjene.

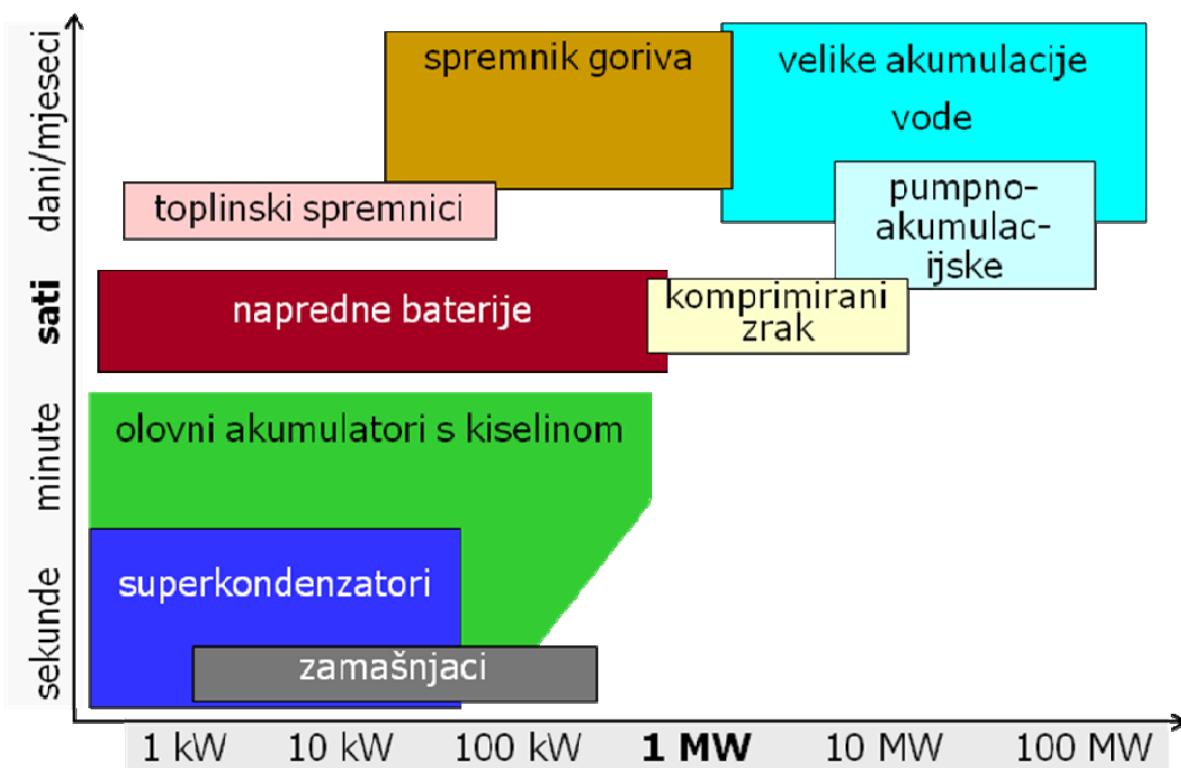
Najvažniji elementi ocjene pojedinog spremnika energije su:

- snaga i količina energije
- gustoća energije
- učinkovitost i brzina punjenja/praznjenja
- trajnost pohrane energije
- cijena, trajnost, održavanje, sigurnost.

Slike koje slijede prikazuju usporedbu različitih spremnika.



Slika 5 Usporedba baterija prema brzini punjenja i gustići energije



Slika 6 Usporedba spremnika energije prema vremenu koje mogu osigurati određenu snagu