

Energijeske tehnologije

Uvodna razmatranja

O predmetu i osnovnim pojmovima

Vladimir Mikuličić, Davor Grgić, Zdenko Šimić, Marko Delimar

FER, 2014.



Teme:

1. Organizacija i sadržaj predmeta
- 2. Uvodna razmatranja**
3. O energiji
4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama
5. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
6. Geotermalna energija
7. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
8. Potrošnja električne energije
9. Prijenos i distribucija el. en.
10. Energija Sunca
11. Energija vjetra
12. Energija biomase, gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
13. Skladištenje energije
14. Energija, okoliš i održivi razvoj

O čemu ćemo govoriti

- o nakani predmeta, čime ćemo se baviti, kako i zašto
- o važnosti opskrbe (električnom) energijom
- o „proizvodnji“ i „potrošnji“ (električne) energije
- o elektroenergetskom sustavu i električnoj energiji
- o posebnostima elektroenergetskog sustava
- o šest „naj“ elektroenergetskog sustava (EES-a)
- o opskrbi energijom
- o ilustrativnim pitanjima i zadacima
- što treba znati (naučiti)

Nakana predmeta

Nakana je predmeta predočiti i protumačiti cjelokupnu (neiskriviljenu) sliku o energiji, o „proizvodnji” i opskrbi energijom (o „problemu opskrbe energijom”, mogućnostima i načinima ublažavanja i rješavanja problema) i o korištenju energijom (uporabi, „potrošnji” energije).

Učinit ćemo to promatrajući i razmatrajući energetske pretvorbe i procese u danas najvećem tehničkom sustavu za opskrbu energijom, točnije električnom energijom, elektroenergetskom sustavu, kao i u uređajima za opskrbu električnom energijom.

Zbog toga bavit ćemo se:

Čime ćemo se baviti?

- pravilnostima koje upravljuju pretvorbama (najrazličitijih) oblika energije u mehanički rad (električnu energiju) u postrojenjima (elektranama) i uređajima za „proizvodnju“ električne energije,
- energetskim procesima u elektroenergetskom sustavu: „proizvodnjom“, prijenosom, razdiobom i uporabom („potrošnjom“) električne energije,
- „problemom opskrbe energijom“ i utjecajem elektroenergetskog sustava na okoliš i društvo

Kako?

Primjenjujući

- princip očuvanja mase,
- princip očuvanja energije (prvi glavni stavak termodinamike),
- jednadžbu stanja idealnog plina i
- princip rasta entropije (drugi glavni stavak termodinamike)

na fluide koji omogućuju **preuzimanje** energije, **pohranjivanje**, **prenošenje**, **pretvorbu** energije u **eksergiju** i **predaju** energije i eksergije korisnicima

Zašto?

- energija, energetske pretvorbe i procesi materijalna su osnova svake civilizacije
- dostupni oblici energije određuju stupanj razvoja te civilizacije
- tehnološki (i industrijski) razvoj civilizacije prestaje s iscrpljenjem izvora energije, prestaje s prestankom odvijanja energetskih procesa
- „naša“ civilizacija počiva na električnoj energiji i na njezinoj pretvorbi u **korisne oblike energije** i omogućavanju **komuniciranja** i **„procesiranja znanja“**

Energija, eksergija, anergija

- „proizvodnja” i „potrošnja” (električne) energije?
- princip očuvanja energije (1. glavni stavak termodinamike)
- „problem opskrbe energijom”
- potrošnja **eksergije**, gubitci eksersgije
- proizvodnja eksersgije
- **anergija**
- glavni „stavci” termodinamike

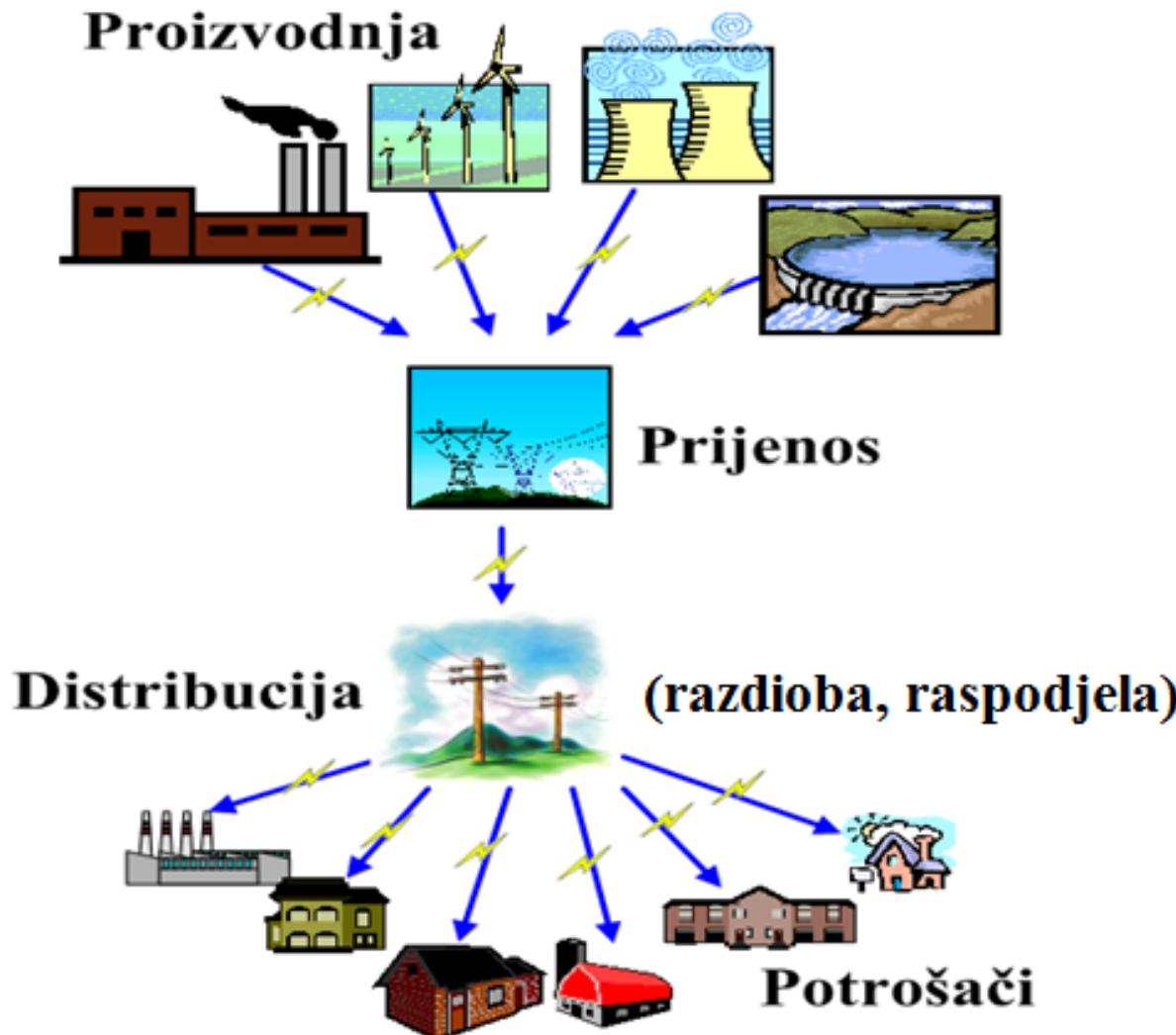
Energetski proces

- proces preobrazbe jednih oblika energije u druge

Elektroenergetski sustav (EES)

- **postrojenja (elektrane)** za proizvodnju električne energije (termoelektrane, nuklearne elektrane, hidroelektrane, vjetroelektrane, solarne termoelektrane i solarne fotonaponske elektrane),
- **rasklopna postrojenja** za razvod i transformaciju električne energije,
- **vodovi za prijenos i vodovi i kabeli za rasporjeđuju** (razdiobu, distribuciju) električne energije,
- različiti (mnogobrojni) **uredaji za vođenje, upravljanje, zaštitu, mjerjenje, kontrolu i signalizaciju rada** elektroenergetskog sustava, te
- **potrošački uredaji, motori i aparati** u kojima se električna energija pretvara u **korisne oblike energije**, oblike neophodno potrebne za održavanje ljudskog života i aktivnosti: **(mehanički) rad, toplinsku, kemijsku i rasvjetnu energiju**

Shema elektroenergetskog sustava



O elektroenergetskom sustavu

- **najveći**
- **najrasprostranjeniji**
- **najutjecajniji**
- **najneophodniji**
- **najskuplji**
- **najkomplikiraniji sustav za opskrbu energijom**

Zašto?

Zbog prirode električne energije:
ona je **prijelazni oblik energije.**

O prednostima uporabe električne energije

- energija (eksergija) na kućnom pragu omogućuje:
 - najjednostavniju, najpouzdaniju, najsigurniju, najbržu, najčistiju, najudobniju i, posljedično, u brojnim slučajevima i najekonomičniju opskrbu energijom (eksergijom)
 - smanjivanje štetnog utjecaja energetskih pretvorbi na okoliš
 - iskorištavanje **nekonvencionalnih primarnih oblika** energije
 - održivi razvoj

O prednostima uporabe električne energije

■ ublažuje problem:

- iscrpljivanja neobnovljivih prirodnih izvora
- onečišćenja ciklički iskorištavanih prirodnih izvora

Primarni oblici energije

- nalaze se u prirodi, svrstavaju se prema nositeljima (gorivima) u
 - **konvencionalne** (ustaljene koji se danas obično i najčešće upotrebljavaju)
 - **nekonvencionalne** (neustaljene oblike primarne energije)
- dijele se prema:
 - oblicima energije (primarni oblici energije)
 - obnovljivosti nositelja (obnovljivi, neobnovljivi)
 - tehničkoj mogućnosti i ekonomskoj opravdanosti iskorištavanja
 - mogućnosti transporta
 - mogućnosti uskladištanja

O posebnostima elektroenergetskog sustava

1. proizvodnja = potražnji (potrošnji) + gubici proizvodnje, prijenosa i razdiobe
2. velika brzina odvijanja prijelaznih procesa u elektroenergetskom sustavu
3. proizvodnju i potrošnju **radne** električne energije izmjenične struje prati proizvodnja i potrošnja **jalove** električne energije i snage kao posebne specifičnosti u odnosu na ostale oblike energije

O posebnostima elektroenergetskog sustava

4. postojanje stalne i velike neravnomjernosti potražnje električne energije tijekom godine, mjeseca, tjedna, dana pa i sata
5. 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

O posebnostima elektroenergetskog sustava

6. komplikiranost proračuna
7. povezanost s, doslovce, svim granama gospodarstva što znatno otežava planiranje razvoja elektroenergetskog sustava

O šest naj... EES-a (2010. god.)

- **najveći:**

golema postrojenja za proizvodnju električne energije (elektrane), zajedno s prijenosnim i razdjelnim dijelom elektroenergetskog sustava, zauzimaju velika prostranstva Zemlje

O šest naj... elektroenergetskog sustava



Hidroelektrana „Itaipu”, 14.000 MW

O šest naj... elektroenergetskog sustava



Hidroelektrana „Tri klanca“ („Tri kanjona“), 22.500 MW

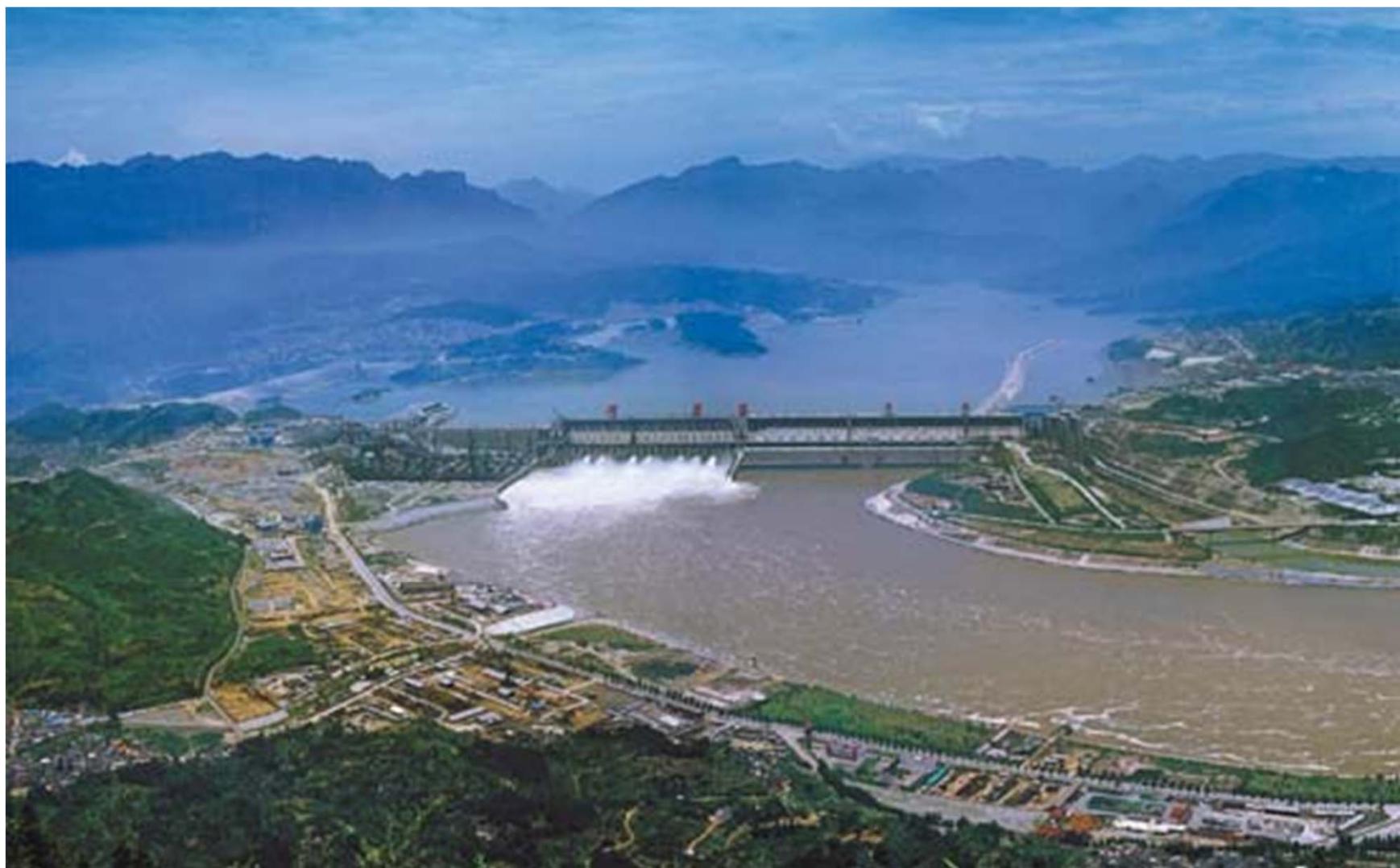
Energijske tehnologije: Uvodna razmatranja

O šest naj... elektroenergetskog sustava



Hidroelektrana „Tri klanca“ („Tri kanjona“), 22.500 MW

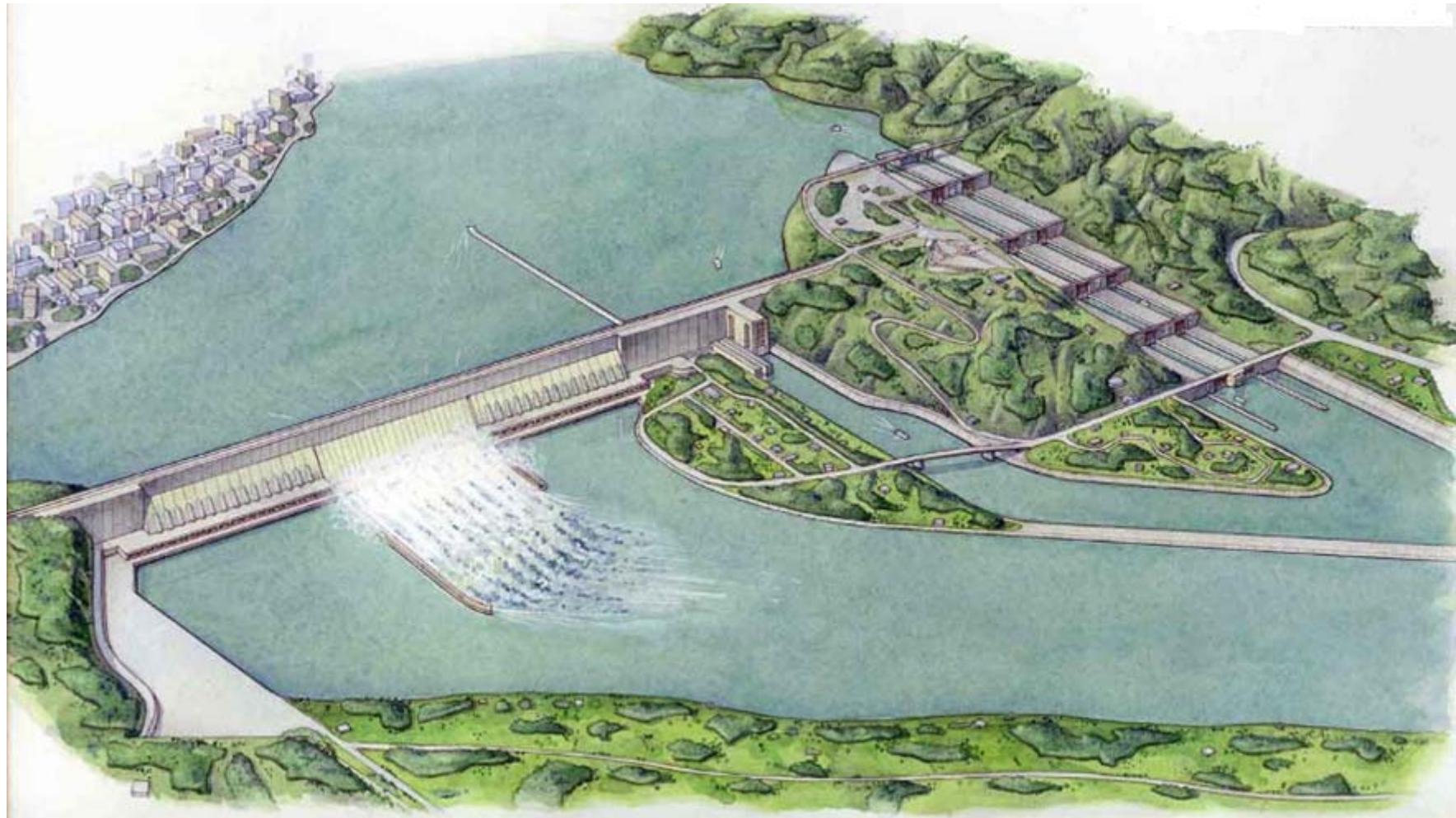
O šest naj... elektroenergetskog sustava



Hidroelektrana „Tri klanca“ („Tri kanjona“), 22.500 MW

Energijske tehnologije: Uvodna razmatranja

O šest naj... elektroenergetskog sustava



Hidroelektrana „Tri klanca“ („Tri kanjona“), 22.500 MW

O šest naj... elektroenergetskog sustava



Hidroelektrana „Tri klanca“ („Tri kanjona“), 22.500 MW

O šest naj... elektroenergetskog sustava



Hidroelektrana „Tri klanca“ („Tri kanjona“), 22.500 MW

Hrvatski elektroenergetski sustav - 2010. god.

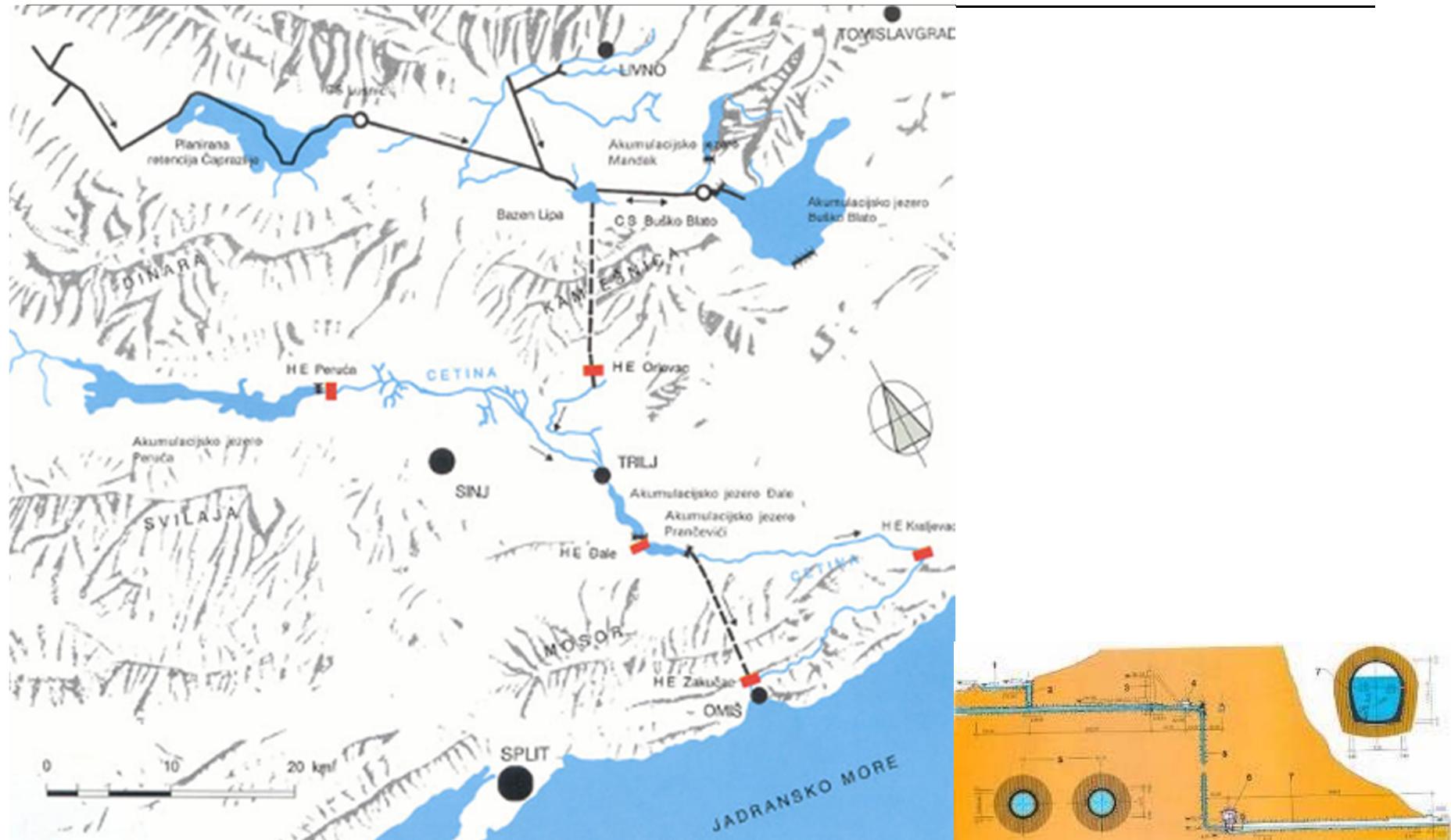
■ snaga 3.745 MW:

- 2.079 MW u hidroelektranama (26 hidroelektrana),
- 1.666 MW u termoelektranama (4 termoelektrana i 3 termoelektrane-toplane)
- najveća je hrvatska elektrana hidroelektrana "Zakučac", 486 MW, rijeka Cetina, a
- najveća termoelektrana, TE-TO Zagreb, 440 MW

■ izvan Hrvatske:

- NE "Krško", 354 MW (708 MW), 338 MW (na pragu)
- TE „Obrenovac“, 300 MW
- TE "Gacko", 100 MW
- TE Kakanj, 50 MW (?)

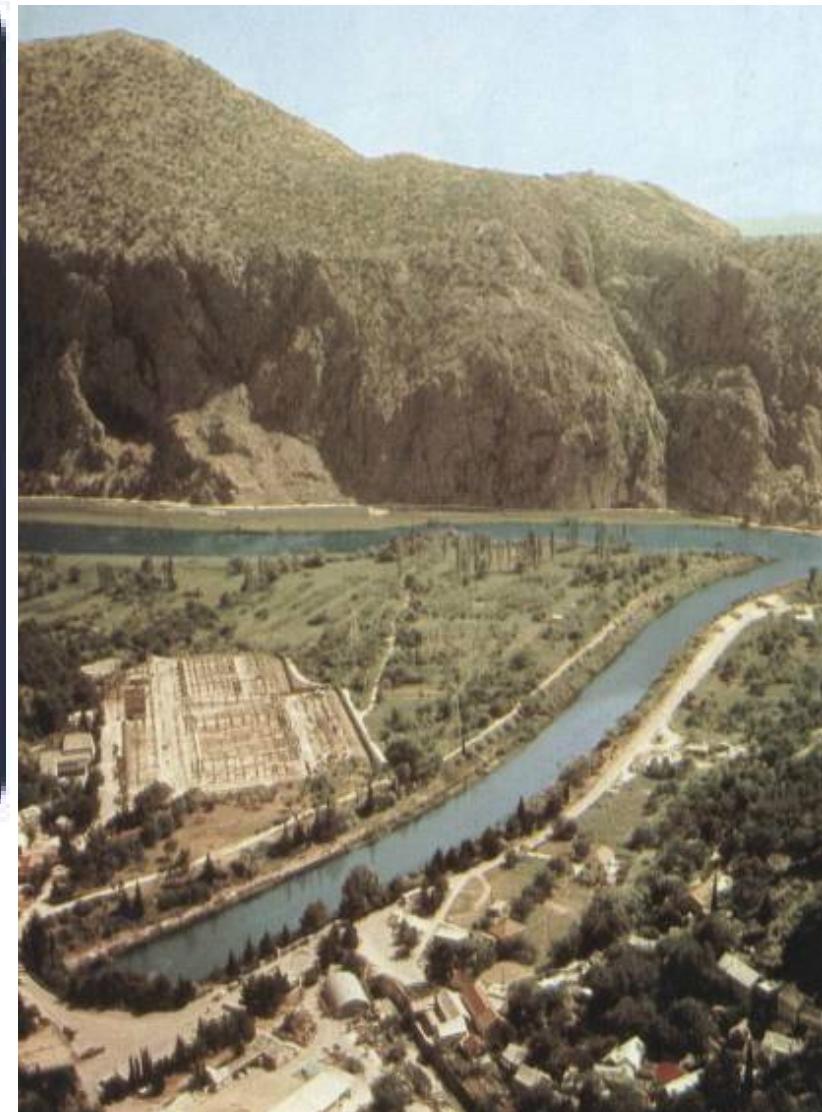
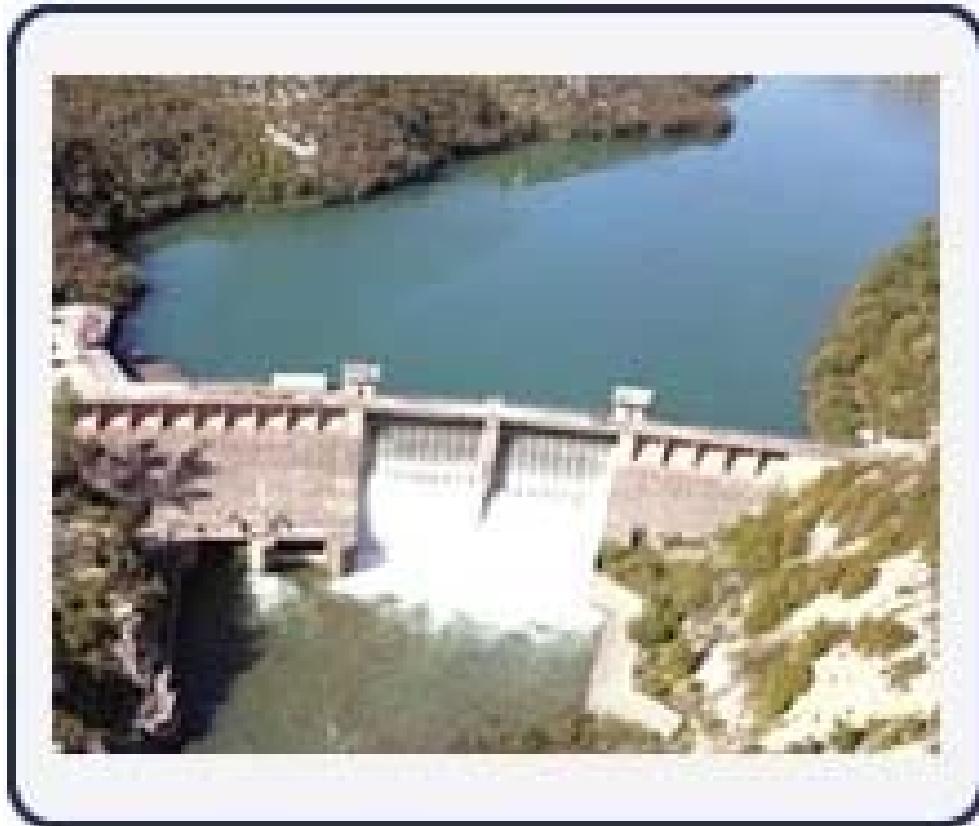
O hrvatskom elektroenergetskom sustavu



Hidroelektrana „Zakučac”, 486 MW

Energijske tehnologije: Uvodna razmatranja

O hrvatskom elektroenergetskom sustavu



Hidroelektrana „Zakučac”, 486 MW

O hrvatskom elektroenergetskom sustavu



Termoelektrana „Sisak“, 420 MW

O hrvatskom elektroenergetskom sustavu



TE-TO Zagreb, 440 MWe (850 MWt)

O hrvatskom elektroenergetskom sustavu



EL-TO Zagreb, 88,8 MWe/439 MWt

O šest naj... elektroenergetskog sustava



Nuklearna elektrana, „Kashiwazaki Kariwa”, 8.212 MW

O šest naj... elektroenergetskog sustava



Termoelektrana „Taichung”, 5.500 MW (5,824 MW)

O šest naj... elektroenergetskog sustava



Geotermalna elektrana, 720 MW

O šest naj... elektroenergetskog sustava

- 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



Pet od devet solarnih termoelektrana u pustinji Mojave

O šest naj... elektroenergetskog sustava

- najveće postrojenje za direktnu pretvorbu Sunčeve energije u električnu energiju (solarna fotonaponska elektrana)
postrojenje je izgrađeno 2008. godine u Španjolskoj
Postrojenje se koristi s (više od) 162.000 solarnih fotonaponskih panela sumarne snage (električne) 60MW.



O šest naj... elektroenergetskog sustava



- najveći vjetroagregat danas ima promjer rotora jednak 126 metara:
(službeno) snage je 6 MW, no očekuje se da će njegova stvarna snaga biti veća od 7 MW

Vjetroagregat snage 7+MW

O šest naj... elektroenergetskog sustava

- **najrasprostranjeniji:** povezuje države i kontinente
- **najutjecajniji:** neželjeni utjecaji na ljudе i okoliš
("efekt staklenika", „kisele kiše“, toplinsko i radioaktivno opterećenje okolišа)
 - **TE 1.000 MW** (dnevno):
 - 8.000 tona ugljena
 - 19.000 tona CO₂
 - 350 tona SO₂
 - 55 tona NO₂
 - 2.000 tona (krutog, radioaktivnog i toksičnog) pepela

O šest naj... elektroenergetskog sustava

- **najneophodniji:**
 - ovisnost o električnoj energiji
 - posljedice neopskrbljenosti električnom energijom
 - korelacija između potrošnje električne energije i ukupne proizvodnje i bogatstva zemlje
- **najkompliciraniji**
- **najskuplji**

Opskrba energijom: kako je počelo, a kako je danas?

- 8 MJ po ljudskom biću u danu (*homo sapiens*)
- danas čovjek troši, hraneći se, u prosjeku (svjetski prosjek), usprkos zaprepašćujućim brojevima gladnih i umiranja od gladi svakodnevno, oko 8,4 MJ, a stanovnik "zapada" (razvijenije zemlje) oko 12,6 MJ energije
- ukupna je potrošnja energije (ne eksnergije) međutim po stanovniku planeta 175 MJ po danu, dok stanovnik SAD-a troši 950 MJ dnevno (\approx pet planeta Zemlja)

Opskrba energijom: kako je počelo, a kako je danas?

175 MJ po stanovniku planeta dnevno?

- „električari“ vole iskazivati energiju u Wh ili kWh, MWh, GWh ili TWh ($1W = 1J/s$; $1Wh = 1J/s \cdot 3600s = 3600 J$; $1kWh = 3,6 MJ$)
- **što znači raspolagati s (električnom) energijom (eksergijom) iznosa 1kWh?**
 - s tom se eksergijom 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?)

$$175 \text{ MJ} = 48,6 \text{ kWh}$$

Opskrba energijom: kako je počelo, a kako je danas?

- 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, iscrpljivalo bi se preko mjere.)
- energetski je stupanj djelovanja pritom oko 10%
- **kada bismo 175 MJ eksergije po danu osiguravali ljudskim radom za svakog stanovnika Zemlje trebali raditi 147 robova**

Opskrba energijom: kako je počelo, a kako je danas?

- otkrićem električne energije po prvi je puta u povijesti čovječanstva omogućeno ljudskom biću da na krajnje jednostavan način raspolaže s golemim količinama energije (eksergije) što je i, posljedično, izazvalo veliko povećanje potrošnje energije (eksergije) (Primjer: sušilo za kosu /fen/, 1400 W.)
- pritom se radi (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:

Opskrba energijom: kako je počelo, a kako je danas?

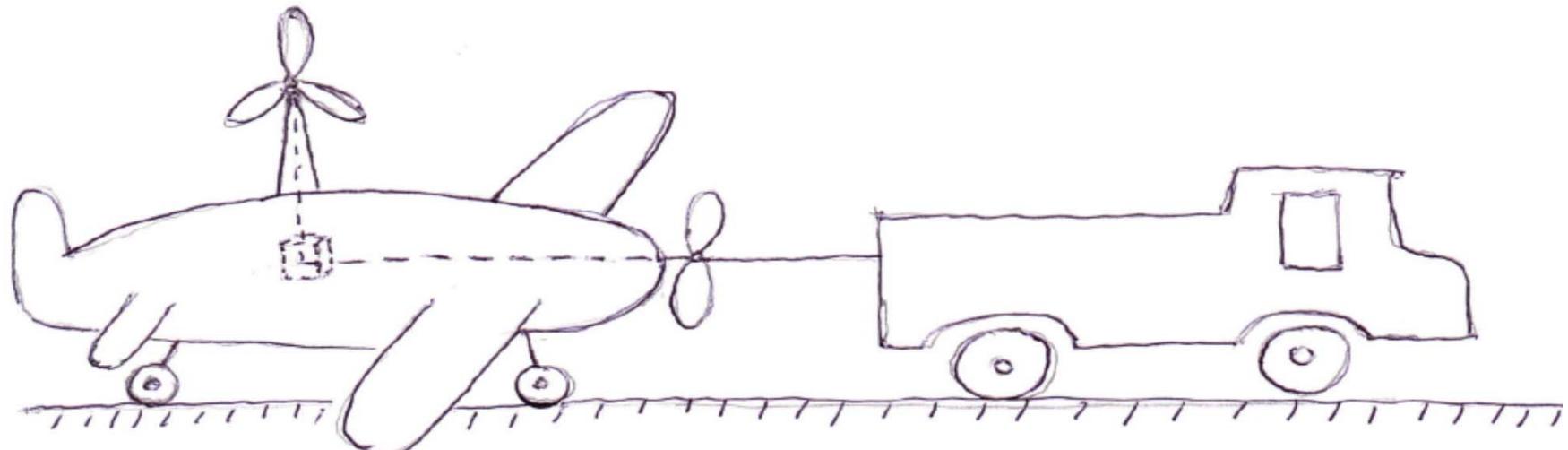
- 1 kg drva omogućuje proizvodnju približno 1 kWh električne energije
- 1 kg ugljena 3 kWh električne energije
- 1 kg nafte 4 kWh električne energije; (približno i 1 kg plina)
- 1 kg prirodnog uranija 50.000 kWh električne energije
- 1 kg plutonija 6.000.000 kWh električne energije, dok se
- iz potencijalne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

Opskrba energijom: kako je počelo, a kako je danas?

- očito, mala je gustoća energije pohranjena u vodi i zraku, pa su zbog toga potrebne goleme količine vode i dubine akumulacijskih jezera ili velike visine s kojih pada voda, odnosno goleme količine i velike brzine zraka (vjetra)
(Velike su brzine vjetra međutim neiskoristive zbog prevelikih snaga koje ne mogu izdržati vjetroelektrane; snaga vjetra raste s trećom potencijom brzine.)
- pritom se, dakako, u elektranama ne može iskoristiti sva energija vode ili zraka jer i voda i zrak moraju dalje strujati (odnosići neiskorištenu, netransformiranu energiju) da bi načinili mesta količinama koje dolaze: radi se, naime, o strujanju fluida

Hoće li letjeti?

Energetska se kriza pokušala ublažiti ovakvom idejom
štедnje energije, slika.



Hoće li letjeti?

Na trup zrakoplova s propelerom montirat će se vjetroturbina (vjetrenjača) koja će se (njezin rotor) preko sustava zupčanika (za povećanje broja okretaja) spojiti s osovinom propelera. Motorno će vozilo (kamion) povlačiti zrakoplov po vodoravnoj pisti do trenutka kada će brzina zrakoplova omogućiti da struja zraka započne okretati rotor vjetroturbine, a ovaj propeler zrakoplova. U tom će se trenutku prekinuti veza između motornog vozila (koje će skrenuti s piste) i zrakoplova, a ulogu će vozila preuzeti propeler zrakoplova pokretan vjetroturbinom; zrakoplov će se vinuti uvis i nastaviti letjeti prema cilju.

Je li ostvariva ovakva ideja?

Dva pitanja

- Ne zaboravljući fizikalne i kemijske okolnosti na planetu Zemlja, koju smatramo zatvorenim sustavom, te uzimajući u obzir predvidiv znanstveni, tehnološki i tehnički razvoj, može li vodik postati "gorivom budućnosti"?
- Kolika se količina energije mora osigurati da bismo dobili 1 tonu pšenice? (Energetska je vrijednost 1 kg pšenice 14.180 kJ, a antracita 35.300 kJ.) Više od:
 - a) 5.000.000 kJ (1389 kWh)
 - b) 6.000.000 kJ (1667 kWh)**
 - c) 7.000.000 kJ (1944 kWh)

Djelovanje hladnjaka

Ljeti ste, u toplinski izoliranoj kuhinji, ostavili otvorenim vrata hladnjaka (koji radi). Hoće li se zrak u kuhinji:

- a) ohladiti,
- b) ugrijati,
- c) ne će se promijeniti temperatura zraka u kuhinji?

Tko je brži? Zašto?



Kako rješavati (riješiti) zadatke (probleme)?

Kasnije ćemo detaljnije govoriti o postupcima rješavanja energetskih problema, zasad samo o najopćenitijem.

- 1. Pozorno pročitajte zadatak i predočite sebi što analizirate**
- 2. Ustanovite o kojoj se vrsti sustava radi (što je sustav bit će govora kasnije)**
- 3. Skicirajte predočeni sustav i odijelite ga vidljivo od okolice (što je okolica bit će govora kasnije)**
- 4. Ustanovite procese unutar sustava i procese koji se odvijaju između sustava i okolice**

Kako rješavati (riješiti) zadatke (probleme)?

- 5. Zapišite što morate iznaći (napravite listu nepoznanica)**
- 6. Zapišite sve preostalo povezano sa zadatkom (preostale obavijesti povezane sa zadatkom)**
- 7. Sastavite listu jednadžbi povezanih sa zadatkom (uočit ćete kako riješiti zadatak)**
- 8. Riješite (algebarski) jednadžbe (odredite algebarske izraze za nepoznanice)**
- 9. Izračunajte numeričke vrijednosti nepoznanica i kontrolirajte jedinice u svakom proračunu**

Kako rješavati (riješiti) zadatke (probleme)?

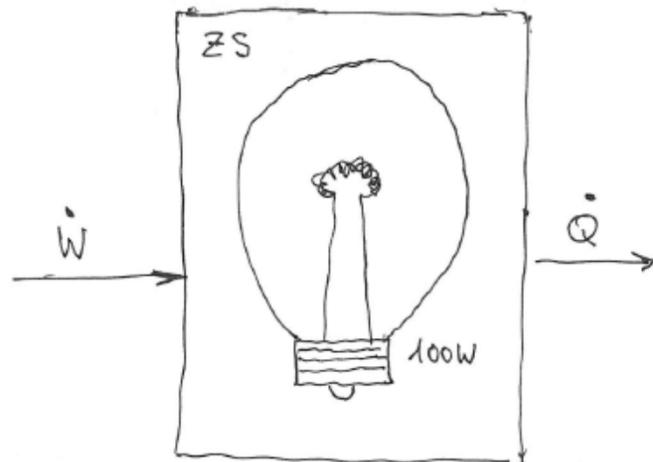
Primjer

Odredite brzinu prijenosa toplinske energije sa 100 vatne žarulje u okolicu.

Rj.

1. Pozorno pročitajte zadatak i predočite sebi što analizirate
2. Ustanovite o kojoj se vrsti sustava radi
o zatvorenom sustavu
3. Skicirajte predočeni sustav i odijelite ga vidljivo od okolice

Kako rješavati (riješiti) zadatke (probleme)?



4. Ustanovite procese unutar sustava i procese koji se odvijaju između sustava i okolice

U zatvoreni se sustav dovodi električna energija snage 100W, a odvodi toplinska. Električna energija pretvara se u unutrašnju kaloričku energiju a ova u toplinsku (rasvjetnu) energiju koja prelazi u okolicu. Pritom se postignuta najviša temperatura ne mijenja, pa dakle ni unutrašnja kalorička kao ni toplinska energija.

Kako rješavati (riješiti) zadatke (probleme)?

5. Zapišite što morate iznaći (napravite listu nepoznanica)

$$\dot{Q} \left[\frac{J}{S} = W \right]$$

6. Napišite sve preostalo povezano sa zadatkom (preostale obavijesti povezane sa zadatkom)
7. Sastavite listu jednadžbi povezanih sa zadatkom (uočit ćete kako riješiti zadatak)

**Radi se samo o jednoj jednadžbi: principu
očuvanja energije za zatvoreni sustav odnosno 1.
glavnom stavku termodinamike za zatvoreni
sustav**

Kako rješavati (riješiti) zadatke (probleme)?

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{d}{dt}(mu) + \frac{d}{dt}\left(\frac{mc^2}{2}\right) + \frac{d}{dt}(mgz) = 0$$

$$\left(\frac{d}{dt}(mu) = 0; \quad \frac{d}{dt}\left(\frac{mc^2}{2}\right) = 0; \quad \frac{d}{dt}(mgz) = 0 \right)$$

8. Riješite (algebarski) jednadžbe (odredite algebarske izraze za nepoznanice)

$$\dot{Q} = \dot{W}$$

Kako rješavati (riješiti) zadatke (probleme)?

9. Izračunajte numeričke vrijednosti nepoznanica i kontrolirajte jedinice u svakom proračunu

$$\dot{Q} = \dot{W} = -100W$$

Predznak minus (–) govori da toplinska energija napušta zatvoren sustav, struji iz zatvorenog sustava u okolicu.

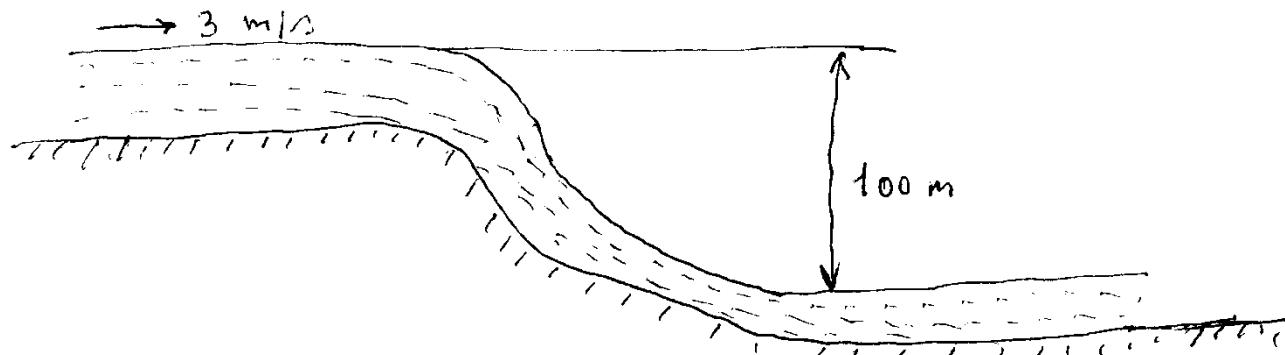
(Naime, električna se energija (mehanički rad) dovodi u sustav pa je stoga, dogovorno, negativnog predznaka.)

Provjera algebre, proračuna i jedinica pokazuje njihovu točnost.

Energija i snaga rijeke

Odredite energiju rijeke na lokaciji 100 m iznad ušća u more, slika, ako je protok na tom mjestu $500 \text{ m}^3/\text{s}$ a brzina 3 m/s .

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3, g = 9,81 \text{ m/s}^2.$$



Rj.

Energija i snaga rijeke

$$e_{vode} = gH + \frac{c^2}{2} = \left(9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 100m + \frac{9 \frac{m^2}{s^2}}{2} \right) \cdot \frac{1 \frac{kJ}{kg}}{1000 \frac{m^2}{s^2}} = \\ = \left(981 \frac{m^2}{s^2} + 4,5 \frac{m^2}{s^2} \right) \cdot \frac{1 \frac{kJ}{kg}}{1000 \frac{m^2}{s^2}} = 0,986 \frac{kJ}{kg}$$

Energija i snaga rijeke

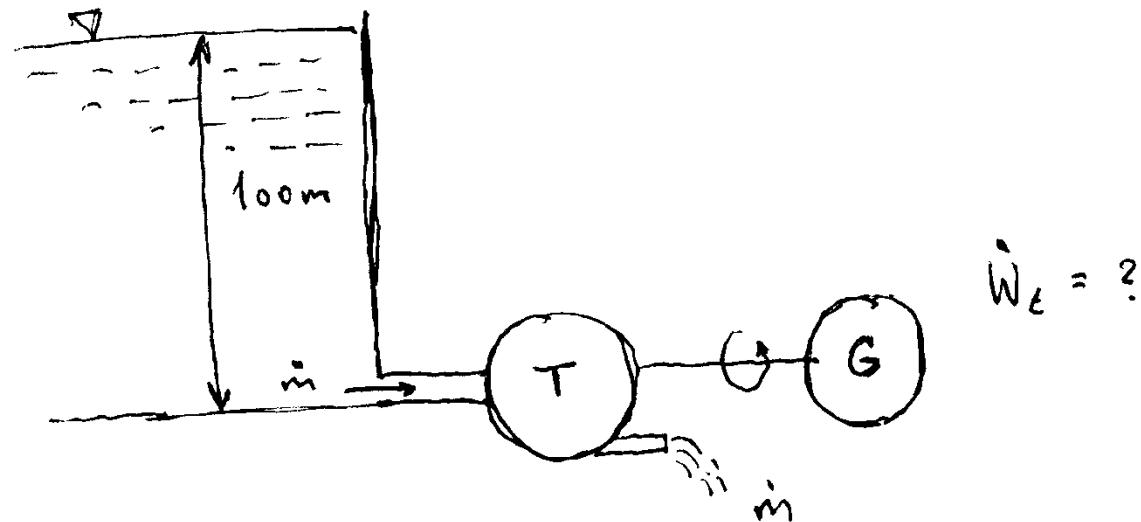
$$\dot{m} = \rho Q = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 500 \frac{m^3}{s} = 500.000 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{E}_v = \dot{m}e_v = 500.000 \frac{kg}{s} \cdot 0,986 \frac{kJ}{kg} = \\ = 493.000 kW = 493 MW$$

Uočite, kinetička je energija vode zanemariva u odnosu na njezinu potencijalnu energiju.

Energija vode i snaga hidroelektrane

Energija se vode u akumulacijskom jezeru hidroelektrane pretvara u električnu energiju, slika.



Energija vode i snaga hidroelektrane

Kolika je snaga sinkronog generatora hidroelektrane ako se 1000 kg/s vode dovodi vodnoj turbini?

Procese pretvorbi energije smatrajte idealnim.
(Drugim riječima, zanemarite sve gubitke eksnergijske tijekom pretvorbi oblika energije u električnu energiju.)

Rj.

$$\dot{W}_t = \dot{m}gH = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 100\text{m} = \\ = 981.000\text{W} = 981\text{kW}$$

Energija i snaga vjetra

Vjetroturbina promjera 12m smještena je na lokaciji gdje je brzina vjetra 10 m/s. Kolika je maksimalna snaga vjetroturbine? Gustoća je zraka (vjetra) 1,18 kg/m³.

Rj.

Raspoloživa je energija vjetra kinetička (koja se u vjetroturbini pretvara u mehanički rad)

$$e_k = \frac{c^2}{2} = \frac{100 \frac{m^2}{s^2}}{2} \cdot \frac{1 \frac{kJ}{kg}}{1000 \frac{m^2}{s^2}} = 0,05 \frac{kJ}{kg}$$

Energija i snaga vjetra

Idealna bi vjetroturbina dakle, zaustavljući 1 kg vjetra, omogućila korištenje 0,05 kJ mehaničkog rada.

Da bismo odredili snagu vjetroturbine, moramo poznavati količinu vjetra (u kg) koja u 1 sekundi prolazi kroz rotor vjetroturbine, tj. maseni protok vjetra:

$$\dot{m} = \rho A c = \rho \frac{d^2 \pi}{4} c =$$
$$= 1,18 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{(12m)^2 \pi}{4} \cdot 10 \frac{m}{s} = 1334,55 \frac{kg}{s}$$

Energija i snaga vjetra

pa je maksimalna snaga vjetroturbine, zaustavi li se ta količina vjetra,

$$\dot{W}_{vt_{\max}} = \dot{m} \cdot e_k = 1334,55 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 0,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 66,7 \text{kW}$$

Dakako, jasno je da vjetroturbina ne može raditi ako zaustavi vjetar (strujanje zraka). Pokazat ćemo kasnije, maksimalna se moguća snaga vjetroturbine dobiva ako se u vjetroturbini **vjetar uspori do 1/3 svoje početne brzine**; u tom slučaju, kad ne bi postojali nikakvi (dodatni) gubitci energije, dobivamo da je **maksimalno moguća snaga vjetroturbine jednaka 16/27 snage vjetra.**

Lokacija vjetroelektrane

Dvije se lokacije natječu za iskorištavanje energije vjetra. Na prvoj vjetar puše konstantnom brzinom od

➤ **7 m/s kroz 3000 sati godišnje,**

a na drugoj

➤ **10 m/s kroz 2000 sati godišnje.**

Koju biste lokaciju odabrali s obzirom na (moguću) količinu proizvedene električne energije? Izvan navedenih sati brzina je vjetra na obje lokacije neiskoristiva. Gustoća je vjetra na obje lokacije ista, $1,25 \text{ kg/m}^3$.

Lokacija vjetroelektrane

Rj.

$$l_1 = \frac{c_1^2}{2} = \frac{\left(7 \frac{m}{s}\right)^2}{2} \cdot \frac{1 \frac{kJ}{kg}}{1000 \frac{m^2}{s^2}} = 0,0245 \frac{kJ}{kg}$$

$$l_2 = \frac{c_2^2}{2} = \frac{\left(10 \frac{m}{s}\right)^2}{2} \cdot \frac{1 \frac{kJ}{kg}}{1000 \frac{m^2}{s^2}} = 0,050 \frac{kJ}{kg}$$

Lokacija vjetroelektrane

$$\dot{W}_1 = \dot{m}_1 l_1 = \rho c_1 A l_1 = 1,25 \frac{kg}{m^3} \cdot 7 \frac{m}{s} \cdot 1 m^2 \cdot 0,0245 \frac{kJ}{kg} = 0,2144 kW$$

$$\dot{W}_2 = \dot{m}_2 l_2 = \rho c_2 A l_2 = 1,25 \frac{kg}{m^3} \cdot 10 \frac{m}{s} \cdot 1 m^2 \cdot 0,050 \frac{kJ}{kg} = 0,625 kW$$

$$E_1 = \dot{W}_1 \cdot t_1 = 0,2144 kW \cdot 3000 \frac{h}{god} =$$

$$= 643,2 \frac{kWh}{god} \quad \left(po \quad m^2 \quad površine \quad strujanja \right)$$

$$E_2 = \dot{W}_2 \cdot t_2 = 0,625 kW \cdot 2000 \frac{h}{god} =$$

$$= 1.250 \frac{kWh}{god} \quad \left(po \quad m^2 \quad površine \quad strujanja \right)$$

“Nuklearni automobil”

Prepostavite da automobil troši dnevno 5 litara (L) benzina.

Neka je gustoća benzina 0,78 kg/L, a 44.000 kJ toplinske energije oslobađa se izgaranjem 1 kg benzina.

Prepostavite dalje da je moguć pogon automobila pomoću 0,1 kg U-235.

Nakon koliko će dana trebati automobil opskrbiti s novih 0,1 kg U-235, rabi li se automobil na opisani način?

Raspadom jedne jezgre U-235 oslobađa se 200 MeV toplinske energije.

“Nuklearni automobil”

Rj.

- Masa benzina koja dnevno izgori u automobilu:

$$m_{ben} = (\rho \cdot V)_{ben} = (0,75\text{kg/L}) \cdot (5\text{L/dan}) = \\ = 3,75 \text{ kg/dan}$$

- Dnevno potrebna energija za korištenje automobila:

$$\text{Energija} = m_{ben} \cdot Q = \\ (3,75 \text{ kg/dan}) \cdot (44.000\text{kJ/kg}) = 165.000 \text{ kJ/dan}$$

- 0,1 kg U-235 sadrži

“Nuklearni automobil”

$$N_{U-235} : m = N_A : A_{U-235} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow N_{U-235} = \frac{m \cdot N_A}{A_{U-235}} = \frac{0,1 \cdot 6,022 \cdot 10^{26}}{235} =$$
$$= 2,56 \cdot 10^{23} \text{ jezgara } U-235$$

- Toplinska energija oslobođena fisijom svih jezgara U-235 jednaka je $2,56 \cdot 10^{23} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 819,2 \cdot 10^{10} \text{ J}$

“Nuklearni automobil”

- Broj dana vožnje automobila

$$B_{dana} = \frac{8,2 \cdot 10^9 \text{ kJ}}{165.000 \frac{\text{kJ}}{\text{dan}}} = 49.696,97 \text{ dana} \approx$$

$\approx 136 \text{ godina}$

Napomena:

- kritična masa neostvariva je s tako malom količinom urana (veličine trešnje);
- sav U–235 ne može biti podvrgnut fisiji (zbog kritične mase nakon djelomične konverzije)
- plovila pogonjena nuklearnim reaktorima

Energetski (termički) stupanj djelovanja vola

Dobro hranjeni vol radi sa snagom jednakom 200 W. Radi li dnevno 5 sati, a hranom unaša 11.250 kcal, koliki je koeficijent iskorištenja vola?

(Napomena: inženjeri koeficijent iskorištenja nazivaju termičkim (energetskim) stupnjem djelovanja, η_t .)

Rj.

$$\eta_t = \frac{w[J]}{q_{dov}[J]} = \frac{200W \cdot 5h \cdot \frac{3.600s}{1h}}{11.250kcal \cdot \frac{4.186,8J}{1kcal}} = \\ = 7,64 \cdot 10^{-2} \Rightarrow 7,64\%.$$

Energetski (termički) stupanj djelovanja čovjeka

Dnevni je unos energije hranom prosječne osobe u razvijenim zemljama jednak 3,5 kWh (12,6 MJ; 3009,5 kcal). Bazalni je metabolizam (energija nužna za puko preživljavanje) jednak 70 W. Da bi ljudsko biće moglo raditi, snaga unesena hranom (uključene su potrebe za bazalni metabolizam) mora biti 400 W.

- a) procijenite maksimalno trajanje fizičkog rada u jednom danu
- b) ukoliko je rezultat fizičkog rada u 1 satu 60 Wh, koliki je maksimalni dnevni rad što ga obavi prosječna osoba?
- c) odredite odnos dnevnog rada i energije unesene hranom za prosječnu osobu (η_t)

Rj.

Energetski (termički) stupanj djelovanja čovjeka

a) $3.500 - 70 \cdot (24-x) - 400x = 0 \Rightarrow x = 5,515\text{h}$

(manje: pretpostavljeno je da osoba ako ne radi samo leži ne baveći se bilo kakvom aktivnošću)

b) $0,06 \text{ kWh/h} \cdot 5,52 \text{ h} = 0,33\text{kWh}$

c) $\eta_t = \frac{0,33\text{kWh}}{3,5\text{kWh}} = 0,0943 \Rightarrow 9,43\%$

Žarulja i potrošnja ugljena

Odredite količinu ugljena, ogrjevne moći 6.150 kWh/t, što će izgorjeti u termoelektrani, potrebnu da žarulja snage 100 W svijetli 24 sata dnevno, cijele godine, ako se u termoelektrani 40% energije akumulirane u ugljenu pretvara u električnu energiju.

Potrošnja je električne energije žarulje u godini dana:

$$0,1 \text{ kW} \cdot 24 \cdot 365 = 876 \text{ kWh.}$$

Proizvodnja je električne energije pretvorbom iz kemijske energije, akumulirane u ugljenu, izgori li tona ugljena:

$$0,4 \cdot 6.150 \text{ kWh/t} = 2.460 \text{ kWh/t.}$$

Žarulja i potrošnja ugljena

Dakle je količina ugljena, koji mora izgorjeti da bi žarulja svijetlila godinu dana (8.760 sati), jednaka:

$$\frac{876kWh}{2.460 \frac{kWh}{t}} = 0,356t = 356kg.$$

Provjera tvrdnje

Proizvođač tvrdi da je snaga njegovog ventilatora 200W u trenucima kad iz ventilirane prostorije izbacuje 25 kg/s zraka brzinom od 5 m/s. Je li tvrdnja točna? Prepostavite jednodimenzionalni, stacionarni i idealni proces rada ventilatora.

Rj.

$$\dot{E}_{ušla} - \dot{E}_{izašla} = \frac{dE_{sustava}}{dt} = 0 \Rightarrow \dot{E}_{ušla} = \dot{E}_{izašla} \Rightarrow$$

$$\dot{E}_{ušla} = \dot{W}_t = \dot{E}_{izašla} = \dot{m}_{zraka} e_k = \dot{m}_{zraka} \frac{c_{izlazna}^2}{2}$$

Provjera tvrdnje

$$c_{izlazna} = \sqrt{\frac{2\dot{W}_t}{\dot{m}_{zraka}}} = \sqrt{\frac{400 \frac{J}{s}}{25 \frac{kg}{s}}} = 4 \frac{m}{s}$$

Tvrđnja je proizvođača netočna.

Potrošak energije

Automobil se ubrzava iz stanja mirovanja do brzine od 100 km/h za 10 sekunda.

Hoće li potrošak energije biti veći ako se brzina od 100 km/h postigne unutar 5 sekunda?

Otpore gibanju automobila zanemarite.

Ukratko

Predstavili smo sadržaj premeta i razloge bavljenja njime: govorili smo o problemu opskrbe energijom i o opskrbi energijom, o primarnim oblicima energije, o važnosti i prirodi (električne) energije (eksergije i anergije) i elektroenergetskog sustava, o posebnostima i o šest “naj” elektroenergetskog sustava, te i o utjecaju elektroenergetskog sustava na okoliš.

Što treba znati (naučiti) – 01 Uvodna razmatranja (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

Što je (su)? Koji (koje) su? (kvalitativni odgovori)

- anergija
- eksnergija
- električna energija
- elektroenergetika
- elektroenergetski sustav
- energetika
- energetski proces
- fosilna goriva
- konvencionalni oblici energije

Što treba znati (naučiti) – 01 Uvodna razmatranja (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- korisni oblici energije
- nekonvencionalni oblici energije
- neobnovljivi oblici energije
- oblici energije koje je moguće akumulirati
- oblici energije koje nije moguće akumulirati
- obnovljivi oblici energije
- posebnosti elektroenergetike i elektroenergetskog sustava
- primarni oblici energije
- princip očuvanja energije



Energijeske tehnologije

O energiji

Energija, pojmovi i odnosi koji je određuju

Vladimir Mikuličić, Davor Grgić, Zdenko Šimić, Marko Delimar

FER, 2014.



Teme:

1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
- 3. O energiji**
4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama
5. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
6. Geotermalna energija
7. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
8. Potrošnja električne energije
9. Prijenos i distribucija el. en.
10. Energija Sunca
11. Energija vjetra
12. Energija biomase, gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
13. Skladištenje energije
14. Energija, okoliš i održivi razvoj

O čemu ćemo govoriti

- O “definiciji” energije i razvrstavanju oblika energije
- O unutrašnjoj energiji (gravitacijskoj i električnoj potencijalnoj, nuklearnoj, kemijskoj, kinetičkoj, unutrašnjoj kaloričkoj i mehaničkoj energiji, energiji mirovanja i prijelaznim oblicima energije (mehaničkom radu, toplinskoj i električnoj energiji i radu trenja)
- O opskrbi Zemlje energijom
- O definiciji mehaničkog rada, o osnovnim pojmovima, drugoj podjeli oblika energije (energija, eksjerija i anergija) i definicijama 1. i 2. gl. stavka termodinamike
- O povratljivim (“idealnim”) i nepovratljivim (realnim) procesima, o entropiji
- O pitanjima i primjerima
- Što treba znati (naučiti)

Što je energija?

Ne postoji „dobra”, jednostavna, općeprihvaćena definicija energije. Zašto?

Definicije koje se rabe

- **energija je sposobnost obavljanja (mehaničkog) rada**
- energija je jedan od osnovnih oblika materije
(materija = tvar + energija)
- energija je svojstvo materije da može biti transformirana u rad i/ili toplinu **(definiranje energije pomoću energije: rad i toplina jesu energija, oblici energije)**
- **energija je sposobnost izazivanja promjene**
- energija je „ono“ što mijenja stanje zatvorenog sustava kada prelazi njegove granice

Što je energija?

- 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.

Zašto ne postoji prihvatljiva (dobra) definicija energije?

Subjektivni i objektivni razlog ..., osnovni pojam...

- **energija je sposobnost obavljanja (mehaničkog) rada**
 - **zašto baš ta definicija?**
 - **mehanički rad** (Definicija iz „Fizike“.)
 - **sila**

Temeljne sile

- gravitacijska (10^0), beskonačnog dosega, jakost opada s kvadratom udaljenosti
- elektromagnetska (10^{36}), beskonačnog dosega, jakost opada s kvadratom udaljenosti
- jaka nuklearna (10^{38}), dosega 1 **fermi** (10^{-13} cm), jakost opada mnogo brže nego li s kvadratom udaljenosti, i
- slaba nuklearna sila (10^{25}), dosega mnogo manjeg od jednog fermija

Unutrašnja energija – stacionarni (stalni) oblici energije

- 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**

Oblici unutrašnje energije

- gravitacijska potencijalna energija
- električna (elektromagnetska) potencijalna energija
- nuklearna energija (fuzije i fisije)
- kinetička energija (zbog djelovanja jedne ili više sila)
- energija mirovanja ($E=mc_{sv}^2$) koju tijelo (sustav) posjeduje jer posjeduje masu
- unutrašnja kalorička energija

Gravitacijska potencijalna energija

- postoji jer postoji sila privlačenja između dva tijela (sustava) zbog njihovih masa

Električna potencijalna energija

- naziv je nastao kao rezultat gledanja na svaki izvor struje kao na nabijeni kondenzator
- ako je u kondenzatoru pohranjen naboј **Q** pri naponu **U**, električna je potencijalna energija jednaka produktu **QU [J]**
- baterija se 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)

Nuklearna energija fisije

- o tom obliku energije govorit će se u temi „Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim elektranama“

Unutrašnja kalorička energija

- energija 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)
- prosječna (translatorna) brzina molekula (kinetička energija molekula) proporcionalna je temperaturi tijela

Kinetička i energija mirovanja

- kinetička energija (zbog djelovanja jedne ili više sila),
- energija mirovanja ($E = mc_{sv}^2$) koju tijelo (sustav) posjeduje jer posjeduje masu
 - svi ostali oblici ili su oblik unutrašnje energije (kemijska, mehanička energija primjerice) ili su **prijelazni oblik energije**

Prijelazni oblici energije

- mehanički rad ili kraće rad
- toplinska energija
- električna energija
- rad trenja

Mehanički rad

- prijelazni oblik energije koji se javlja samo u trenucima kada mehanička energija i/ili unutrašnja kalorička energija, posredovanjem sile, mijenjajući oblik, prelaze sa sustava na sustav, a po iznosu je jednak umnošku komponente sile u smjeru puta i prevaljenog puta

Toplinska energija

- postoji samo u trenucima kada se jedan ili više stalnih ili prijelaznih oblika energije pretvaraju u unutrašnju kaloričku energiju a ova, zbog time izazvanih razlika u temperaturi, u toplinsku energiju koja prelazi sa sustava više na sustav niže temperature do trenutka izjednačavanja temperatura
- toplinska energija, kada prijeđe na sustav niže temperature, pretvara se ponovno u unutrašnju kaloričku energiju tog sustava povisujući mu temperaturu
- nužan i dostatan uvjet za pretvorbu unutrašnje kaloričke energije u toplinsku, i zatim prijelaz toplinske energije između sustava, razlika je u temperaturi između sustava

Električna energija

- tranzijent u procesu pretvaranja električne potencijalne energije u neki drugi oblik: mehanički rad, potencijalnu, kinetičku, rasvjetnu, unutrašnju kaloričku energiju, ...

Rad trenja

- rad trenja: mehanički rad kojim se svladavaju sile trenja (sile što tangencijalno djeluju na granicu tijela) i/ili otpora (naprezanja) pretvoren u unutrašnju kaloričku energiju)

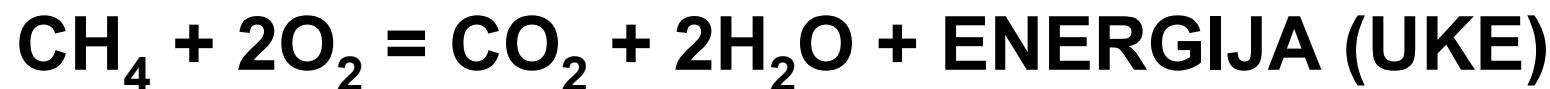
Mehanička energija

- mehanička energija nije mehanički rad
- mehanička energija je stacionarni oblik energije: zajednički naziv za sumu oblika energije koji se pohranjuju u tijelu (sistemu) kao cjelini:
 - kinetičke,
 - gravitacijske potencijalne,
 - elastične potencijalne i
 - rotacijske energije sistema (tijela)

Kemijska energija

- oblik unutrašnje energije akumuliran u tvari na razini atoma: električna potencijalna energija akumulirana u rasporedu atoma u molekuli, koja se, u svakidašnjem životu, naziva kemijskom energijom

Kemijska energija – proces izgaranja



- 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

„Nekorisni“ oblici energije

- **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 struji pritom uvijek iz prostora veće gustoće energije u prostor manje gustoće
- taj je proces spontani, samonikli, samopotičajni i samoodržavajući: odvija se dok se ne izjednače početno nejednolike raspodjele gustoće energije

O opskrbi Zemlje energijom

- **otkud energija na Zemlji?**
 1. Sunčev zračenje (opći naziv za energiju koju Sunce emitira u svemir), akumulira se pomoću fotosinteze
 2. geotermalno djelovanje („vlastita“ energija)
 3. plima i oseka
 4. ljudsko djelovanje (zanemarivo)
- **2.+3. < 0,04 % Sunčeve energije**
- **ključna uloga kemijske energije**

Fotosinteza

- fotosintezom se dio dozračene Sunčeve energije pretvara u kemijsku energiju pohranjenu u stvorenim organskim molekulama



- tijekom fotosinteze biljka kroz korijen uzima hranjive tvari
- u suprotnom procesu, procesu oksidacije, izgaranja, oslobađa se energija uz istodobno stvaranje CO_2 :



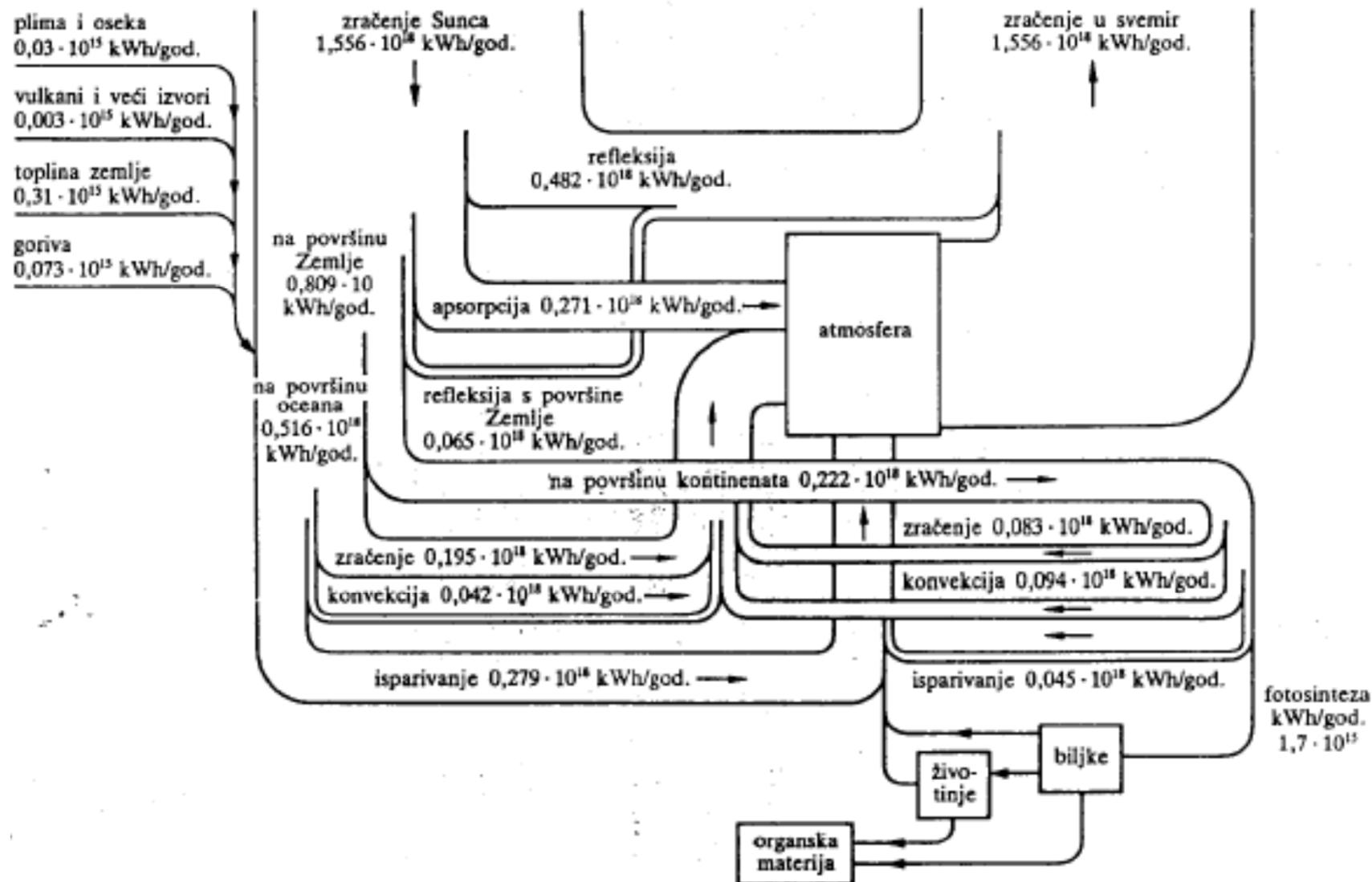
„Minuli” rad fotosinteze

- na fotosintezi se, njenom minulom radu točnije, temelji naša (Zemljina) opskrba energijom: fotosinteza omogućuje proizvodnju hrane i goriva
- proces je 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 (prijelazni oblik energije) transformirana u kemijsku energiju
- 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

Učinak fotosinteze

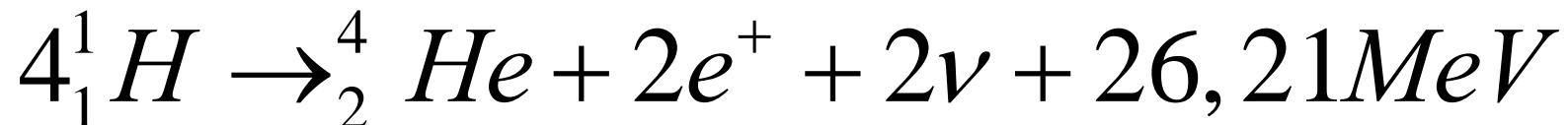
- vrlo se mali dio dozračene Sunčeve energije akumulira posredstvom fotosinteze: tek **0,023%** (Prema nekim analizama, **0,1%**, slika.)
- nadalje, od energije preuzete djelovanjem fotosinteze, samo 45% ostaje u biljkama u obliku materije, a ostatak od 55% vraća se tzv. disanjem u atmosferu
- netoprirast nastao djelovanjem fotosinteze na Zemlji godišnje iznosi $164 \cdot 10^9$ tona, od čega se 2/3 takve materije proizvodi na kontinentima, a 1/3 u oceanima

Zemljina energijska bilanca



Sunčeve zračenje

- **Sunčeve zračenje opći je naziv za energiju koju Sunce emitira u svemir**
- najvažniji je izvor te energije
termonuklearna fuzija u Suncu:



Termonuklearna fuzija na Suncu

- 4 atoma vodika spaja se u helij i pritom se oslobođaju goleme količine energije:
0,75% mase pretvara se u energiju
(0,7% prema nekim autorima), dok se u današnjem najboljem, ljudima kontroliranom procesu, procesu fisije, **0,1 % mase pretvara u energiju**
- **nastaje jezgra helija, 2 pozitrona i 2 neutrina , i energija koja iznosi 26,21 MeV**

Termonuklearna fuzija na Suncu

- zbog tog procesa približno **4,2 milijuna tona u sekundi gubitak je mase** Sunca (pretvorba mase u energiju)
- približno 1,9 milijuna tona u sekundi gubitak je mase Sunca zbog „solarnog vjetra“

No, zasad, to nas ne brine: Sunce će potrajati još kojih 5 milijardi godina (život na Zemlji manje od 2 milijarde godina) prije nego li se pretvori u „crvenog diva“.

- samo milijarditi dio emitirane energije Sunca dopire do Zemlje

Elektromagnetsko zračenje

- 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 Sunca s koje se emitira u obliku elektromagnetskog zračenja

O drugoj podjeli oblika energije

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 priхватiti 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“.

O drugoj podjeli oblika energije

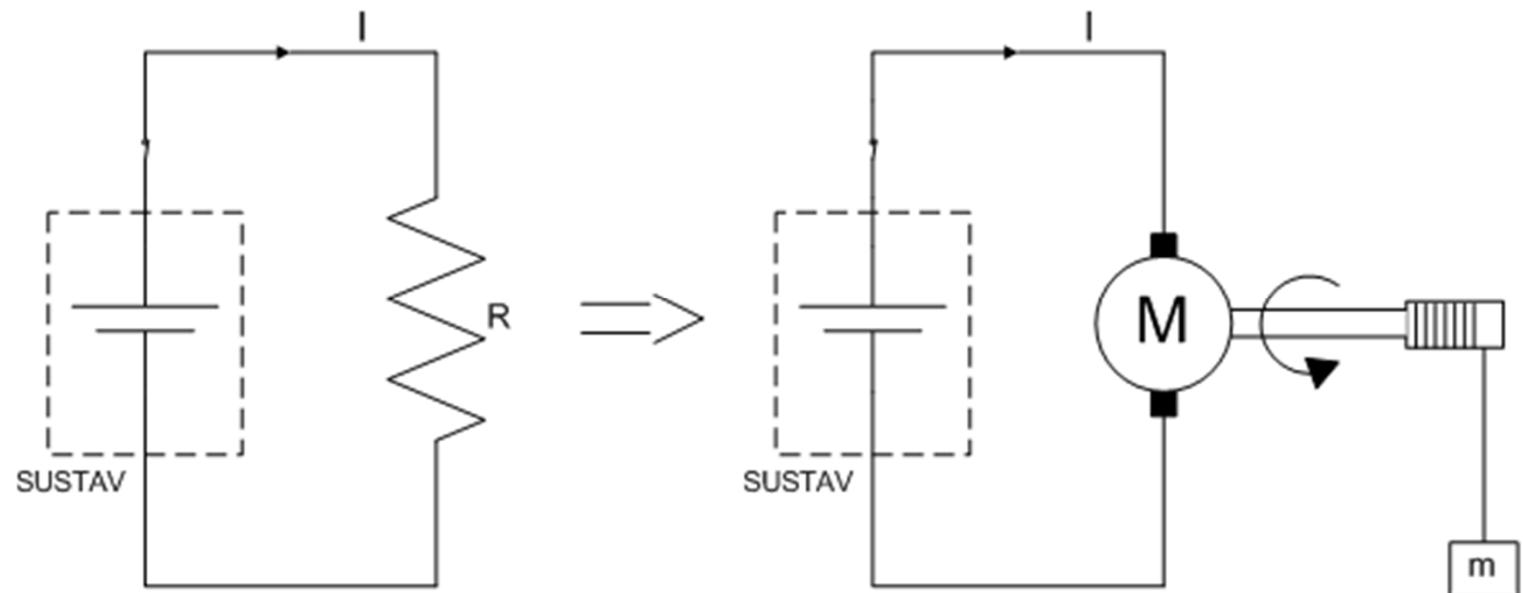
Zašto mijenjamo definiciju rada? Zašto prihvaćamo ovaku definiciju? Što je „sustav“?
Zašto naglašavamo „pozitivni rad“? Što je „proces“? Što znači „jedino vanjsko djelovanje“?
Što je „teret“?

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*), protječe kroz radni otpornik, slika?

Pretvorba električne energije u mehanički rad



***Svladava li se sila na putu?
Postoji li pomak hvatišta sile?***

O osnovnim pojmovima

- sustav
- granica sustava i okolica
- osobine, svojstva i stanje sustava
- veličine (funkcije) stanja sustava
- međudjelovanje (komuniciranje) sustava s okolicom
- vrste sustava (zatvoreni, otvoreni, adijabatski, izolirani)
- proces
- jedino vanjsko djelovanje
- teret

Pozitivni rad

$$\begin{aligned} W_{12} &= \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} \cdot \vec{c} dt = \\ &= \int_{t_1}^{t_2} \left\{ F_x [x(t), y(t), z(t)] x'(t) + F_y [x(t), y(t), z(t)] y'(t) + F_z [x(t), y(t), z(t)] z'(t) \right\} dt [J] \end{aligned}$$

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s} = F \cdot ds \cdot \cos \varphi = F \cdot c \cdot dt \cdot \cos \varphi \quad [J]$$

Sila je, u općem slučaju, funkcija puta, brzine i vremena.

Pozitivni i negativni rad

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

odnosno,

$$\begin{aligned} dW &= -\vec{F} \cdot d\vec{s} = -F \cdot ds \cdot \cos \phi = \\ &= -F \cdot c \cdot dt \cdot \cos \phi \quad [J] \end{aligned}$$

Ta je promjena (dodavanje minusa) pitanje dogovora – nije vezana uz fizikalnost mehaničkog rada.

Zašto stavljamo predznak minus?

...

Energija je sposobnost obavljanja rada

- što 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?

Pretvorba mehaničkog rada u energiju

- mehanički se rad uvijek i u potpunosti može pretvoriti u energiju
- 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:

Eksergija, energija i anergija

- eksergija
- energija
- anergija

Koji su oblici energije eksergija,
energija odnosno anergija?

Formulacije 1. i 2. gl. stavka termodinamike

Prvi glavni stavak termodinamike:

- u svim procesima ostaje zbroj eksergije i anergije sačuvan i jednak energiji:**

Eksergija+Anergijska = konstanta = Energija

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

Drugi glavni stavak termodinamike:

- svaka se energija sastoji od eksergije i anergije od kojih jedna može imati vrijednost nula:**

Energija = Eksergija+Anergijska

Formulacije prvih dvaju stavaka termodinamike

Zašto prihvaćamo takve formulacije prvih dvaju stavaka termodinamike?

- **problem opskrbe energijom**
- **zašto se energija ne može stalno u potpunosti pretvarati u mehanički rad (eksergiju)**
- **o čemu ovise, koliki su gubitci eksergije**
- **koliki je maksimalni mehanički rad što ga možemo dobiti iz eksergije neke energije i kako**

Opskrba eksergijom

- opskrba energijom svodi se na opskrbu eksergijom
- za život je potrebna energija, ali ne bilo kakva energija, već eksergija: takva energija koja se, jednostavnim procesima, može pretvarati u mehanički rad i druge korisne oblike energije
- zadatak je, dakle, proizvoditi eksergiju: većina se energetskih procesa stoga, kojima se osigurava opskrba eksergijom, svodi na odvajanje eksergije od anergije u energiji

Opskrba eksergijom – realni procesi

- eksergija se iskorištava u najrazličitijim procesima, a anergija odvodi u okolicu: nema gdje drugdje
- potrošači, međutim, služeći se eksergijom, troše eksergiju jer se za vrijeme iskorištavanja eksergije, ne radi li se o „**idealnim**“ već o realnim procesima, eksergija pretvara u anergiju i postaje nepovratno izgubljena
- samo u "**idealnim procesima**" eksergija se ne pretvara u anergiju, njena količina ostaje konstantna

Opskrba eksnergijom – “idealni procesi”

Što su „idealni procesi“?

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 moramo “idealne procese” opisati nekako drugčije kako bismo ih mogli kvantificirati.

„Idealni“ i „neidealni“ procesi

- „idealni“ su procesi **povratljivi (reverzibilni)**
- „neidealni“ procesi su **nepovratljivi (ireverzibilni)**: to su realni procesi, procesi koji se stvarno odvijaju u svijetu u kojem obitavamo
 - **u svim se nepovratljivim procesima pretvara eksergija u anergiju**
 - **samo u povratljivim procesima ostaje eksergija konstantna**
 - **nemoguće je anergiju pretvoriti u eksergiju: proces u kojem bi se anergija pretvarala u eksergiju je nemoguć**

Realni energetski procesi

- realni su energetski procesi nepovratljivi
- transformacije oblika energije uzrokuju smanjivanja zaliha eksergije
- **u svim procesima ostaje (1. gl. stavak termodinamike) energija konstantna, ali ona gubi mogućnost transformacije to više što je više eksergije pretvoreno u anergiju**

Problem opskrbe energijom

- pretvorbe energije (realni, nepovratljivi procesi) uzrokuju gubitak eksergije koji treba nadoknađivati
- povećanje broja stanovnika Zemlje i povećanje standarda zahtjeva proizvodnju novih količina eksergije

Povratljivi i nepovratljivi procesi

Koји су процеси povratljivi односно у којем би slučaju bili povratljivi?

- **kvalitativni i kvantitativni odgovori**
- **kvalitativni:**
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 okolici ne zaostanu neke trajne, vidljive (zabilježive) promjene (Njihalo.)

Povratljivi i nepovratljivi procesi

- kvantitativne odgovore na pitanja omogućuje razmatranje promjena fizikalne veličine nazvane **entropija**
- entropija je jednaka omjeru ukupne količine toplinske energije koja se izmjenjuje između sustava i okolice i temperature pri kojoj se to događa.
- **pritom vrijedi za adijabatski sustav**
(AS grade sustav, odnosno sustavi u kojima se odvijaju energetski procesi, i okolica)

Promjena entropije, povratljivost i nepovratljivost

- **ostaje li entropija AS konstantna ($ds_{AS} = 0$), za vrijeme energetskih procesa, u adijabatskom sustavu odvijaju povratljivi procesi: sva eksergija ostaje sačuvana, ništa se eksergije ne pretvara u anergiju**
- **raste li entropija AS ($ds_{AS} > 0$), radi se o nepovratljivim 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 eksergiju (perpetuum mobile druge vrste)

Promjena entropije adijabatskog sustava

■ zašto promatramo zbivanja u adijabatskom sustavu?

- adijabatski sustav zadovoljava postavljene odnose s obzirom na to da je entropija, točnije, promjena entropije definirana ovom diferencijalnom jednadžbom:

$ds = dq/T + d[\text{anergija nastala u nepovratljivim procesima}]/T \text{ [J/kgK]}$

npr., ako se radi o trenju (proces kojim se proizvodi entropija):

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

Strujanje entropije i proizvodnja entropije

Promjena se entropije dijeli na:

- strujanje entropije (dq/T) i
- na proizvodnju entropije

(npr, $|dw_{trenja}| / T$)

■ zašto $|dw_{trenja}|$ a ne dw_{trenja} ?

Kada će promjena entropije AS biti jednaka nuli?

- budući da je dq/T jednako nula, to ds_{AS} može biti jednaka nuli samo ako se unutar adijabatskog sustava ne odvijaju nepovratljivi procesi, tj. procesi koji uzrokuju proizvodnju (porast) entropije, poput prijelaza toplinske energije preko konačnih razlika temperature, ekspanzije plina bez obavljanja mehaničkog rada, pojavljivanja trenja, električnog otpora, neelastičnih deformacija, prigušivanja itd., odnosno samo ako se unutar adijabatskog sustava odvijaju povratljivi procesi izjednačavanja početno nejednolike raspodjele gustoće energije (npr., prijelaz toplinske energije na povratljivi način)

Koliki se dio eksergije pretvara u anergiju?

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

$$d(\text{gubitak eksergije}) = T_{\text{ok}} \, ds_{\text{AS}}$$

$$[ds_{\text{AS}} = ds_{\text{ok}} + ds_s]$$

Tu ćemo jednadžbu riješiti kasnije, kao i odgovoriti na pitanje koliko maksimalno mehaničkog rada možemo dobiti iz nekog oblika energije, a sada ćemo najprije promatrati i opisivati **energetske pretvorbe i procese u termoelektranama**.

Pitanja

Promatrajte 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 jednake?

Uputa: odgovor na pitanje potražite služeći se principom očuvanja mase i pojmom "otvoreni sustav". Gustoće vina prepostavite jednakim. (Odgovor usporedite s onim danim na web stranici <http://www.fer.unizg.hr/predmet/enevre> u Tekst 02 O energiji.)

Pitanja

Što je energetski povoljnije:

- gurati ili
- povlačiti (vući) tačke (teretna kolica s jednim kotačem i dvije ručke)?

Izgori li u spremniku krutih stijenki (zatvoreni sustav) komad drveta, hoće li se promijeniti količina mase u spremniku?

Što ako je spremnik ujedno i adijabatski sustav?

Bi li mogao vidjeti nevidljivi čovjek? (Lik romana i filmova.)

Pitanja

S visine H m istu ste čeličnu kuglu bacili istom početnom brzinom $c_{\text{početno}}$ m/s:

- a) okomito uvis
- b) vodoravno
- c) okomito prema dolje.

Zanemarimo li otpor zraka, u kojem će slučaju čelična kugla najvećom brzinom udariti u tlo?

„Prirodni“ efekt staklenika

Zahvaljujući prirodnom (bez djelovanja čovjeka) efektu staklenika srednja je temperatura na Zemlji 15 °C. Kolika bi bila temperatura na Zemlji bez tog efekta?

Rj.

U svijetu kojem živimo neprestano se odvija samo jedan te isti proces - strujanjem energije izjednačuje se početno nejednolika raspodjela gustoće energije: energija struji sa sustava (iz prostora) veće gustoće na sustav (u prostor) manje gustoće. Tako se energija Sunčeva zračenja pristigla na Zemlju stalno isijava u Svemir. Pritom vrijedi bilanca energije (princip očuvanja energije): količina dozračene energije jednaka je količini izračene energije u nekom vremenskom razdoblju.

„Prirodni“ efekt staklenika

Približan proračun daje ovakav rezultat.

Budući da je vrijednost solarne konstante $1,36 \text{ [kW/m}^2\text{]}$, da Zemlju, s obzirom na dozračenu Sunčevu energiju, možemo smatrati ravnim diskom površine $r_{\text{Zemlje}}^2 \pi \text{ [m}^2\text{]}$, da se 30% dozračene energije sa Sunca na vanjskom obodu atmosfere odmah reflektira u Svemir, te da Zemlja zrači prema Stefan-Boltzmannovom zakonu, to vrijedi:

„Prirodni“ efekt staklenika

$$P_{apsorbirana} = P_{izračena}$$

$$P_{apsorbirana} = (1 - 0,3) \cdot 1,36 \left[\frac{kW}{m^2} \right] \cdot r_{Zemlje}^2 \left[m^2 \right] \cdot \pi$$

$$P_{izračena} = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right] \cdot T^4 \left[K^4 \right] \cdot 4r_{Zemlje}^2 \left[m^2 \right] \cdot \pi$$

$$T^4 = \frac{0,7 \cdot 1,36 \left[\frac{kW}{m^2} \right]}{4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]} = 4,17 \cdot 10^9 \left[K^4 \right]$$

$$T = 254K \approx -19^\circ C$$

Prividna snaga generatora termoelektrane

20.000 tona ugljena, ogrjevne moći $8,37 \text{ MJ/kg}$, priprema se dnevno za pogon termoelektrane.

Odredite:

- a) moguću godišnju proizvodnju električne energije (u kWh) na stezaljkama generatora ako je stupanj djelovanja termoelektrane na stezaljkama generatora 36%, i
- b) instaliranu snagu generatora u MVA, faktor je snage svakog generatora 0,8, ako je ukupno vrijeme trajanja rada generatora 7.000 sati godišnje, a želi se iskoristiti sva pripremljena količina ugljena.

Prividna snaga generatora termoelektrane

Rj.

a)

Godišnje izgori:

$$20.000 \cdot 365 = 7.300 \cdot 10^3 \text{ tona ugljena.}$$

Ukupna količina toplinske energije koja se pritom oslobađa je:

$$7.300 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot 8,37 \text{ MJ/kg} = 61.101 \cdot 10^6 \text{ MJ},$$

a proizvedena električna energija u godini dana
($1\text{kWh} = 3,6\text{MJ}$)

$$\begin{aligned} 61.101 \cdot 10^6 \text{ MJ} \cdot 0,36 &= 21.996,36 \cdot 10^6 \text{ MJ=} \\ &= 6.110,1 \cdot 10^6 \text{ kWh.} \end{aligned}$$

Prividna snaga generatora termoelektrane

b)

Radnu snagu generatora određujemo iz godišnje moguće proizvodnje električne energije i vremena trajanja rada generatora

$$Snaga \equiv P = \frac{energija}{vrijeme} = \frac{6.110,1 \cdot 10^6 kWh}{7.000 h} =$$

$$= 0,8729 \cdot 10^6 kW = 873MW,$$

pa je dakle prividna snaga generatora

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{873}{0,8} = 1091MVA.$$

Izbacivanje u Svemir

Odredite brzinu kojom moramo tijelo mase m kg izbaciti okomito uvis da se ono ne vrati na Zemlju?

Masa je zemlje $M = 6,0 \cdot 10^{24}$ kg, polumjer $R = 6370$ km, a gravitacijska konstanta $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$.

Rj.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2};$$

$$|W_{12}| = F \cdot s \cdot \cos \varphi$$

Izbacivanje u Svemir

Rad dW koji se obavi kad se tijelo mase m digne za dz uvis (u polju sile teže Zemlje) iznosi:

$$dW = G \frac{mM}{z^2} dz,$$

gdje je z udaljenost tijela od središta Zemlje.

Rad pak koji treba obaviti da se tijelo digne do visine (mjesta) gdje sila teže više ne djeluje, bit će:

$$W_{12} = \int_R^\infty G \frac{mM}{z^2} dz = G \frac{mM}{R}.$$

Izbacivanje u Svemir

Taj je rad jednak (princip očuvanja energije) promjeni kinetičke energije tijela bačenog u vis brzinom c (početno tijelo miruje). Vrijedi dakle:

$$G \frac{mM}{R} = \frac{mc^2}{2}.$$

Odavde dobivamo:

$$c = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = 11,2 \text{ km s}^{-1}.$$

Snaga motora automobila

Konstantni je moment automobilskog motora 300 Nm kad osovina motora rotira s 4500 okretaja u minuti. Kolika je snaga motora na osovini?

Rj.

$$M = Fr \Rightarrow F = \frac{M}{r} \Rightarrow W_t = F_s = \frac{M}{r} 2r\pi n = 2\pi n M \Rightarrow$$

$$\dot{W}_t = \frac{dW_t}{dt} = 2\pi \frac{dn}{dt} M = 2\pi \dot{n} M [W]$$

gdje je \dot{n} broj okretaja u jedinici vremena.

Snaga motora automobila

$$\dot{W}_t = 2\pi \frac{4.500 \text{okr}}{\text{min}} \frac{1 \text{min}}{60 \text{s}} \cdot 300 \text{Nm} \frac{1 \text{kJ}}{1000 \text{Nm}} = \\ = 141,37 \text{kW}$$

Snaga motora na osovini upravno je proporcionalna momentu motora i brzini rotacije osovine.

Svladavanje uzbrdice

Automobil mase 1000 kg vozi konstantnom brzinom od 100 km/h po vodoravnoj cesti. Počinje li se cesta uspinjati nagibom od 20° , kolika je dodatna snaga automobila ostaje li brzina i dalje jednaka 100 km/h?

Rj.

Dodatna je snaga potrebna budući da se povećava potencijalna energija automobila zbog uspinjanja ceste.

Svladavanje uzbrdice

$$\begin{aligned}\dot{W}_t &= \frac{dW_t}{dt} = mg \frac{dz}{dt} = mg c_{okomita} = \\ &= 1000kg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 100 \frac{km}{h} \cdot \sin 20^0 \cdot \frac{1000m}{1km} \cdot \frac{1h}{3600s} = \\ &= 93,2 \frac{kJ}{s} = 93,2 kW\end{aligned}$$

Svladavanje trenja

Brzina je automobila mase 1000 kg na vodoravnoj cesti 100 km/h. Ukoliko je koeficijent trenja između ceste i guma automobila 0,007, kolika je snaga kojom se svladava ta sila trenja?

Rj.

$$\dot{W}_t = F_{trenja}c = \mu Gc = 0,007 \cdot 1000kg \cdot$$

$$\cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 100 \frac{km}{h} \cdot \frac{1000m}{1km} \cdot \frac{1h}{3600s} =$$

$$= 1.907,5 \frac{kNm^2}{s^3} = 1,9kW$$

Ubrzanje automobila

Odredite snagu potrebnu da se automobil mase 1000 kg ubrza iz stanja mirovanja do 100 km/h za 10 sekunda.

Rj.

Rad potrebit za ubrzanje automobila jednak je promjeni kinetičke energije automobila

$$W_t = \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) = \frac{1}{2} 1000 \text{kg} \left[\left(\frac{100.000 \text{m}}{3600 \text{s}} \right)^2 - 0^2 \right] =$$

Ubrzanje automobila

$$= 385.802,5 J = 385,8 kJ \Rightarrow$$

$$\dot{W}_t = \frac{W_t}{\Delta t} = \frac{385,8}{10} = 38,58 kW$$

To je dodatna snaga snazi potrebnoj za svladavanje otpora trenja i drugih nesavršenosti.

Trajanje ubrzanja

Snaga je motora automobila 100 kW, a masa 1000 kg. U kojem bi se vremenu, zanemarimo li sve otpore kretanju automobila, automobil iz stanja mirovanja mogao ubrzati do 100 km/h na vodoravnoj cesti?

Rj.

$$W_t = \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) = \frac{1}{2} 1000 \text{kg} \left[\left(\frac{100.000 \text{m}}{3600 \text{s}} \right)^2 - 0^2 \right] = \\ = 385.802,5 \text{J} = 385,8 \text{kJ} \Rightarrow$$

Trajanje ubrzanja

Traženo je vrijeme stoga

$$\delta t = \frac{W_t}{\dot{W}_t} = \frac{385,8 \text{ kJ}}{100 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}} = 3,9 \text{ s}$$

Kako voziti?

Stalno je opterećenje osobnog automobila 12 kW. Prepostavi li se termički stupanj djelovanja motora automobila jednak 24% odredite potrošnju goriva u km/litri kreće li se automobil brzinom:

- a) 80 km/h
- b) 130 km/h.

Energija je 1 litre goriva 10,6 kWh.

Kako voziti?

Rj.

„Stalno opterećenje“: svladavanje sile trenja između kotača automobila i podloge; trenje omogućuje kretanje automobila kakvo poznajemo. (Kad bi trenje bilo jednako nuli, kada ne bi postojalo u prirodi, automobil bi se mogao kretati jedino na „mlazni pogon“. Kao i mi, životinje, ptice, ribe,...)

Moramo odrediti energiju (mehanički rad) za svladavanje otpora zraka (atmosfere).

Potrebita je sila za svladavanje otpora zraka:

Kako voziti?

$$F_z = k \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_z \cdot A \cdot c^2 [N]$$

Sila otpora, osim o brzini, ovisi i o gustoći fluida kroz koji se kreće tijelo, o ploštini površine tijela izloženoj strujanju fluida i o „aerodinamičnosti“ tijela.

Kako voziti?

U promatranom slučaju:

- $\rho_z = 1,2 \text{ kg/m}^3$ (gustoća zraka)
- $A = 1\text{m}^2$ (površina projekcije automobila na ravnicu okomitu na pravac gibanja automobila – zbog jednostavnijeg proračuna pretpostavljamo da je ploština te površine 1m^2)
- $c[\text{m/s}]$ = brzina automobila

Kako voziti?

- $k = 1$ (veličina koja ovisi o obliku automobila („aerodinamičnosti“) i o brzini kojom se kreće – određuje se eksperimentalno u „zračnim tunelima“; $k < 1$, no, zbog što jednostavnijeg računa, uzimamo $k = 1$. Isto tako, u promatranom rasponu brzina, koji je malen, ne ćemo puno pogriješiti, pretpostavimo li neovisnost k-a o brzini.)

Dobivamo da je potrebita snaga automobila, koja omogućuje kretanje automobila u postojećim okolnostima, jednaka (snaga = sila • brzina):

Kako voziti?

$$P = \left[\frac{F_z \cdot c}{1000} + 12 \right] kW = \\ = \left[\frac{\frac{1}{2} \rho_z k A c^3}{1000} + 12 \right] kW.$$

(Dijelimo s 1000 kako bismo snagu umjesto u W izrazili u kW; $k = 10^3$)

Snaga je dakle (struje fluida) proporcionalna kubu brzine, c^3 . (I to je jedan od problema povezanih s radom vjetroelektrana.)

Kako voziti?

Odgovorimo sada na postavljena pitanja.

a)

$$80 \frac{km}{h} \cdot \frac{1000m}{1km} \cdot \frac{1h}{3600s} = 22,2 m/s$$

$$P_a = \frac{0,6 \cdot 22,2^3}{1000} + 12 = 18,565 kW$$

$$\left(\frac{1}{2} \rho_z = 0,6; k = 1; A = 1 \right)$$

Kako voziti?

Potrebna je energija dakle za 1 sat vožnje 18,565 kWh, a u 1h prevali se 80 km.

Prema tome, potrošnja energije na putu od 1 km bit će:

$$\frac{18,565 \text{ kWh}}{80 \text{ km}} = 0,232 \text{ kWh / km.}$$

Slično,

130 km/h = 36,1 m/s,

$$P_b = \frac{0,6 \cdot 36,1^3}{1000} + 12 = 40,23 \text{ kW}$$

40,23 kWh, 130 km => 0,3095 kWh/km –
potrošnja energije po km

Kako voziti?

Odredimo sada prijeđeni put utroši li se 1 litra goriva.

Vrijede odnosi:

1 litra goriva daje 10,6 kWh, no, kemijska energija nije eksergija:

$$10,6 \cdot 0,24 = 2,544 \text{ kWh/litri } (\eta_t = 0,24)$$

iznos je energije pretvorene u mehanički rad kojim automobil svlada sile otpora prilikom kretanja.

Kreće li se automobil brzinom **80 km/h** s jednom litrom goriva preći će **10,97 km**:

Kako voziti?

$$\frac{2,544 \frac{kWh}{l}}{0,232 \frac{kWh}{km}} = 10,966 km/l,$$

vozimo li pak **brzinom od 130 km na sat, prećićemo 8,22 km:**

$$\frac{2,544 \frac{kWh}{l}}{0,3095 \frac{kWh}{km}} = 8,22 km/l.$$

Ukratko

Gоворили smo o definicijama i pojmu energija, o podjeli oblika energije na stalne i prijelazne, na energiju, eksnergiju i anergiju, o oblicima energije, o opskrbi Zemlje energijom, o fotosintezi i Sunčevoj energiji, o mehaničkom radu, o pojmu sustav, o dvije definicije 1. i 2. glavnog stavka termodinamike, o problemu opskrbe energijom, o povratljivim i nepovratljivim procesima i uvjetima povratljivosti, o entropiji i gubicima eksnergije.

Što treba znati (naučiti) – 02 O energiji (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- adijabatski sustav
- anergija
- Coulombova sila
- četiri temeljne prirodne sile
- drugi glavni stavak termodinamike
- eksergija
- električna potencijalna energija
- elektromagnetska sila
- energija
- energija mirovanja

Što treba znati (naučiti) – 02 O energiji **(<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)**

- entropija
- fizikalna svojstva sustava
- fotosinteza
- geotermalna energija
- granica sustava
- gravitacijska potencijalna energija
- gravitacijska sila
- izolirani sustav
- jaka nuklearna sila
- jedino vanjsko djelovanje

Što treba znati (naučiti) – 02 O energiji **(<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)**

- kemijska energija
- kinetička energija
- konačno, završno stanje
- magnetska sila
- materija
- mehanička energija
- mehanički rad
- nepovratljivi proces(i)
- okolica (sustava)
- otvoreni sustav

Što treba znati (naučiti) – 02 O energiji **(<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)**

- početno stanje
- polje sile
- potencijalna energija
- povratljivi proces
- pozitivni rad
- prijelazni oblici energije
- prijelazni oblik energije
- proces
- proizvodnja entropije
- promjena entropije, povratljivost i nepovratljivost

Što treba znati (naučiti) – 02 O energiji

(<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- prvi glavni stavak termodinamike
- rad trenja
- sila
- slaba nuklearna sila
- stalni ili stacionarni oblici energije
- stanje sustava
- strujanje entropije
- Sunčeve zračenje
- sustav
- teret

Što treba znati (naučiti) – 02 O energiji **(<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)**

- termonuklearna fuzija
- toplinska energija
- tvarni sustav
- unutrašnja energija
- veličina (funkcija) stanja sustava
- zatvoreni sustav

Energijeske tehnologije

Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama

Osnovno o pretvorbama i procesima u termoelektranama

Vladimir Mikuličić, Davor Grgić, Zdenko Šimić, Marko Delimar
FER, 2013.



Teme:

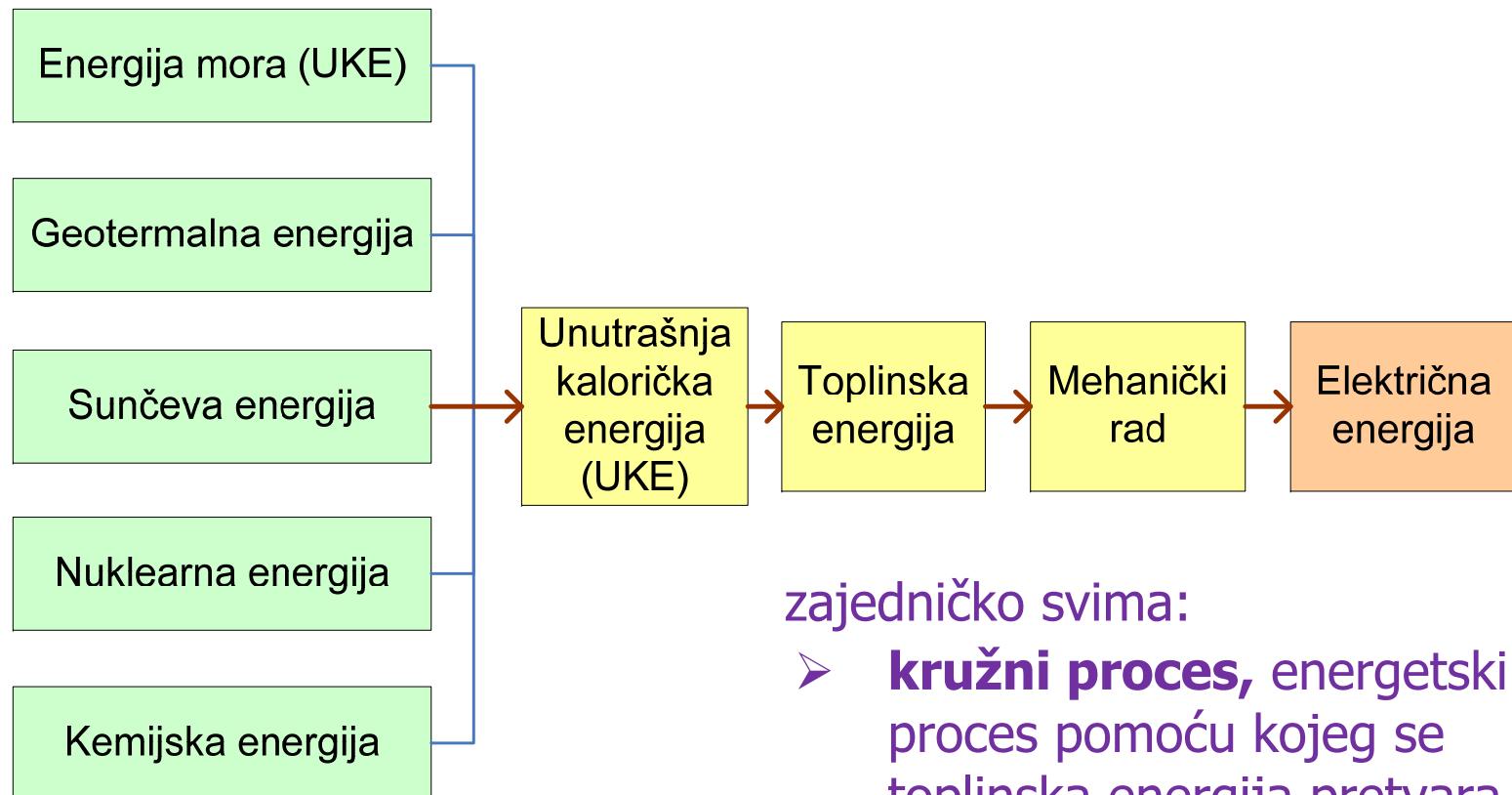
1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
- 4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama**
5. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
6. Geotermalna energija
7. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
8. Potrošnja električne energije
9. Prijenos i distribucija el. en.
10. Energija Sunca
11. Energija vjetra
12. Energija biomase, Gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
13. Skladištenje energije
14. Energija, okoliš i održivi razvoj

Sadržaj (o čemu ćemo govoriti)

- Energetske pretvorbe u termoelektrani s parnom turbinom
- Termoelektrana kao zatvoreni sustav
- Princip očuvanja mase za zatvoreni sustav
- Princip očuvanja energije za zatvoreni sustav
- Termoelektrana kao sklop otvorenih sustava
- Princip očuvanja mase za otvoreni sustav
- Princip očuvanja energije za otvoreni sustav
- Prvi glavni stavak termodinamike za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava
- Energetske pretvorbe u termoelektranama s plinskom turbinom
- Ukratko
- Pitanja, primjeri
- Što treba znati (naučiti)

Što su termoelektrane?

Energetske pretvorbe u termoelektranama



Podjela termoelektrana – prema primarnim oblicima energije

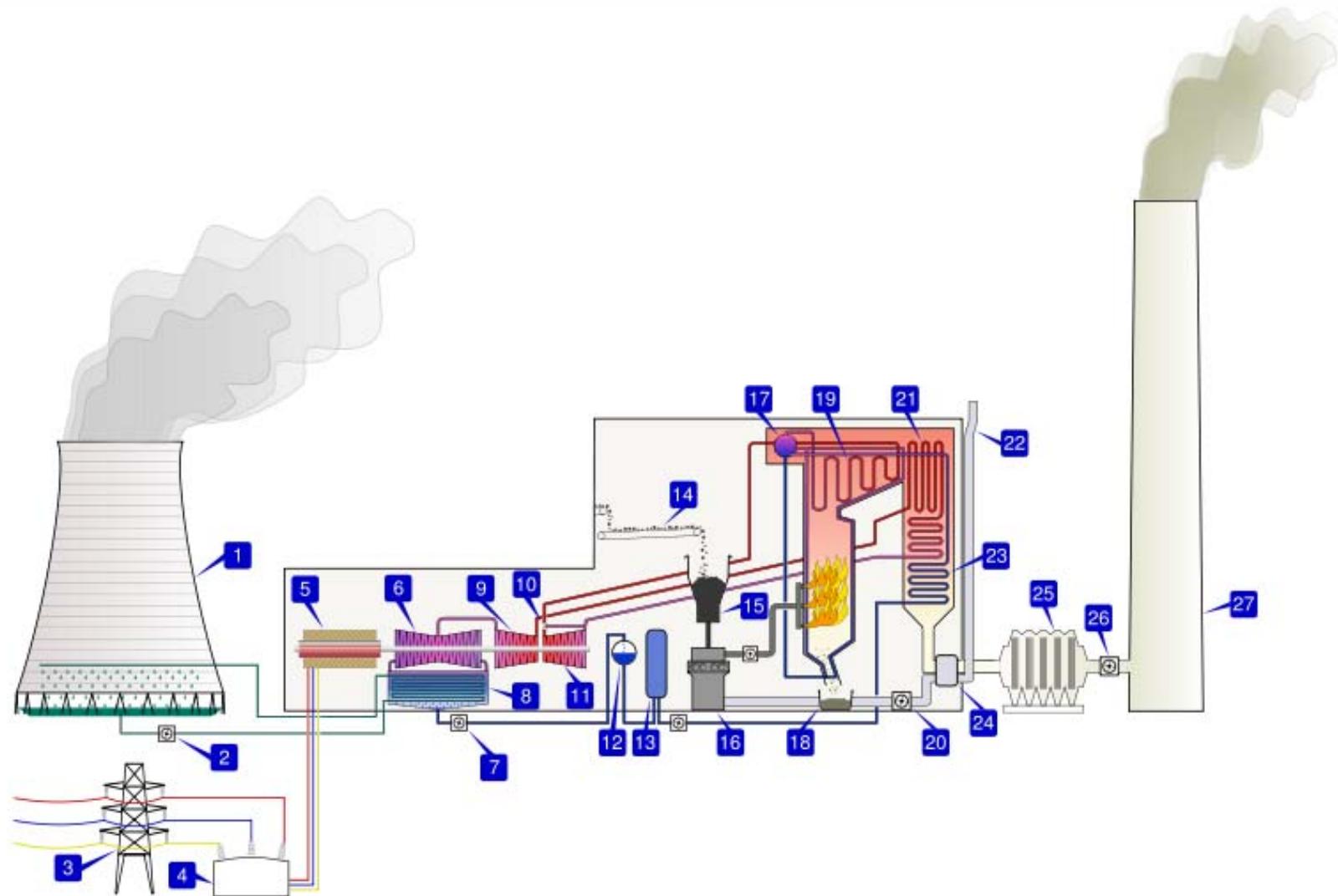
- konvencionalne („klasične“)
- nuklearne (fisija, fuzija)
- solarne (sunčane):
 solarne termoelektrane
 (fotonaponske elektrane ne ubrajaju se u
 termoelektrane) i
- geotermalne

Danas se iz termoelektrana namiruje više od 80% svjetskih potreba za električnom energijom, a oko 16% iz hidroelektrana.

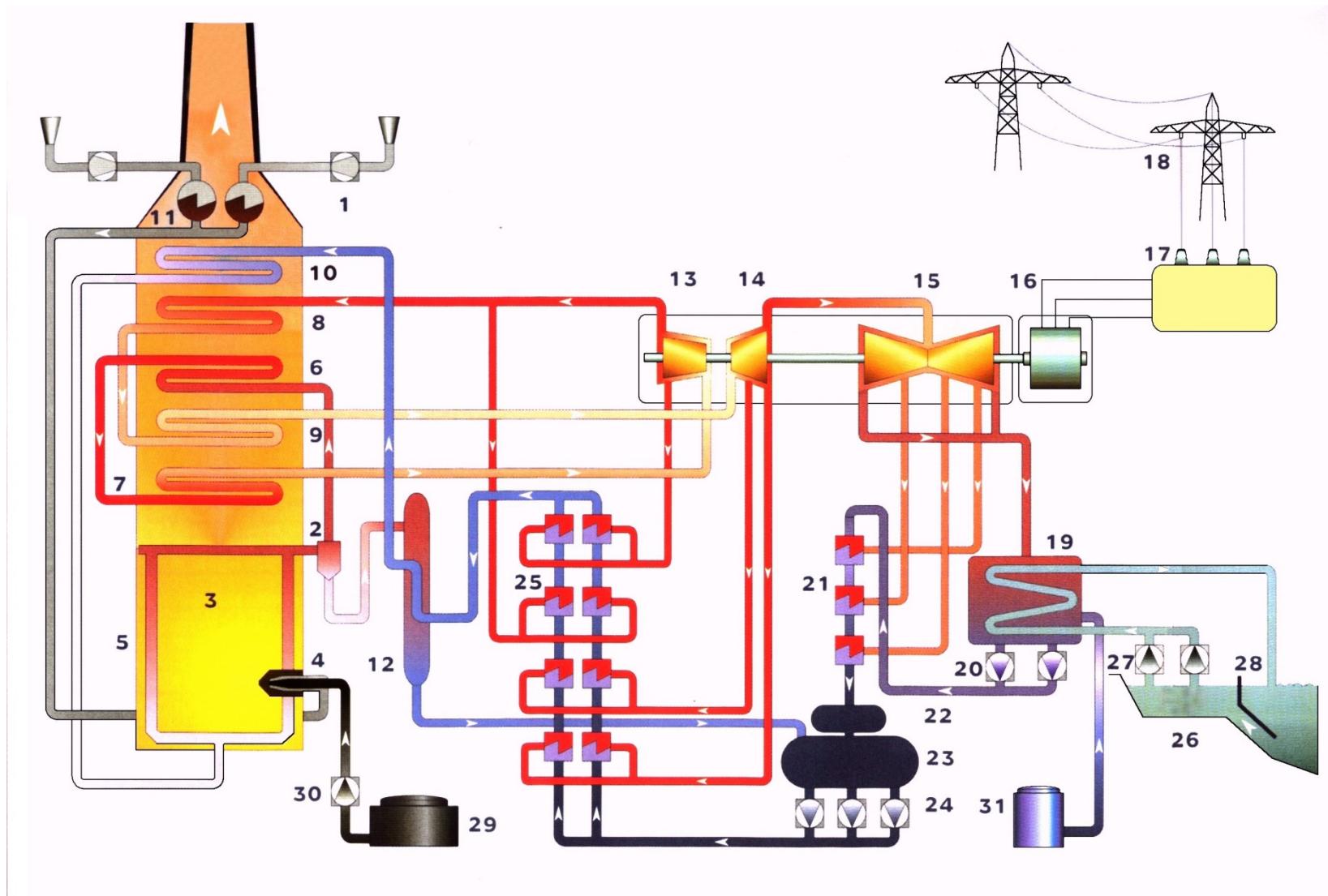
Termoelektrana ložena ugljenom, 2600 MW (NE Krško, 727 MW)



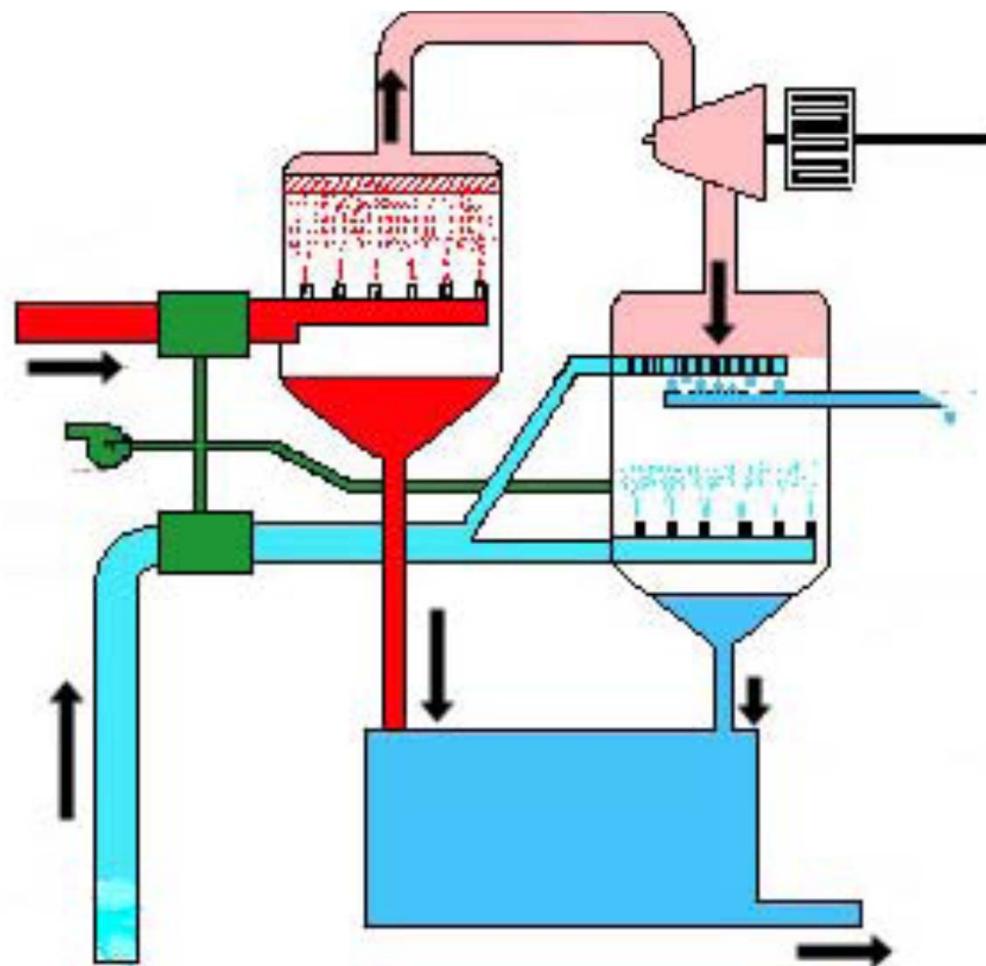
Shema termoelektrane ložene ugljenom



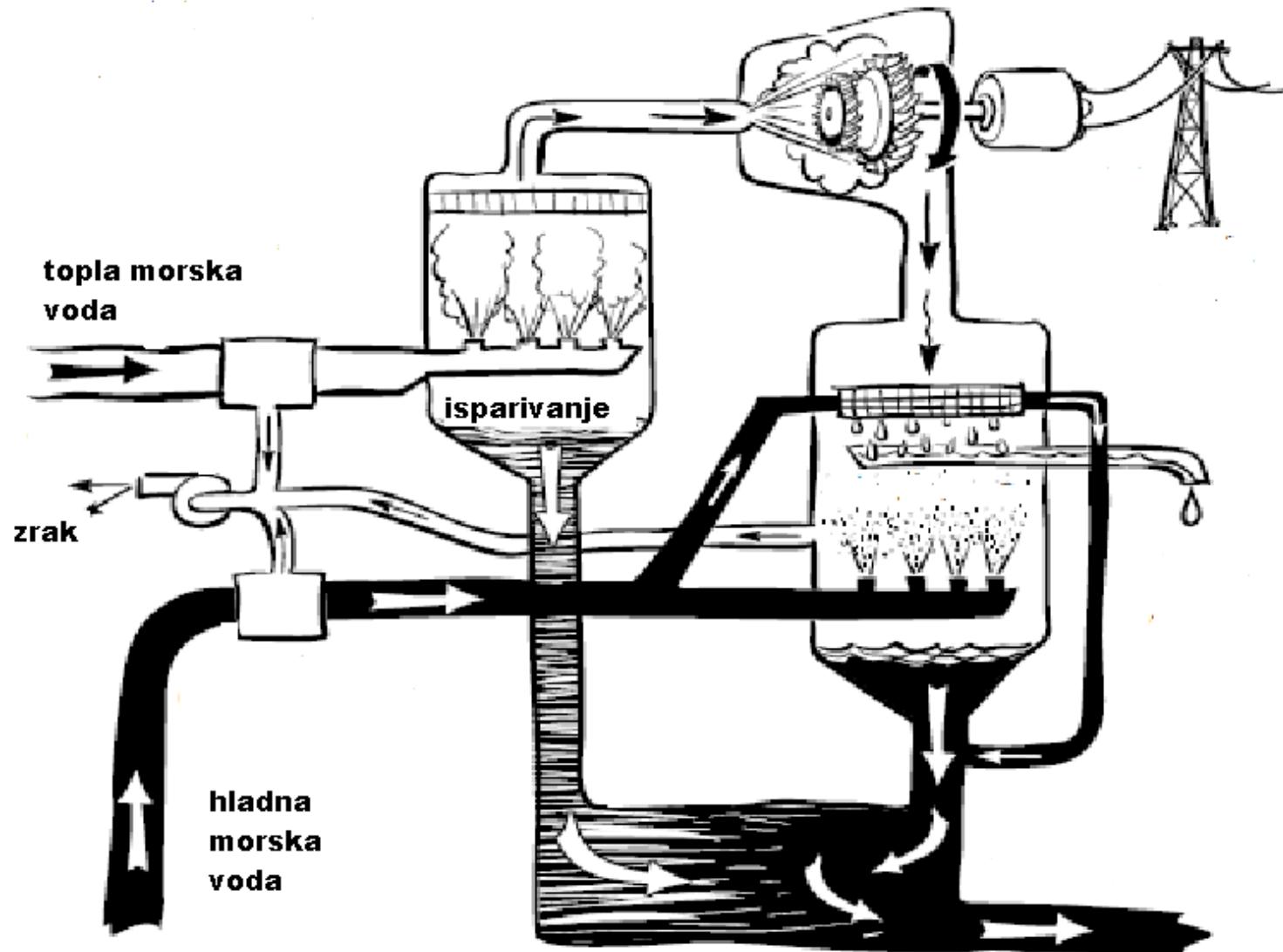
Shema termoelektrane ložene mazutom



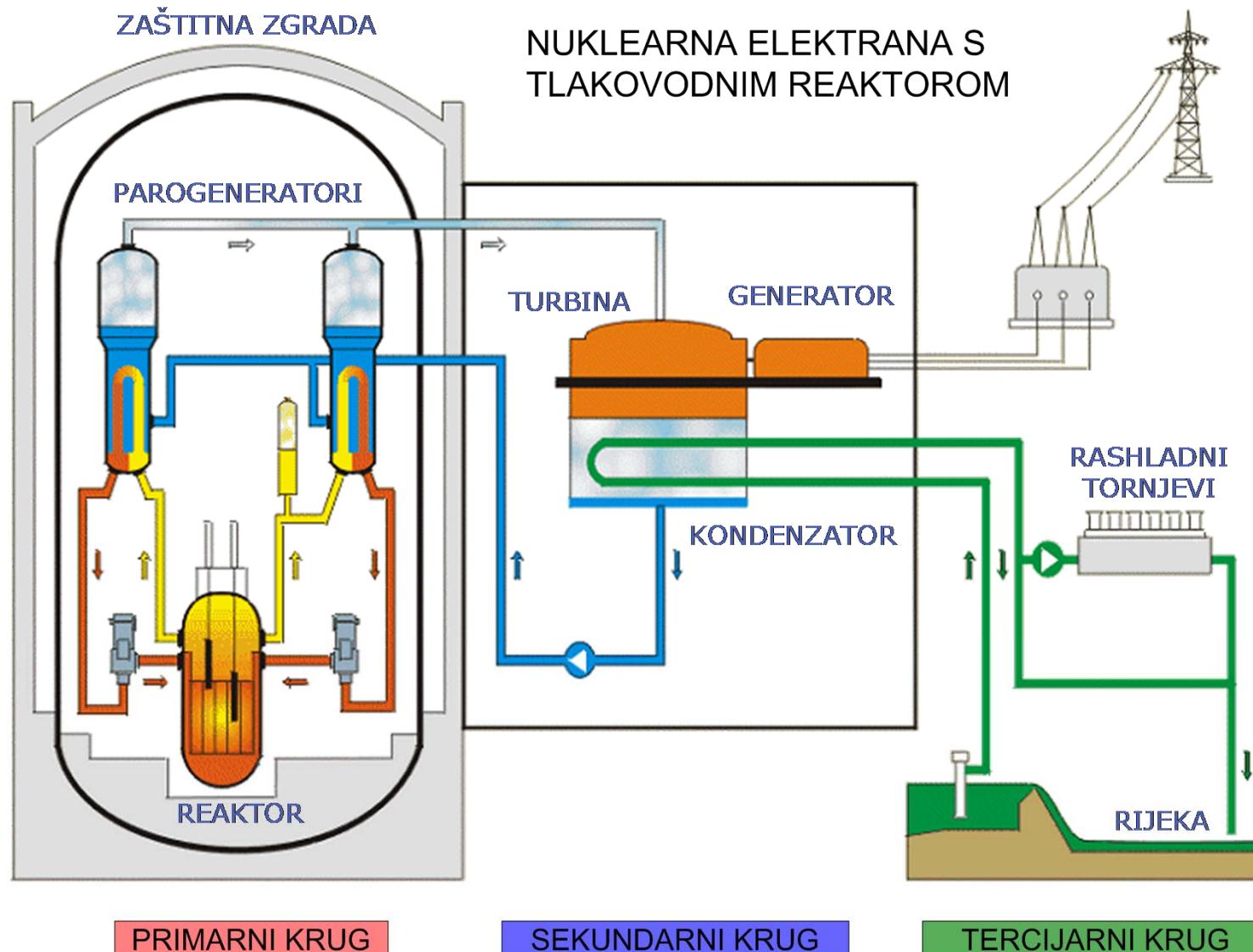
Pretvorba UKE mora u el. energiju



Pretvorba UKE mora u el. energiju



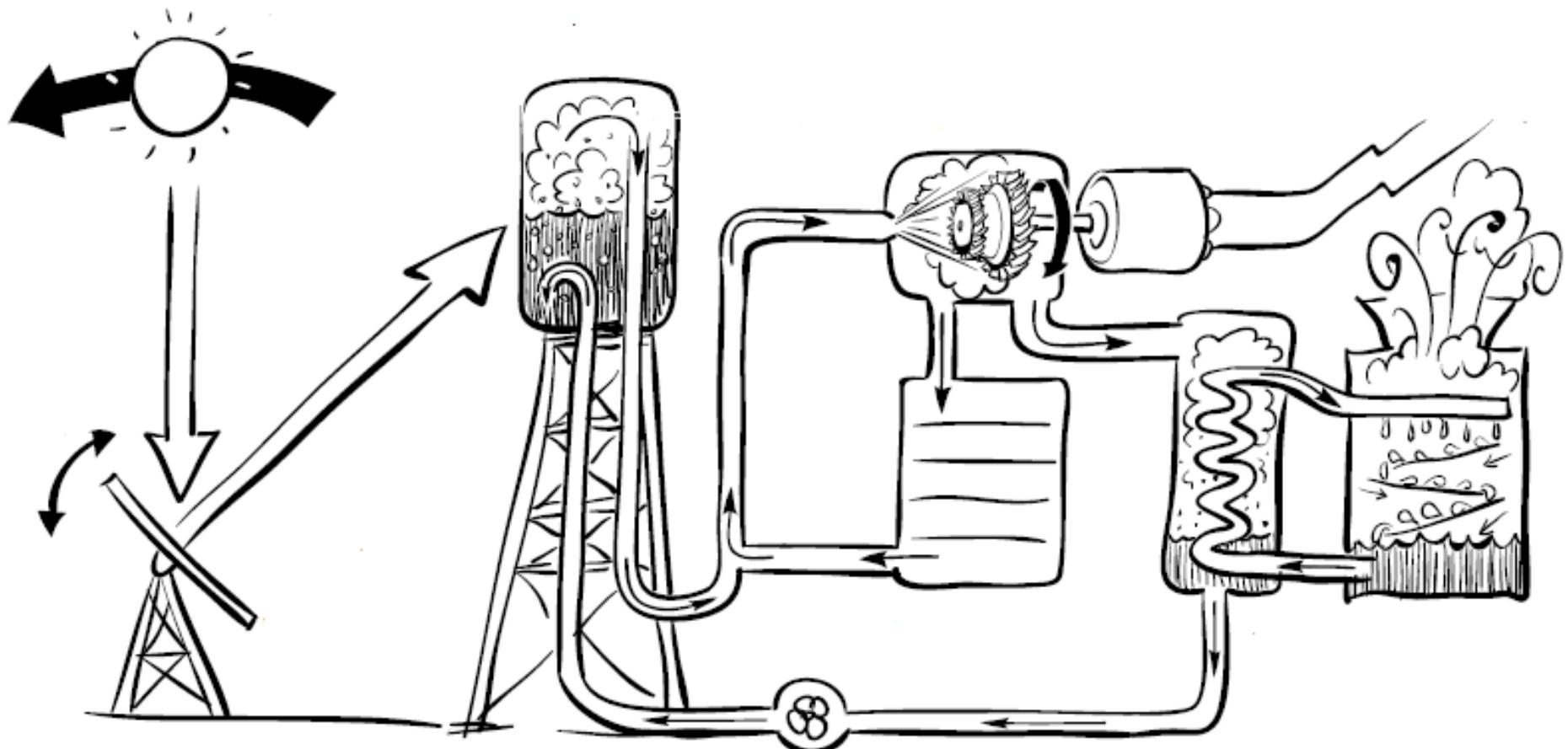
Shema nuklearne elektrane



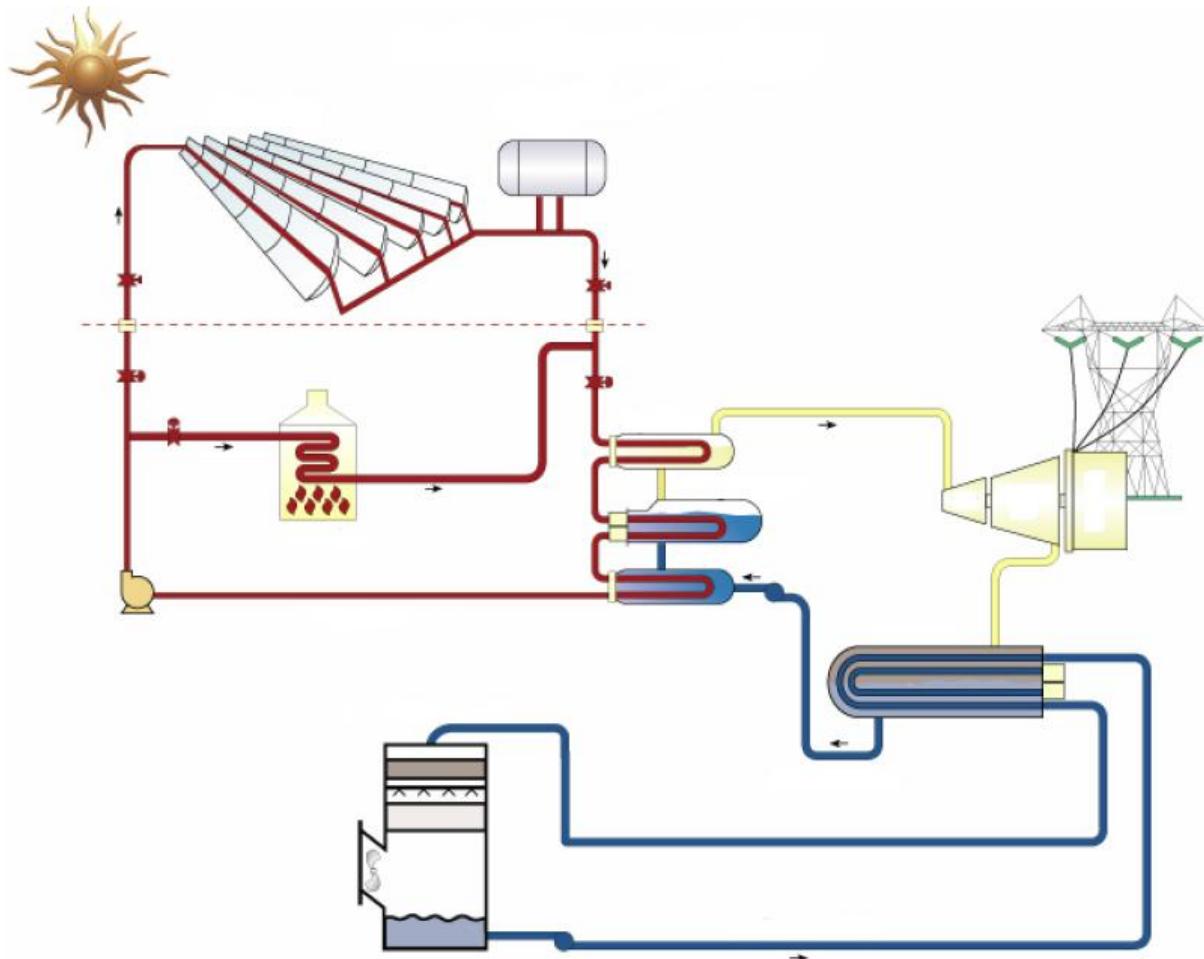
Solarna termoelektrana



Solarna termoelektrana

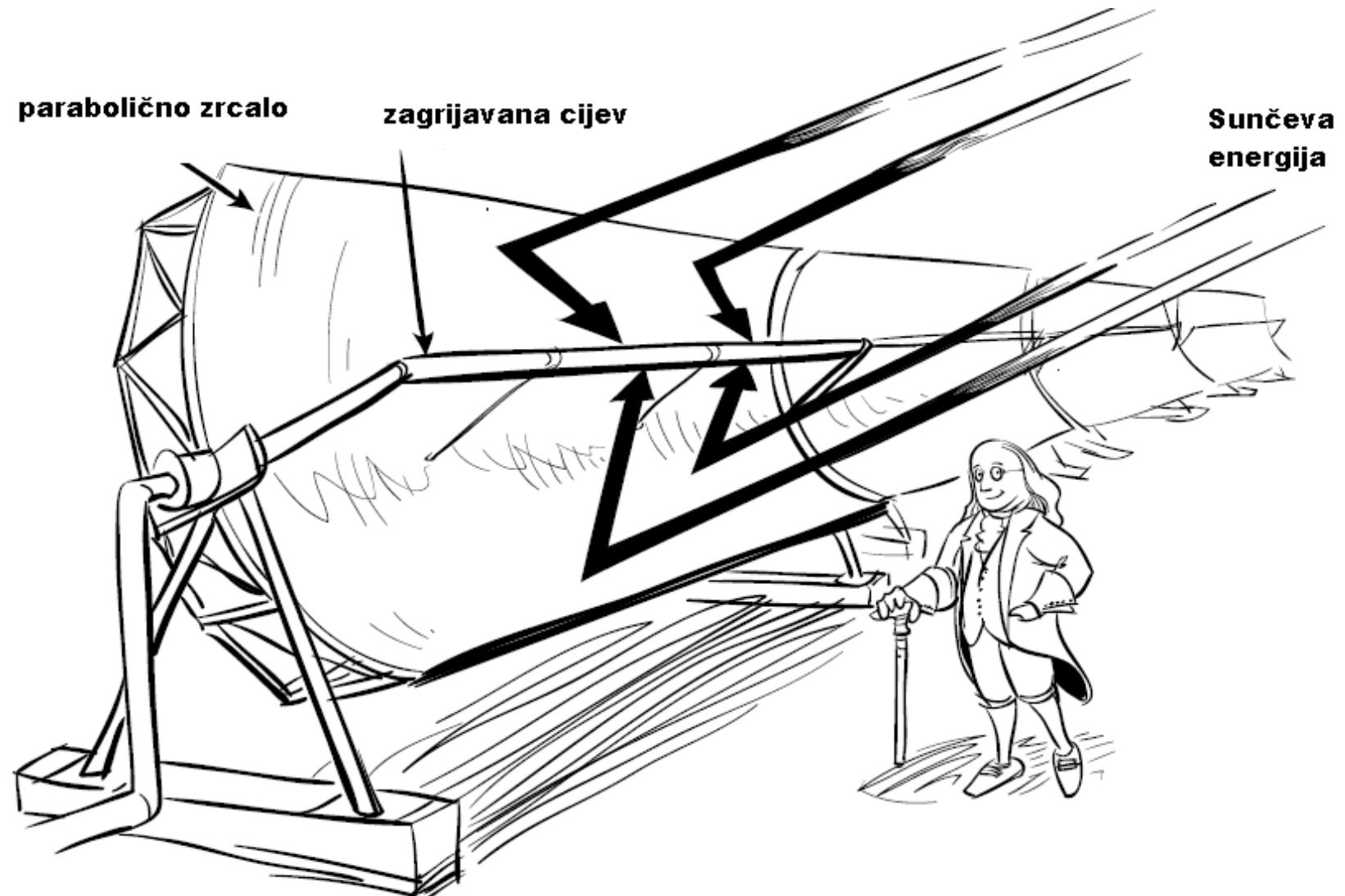


Parabolična protočna solarna termoelektrana

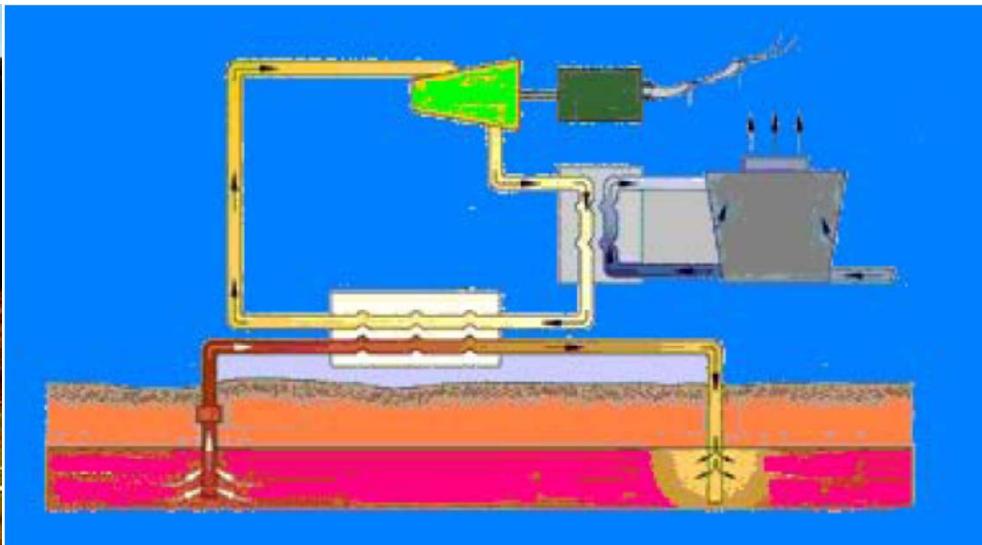
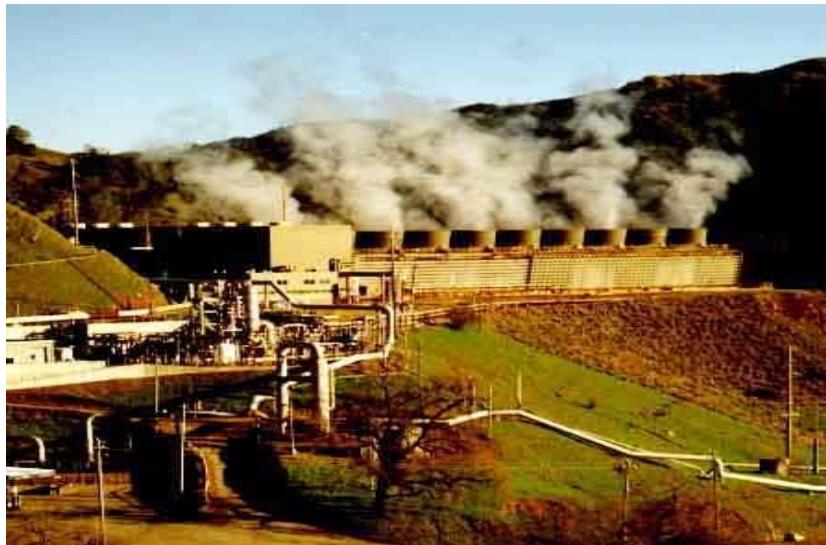


Solarna elektrana u kojoj ulje pohranjuje i predaje energiju Sunčeva zračenja vodi i pari u parnom kotlu (parogeneratoru)

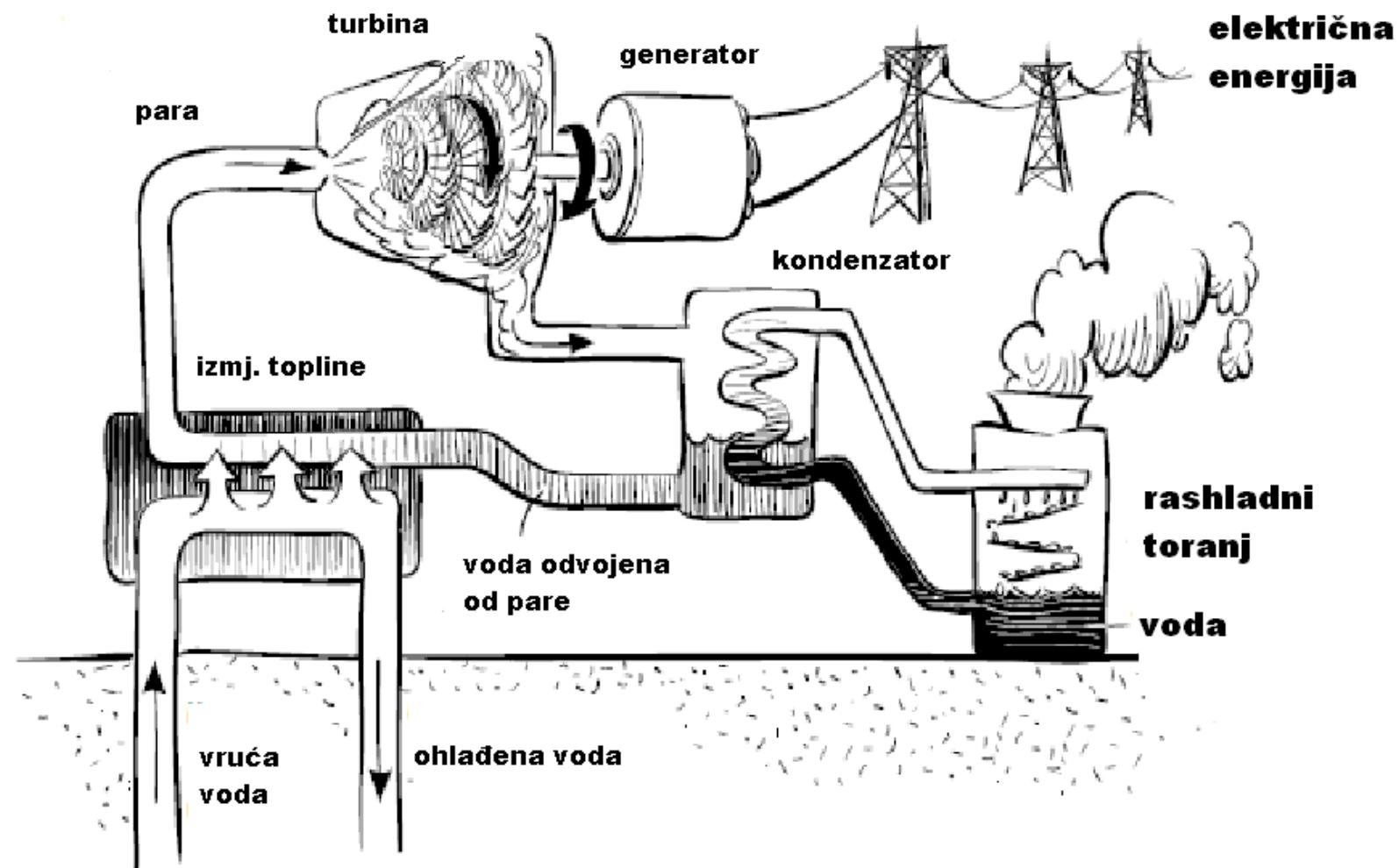
Zagrijavanje fluida pomoću paraboličnih zrcala



Geotermalna termoelektrana



Geotermalna termoelektrana



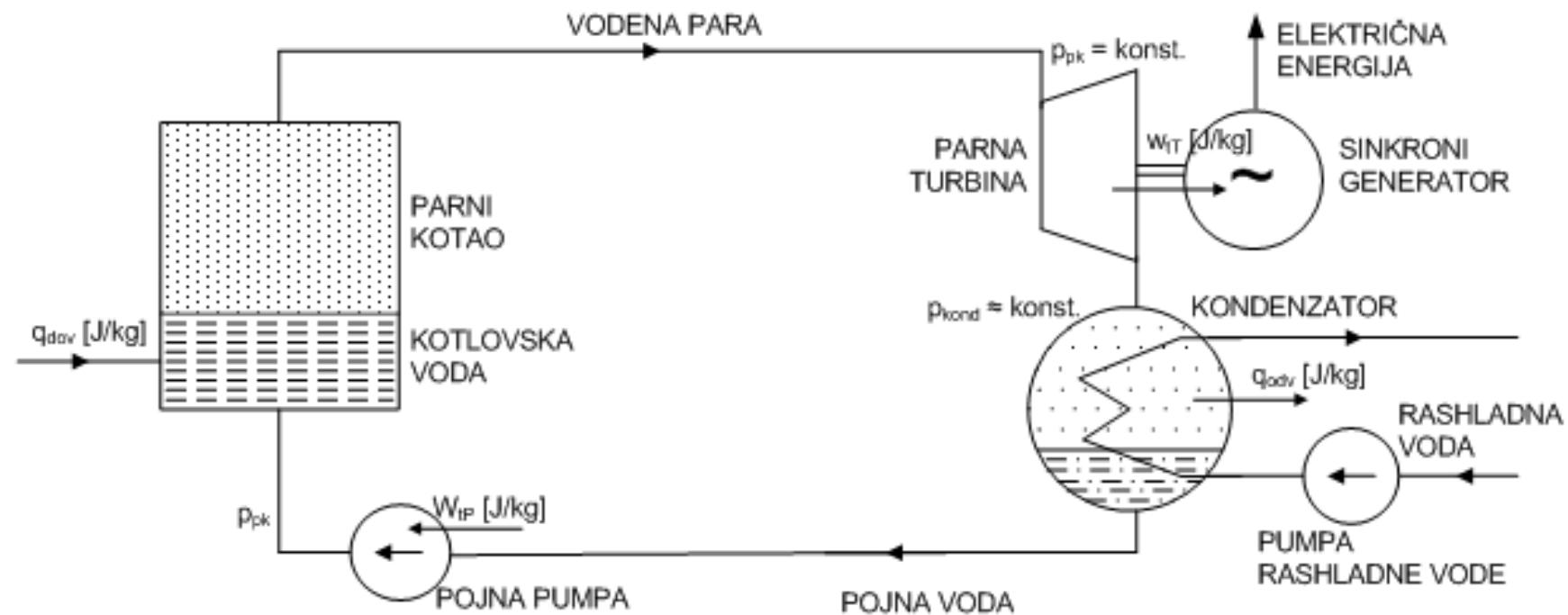
Podjela termoelektrana – prema pogonskim strojevima

- termoelektrane s:
 - parnim turbinama
(nekada je to bio parni stupni stroj)
 - plinskim turbinama
 - dizel motorima
- postoje i daljnje podjele termoelektrana, zajedničko svima:
 - **kružni proces**, energetski proces pomoću kojeg se toplinska energija pretvara u mehanički rad

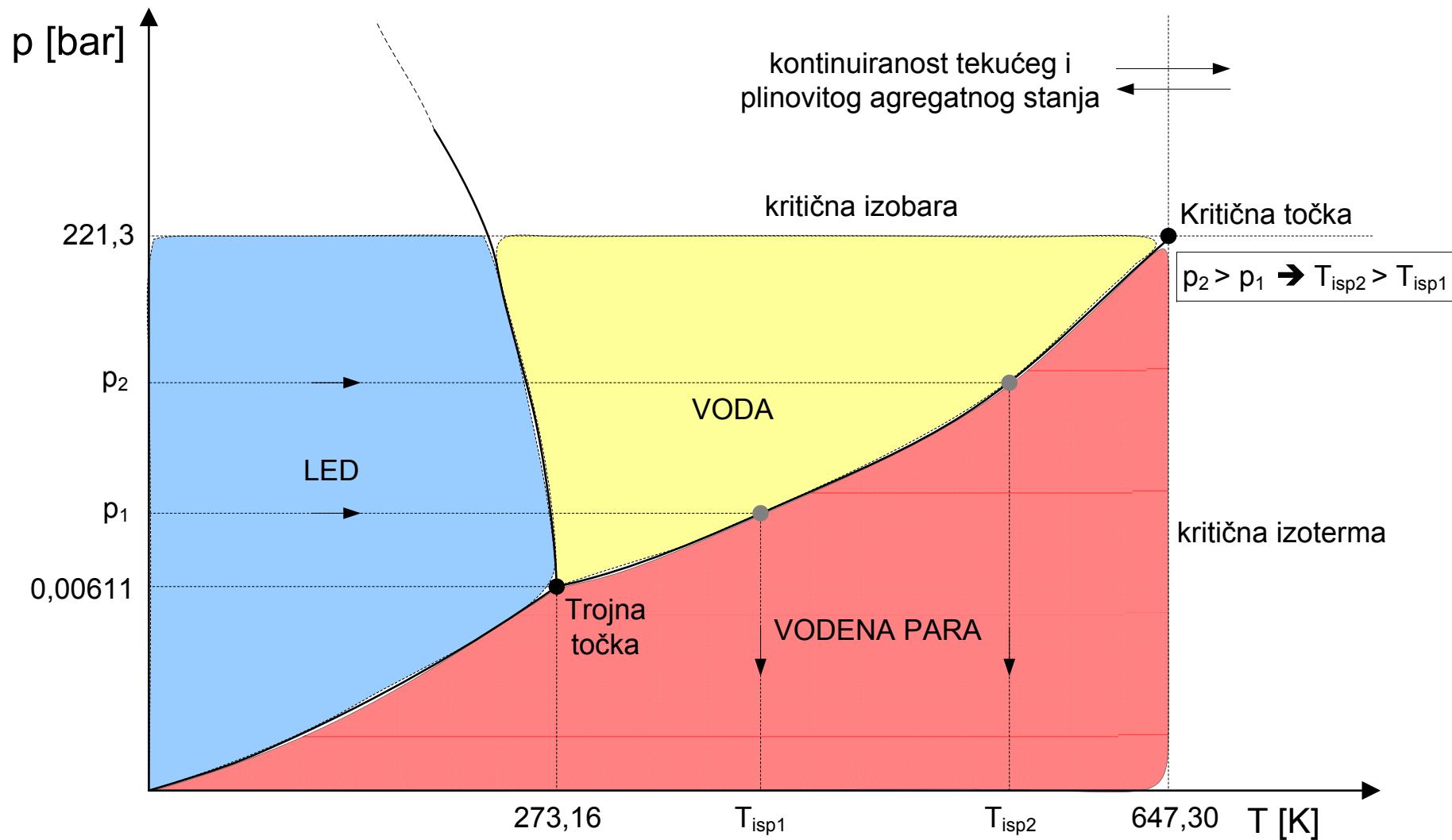
Energetske pretvorbe u termoelektrani s parnom turbinom – proces u ložištu

- energetske pretvorbe u "klasičnoj" termoelektrani s parnom turbinom započinju s procesom izgaranja
- proces u ložištu (parnom kotlu)

Energetske pretvorbe u termoelektrani s parnom turbinom – shema termoelektrane – opis pretvorbi i procesa



Agregatna stanja vode – ovisnost temperature isparivanja o tlaku

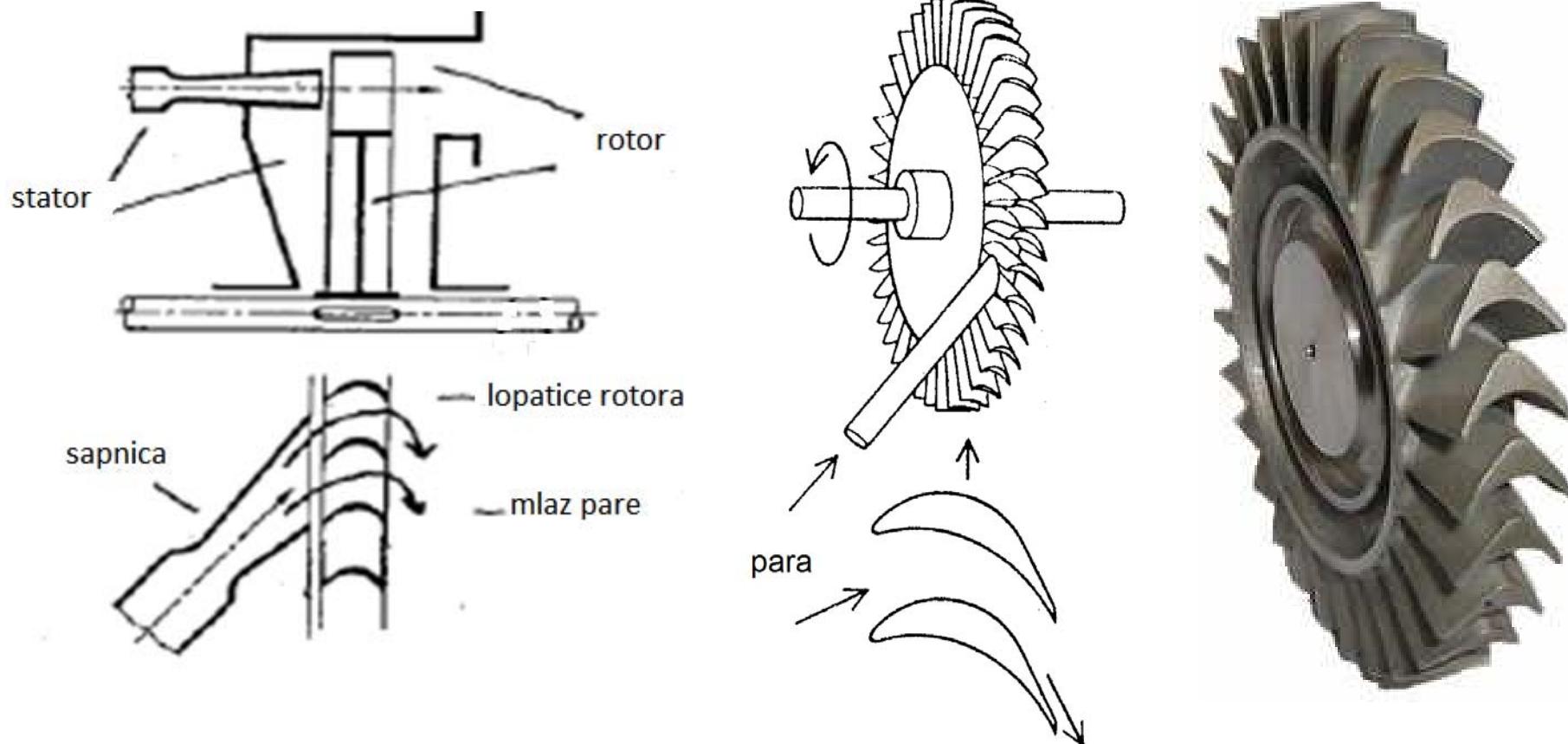


Nuklearna elektrana „Krško“ (2 jedinice rashladnih tornjeva)

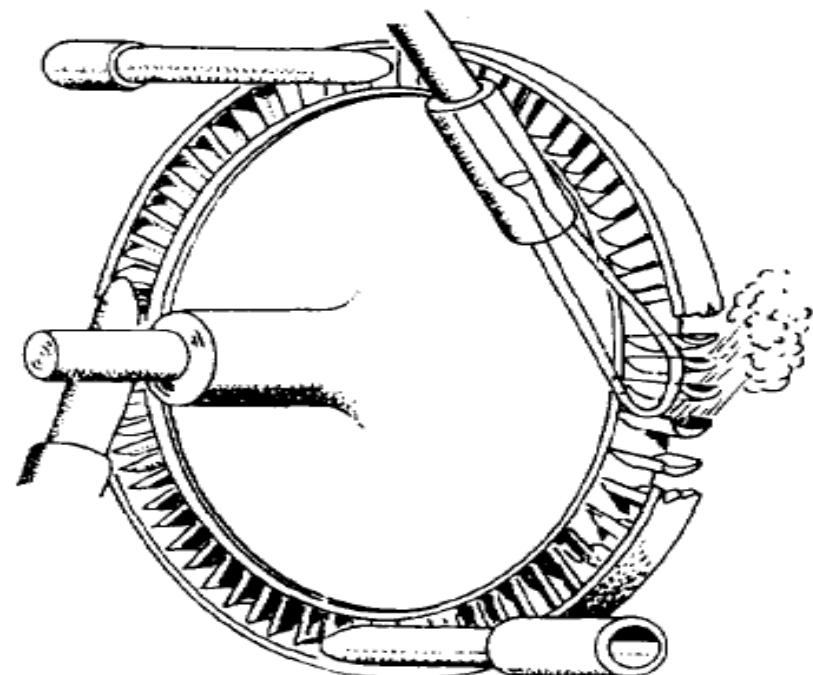
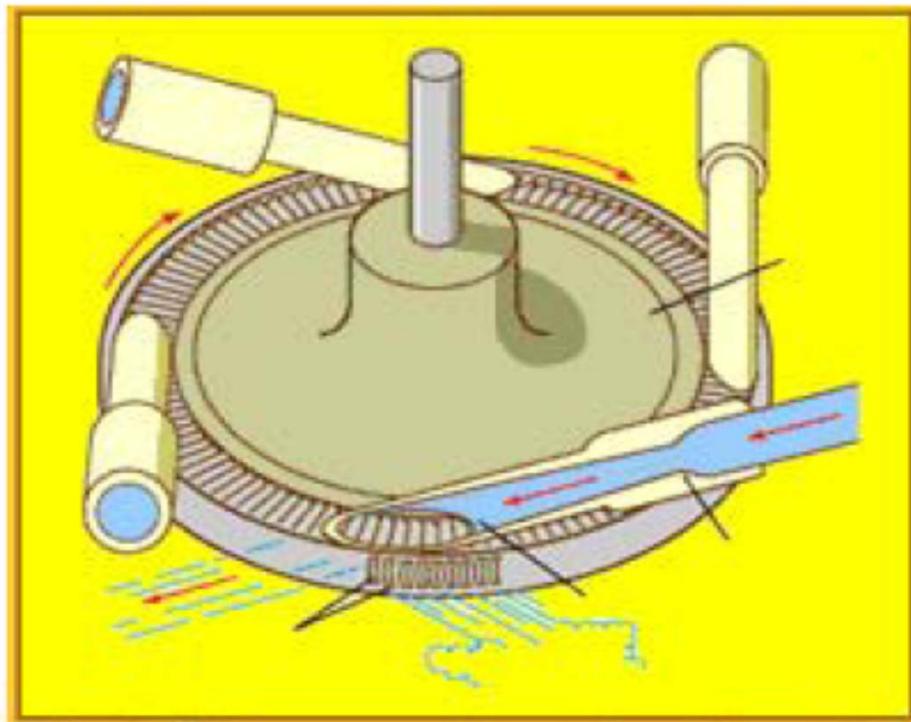


Energijske tehnologije: Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama

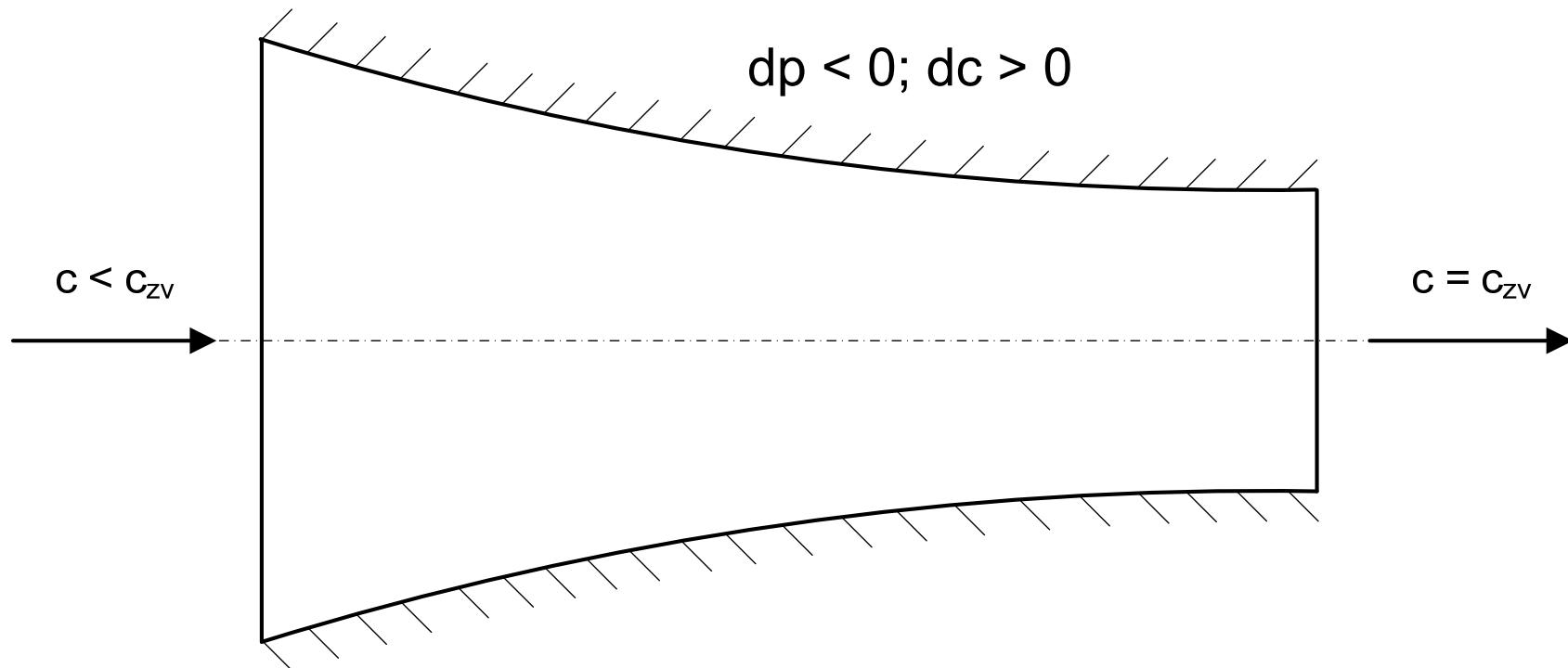
Energetske pretvorbe u parnoj turbini - skica najjednostavnije parne turbine



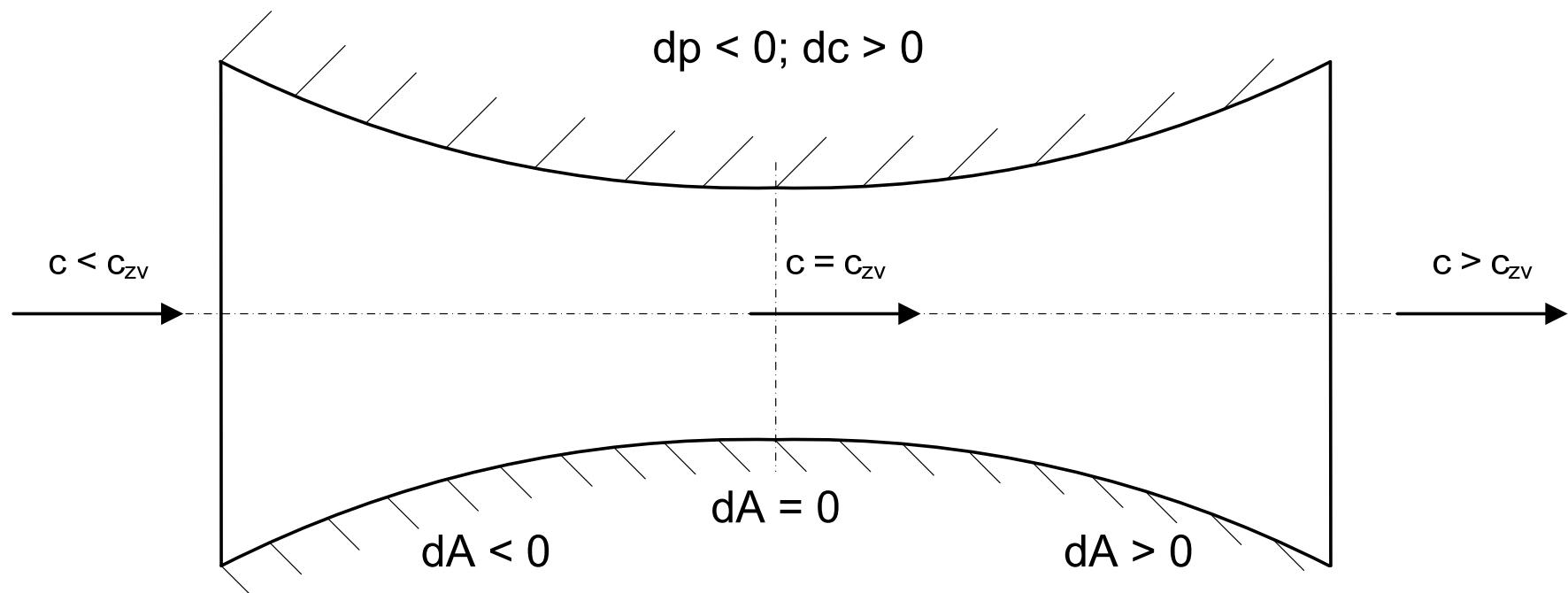
Energetske pretvorbe u parnoj turbini - skica najjednostavnije parne turbine



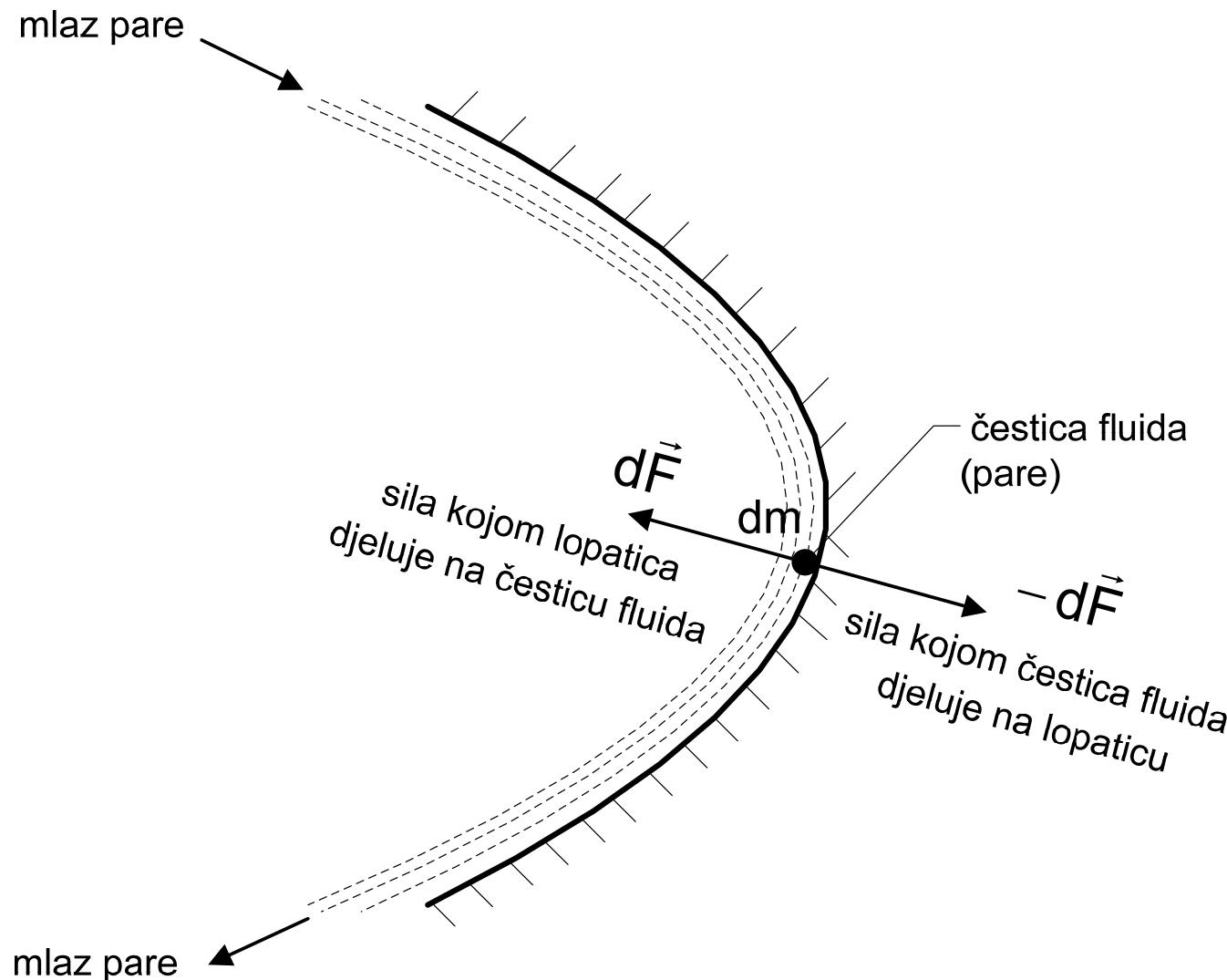
Energetske pretvorbe u parnoj turbini – proces u konvergentnoj sapnici



Energetske pretvorbe u parnoj turbini – proces u de Lavalovoj sponici



Energetske pretvorbe u parnoj turbini – proces u rotoru



Pretvorbe i procesi u termoelektrani – jednadžbe analiza

Radi se o ovim jednadžbama:

- analitički oblik principa očuvanja mase
- analitički oblik principa očuvanja energije
- analitički oblik principa rasta entropije
- jednadžba stanja idealnog plina

Termoelektrana kao zatvoreni sustav – princip očuvanja mase

- princip očuvanja mase za zatvoreni sustav

$$m_{zs} = \text{konst. [kg]},$$

$$\frac{dm_{zs}}{dt} = 0 \text{ [kg/s]}$$

Princip očuvanja energije za zatvoreni sustav

- Analitički oblik?
- **Kako zatvoreni sustav međudjeluje (komunicira) sa svojom okolicom?**
 - Samo izmjenjujući energiju (prijelazne oblike energije):
 - mehanički rad
 - toplinsku energiju
 - rad trenja

Zatvoreni sustav – preuvjeti izmjene energije

- Kako se mogu izmjenjivati prijelazni oblici energije između zatvorenog sustava i njegove okolice?
 - Samo
 - posredovanjem sile
 - posredovanjem razlike u temperaturi sustava i okolice

Takva su međudjelovanja određena i ograničena principom očuvanja energije.

Mehanički rad zatvorenog krutog sustava

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

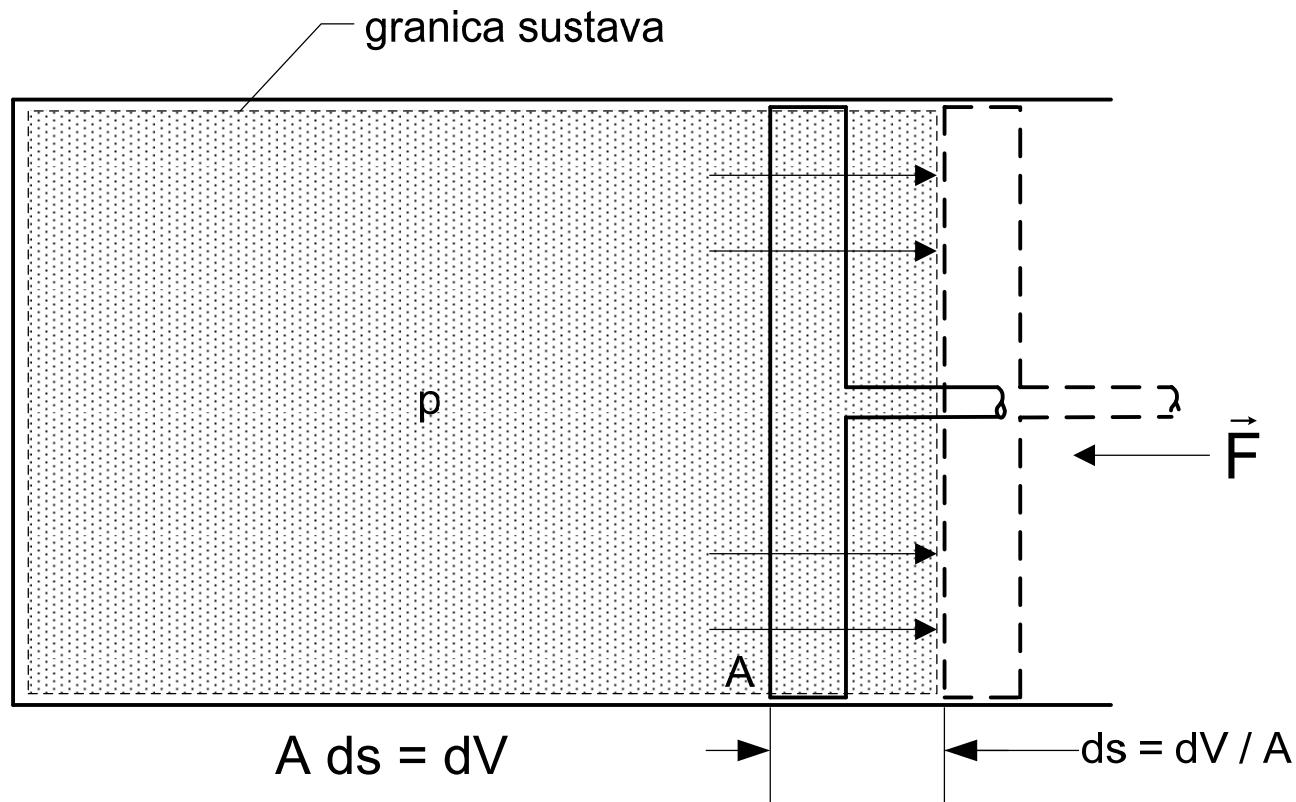
$$\frac{W_{12}}{m} = w_{12} = - \int_1^2 \frac{\vec{F}}{m} \cdot d\vec{s} \quad [J / kg]$$

Dobivamo:

$$w_{12} = - [g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2)] \quad [J/kg]$$

Miruje li zatvoreni sustav, može li izmjenjivati mehanički rad s okolicom?

Mehanički rad mirujućeg zatvorenog sustava



Mehanički rad promjene volumena

$$dW = -\vec{F} \cdot d\vec{s} = -F \, ds \cos\phi = -F \, ds \cos 180^\circ = F \, ds = pA \, ds = p \, dV$$

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

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

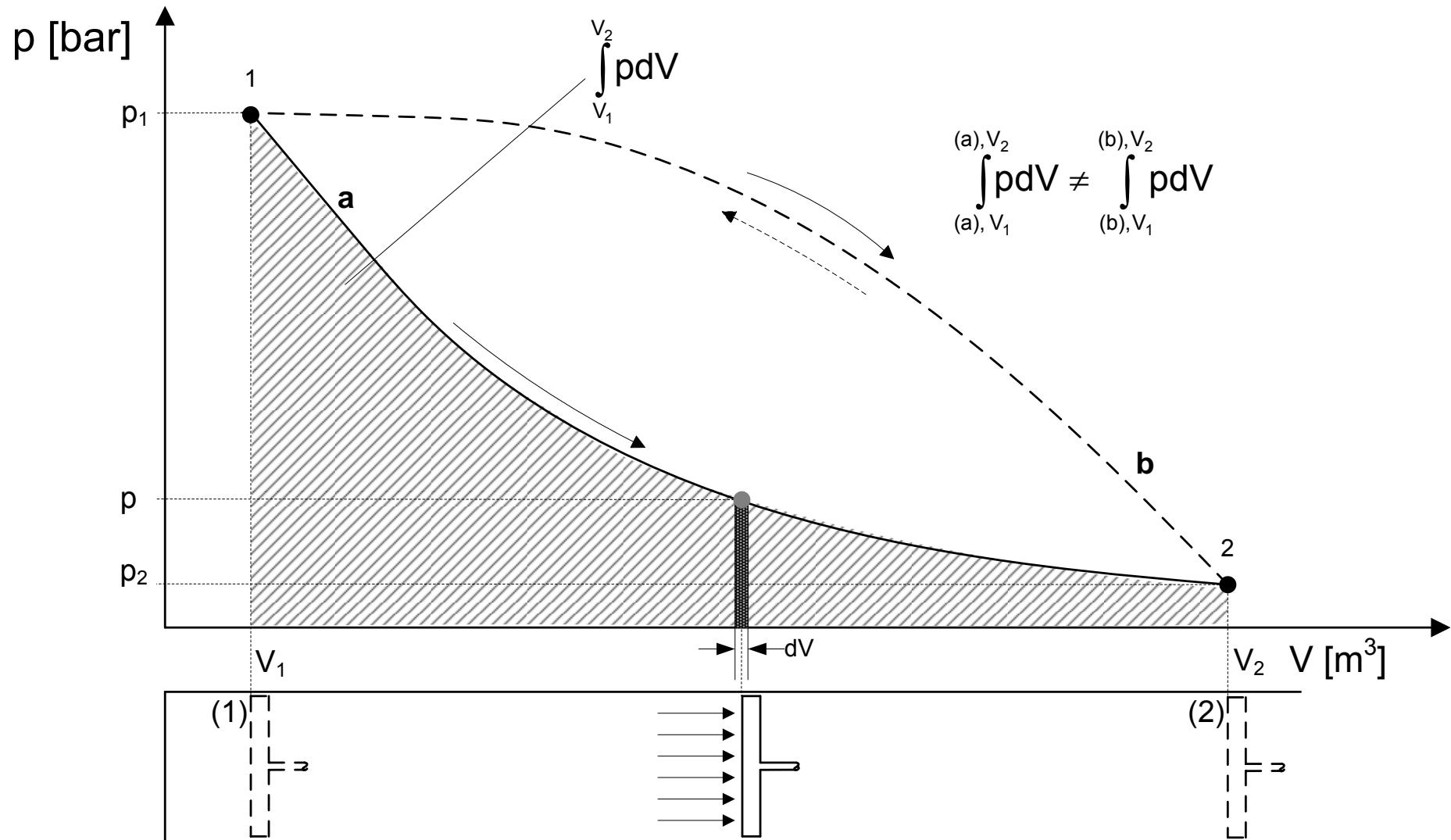
Mehanički rad promjene volumena nije veličina stanja

$$\int_1^2 dw \neq w_2 - w_1,$$

nego je

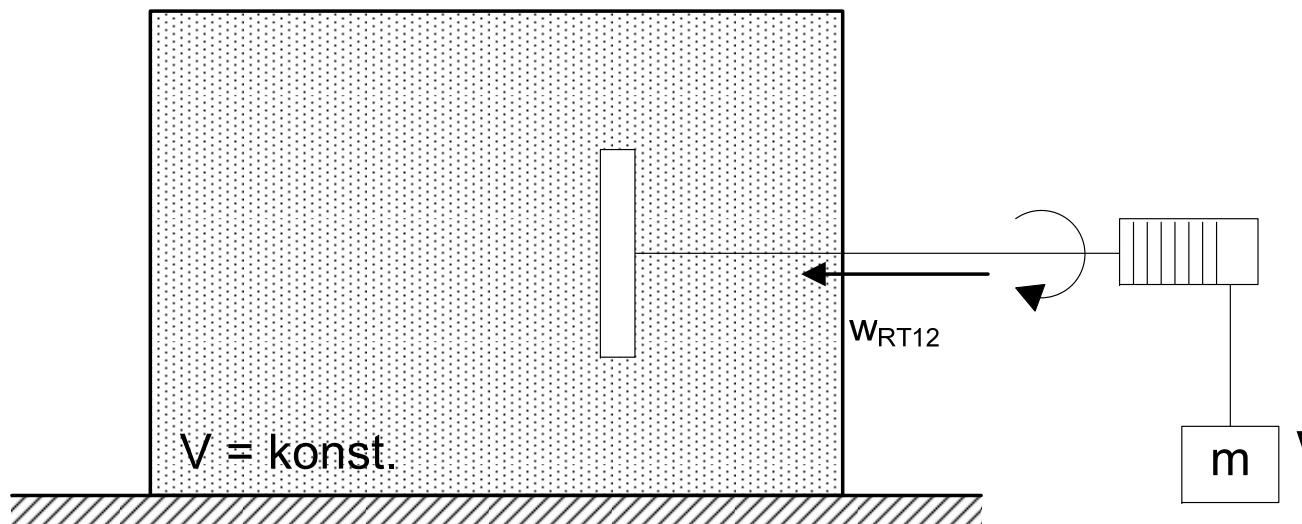
$$\int_1^2 dw = w_{12}$$

Mehanički rad promjene volumena nije veličina stanja



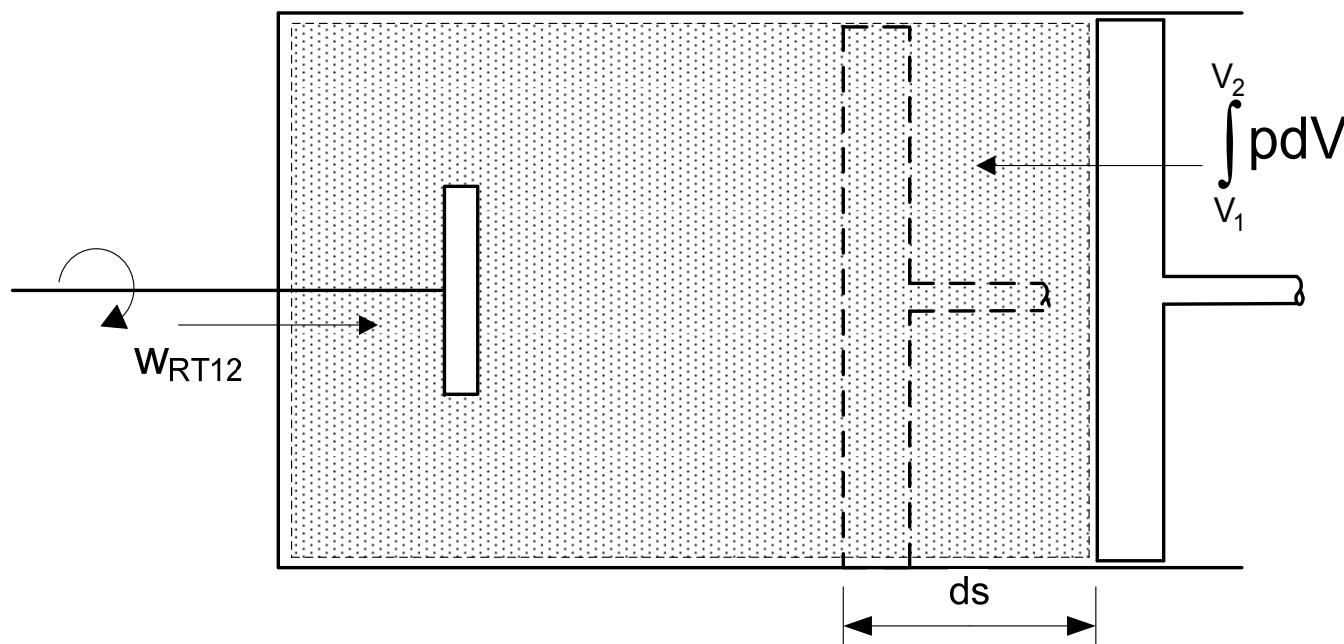
Rad trenja

- Miruje li zatvoreni sustav, ne mijenjajući svoj položaj u prostoru i ne mijenjajući volumen, može li i u tom slučaju izmjenjivati mehanički rad s okolicom?
- Da, djeluje li tangencijalna sila (sila trenja) na sustav: izmjenjuje se rad trenja.



Zatvoreni sustav – dovođenje mehaničkog rada promjene volumena i rada trenja

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdV + w_{RT12}$$



1. glavni stavak termodinamike za mehanički rad zatvorenog sustava

Giba li se zatvoreni sustav, valja uzeti u obzir i promjenu potencijalne i kinetičke energije sustava (promjena se elastične i energije rotacije ne događa):

$$w_{12} = - [g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2)] + \int_{v_1}^{v_2} pdv + w_{RT12} \text{ [J/kg]}$$

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

Pozitivni rad trenja?

- rad je trenja doveden sustavu ($w_{RT} < 0$)
- **može li rad trenja biti pozitivan?**
(Može li zatvoreni sustav predavati rad trenja u okolicu?)
- prema 2. glavnom stavku termodinamike, ne:

$$w_{RT_{12}} \leq 0$$

- to potvrđuju opažanja

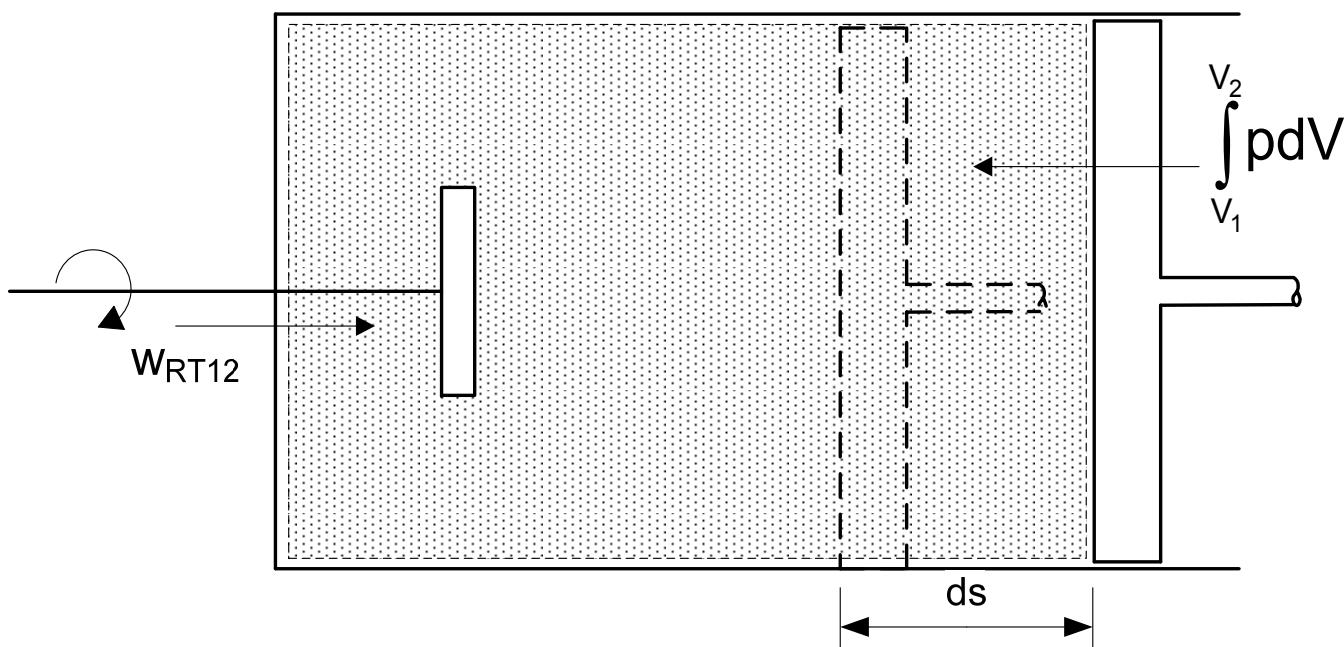
Mehanički povratljivi i nepovratljivi procesi

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

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

Zatvoreni sustav – dovođenje mehaničkog rada promjene volumena i rada trenja => UKE

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



Primjena principa očuvanja energije – unutrašnja kalorička energija

- u mirujući je zatvoreni sustav moguće dovoditi mehanički rad bilo kompresijom plina bilo 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
- zaključujemo o postojanju oblika energije nazvanom **unutrašnja kalorička energija**

Toplinska energija

- neelastičan sraz
- jer princip očuvanja energije vrijedi uvijek mora postojati oblik energije različit od mehaničkog rada koji, nevezano uz masu, prelazi granicu (zatvorenog) sustava, a koji je posljedica promjene unutrašnje kaloričke energije
- taj je oblik energije toplinska energija definirana relacijom (princip očuvanja energije):

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

($q_{12} > 0 \Leftrightarrow$ toplinska energija se dovodi u sustav;
 $q_{12} < 0 \Leftrightarrow$ toplinska energija se odvodi iz sustava)

Toplinska energija

- toplinska je energija definirana poznatim veličinama
- ona je prijelazni oblik energije
- pozitivna je ako se dovodi sustavu, a negativna kad se odvodi iz sustava
- toplinska je energija energija: u posebnom se energetskom procesu kojem je podvrgnut sustav, kružnom procesu, dovedena toplinska energija pretvara u unutrašnju kaloričku energiju, koja se zatim razlaže na eksergiju i anergiju
- eksergija se u obliku mehaničkog rada predaje drugim sustavima, a anergija se u obliku toplinske energije odvodi u okolicu
- takav se proces odvija u termoelektrani. Pritom se još mehanički rad (eksergija) u sinkronom generatoru pretvara u električnu energiju (eksergija).

Toplinska energija – diferencijalni oblik jednadžbi

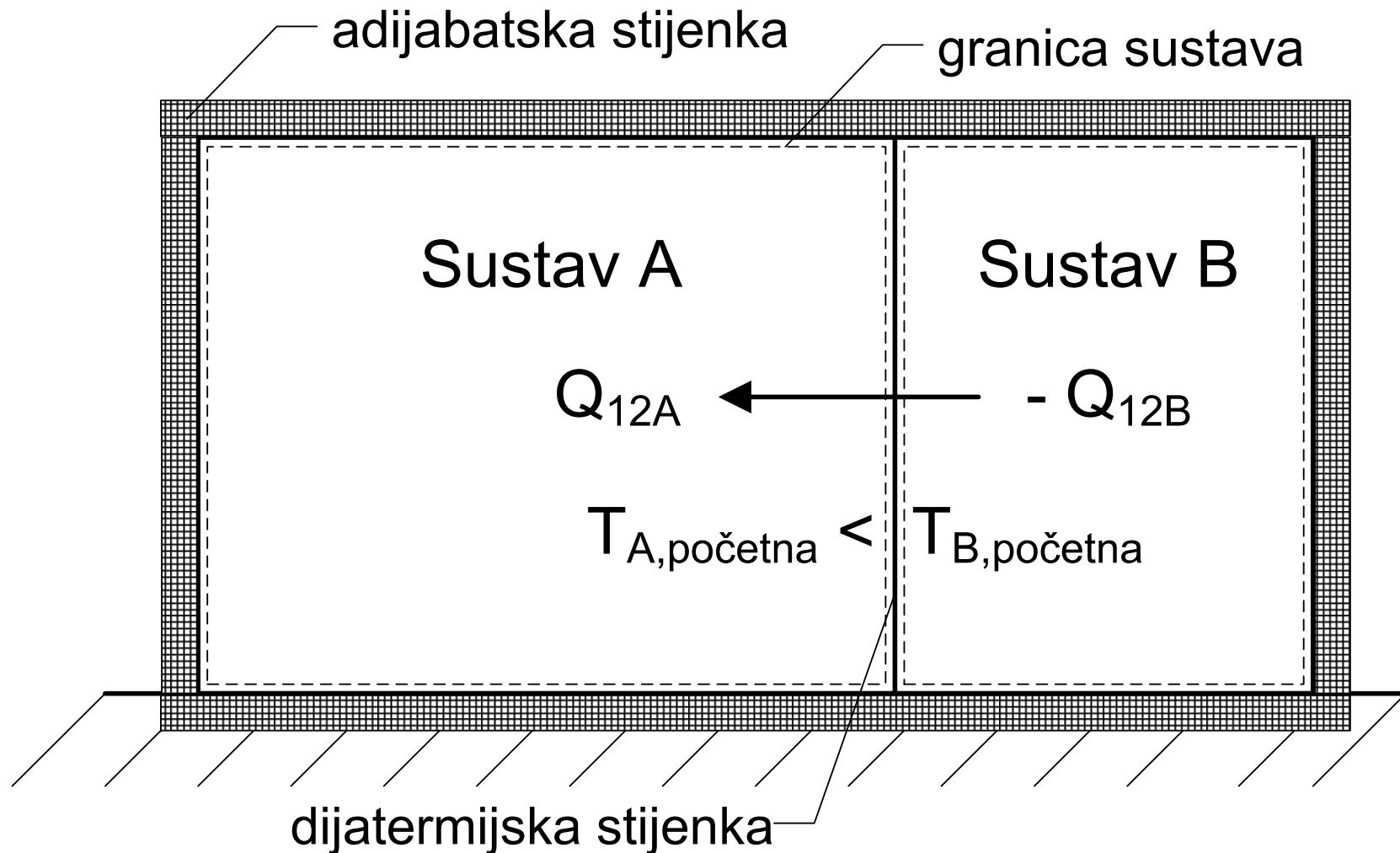
$$dQ = dU + dW \text{ [J]}, \text{ odnosno } dq = du + dw \text{ [J/kg]}$$

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, diferencijalnu bismo jednadžbu trebali ovako pisati: $\delta q = du + \delta w$ ili, možda, $\partial q = du + \partial w$, ili još na koji drugačiji način, što međutim ne ćemo raditi.

Okolnosti prijelaza toplinske energije



Postulati toplinske ravnoteže

- $T_{\text{Apočetna}} < T_{\text{Bpočetna}} \Rightarrow$
 $T_{\text{Akonačna}} = T_{\text{Bkonačna}} = T_{\text{konačna}}$
 $T_{\text{konačna}} = ?$
- **dva ravnotežna postulata**
 - izjednačenje temperatura
 - “nulti (glavni) stavak termodinamike”
- $Q_{12} = U_2 - U_1 + W_{12}$
- $Q_{12} = 0 \text{ i } W_{12} = 0$
- $U_2 - U_1 = 0 \Rightarrow U_2 = U_1$

Prijelaz toplinske energije - odnosi

- $U_1 = U_{1A} + U_{1B}$
- $U_2 = U_{2A} + U_{2B}$
- $U_{2A} + U_{2B} = U_{1A} + U_{1B}$
- $U_{2A} - U_{1A} = U_{1B} - U_{2B} = -(U_{2B} - U_{1B})$
- $U_{2A} - U_{1A} = Q_{12A}$
- $U_{2B} - U_{1B} = Q_{12B}$
- $Q_{12A} = -Q_{12B}$
- $Q_{12A} = U_{2A} - U_{1A} + W_{12A}$ ($W_{12A} = 0$)
- $Q_{12B} = U_{2B} - U_{1B} + W_{12B}$ ($W_{12B} = 0$)

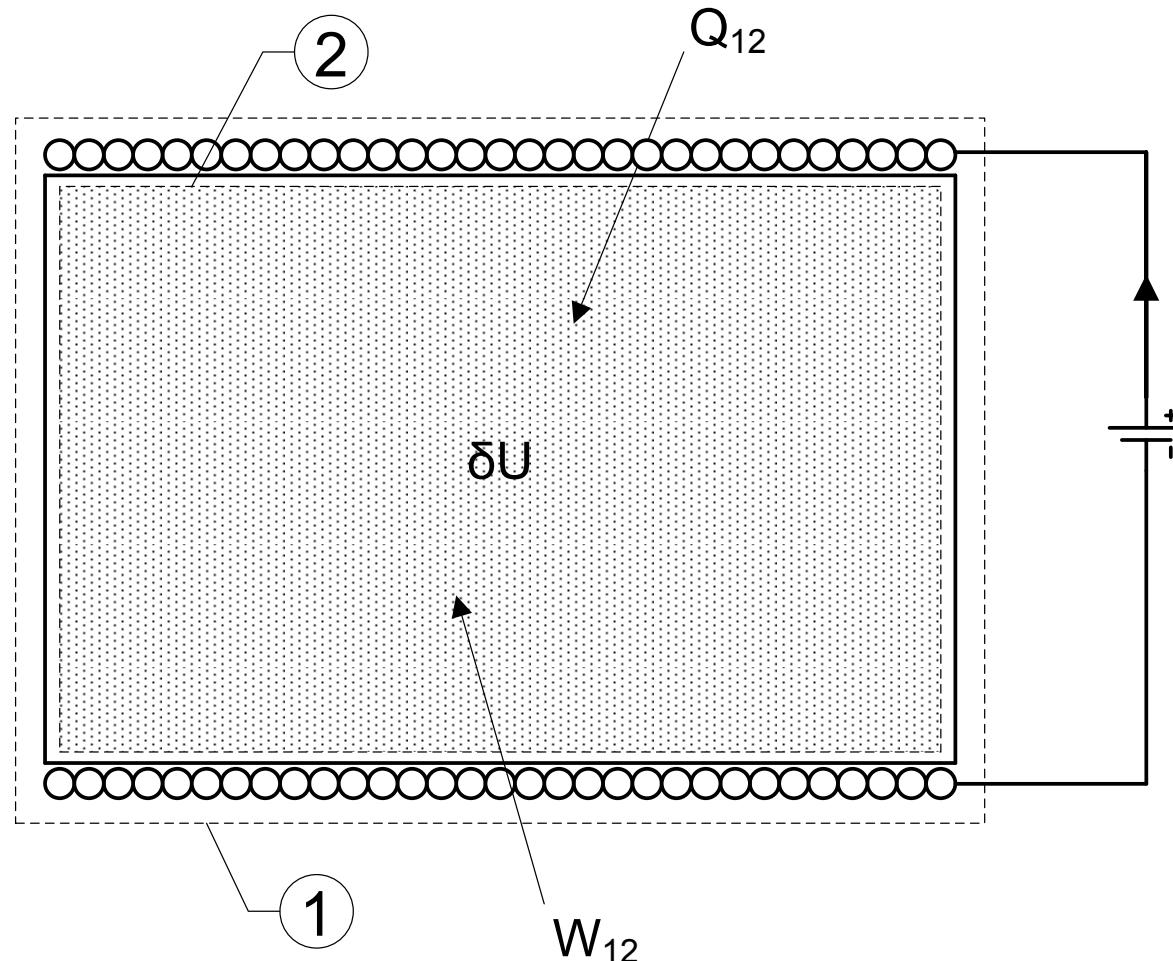
Prijelaz toplinske energije - zaključci

- toplinska je energija energija koja prelazi granice između dva sustava samo zbog razlike njihovih temperatura
- u adijabatskom sustavu kao cjelini, bez mogućnosti obavljanja mehaničkog rada, toplinska energija koju predaje jedan njegov dio jednak je toplini koju preuzima drugi dio sustava
- 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)

Toplinska energija - zaključci

- toplinska energija nije svojstvo sustava
- nije „ono“ što neminovno (neizbjježno, nužno) uzrokuje porast temperature sustava (može, no ne mora)
- nije „ono“ što je uvijek nazočno kad raste (kad se mijenja) temperatura sustava
- poput mehaničkog rada toplinska je energija prijelazni oblik energije: postoji samo u vremenu trajanja međudjelovanja između sustava
- poput mehaničkog rada ona je događanje: svojom su prirodom toplinska energija i mehanički rad slični razgovoru; mada posljedice razgovora mogu trajati vječno, razgovor prestaje sa zadnjom izgovorenom riječi

Zaključno o toplinskoj energiji i mehaničkom radu



Koji oblik energije prelazi granicu sustava?

1. glavni stavak termodinamike za zatvoreni sustav

Relacija

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

analitički je oblik principa očuvanja energije za zatvoreni sustav. Naziva se

prvim glavnim stavkom termodinamike za zatvoreni sustav.

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

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

1. glavni stavak termodinamike za zatvoreni sustav

Pritom je nebitno miruje li ili se giba zatvoreni sustav. Zašto?

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

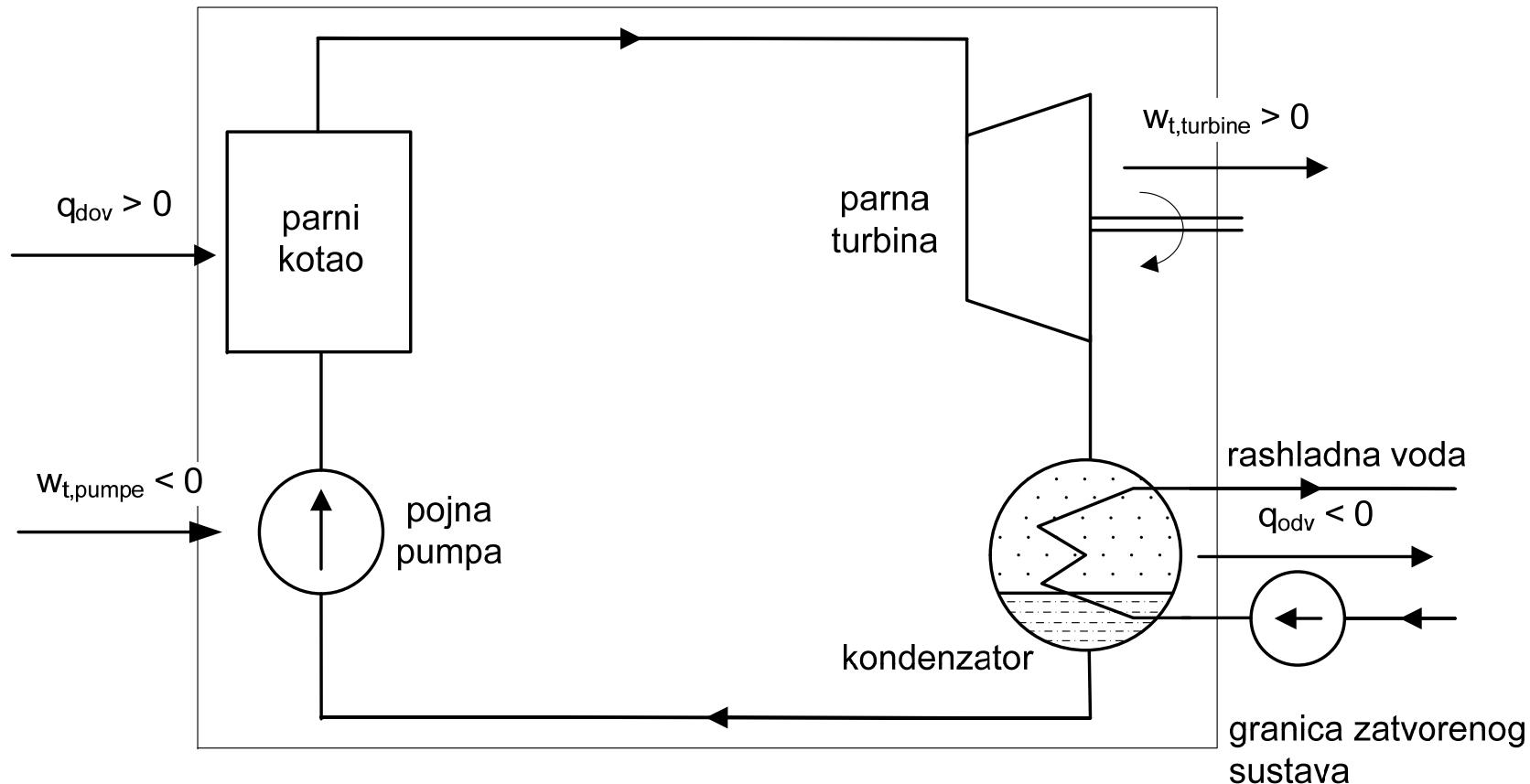
$$q_{12} - \int_{v_1}^{v_2} pdv + |w_{RT12}| + g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) = (u_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + gz_2) - (u_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + gz_1)$$

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

Zaključno o 1. glavnom stavku termodinamike za zatvoreni sustav

- tri su oblika energije 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

Primjena 1.gl.st. termodinamike za ZS na proces u termoelektrani



Primjena 1.gl.st. termodinamike za ZS na proces u termoelektrani

- termoelektrana je zatvoren sustav (fluid u termoelektrani promatramo kao zatvoren sustav) podvrgnut **kružnom procesu**
- $Q_{12} = W_{12}$ [J], odnosno $q_{12} = w_{12}$ [J/kg]
 $(u_2 - u_1 = \delta u = 0: \text{zašto?})$

Za zatvoreni je sustav podvrgnut kružnom procesu mehanički rad predan u okolicu proporcionalan toplinskoj energiji preuzetoj iz okoline.

- $q_{12} = q_{\text{dov}} + q_{\text{odv}}$
- $W_{12} = W_{\text{odv}} + W_{\text{dov}} = W_{\text{turbine}} + W_{\text{pumpe}}$
- $|q_{\text{dov}}| - |q_{\text{odv}}| = |W_{\text{turbine}}| - |W_{\text{pumpe}}|$
- $W_{\text{turbine}} = q_{\text{dov}} - |q_{\text{odv}}|$ [J/kg] ($|W_{\text{pumpe}}| \ll W_{\text{turbine}}$)

Rezultati i nedostatci primjene ...

- što se događa s energijom u termoelektrani ?
 - 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,...?
 - da bismo odgovorili na ta pitanja valja uočiti da termoelektranu možemo promatrati kao **sklop otvorenih sustava**

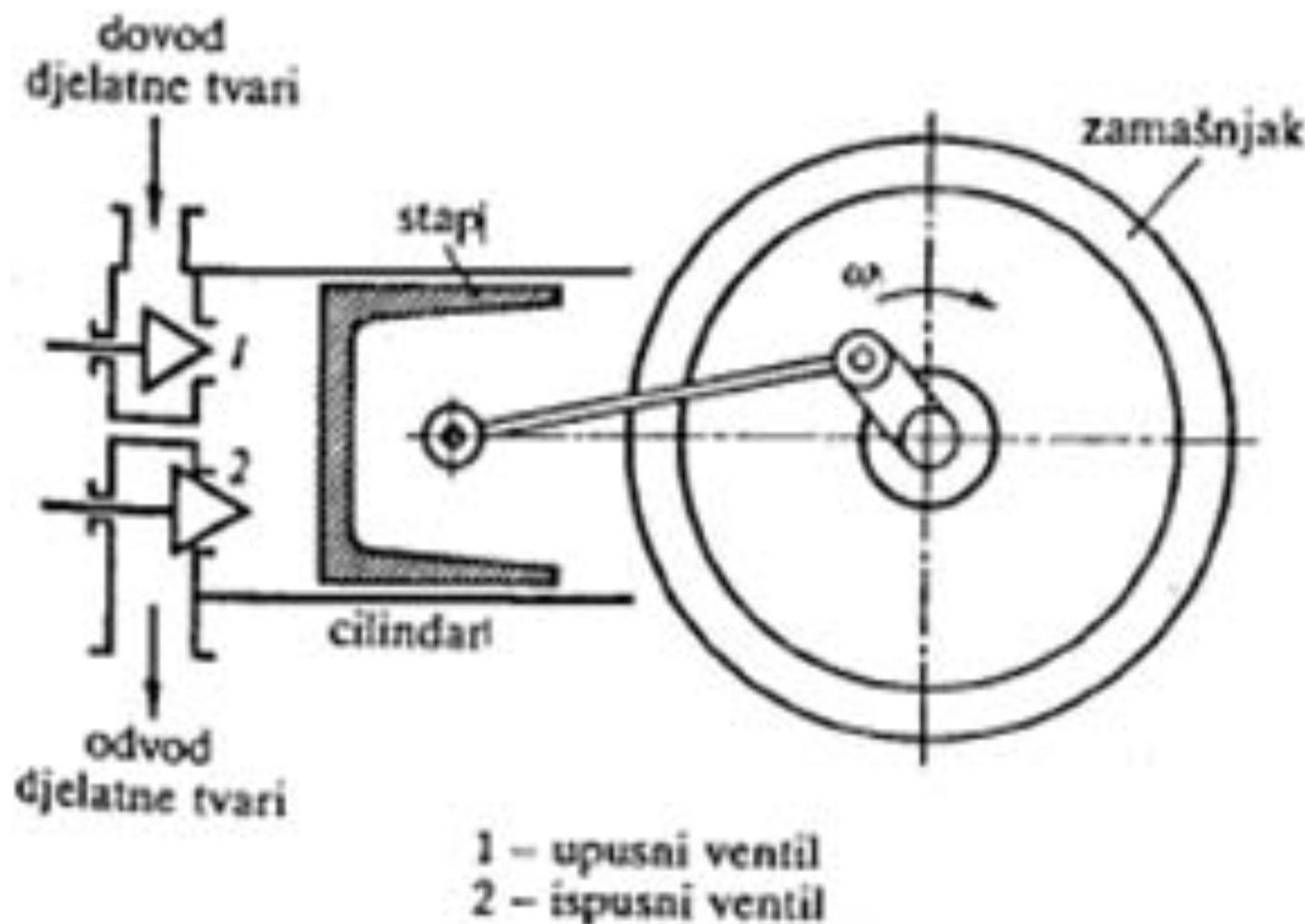
Termoelektrana kao sklop otvorenih sustava

- parni kotao
- parna turbina
- kondenzator
- pumpa
- cijevi

Nastanak 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 u kojem ostaje i nakon ekspanzije
- na taj je način iscrpljena njegova uporabljivost, a i uporabljivost uređaja i stroja
- takav postupak, dakako, za praksu nije prihvatljiv jer se uređaji i strojevi ne grade za jednokratno iskorištavanje
- zbog toga se stroj mora stalno puniti plinom ili vodenom parom početnog stanja, ali se iz njega plin (vodena para) i istiskuje nakon ekspanzije (predavanja mehaničkog rada promjene volumena)
- na taj se način dolazi do **otvorenih sustava** (Kasnije ćemo pokazati kako je moguće i iz zatvorenog sustava trajno dobivati mehanički rad.)
- plin ili para koja se dovodi i odvodi iz sustava naziva se **djelatnom tvari (djelatnim medijem)**

Stapni parni stroj – primjer otvorenog sustava



Jednodimenzionalni, stacionarni, strujni procesi otvorenih sustava

- **otvoreni sustav:** bilo što ili tko, procesi bilo kakvi
- zašto **jednodimenzionalni, stacionarni, strujni procesi?**
 - najjednostavniji, u prvoj približnosti procesi u elektroenergetskom sustavu
- što su jednodimenzionalni, stacionarni, strujni procesi?
- što su strujni procesi?
 - procesi koji uključuju fluid kao djelatnu tvar što prelazi granice sustava
- što je fluid?
 - tvar koja se pod djelovanjem smičnog naprezanja, **kolikogod malenog**, neprekidno deformira, struji

Jednodimenzionalni, stacionarni, strujni procesi otvorenih sustava – zašto?

- koji je proces jednodimenzionalni?
 - sve su fizikalne veličine funkcija samo jedne dimenzije, pravca strujanja: 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
 - primjer: dvodimenzionalno strujanje fluida kroz cijev (slika), što je poseban slučaj realnog, trodimenzionalnog strujanja. Trebali bismo računati s ovakvom funkcijom brzine:

Jednodimenzionalno strujanje

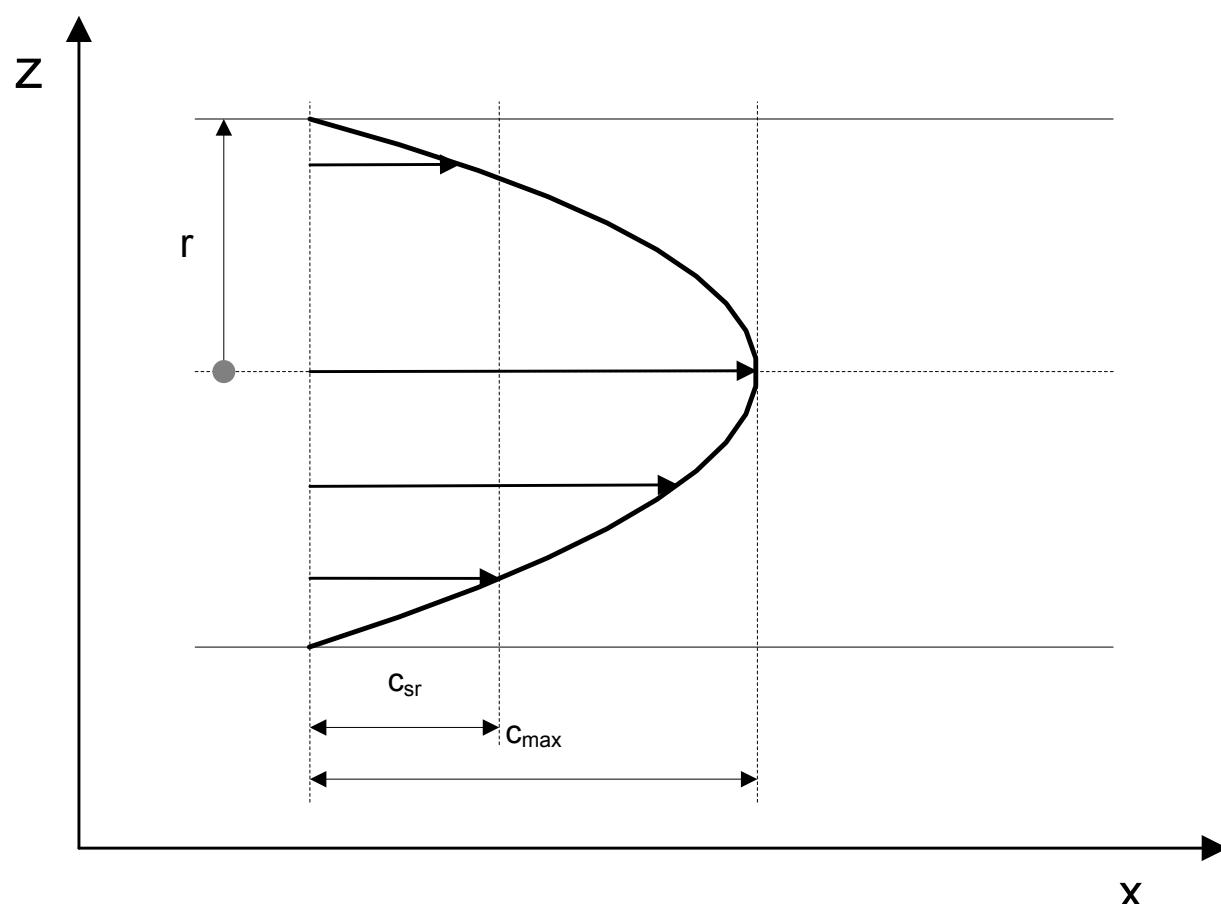
$$\vec{c} = c_x(x, z, t) \vec{i} + c_z(x, z, t) \vec{k}$$

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

Jednodimenzionalno strujanje



Laminarno strujanje fluida u ravnoj cijevi:
profil brzina u presjeku cijevi

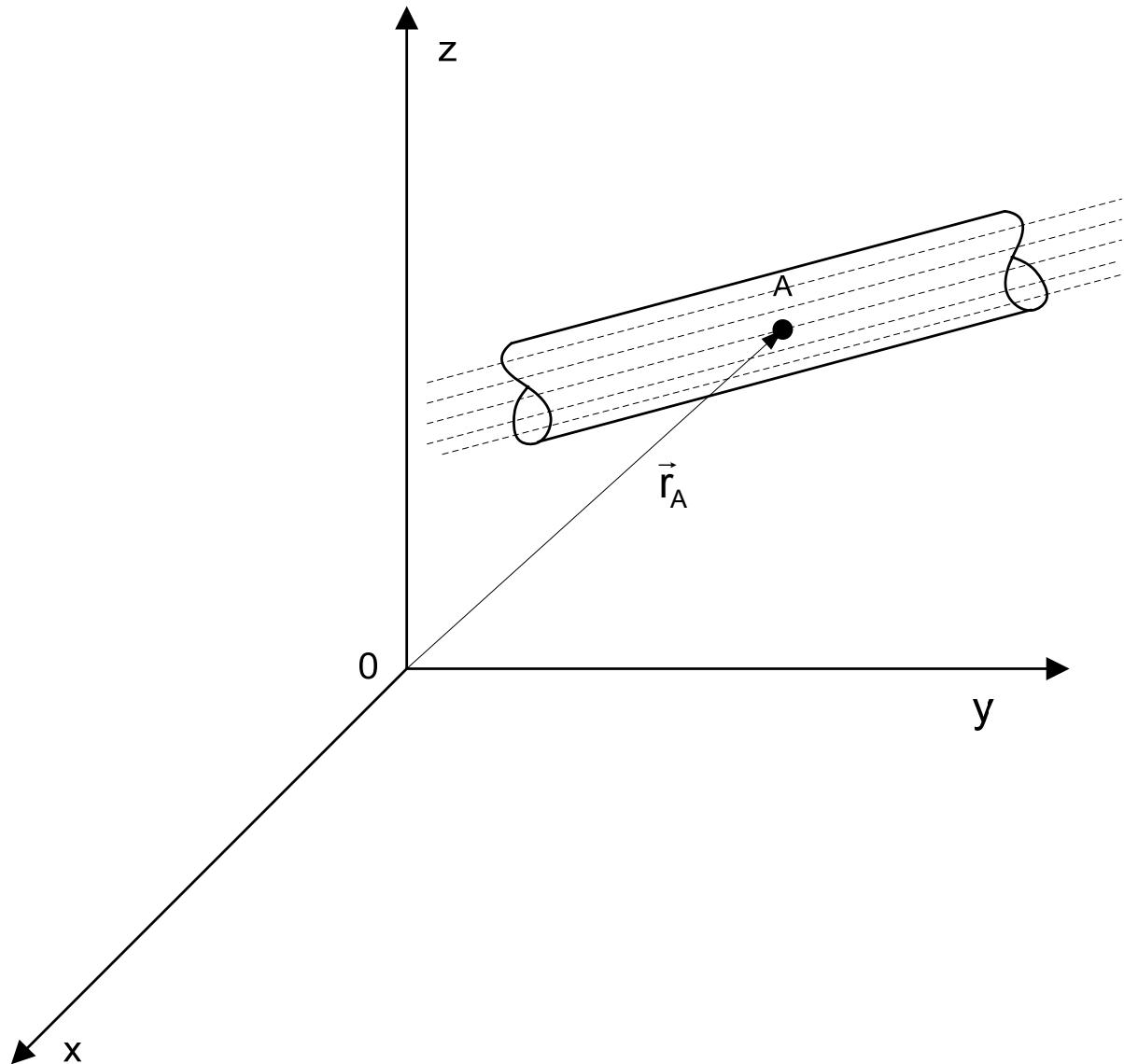
Stacionarno strujanje

- 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

Stacionarno strujanje - tumačenje



Tehnički rad ili rad na osovini

- rad predan iz otvorenog sustava (odnosno doveden u otvoreni sustav):

$W_{t_{12}}$ [J] odnosno $w_{t_{12}}$ [J/kg]) pojavljuje se na osovini turbostroja (parna ili plinska turbina, pumpa,...) odnosno na osovini stапног (parnog) stroja

■ **kako odrediti tehnički rad različitih otvorenih sustava (stапnih strojeva i turbostrojeva)?**

- **primjenom principa očuvanja mase i energije**

Princip očuvanja mase za otvoreni sustav

- **masa što uđe u otvoreni sustav mora biti jednaka masi što izađe iz otvorenog sustava plus masa što se akumulira u otvorenom sustavu**
- **konačna vrijednost neke veličine stanja minus početna vrijednost te veličine jednaka je njenoj promjeni**
- **masa što je izašla iz otvorenog sustava – (minus) masa što je ušla u otvoreni sustav = - (minus) masa što se akumulira u otvorenom sustavu**

Princip očuvanja mase za otvoreni sustav – analitički oblik

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

- zašto?
- što znače pojedini članovi u tom izrazu?
- zašto dvostruki i trostruki integral?

Princip očuvanja mase za otvoreni sustav – analitički oblik

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

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

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

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

Princip očuvanja mase za otvoreni sustav – analitički oblik za JSS procese – jednadžba kontinuiteta

$$\iint_{A_i} \rho_i \vec{c}_i d\vec{A}_i = \sum_{k=1}^n \rho_i \vec{c}_i \vec{A}_i = \sum_{k=1}^n \dot{m}_{i_k} \quad \iint_{A_u} \rho_u \vec{c}_u d\vec{A}_u = \sum_{j=1}^m \rho_u \vec{c}_u \vec{A}_u = \sum_{j=1}^m \dot{m}_{u_j}$$

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

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

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

Analitički oblik principa očuvanja mase za JSSP otvorenih sustava – jednadžba kontinuiteta

➤ relacija

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

analitički je oblik principa očuvanja mase za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava (derivacija po vremenu tog principa). Naziva se i jednadžbom kontinuiteta.

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

Princip očuvanja energije za otvoreni sustav

Riječima iskazan princip očuvanja energije za otvoreni sustav glasi:

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

Princip očuvanja energije za otvoreni sustav – analitički oblik

Iskazano matematičkim jezikom:

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

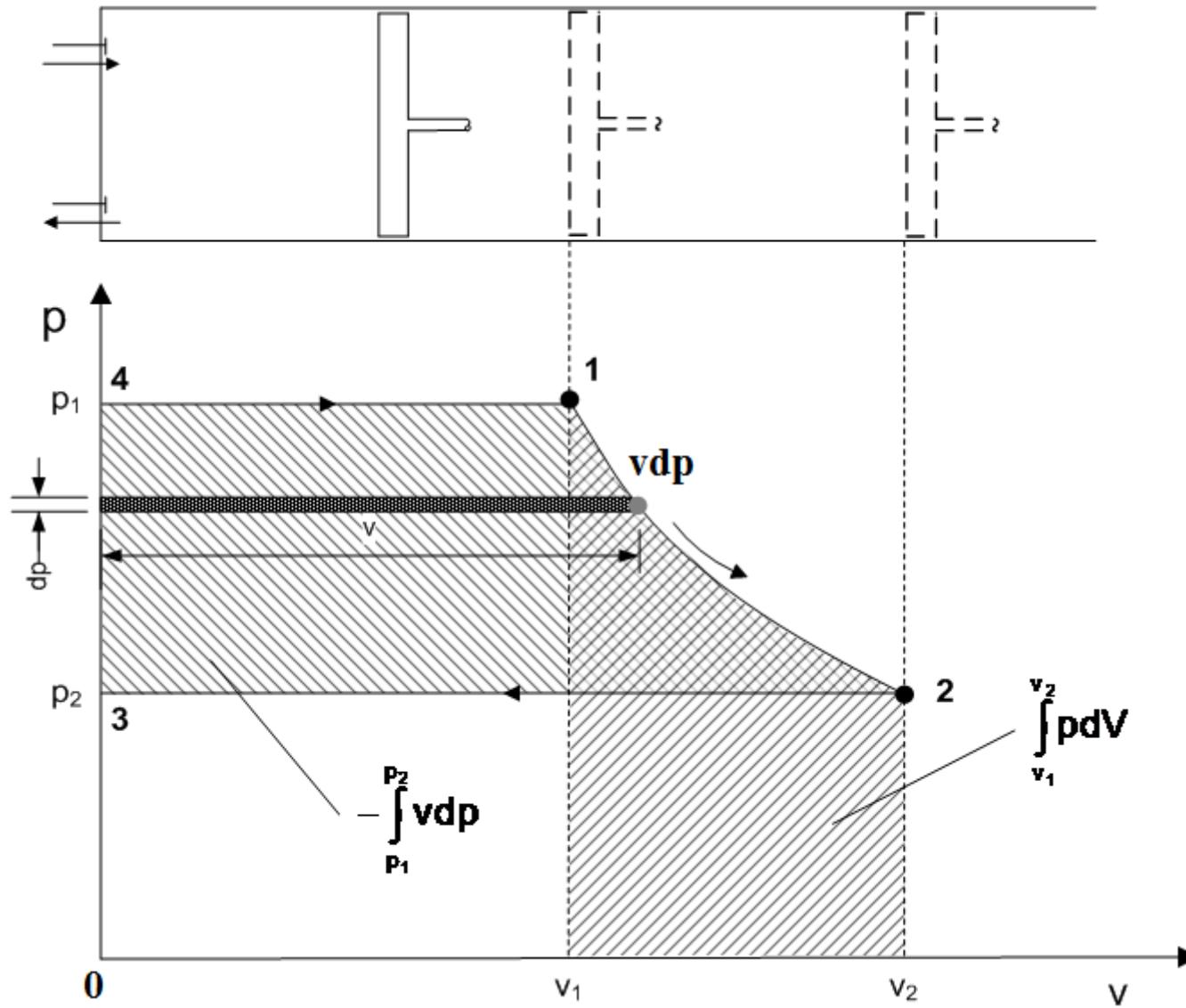
Prilagodimo sada tu relaciju za primjenu na jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava: izvedimo jednadžbu prvog glavnog stavka termodinamike za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava.

Tehnički rad stapnog stroja

Prije toga, odgovorimo na pitanje koliko tehničkog rada dobivamo iz stapnog stroja u kome se odvija jednodimenzionalni, stacionarni, strujni proces.

Promatramo, dakle, jedan od jednostavnijih tehničkih otvorenih sustava u kome se odvija jedan od najjednostavnijih (kružnih) procesa: **„proces među stalnim tlakovima“**.

Tehnički rad starnog stroja – proces među stalnim tlakovima



Tehnički rad stapnog stroja

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

Integriramo po zatvorenoj krivulji pa suma integrala mora biti jednak ploštini površine 4-1-2-3-4 u p,v-dijagramu ($v_3=v_4=0$):

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

Tehnički rad stapnog stroja

Tu površinu možemo i drugčije odrediti: sumirajući elementarne površine vdp,

$$\int_{p_1}^{p_2} vdp.$$

Budući da površina ne može biti negativna, to vrijedi:

$$\int_{v_1}^{v_2} pdv - (p_2v_2 - p_1v_1) = - \int_{p_1}^{p_2} vdp$$

Tom relacijom određena je veza između **mehaničkog rada promjene volumena** (mehaničkog rada zatvorenog sustava) i **tehničkog rada** (mehaničkog rada otvorenog sustava):

Veza mehaničkog rada promjene volumena i tehničkog rada

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = w_{t12} + (p_2 v_2 - p_1 v_1) = - \int_{p_2}^{p_1} vdp + (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$$w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} vdp = w_{12} - (p_2 v_2 - p_1 v_1) = \int_{v_1}^{v_2} pdv - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

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

$$\begin{aligned} w_{t12} &= - \int_{p_1}^{p_2} vdp - |w_{RT12}| - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) = \\ &= \int_{v_1}^{v_2} pdv - |w_{RT12}| - (p_2 v_2 - p_1 v_1) - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \end{aligned}$$

Veza mehaničkog rada promjene volumena i tehničkog rada

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

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

Tehnički rad parne turbine

U termoelektranama je međutim stapni parni stroj istisnut parnim turbinama. (**Zašto?**)

**Možemo li relacijom za mehanički rad
stapnog stroja odrediti tehnički rad
turbine?**

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

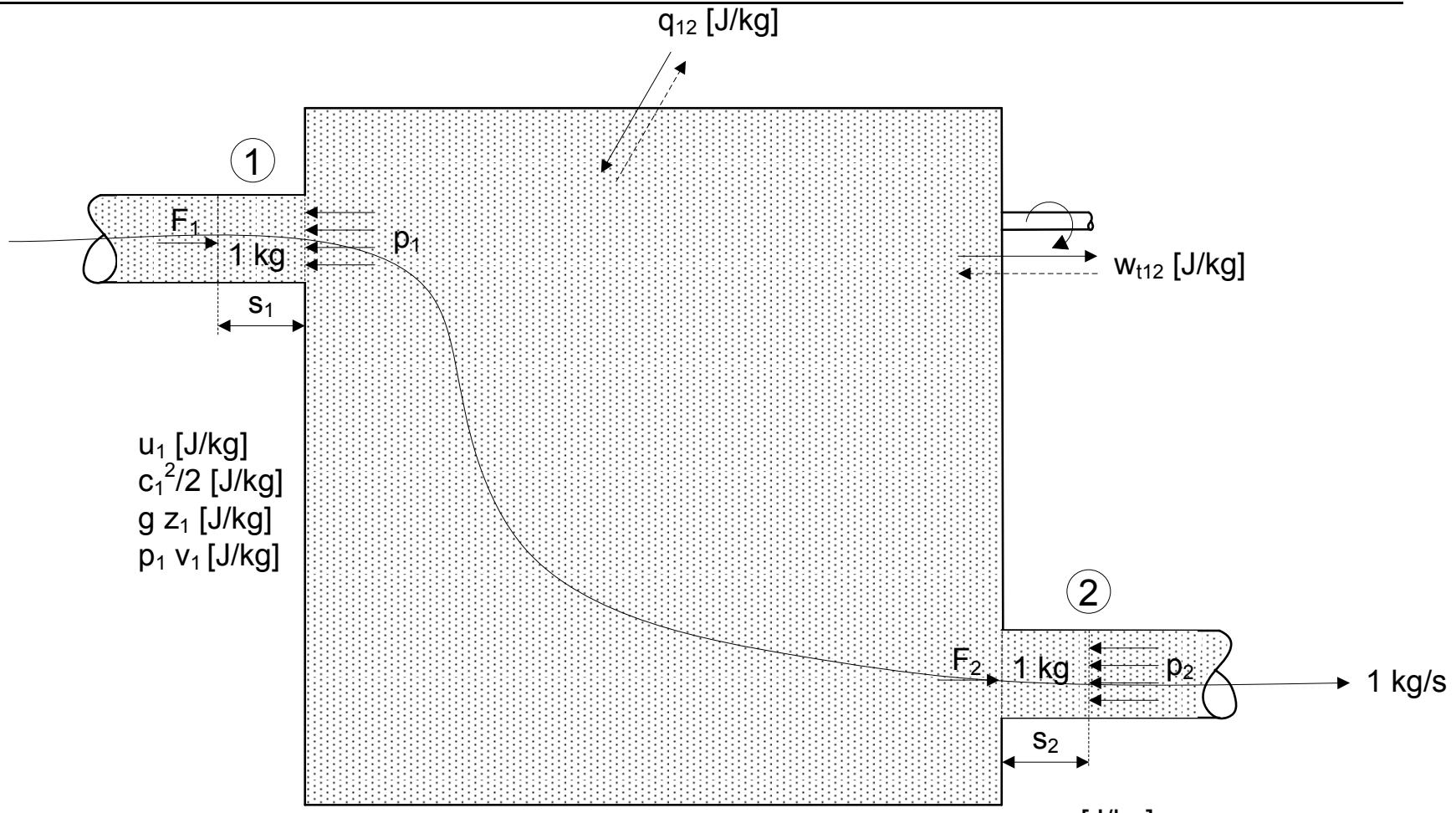
Prvi glavni stavak termodinamike za JSS procese otvorenih sustava

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).**

Ako se pritom radi i o jednodimenzionalnom strujanju, analitički je oblik principa očuvanja energije jednostavan, slika:

Analitički oblik principa očuvanja energije za JSS procese otvorenih sustava



Zamišljeni otvoreni sustav u kojem se odvija jednodimenzionalni, stacionarni, strujni proces

Analitički oblik principa očuvanja energije za JSS procese otvorenih sustava

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

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

Rad strujanja na ulazu u otvoreni sustav jednak je (prethodna slika):

$$F_1 s_1 = p_1 A_1 s_1 = p_1 v_1 \text{ [J/kg]}$$

gdje je $A_1 s_1 = v_1$ [m³/kg] (specifični) volumen 1kg fluida na ulazu u otvoreni sustav.

Jer je rad strujanja mehanički rad (energija), ne može nestati, ostaje pohranjen u kilogramu fluida što ustrujava u otvoreni sustav.

Rad strujanja, entalpija

Na izlazu iz otvorenog sustava rad je strujanja:

$$F_2 s_2 = p_2 A_2 s_2 = p_2 v_2 \text{ [J/kg]}$$

Rad strujanja $p_2 v_2$ ostaje pohranjen u kilogramu fluida što istrujava iz otvorenog sustava.

Suma se rada strujanja i unutrašnje kaloričke energije naziva entalpijom:

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

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 skraćuje:

Analitički oblik principa očuvanja energije za JSS procese otvorenih sustava

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

Relacije se mogu proširiti i na slučaj kad kroz otvoreni sustav istodobno struji više djelatnih tvari:

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

Tehnički rad parne turbine

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

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

Jesu li te dvije relacije istovjetne?

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

Istovjetnost relacija

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

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

$$h = u + pv$$

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

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

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

Istovjetnost relacija

$$dq = du + pdv \text{ ili } dq = dh - vdp$$

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

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

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

$$\int_{p_1}^{p_2} vdp = u_2 - u_1 + \int_{v_1}^{v_2} pdv$$

Istovjetnost relacija

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

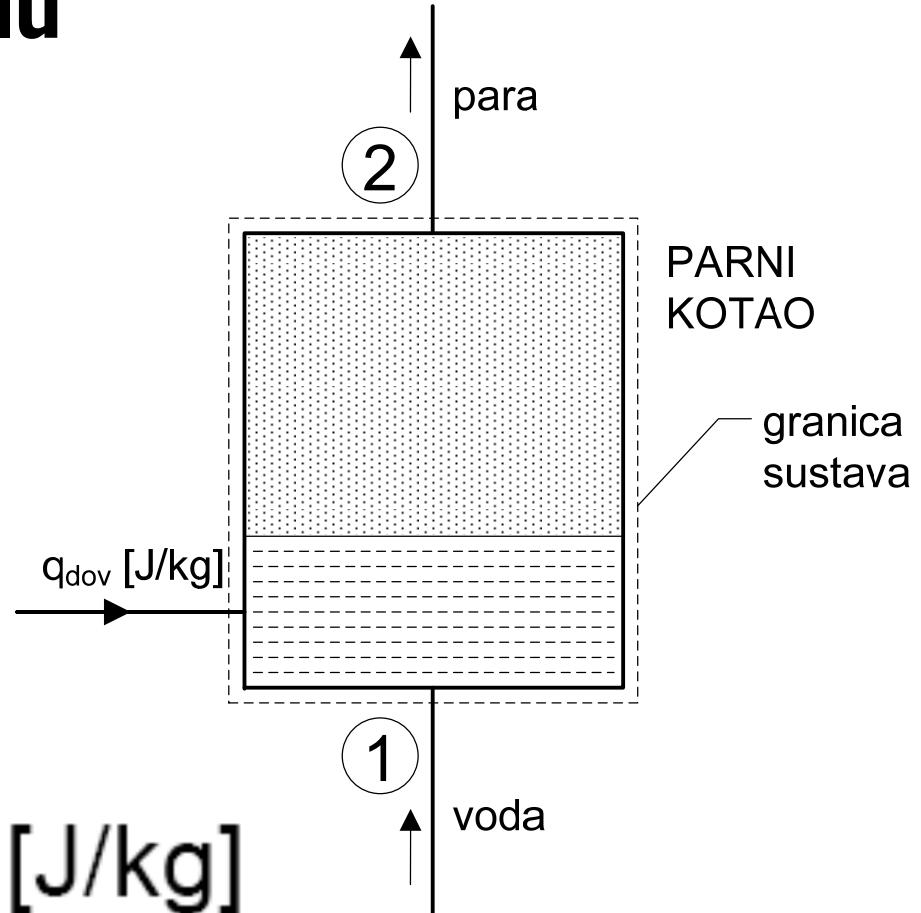
Da. Toplinska je energija prijelazni oblik energije, oblik energije koji prelazi granice sustava nevezano uz masu. Odvija li se prema tome isti proces, između istih stanja (1) i (2), u zatvorenom ili otvorenom sustavu, to ne utječe na izmjenu toplinske energije: ona ovisi samo o temperaturi sustava i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

JSS procesi otvorenih sustava termoelektrana

Proces u parnom kotlu

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

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

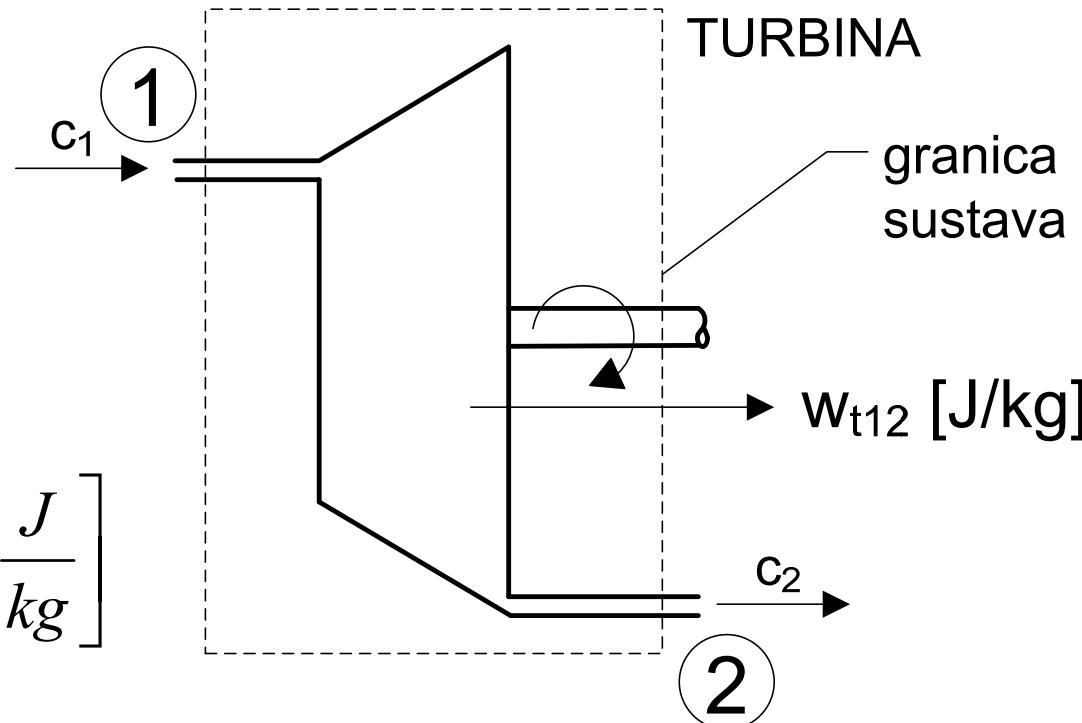


JSS procesi otvorenih sustava termoelektrana

Proces u parnoj ili plinskoj turbini

$$q_{12} + h_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + gz_1 =$$

$$= w_{t12} + h_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + gz_2 \left[\frac{J}{kg} \right]$$

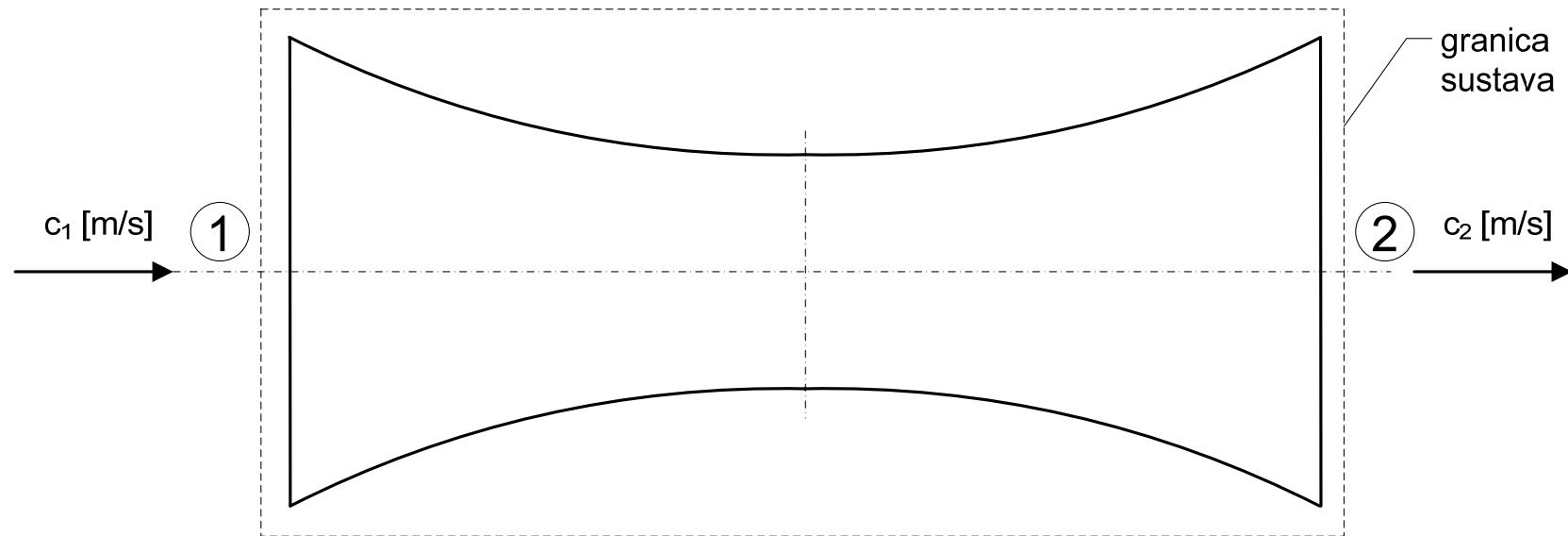


$$w_{t12} = h_1 - h_2 - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2)$$

$$w_{t12} = h_1 - h_2 \left[\frac{J}{kg} \right]$$

JSS procesi otvorenih sustava termoelektrana

Brzina plina na izlazu iz de Lavalove sapnice



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

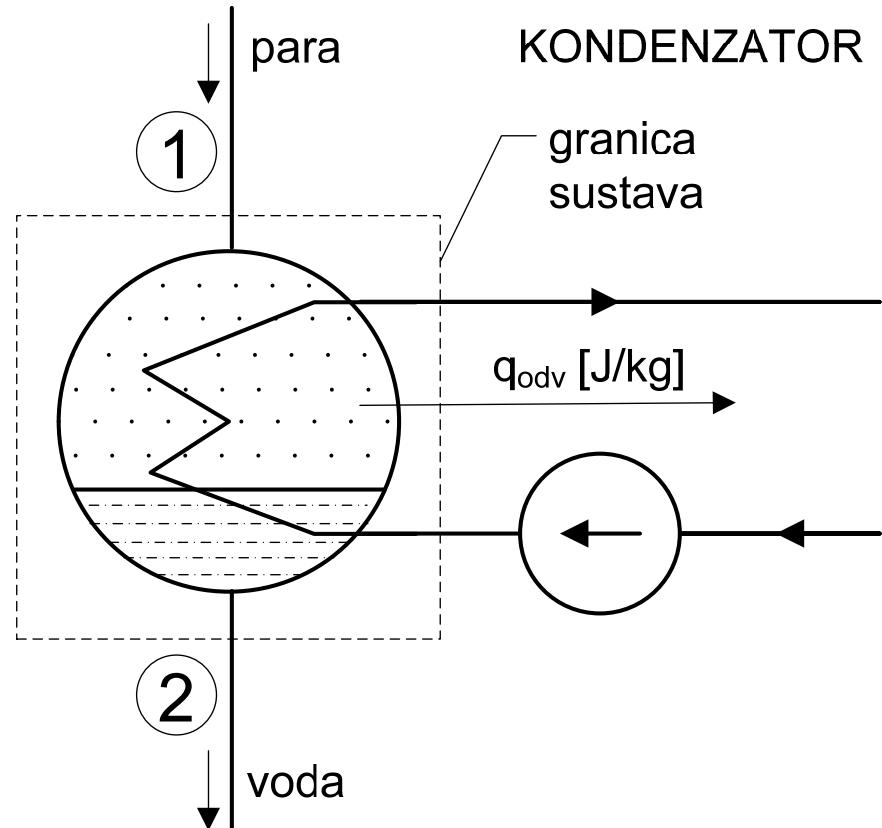
$$c_2^2 = 2(h_1 - h_2) + c_1^2 \quad c_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)} \text{ [m/s]}$$

JSS procesi otvorenih sustava termoelektrana

Proces u kondenzatoru

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

$$p_{kond} \approx \text{konst.}$$



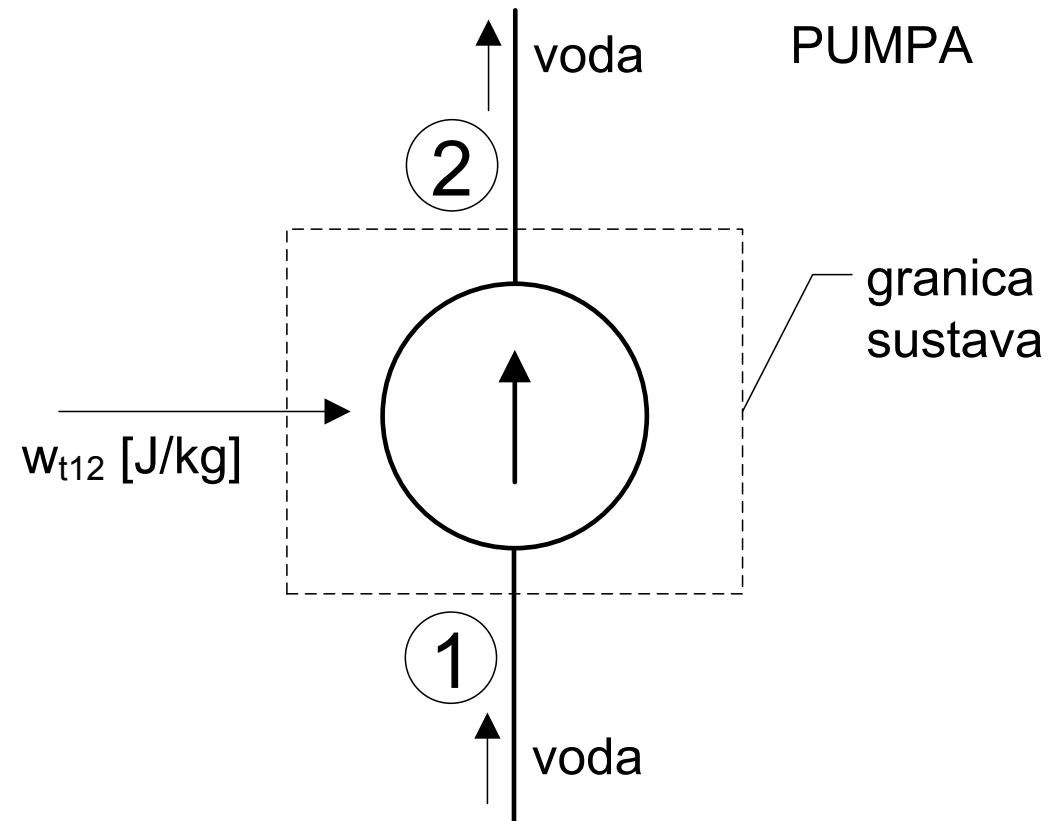
$$q_{12} = h_2 - h_1 \text{ [J/kg]}$$

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

JSS procesi otvorenih sustava termoelektrana

Proces u pumpi

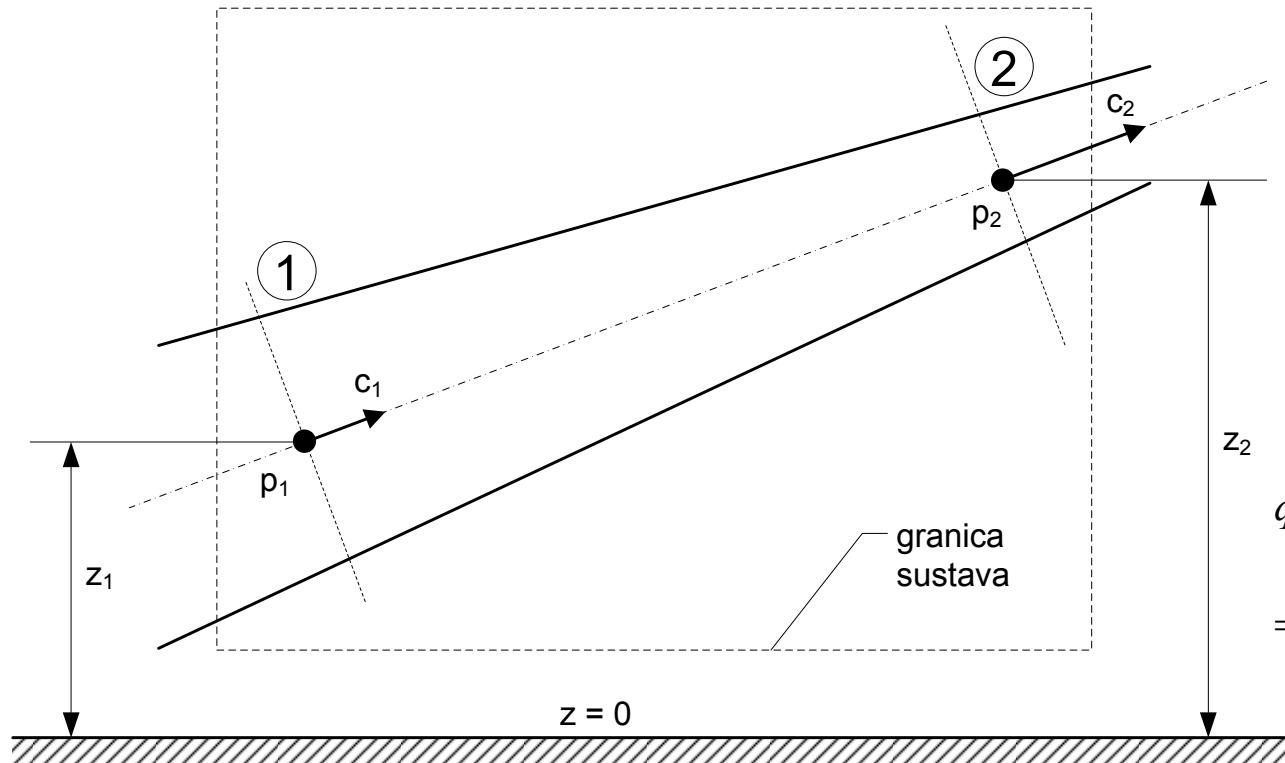
$$q_{12} + h_1 + \frac{1}{2}c_1^2 + gz_1 = \\ = w_{t12} + h_2 + \frac{1}{2}c_2^2 + gz_2 \left[\frac{J}{kg} \right]$$



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

JSS procesi otvorenih sustava hidroelektrana

Strujanje vode u cjevovodu: Bernoullijeva jednadžba



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

$$q_{12} = 0, w_{RT12} = 0$$

$$w_{t12} = 0$$

$$u_1 + p_1 v_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + g z_1 = u_2 + p_2 v_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + g z_2$$

JSS procesi otvorenih sustava hidroelektrana

$$u_1 + p_1 v_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + g z_1 = u_2 + p_2 v_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + g z_2$$

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

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

$$u_1 = u_2$$

$$p_1 v_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + g z_1 = p_2 v_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + g z_2$$

JSS procesi otvorenih sustava hidroelektrana

Tehnički rad vodne turbine

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

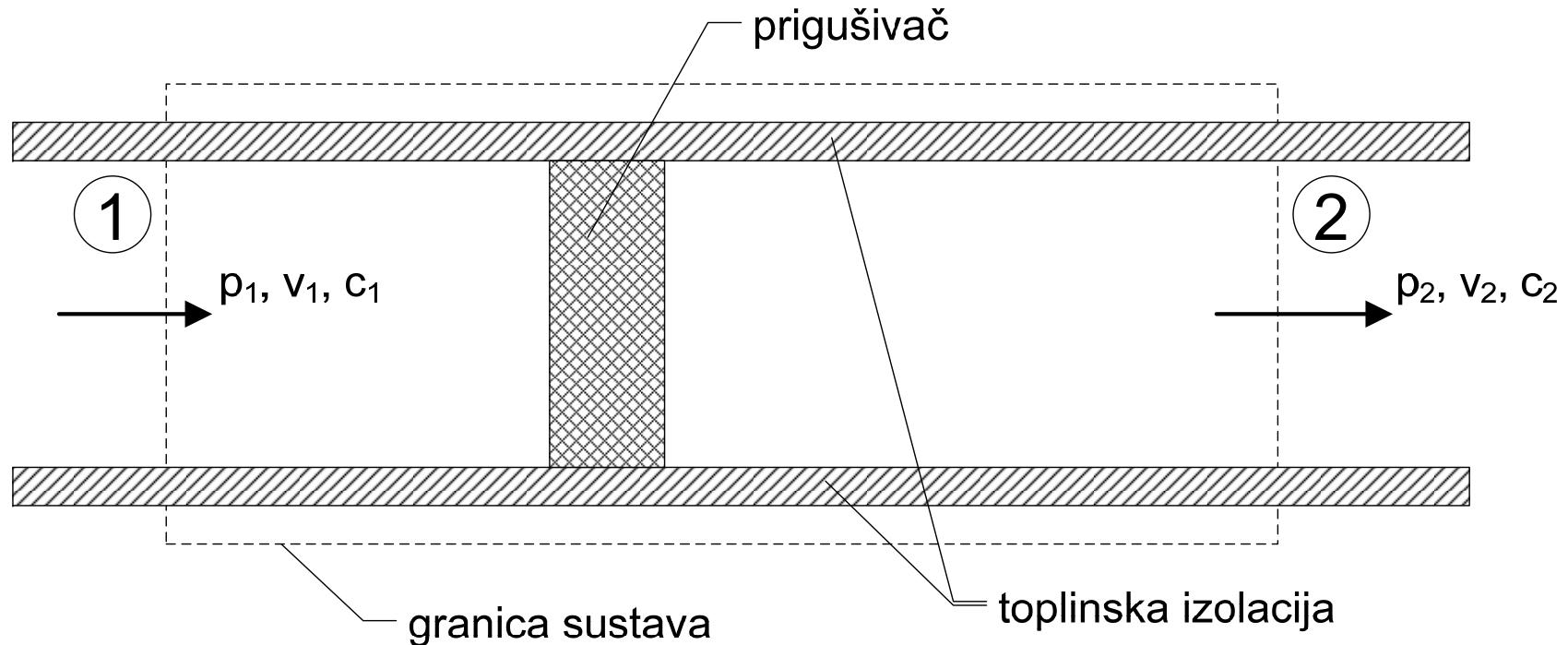
$$q_{12} = 0, \quad u_1 = u_2, \quad v_1 = v_2 = v$$

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

$v = \text{konst.}$

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

Proces prigušivanja



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

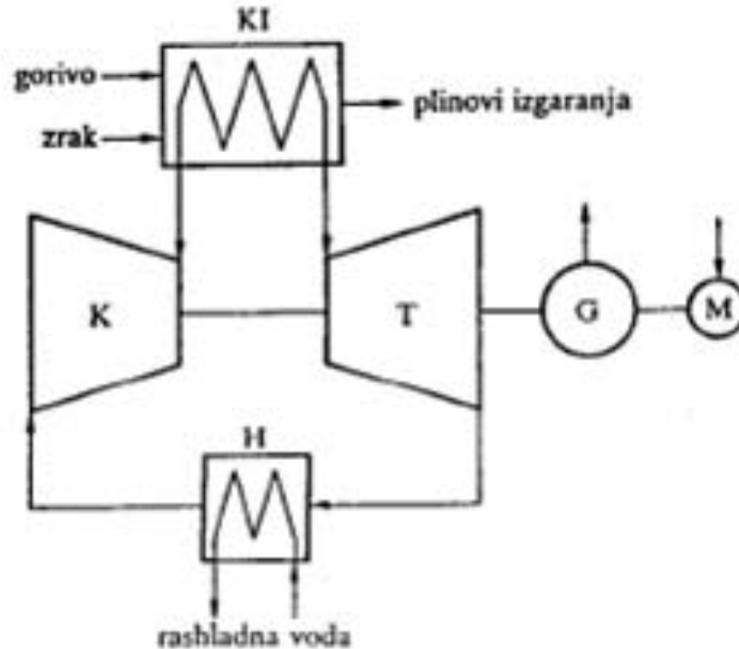
$$q_{12} = 0 \text{ i } w_{t12} = 0 \quad \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) \approx 0 \quad z_1 = z_2$$

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

Osnove rada termoelektrana s plinskom turbinom – zatvoreni proces

- s energetskog je stajališta „zatvoreni proces“ u termoelektrani s plinskom turbinom analogan kružnom procesu u termoelektrani s parnom turbinom
- postrojenje se sastoji od kompresora, komore za izgaranje, plinske turbine i hladnjaka, slika, 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.)
- komora za izgaranje s izmjenjivačem topline odgovara parnom kotlu, plinska turbina parnoj turbini, hladnjak kondenzatoru, a kompresor pojnoj pumpi.
- razlika: fluid u postrojenju s plinskom turbinom ne mijenja agregatno stanje (plinovito) za razliku od fluida u postrojenju s parnom turbinom koji je i u tekućem i u plinovitom agregatnom stanju

Osnove rada termoelektrana s plinskom turbinom – zatvoreni proces - shema postrojenja



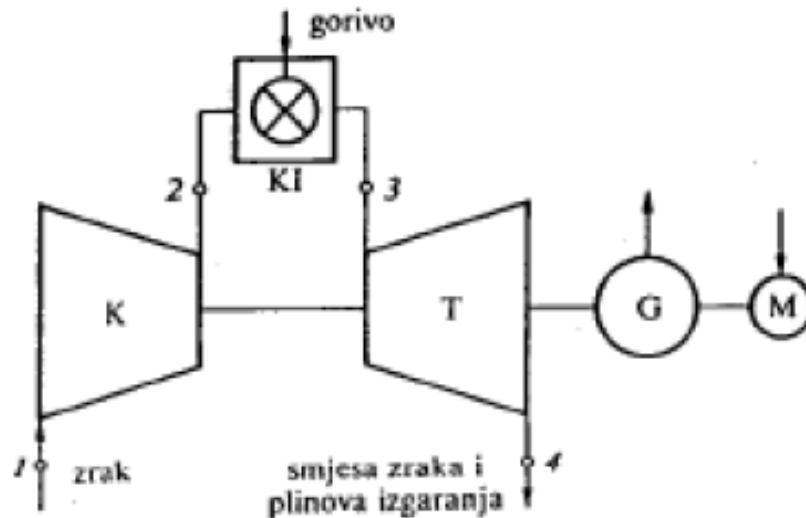
Shema najjednostavnije izvedbe termoelektrane s plinskom turbinom i zatvorenim procesom:

K – kompresor, KI – komora za izgaranje, T – turbina,
H – hladnjak, G – sinkroni generator, M – motor za pokretanje rada postrojenja

Osnove rada termoelektrana s plinskom turbinom – otvoreni proces

Prednost je zatvorenog procesa, u usporedbi s otvorenim, da za pogon postrojenja može poslužiti i kruto gorivo. U otvorenom procesu 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.

Osnove rada termoelektrana s plinskom turbinom – otvoreni proces - shema postrojenja



Shema najjednostavnije izvedbe termoelektrane s plinskom turbinom i otvorenim procesom:

K – kompresor, KI – komora za izgaranje, T – turbina,

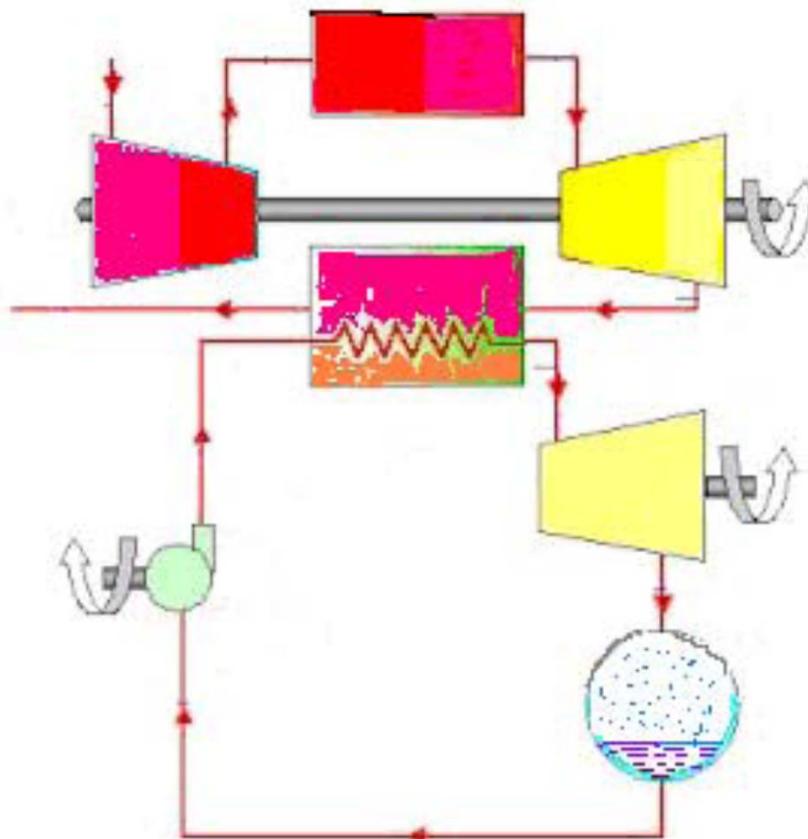
H – hladnjak, G – sinkroni generator,

M – motor za stavljanje postrojenja u pogon

Osnove rada termoelektrana s plinskom turbinom – zaključak

U otvorenom se procesu mora 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. Analiza je energetskih pretvorbi i procesa u termoelektranama s plinskom turbinom potpuno istovjetna analizi u termoelektranama s parnom turbinom.

Osnove rada termoelektrana s plinskom turbinom – spojni proces



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

Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama - zaključak

Promatrajući energetske pretvorbe i procese u termoelektranama 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 povezanost tlakova, volumena i temperatura za vrijeme pojedinačnih procesa?
Kako odrediti vrijednosti entalpije: $h = u + pv$?**

Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama - zaključak

Tlak i temperaturu 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.

Ukratko

Govorili smo o termoelektranama, pretvorbama energije i procesima u njihovim otvorenim sustavima, principima očuvanja mase i energije, mehaničkom radu zatvorenog i otvorenog sustava (mehaničkom radu promjene volumena i tehničkom radu), radu trenja i strujanja, o unutrašnjoj kaloričkoj i toplinskoj energiji, o entalpiji, o postulatima toplinske ravnoteže (okolnosti prijelaza toplinske energije), 1. glavnom stavku termodinamike za zatvoreni i otvoreni sustav, o jednodimenzionalnim, stacionarnim, strujnim procesima otvorenih sustava i o osnovama rada termoelektrana s plinskom turbinom.

Pitanja

- Je li mehanički rad promjene volumena veličina stanja?
- Je li unutrašnja kalorička energija veličina stanja?
- Je li toplinska energija veličina stanja?
- Je li rad trenja veličina stanja?
- Može li zatvoreni sustav predavati rad trenja u okolicu?
- Je li mehanički rad promjene volumena zatvorenog adijabatskog sustava veličina stanja?
- Kada su dva tijela (sustava) u toplinskoj ravnoteži?
- Mijenja li se unutrašnja kalorička energija adijabatskog sustava za vrijeme procesa izjednačavanja temperatura unutar adijabatskog sustava?
- Da bi dva (ili više sustava) bili u toplinskoj ravnoteži, trebaju li im temperature i tlakovi biti jednaki?

Pitanja

- Zašto toplinska energija prelazi granice između dva (ili više) sustava?
- Kako se određuje temperatura smjese više tijela (krutih ili kapljevitih) koja se ustali nakon toplinskog uravnoteženja?
- Je li toplinska energija svojstvo sustava?
- Je li toplinska energija akumulirana u sustavu?
- Povisuje li toplinska energija, što se dovodi sustavu, uvijek temperaturu sustava?
- Adijabatski spremnik krutih stijenki, volumena 1 m^3 , podijeljen je pregradom u dva jednaka dijela. U jednom se dijelu spremnika nalazi idealni plin, a drugi je dio spremnika zrakoprazan. Tlak je idealnog plina 120 bar, a temperatura 600 K. Ukloni li se pregrada, kolika će biti temperatura idealnog plina?

Primjer 1

Promatrajmo kamen mase 10 kg i plitku posudu (zanemarit ćemo dubinu vode) što sadrži 100 kg vode.

Početno kamen je 10,2 m iznad vode i kamen i voda su na temperaturi okolice. Kamen zatim pada u vodu, zanemarit ćemo trenje između kamena i zraka.

Odredite promjenu unutrašnje kaloričke, kinetičke i potencijalne energije kao i iznos izmijenjene toplinske energije i mehaničkog rada za iduće promjene stanja podrazumijevajući standardno ubrzanje sile teže, $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$:

1. kamen upravo treba ući u vodu,
2. kamen se upravo smirio na dnu posude,
3. toplinska je energija prešla u okolicu u tolikom iznosu da su kamen i voda na početnoj temperaturi.

Primjer 1 - rješenje

Kamen je zatvoreni sustav (rad je trenja zanemaren):

$$Q_{12} = U_2 - U_1 + m \cdot \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + mg(z_2 - z_1) + W_{12}$$

1. kamen upravo treba ući u vodu

Uz pretpostavku da se toplinska energija niti dovodi niti odvodi za vrijeme pada kamena (zanemareno trenje zraka), zaključujemo da za vrijeme promjene od početnog do promatranog stanja vrijedi:

$$Q_{12} = 0, W_{12} = 0, \Delta U = 0 (Q_{12} - W_{12} = \Delta U),$$

pa se prvi glavni stavak termodinamike svodi na:

$$\begin{aligned} -m \cdot \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} &= -\delta E_{kin} = mg(z_2 - z_1) = \delta E_{pot} = \\ &= 10kg \cdot 9,80065 \frac{m}{s^2} \cdot (-10,2m) = -1000J = -1kJ \end{aligned}$$

Primjer 1 - rješenje

Dakle je $\delta E_{kin} = 1\text{kJ}$, a $\delta E_{pot} = -1\text{kJ}$. (Potencijalna se energija pretvorila u kinetičku, potencijalna se energija smanjila.)

2. Nakon što se kamen zaustavio na dnu posude (udaljenost dna posude od površine vode zanemarujemo):

$Q_{12} = 0$, $W_{12} = 0$, $\delta E_{kin} = 0$ (u početnom položaju kamen miruje kao i u konačnom), stoga vrijedi:

$$\delta E_{pot} = -(U_2 - U_1) = -\delta U = mg(z_2 - z_1) = -1\text{kJ}$$

$\delta U = 1\text{ kJ}$, $\delta E_{pot} = -1\text{ kJ}$ (Potencijalna se energija pretvorila u unutrašnju kaloričku energiju.)

Primjer 1 - rješenje

3. Nakon prijelaza toplinske energije u okolicu, kada su kamen i voda na istoj početnoj temperaturi, zaključujemo da je:

$\delta U = 0$ ($T_{\text{konačno}} = T_{\text{početno}}$). Dalje je $\delta E_{\text{kin}} = 0$, $W_{12} = 0$, pa je količina toplinske energije koja je prešla u okolicu:

$Q_{12} = \delta E_{\text{pot}} = mg(z_2 - z_1) = -1 \text{ kJ}$ (Toplinska se energija odvodi iz sustava /kamen-voda/.)

Pretvorbe se energije odvijaju dakle ovako: potencijalna se energija kamena pretvara u njegovu kinetičku energiju, ova u unutrašnju kaloričku energiju kamena, s trenutkom udara

Primjer 1 - rješenje

kamena o površinu vode odnosno dno posude, koja se zatim pretvara u toplinsku energiju i odvodi u vodu pretvarajući se u unutrašnju kaloričku energiju vode. Zbog razlike temperature vode (kamena) i okolice ta se unutrašnja kalorička energija pretvara u toplinsku energiju koja prelazi u okolicu (sve do trenutka izjednačavanja temperatura vode (kamena) i okolice i tamo se pretvara u unutrašnju kaloričku energiju ostajući pohranjena u okolini).

Kraće, sva se potencijalna energija kamena nakon sudara s vodom (dnom posude) pretvara u toplinsku energiju i odvodi u okolicu.

Primjer 2

Agregat hidroelektrane (vodna turbina i sinkroni generator) nalazi se 100 m ispod površine akumulacijskog jezera. Radi stacionarno pretvarajući energiju masenog protoka vode (2.000 kg/s) u električnu energiju. Ako je mehanička snaga na osovini vodne turbine 1.500 kW, a električna snaga na osovini sinkronog generatora 1.450 kW, koliki je stupanj djelovanja vodne turbine, a koliki agregata? Zanemarite sve gubitke energije (eksergije) u cjevovodima koji vodu dovode turbini i odvode iz turbine, prepostavite da su razine gornje i donje vode nepromjenjive za vrijeme rada aggregata, da je kinetička (i potencijalna) energija vode na izlazu iz turbine jednaka nuli, a proces smatrajte jednodimenzionalnim i stacionarnim.

Primjer 2 - rješenje

- stupanj djelovanja vodne turbine

$$\eta_{turbine} = \frac{\text{mehanička snaga na osovini turbine}}{\text{mehanička snaga izdvojena iz vode}} = \frac{\dot{W}_{t_t}}{\delta\dot{W}_{vode}}$$

„Mehanička snaga izdvojena iz vode“ jest energija (snaga) ekstrahirana iz vode koja protjeće kroz turbinu i jednaka je razlici energije (snage) vode na ulazu i izlazu iz turbine

$$\dot{W}_{vode_{ulaz}} - \dot{W}_{vode_{izlaz}} = \delta\dot{W}_{vode}$$

Primjer 2 - rješenje

U promatranom slučaju, što normalno nije slučaj, pretpostavili smo da je energija (snaga) vode na izlazu iz turbine jednaka nuli; drugim riječima, sva je mehanička energija (snaga) vode (kinetička i potencijalna) pretvorena u mehanički rad (snagu) koji se (koja se) dobiva na osovini turbine.)

- stupanj djelovanja generatora

$$\eta_{generatora} = \frac{\text{električna snaga generatora}}{\text{mehanička snaga na osovini generatora (turbine)}} = \frac{\dot{W}_{električna}}{\dot{W}_{t_t}}$$

Primjer 2 - rješenje

Energija je 1 kg vode raspoloživa za pretvorbu u mehanički rad u turbini jednaka

$$p_1 V_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + g z_1 = p_2 V_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + g z_2 \left[\frac{J}{kg} \right] \Rightarrow$$

$$g z_1 \left[\frac{J}{kg} \right] = 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 100m \cdot \frac{1 \frac{kJ}{kg}}{1000 \frac{m^2}{s^2}} = 0,981 \frac{kJ}{kg}$$

$p_1 = p_2 = p_{\text{ok}}$, $V_1 = V_2$, $c_1 = c_2 = 0$, $z_1 = 100 \text{ m}$,
 $z_2 = 0$ (razina donje vode /vode na izlazu iz turbine/), pa je snaga vode na ulazu u turbinu

Primjer 2 - rješenje

$$gz_1 \left[\frac{J}{kg} \right] \cdot \dot{m} \left[\frac{kg}{s} \right] = 0,981 \frac{kJ}{kg} \cdot 2.000 \frac{kg}{s} = 1.962 kW = 1,962 MW$$

Stupanj je djelovanja turbine

$$\eta_{turbine} = \frac{\dot{W}_{t_t}}{\delta \dot{W}_{vode}} = \frac{1.500 kW}{1.962 kW} = 0,76$$

a agregata

$$\eta_{agregata} = \frac{\dot{W}_{električna}}{\delta \dot{W}_{vode}} = \frac{1.450 kW}{1.962 kW} = 0,74$$

Primjer 2 - rješenje

Stupanj je djelovanja generatora

$$\eta_{generatora} = \frac{\dot{W}_{električna}}{\dot{W}_{t_t}} = \frac{1.450 kW}{1.500 kW} = 0,97$$

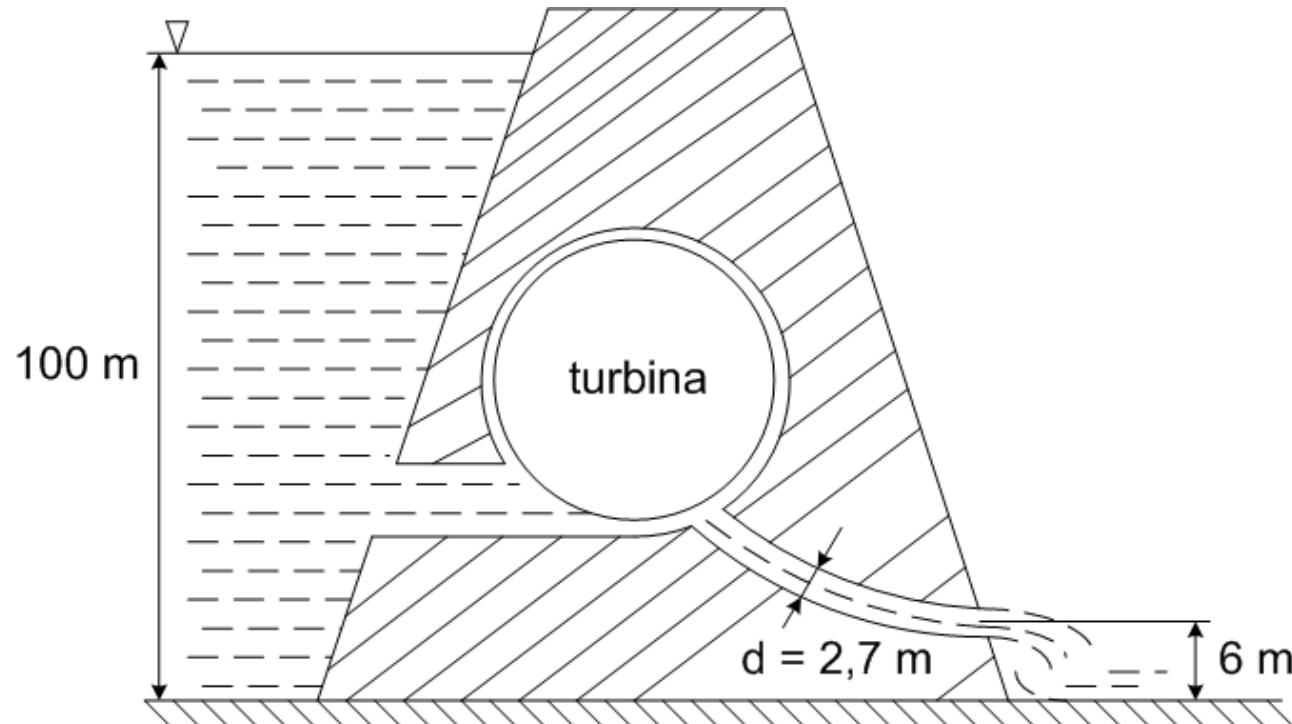
Mora dakako vrijediti

$$\eta_{agregata} = \eta_{turbine} \cdot \eta_{generatora} = 0,76 \cdot 0,97 =$$

$$= 0,74 = \frac{\dot{W}_{električna}}{\delta \dot{W}_{vode}} = 0,74$$

Primjer 3

Odredite snagu turbine prema slici. Volumni je protok vode kroz turbinu $30 \text{ m}^3/\text{s}$. Pretpostavite jednodimenzionalni stacionarni strujni proces idealne kapljevine ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g=9,81 \text{ m/s}^2$).



Primjer 3 - rješenje

$$q_{12} + p_1 v_1 + u_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1 = p_2 v_2 + u_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2 + w_t \left[\frac{J}{kg} \right] / \cdot \dot{m} \left[\frac{kg}{s} \right] \Rightarrow$$

$$\dot{Q}_{12} + \dot{m} \left(p_1 v_1 + u_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1 \right) = \dot{m} \left(p_2 v_2 + u_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2 \right) + \dot{W}_t [W]$$

$$\dot{Q}_{12} = 0; \quad p_1 = p_2 = p_{0k}; \quad v_1 = v_2 = v; \quad c_1 = 0; \quad z_1 = 100m;$$

$$z_2 = 6m; \quad u_1 = u_2 \quad (to \quad \acute{c}emo \quad kasnije \quad pokazati) \Rightarrow$$

$$\dot{W}_t = \dot{m} \left[gz_1 - \left(\frac{c_2^2}{2} + gz_2 \right) \right] [W]$$

Primjer 3 - rješenje

$$\dot{m} = \rho A_1 c_1 = \rho A_2 c_2 = \rho Q = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 30 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 30.000 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$c_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{30}{\pi \cdot 2,7^2} = 5,24 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$
$$\qquad \qquad \qquad \frac{4}{}$$

$$\dot{W}_t = 30.000 \cdot \left[9,81 \cdot 100 - \left(\frac{5,24^2}{2} + 9,81 \cdot 6 \right) \right] [\text{W}] = 27,3 \text{MW}$$

Što treba znati (naučiti) – 03 Energetske pretvorbe u TE (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- agregat
- agregatna stanja vode – ovisnost temperature isparivanja o tlaku
- Bernoullijeva jednadžba
- brzina plina na izlazu iz de Lavalove sapnice
- dijelovi turbine
- dva ravnotežna postulata
- ekspanzija plina
- ekstenzivne fizikalne veličine
- elektrane (podjela)
- energetske pretvorbe u termoelektrani s parnom turbinom

Što treba znati (naučiti) – 03 Energetske pretvorbe u TE (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- energetske pretvorbe u termoelektrani s plinskom turbinom
- energetski procesi u turbini (kvalitativan opis)
- entalpija
- generator pare
- intenzivne fizikalne veličine
- jednodimenzionalni, stacionarni, strujni proces
- koji se primarni oblici energije u termoelektranama pretvaraju u električnu energiju
- kombinacije rada plinske i parne turbine u termoelektrani
- kompresija plina
- kondenzat

Što treba znati (naučiti) – 03 Energetske pretvorbe u TE (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- kondenzator
- konvencionalna („klasična“) termoelektrana
- konvergentna sapnica
- konvergentno-divergentna sapnica (de Lavalova sapnica)
- kružni proces
- kružni proces (mirujućeg) zatvorenog sustava
- ložište
- međudjelovanja zatvorenog sustava s okolicom
- mehanički nepovratljivi proces
- mehanički povratljivi proces
- mehanički rad promjene volumena

Što treba znati (naučiti) – 03 Energetske pretvorbe u TE (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- nulti (glavni) stavak termodinamike
- odnos između mehaničkog rada promjene volumena (mehaničkog rada zatvorenog sustava) i tehničkog rada (mehaničkog rada otvorenog sustava)
- opći oblik prvog glavnog stavka termodinamike za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava
- parni kotao
- parovod
- podjela termoelektrana prema pogonskom stroju
- pojna (kotlovska) voda

Što treba znati (naučiti) – 03 Energetske pretvorbe u TE (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- postizavanje željenog tlaka u parnom kotlu
- prednosti i nedostatci parnih turbina u usporedbi s parnim stupnim strojevima (zašto su parne turbine istisnule parne stupne strojeve u termoelektranama)
- prijelaz vode iz tekućeg stanja u plinovito
- princip očuvanja energije za mehanički rad zatvorenog sustava
- princip očuvanja energije za zatvoreni sustav
- princip očuvanja energije za otvoreni sustav
- princip očuvanja mase za zatvoreni sustav
- principa očuvanja mase za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava
- proces izgaranja

Što treba znati (naučiti) – 03 Energetske pretvorbe u TE (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- proces među stalnim tlakovima
- proces prigušivanja fluida
- proces u kondenzatoru (koliko se toplinske energije odvodi iz termoelektrane u kondenzatoru)
- proces u parnoj ili plinskoj turbini (tehnički rad turbine)
- proces u pojnoj pumpi (tehnički rad pojne pumpe)
- procesom u parnom kotlu termoelektrane (koliko se toplinske energije dovodi u termoelektranu u parnom kotlu)
- prvi glavni stavak termodinamike za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese otvorenih sustava
- prvi glavni stavak termodinamike za zatvorene sustave

Što treba znati (naučiti) – 03 Energetske pretvorbe u TE (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- rad strujanja
- rad trenja
- rashladna voda
- razlozi ugradnje kondenzatora u termoelektranu (nuklearnu elektranu)
- sapnica
- snaga mehaničkog rada turbine
- solarna elektrana
- solarna termoelektrana
- stapni parni stroj
- tehnički rad parne turbine (JSSP)

Što treba znati (naučiti) – 03 Energetske pretvorbe u TE (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- tehnički rad vodne turbine
- temperatura vrelišta, isparivanja, zasićenja ili kondenzacije
- termoelektrana
- termoelektrana kao sklop otvorenih sustava
- termoelektrana kao zatvoreni sustav
- termoelektrana s plinskom turbinom i otvorenim procesom
- termoelektrana s plinskom turbinom i zatvorenim procesom
- toplinska energija
- toplinska ravnoteža
- transformacije energije u parnoj turbini

Što treba znati (naučiti) – 03 Energetske pretvorbe u TE (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- tri oblika energije koji su osnova prvog glavnog stavka termodinamike za zatvorene sustave
- uloga fluida u elektranama
- unutrašnja kalorička energija zatvorenog sustava, povezanost s toplinskom energijom i mehaničkim radom
- prednosti i nedostatci parnih turbina u usporedbi s parnim stupnim strojevima (zašto su parne turbine istisnule parne stupne strojeve u termoelektranama)

Energjske tehnologije

O idealnom plinu

Obilježja idealnog plina

Vladimir Mikuličić, Davor Grgić, Zdenko Šimić, Marko Delimar
FER, 2013.



Teme:

1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
- 4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama**
5. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
6. Geotermalna energija
7. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
8. Potrošnja električne energije
9. Prijenos i distribucija el. en.
10. Energija Sunca
11. Energija vjetra
12. Energija biomase, Gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
13. Skladištenje energije
14. Energija, okoliš i održivi razvoj

Sadržaj

- Analitički oblici jednadžbe stanja idealnog plina
- Unutrašnja kalorička energija idealnog plina
- Specifični toplinski kapaciteti idealnog plina
- Ukratko
- Primjeri
- Što treba znati (naučiti)

Što je idealni plin

- idealni je plin (nepostojeća) tvar, u plinovitom agregatnom stanju, koja se ponaša sukladno s predviđanjima naših matematičkih modela

Jednadžba stanja idealnog plina

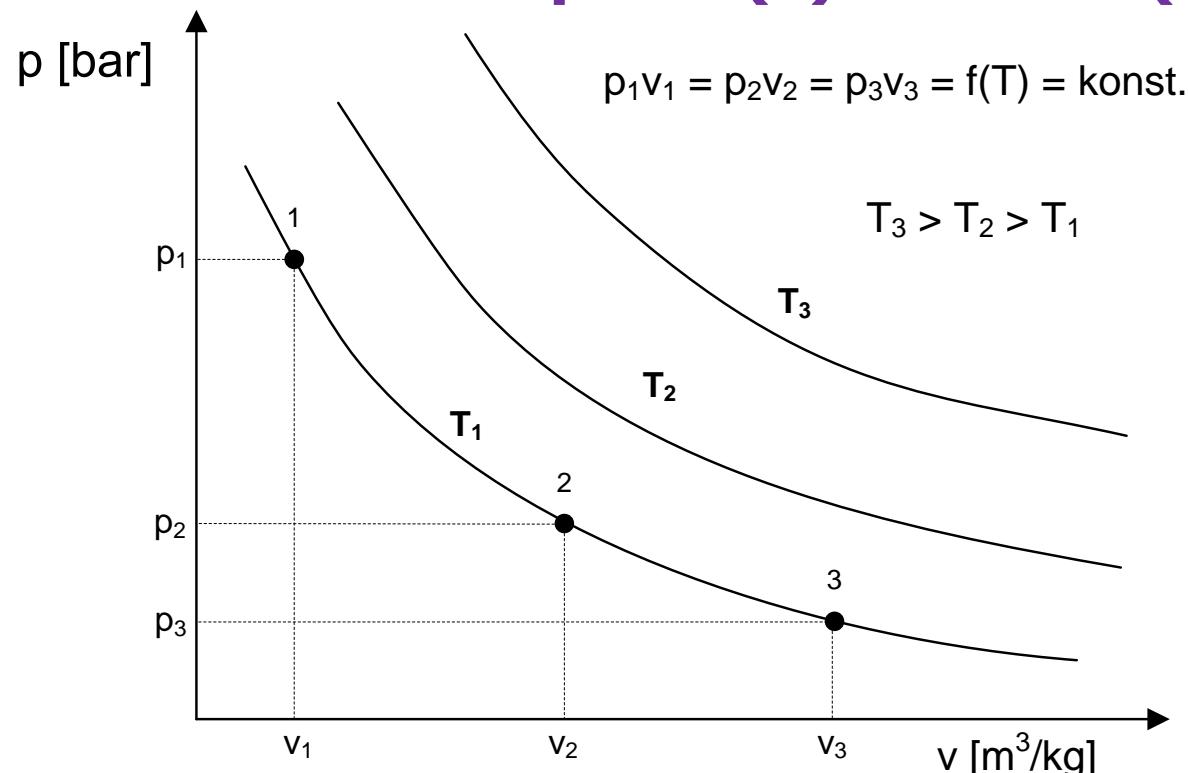
- **jednadžba stanja idealnog plina** opisuje i predviđa ponašanje (idealnog) plina kojemu se istodobno mijenjaju tri veličine stanja:
 - tlak,
 - volumen i
 - temperatura
- pokazuje se, stanje je (idealnog) plina određeno poznajemo li vrijednosti dvije (od tri) veličine stanja jer je vrijednost treće veličine stanja za svako ravnotežno stanje funkcija dviju veličina stanja

Jednadžba stanja idealnog plina - Boyle - Mariotteov zakon

- Boyle - Mariotteov zakon:**

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

$$pv = f(T) = \text{konst. (za } T = \text{konst.})$$



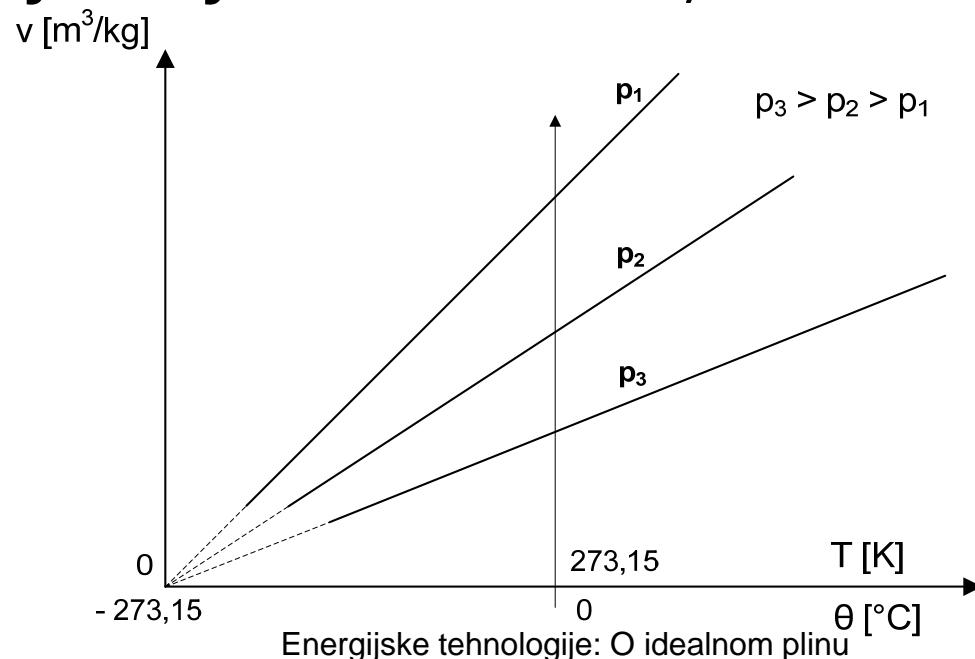
Jednadžba stanja idealnog plina - Gay-Lussacov zakon

- **Gay-Lussacov zakon:**

„specifični je volumen plinova pri konstantnom tlaku proporcionalan temperaturi“:

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

Jednadžba je prikazana je u v, ϑ - dijagramu snopom pravaca koji se sijeku u točki $-273,15^{\circ}\text{C}$.



Jednadžba stanja idealnog plina – analitički oblik za 1kg plina

➤ **kombinirajući zakone dobivamo:**

- $pv = p\varphi(p)T = f(T)$ jer je $v = \varphi(p)T$, 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:

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

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

Jednadžba stanja idealnog plina – analitički oblik za m kg plina

- za masu od m kg jednadžba će stanja biti
 $pV = mRT$ [J] ($mv = V$)
- 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

Plinska konstanta

- **fizikalno se značenje plinske konstante može uočiti iz njezine dimenzije:**

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

- **plinska je konstanta prema tome rad koji obavi 1kg (idealnog) plina kada mu se, kod konstantnog tlaka, temperatura promijeni za 1K:**

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

- $p v_2 - p v_1 = R T_2 - R T_1 = R(T_2 - T_1)$; $\delta T = T_2 - T_1 = 1K$

Pogodniji oblik jednadžbe stanja idealnog plina – definicija kilomola

- $m = \mu \text{ kg}$
- μ je toliko kilograma plina kolika je relativna atomska ili molekularna masa plina. Ta se količina plina naziva **kilomol (kmol)**: $1 \text{ kmol} = \mu \text{ kg}$
- 1 kmol višekratnik je jedinice za količinu tvari Međunarodnog sustava jedinica (SI), mola:
$$1 \text{ kmol} = 10^3 \text{ mol}$$
- mol je količina tvari onog sustava koji sadrži toliko jedinki (elektrona, atoma, molekula, itd.) koliko ima atoma u 0,012 kg najlakšeg izotopa ugljika C-12
- 0,012 kg C-12 sadrži $6,022 \cdot 10^{23}$ atoma (**Avogadrov 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.

Pogodniji oblik jednadžbe stanja idealnog plina – masa kilomola tvari

- **relativnu atomsku masu definiramo kao broj (neimenovani broj) koji pokazuje koliko je puta masa nekog elementa veća od 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:** npr., uzmemo li 1kmol vode (H_2O), uzeli smo 18 kg vode, 1 kmol $CO_2 = 44$ kg CO_2 itd.

Pogodniji oblik jednadžbe stanja idealnog plina – kilomolni volumen

- jer vrijedi **Avogadrov zakon** (i 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 mjeranjima i za temperaturu 0°C (273,15 K) i tlak od 1 atm (1,01325 bar)

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

Pogodniji oblik jednadžbe stanja idealnog plina

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

$$p v_{\mu} = \mu_1 R_1 T$$

$$p v_{\mu} = \mu_2 R_2 T$$

...

$$p v_{\mu} = \mu_i R_i T$$

...

$$p v_{\mu} = \mu_n R_n T$$

Pogodniji oblik jednadžbe stanja idealnog plina – opća plinska konstanta

$$\mu_1 R_1 = \mu_2 R_2 = \mu_3 R_3 = \dots = \mu_n R_n = R_\mu$$

- 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 mjerenjem:

$$R_\mu = 8314,3 \text{ J/kmol K}$$

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

Pogodniji oblik jednadžbe stanja idealnog plina – Boltzmannova konstanta

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

$$pv_{\mu} = R_{\mu}T \text{ [J/kmol]}$$

- odnosno za n kilomolova

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

- 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: $k_B = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
(Boltzmannova konstanta)

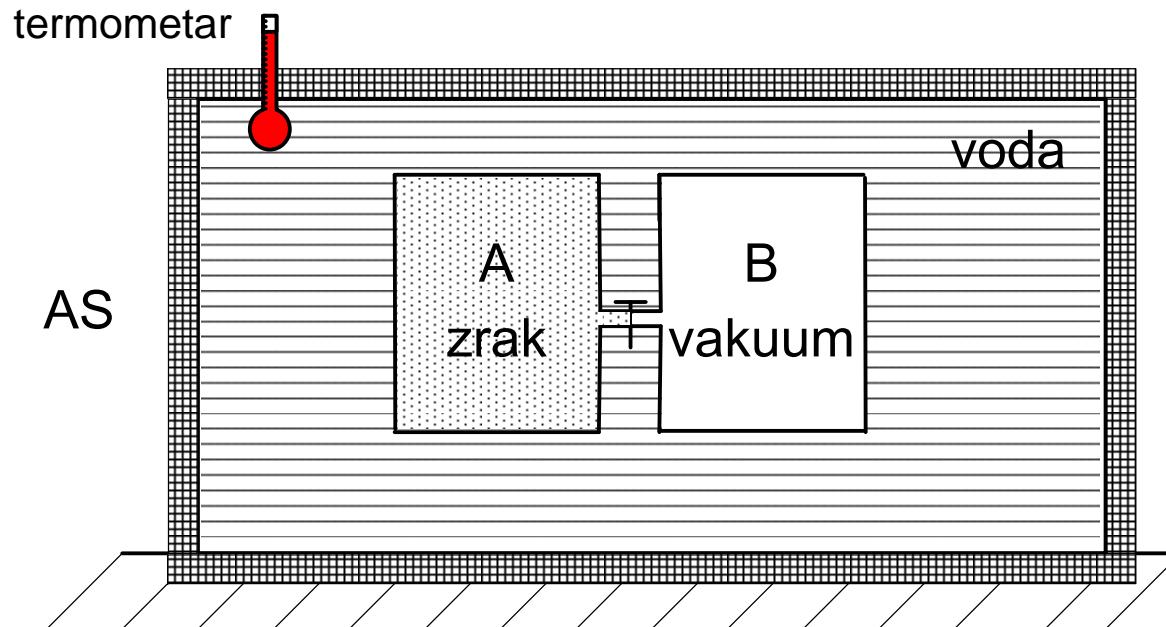
Normalni ili normirani kubični metar

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

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

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

Unutrašnja kalorička energija idealnog plina



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

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = 0 \text{ i } \left(\frac{\partial u}{\partial p} \right)_T = 0 \Rightarrow u \neq f(v, p)$$

$$\mathbf{u = f(T)}$$

Specifični toplinski kapacitet

Ovisnost se unutrašnje kaloričke energije o temperaturi mogla odrediti tek nakon uvođenja pojma „**specifični toplinski kapacitet**“ (ili „**specifična toplina**“).

Specifični je toplinski kapacitet (c [J/kgK]) neke tvari, kako to definira „Fizika“, **ona količina toplinske energije koju treba dovesti jednom kilogramu tvari kako bi joj se temperatura povećala za jedan kelvin:**

$$c = \frac{dQ}{dT} = \frac{dq}{dT} \text{ [J/kgK]}$$

(Relacija ne vrijedi za procese promjene agregatnih stanja.)

Specifični toplinski kapacitet

Definicija specifičnog toplinskog kapaciteta 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 temperature prije dovođenja i nakon prestanka dovođenja toplinske energije:

$$Q_{12} = k \cdot m \cdot (T_2 - T_1) = k \cdot m \cdot \Delta T [J]$$

Faktor proporcionalnosti k nazvan je specifičnim toplinskim kapacitetom.

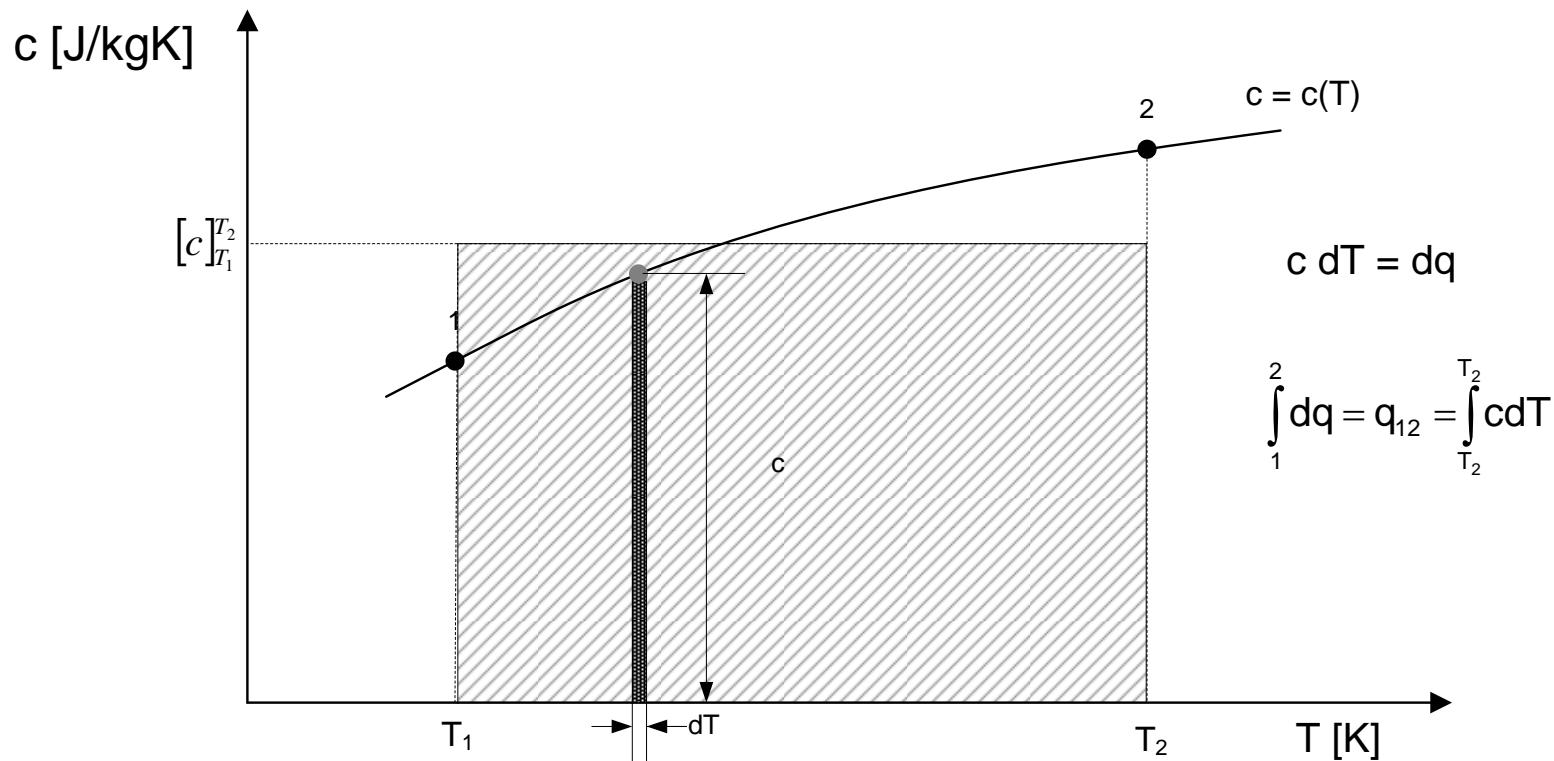
Ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta o ...

Specifični toplinski kapacitet ovisi o

- **svojstvima tvari (građi tvari),**
- **o temperaturi i**
- **o načinu dovođenja toplinske energije.**

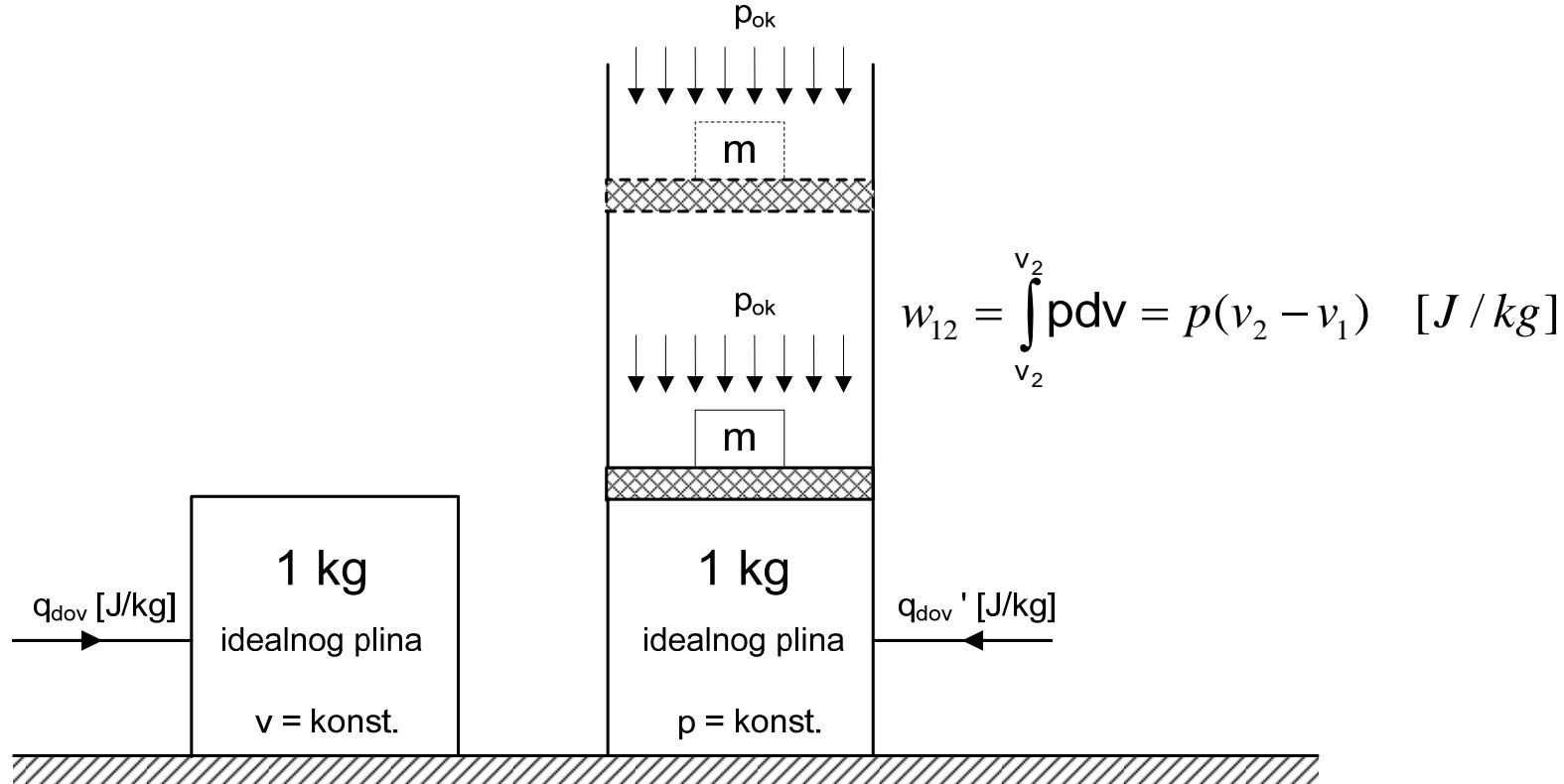
Posebno je nezgodna ovisnost o temperaturi, slika, budući da je nelinearna: takva bi funkcionalna ovisnost, uključena u proračune, zнатно оtežala energetske analize. Zbog toga se u svim proračunima računa sa **srednjim specifičnim kapacitetom** među temperaturama T_1 i T_2 , temperaturama između kojih se odvija promatrani proces.

Ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta o temperaturi



$$q_{12} = [c]_{T_1}^{T_2} [T_2 - T_1] = \int_{T_1}^{T_2} cdT \Rightarrow [c]_{T_1}^{T_2} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} cdT}{T_2 - T_1}$$

Ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta o uvjetima dovođenja toplinske energije



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 specifičnog toplinskog kapaciteta ovisiti o načinima dovođenja toplinske energije.

Specifični toplinski kapacitet uz konstantni volumen

$$c = \frac{dq}{dT} \text{ i dalje, jer je } dq = du + pdv,$$

$$c = \frac{dq}{dT} = \frac{du}{dT} + \frac{pdv}{dT}$$

Ako se promatraju prilike uz konstantni volumen ($v = \text{konst}$, $dv = 0$), dobiva se

(sa c_v označavamo specifični toplinski kapacitet uz konstantni volumen /kod konstantnog volumena/):

$$c_v = \left(\frac{\partial q}{\partial T} \right)_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = \frac{du}{dT} [\text{J/kgK}]$$

Funkcionalna veza UKE i temperature

Nađena je tako funkcionalna veza između unutrašnje kaloričke energije i temperature, odnosno kako se može izračunati promjena unutrašnje kaloričke energije:

$$du = c_v dT \text{ [J/kg]}$$

Specifični toplinski kapacitet uz konstantni tlak

Ako se toplinska energija dovodi uz konstantni tlak ($p = \text{konst}$, $dp = 0$), dobiva se (sa c_p označavamo specifični toplinski kapacitet uz konstantni tlak /kod konstantnog tlaka/):

$$c = \frac{dq}{dT} \text{ i dalje, jer možemo pisati da je } dq = dh - vdp,$$

$$c_p = \left(\frac{\partial q}{\partial T} \right)_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = \frac{dh}{dT} \quad (dp = 0) \text{ [J/kgK]}$$

Nađena je tako i funkcionalna veza između entalpije i temperature, odnosno kako se može izračunati promjena entalpije:

$$\mathbf{dh = c_p dT [J/kg]}$$

Odnos između specifičnih toplinskih kapaciteta

$$c_p = \frac{dh}{dT} = \frac{d}{dT}(u + pv) = \frac{d}{dT}(u + RT) = \frac{du}{dT} + R = c_v + R$$

$$c_p - c_v = R \quad \frac{c_p}{c_v} = \kappa$$

$$c_v = \frac{R}{\kappa - 1} \quad i \quad c_p = \frac{\kappa R}{\kappa - 1}$$

Ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta o građi tvari

- za plinove s jednoatomnim molekulama kilomolne specifične topline iznose

$$c_{\mu p} = \frac{5}{2} R_\mu \text{ i } c_{\mu v} = \frac{3}{2} R_\mu$$

s tim da ne ovise o temperaturi

- za plinove s dvoatomnim molekulama, pri temperaturama između 0 i 200°C, kilomolne su specifične topline

$$c_{\mu p} = \frac{7}{2} R_\mu \text{ i } c_{\mu v} = \frac{5}{2} R_\mu$$

(Za dvoatomne je plinove navedeno temperaturno područje jer specifične topline ovise o temperaturi. Za plinove s većim brojem molekula ne vrijede tako jednostavne zakonitosti.)

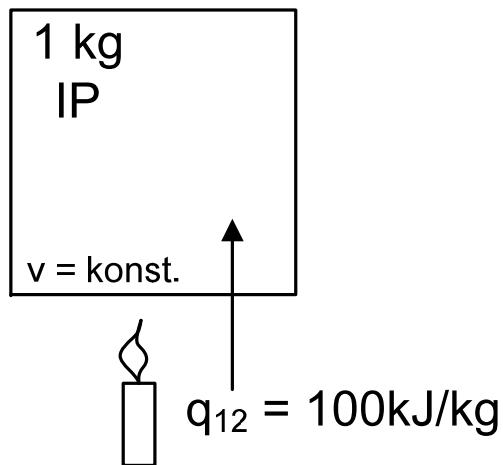
Ovisnost κ o broju atoma u molekuli

- za jednoatomne plinove $\kappa = 1,667$
- za dvoatomne plinove $\kappa = 1,400$
- 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 $\kappa = 1,3$
- za čvrste i kapljevite tvari specifična toplina normalno raste s temperaturom, ali je razlika između c_p i c_v zanemariva

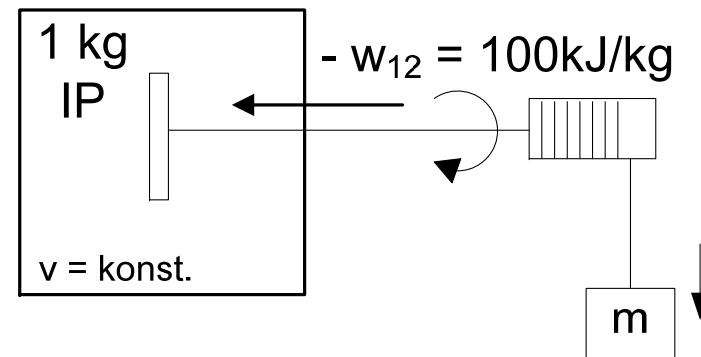
Manjkavosti definicije specifičnog toplinskog kapaciteta

- promatramo dva procesa s jednim kilogramom idealnog plina smještenim u spremniku krutih (čvrstih) stijenki

(A)



(B)



- slučaj (A):

$q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12}$ pa jer je $w_{12} = 0$ (mehanički se rad ne dovodi) dobivamo:

$$\mathbf{q_{12} = u_2 - u_1 = 100 \text{ kJ/kg};}$$

Manjkavosti definicije specifičnog toplinskog kapaciteta

- slučaj (B):

$q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12}$ pa jer je $q_{12} = 0$ (toplinska se energija ne dovodi) dobivamo:

$$-w_{12} = u_2 - u_1 = \mathbf{100 \text{ kJ/kg.}}$$

$$dT = \frac{du}{c_v} \quad c_v \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad c_p \equiv \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

$$c_{zvuka} = \sqrt{kpv} = \sqrt{\kappa RT}$$

Ukratko

Upoznali smo fizikalna svojstva hipotetičke tvari, koju zovemo idealnim plinom, i izveli jednadžbu što opisuje i predviđa ponašanje idealnog plina kome se istodobno mijenjaju i tlak i temperatura i volumen (obujam): jednadžbu stanja. Odredili smo funkcionalnu ovisnost unutrašnje kaloričke energije i entalpije o temperaturi, upoznali pojam specifičnog toplinskog kapaciteta i upozorili na manjkavosti "klasične" definicije tog pojma.

Primjeri

Usporedite (omjerom) energiju 1 kg U-235 s energijom 1 kg ugljena. Fisijom 1 atoma U-235 oslobađa se 200 MeV toplinske energije, a izgaranjem 1 kg ugljena 32,8 MJ.

Rj. 1kg U – 235 ima koliko atoma U – 235?

$$1\text{kg} : x = 1\text{kmol} : 6,022 \cdot 10^{26} \Rightarrow x = \frac{1\text{kg} \cdot 6,022 \cdot 10^{26}}{1\text{kmol}} \cdot$$

$$1 \text{ kmol} U^{235} = \mu \text{ kg} U^{235} = 235 \text{ kg} U^{235} \Rightarrow 1\text{kg} U^{235} = \frac{1\text{kmol}}{235} =$$

$$= 0,00426 \text{ kmol} = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ kmol} \Rightarrow$$

$$x = \frac{1\text{kg} \cdot \frac{4,26 \cdot 10^{-3} \text{ kmol}}{1\text{kg}} \cdot 6,022 \cdot 10^{26}}{1\text{kmol}} = 25,65 \cdot 10^{23} \text{ atoma } U^{235}$$

Primjeri

1 kg U-235 podvrgnut fisiji oslobađa energiju jednaku

$$25,65 \cdot 10^{23} \cdot 200 \cdot 10^6 \text{ eV} = 5.130 \cdot 10^{29} \text{ eV} = 5,13 \cdot 10^{32} \text{ eV}$$

$$5,13 \cdot 10^{32} \text{ eV} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} = 8,21 \cdot 10^{13} \text{ J} = 82,1 \cdot 10^{12} \text{ J} = 82,1 \text{ TJ}$$

Dobivamo

$$\frac{82,1 \text{ TJ}}{32,8 \text{ MJ}} = 2,5 \cdot 10^6$$

Primjeri

Koliko puta treba povećati energiju potrebnu za pogon pumpe (crpke) želimo li da u istom vremenu pumpamo (crpimo) dvostruku količinu vode?

Proces pumpanja (crpljenja) smatrajte idealnim (zanemarite trenje, promjenu gustoće vode, povećana naprezanja) stacionarnim strujnim procesom uz nepromijenjene dimenzije pumpe. (Površina presjeka cijevi pumpe ostaje nepromijenjena).

Promjenu potencijalne energije vode za vrijeme procesa pumpanja zanemarite.

Primjeri

Rj.

$$\dot{m} = \rho A c [kg / s] \Rightarrow 2\dot{m} = \rho A 2c [kg / s] \Leftrightarrow$$

dvostruka brzina strujanja vode da bi se pumpala
dvostruka količina uz nepromijenjene dimenzije
pumpe.

Potrebna energija

$$\frac{mc^2}{2} \Rightarrow \frac{2m \cdot (2c)^2}{2} = \frac{8mc^2}{2} = 8 \cdot \frac{mc^2}{2} \Rightarrow$$

8 puta.

Primjeri

Benzinski motor razvija snagu od 50 kW. Maseni je protok benzina pritom 15 kg/h, a zraka 215 kg/h. Temperatura je smjese goriva i zraka 15°C na ulazu u motor, a 900°C temperatura je plinova izgaranja na izlazu iz motora. Motor je hlađen vodom. Odredite iznos toplinske energije odvedene u jednoj sekundi vodom ukoliko se svako drugo odvođenje toplinske energije može zanemariti. Poznata je razlika specifičnih vrijednosti entalpija smjese zraka i goriva na ulazu u motor i plinova izgaranja na izlazu iz motora: 1.675 kJ/kg.

Primjeri

Rj.

$$q_{12} + h_1 + \frac{1}{2}c_1^2 + gz_1 = w_{t12} + h_2 + \frac{1}{2}c_2^2 + gz_2$$

$$\delta e_{kin} \approx 0; \delta e_{pot} \approx 0 \Rightarrow$$

$$q_{12} = w_{t12} + h_2 - h_1 / \cdot m$$

$$Q_{12} = W_{t12} + (h_2 - h_1)m / : t(s)$$

$$\dot{Q}_{12} = P_{t12} + (h_2 - h_1)\dot{m} =$$

$$= 50.000 \frac{J}{s} + (-1.675) \frac{10^3 J}{kg} \cdot (215 + 15) \frac{kg}{h} \cdot \frac{1h}{3.600s} \approx$$

$$\approx -57 \frac{kJ}{s}$$

Primjeri

Idealni plin, $R = 287 \text{ J/kgK}$, struji konstantnom
brzinom, 10 m/s , kroz cijev promjera $0,2 \text{ m}$ u
veliki spremnik. Kolika je količina plina što u
jednom satu ustrujava u spremnik ako je
temperatura plina 25°C a tlak 150 kPa ?
Zanemarite sve otpore strujanju.

Primjeri

Rj.

$$pv = RT \Rightarrow v = \frac{RT}{p} = \frac{287 \frac{J}{kgK} \cdot 298,15K}{150 \cdot 10^3 \frac{N}{m^2}} = 0,57 \frac{m^3}{kg}$$

$$\dot{m} = \rho Ac = \frac{Ac}{v} = \frac{0,2^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 10 \frac{m}{s}}{0,57 \frac{m^3}{kg}} = 0,53 \frac{kg}{s}$$

$$m = \dot{m} \cdot t = 0,53 \frac{kg}{s} \cdot 3.600s = 1.908kg.$$

Primjeri

Za koliko će se kilograma povećati masa jedne tone vode što se zagrijava od 0°C da vrelišta (100°C)?

Računajte s konstantnom specifičnom toplinom vode $c_p = 4,1868 \text{ kJ/kgK}$.

Rj.

$$\begin{aligned} Q (\text{E, energija}) &= mc_p\delta T = \\ &= 1000\text{kg} \cdot 4,186,8\text{J/kgK} \cdot 100\text{K} = 4,1868 \cdot 10^8 \text{ J}. \end{aligned}$$

Primjeri

Povećanje je mase vode:

$$\delta m = \frac{E}{c_{sv}^2} = \frac{4,1868 \cdot 10^8 \frac{kgm^2}{s^2}}{(3 \cdot 10^8)^2 \frac{m^2}{s^2}} = 0,47 \cdot 10^{-8} kg.$$

Primjeri

U parovodu se konstantnog presjeka temperatura pare što struji smanjuje od 800°C na 750°C . Ukoliko strujanje pare promatramo kao izobarno (tlak pare je konstantan) stacionarno strujanje idealnog plina, za koliko se smanjuje brzina strujanja pare u parovodu?

Primjeri

Rj.

$$\frac{c_1 A}{v_1} = \frac{c_2 A}{v_2} = \dots = \frac{c A}{v} = \dot{m} = \text{konst.}$$

$$p = \text{konst.} \Rightarrow \frac{p v_1 = R T_1}{p v_2 = R T_2} \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} =$$

$$= \frac{750 + 273,15}{800 + 273,15} = 0,95$$

$$\frac{c_1 A}{v_1} = \frac{c_2 A}{v_2} \Rightarrow \frac{c_2}{c_1} = \frac{v_2}{v_1} = 0,95 \Rightarrow$$

$$c_2 = 0,95 c_1$$

Primjeri

Gustoća je zraka tlaka $1,013251 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ i temperature $273,15\text{K}$ 1kg/m^3 . Odredite broj molekula zraka u 1cm^3 zraka te masu „molekule zraka“.

Rj.

$$v_\mu = \frac{R_\mu T}{p} = \frac{8.314,3 \frac{\text{J}}{\text{kmolK}} \cdot 273,15\text{K}}{1,01325 \cdot 10^5} = 22,414 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$$

Broj je kilomolova u 1 cm^3 :

Primjeri

$$n = \frac{V}{v_\mu} = \frac{10^{-6} m^3}{22,414 \frac{m^3}{kmol}} = \frac{10^{-6}}{22,414} kmol$$

Ako imamo n kilomolova, njihov je volumen

$V = n \cdot v_\mu$. (v_μ je volumen 1 kilomola pri tlaku p i temperaturi T.)

1 kilomol sadrži $6,023 \cdot 10^{26}$ (Avogadrov broj) molekula (čestica).

Dakle će 1 cm³ sadržati

$$6,023 \cdot 10^{26} : 22,414 \text{ m}^3/\text{kmol} = x : 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kmol}$$

Primjeri

$$x = \frac{6,023 \cdot 10^{26} \cdot 10^{-6}}{22,414} = 2,687 \cdot 10^{19} \text{ molekula.}$$

Molekulska masa zraka pri zadanim uvjetima iznosi:

$$\begin{aligned} m_z &= \rho v_\mu = 1 \text{ kg/m}^3 \cdot 22,414 \text{ m}^3/\text{kmol} = \\ &= 22,414 \text{ kg/kmol.} \end{aligned}$$

Masa je zraka u 1 cm³

$$m_z = 10^{-6} \text{ kg (jer je } \rho = 1 \text{ kg/m}^3\text{)},$$

Primjeri

pa je masa jedne „molekule zraka“:

$$m_{m_z} = \frac{m_z}{2,687 \cdot 10^{19}} \text{ kg} = \frac{10^{-6}}{2,687} \cdot 10^{-19} = \\ = 3,72 \cdot 10^{-26} \text{ kg.}$$

Primjeri

Promatrani adijabatski sustav cilindar je sa stapom, zanemarive mase, koji se giba bez trenja. Promjer je cilindra 0,5 m, a stap je opterećen stalnom silom, okomitom na stap, iznosa 2000 N. U cilindru se nalazi idealni plin ($R = 287 \text{ J/kgK}$, $\kappa = 1,4$) temperature 20°C . Tlak je okoline (atmosfere) 1 bar, a stap je udaljen 1 m od dna cilindra.

Koliko rada, posredstvom rotirajuće lopatice (rada trenja), treba dovesti u cilindar da bi se stap, svladavajući spomenutu silu, pomaknuo za 0,5 m?

Primjeri

1. glavni stavak za zatvoreni sustav:

$$Q_{12} = \delta U + W_{12}$$

$Q_{12} = 0$ (adijabatski sustav),

$W_{12} = W_{RT12} + \text{mehanički rad promjene volumena}$
(W_{12} je ukupni rad koji se izmjenjuje između
zatvorenog sustava i okoline za vrijeme procesa)

Dobivamo:

$$\delta U = -W_{12} = -pA\delta s - W_{RT12};$$

$$\delta U = c_v m(T_2 - T_1)$$

Primjeri

- ukupni je tlak što djeluje na stap:

$$p = \frac{F}{A} + p_{ok} = \frac{2.000N}{0,25^2 m^2 \pi} + 100.000 \frac{N}{m^2} =$$

$$= 110.185,9 \frac{N}{m^2}$$

- masa idealnog plina

$$m = \frac{pV_1}{RT_1} = \frac{110.185,9 \frac{N}{m^2} \cdot 0,25^2 m^2 \cdot \pi \cdot 1m}{287 \frac{J}{kgK} \cdot 293,15K} = \\ = 0,257 kg$$

Primjeri

- temperatura plina porasla je zbog dovedenog rada trenja

$$T_2 = \frac{pV_2}{mR} = \frac{110.185,9 \frac{N}{m^2} \cdot 0,25^2 m^2 \cdot \pi \cdot 1,5 m}{0,257 kg \cdot 287 \frac{J}{kgK}} = \\ = 439,98 K$$

Primjeri

- dovedeni rad trenja

$$\begin{aligned} W_{RT12} &= -pA\delta s - c_v m(T_2 - T_1) = \\ &= -pA\delta s - \frac{R}{\kappa-1} m(T_2 - T_1) = \\ &= -110.185,9 \frac{N}{m^2} \cdot 0,25^2 m^2 \cdot \pi \cdot 0,5 m - \\ &\quad 0,257 kg \cdot \frac{287 \frac{J}{kgK}}{1,4-1} (439,98 - 293,15) K = \\ &= -37.888,87 J \end{aligned}$$

(Negativni predznak upućuje na činjenicu da se rad trenja dovodi u sustav.)

Primjeri

Koristan rad sustava (plina), rad predan u okolicu za vrijeme procesa:

$$W_{koristan} = F \cdot s = 2000 \text{ N} \cdot 0,5 \text{ m} = 1000 \text{ J}$$

Što treba znati (naučiti) – 04 O idealnom plinu(<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enevre>)

- absolutna temperatura
- Avogadrov broj
- Avogadrov zakon
- Boltzmannova konstanta
- Boyle - Mariotteov zakon
- Celzijeva termodinamička temperatura
- Charlesov zakon
- entalpija idealnog plina
- Gay-Lussacov zakon
- homogeni sustav

Što treba znati (naučiti) – 04 O idealnom plinu(<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enevre>)

- idealizacija
- idealna kapljevina
- idealni energetski procesi
- idealni fluid
- idealni plin
- jednadžba stanja idealnog plina
- Jouleov pokus
- Jouleov zakon
- kelvin
- kilomol (kmol)

Što treba znati (naučiti) – 04 O idealnom plinu(<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enevre>)

- kilomolni specifični toplinski kapacitet
- kilomolni volumen
- krivulja procesa
- krivulja promjene stanja
- ledište vode
- manjkavosti definicije specifičnog toplinskog kapaciteta
- mol
- normalni ili normirani kubični metar

Što treba znati (naučiti) – 04 O idealnom plinu(<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enevre>)

- odnosi između specifičnih toplinskih kapaciteta uz konstantni tlak i konstantni volumen
- opća plinska konstanta
- ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta o temperaturi
- ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta o dovođenja toplinske energije
- para
- plinska konstanta
- porast vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta s temperaturom

Što treba znati (naučiti) – 04 O idealnom plinu(<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enevre>)

- relativna atomska masa
- specifični toplinski kapacitet
- specifični toplinski kapacitet idealnog plina
- specifični toplinski kapacitet uz konstantni tlak
- specifični toplinski kapacitet uz konstantni volumen
- srednji specifični toplinski kapacitet
- termodinamička jednadžba stanja
- termodinamička ravnoteža
- termodinamička temperatura

Što treba znati (naučiti) – 04 O idealnom plinu(<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- trojna točke vode
- unutrašnja kalorička energija idealnog plina
- zakon ponašanja idealnog plina

Energijeske tehnologije

Energetski procesi s idealnim plinom

Procesi u zatvorenim i otvorenim sustavima, kružni procesi

Vladimir Mikuličić, Davor Grgić, Zdenko Šimić, Marko Delimar
FER, 2013.



Teme:

1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
- 4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama**
5. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
6. Geotermalna energija
7. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
8. Potrošnja električne energije
9. Prijenos i distribucija el. en.
10. Energija Sunca
11. Energija vjetra
12. Energija biomase, Gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
13. Skladištenje energije
14. Energija, okoliš i održivi razvoj

Sadržaj

- Izohorni proces
- Izobarni proces
- Izotermni proces
- Adijabatski proces
- Politropski proces
- Kružni procesi
- Kružni procesi zatvorenih sustava
- Kružni procesi otvorenih sustava
- Termički (energetski) stupanj djelovanja
- Carnotov kružni proces
- Jouleov kružni proces
- Ljevokretni kružni procesi
- Ukratko
- Pitanje, zadatak, primjeri
- Što treba znati (naučiti)

Analiza energetskih procesa

- analiza energetskih procesa s idealnim plinom koji su, u prvom približenju, odgovarajući procesima s realnim fluidom (plinom i vodenom parom) u termoelektranama
 - mehanički rad promjene volumena
 - tehnički rad
 - toplinska energija
 - tlakovi, temperature i specifični volumeni

$pV = RT$ i $pV^n = \text{konst.}$

$$pV = RT \text{ [J/kg]}$$

$$pV^n = \text{konst. [J/kg]}$$

$$0 \leq n \leq \infty$$

$pV = RT$ i $pV^n = \text{konst.}$

$$pV^n = \text{konst. [J/kg]} \quad 0 \leq n \leq \infty$$

- kad **n** poprimi vrijednost nula ($n = 0 \Rightarrow p = \text{konst.}$), radi se o **izobarnom procesu** odnosno o promjeni stanja idealnog plina uz konstantni tlak,
- kad **n** poprimi 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** poprimi 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** poprimi 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** poprimi 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.

Jednadžbe analize

$m = \text{konst.} = 1\text{kg}$ i $\dot{m} = \text{konst.} = 1\text{kg/s}$,

$$q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12} = u_2 - u_1 + \int_{v_1}^{v_2} pdv \text{ odnosno } dq = du + pdv \text{ i}$$

$$q_{12} + u_1 + p_1 v_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + g z_1 = w_{t12} + u_2 + p_2 v_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + g z_2 \text{ odnosno}$$

$$dq = dw_t + d(u + pv) + de_k + de_p = du + pdv = dh - vdp,$$

$$pv = RT \text{ [J/kg] odnosno } pv_\mu = R_\mu T \text{ [J/kmol]}$$

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv \text{ odnosno } dw = pdv$$

$$w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} vdp - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \text{ odnosno } dw_t = -vdp - de_k - de_p$$

$$\int_{v_1}^{v_2} pdv - (p_2 v_2 - p_1 v_1) = - \int_{p_1}^{p_2} vdp$$

Jednadžbe analize

$$dq = cdT \text{ odnosno } c = \frac{dq}{dT} = \frac{du}{dT} + \frac{pdv}{dT} = \frac{dh}{dT} - \frac{vdp}{dT}$$

$$du = c_v dT \text{ i } dh = c_p dT$$

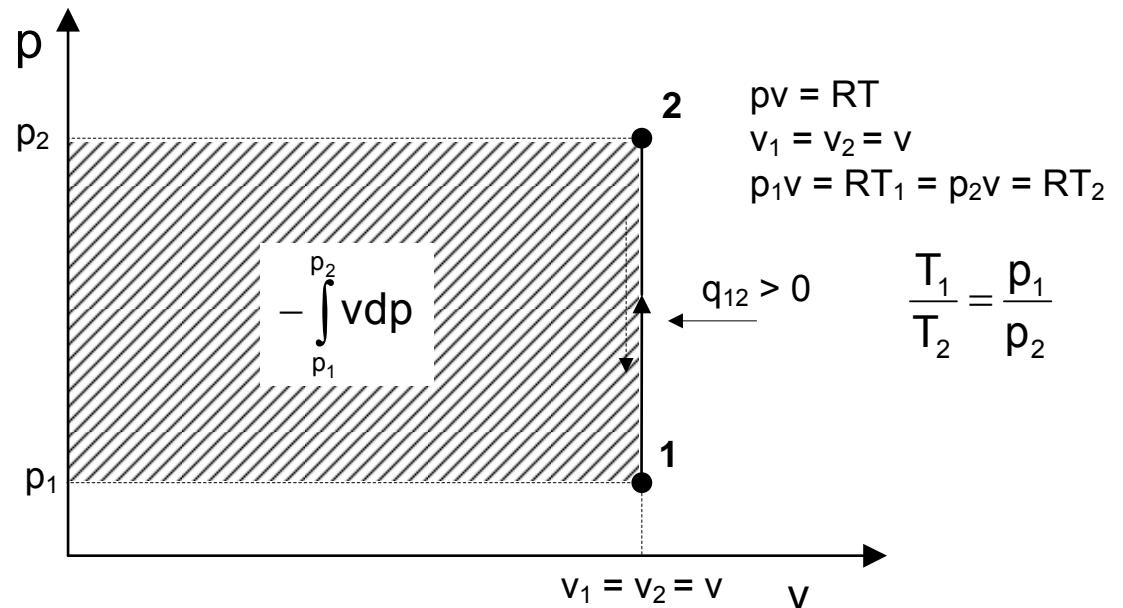
$$c_p = c_v + R, \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v}, \quad c_v = \frac{R}{\kappa - 1} \text{ i } c_p = \frac{\kappa R}{\kappa - 1}$$

Izohorni proces, $n = \infty$

$$pv^n = p_1v_1^n = p_2v_2^n = \text{konst.}$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} = 1$$

$$n \rightarrow \infty \quad \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} \rightarrow 1 \Rightarrow v_1 = v_2 = v$$



$$dw = pdv = 0 \quad (dv = 0) \quad w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} vdp - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) = -v(p_2 - p_1) - \delta e_k - \delta e_p$$

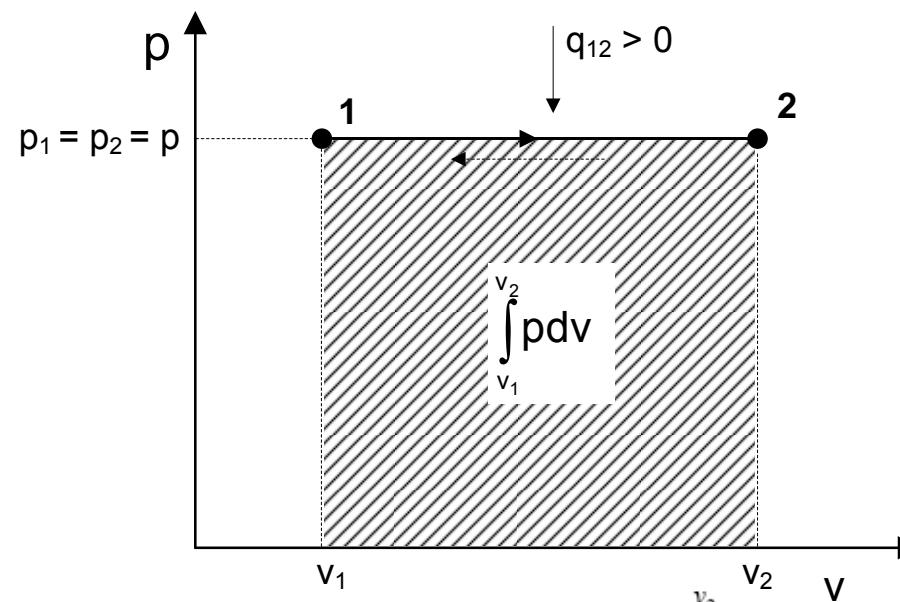
$$dq = du + pdv \text{ ili } dq = dh - vdp \quad dq = c_v dT, \text{ dakle } q_{12} = c_v(T_2 - T_1) \quad T_2 > T_1, q_{12} > 0$$

$$dq = c_p dT - vdp \quad pv = RT \quad pdv + vdp = RdT$$

Jer je $v = \text{konst}$, to je $pdv = 0$, pa je vdp jednako RdT ($vdp = RdT$). Vrijedi dakle,

$$dq = c_p dT - vdp = c_p dT - RdT = (c_p - R)dT = c_v dT.$$

Izobarni proces, $n = 0$



$$pv = RT, T \uparrow \Rightarrow v \uparrow /p = \text{konst.} /$$

$$dq = c_p dT, q_{12} = c_p(T_2 - T_1)$$

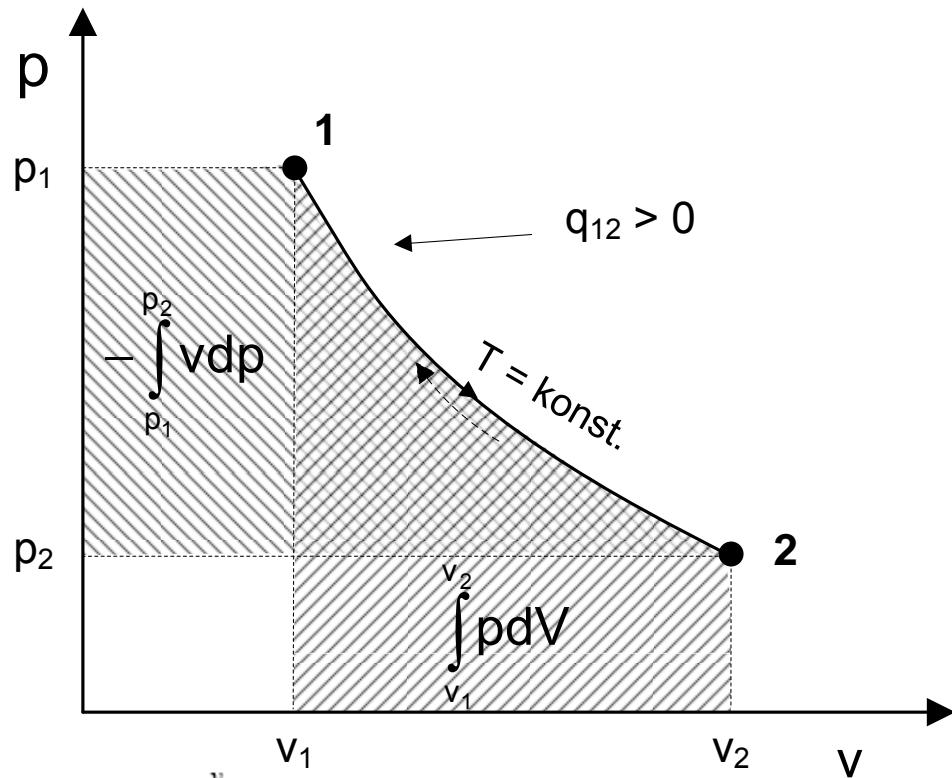
$$dw = pdv \text{ odnosno } w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1)$$

$$dw_t = -vdp - de_k - de_p = -de_k - de_p \quad (dp = 0)$$

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

$$T_1 = \frac{pv_1}{R} \text{ i } T_2 = \frac{pv_2}{R} \quad \frac{T_1}{T_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Izotermni proces, $n = 1$



$pV = RT = \text{konst.}$ (jer je $T = \text{konst.}$)

$$pV = p_1V_1 = p_2V_2 \text{ odnosno } \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

$$p = \frac{p_1V_1}{V} = \frac{p_2V_2}{V} = \frac{RT}{V}$$

$$W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p_1 V_1 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = RT \ln \frac{V_2}{V_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$(p_1V_1 = p_2V_2 = RT)$$

$$W_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} V dp - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1)$$

Izotermni proces, n = 1

$$\int p dv = - \int v dp$$

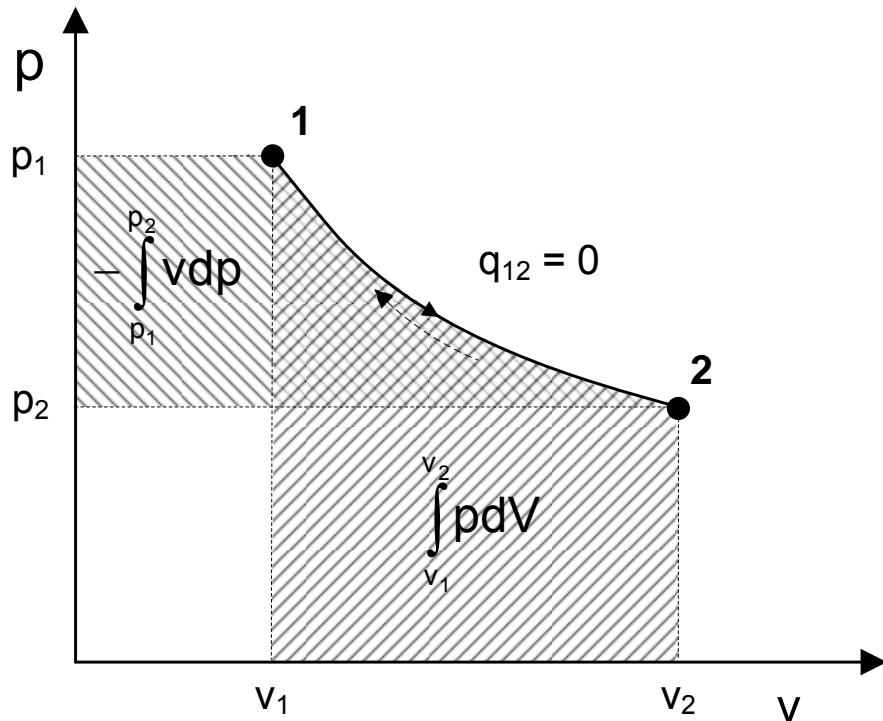
$p dv + v dp = R dT = 0$ ($dT = 0$, jer je $T = \text{konst.}$)

$$pdv = -vdp$$

$dq = du + pdv = pdv = dw$ ($du = c_v dT = 0$, $T = \text{konst.}$)

$$q_{12} = w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p_1 v_1 \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = R T \ln \frac{v_2}{v_1} = R T \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Adijabatski proces, $n = \kappa = \frac{c_p}{c_v}$



Dijeljenjem (II) s (I) dobivamo:

$$\frac{c_p}{c_v} = \kappa = -\frac{vdp}{pdv} \text{ (III).}$$

$$\kappa \frac{dv}{v} = -\frac{dp}{p}$$

$$\int \kappa \frac{dv}{v} = - \int \frac{dp}{p} + C$$

$$\kappa \ln v = - \ln p + \ln \text{konst.} (C = \ln \text{konst.})$$

$$\ln v^\kappa + \ln p = \ln \text{konst, odnosno, } \ln(pv^\kappa) = \ln \text{konst.}$$

$$pv^\kappa = \text{konst.}$$

$$pv^\kappa = \text{konst.}$$

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

$$0 = du + pdv = dh - vdp$$

$$du + pdv = 0, \text{ odnosno } c_v dT = -pdv \text{ (I)}$$

$$dh - vdp = 0, \text{ odnosno } c_p dT = vdp \text{ (II)}$$

Adijabatski proces, $n = \kappa = \frac{c_p}{c_v}$

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv \text{ i } w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} vdp - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) \cdot g(z_2 - z_1)$$

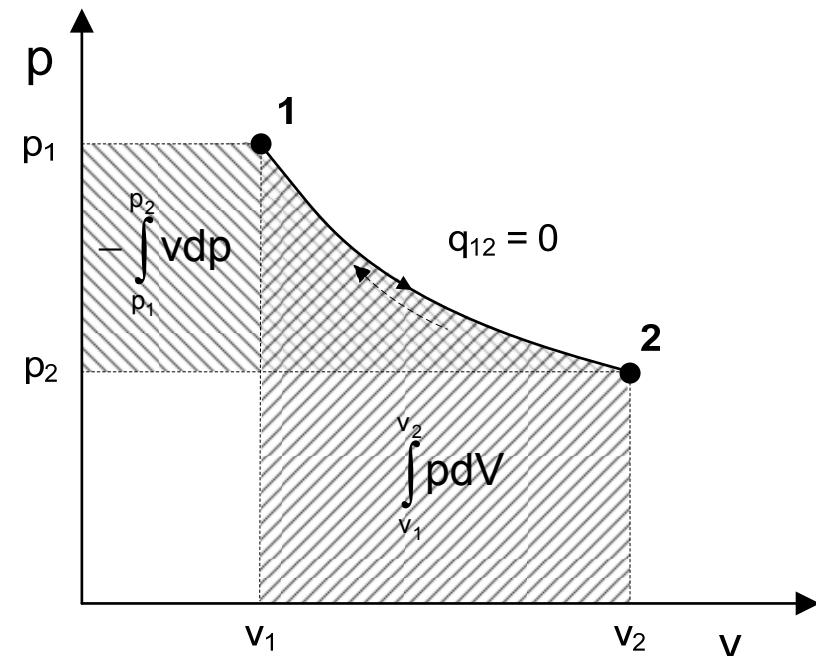
$$p = \frac{p_1 v_1^\kappa}{v^\kappa} \quad (p_1 v_1^\kappa - \text{konst.}) \quad w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = p_1 v_1^\kappa \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^\kappa} = \frac{p_1 v_1^\kappa}{\kappa-1} \left(\frac{1}{v_1^{\kappa-1}} - \frac{1}{v_2^{\kappa-1}} \right)$$

$$dq = du + pdv = dh - vdp = 0 \quad pdv = -du, \text{ a } vdp = dh.$$

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = - \int_{u_1}^{u_2} du = - \int_{T_1}^{T_2} c_v dT = c_v (T_1 - T_2)$$

$$- \int_{p_1}^{p_2} vdp = - \int_{h_1}^{h_2} dh = - \int_{T_1}^{T_2} cpdT = c_p (T_1 - T_2)$$

$$w_{t12} = c_p (T_1 - T_2) - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1)$$



Adijabatski proces - odnosi između tlakova, volumena i temperatura

$$p_1 v_1 = RT_1 / \bullet v_1^{\kappa-1} \Rightarrow p_1 v_1^\kappa = RT_1 v_1^{\kappa-1} \text{ (A)}$$

$$p_2 v_2 = RT_2 / \bullet v_2^{\kappa-1} \Rightarrow p_2 v_2^\kappa = RT_2 v_2^{\kappa-1} \text{ (B)}$$

$$p_1 v_1^\kappa = p_2 v_2^\kappa = p v^\kappa$$

$$RT_1 v_1^{\kappa-1} = RT_2 v_2^{\kappa-1} \quad T_1 v_1^{\kappa-1} = T_2 v_2^{\kappa-1} \text{ ili } \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{\kappa-1}$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\kappa}}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{\kappa-1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

Politropski proces, $n = n \neq 0, 1, \kappa, \infty$

$$pV^n = \text{konst.}$$

$$dq = du + pdv \text{ ili } dq = dh - vdp$$

$$dq = du + pdv = c_v dT + pdv \quad p = \frac{\text{konst.}}{v^n}$$

$$pv^n = \text{konst. /dif.} \Rightarrow v^n dp + npv^{n-1} dv = 0$$

$$vdp + npdv = 0$$

$$pv = RT / \text{dif.} \Rightarrow vdp + pdv = RdT$$

$$vdp + npdv = 0$$

$$-vdp - pdv = -RdT$$

$$npdv - pdv = -RdT \quad pdv = -\frac{RdT}{n-1}$$

$$dq = du + pdv = c_v dT + pdv = c_v dT - \frac{RdT}{n-1} = \left(c_v - \frac{c_p - c_v}{n-1} \right) dT = c_v \left(\frac{n-1}{n-1} - \frac{\kappa-1}{n-1} \right) dT =$$
$$(R = c_p - c_v, \kappa = c_p/c_v)$$

Politropski proces – izmijenjena toplinska energija

$$dq = c_v \frac{n - K}{n - 1} dT$$

$$dq = c_v dT \text{ i } dq = c_p dT$$

Nameće se zaključak da relacija $c_v \frac{n - K}{n - 1}$

mora biti „politropski specifični toplinski kapacitet“.

Označit ćemo ga s indeksom **n**:

$$c_n = c_v \frac{n - K}{n - 1}$$

n upućuje da postoji beskonačno mnogo specifičnih toplinskih kapaciteta budući da **n** poprima sve vrijednosti između nule (uključivo) i beskonačnog (uključivo)

Specifični toplinski kapaciteti

$n = 0 \Rightarrow c_n = c_v \cdot \nu = c_p$ (izobarni proces, specifični toplinski kapacitet uz konstantni tlak),

$n = 1 \Rightarrow c_n = \infty = c_{\text{izotermna}}$ (izotermni proces, specifični toplinski kapacitet uz konstantnu temperaturu beskonačno je velik: toplinska se energija dovodi (odvodi) a da se pritom temperatura sustava ne mijenja),

$n = \nu \Rightarrow c_n = 0 = c_{\text{adijabatska}}$ (adijabatski proces: adijabatski je specifični toplinski kapacitet jednak nuli budući da se toplinska energija ne dovodi niti odvodi),

$n = \infty \Rightarrow c_n = c_v$ (izohorni proces, specifični toplinski kapacitet uz konstantni volumen), i, konačno

$$0 < n < \infty \quad (n \neq 0, 1, \nu, \infty) \Rightarrow c_n = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} \quad (\text{politropski specifični toplinski kapacitet}).$$

Politropski proces – izmjenjena toplinska energija

Integrirajući diferencijalnu jednadžbu

$$dq = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} dT$$

dobivamo toplinsku energiju koja se izmjenjuje za vrijeme politropskog procesa:

$$q_{12} = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} (T_2 - T_1)$$

$$1 < n < \kappa \Rightarrow c_n < 0 \quad (q_{12} > 0)$$

Naime, dovodi li se toplinska energija i pritom dobiva mehanički rad (plin ekspandira), temperatura će T_2 biti manja od temperature T_1 , $T_2 < T_1$, pa će zbog toga biti $q_{12} > 0$.

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

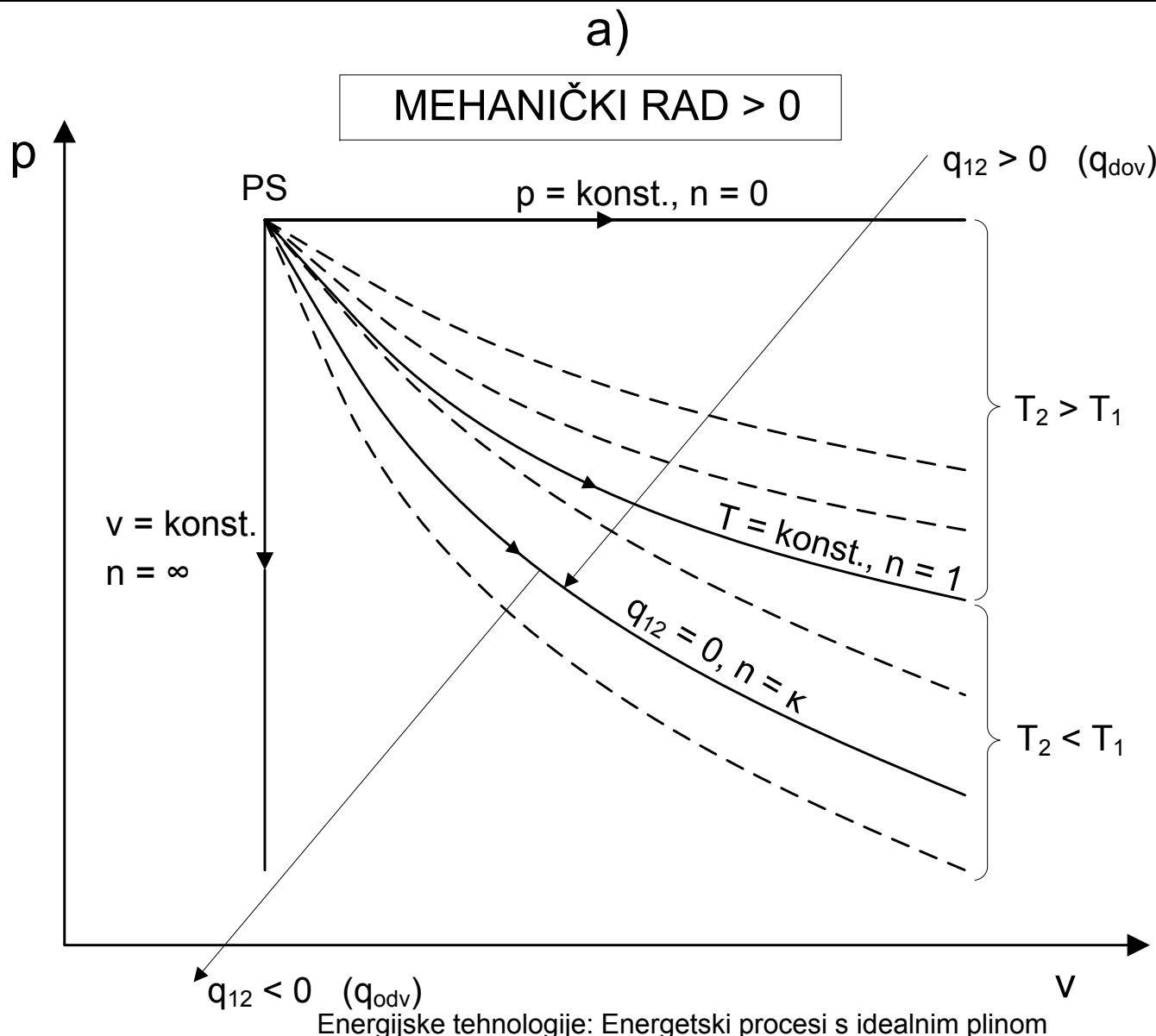
Očito se dakle za vrijeme promatrane politropske ekspanzije ($1 < n < \kappa$) temperatura snizuje,

$$T_2 < T_1, \text{ jer je } n > 1, \text{ a } v_2 > v_1.$$

Negativna specifični toplinski kapacitet ?

- što znači negativni politropski specifični toplinski kapacitet?
 - negativni specifični toplinski kapacitet znači da je eksergija toplinske energije, koja se dovodi u sustav (plinu), manja od dobivenog mehaničkog rada, a jer je energija (eksergija) nestvoriva, manjak eksergije nadoknađuje se eksergijom unutrašnje kaloričke energije plina kome se zbog toga snizuje temperatura
 - očito, s energetskog su stajališta zbog toga prihvatljivi samo politropski procesi s vrijednosti eksponenta **n** između **1** i **κ**: **1 < n < κ**, slika 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)

Usporedba procesa – dobivanje mehaničkog rada, dovođenje i odvođenje toplinske energije

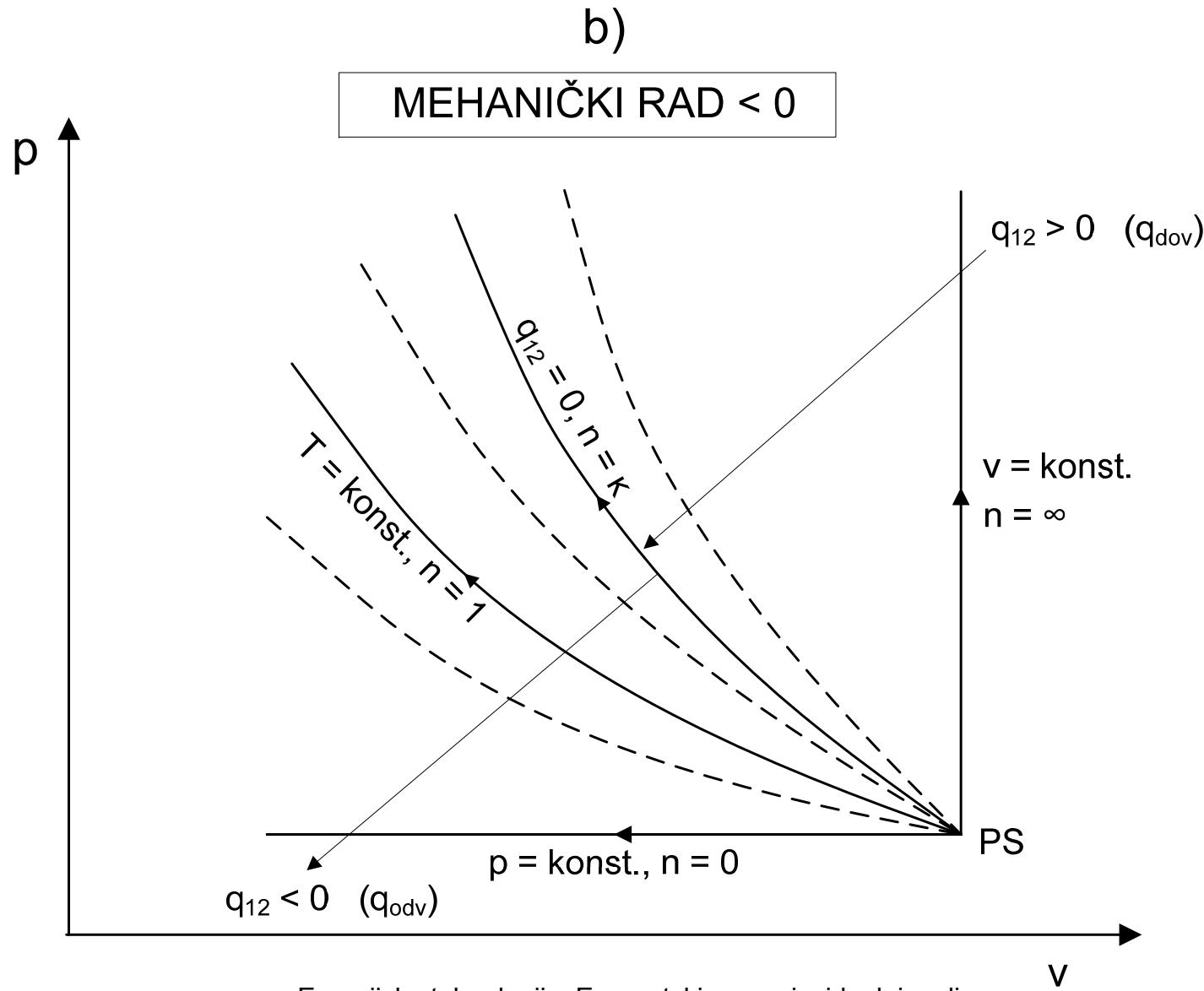


Usporedba procesa – dobivanje mehaničkog rada, dovođenje i odvođenje toplinske energije

U slučaju ekspanzije (dobivanje mehaničkog rada), ukoliko su vrijednosti eksponenta **n**:

- $0 \leq n < \kappa$ toplinska se energija mora dovoditi u proces ($q_{12} = q_{\text{dov}} > 0$),
- 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 iz procesa ($q_{12} = q_{\text{odv}} < 0$).

Usporedba procesa – ulaganje mehaničkog rada, dovođenje i odvođenje toplinske energije



Usporedba procesa – ulaganje mehaničkog rada, dovođenje i odvođenje toplinske energije

Suprotno vrijedi u slučaju kompresije (obavljanje mehaničkog rada), slika b).

Ako su vrijednosti eksponenta n:

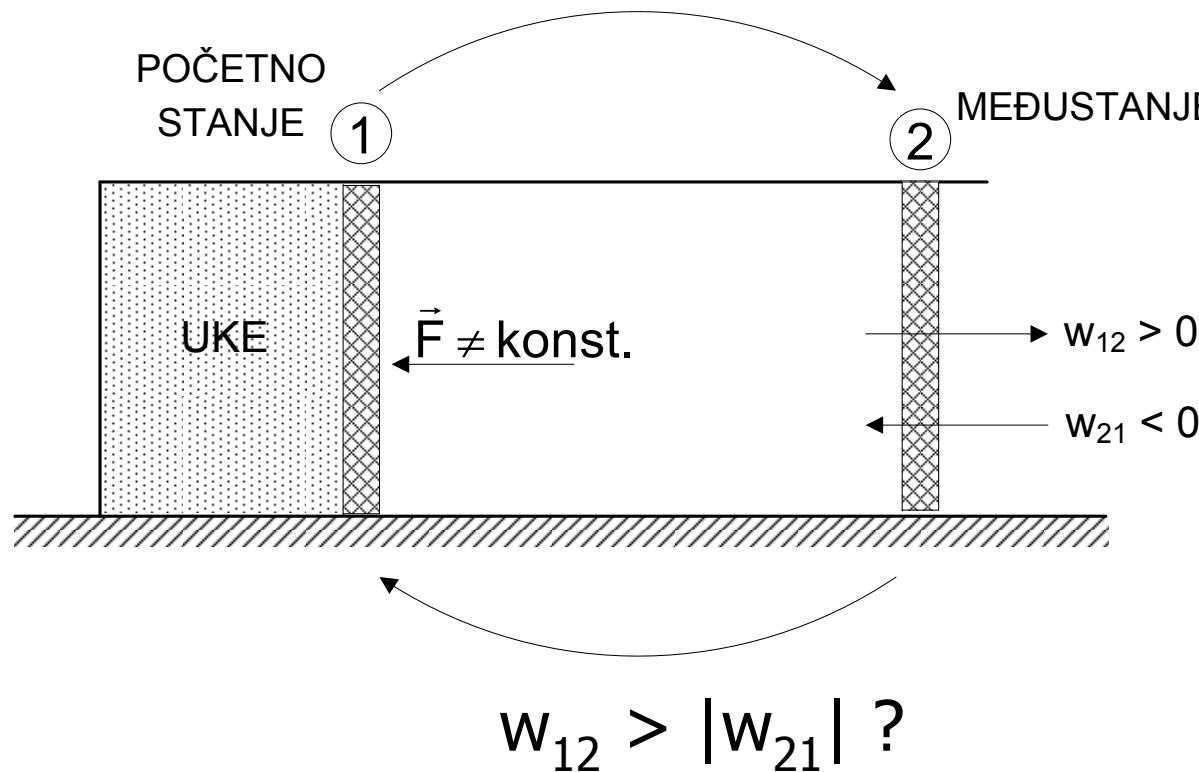
- $\kappa < n \leq \infty$ toplinska se energija mora dovoditi u proces ($q_{12} = q_{\text{dov}} > 0$).
- $n = \kappa$ toplinska se energija niti dovodi niti odvodi ($q_{12} = 0$, adijabatski proces),
- $0 \leq n < \kappa$ toplinska se energija mora odvoditi iz procesa ($q_{12} = q_{\text{odv}} < 0$).

Kružni procesi

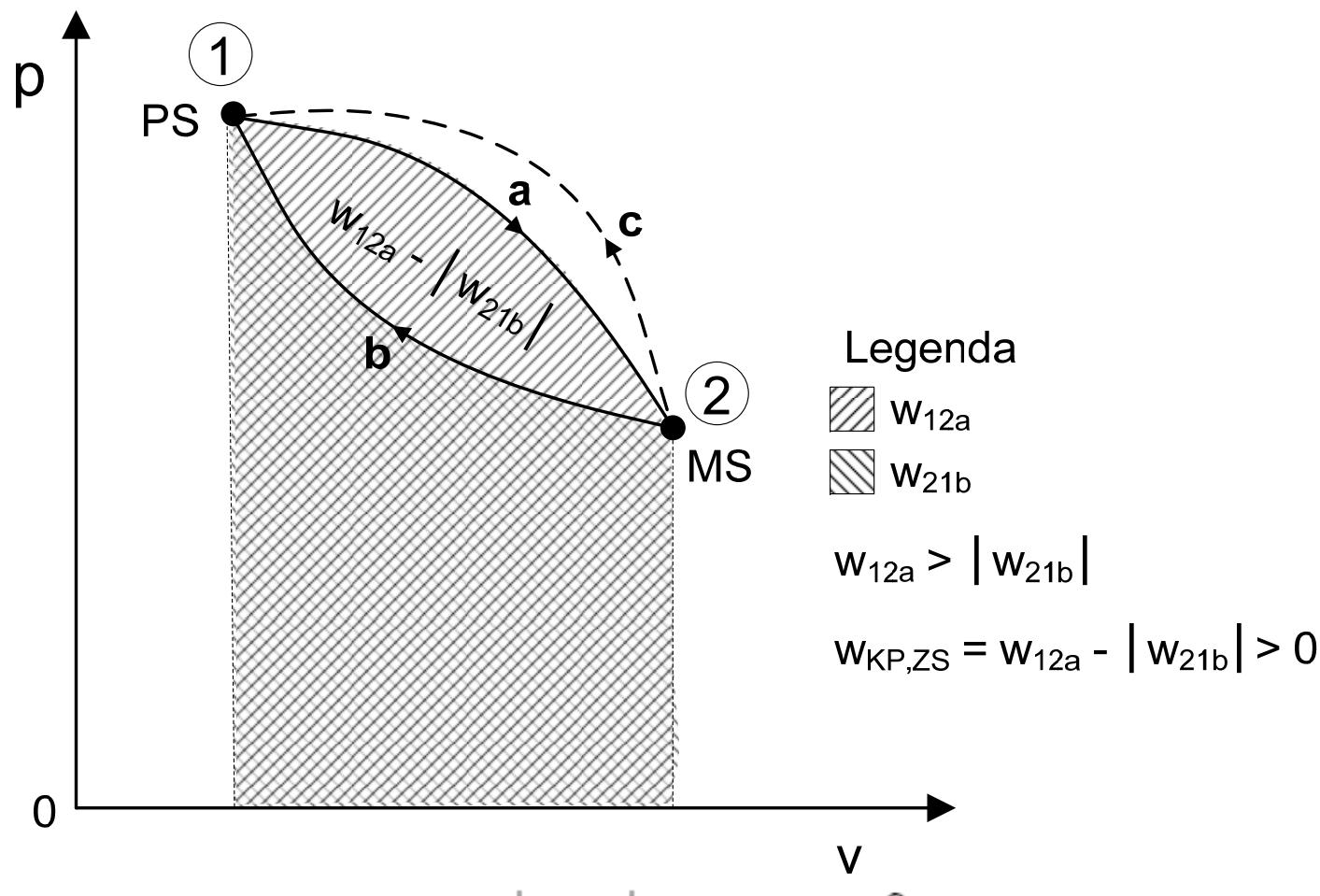
- kružni proces: proces s procesima
- vraća sustav u početno stanje
- sve veličine stanja (tlak, temperatura, volumen, unutrašnja kalorička energija, entalpija, itd.) postižu početne vrijednosti i to vrijedi bez obzira je li kružni proces sastavljen od povratljivih ili nepovratljivih procesa, odnosno radi li se o zatvorenom, otvorenom itd. sustavu

Kružni procesi zatvorenih sustava

- zašto provoditi kružni proces?
- je li moguće iz zatvorenog sustava trajno dobivati mehanički rad a da ga ne „pretvorimo“ u otvoreni sustav?



Kružni procesi zatvorenih sustava

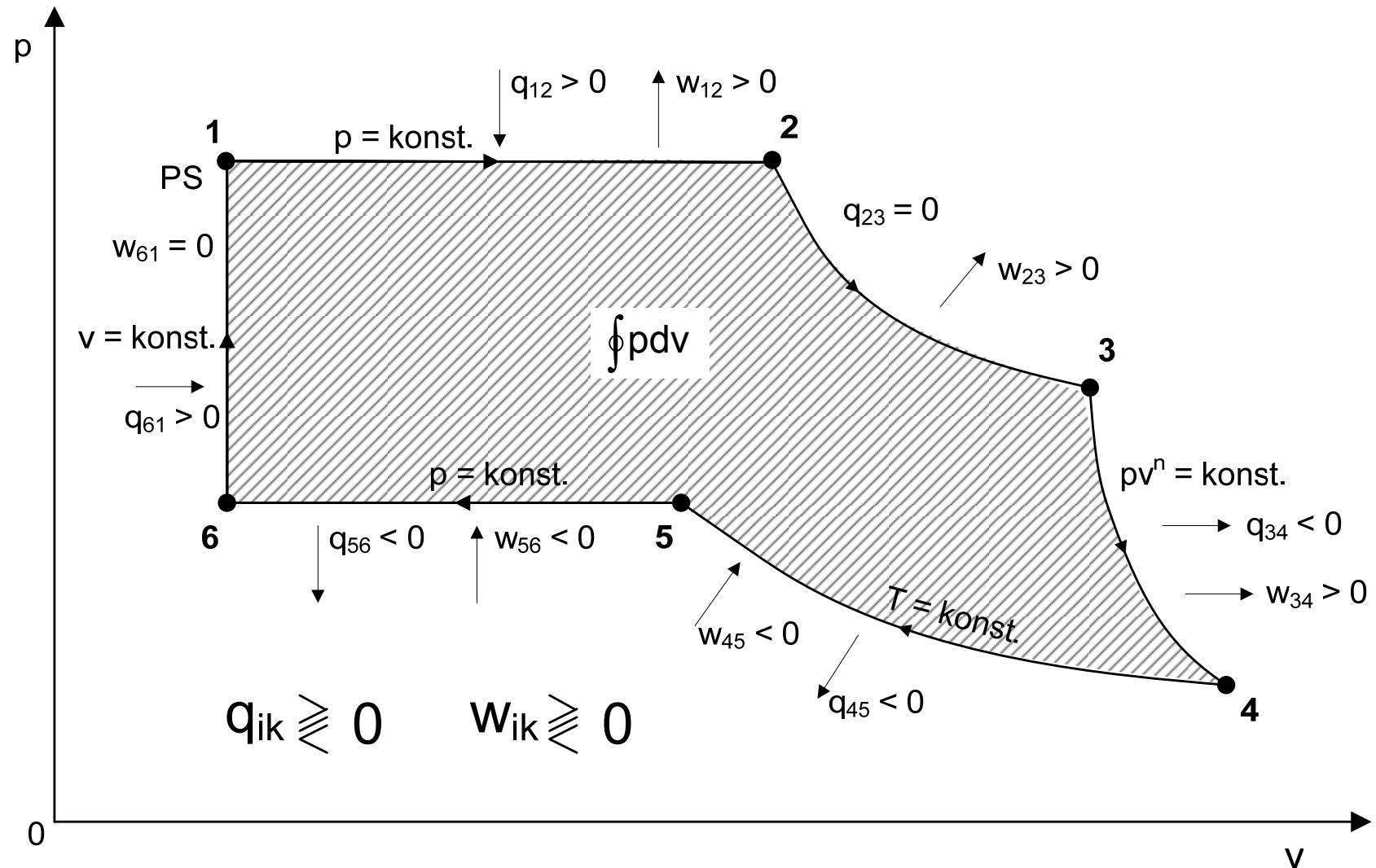


$$w_{12a} + w_{21b} = w_{12a} - |w_{21b}| = w_{KP_{ZS}} > 0$$

$w_{12a} > |w_{21b}|?$

$$w_{12a} + w_{21c} = w_{12a} - |w_{21c}| = w_{KP_{ZS}} < 0$$

Kružni procesi zatvorenih sustava



Kružni procesi zatvorenih sustava

$$q_{12} = w_{12} + u_2 - u_1$$

$$q_{23} = w_{23} + u_3 - u_2 \quad q_{ik}$$

$$q_{34} = w_{34} + u_4 - u_3$$

...

$$q_{61} = w_{61} + u_1 - u_6$$

$$w_{ik} = \int_{v_i}^{v_k} p dv \cdot |w_{RTik}|$$

$$q_{12} + q_{23} + q_{34} + \dots + q_{61} = w_{12} + w_{23} + w_{34} + \dots + w_{61}$$

$$w_{KP_{zs}} = \sum w_{ik} = \sum q_{ik} \text{ [J/kg]}$$

Koliki je $w_{KP_{zs}}$?

Mehanički rad kružnog procesa zatvorenog sustava

$$w_{ik} = \int_{v_i}^{v_k} pdv \text{ (zanemarujemo trenje)}$$

$$w_{KP_{ZS}} = \sum w_{ik} = \int_{v_1}^{v_2} pdv + \int_{v_2}^{v_3} pdv + \dots + \int_{v_n}^{v_1} pdv = \oint pdv$$

$$\oint pdv = w_{KP_{ZS}} + \sum |w_{RTik}|$$

$$w_{povKP_{ZS}} = \oint pdv \quad \text{mehanički povratljivi proces (ne postoji trenje)}$$

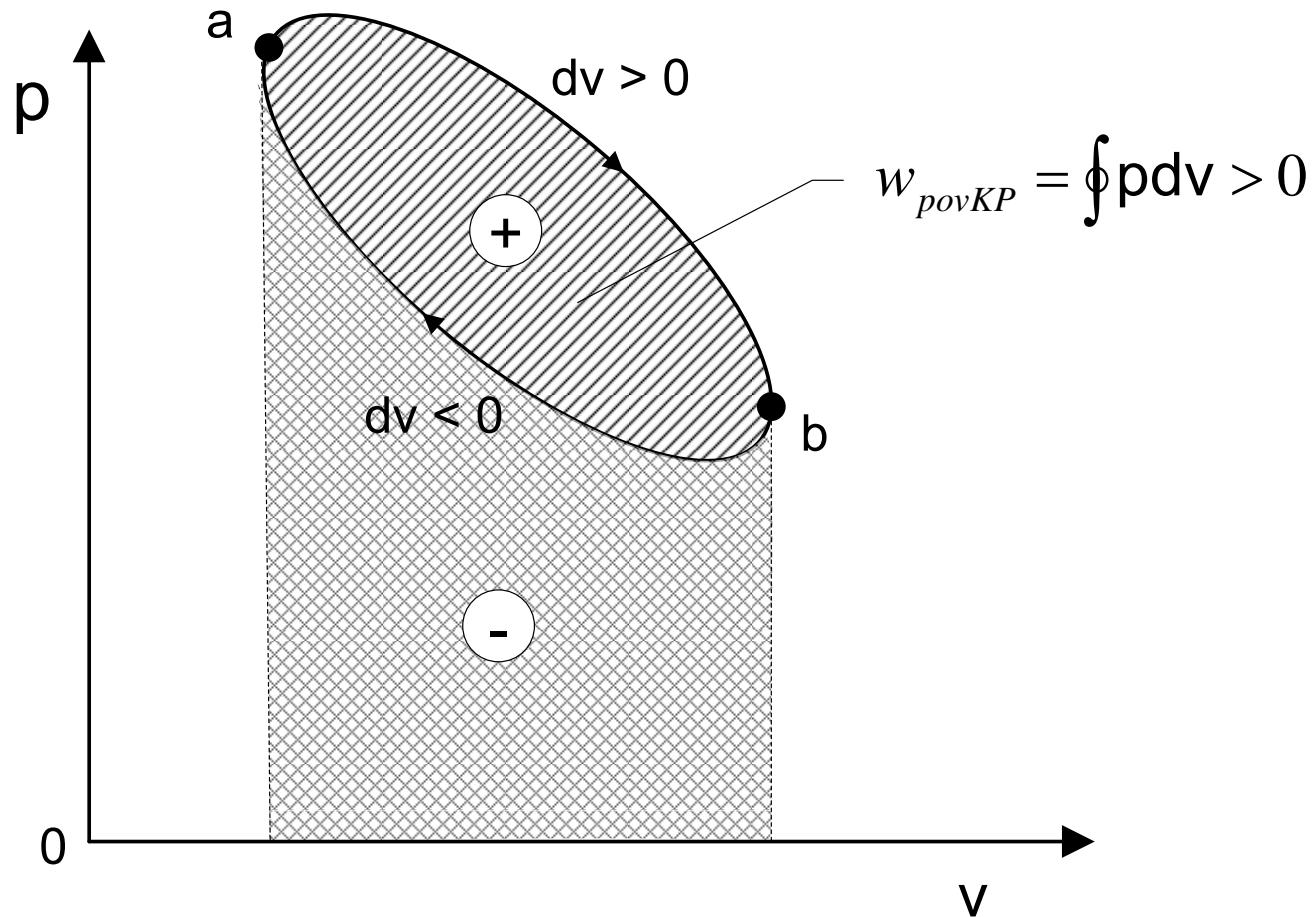
Mehanički rad kružnog procesa zatvorenog sustava

$$\sum q_{ik} = \sum q_{ik_{dov}} + \sum q_{ik_{odv}} = q_{dov} + q_{odv} = q_{dov} - |q_{odv}|$$

$$W_{povKP_{ZS}} = \oint p dV = q_{dov} - |q_{odv}|$$

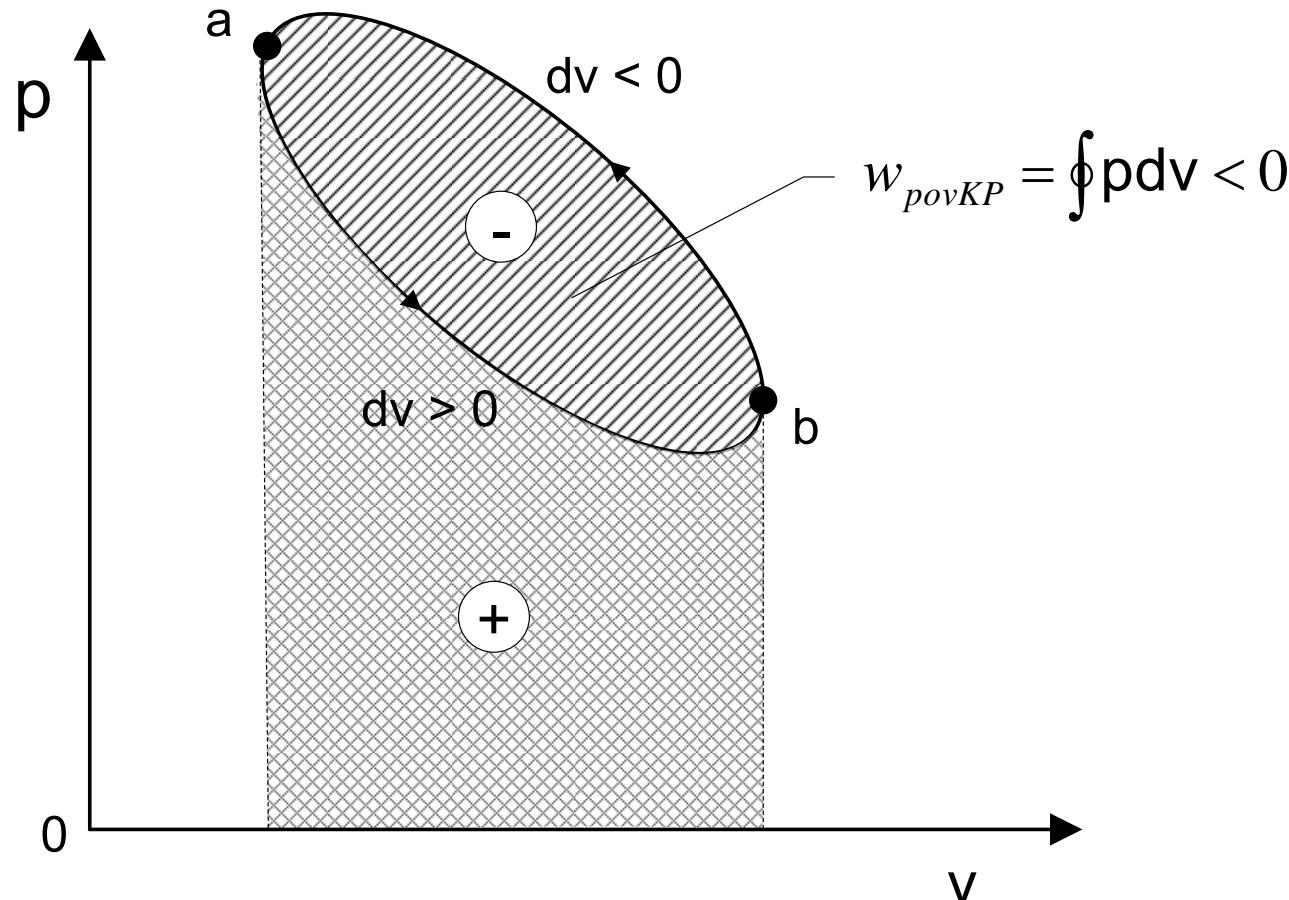
Uočimo sada još nešto. Realizirajući kružni proces kretali smo se u desnu stranu; u smjeru gibanja kazaljke na satu, slika. Takav se kružni proces naziva **desnokretnim**.

Desnokretni kružni proces



$$w_{DKP} = \int_a^b pdv - \left| \int_b^a pdv \right| > 0 \text{ jer je } \int_a^b pdv > \left| \int_b^a pdv \right|.$$

Ljevokretni kružni proces



$$w_{LJKP} = \int_a^b pdv + \int_b^a pdv = \int_a^b pdv - \left| \int_b^a pdv \right| < 0 \text{ jer je } \int_a^b pdv < \left| \int_b^a pdv \right|$$

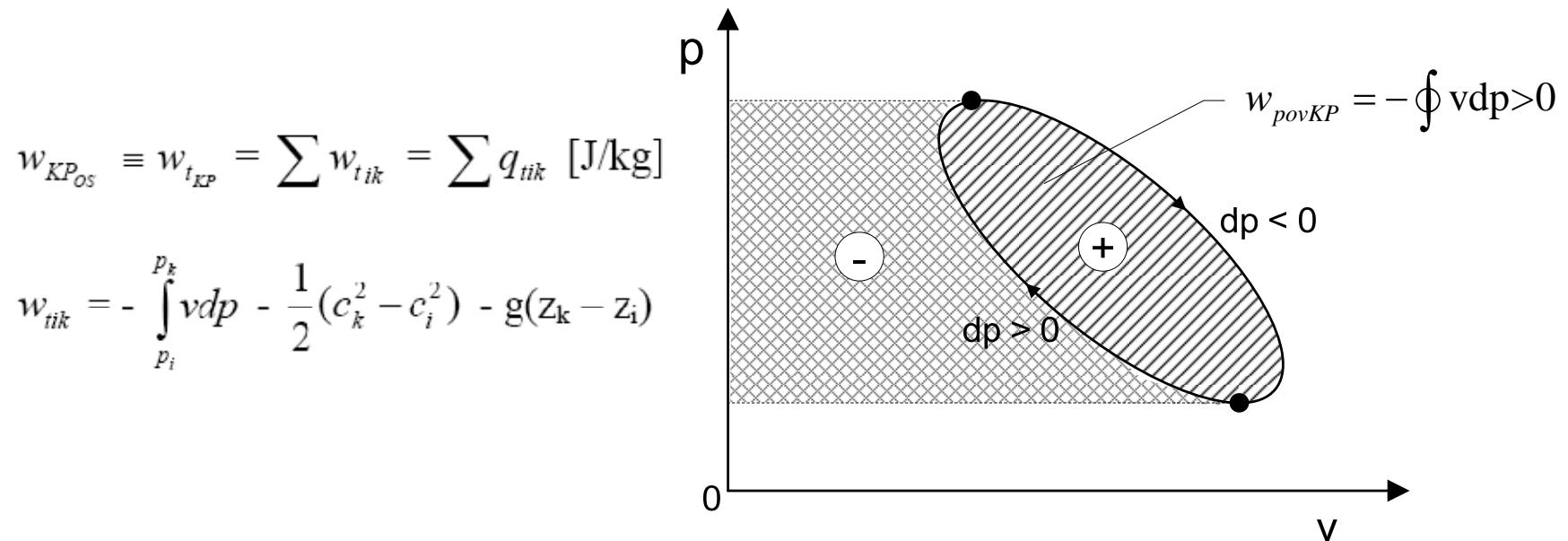
Kružni procesi otvorenih sustava

- u termoelektranama fluid je sustav podvrgnut kružnom procesu koji je realiziran pomoću različitih procesa u otvorenim sustavima
- 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:

$$w_{KP_{OS}} \equiv w_{t_{KP}} ?$$

Mehanički rad desnokretnog kružnog procesa otvorenih sustava

- princip očuvanja energije (1. glavni stavak termodinamike za otvoreni sustav)



$$w_{t_{KP}} = - \oint v dp = \sum w_{tik} = w_{t_{turbine}} + w_{t_{pumpe}} = w_{t_{turbine}} - |w_{t_{pumpe}}| = \sum q_{tik} \text{ [J/kg]}$$

Mehanički rad kružnih procesa

- kolika je ukupno izmijenjena toplinska energija
 $\sum q_{tik}$?
- toplinska je energija oblik energije što prelazi granice sustava nevezano uz masu, što znači da je neovisna o tome odvija li se (isti) proces u zatvorenom ili otvorenom sustavu, pa mora stoga vrijediti:

$$\sum q_{tik} \equiv \sum q_{ik} = \sum q_{ik_{dov}} + \sum q_{ik_{odov}} = q_{dov} + q_{odov} = q_{dov} - |q_{odov}|$$

Mehanički rad kružnih procesa

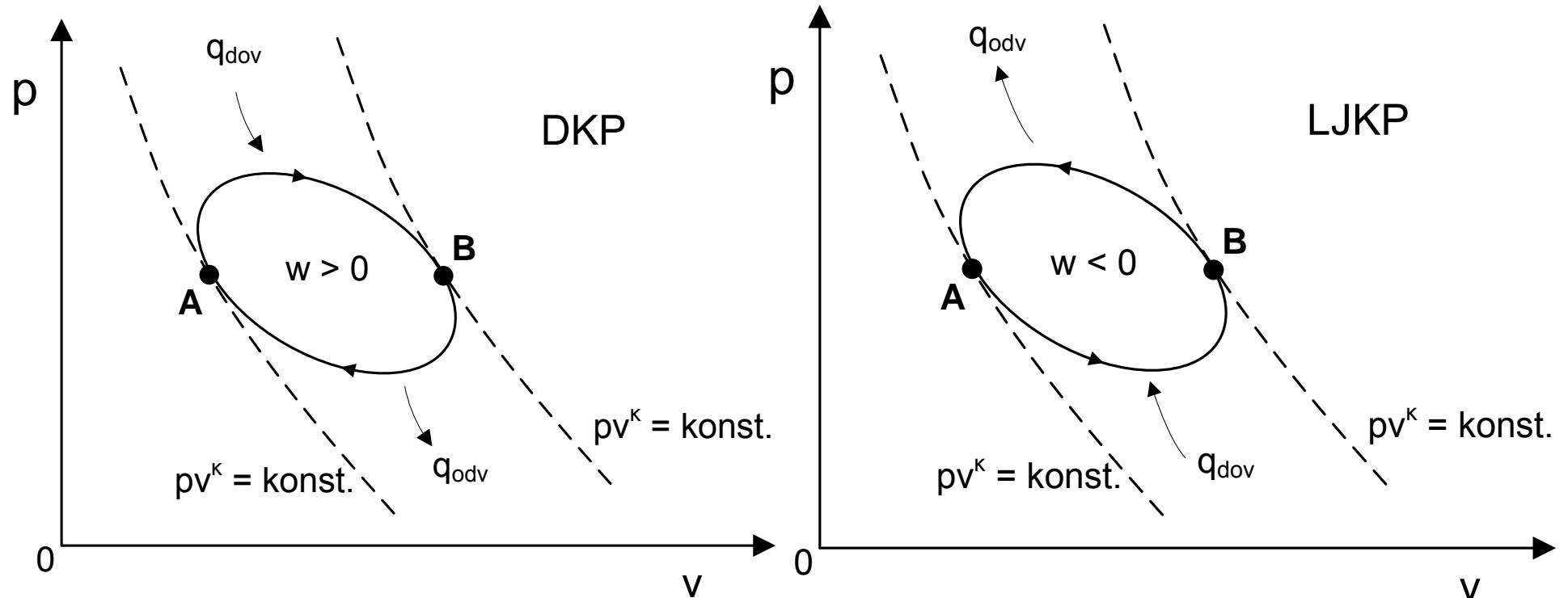
- jer vrijedi i da je

$$w_{t_{KP}} = \sum q_{tik} = \sum q_{ik}, \text{ a } w_{KP_{ZS}} = \sum q_{ik}$$

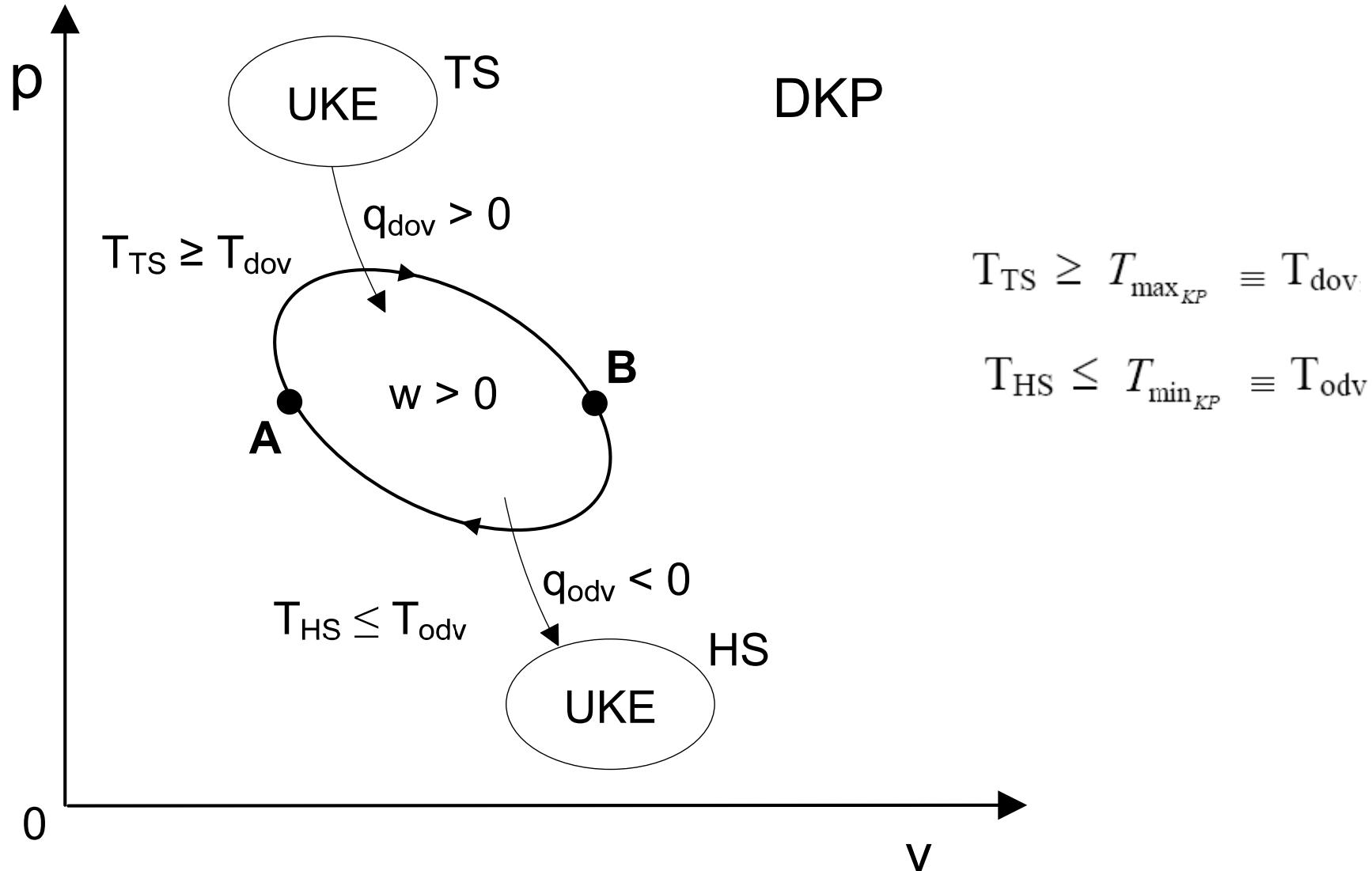
- zaključujemo da je ukupni iznos izmijenjenog mehanički rada za vrijeme odvijanja kružnog procesa neovisan o tome provodi li se kružni proces sa zatvorenim sustavom ili otvorenim sustavima:

$$w_{KP_{ZS}} = w_{t_{KP}} = W_{KP} = w = \oint pdv = - \oint vdp = q_{dov} + q_{odv} = q_{dov} - |q_{odv}|$$

Kružni proces bez dovođenja, odvođenja toplinske energije?



Toplinski spremnici i prijelaz toplinske energije u i iz kružnog procesa



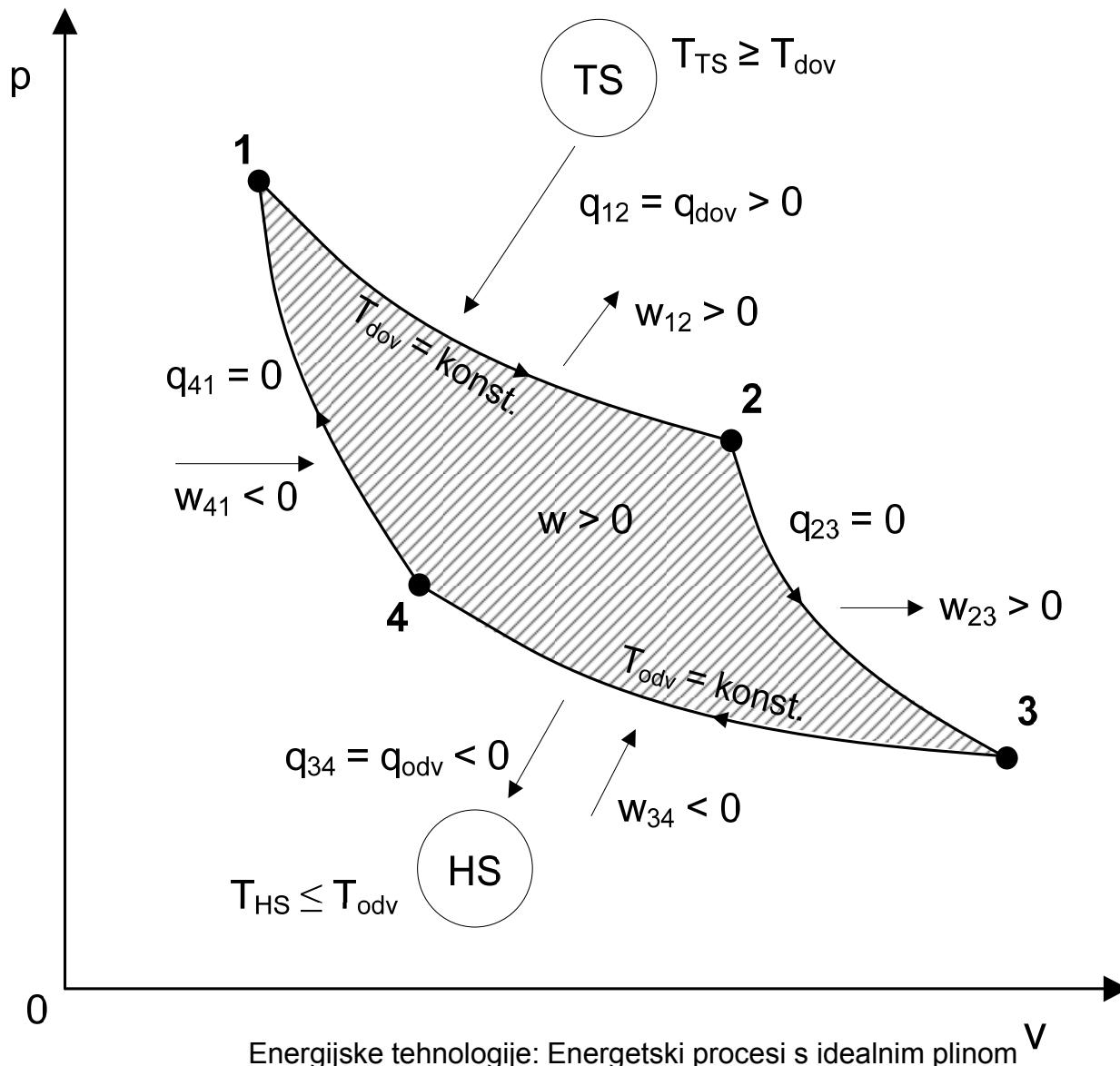
Termički (energetski) stupanj djelovanja

$$w = q_{dov} - |q_{odv}| \text{ [J/kg]}$$

$$\eta_t = \frac{w}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} + q_{odv}}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} - |q_{odv}|}{q_{dov}} = 1 - \frac{|q_{odv}|}{q_{dov}}$$

$$\eta_{t\max} \quad q_{odv} \quad q_{odv_{\min}} ?$$

Carnotov desnokretni kružni proces



Mehanički rad DCKP

$$w = \oint pdv = - \oint vdp = q_{dov} + q_{odv} = q_{dov} - |q_{odv}| \text{ [J/kg]}$$

$$q_{12} = RT_{dov} \ln \frac{v_2}{v_1} = q_{dov} > 0, \quad q_{34} = RT_{odv} \ln \frac{v_4}{v_3} = -RT_{odv} \ln \frac{v_3}{v_4} = q_{odv} < 0.$$

$$\frac{T_{dov}}{T_{odv}} = \left(\frac{v_3}{v_2} \right)^{\kappa-1} = \left(\frac{v_4}{v_1} \right)^{\kappa-1} \quad \frac{v_3}{v_2} = \frac{v_4}{v_1} \text{ ili } v_1v_3 = v_2v_4$$

$$w = q_{dov} - |q_{odv}| = RT_{dov} \ln \frac{v_2}{v_1} - RT_{odv} \ln \frac{v_3}{v_4} = R(T_{dov} - T_{odv}) \ln \frac{v_2}{v_1} \text{ [J/kg]} > 0$$

Mehanički rad DCKP

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:

$$\begin{aligned} w &= \oint pdv = \int_{v_1}^{v_2} pdv + \int_{v_2}^{v_3} pdv + \int_{v_3}^{v_4} pdv + \int_{v_4}^{v_1} pdv = \\ &= RT_{\text{dov}} \ln \frac{v_2}{v_1} + c_v(T_{\text{dov}} - T_{\text{odv}}) + RT_{\text{odv}} \ln \frac{v_4}{v_3} + c_v(T_{\text{odv}} - T_{\text{dov}}) = R(T_{\text{dov}} - T_{\text{odv}}) \ln \frac{v_2}{v_1} \end{aligned}$$

Dakako, isti bismo rezultat dobili računamo li rad kružnog procesa i prema izrazu $w = - \oint vdp$.

Termički stupanj djelovanja DCKP

$$\eta_{tCKP} = \frac{w}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} + q_{odv}}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} - |q_{odv}|}{q_{dov}} = 1 - \frac{|q_{odv}|}{q_{dov}} = 1 - \frac{T_{odv}}{T_{dov}}$$

Dakle je količina toplinske energije koja se u Carnotovom deslokretnom kružnom procesu pretvara u mehanički rad jednaka:

$$w = \eta_{tCKP} q_{dov} = \left(1 - \frac{T_{odv}}{T_{dov}}\right) q_{dov} [\text{J/kg}]$$

$\eta_{tCKP} = f(T)$ Je li je to iznenadujući rezultat? Ne.

$$T_{TS} \geq T_{\max_{KP}} \equiv T_{dov} \text{ i } T_{HS} \leq T_{\min_{KP}} \equiv T_{odv}$$

Carnotov kružni proces – najbolji kružni proces

- pokazat ćemo, 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 $|q_{\text{odvmin}}| > 0$, termički stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa ne može biti jednak jedan.
- to slijedi i iz ovakve analize ...

$$T_{\text{odv}} \gg 0 \text{ K}$$

$$T_{\text{odv}} \gg 0 \text{ K?}$$

$$T_{\text{ok}}$$

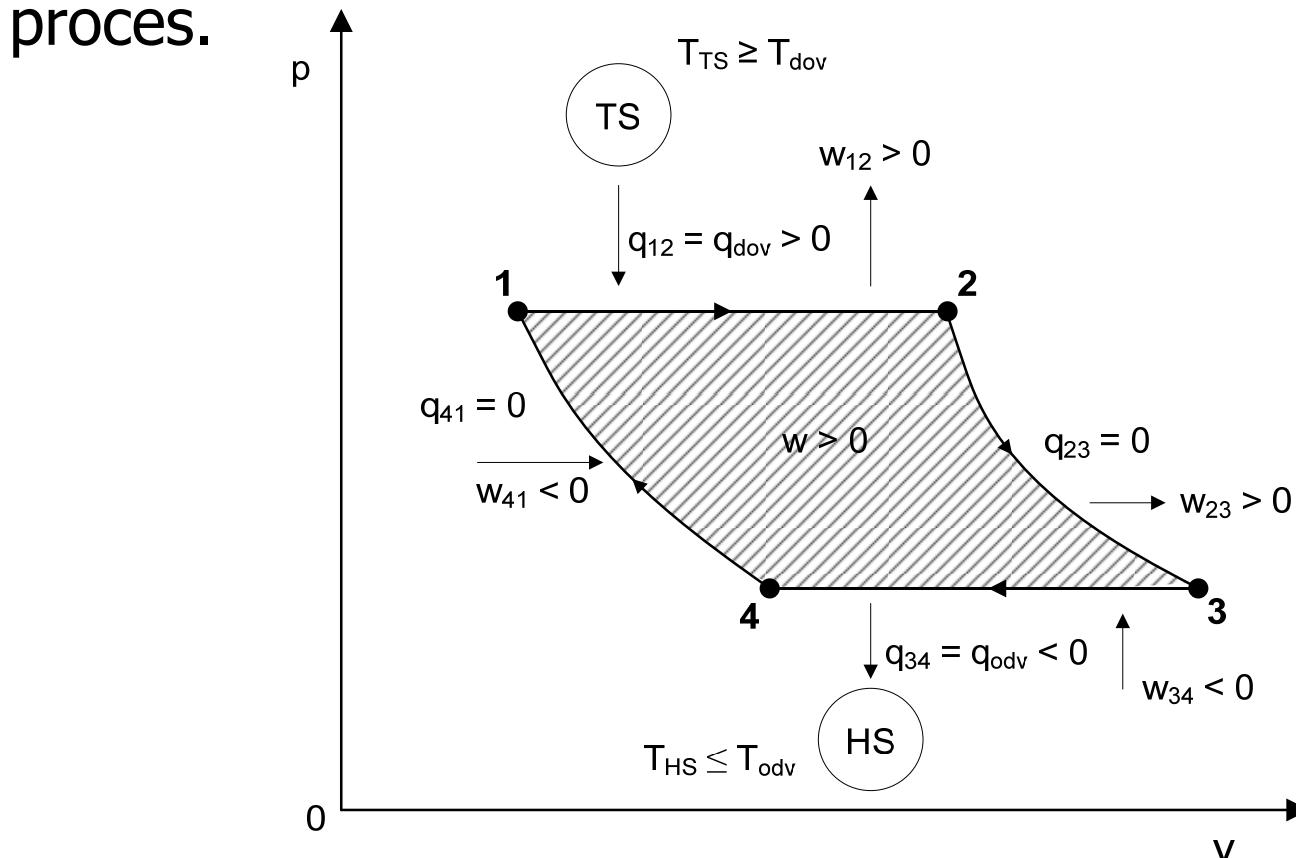
$$\eta_{\text{tCKP}} = 1?$$

$$T_{\text{dov}} = \infty$$

Zašto se Carnotov kružni proces ne provodi u tehničkoj praksi?

Jouleov (*Braytonov*) desnokretni kružni proces

- Za tehničku je praksi primjenjiv kružni proces sastavljen od dviju izobara i dviju adijabata (slika). To je proces među stalnim (konstantnim) tlakovima ili Jouelov kružni proces.



Mehanički rad i termički stupanj djelovanja

DJKP

$$W = q_{dov} - |q_{odv}| = c_p (T_2 - T_1) - c_p (T_3 - T_4) \text{ [J/kg]}$$

$$\eta_{tJKP} = \frac{w}{q_{dov}} = 1 - \frac{|q_{odv}|}{q_{dov}} = 1 - \frac{T_3 - T_4}{T_2 - T_1} = 1 - \frac{T_4}{T_1} \frac{\left(\frac{T_3}{T_4} - 1\right)}{\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)} = 1 - \frac{T_4}{T_1}$$

Za Joulov kružni proces vrijedi ovaj odnos između temperatura procesa:

$$T_1 T_3 = T_2 T_4$$

pa je razlomak $\frac{\left(\frac{T_3}{T_4} - 1\right)}{\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)}$ jednak 1.

$$\frac{T_1}{T_4} = \left(\frac{p_v}{p_n} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{p_v}{p_n} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \Rightarrow \frac{T_1}{T_4} = \frac{T_2}{T_3} \Rightarrow T_1 T_3 = T_2 T_4$$

Usporedba termičkih stupnjeva djelovanja CKP i JKP

$$T_{\max CKP} = T_{\max JKP} = T_{\max} \quad T_{\min CKP} = T_{\min JKP} = T_{\min}$$

$$T_{\max CKP} = T_{dov} \quad T_{\max JKP} = T_2$$

$$T_{\min CKP} = T_{odv} \quad T_{\min JKP} = T_4$$

$$\eta_{tCKP} = 1 - \frac{T_{odv}}{T_{dov}} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} \qquad \eta_{tJKP} = \frac{w}{q_{dov}} = 1 - \frac{T_4}{T_1} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_1}$$

$$T_1 < T_{\max JKP} = T_2$$

$$\eta_{tJKP} < \eta_{tCKP}$$

Primjene desnokretnog Jouleovog kružnog procesa

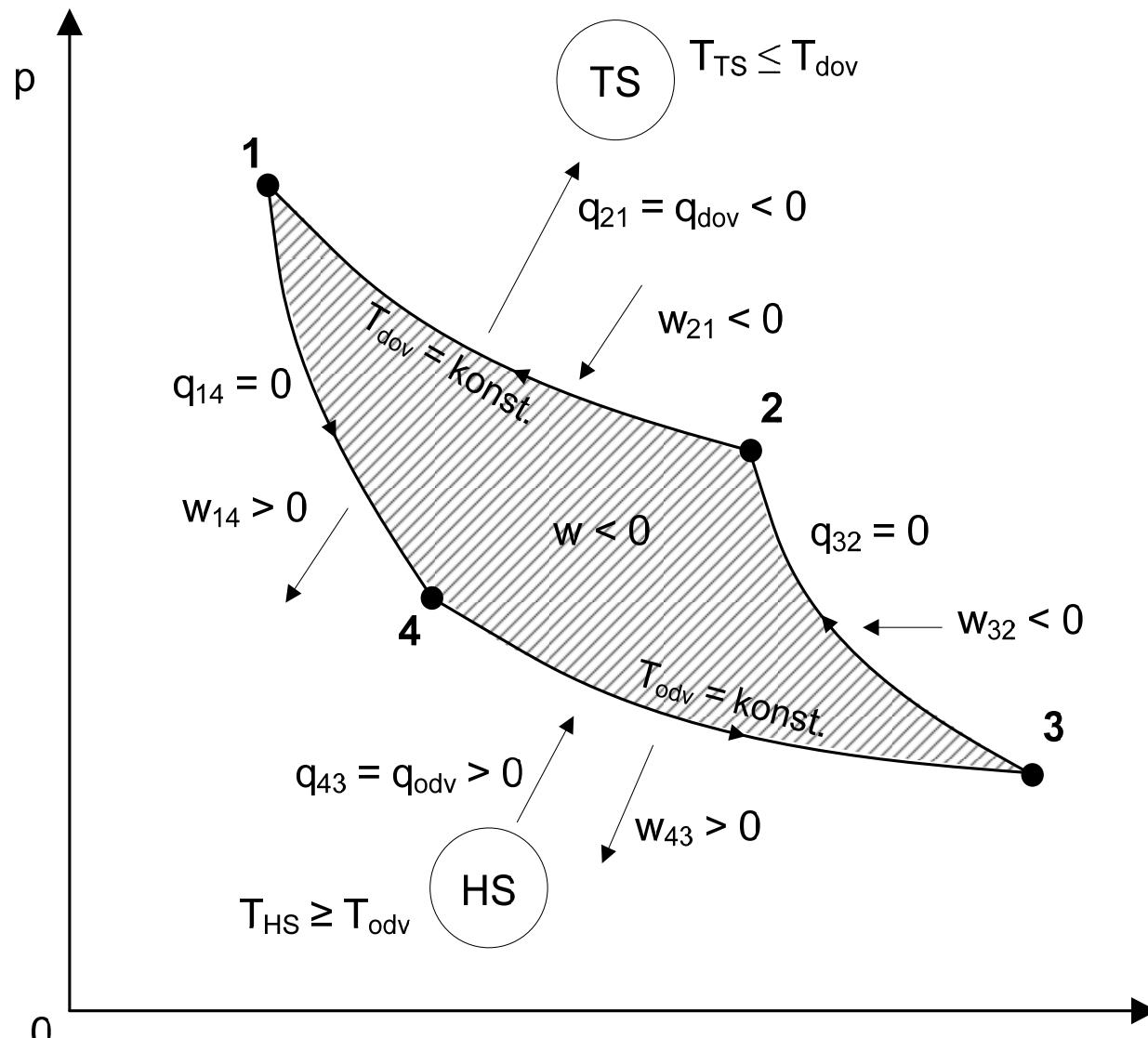
- u termoelektranama s plinskim turbinama, odnosno u termoelektranama sa spojnim procesima
- pogon reaktivnih (mlaznih) motora velikih zrakoplova

$$\vec{F} \approx -\dot{m}(\vec{c}_{izlplinova} + \vec{c}_{zrakoplova}) [N]$$

Ljevokretni kružni procesi

- svaki se desnokretni kružni proces može odvijati i kao ljevokretni
- nužan će uvjet i sada biti postojanje dvaju toplinskih spremnika
- promatrajmo realizaciju ljevokretnog Carnotovog kružnog procesa
- zadržat ćemo (namjerno) oznake i parametre tog kružnog procesa jednake onima DCKP; bit će kasnije jasno zašto

Ljevokretni Carnotov kružni proces



Mehanički je rad ljevokretnog kružnog procesa negativan

$$w = \oint pdv = - \oint vdp = q_{dov} + q_{odv} = q_{odv} - |q_{dov}| =$$

$$= RT_{odv} \ln \frac{v_3}{v_4} - RT_{dov} \ln \frac{v_2}{v_1} = R(T_{odv} - T_{dov}) \ln \frac{v_2}{v_1} \text{ [J/kg]}$$

Jer je $T_{dov} > T_{odv}$, to je $w < 0$, ali je i sada mehanički rad mehanički rad utrošen na odvijanje ljevokretnog kružnog procesa (proporcionalan) ploštini površine kružnog procesa u p,v -dijagramu.

$$T_{HS} \geq T_{odv} \quad T_{TS} \leq T_{dov}$$

Dizalice topline (toplinske pumpe)

- 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
- primjer: zimski dan s niskom temperaturom, - 20°C, temperatura vode (jezera) 2°C
- temperaturu prostorija kuće održavati na 20°C
- $T_{odv} = 275,15 \text{ K}$, a $T_{dov} = 293,15 \text{ K}$
- utrošak mehaničkog rada (električne energije) i količina toplinske energije kojom grijemo kuću u idealnom slučaju (Carnotov ljevokretni kružni proces) ?

Učinak dizalice topline

$$\frac{w}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} + q_{odv}}{q_{dov}} = \frac{T_{dov} - T_{odv}}{T_{dov}}$$

$$\frac{|q_{dov}|}{|w|} = \frac{T_{dov}}{T_{dov} - T_{odv}} = \frac{293,15}{293,15 - 275,15} \approx 16,29$$

- 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**.

Zašto iste oznake u desnokretnom i ljevokretnom kružnom procesu

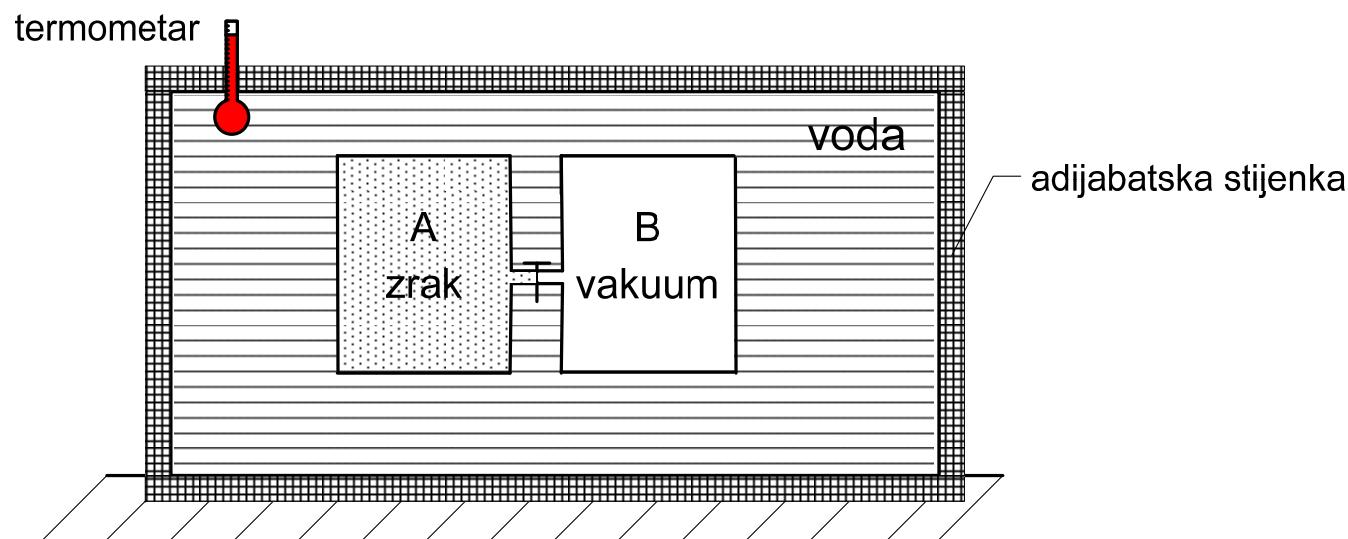
- ista relacija, $w = q_{dov} + q_{odv}$, vrijedi i za desnokretni i za ljevokretni kružni proces
(U suprotnom morali bismo rabiti dva izraza, ovisno o tome koji kružni proces analiziramo.)
- u slučaju desnokretnog kružnog procesa vrijedi: $w = q_{dov} + q_{odv} > 0$ budući da je $q_{dov} > 0$ pa je i $w > 0$, mada je $q_{odv} < 0$, jer je $q_{dov} > |q_{odv}|$
- 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 $|q_{dov}| > q_{odv}$

Ukratko

Razmatrani su energetski procesi s idealnim plinom, procesi kojima se mogu opisivati i predvidjeti odvijanja energetskih procesa u termoelektranama: izohorni, izobarni, izotermni, adijabatski i politropski proces, te desnokretni i ljevokretni kružni procesi zatvorenih i otvorenih sustava.

Pitanje

Promatramo Jouleov pokus, slika. U samom trenutku postizanja mehaničke ravnoteže, izjednačenja tlakova u spremnicima A i B, u kojem je spremniku temperatura plina viša?

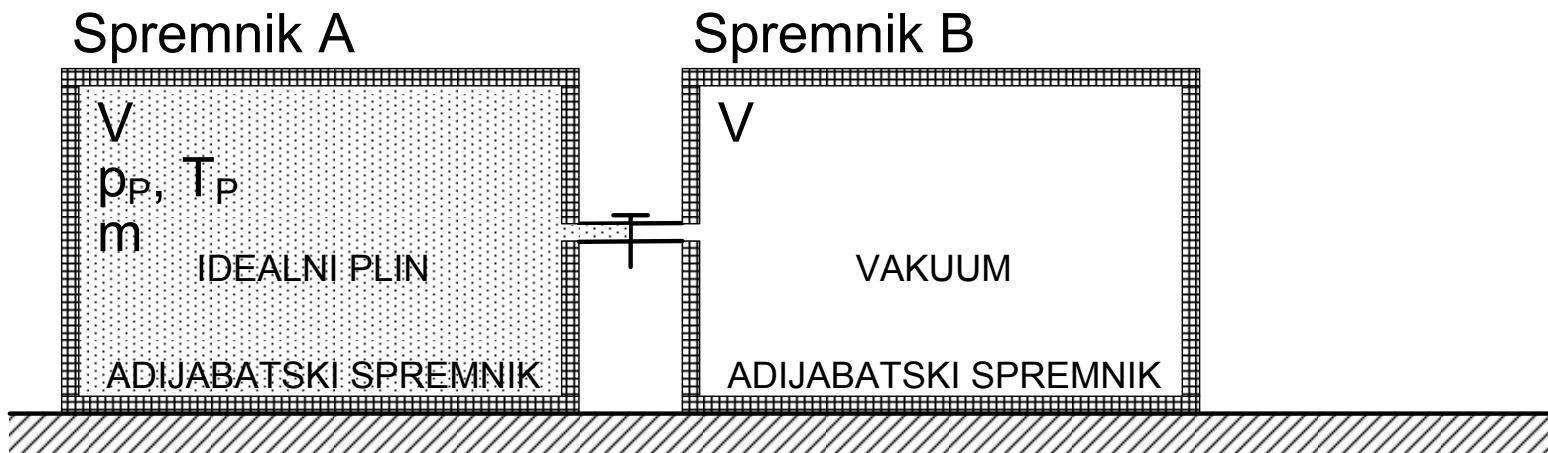


Zadatak

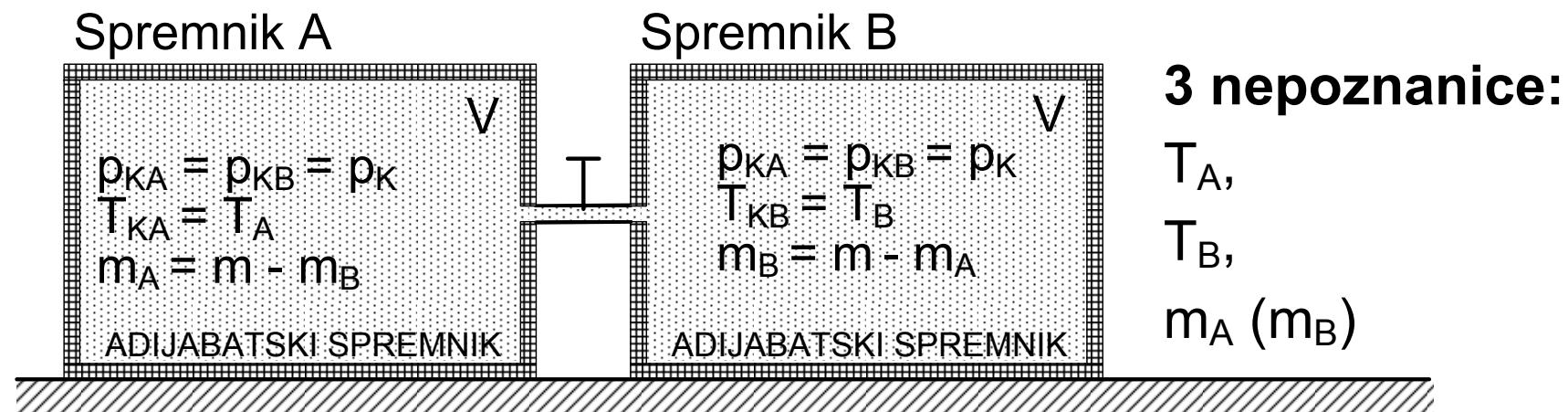
Dva kruta spremnika, A i B, svaki obujma $0,5 \text{ m}^3$, adijabatski su sustavi povezani sa cijevi zanemarivog obujma u kojoj se nalazi ventil. Početno se u spremniku A nalazi idealni plin ($c_v = 472 \text{ J/kgK}$, $\kappa = 1,4$) tlaka 10 bara i temperature 21°C , ventil je u spojnoj cijevi zatvoren, a spremnik je B zrakoprazan. Otvorimo li ventil samo do trenutka kada se tlakovi u oba spremnika izjednače, i zatim zatvorimo, kolike su konačne temperature, mase i tlakovi u spremnicima A i B? (Naglašavamo, prijelaz je toplinske energije između spremnika onemogućen.)

Zadatak

Početno stanje (1)



Konačno stanje (2)



Zadatak - rješenje

Zaključujemo, budući da su spremnici jednakih volumena, da će za postignutu mehaničku ravnotežu vrijediti:

$$p_{kA} = p_{kB} = p_k = p_p/2.$$

Dalje, budući da su spremnici konstantnog obujma, te da nema odvođenja ni dovođenja bilo mehaničkog rada bilo toplinske energije, mora vrijediti za svaki spremnik:

$$p_k = \frac{m_k R T_k}{V} = \text{konst.}$$

($m_k = \text{konst}$, $R = \text{konst}$, $V = \text{konst}$, $T_k = \text{konst}$. /adijabatski sustav/) Dakle, nepoznanice su konačne temperature u spremnicima, T_A i T_B , i masa u jednom od spremnika:
 $m_A = m - m_B$ ili $m_B = m - m_A$.

Zadatak - rješenje

Postavljamo stoga tri jednadžbe: princip očuvanja mase, 1. glavni stavak termodinamike (princip očuvanja energije) i jednadžbu stanja idealnog plina.

1) princip očuvanja mase

$$m = \frac{p_p \cdot V}{RT_p} = m_A + m_B = \frac{p_p}{2} \frac{V}{RT_A} + \frac{p_p}{2} \frac{V}{RT_B} \quad (1)$$

Zadatak - rješenje

2) 1. glavni stavak termodinamike

Promatramo li oba spremnika kao jedinstveni zatvoreni sustav vrijedi:

$$Q_{12} = U_2 - U_1 + W_{12}; \quad Q_{12} = 0, \quad W_{12} = 0, \quad U_2 = U_1$$

Ukupni se sadržaj unutrašnje kaloričke energije (UKE) stanja 1 i 2 sastoji od UKE spremnika A i B u oba stanja:

$$U_1 = U_{1A} + U_{1B} = U_{1A} \quad (U_{1B} = 0), \quad \text{a} \quad U_2 = U_{2A} + U_{2B}$$

Zadatak - rješenje

S 1 označeno je početno stanje, stanje prije otvaranja ventila, a s 2 stanje nakon zatvaranja ventila, stanja kad su se tlakovi u spremnicima izjednačili:

$$U_1 = U_2 = mc_v T_p = m_A c_v T_A + m_B c_v T_B /:c_v$$

$$mT_p = m_A T_A + m_B T_B \quad (2)$$

Jer je konačni tlak u oba spremnika jednak:

Zadatak - rješenje

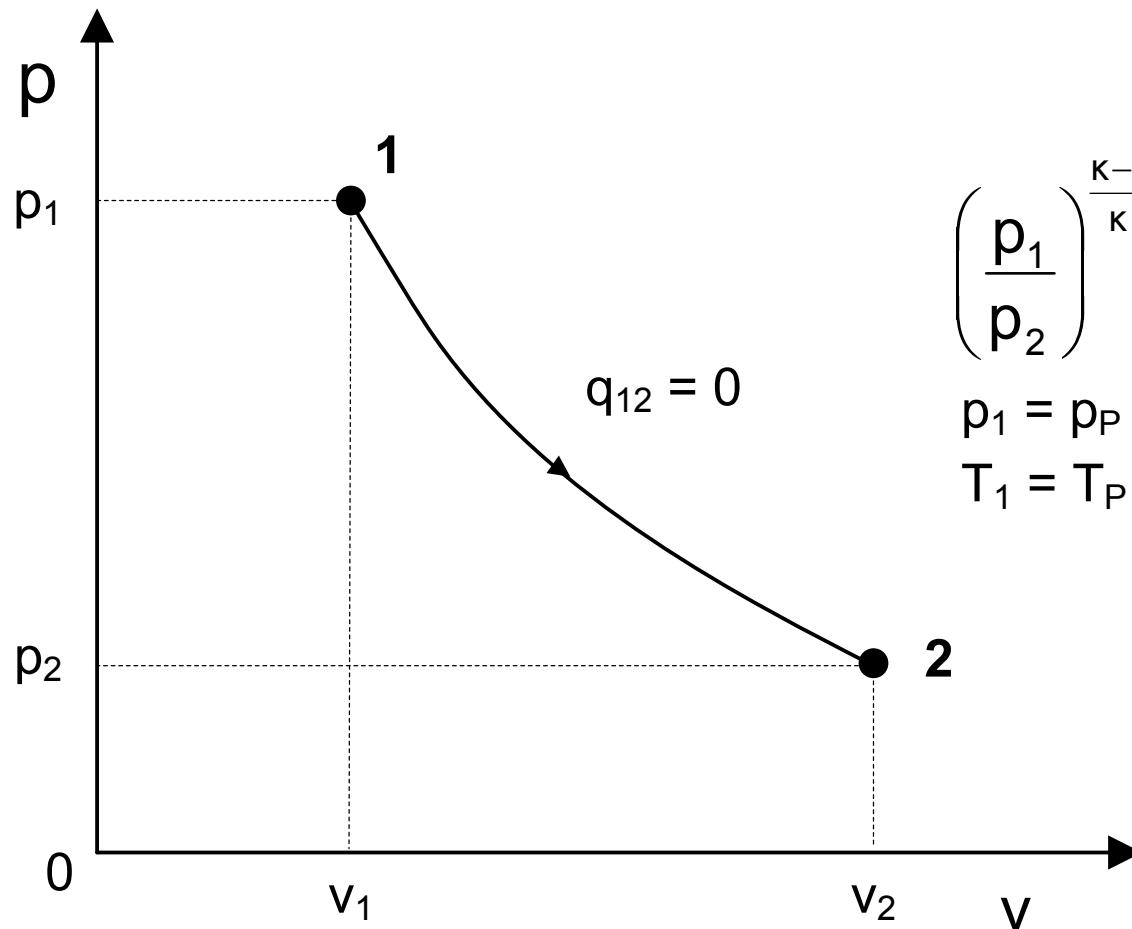
$$p_k = \frac{p_p}{2} = \frac{m_A R T_A}{V} = \frac{m_B R T_B}{V} \Rightarrow$$

$$m_A T_A = m_B T_B \rightarrow (2) \Rightarrow m_A T_A = m_B T_B = \frac{m T_p}{2} (3)$$

3) Jednadžba stanja idealnog plina

Za sustav odabiremo količinu plina u spremniku A koja ne će preći u spremnik B. Taj je dio plina, za razliku od dijela što ustrujava u spremnik B, u ravnotežnom stanju pa ekspanziju tog dijela plina možemo opisati adijabatskim (izentropskim) procesom, slika.

Zadatak - rješenje



$$\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$p_1 = p_P ; p_2 = 0,5 p_P$$
$$T_1 = T_P ; T_2 = T_A$$

$$T_A = \frac{T_p}{2^{\frac{1,4}{0,4}}} = 241,3K \quad /Tp = (273,15 + 21)K/$$

Zadatak - rješenje

Dalje je (konačno stanje u spremniku A):

$$\frac{p_p}{2} \cdot V = m_A R T_A \Rightarrow m_A = \frac{500000 \cdot 0,5}{188,8 \cdot 241,3} = 5,51 \text{ kg}$$

$$(R = c_v(\kappa-1) = 188,8 \text{ J/kgK})$$

Iz (1):

$$m_B = m - m_A = \frac{1000000 \cdot 0,5}{188,8 \cdot 294,15} - 5,51 = 3,49 \text{ kg}$$

Iz (3):

$$T_B = \frac{m_A T_A}{m_B} = 380,96 \text{ K}$$

Zadatak - rješenje

Dakle je temperatura plina u početno zrakopraznom spremniku viša od temperature u spremniku A.

Fizikalno to je jasno budući da je u plinu koji istrujava iz spremnika A pohranjena entalpija ($h = u + pv = c_p T$) i ona se u spremniku B pretvara u unutrašnju kaloričku energiju ($u = c_v T$):

$$h = u, c_p T = c_v T'; T' = \frac{c_p}{c_v} T \rightarrow \frac{c_p}{c_v} > 1 \Rightarrow T' > T.$$

Primjeri

Idealni plin, $R = 287 \text{ J/kgK}$, temperature 300 K , nalazi se u cilindru sa stapom pomičnim bez trenja. Plinu se posredstvom okretanja lopatice, kod konstantnog tlaka, 5 bara, doveo rad trenja u iznosu od 75 kJ/kg . Temperatura se plina pritom nije promijenila, ali volumen se plina udvostručio. Odredite toplinsku energiju u kJ/kg koja je za vrijeme procesa odvedena u okolicu.

Rj.

$$q_{12} = \delta u + \int_{v_1}^{v_2} pdv - |w_{RT12}|$$

$$\delta u = c_v \delta T = 0 \Leftrightarrow T = \text{konst.}$$

Primjeri

Odvedena toplinska energija q_{12} :

$$\int_{v_1}^{v_2} pdv = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = 0,287 \frac{kJ}{kgK} \cdot 300K \cdot \ln 2 = \\ = 59,69 \frac{kJ}{kg}$$

$$q_{12} = 59,69 \frac{kJ}{kg} - 75 \frac{kJ}{kg} = -15,31 \frac{kJ}{kg} = q_{odv}$$

Primjeri

Odredite koliki se dio toplinske energije dovedene u proces izobarne ekspanzije idealnog plina ($\kappa = 1,4$) pretvara u mehanički rad promjene volumena, a koliki u unutrašnju kaloričku energiju.

Rj. $dq = du + pdv / : dq$

$$1 = \frac{du}{dq} + \frac{pdv}{dq}$$

$$\frac{pdv}{dq} = 1 - \frac{du}{dq} = 1 - \frac{c_v dT}{c_p dT} =$$

$$= 1 - \frac{1}{\kappa} = 1 - \frac{1}{1,4} = 0,285 \Rightarrow$$

Primjeri

$$pdv = 0,285 \cdot dq;$$

$$du = (1-0,285) \cdot dq = 0,715 \cdot dq$$

Dakle se u ovom slučaju, dvoatomni idealni plin ($\kappa = 1,4$), 28,5% dovedene toplinske energije u izobarnom procesu pretvara u mehanički rad promjene volumena, a ostalih, 71,5% u unutrašnju kaloričku energiju plina.

Primjeri

Jedan je od važnijih dijelova postupka nekih tehnoloških procesa miješanje fluida (plinova ili kapljevina). Promatrajte idealni plin, R = 287 J/kgK, κ= 1,4, pod tlakom 50 bara, temperature 300 K i volumena 0,5 m³ koji se nalazi u cilindru sa stupom pomičnim bez trenja. Za vrijeme cjelogupnog procesa miješanja plinu je doveden rad trenja iznosa 30 MJ. Kolika je temperatura plina na kraju procesa miješanja, ukoliko se tlak ne mijenja za vrijeme procesa, a cilindar je savršeno toplinski izoliran?

Rj.

$$Q_{12} = \delta U + \int_{V_1}^{V_2} pdV - |W_{RT12}|; \quad Q_{12} = 0$$

$$m = \frac{p_1 V_1}{R T_1} = \frac{50 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} \cdot 0,5 m^3}{287 \frac{J}{kgK} \cdot 300 K} = 29 kg$$

Primjeri

- konačna temperatura

$$\int_{V_1}^{V_2} pdV = p_1(V_2 - V_1) = mR(T_2 - T_1)$$

$$-mR(T_2 - T_1) + W_{RT12} = \delta U = mc_v(T_2 - T_1) \Rightarrow T_2$$

$$T_2 = T_1 + \frac{W_{RT12}}{mc_p}$$

$$(c_v + R = c_p)$$

$$c_p = \frac{\kappa \cdot R}{\kappa - 1} = 1004,5 \frac{J}{kgK}$$

$$T_2 = 300K + \frac{30 \cdot 10^6 J}{29kg \cdot 1004,5 \frac{J}{kgK}} = 1329,85K.$$

Primjeri

1kg idealnog plina ($R = 287 \text{ J/kgK}$, $\kappa = 1,4$) politropski se komprimira, od tlaka 1 bar i temperature 300 K, na tlak 10 bara i 450 K. Odredite uloženi mehanički rad promjene volumena, izmijenjenu toplinu, konačni volumen plina i eksponent politropskog procesa.

Rj.

Primjeri

- eksponent politropske kompresije

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \Rightarrow \frac{n-1}{n} = \frac{\ln \frac{T_2}{T_1}}{\ln \frac{p_2}{p_1}} =$$

$$= \frac{\ln \frac{450K}{300K}}{\ln \frac{10bar}{1bar}} = 0,176 \Rightarrow n = 1,2$$

Primjeri

- uloženi meh. rad i izmijenjena top. energija

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{287 \cdot 450}{10 \cdot 10^5} = 0,129 \frac{m^3}{kg}$$

$$\begin{aligned} w_{12} &= \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = \\ &= \frac{287}{1,2-1} (300 - 450) = -215.250 \frac{J}{kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{12} &= c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} (T_2 - T_1) = \frac{R}{\kappa - 1} \cdot \frac{n - \kappa}{n - 1} (T_2 - T_1) = \\ &= \frac{287}{1,4-1} \cdot \frac{1,2-1,4}{1,2-1} \cdot 150 = -107.625 \frac{J}{kg}. \end{aligned}$$

Primjeri

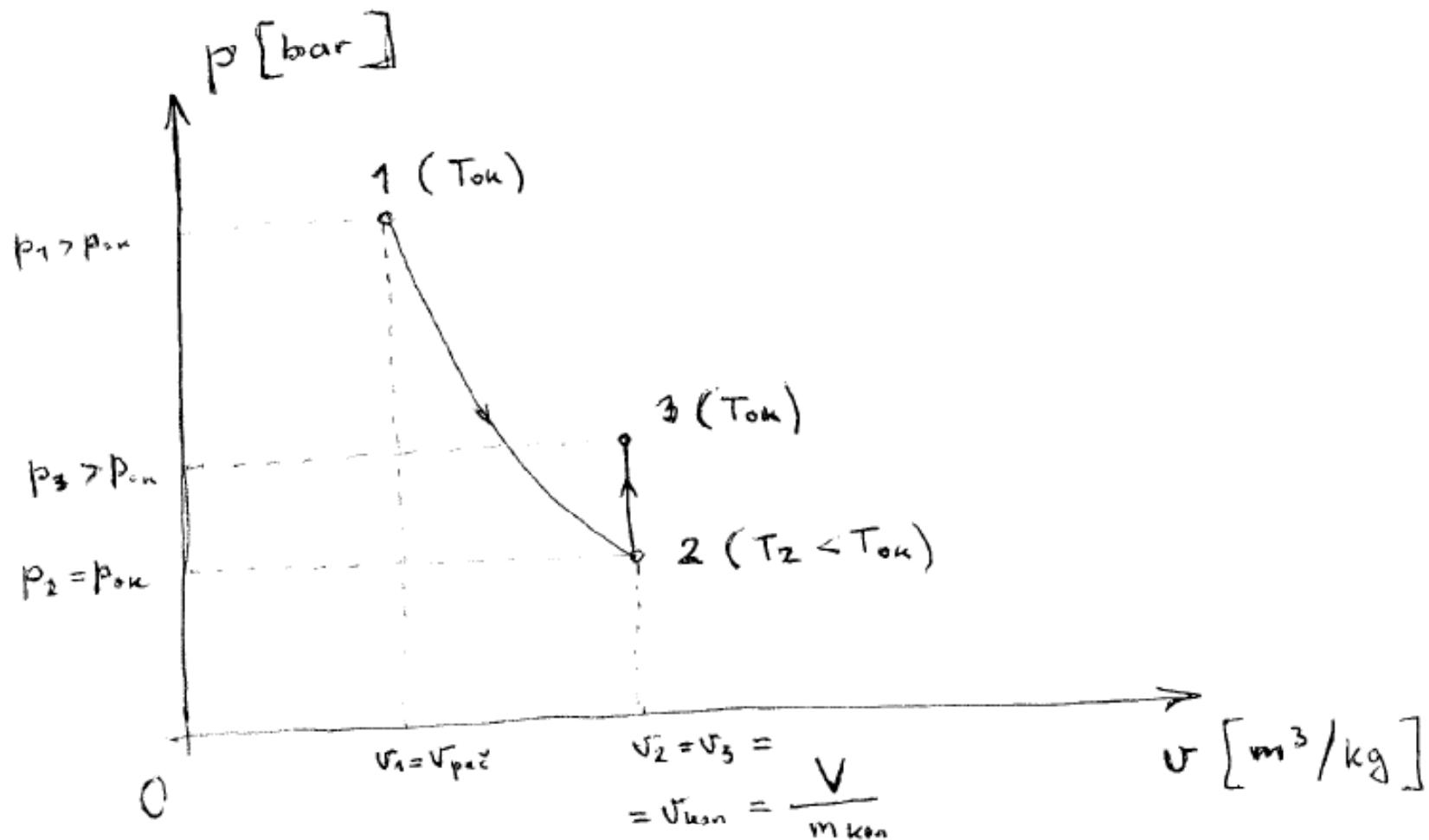
Temperatura je idealnog plina u spremniku krutih stijenki obujma $V[m^3]$ jednaka temperaturi okolice, $T_{ok}[K]$, a tlak $p_1[bar]$. Otvaranjem ventila idealni plin velikom brzinom struji iz spremnika u okolicu. U trenutku izjednačenja tlaka u spremniku s tlakom okolice zatvara se ventil, a preostali idealni plin u spremniku zagrijava na temperaturu okolice postižući iznos tlaka $p_3[bar]$. Koliki je κ zraka? Poznate su vrijednosti tlaka i temperature okolice i tlakova p_1 i p_3 .

Primjeri

Rj.

Količinu idealnog plina koja ostaje u spremniku smatramo sustavom. Ta je količina podvrgnuta adijabatskom procesu ekspanzije za vrijeme istrujavanja plina iz spremnika, pa će se za vrijeme takvog procesa ohladiti na temperaturu nižu od temperature okolice, slika. Prijelazom toplinske energije iz okolice u spremnik (radi se o izohornom procesu) idealni će se plin u spremniku zagrijati na temperaturu okolice, a njegov će tlak porasti na iznos $p_3[\text{bar}] > p_{\text{ok}}[\text{bar}]$.

Primjeri



Primjeri

Za adijabatski proces između stanja 1 i 2 vrijedi

$$\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_{ok}}{T_2}$$

a za izohorni između stanja 2 i 3

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{p_2} = \frac{T_{ok}}{T_2} = \frac{P_3}{P_{ok}}$$

Primjeri

pa dobivamo

$$\left(\frac{p_1}{p_{ok}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{p_3}{p_{ok}}$$

$$\kappa = \frac{\ln \frac{p_1}{p_{ok}}}{\ln \frac{p_1}{p_3}}$$

Primjeri

Kružni se proces motora odvija s idealnim plinom ($R = 287 \text{ J/kgK}$, $\kappa = 1,4$) ovako:

1. plin se adijabatski komprimira s tlaka 1 bar i temperature 20°C na tlak 30 bara;
2. izobarno ekspandira na dvostruki volumen;
3. izotermno ekspandira na početni volumen;
4. izohorno se hlađi do početnog stanja.

Odredite rad kružnog procesa i izmjenjenu toplinsku energiju u J/kg , i termički stupanj djelovanja.

Koliki bi bio termički stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa koji bi se odvijao između toplinskih spremnika iste temperaturne razlike?

Primjeri

Rj.

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 293,15}{10^5} = 0,84 \frac{m^3}{kg}$$

$$v_1 = v_4$$

$$v_2 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\kappa}} = 0,84 \left(\frac{1}{30} \right)^{0,7} = 0,078 \frac{m^3}{kg}$$

$$v_3 = 2v_2 = 0,156 \frac{m^3}{kg}$$

Primjeri

Rj.

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 293,15 \left(\frac{30}{1} \right)^{0,286} = 775,44K$$

$$T_3 = T_2 \frac{v_3}{v_2} = 775,44 \cdot 2 = 1550,9K$$

$$p_4 = \frac{p_3 v_3}{v_4} = 5,57 bar$$

Primjeri

Rj.

$$w_{12} = c_v(T_1 - T_2) = \frac{R}{\kappa - 1}(293,15 - 775,44) =$$

$$= \frac{287}{1,4 - 1}(293,15 - 775,44) = -346.043,1 \frac{J}{kg}$$

$$w_{23} = p_2(v_3 - v_2) = 30 \cdot 10^5(0,156 - 0,078) =$$

$$= 234.000 \frac{J}{kg}$$

Primjeri

Rj.

$$w_{34} = p_3 v_3 \ln \frac{p_3}{p_4} = 30 \cdot 10^5 \cdot 0,156 \ln \frac{30}{5,57} =$$

$$= 788.019,49 \frac{J}{kg}$$

$$w_{KP} = 788.019,49 + 234.000 - 364.043,1 =$$

$$= 657.976,39 \frac{J}{kg}$$

Primjeri

Rj.

$$q_{dov} = q_{23} + q_{34}$$

$$\begin{aligned} q_{23} &= c_p(T_3 - T_2) = \frac{\kappa R}{\kappa - 1}(T_3 - T_2) = \\ &= \frac{1,4 \cdot 287}{1,4 - 1}(1550,9 - 775,44) = 778.949,57 \frac{J}{kg} \end{aligned}$$

$$q_{34} = w_{34} = 788.019,49 \frac{J}{kg}$$

$$q_{dov} = 1.566.969,06 \frac{J}{kg}$$

$$\eta_t = \frac{w_{KP}}{q_{dov}} = \frac{657.976,39}{1.566.969,06} = 0,42$$

$$\eta_{tCKP} = 1 - \frac{293,15}{1550,9} = 0,81.$$

Što treba znati (naučiti) – 05 Energetski procesi s idealnim plinom (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- adijabata
- adijabatski proces
- adijabatski specifični toplinski kapacitet
- Carnotov (desnokretni) kružni proces
- desnokretni kružni proces
- dizalica toplina (toplinska pumpa)
- eksergijski (eksergetski) stupanj djelovanja
- faktor preobrazbe
- h,s-dijagram
- izobara
- izobarni proces
- izohora

Što treba znati (naučiti) – 05 Energetski procesi s idealnim plinom (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- izohorni proces
- izoterna
- izotermni proces
- jednadžba $pv^n = \text{konst.} [\text{J/kg}]$
- Jouleov kružni proces
- kružni proces
- kružni proces otvorenih sustava
- kružni procesi zatvorenih sustav
- ljevokretni kružni procesi
- ljevokretni Carnotov kružni proces
- mehanički rad (tehnički rad) desnokretnog kružnog procesa otvorenog sustava

Što treba znati (naučiti) – 05 Energetski procesi s idealnim plinom (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- mehanički rad kružnog procesa
- mehanički rad kružnog procesa sa zatvorenim sustavom
- odnos između specifičnih volumena Carnotovog kružnog procesa
- odnos između temperatura Jouelovog kružnog procesa
- ogrjevni spremnik ili izvor topline
- p,v-dijagram
- politropa
- politropski proces
- politropski specifični toplinski kapacitet
- rad Carnotovog desnokretnog kružnog procesa
- rad Jouelovog desnokretnog kružnog procesa

Što treba znati (naučiti) – 05 Energetski procesi s idealnim plinom (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- rashladni spremnik ili ponor topline
- rashladni stroj (hladnjak)
- T,s-dijagram
- termički (energetski) stupanj djelovanja
- termički stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa
- termički stupanj djelovanja desnokretnog Jouelovog kružnog procesa
- toplinski spremnici
- toplinski stroj
- veličina **n**

Energijeske tehnologije

**Ograničenja pretvorbama i pretvorbe oblika energije
u eksjeriju (mehanički rad)**

Vladimir Mikuličić, Davor Grgić, Zdenko Šimić, Marko Delimar
FER, 2013.



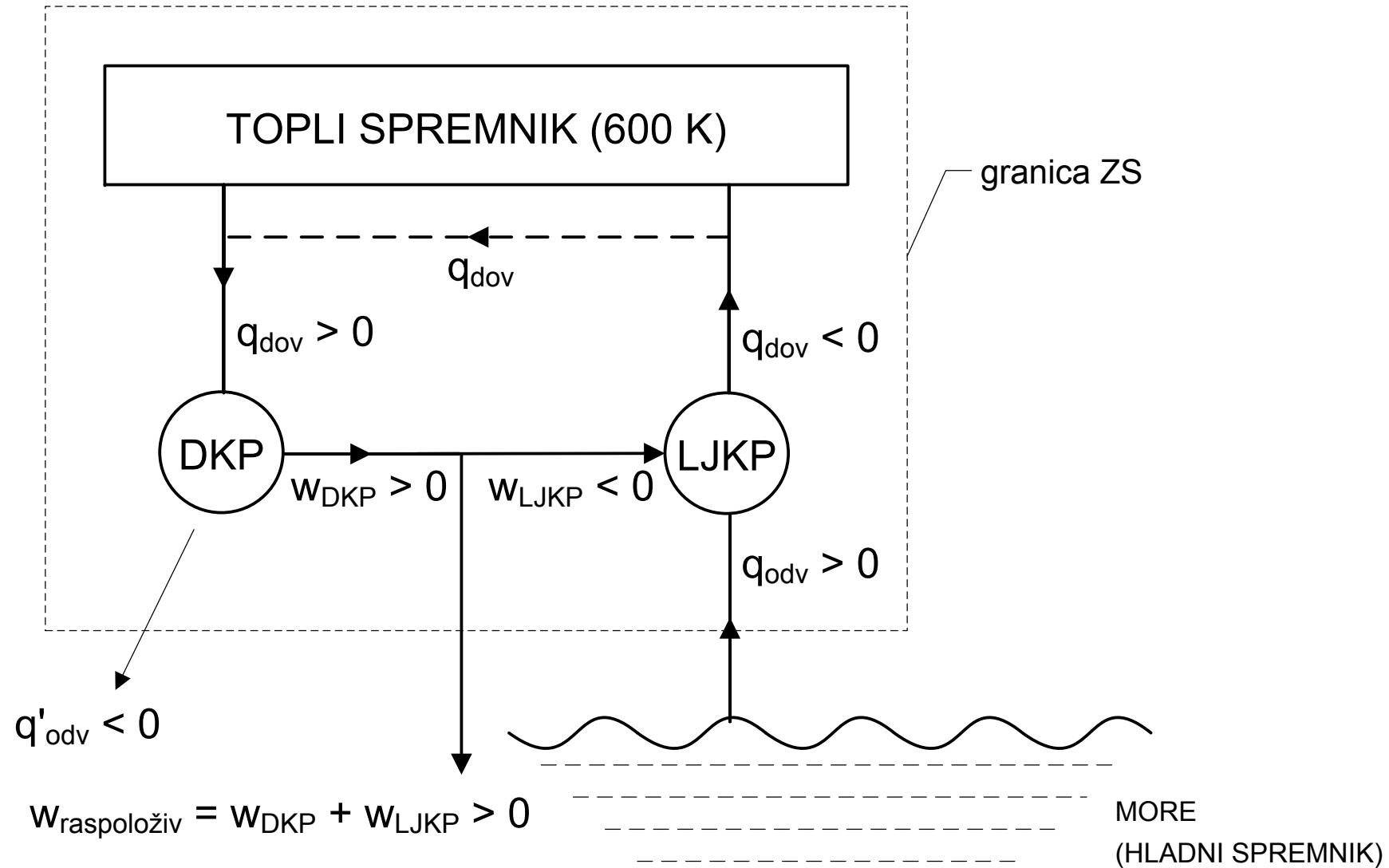
Teme:

1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
- 4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama**
5. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
6. Geotermalna energija
7. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
8. Potrošnja električne energije
9. Prijenos i distribucija el. en.
10. Energija Sunca
11. Energija vjetra
12. Energija biomase, Gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
13. Skladištenje energije
14. Energija, okoliš i održivi razvoj

Sadržaj

- O mogućnostima pretvorbi oblika energije u mehanički rad (eksergiju)
- Drugi glavni stavak termodinamike
- Entropija i drugi glavni stavak termodinamike
- Entropija i nepovratljivost
- Promjena entropije sustava (idealnog plina, kapljevine i krutine)
- T,s – dijagrami procesa s idealnim plinom
- Usporedba termičkih stupnjeva djelovanja
- Određivanje eksergije i anergije
- Eksergija toplinske energije (unutrašnje energije)
- Eksergija unutrašnje kaloričke energije (zatvorenog sustava)
- Eksergija entalpije (otvorenog sustava)
- Određivanje eksergije pomoću h,s - dijagrama
- Eksergija plina
- Eksergija vodene pare
- Ukratko
- Primjeri
- Što treba znati (naučiti)

Perpetuum mobile druge vrste



Mehanički rad zajedničkog rada kružnih procesa: ljevokretnog i desnokretnog

$$W_{LJKP} = q_{dov} + q_{odv} < 0$$

$$W_{DKP} = q_{dov} > 0$$

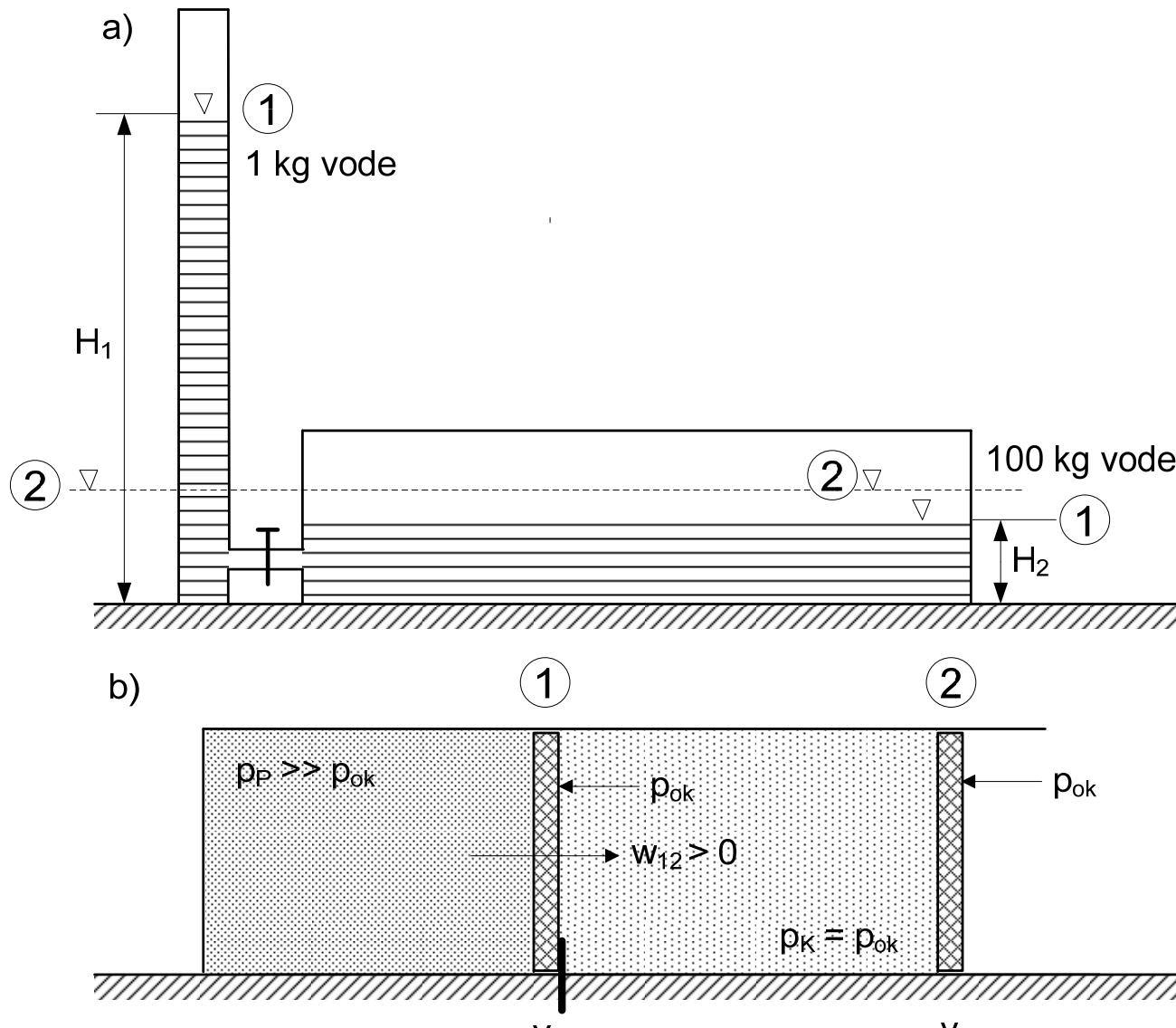
$$W_{raspoloživ} = W_{DKP} + W_{LJKP} = q_{odv} > 0.$$

$$q_{odv} > |q'_{odv}|$$

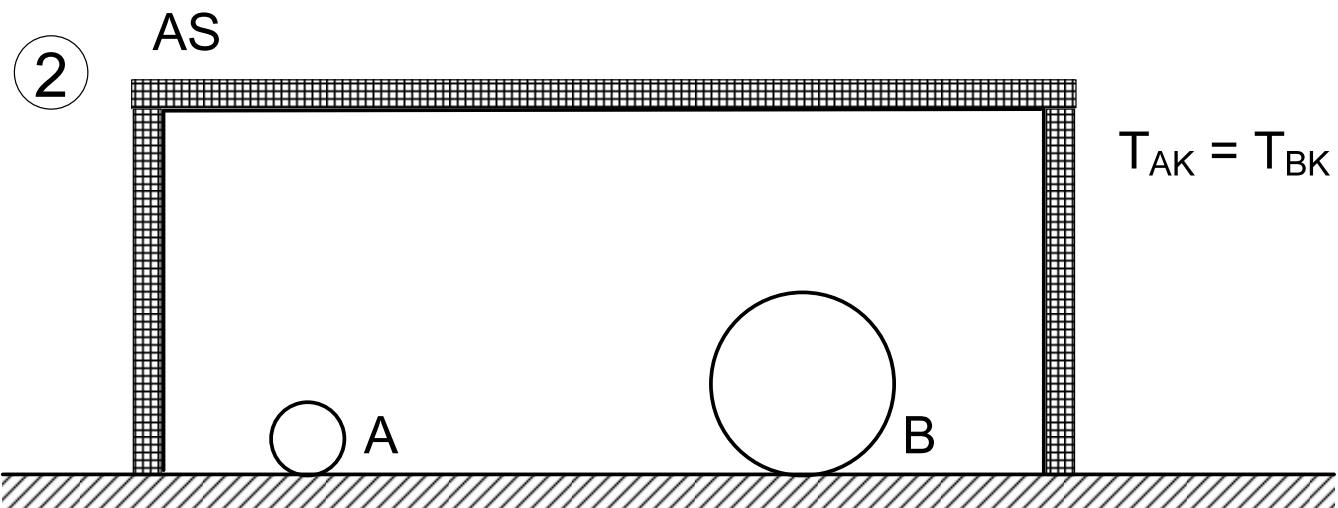
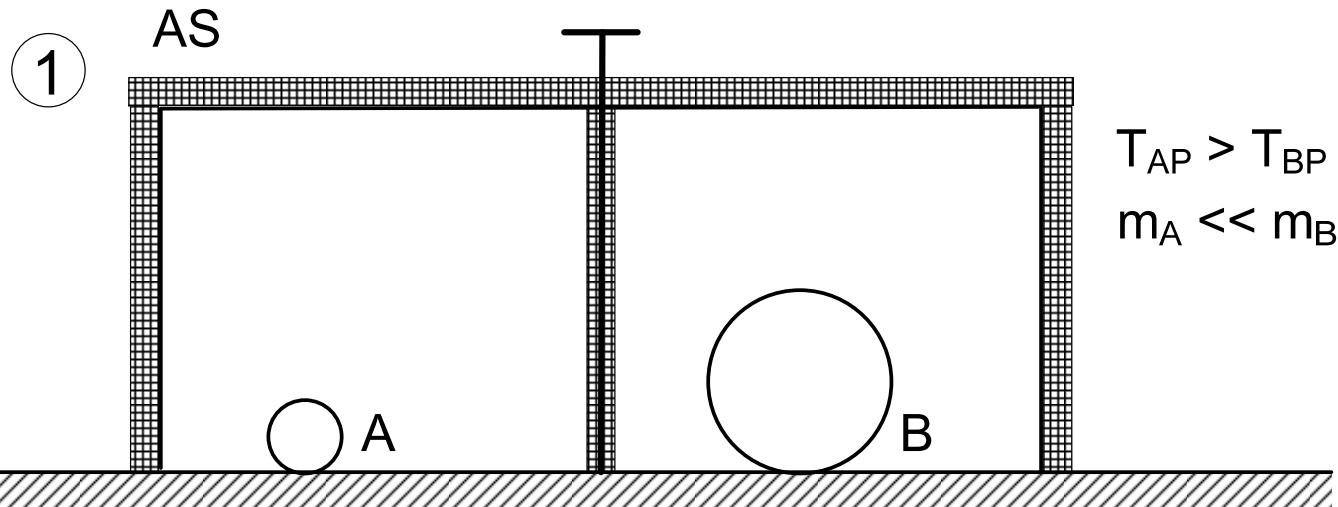
$$W_{LJKP} = q_{dov} + q_{odv} \quad W_{DKP} = q_{dov} + q'_{odv}$$

$$W_{raspoloživ} = W_{DKP} + W_{LJKP} = q_{odv} + q'_{odv} = q_{odv} - |q'_{odv}| > 0$$

O mogućnostima pretvorbi oblika energije u mehanički rad (eksergiju) – što će se dogoditi?



O mogućnostima pretvorbi oblika energije u mehanički rad (eksergiju) – što će se dogoditi?



Što je zajedničko opisanim procesima (događanjima)?

Početno nejednolika raspodjela gustoće akumulirane energije, zatim spontani (samonikli, samopotičajni, samopokretački, samoodržavajući) proces promjene nejednolike raspodjele gustoće energije u jednoliku.

Očito, radi se o nejednolikoj raspodjeli **gustoće** oblika energije a ne o **ukupnim količinama** energije:

$$m_{\text{lijeva}} \cdot g \cdot \frac{H_1}{2} = 1 \text{ kg} \cdot g \cdot \frac{H_1}{2} < m_{\text{desna}} \cdot g \cdot \frac{H_2}{2} = 100 \text{ kg} \cdot g \cdot \frac{H_2}{2}$$

$$g \cdot \frac{H_1}{2} > g \cdot \frac{H_2}{2}$$

Nepovratljivi procesi izjednačavanja

Procesi su izjednačavanja gustoća energije, čini se, jednosmjerni: nepovratljivi su.

Što to znači?

... trajna i zabilježiva promjena u sustavu ili okolici, odnosno i u sustavu i okolici

Procesi su uspostavljanja jednolike raspodjele gustoće energije, a to su zapravo jedini procesi što se odvijaju u našem makroskopskom svijetu, nepovratljivi procesi: procesi koji uzrokuju smanjivanje raspoloživih količina eksergije

Zašto se odvijaju nepovratljivi procesi?

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?

Formulacija se

**„spontana promjena
nejednolike u jednoliku raspodjelu gustoće
energije“ naziva drugim glavnim stavkom
termodinamike.**

Drugi glavni stavak termodinamike

- „kako to da postoji problem opskrbe energijom ako je energija nestvoriva i neuništiva (oduvijek je bila „tu“ i uvijek će biti)?
- je li 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 moguće unutrašnju kaloričku energiju akumulirana u okolini (u podsustavima okoline: zraku vodi i tlu) pretvoriti u mehanički rad?
- ...

Drugi glavni stavak termodinamike – izvorne formulacije

- 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

„Toplina ne može sama od sebe prijeći od hladnijeg tijela na toplige, i to ni neposredno ni posredno.“

„Nije moguće izgraditi periodički stroj koji ne bi proizvodio ništa drugo do dizanja nekog tereta (mehanički rad) uz odgovarajuće ohlađivanje jednog toplinskog spremnika“. („perpetuum mobile druge vrste“)

Drugi glavni stavak termodinamike

S obzirom na vladanje eksergije i anergije u povratljivim i nepovratljivim procesima vrijedi sljedeće:

- **u svim se nepovratljivim (nepovratnim) procesima pretvara eksergija u anergiju** (to bi ujedno mogla biti definicija nepovratljivih procesa: procesi u kojima se eksergija pretvara u anergiju)
- **samo u povratljivim (povratnim) procesima ostaje eksergija konstantna** (moguća definicija povratljivih procesa: procesi u kojima se eksergija ne pretvara u anergiju)
- **nemoguće je anergiju pretvoriti u eksergiju; proces u kojem bi se anergija pretvarala u eksergiju je nemoguć**

Entropija, veličina stanja - nedvosmisleno određivanje vrste procesa

$$ds = \frac{dq}{T} + \frac{d}{T}(\text{anergija nastala u nepovratljivim procesima}) = \\ = \frac{dq}{T} + ds_{\text{proizvedena}} \text{ [J/kgK]} \quad dS = \frac{dQ}{T} + dS_{\text{proizvedena}} \text{ [J/K]}$$

$$ds_{AS} = \frac{dq}{T} + \frac{|dw_{\text{trenja}}|}{T} > 0 \quad \text{Zašto?}$$

$$ds_{pov} = \frac{dq_{\text{povratljivo}}}{T} \equiv \left(\frac{dq}{T} \right)_{\text{povratljivo}} \quad ds = \frac{dq}{T}$$

$$ds_{AS} = 0$$

Promjena entropije, povratljivost i nepovratljivost

$$dq = Tds = du + pdv; dq = Tds = dh - vdp \Rightarrow$$

$$\int_1^2 Tds = u_2 - u_1 + \int_1^2 pdv = h_2 - h_1 - \int_1^2 vdp$$

Budući da za zatvoreni sustav prema prvom glavnom stavku vrijedi

$$q_{12} + |w_{RT12}| = u_2 - u_1 + \int_1^2 pdv$$

a za otvoreni sustav

$$q_{12} + |w_{RT12}| = h_2 - h_1 - \int_1^2 vdp,$$

zaključujemo da i za zatvoreni i otvoreni proces vrijedi da je

$$q_{12} + |w_{RT12}| = \int_1^2 Tds$$

Promjena entropije, povratljivost i nepovratljivost

Napišemo li tu jednadžbu u diferencijalnom obliku i podijelimo s T, dobivamo izraz

$$ds = \frac{dq}{T} + \frac{|dw_{RT}|}{T}$$

Budući da je rad je trenja uvijek negativan, može se samo dovoditi u sustav, uzimamo stoga njegovu absolutnu vrijednost.

Rad trenja, naime, povećava entropiju sustava jer se, nakon pretvorbe u unutrašnju kaloričku energiju, u obliku toplinske energije dovodi sustavu.

Promjena entropije, povratljivost i nepovratljivost

- ostaje li entropija AS konstantna ($ds_{AS} = 0$), za vrijeme energetskih procesa, u adijabatskom sustavu odvijaju povratljivi procesi: sva eksergija ostaje sačuvana, ništa se eksergije ne pretvara u anergiju
- raste li entropija AS ($ds_{AS} > 0$), radi se o nepovratljivim 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 eksergiju (perpetuum mobile druge vrste)

Još neke formulacije ...

- Clausiusova nejednakost, princip rasta entropije

$$\oint \frac{dq}{T} < 0 \quad ds = \frac{dq}{T} + \frac{|dw_{RT}|}{T}$$

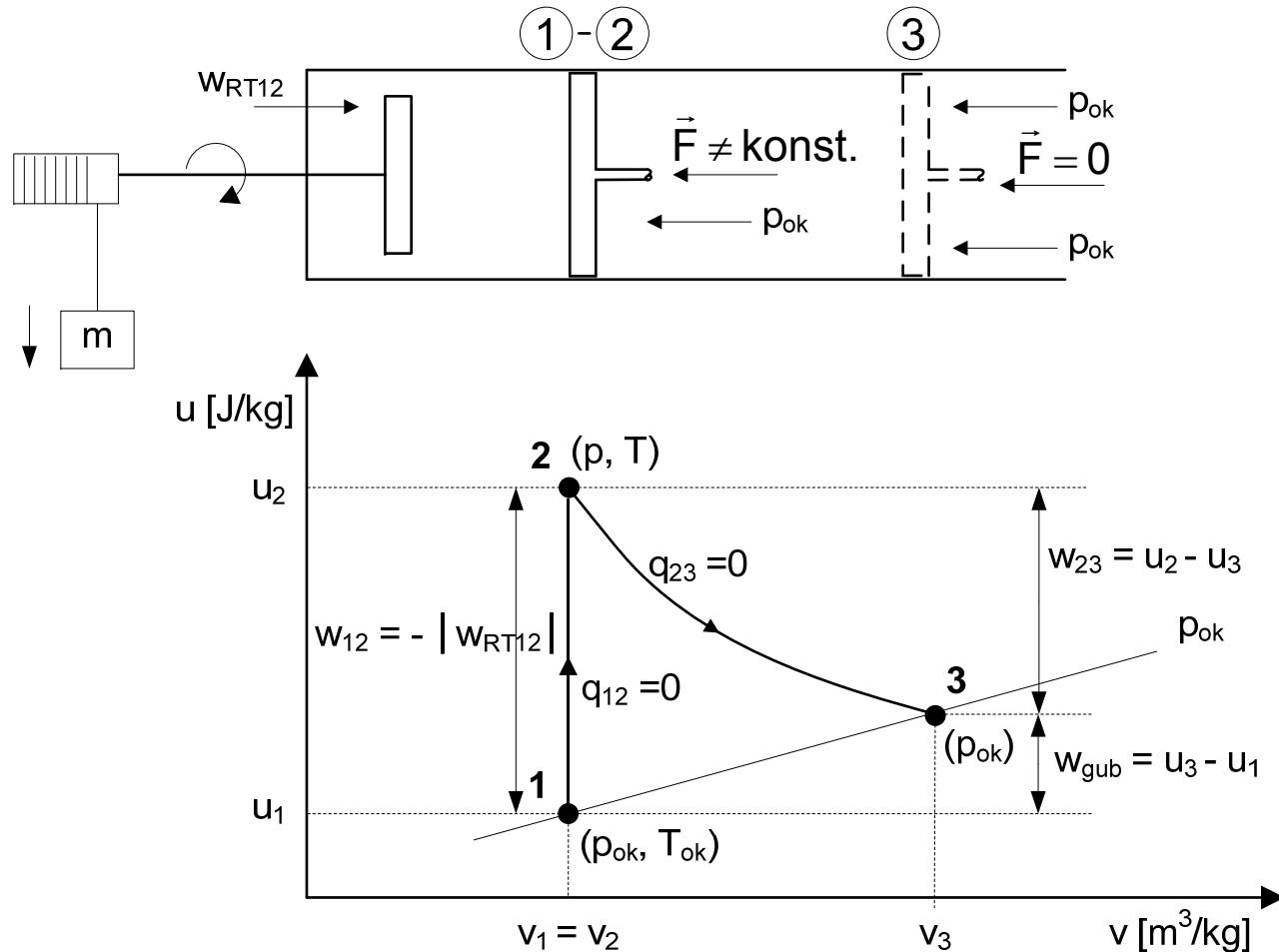
$$\oint ds = 0 = \oint \frac{dq}{T} + \oint \frac{|dw_{RT}|}{T} \Rightarrow \oint \frac{dq}{T} = - \oint \frac{|dw_{RT}|}{T}$$

$$ds_{AS} \geq 0$$

Još neke formulacije ...

- **Svi su prirodni procesi nepovratljivi.
Povratljivi su procesi samo idealizirani granični slučajevi nepovratljivih procesa.**
- **Entropija adijabatskog sustava raste s vremenom dosežući svoju maksimalnu vrijednost.**
(Povezivanje entropije s raspodjelom gustoće energije i s procesom izjednačavanja početno nejednolike raspodjele gustoće energije u adijabatskom sustavu.)

Entropija i nepovratljivost - rad trenja

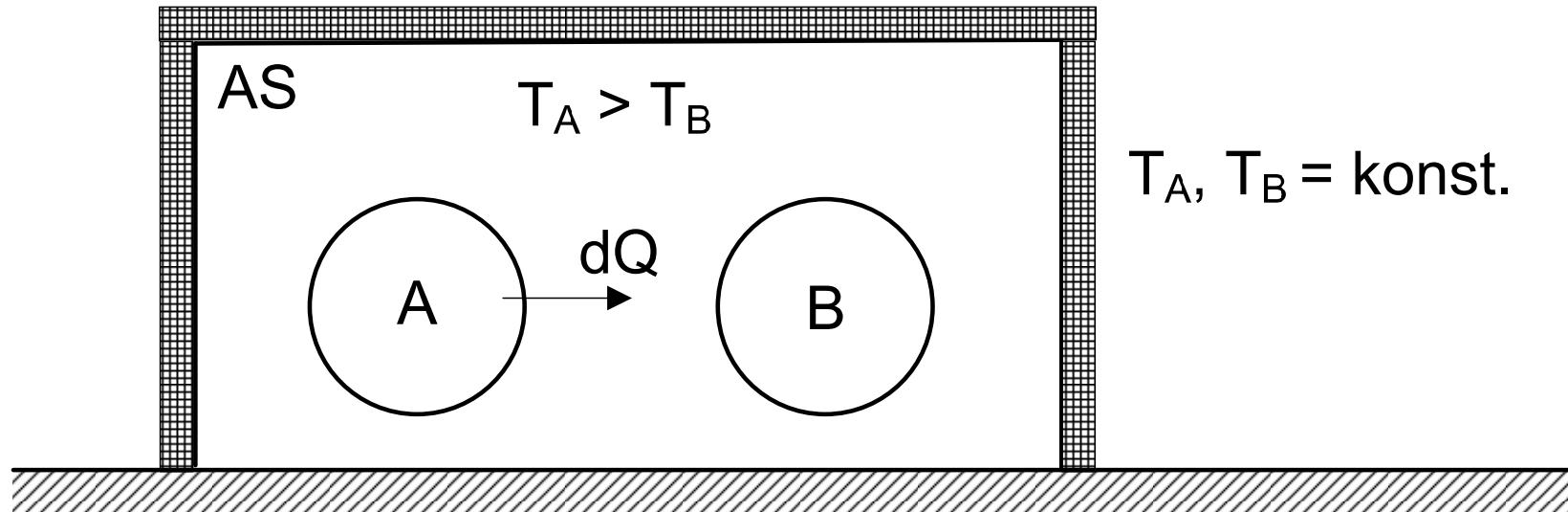


$$\frac{|dw_{RT}|}{T}$$

$$q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12} = u_2 - u_1 - |w_{RT12}| = 0 \quad w_{12} = -|w_{RT12}| < 0$$

$$|w_{RT12}| = u_2 - u_1 \quad q_{23} = u_3 - u_2 + w_{23} = 0 \quad w_{23} = u_2 - u_3$$

Entropija i nepovratljivost – prijelaz toplinske energije preko konačne razlike temperatura



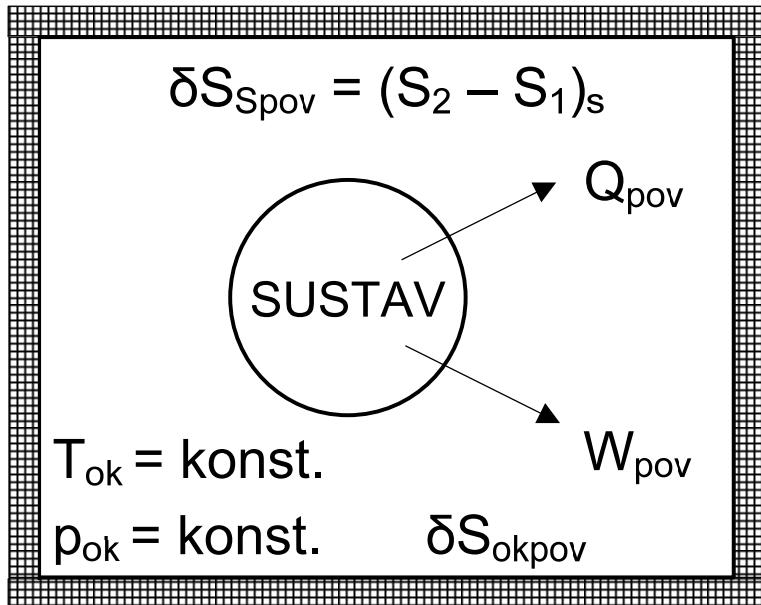
$$-dQ_A = dQ_B = dQ$$

$$dS_A = \frac{dQ_A}{T_A} = -\frac{dQ}{T_A} < 0, \quad dS_B = \frac{dQ_B}{T_B} = \frac{dQ}{T_B} > 0$$

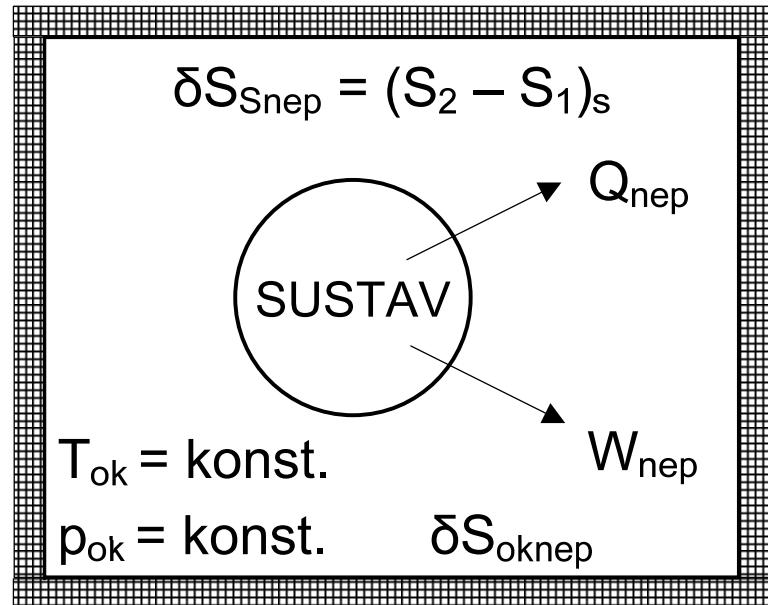
$$dS_{AS} = dS_A + dS_B = \frac{T_A - T_B}{T_A T_B} dQ$$

Što je s energetskog stajališta porast entropije?

AS



AS



$$\delta S_{Spov} = (S_2 - S_1)_s = \delta S_{Snep} = \delta S_s$$

$$\delta S_{okpov} = \frac{Q_{pov}}{T_{ok}} \quad \delta S_{oknep} = \frac{Q_{nep}}{T_{ok}}$$

Što je s energetskog stajališta porast entropije?

$$\delta S_{AS_{pov}} = \delta S_s + \delta S_{okpov} = (S_2 - S_1)_s + \delta S_{okpov} = 0$$

$$\delta S_{AS_{nep}} = \delta S_s + \delta S_{oknep} = (S_2 - S_1)_s + \delta S_{oknep} = \delta S_{uk} > 0$$

$$(S_2 - S_1)_s = - \delta S_{okpov}$$

$$\delta S_{uk} = \delta S_{oknep} - \delta S_{okpov}$$

$$U_1 - U_2 (E_1 - E_2) = Q_{pov} + W_{pov};$$

$$U_1 - U_2 (E_1 - E_2) = Q_{nep} + W_{nep}$$

$$Q_{pov} + W_{pov} = Q_{nep} + W_{nep} \quad W_{pov} - W_{nep} = Q_{nep} - Q_{pov}$$

$$W_{pov} - W_{nep} = T_{ok} (\delta S_{oknep} - \delta S_{okpov}) = T_{ok} [\delta S_{oknep} + (S_2 - S_1)_s]$$

Što je s energetskog stajališta porast entropije?

$$W_{pov} - W_{nep} = W_{gubitak} = T_{ok} \cdot \delta S_{uk} > 0$$

$$\delta S_{uk} = \delta S_{ok_{nep}} + \delta S_s = \frac{Q_{nep}}{T_{ok}} + (S_2 - S_1)_s$$

$$(S_2 - S_1)_s:$$

$$dS = \frac{dq}{T} \qquad dS = \frac{dQ}{T}$$

Promjena entropije sustava

$$ds_s \equiv ds = \frac{dq}{T} = \frac{du + pdv}{T} = \frac{dh - vdp}{T} \quad ds = \frac{dq}{T} = c \frac{dT}{T}$$

$$du = c_v dT; dh = c_p dT \text{ i } pv = RT \quad c_v = c_p = c$$

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v} = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}$$

$$\int_{s_1}^{s_2} ds = c_v \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} + R \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = c_p \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} - R \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p}$$

$$(s_2 - s_1)_s \equiv s_2 - s_1 = \delta s_s \equiv \delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Promjena entropije sustava

- izohorni proces

$$ds_v = c_v \frac{dT}{T}$$

- izobarni proces

$$ds_p = c_p \frac{dT}{T}$$

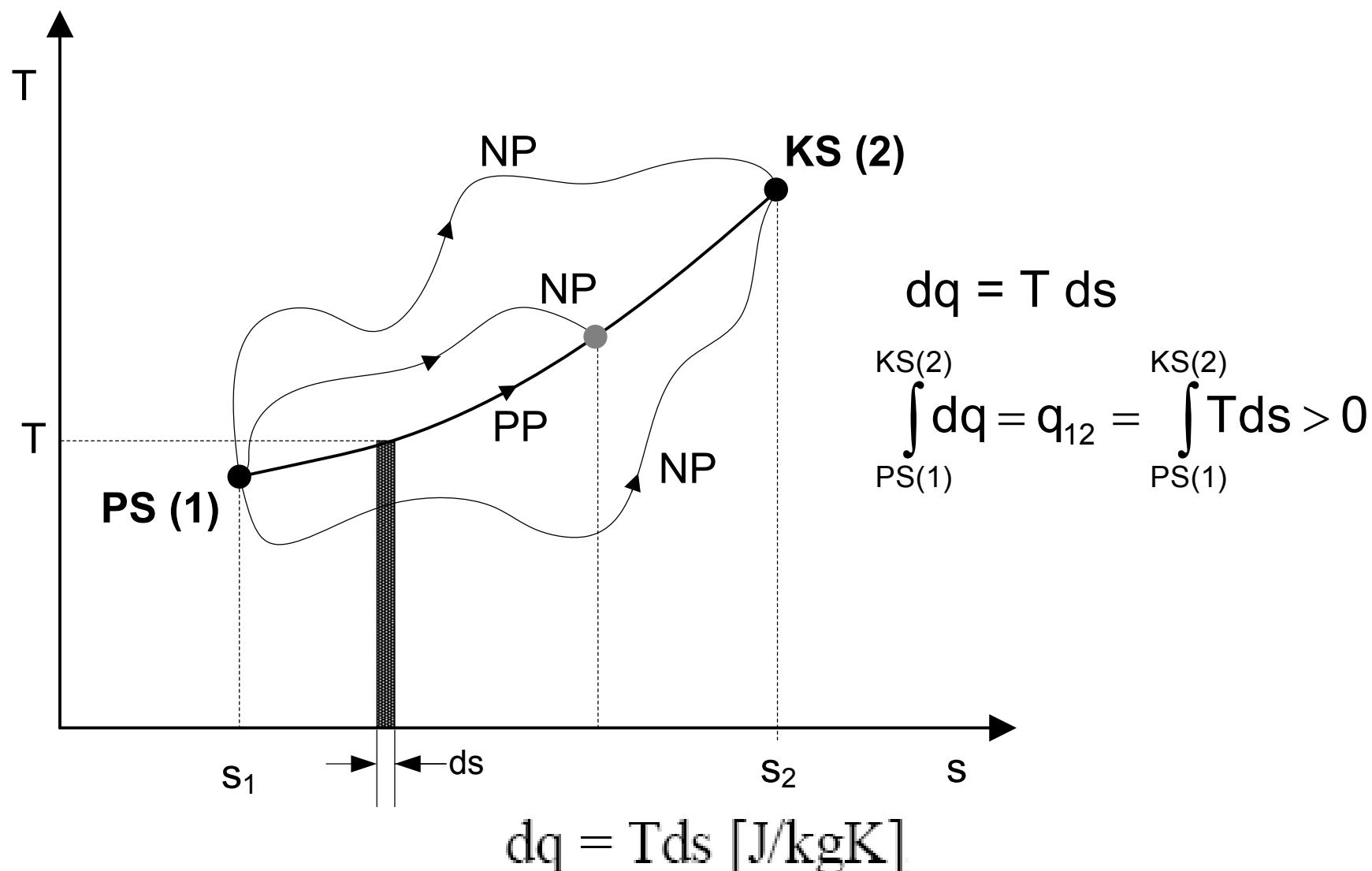
- izotermni proces

$$ds_T = R \frac{dv}{v} = -R \frac{dp}{p}$$

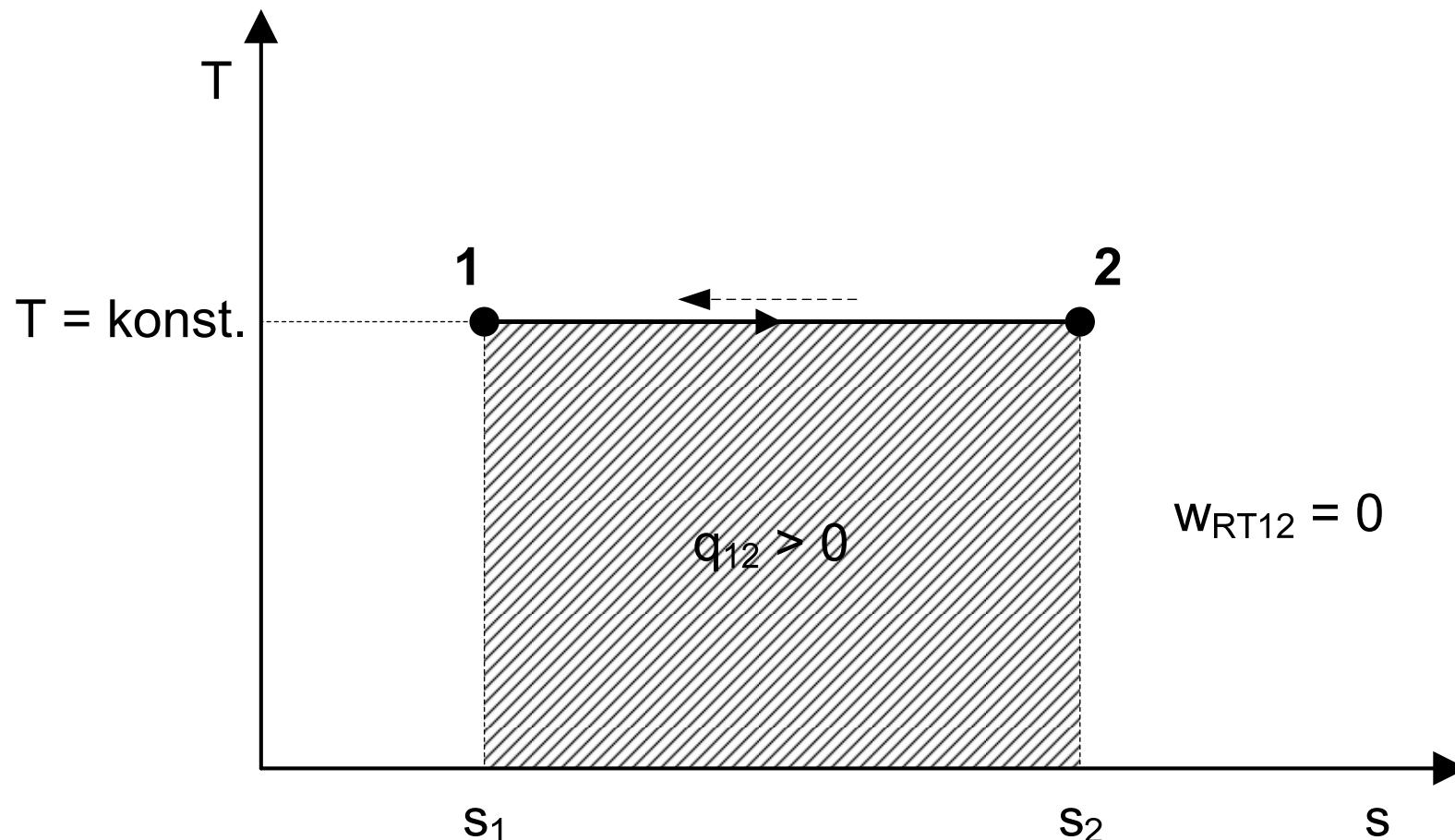
- adijabatski povratljivi proces – naziva se **izentropskim** procesom:
 $ds = 0$
- politropski proces

$$ds_n = c_n \frac{dT}{T}$$

T,s – dijagram

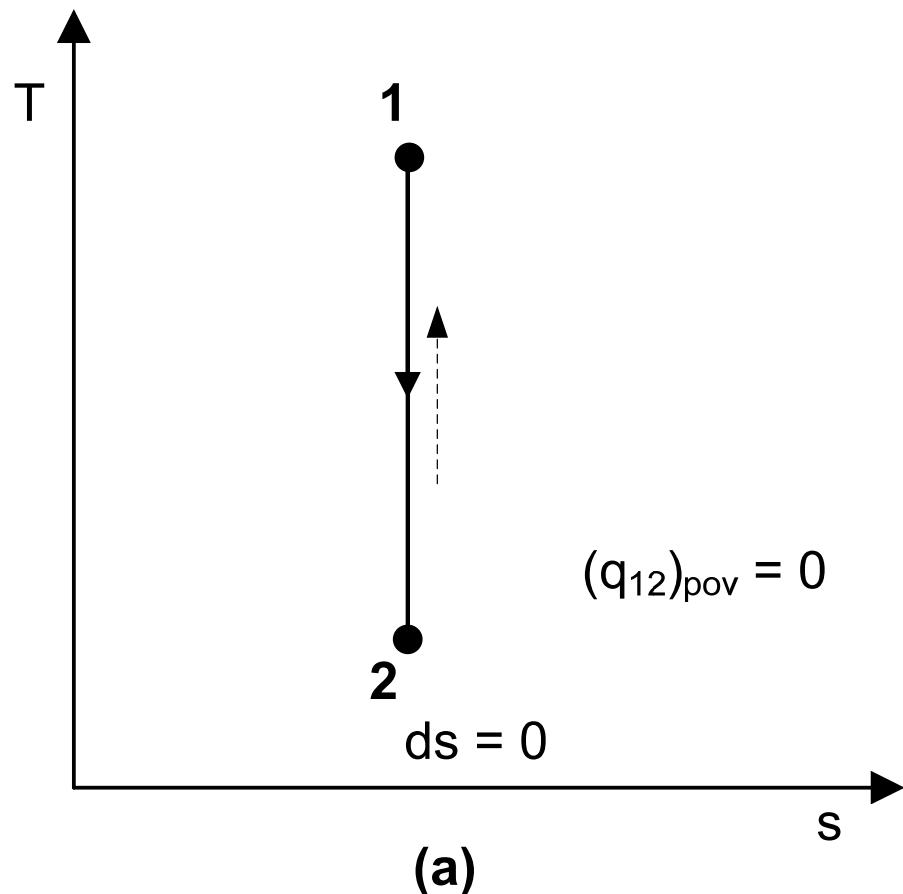


Izotermni proces



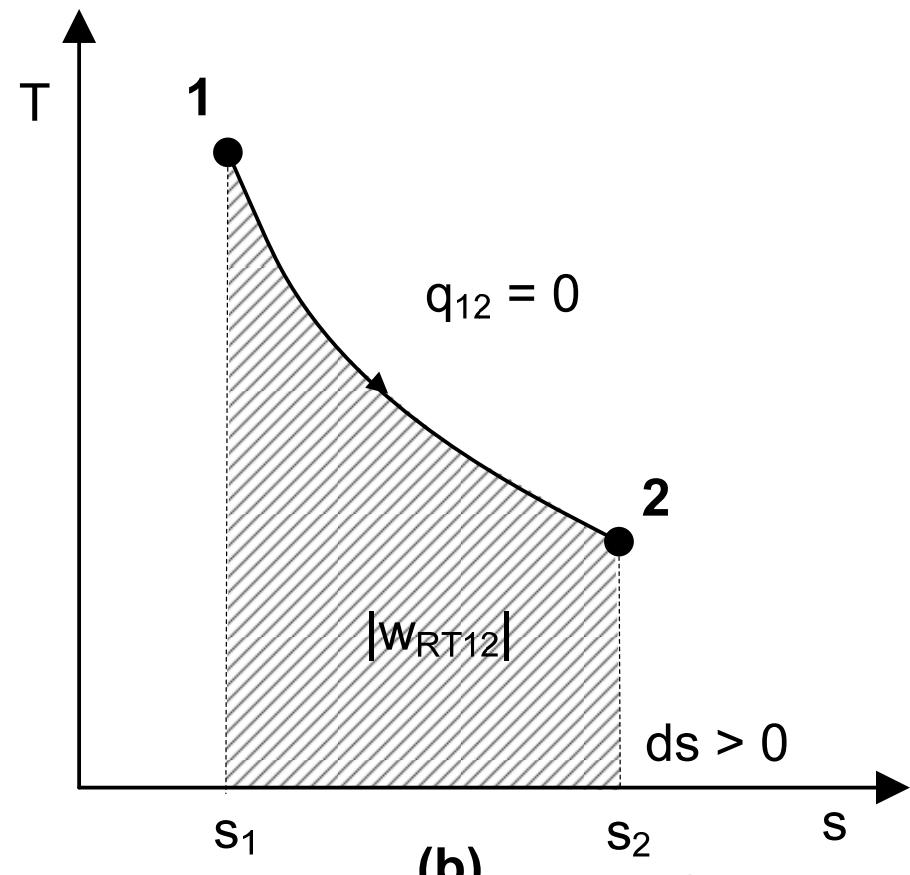
$$\delta s_T = R \ln \frac{v_2}{v_1} = -R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Izentropski i adijabatski proces



(a)

$$ds_{pov} = \frac{dq_{povratljivo}}{T} = 0 \text{ jer } q_{12} = 0$$

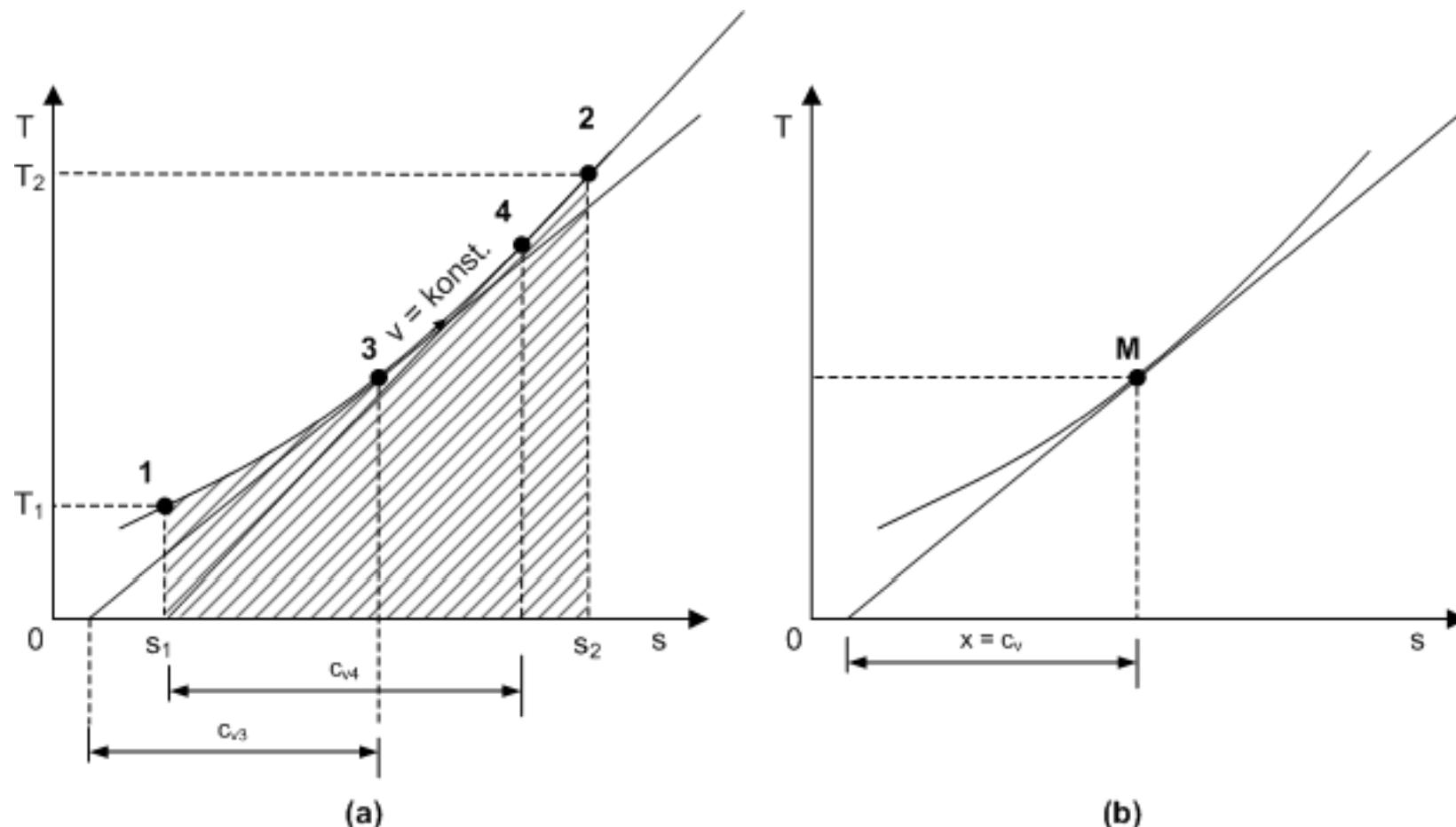


(b)

$$|W_{RT12}| = \int_1^2 T ds \quad ds = \frac{|dw_{trenja}|}{T}$$

Izohorni proces, određivanje specifične topline pomoću T,s - dijagrama

$$ds_v = c_v \frac{dT}{T} : s_v = c_v \ln T + s_{v0}$$



Izohorni proces, određivanje specifične topline pomoću T,s - dijagrama

$\operatorname{tg} \alpha = \frac{T}{x} = \frac{dT}{ds}$ = koeficijent smjera pravca (tangente) u T,s – koordinatnom sustavu

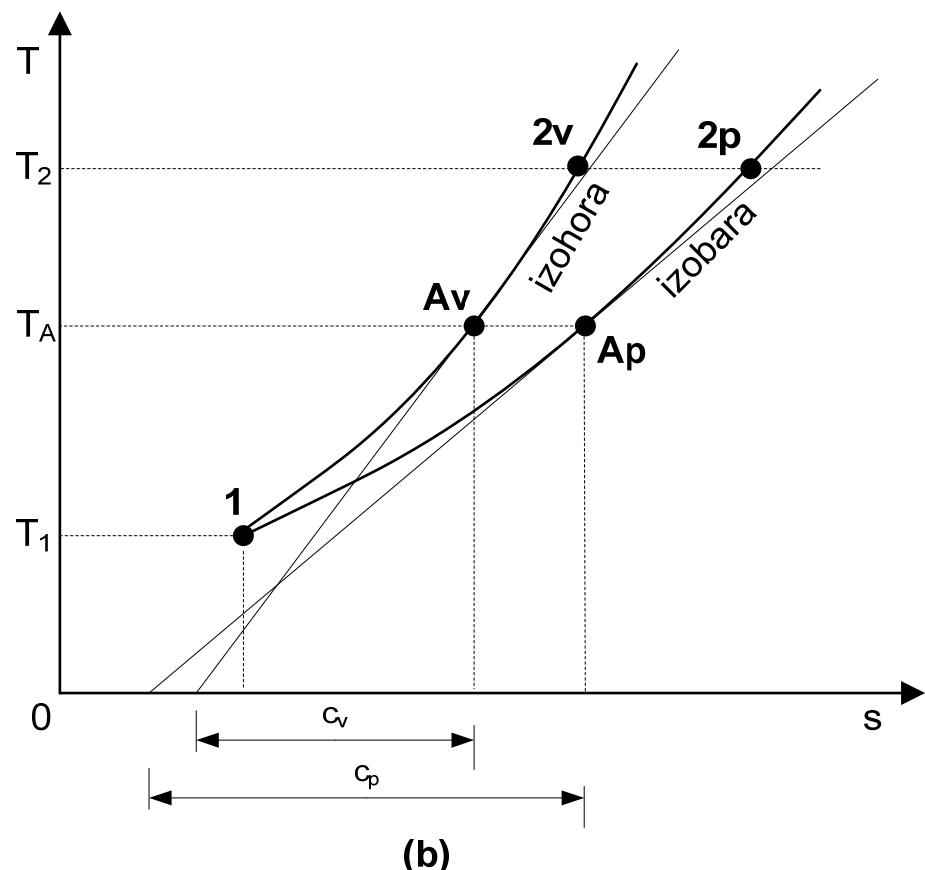
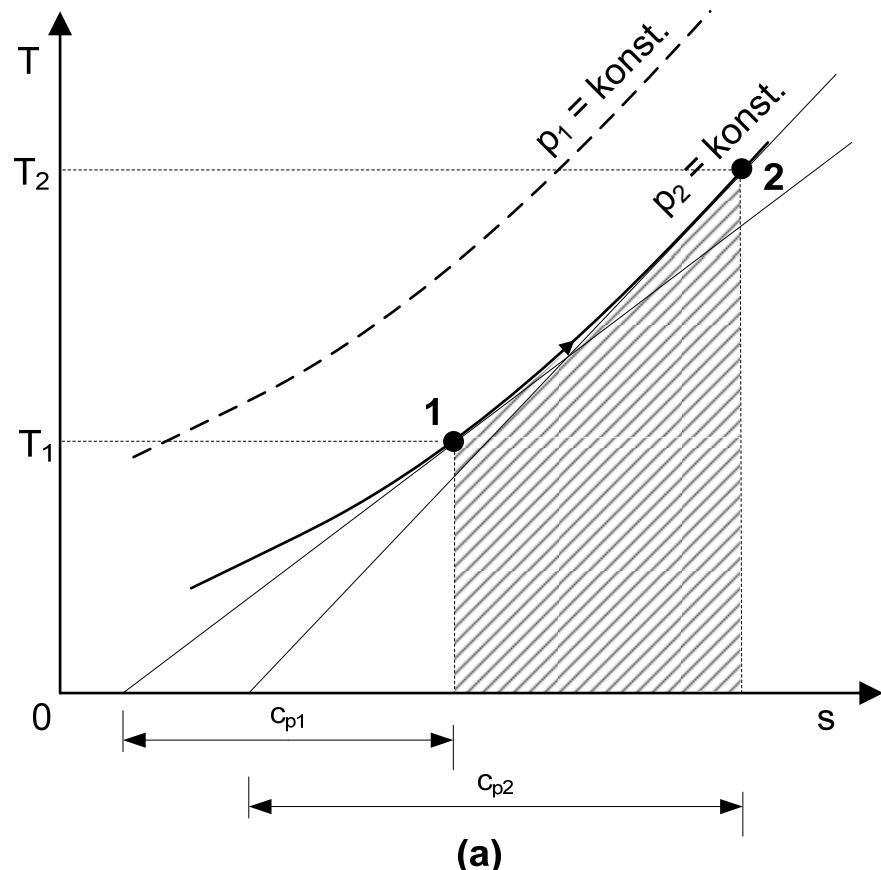
$$Tds = xdT \quad Tds = dq$$

$$dq = Tds = xdT \quad dq = c_v dT$$

$$X = C_v$$

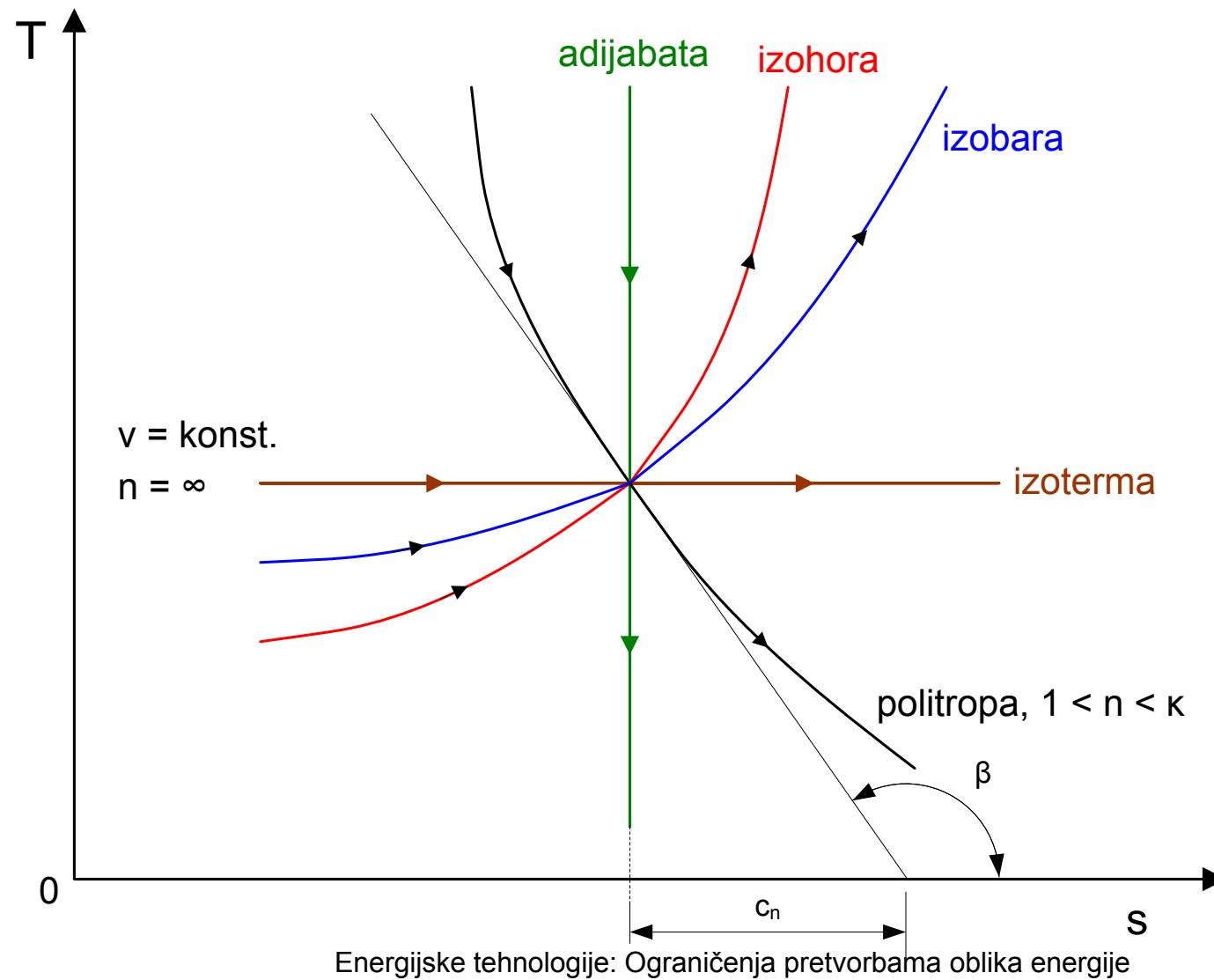
Izobarni proces

$$s_p = c_p \ln T + s_{p0}$$

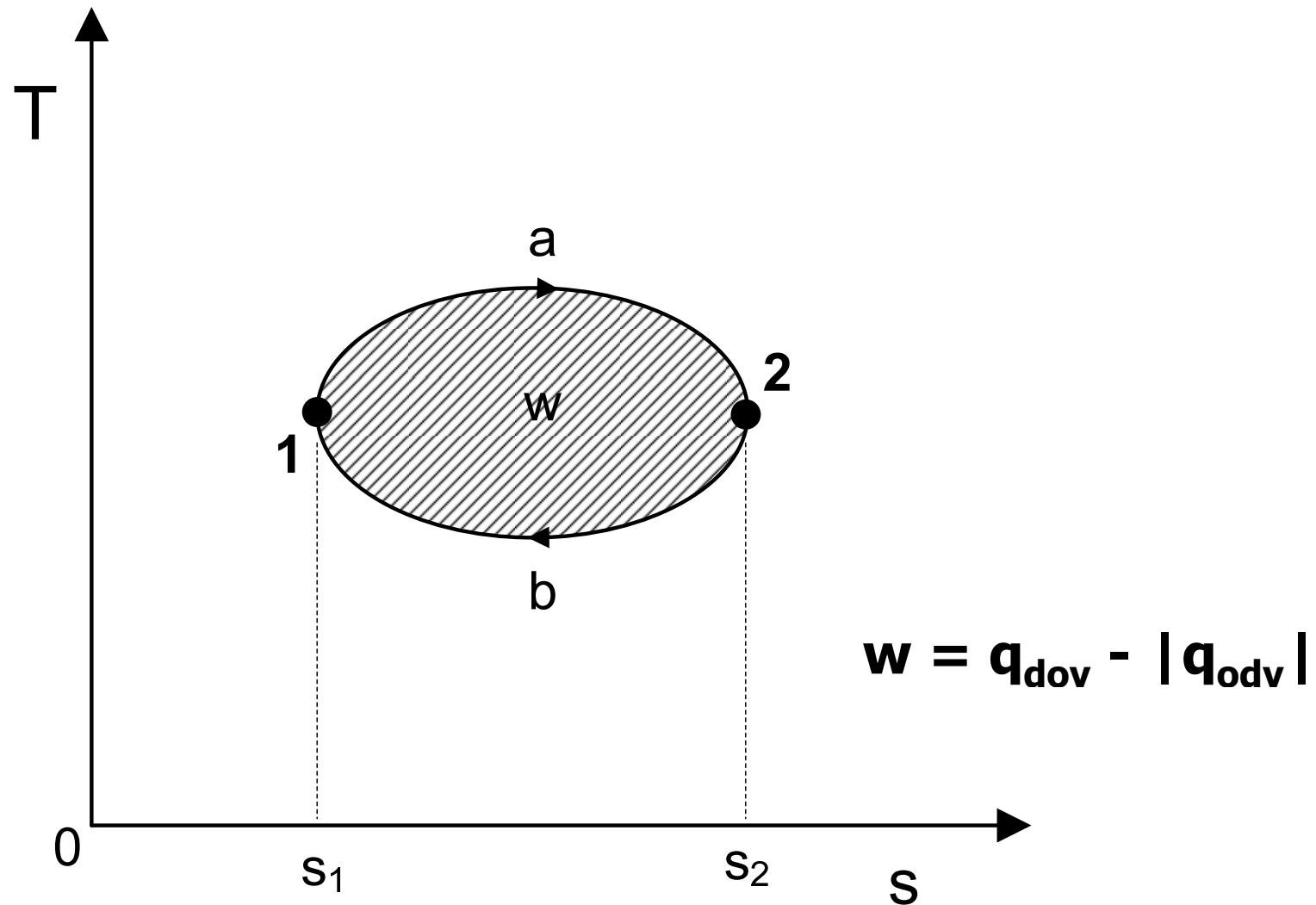


Politropski proces ($1 < n < \kappa \Rightarrow c_n < 0$)

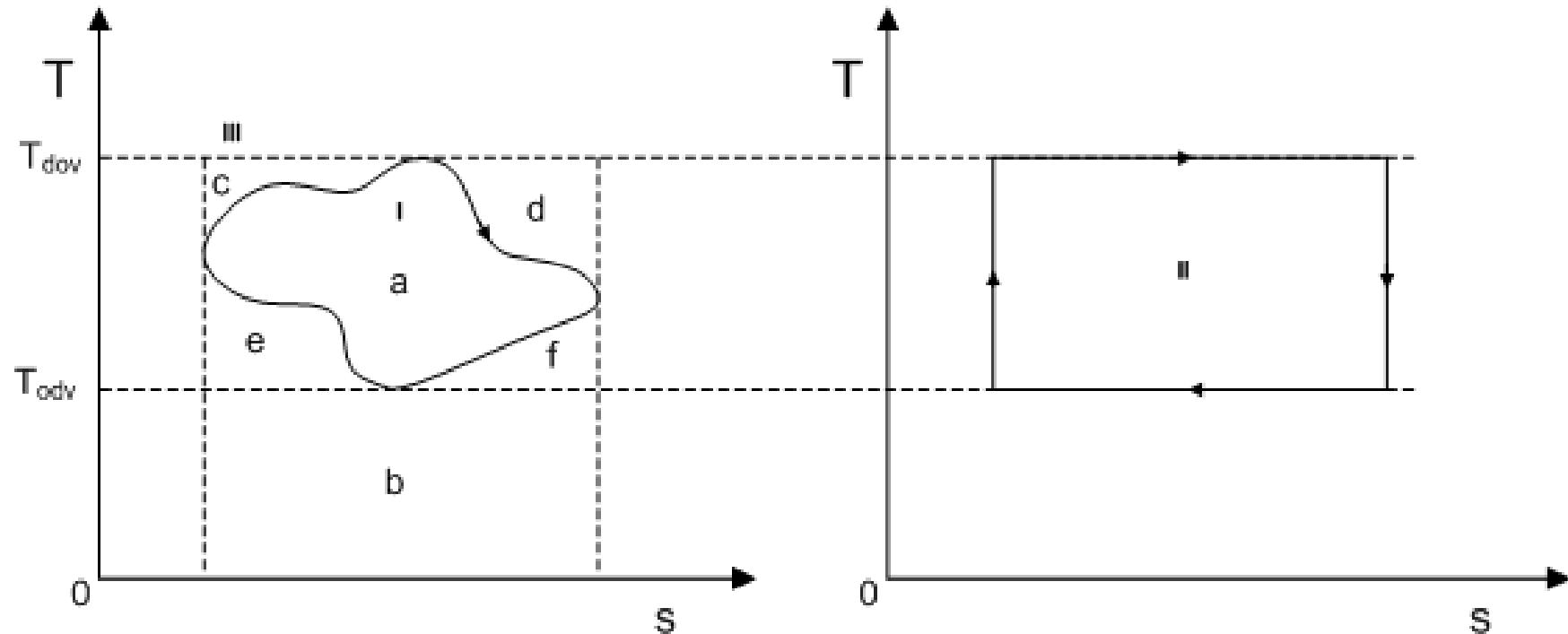
$$s_n = c_n \ln T + s_{n0}$$



Kružni proces



Usporedba termičkih stupnjeva djelovanja



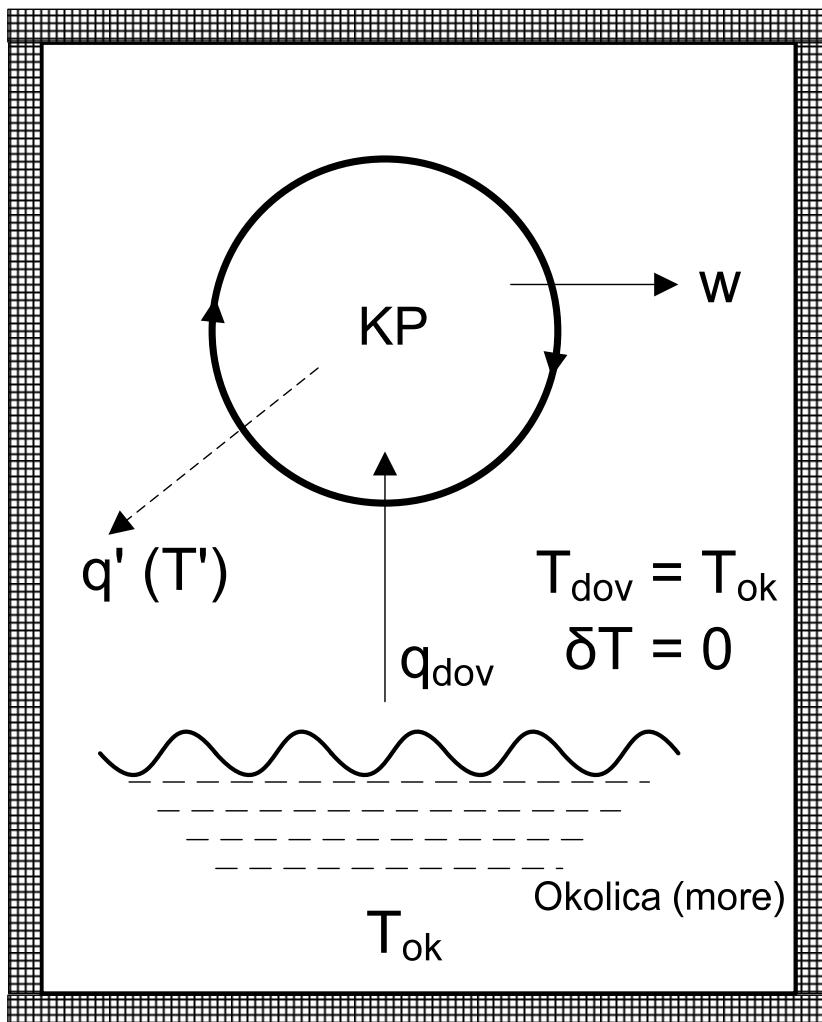
$$\eta_{tCKP}^{II} = \eta_{tCKP}^{III} = \frac{T_{dov} - T_{odv}}{T_{dov}} = 1 - \frac{|Q_{odv}^{III}|}{Q_{dov}^{III}} = 1 - \frac{b}{a+b+c+d+e+f}$$

$$\eta_t^I = 1 - \frac{|Q_{odv}^I|}{Q_{dov}^I} = 1 - \frac{b+e+f}{a+b+e+f}$$

$$\eta_{tCKP} > \eta_t$$

Primjena 2. glavnog stavka termodinamike

AS

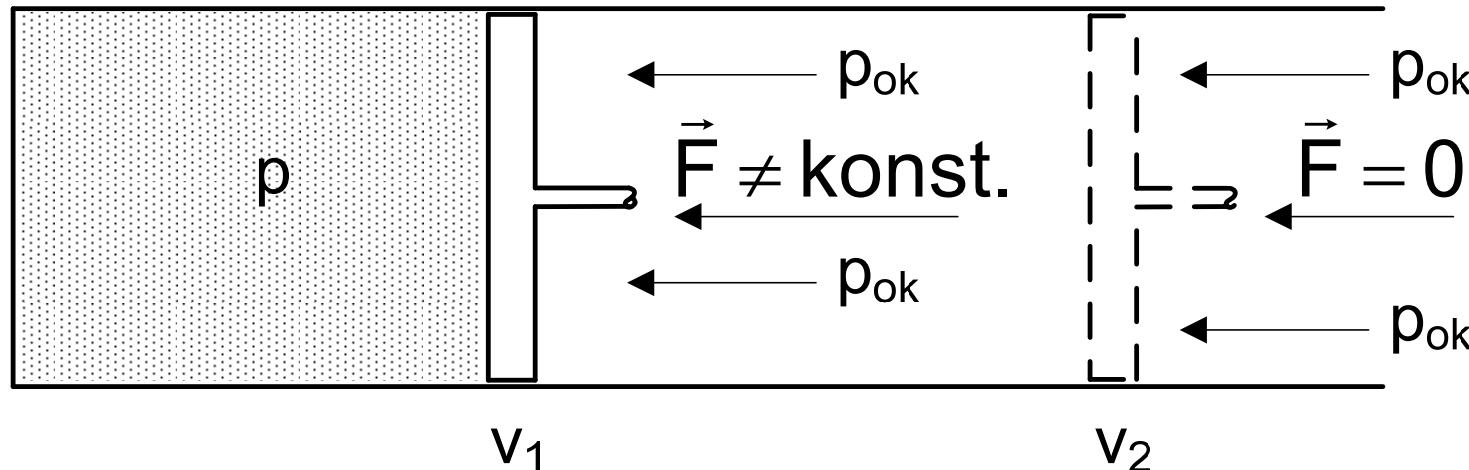


$$\delta S_{AS} \equiv \delta S_{uk} = \delta S_{KP} + \delta S_{ok} = 0$$

$$\delta S_{ok} = \frac{q_{dov}}{T_{ok}} < 0$$

$$\delta S_{ok} = \frac{q'}{T_{ok}} - \frac{|q_{dov}|}{T_{ok}}$$

Primjena 2. glavnog stavka termodinamike



$$W_{12\text{korisni}} = \int_{v_1}^{v_2} pdv - p_{ok}(v_2 - v_1) = \int_{v_1}^{v_2} (p - p_{ok})dv$$

$$\int_{v_1}^{v_2} pdv = w_{plina}$$

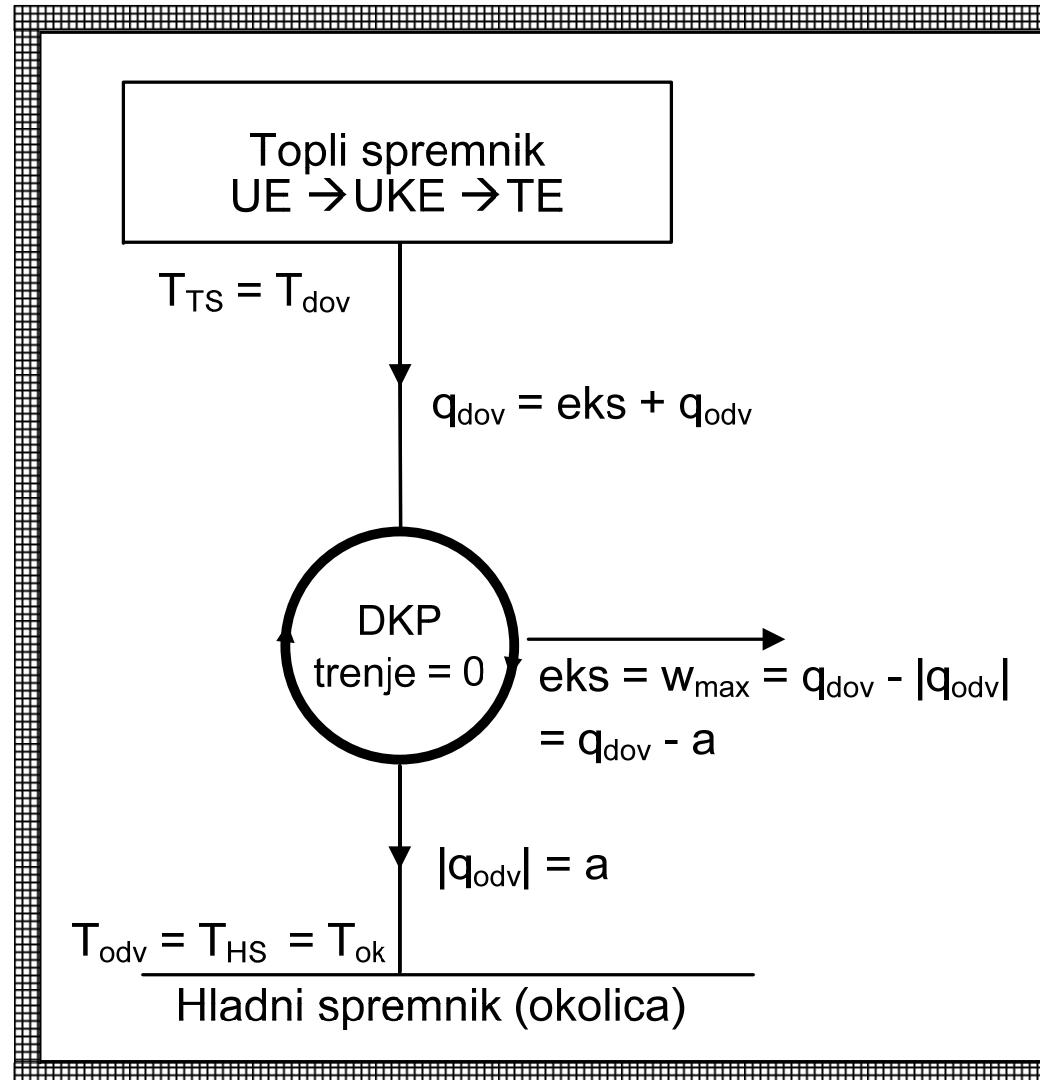
- stanje okoline (mehanička i toplinska ravnoteža s okolicom)
- termodinamička ravnoteža

Određivanje eksergije i anergije

1. Kad možemo iz nekog sustava dobiti (dobivati) mehanički rad, odnosno, istovjetno pitanje, kad možemo iz neke energije dobiti ekserviju?
2. Koliko maksimalno rada možemo dobiti iz takvog sustava? (Kolika je ekservija energije?)
3. Kako se mora odvijati proces da iz takvog sustava dobijemo maksimalni rad (ekserviju)?

Eksergija toplinske energije (unutrašnje energije)

AS



Eksergija toplinske energije (unutrašnje energije)

$$\delta s_{AS} = \delta s_{TS} + \delta s_{KP} + \delta s_{ok} \quad \delta s_{TS} + \delta s_{ok} = 0 \quad -\delta s_{TS} = \delta s_{ok}$$

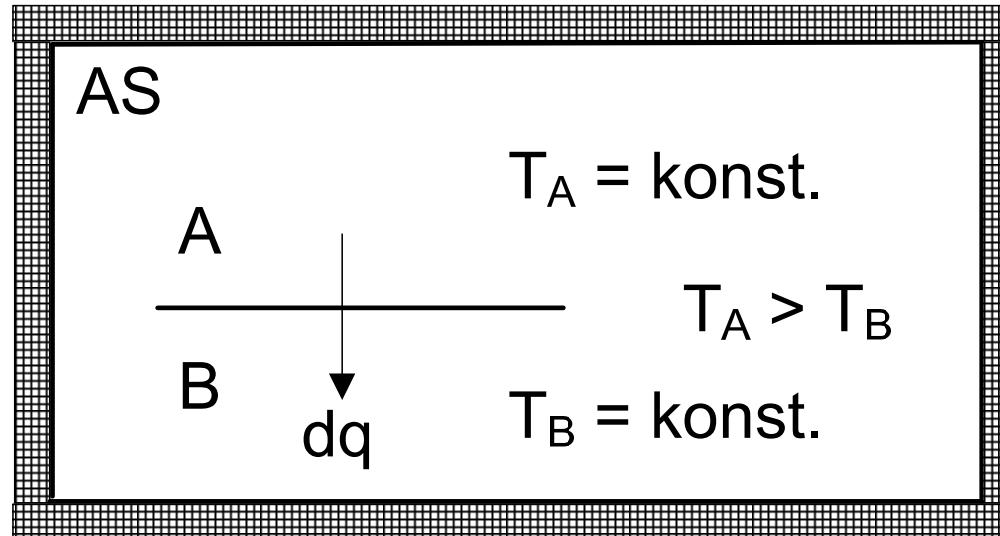
$$\delta s_{TS} = - \int_{PS(1)}^{KS(2)} \frac{dq_{dov}}{T_{dov}} < 0 \quad \delta s_{ok} = \frac{|q_{od}|}{T_{ok}} = \frac{a}{T_{ok}} > 0$$

$$\int_{PS(1)}^{KS(2)} \frac{dq_{dov}}{T_{dov}} = \frac{a}{T_{ok}} \text{ odnosno } a = T_{ok} \int_{PS(1)}^{KS(2)} \frac{dq_{dov}}{T_{dov}}$$

$$eks = w_{max} = q_{dov} - a = q_{dov} - T_{ok} \int_{PS(1)}^{KS(2)} \frac{dq_{dov}}{T_{dov}} = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_{ok}}{T_{dov}} \right) dq_{dov}$$

$$eks = w_{max} = \left(1 - \frac{T_{ok}}{T_{dov}} \right) q_{dov} = \eta_{tCKP} q_{dov}$$

Gubici eksnergije pri prijelazu toplinske energije



$$\text{deks}_A = \left(1 - \frac{T_{\text{ok}}}{T_A}\right) dq \quad \text{deks}_B = \left(1 - \frac{T_{\text{ok}}}{T_B}\right) dq$$

$$\text{deks}_{\text{gub}} = dw_{\text{gub}} = \text{deks}_A - \text{deks}_B = T_{\text{ok}} \frac{T_A - T_B}{T_A T_B} dq = T_{\text{ok}} ds_{\text{uk}}$$

$$ds_{\text{AS}} = ds_A + ds_B = \frac{T_A - T_B}{T_A T_B} dq \quad W_{\text{gubitak}} = T_{\text{ok}} \cdot ds_{\text{uk}}$$

Eksergijski stupanj djelovanja

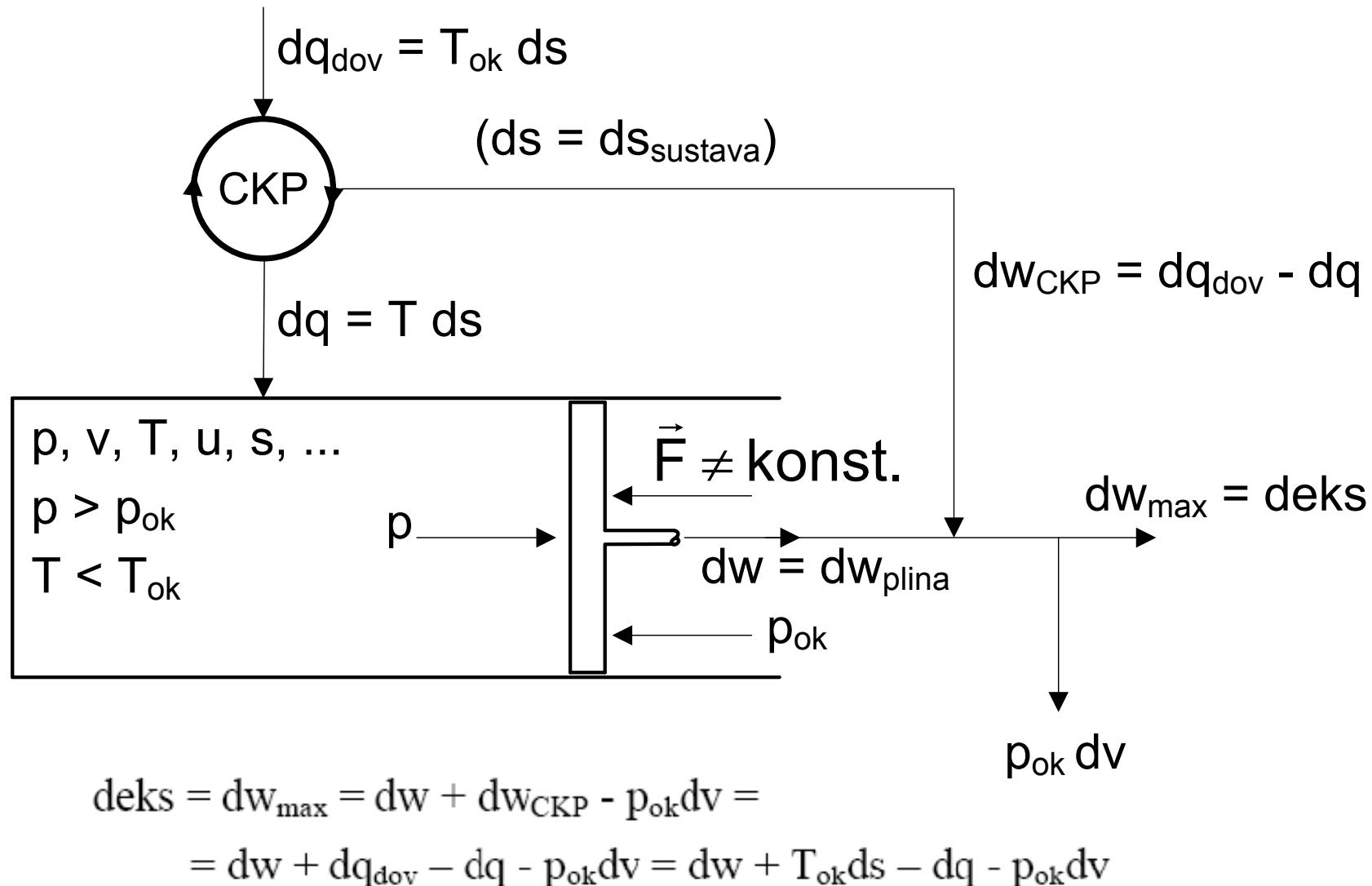
$$\zeta = \frac{Eksergija_{dob} [J]}{Eksergija_{dov} [J]} = \frac{eks_{dob} [J/kg]}{eks_{dov} [J/kg]}$$

$$\zeta = \frac{w}{eks}$$

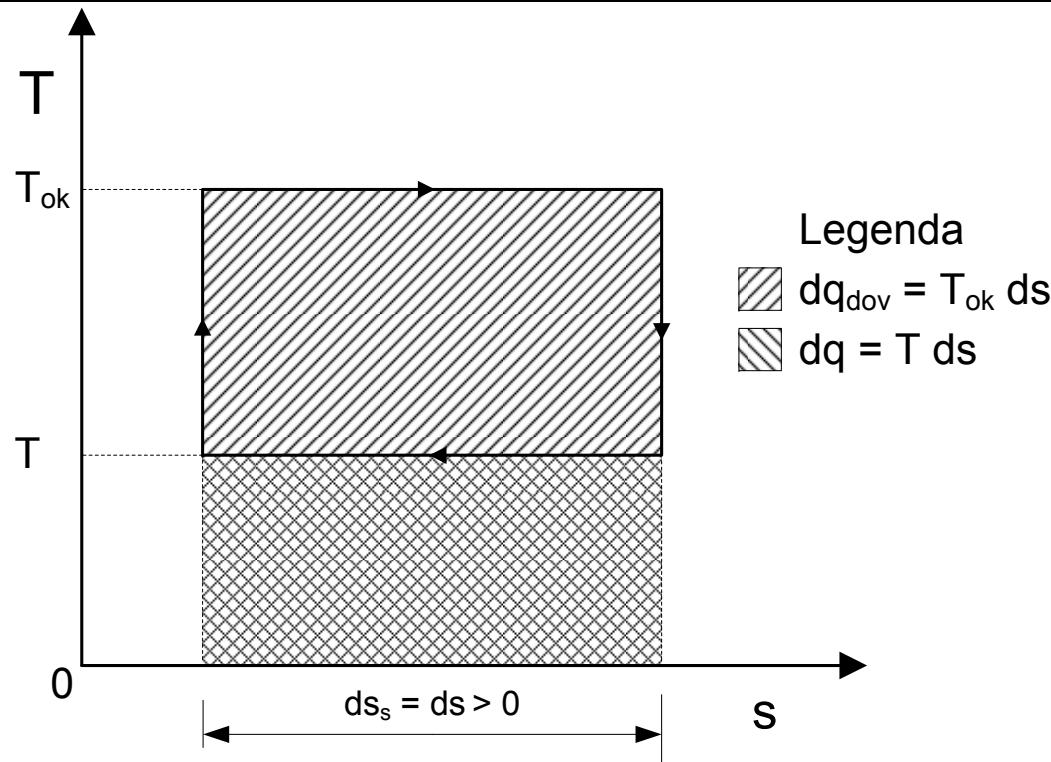
Prijelaz toplinske energije

Carnotov kružni proces

Eksergija unutrašnje kaloričke energije (zatvorenog sustava)



Eksergija unutrašnje kaloričke energije (zatvorenog sustava)

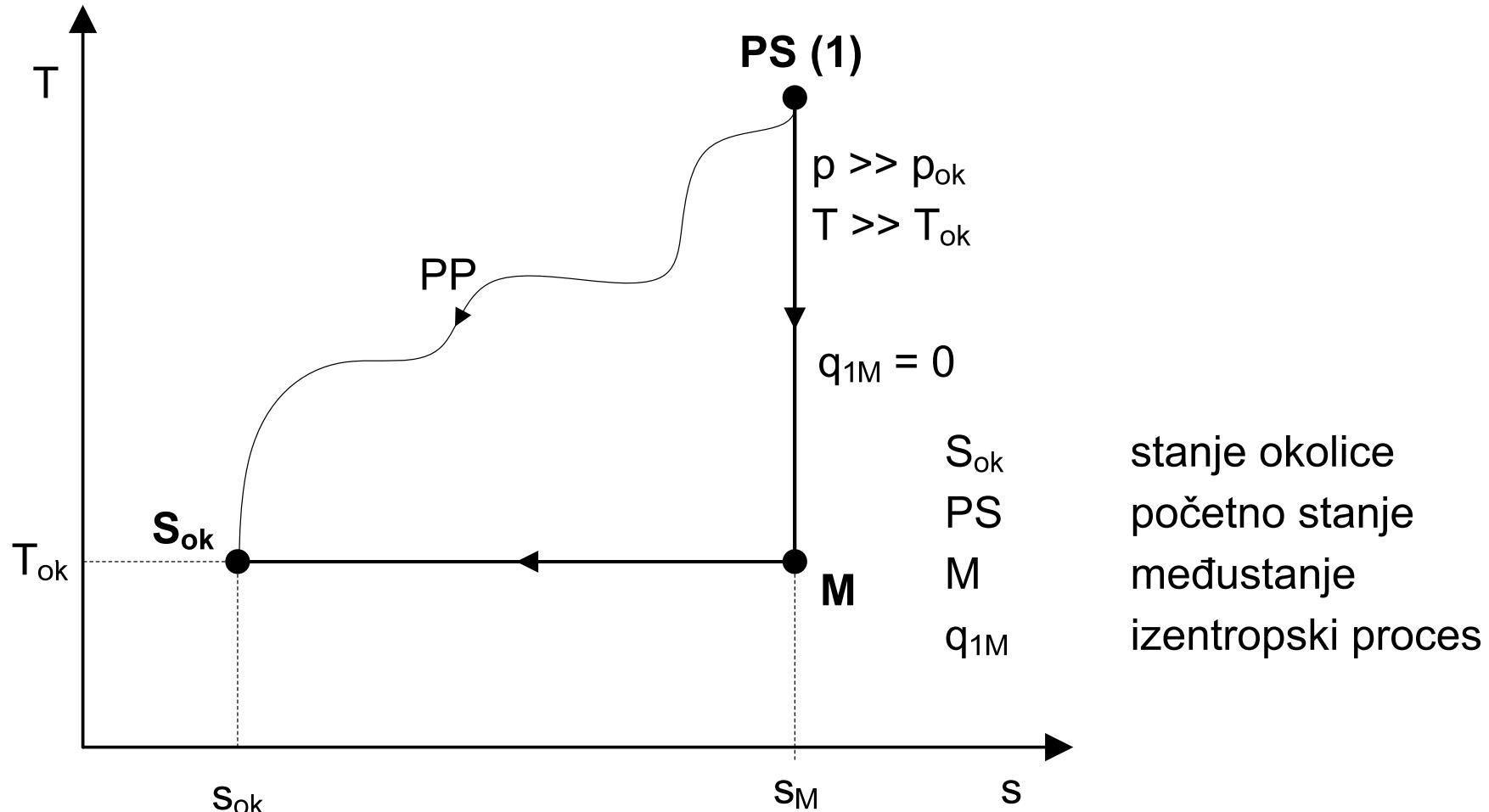


$$deks = dw_{\max} = - (du - T_{ok}ds + p_{ok}dv) \quad dq = dw + du \quad -dq + dw = - du$$

$$\int_{PS}^{KS} deks = \int_{PS}^{KS} dw_{\max} = - \int_{PS}^{KS} (du - T_{ok}ds + p_{ok}dv) = \int_{KS}^{PS} (du - T_{ok}ds + p_{ok}dv)$$

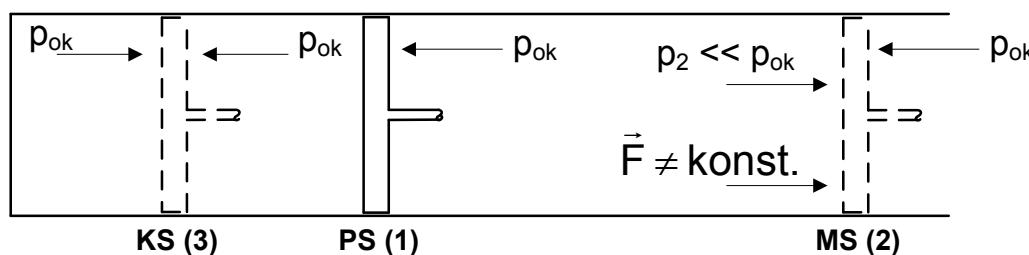
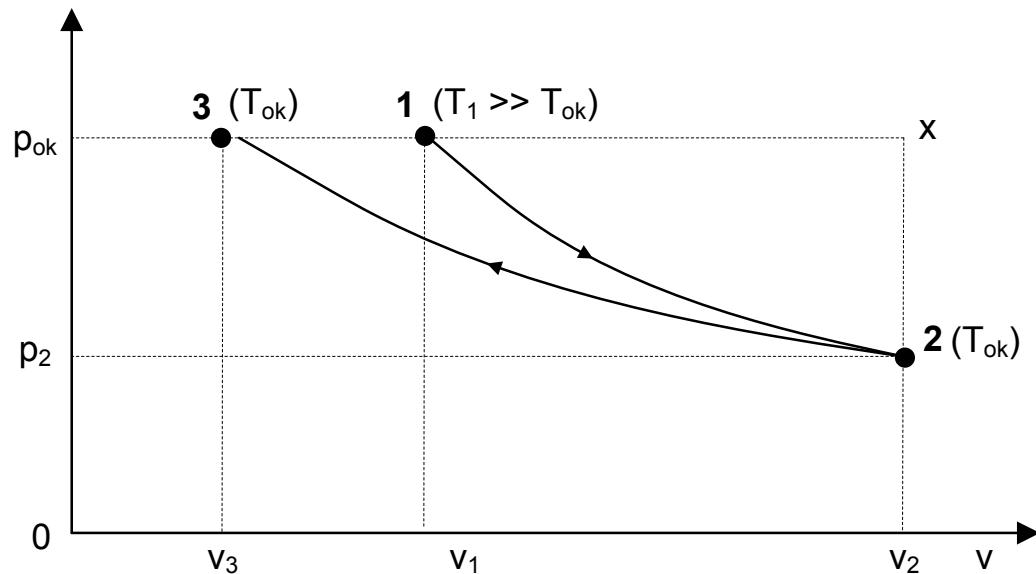
$$eks = w_{\max} = u - u_{ok} - T_{ok}(s - s_{ok}) + p_{ok}(v - v_{ok}) \quad [J/kg] \quad w_{pov} = u_1 - u_2 - T_{ok}(s_1 - s_2) + p_{ok}(v_1 - v_2)$$

Eksergija unutrašnje kaloričke energije (zatvorenog sustava)



$$deks_{gub} = T_{ok} \frac{T_{odv} - T_{ok}}{T_{odv} T_{ok}} dq = \left(1 - \frac{T_{ok}}{T_{odv}}\right) dq$$

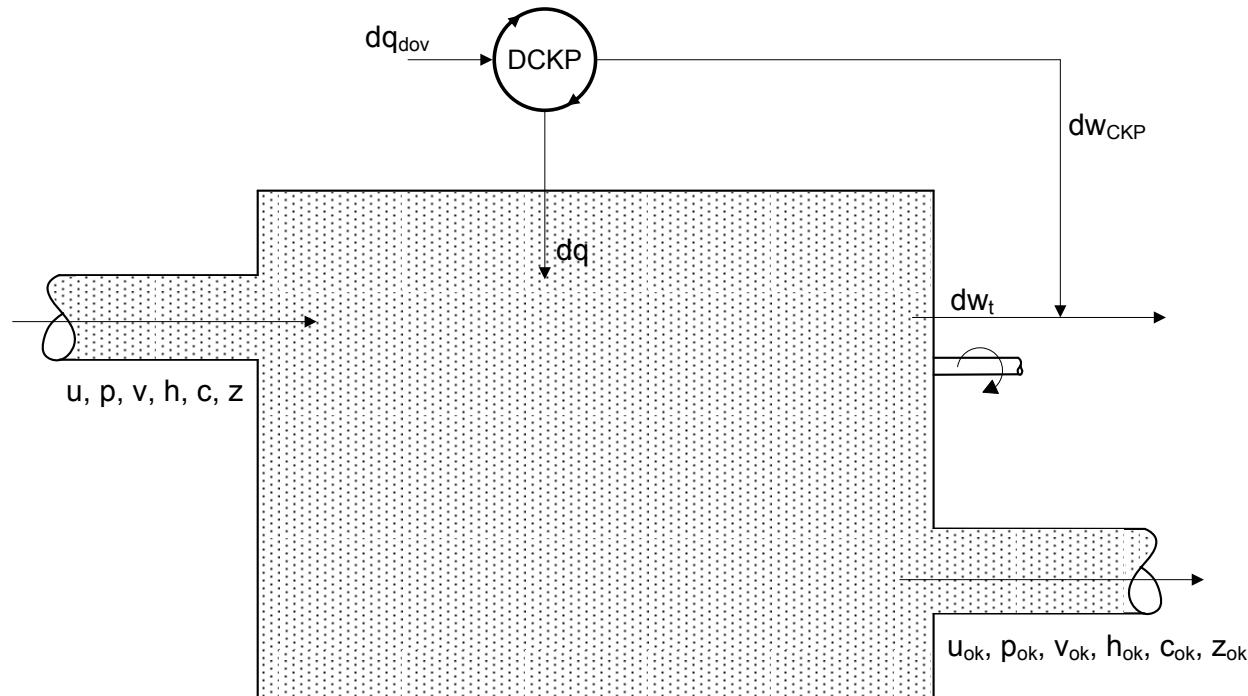
Eksergija plinova izgaranja



$$eks = w_{max} = u_1 - u_3 - T_{0k}(s_1 - s_3) + p_{0k}(v_1 - v_3) \quad [\text{J/kg}]$$

$$u_1 - u_3 = c_v(T_1 - T_{0k}), \quad s_1 - s_3 = c_p \ln \frac{T_1}{T_{0k}}, \quad p_{0k}(v_1 - v_3) = R(T_1 - T_{0k})$$

Eksergija entalpije (otvorenog sustava)



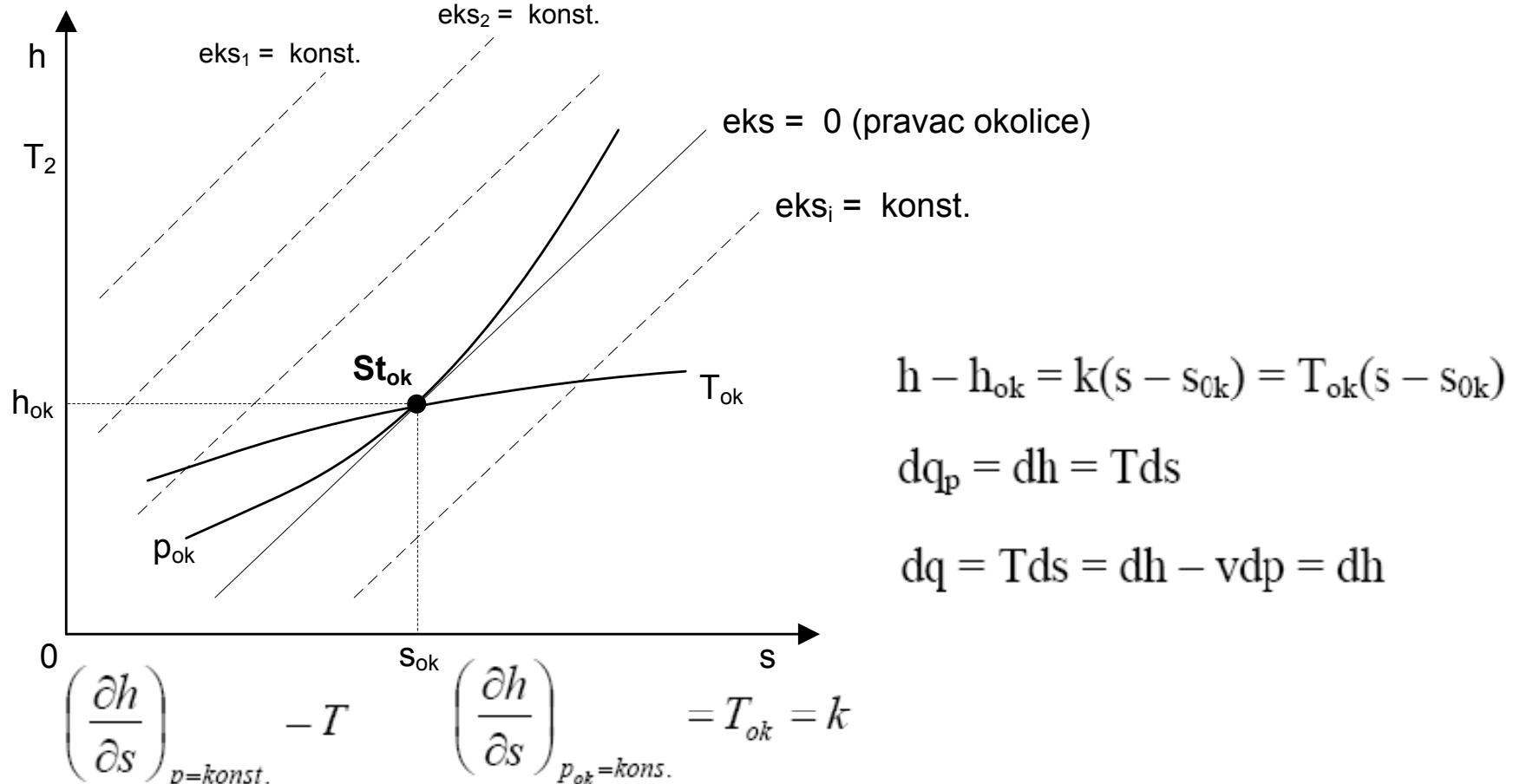
$$dw_{\max} = deks = dw_t + dw_{CKP} = dw_t + T_{ok}ds - dq = - (dq - dw_t - T_{ok}ds)$$

$$dq - dw_t = dh$$

$$\int_{PS}^{KS} dw_{mav} = \int_{PS}^{KS} deks = - \int_{PS}^{KS} (dh - T_{ok}ds) = \int_{KS}^{PS} (dh - T_{ok}ds) =$$

$$w_{\max} = eks = h - h_{ok} - T_{ok}(s - s_{ok}) \quad w_{pov} = h_1 - h_2 - T_{ok}(s_1 - s_2)$$

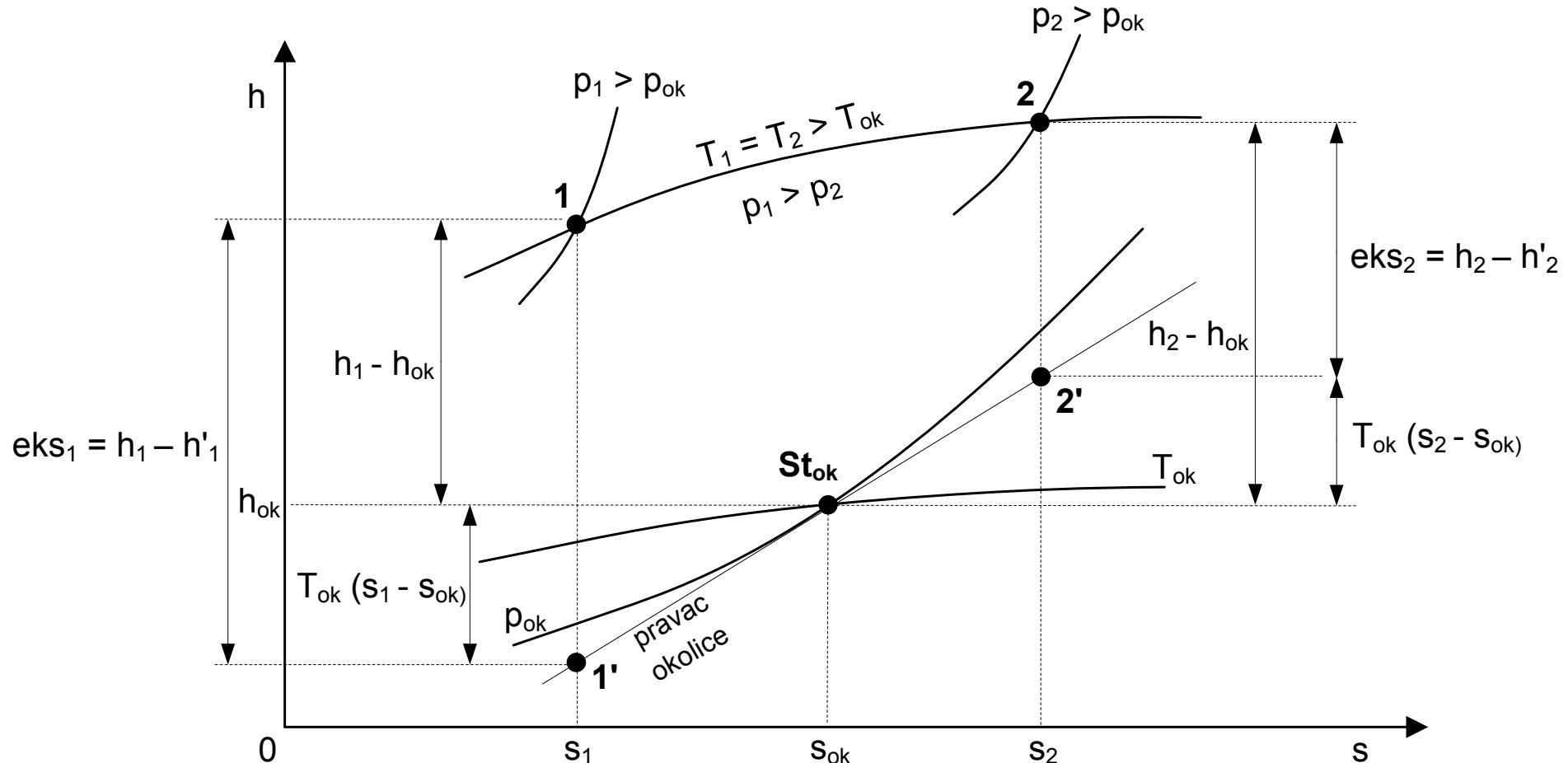
Određivanje eksergije pomoću h,s - dijagrama



$$eks = h - h_{0k} - T_{0k}(s - s_{0k}) \quad eks = 0$$

$$h - h_{0k} = T_{0k}(s - s_{0k})$$

Eksergija plina

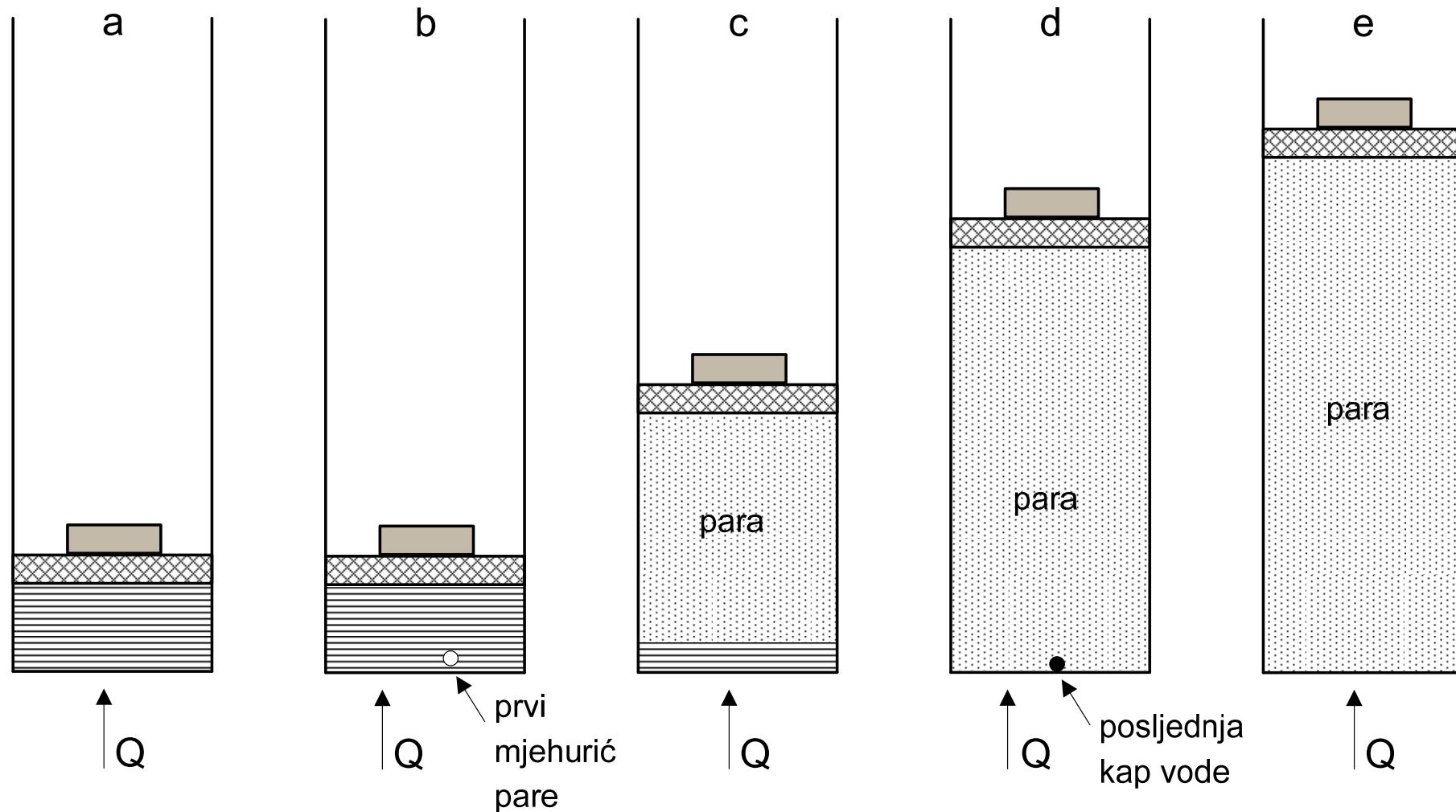


$$eks_1 = h_1 - h_{ok} - T_{ok}(s_1 - s_{ok}) = h_1 - h'_1$$

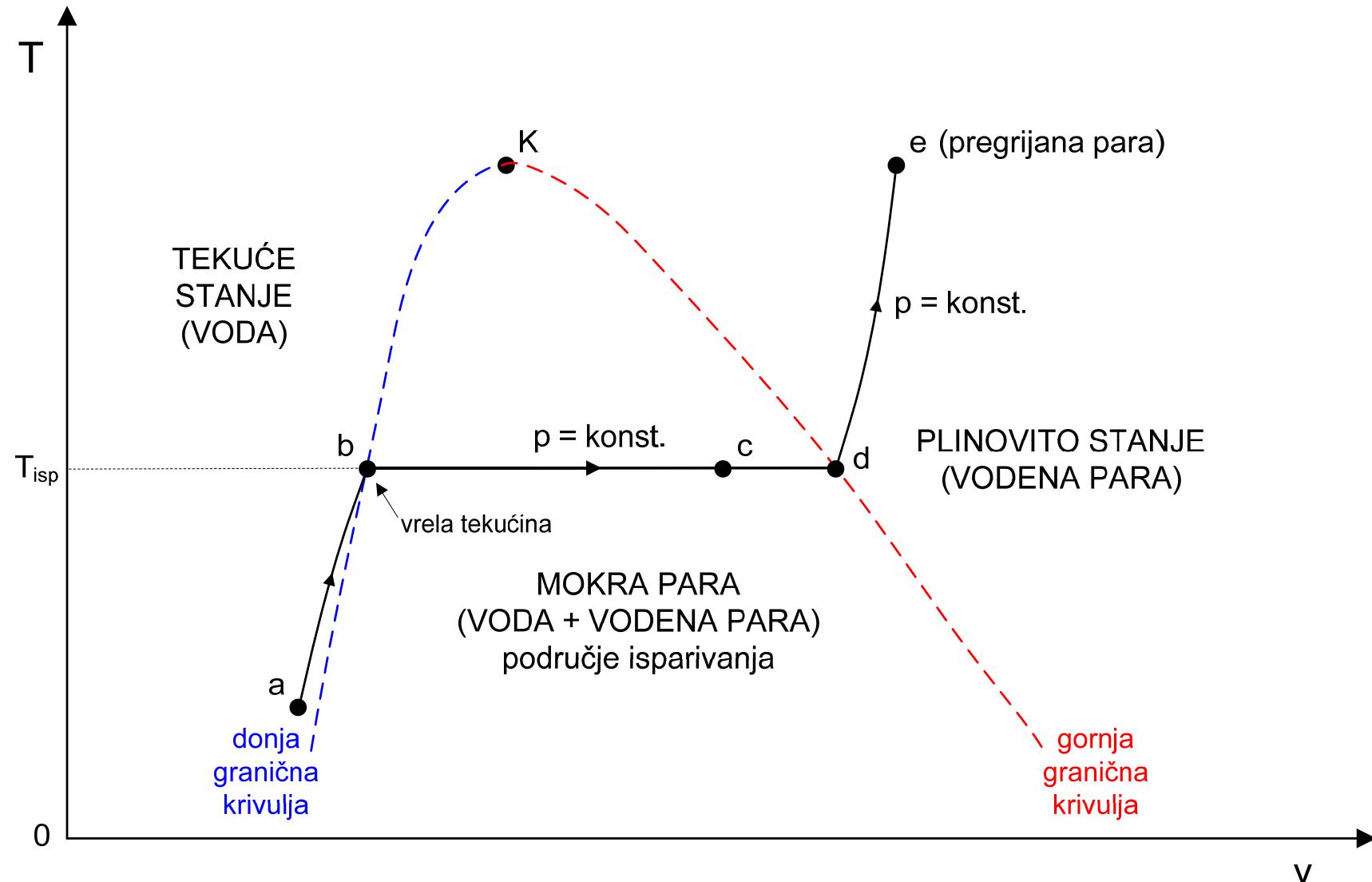
$$eks_2 = h_2 - h_{ok} - T_{ok}(s_2 - s_{ok}) = h_2 - h'_2$$

$$\mathbf{eks_1 - eks_2 = ?}$$

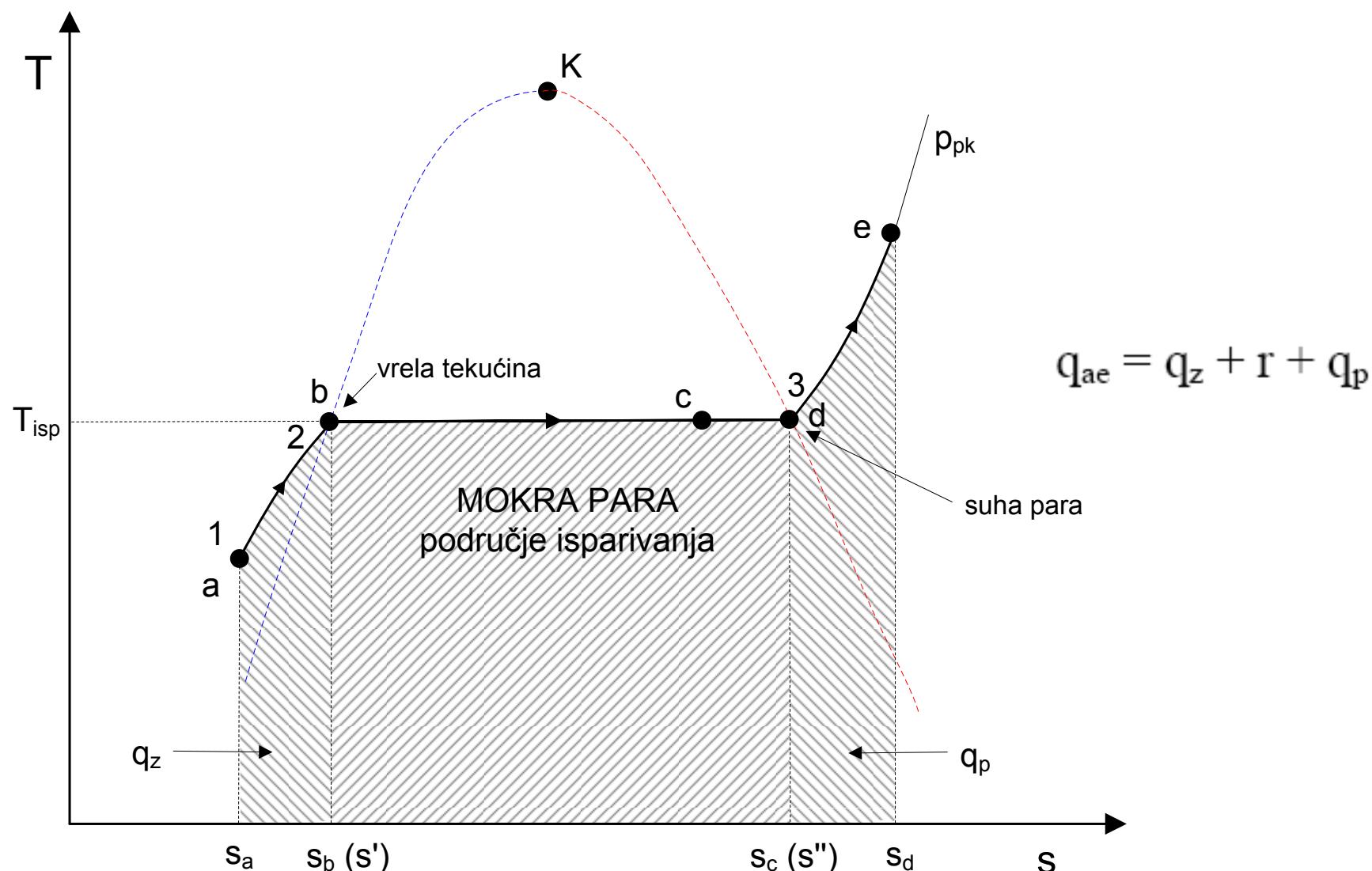
Eksergija vodene pare – proces isparivanja



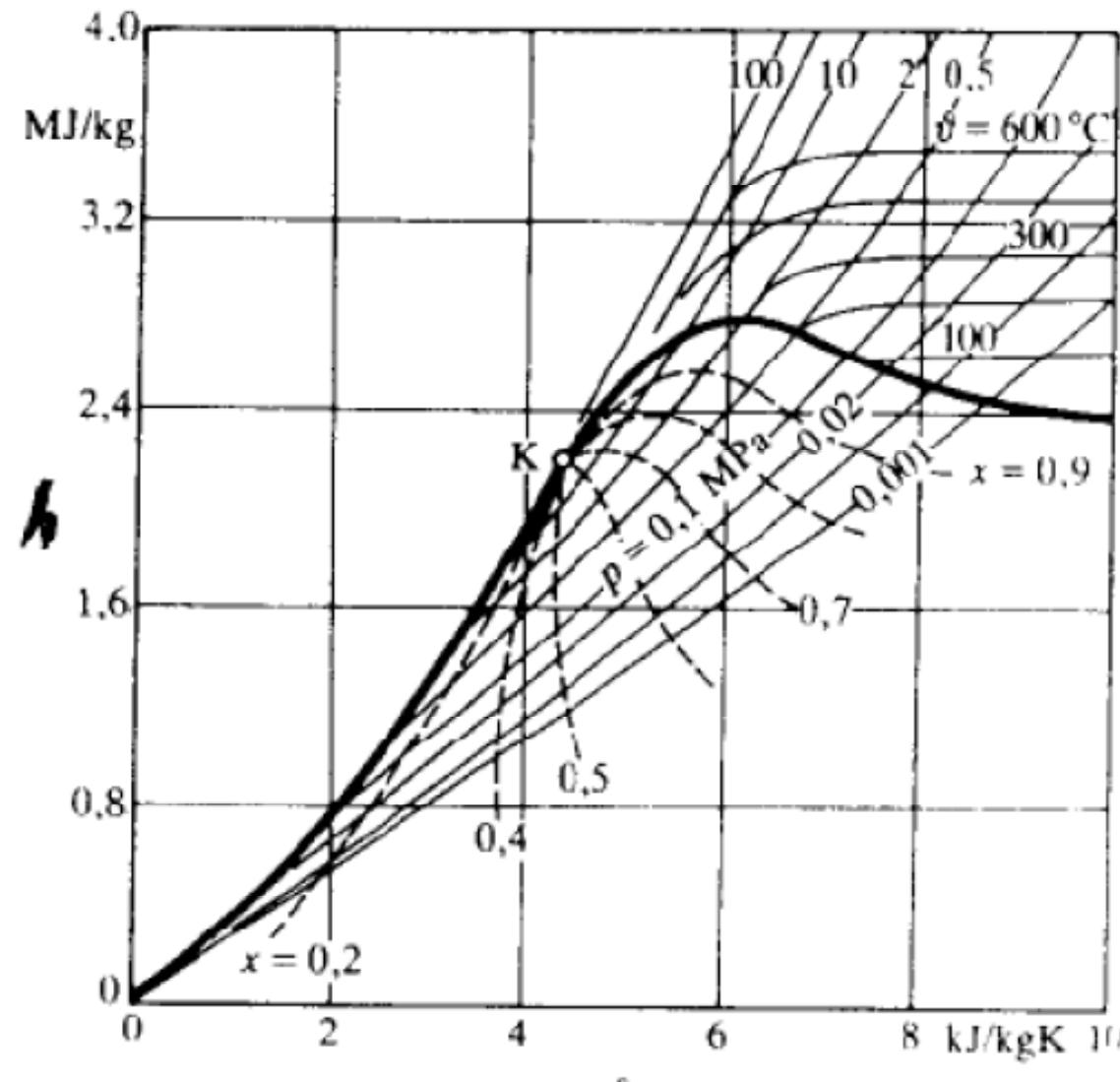
Proces zagrijavanja isparivanja vode, pregrijanja pare



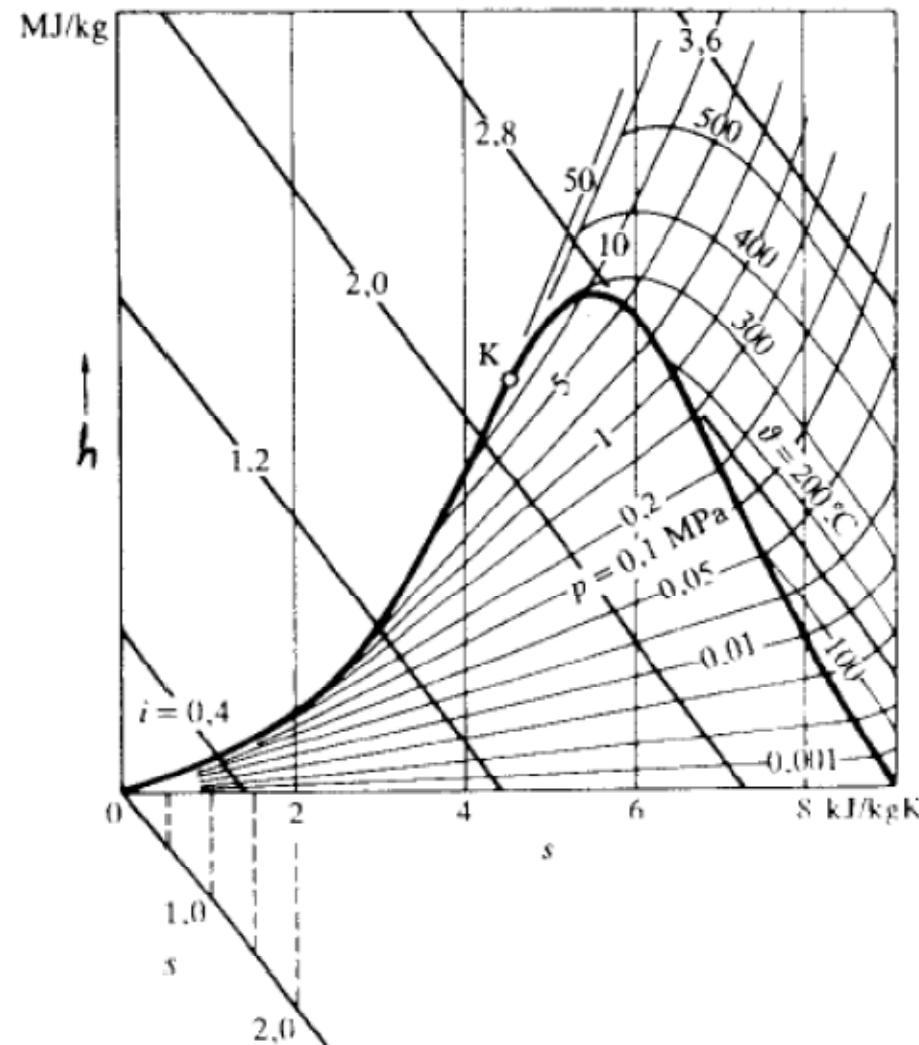
Toplinska energija za zagrijavanje, isparivanje i pregrijavanje



h,s – dijagram za vodu



Kosokutni h,s – dijagram za vodu

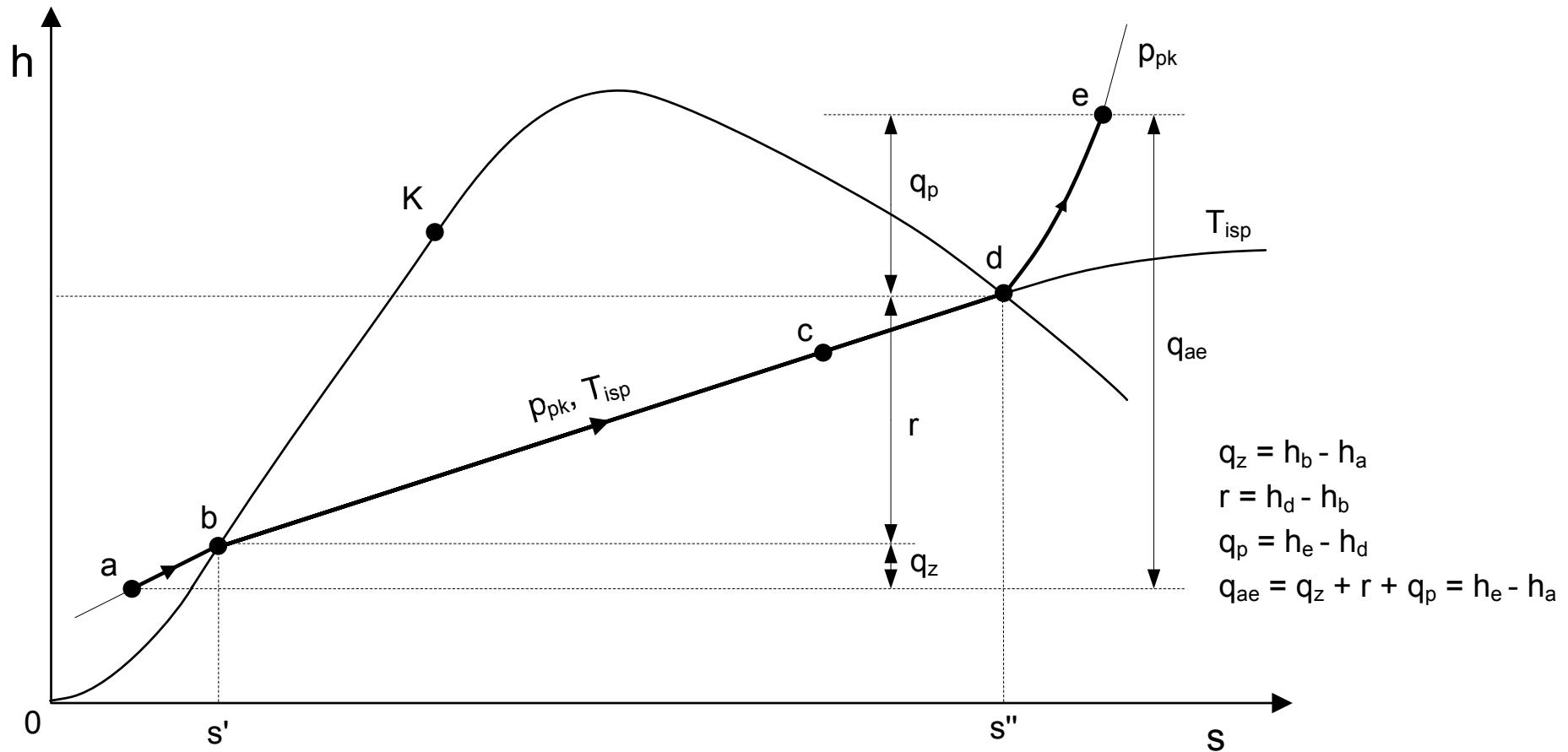


Entalpija zagrijavanja, isparivanja i pregrijavanja

$$dq = dh - vdp = dh \quad (dp = 0)$$

$$q_{ae} = q_z + r + q_p = (h_b - h_a) + (h_d - h_b) + (h_e - h_d) = (h_e - h_a)$$

Određivanje entalpija zagrijavanja, isparivanja i pregrijavanja iz h,s - dijagrama



Entalpija zagrijavanja, isparivanja i pregrijavanja

$$h_b - h_a = h' - h_a = c(T_{isp} - T_a)$$

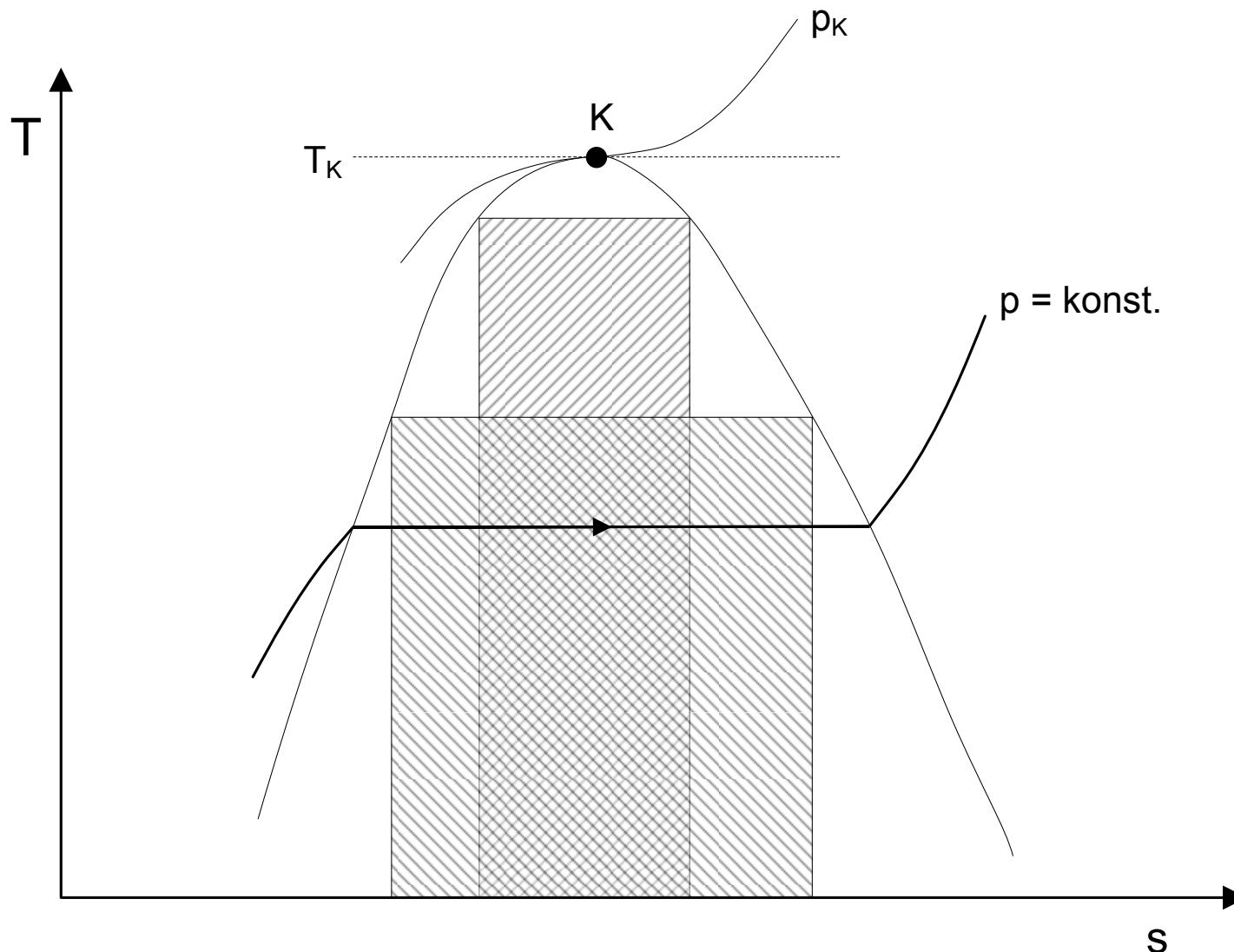
$$h_e - h_d = h_e - h'' = c_p (T_e - T_{isp})$$

$$T_d - T_b = T'' - T' = 0 \quad (T'' = T' = T_{isp})$$

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_p \approx \frac{r}{\delta T = 0} \rightarrow \infty$$

$$r = h_d - h_b = h'' - h' = u'' - u' + p(v'' - v')$$

Entalpija isparivanja u T,s – dijagramu



Entalpija zagrijavanja, isparivanja i pregrijavanja, mehanički rad promjene volumena i promjena UKE za vrijeme procesa

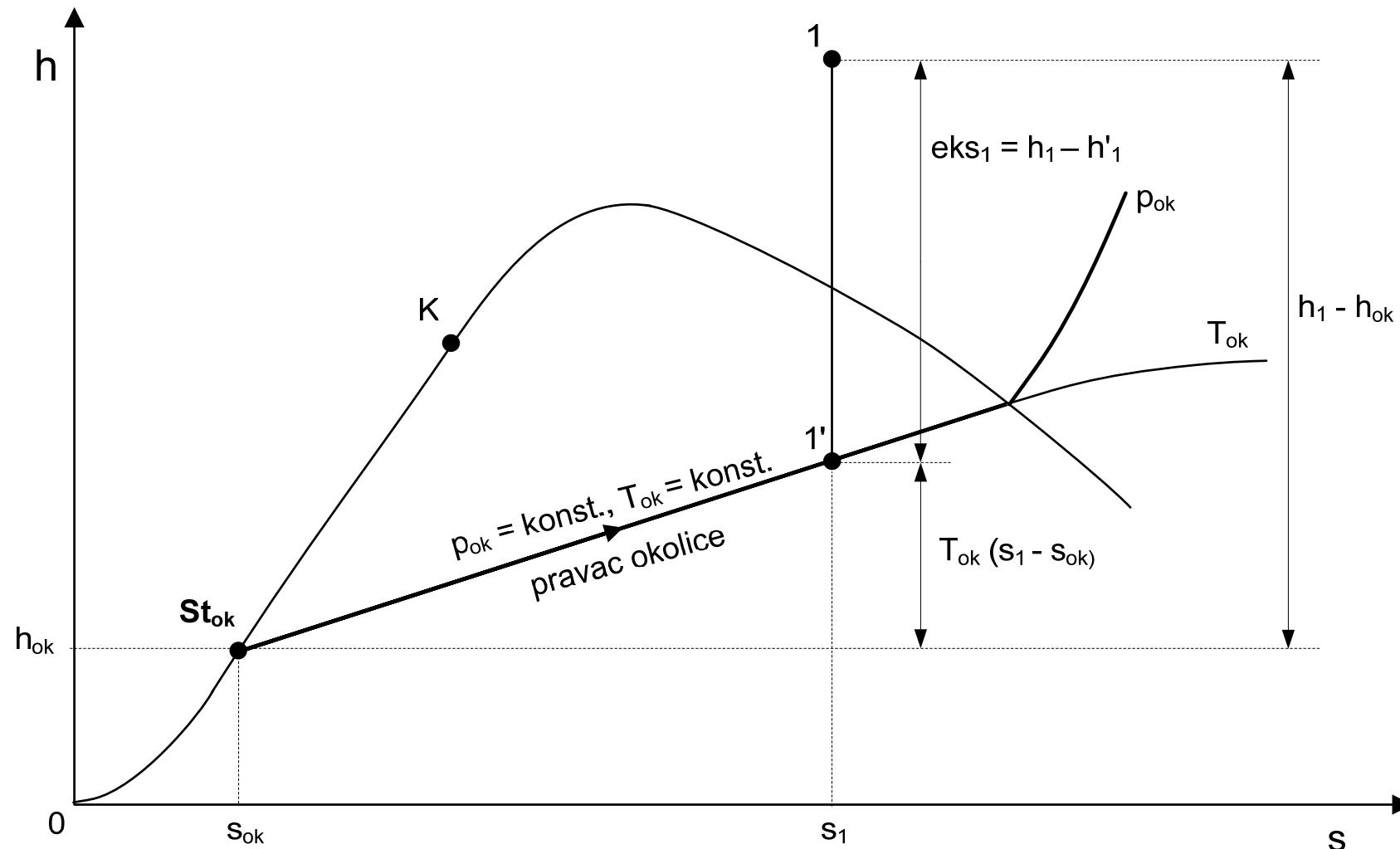
$$q_{ae} = q_z + r + q_p = \int_{s_a}^{s_b} Tds + \int_{s_b}^{s_d} Tds + \int_{s_d}^{s_e} Tds$$

$$r = \int_{s_b}^{s_d} Tds = T'(s_d - s_b) = T'(s'' - s')$$

$$w_{ae} = \int_{v_a}^{v'} pdv + \int_{v'}^{v''} pdv + \int_{v''}^{v_e} pdv - p(v' - v_a) + p(v'' - v') + p(v_e - v'') - p(v_e - v_a)$$

$$u_e - u_a = q_{ae} - w_{ae} = h_e - h_a - p(v_e - v_a)$$

Određivanje eksergije vodene pare iz h,s -dijagrama



$$eks_1 = h_1 - h'_{1'} = h_1 - h_{ok} - T_{ok}(s_1 - s_{ok})$$

Ukratko

Govorili smo o spoznajama 2. glavnog stavka termodinamike i odredili maksimalni mehanički rad koji se može dobiti iz različitih oblika energije. Pokazali smo kako se pomoću proračuna promjene entropije adijabatskog sustava određuju gubici mehaničkog rada (eksergije), uzrokovani odvijanjem realnih, nepovratljivih procesa, kao i kako se određuje, pomoću h,s – dijagrama, eksergija energije akumulirane u fluidu.

Primjer 1.

Adijabatski spremnik krutih stijenki podijeljen je adijabatskom pregradom u dva jednaka dijela, $0,5 \text{ m}^3$ svaki.

U jednom je dijelu idealni plin ($R=287,0 \text{ J/kgK}$, $\kappa=1,4$), a drugi je zrakoprazan. Podigne li se pregrada koliki će zbog toga biti gubitak mehaničkog rada po 1 kg plina? Temperatura je okoline 300K, a tlak 0,1 MPa.

Rj.

$$w_{gub} = T_{ok} \cdot \Delta s_{AS} [\text{J/kg}]$$

Primjer 1.

$$ds_{AS} = \frac{dq}{T} = \frac{du + pdv}{T} = c_v \frac{dT}{T} +$$
$$+ R \frac{dv}{v} = R \frac{dv}{v} (u = konst. \Rightarrow du = 0)$$

$$\delta s_{AS} = R \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{2v_1}{v_1} = R \ln 2$$

$$w_{gub} = T \cdot \Delta s [J/kg] =$$
$$= 300K \cdot 287,0 J/kgK \cdot \ln 2 = 59.679,97 J/kg$$

Primjer 2.

U kondenzatoru termoelektrane odvodi se u okolicu 2000 MWh toplinske energije u jednom satu. Ukoliko je temperatura rashladne vode (okolice) 20°C , a temperatura kondenzata (pare odnosno vode u kondenzatoru) 27°C , koliko se anergije iz termoelektrane odvodi u okolicu u jednom satu?

Rj.

anergija = energija - eksnergija

Primjer 2.

$$\begin{aligned} \text{anergija} &= q_{odv} - q_{odv} \left(1 - \frac{T_{ok}}{T_{kond}}\right) = \\ &= q_{odv} \left(1 - 1 + \frac{T_{ok}}{T_{kond}}\right) = 2.000 \cdot \frac{293,15}{300,15} = \\ &= 1.953,36 MWh \quad (2.000 MWh) \end{aligned}$$

Primjer 3.

Odredite maksimalni mehanički rad koji možemo dobiti iz 1 m³ vakuma. Tlak je okoline 100 kPa, a temperatura 300 K.

Rj.

Budući da vakuum ne sadrži masu, $m = 0$, to je

$U = mu = 0$, $S = ms = 0$, dobivamo:

$$Eks_{\text{vakuma}} = W_{\max \text{ vakuma}} = U - U_{\text{ok}} - T_{\text{ok}}(S - S_{\text{ok}})_s + \\ p_{\text{ok}}(V - V_{\text{ok}}) =$$

$$= [0 - 300 \cdot 0 + 100 \cdot (1 - 0)] \text{ kJ} = 100 \text{ kJ}$$

$V_{\text{ok}} = 0$: u stanju je okoline volumen vakuma jednak nuli

Primjer 3.

Objašnjenje: da bi se ostvario vakuum, pumpa za vakuum troši eksergiju (mehanički rad). Vakuum je dakle produkt obavljanja rada. Energija je neuništiva, taj mehanički rad (eksergija) ostaje pohranjen u vakuumu (u radom stvorenoj neravnoteži između vakuma i okolice); vakuum posjeduje ekserviju ili „radnu sposobnost“.

Primjer 4.

Akumulator automobila osigurava 5,2 MJ električne energije za pokretanje motora. Rad se akumulatora zamjenjuje s radom komprimiranog zraka tlaka 7 MPa i temperature 25°C .

Temperatura je okolice isto 25°C , tlak okolice 100 kPa, a $R_{\text{zraka}} = 287 \text{ J/kgK}$.

Koliki mora biti obujam spremnika zraka, u idealnom slučaju, da bi rad zraka bio jednak 5,2 MJ?

Primjer 4.

Odredimo eksergiju zraka tlaka 7 MPa i 25°C.
(Zrak u spremniku smatramo sustavom.)

$$eks = w_{\max} = u - u_{ok} - T_{ok}(s - s_{ok}) + p_{ok}(v - v_{ok})$$

$u - u_{ok} = 0$ (Temperatura je sustava jednaka temperaturi okolice.)

$$s - s_{ok} = -\delta s$$

$$ds = \frac{dq}{T} = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

$$\int_s^{s_{ok}} ds = s_{ok} - s = R \ln \frac{v_{ok}}{v} \cdot (dT = 0)$$

Primjer 4.

Dobivamo:

$$s - s_{ok} = -R \ln \frac{v_{ok}}{v} = -R \ln \frac{p}{p_{ok}} = \\ = -0,287 \text{ kJ / kgK} \cdot \ln \frac{7000}{100} = -1,219$$

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{0,287 \cdot 298,15}{7000} = 0,0122 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$v_{ok} = \frac{RT_{ok}}{p_{ok}} = \frac{0,287 \cdot 298,15}{100} = 0,856 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Primjer 4.

i dalje:

$$\begin{aligned} eks = w_{\max} &= 0 - 298,15 (-1,219) + \\ &+ 100(0,0122 - 0,856) = 279,06 \text{ kJ/kg}. \end{aligned}$$

Da bismo dobili rad od 5,2 MJ, masa zraka mora biti:

$$Eks = m \cdot eks \Rightarrow m = \frac{Eks}{eks} = \frac{5200}{279,1} = 18,63 \text{ kg}$$

a volumen zraka:

$$V = mv = 18,63 \text{ kg} \cdot 0,0122 \text{ m}^3/\text{kg} = \mathbf{0,227 \text{ m}^3}.$$

Što treba znati (naučiti) – 06 Ograničenja pretvorbama oblika energije u ekserviju (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- analitički oblik drugog glavnog stavka termodinamike
- Clausiusova nejednakost (Clausiusova matematička definicija drugog glavnog stavka termodinamike)
- donja granična krivulja
- drugi glavni stavak termodinamike (neke od formulacija)
- eksersetski stupanj djelovanja
- ekservija entalpije (otvorenog sustava)
- ekservija toplinske energije (unutrašnje energije)
- ekservija unutrašnje kaloričke energije (zatvorenog sustava)
- entalpija isparivanja u T,s – dijagramu
- faktor realnosti

Što treba znati (naučiti) – 06 Ograničenja pretvorbama oblika energije u eksnergiju (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- gornja granična krivulja
- gubitak eksnergije izazvan trenjem
- gubitak eksnergije pri prijelazu toplinske energije preko konačnih razlika temperatura
- gubitak eksnergije u kondenzatoru
- gubitak eksnergije zbog prijelaza toplinske energije preko konačnih razlika temperatura
- gubitak mehaničkog rada (eksergije)
- h,s – dijagram
- isparivanje vode i pregrijavanje vodene pare uz konstantni tlak – prikaz u T,v – dijagramu

Što treba znati (naučiti) – 06 Ograničenja pretvorbama oblika energije u ekserviju (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- kada je moguće energiju akumuliranu u nekom sustavu pretvoriti u mehanički rad (ekserviju)
- kritična izobara
- kritična temperatura
- kritično stanje (kritična točka)
- maksimalni korisni mehanički rad (ekservija) zatvorenog sustava
- maksimalni rad (ekservija) vrućih plinova
- mokra para
- Mollierov dijagram
- nepovratljivost procesa s trenjem
- određivanje ekservije i anergije

Što treba znati (naučiti) – 06 Ograničenja pretvorbama oblika energije u ekserviju (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- određivanje ekservije pomoću h,s – dijagrama
- određivanje ekservije plina pomoću h,s – dijagrama
- određivanje ekservije vodene pare iz h,s – dijagrama
- određivanje entalpija zagrijavanja, isparivanja i pregrijavanja iz h,s – dijagrama
- određivanje specifičnog toplinskog kapaciteta pomoću T,s – dijagrama
- parne tablice
- perpetuum mobile druge vrste (kombinirani rad desnokretnog i ljevokretnog kružnog procesa)
- povratljivi rad
- pravac okolice

Što treba znati (naučiti) – 06 Ograničenja pretvorbama oblika energije u eksnergiju (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- pregrijana para
- primjeri promjene nejednolike raspodjele gustoće energije u jednoliku
- princip rasta entropije
- promjena entropije sustava (idealnog plina, kapljevine i krutine)
- stanje okolice
- suha (zasićena ili suhozasićena) para
- što s energetskog stajališta predstavlja (znači) porast entropije
- T,s – dijagram
- T,s – dijagram kružnog procesa

Što treba znati (naučiti) – 06 Ograničenja pretvorbama oblika energije u eksnergiju (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)

- T,s – dijagram promjene stanja vode i vodene pare za vrijeme zagrijavanja, isparivanja i pregrijavanja
- T,s – dijagrami procesa s idealnim plinom
- termodinamička ravnoteža

Energijeske tehnologije

**Postupci povećanja termičkog stupnja djelovanja u
termoelektranama s parnim turbinama**

Vladimir Mikuličić, Davor Grgić, Zdenko Šimić, Marko Delimar
FER, 2014.



Teme:

1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
- 4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama**
5. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
6. Geotermalna energija
7. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
8. Potrošnja električne energije
9. Prijenos i distribucija el. en.
10. Energija Sunca
11. Energija vjetra
12. Energija biomase, Gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
13. Skladištenje energije
14. Energija, okoliš i održivi razvoj

Sadržaj

Neprovedivost Carnotovog kružnog procesa

Postupci povećanja termičkog stupnja djelovanja

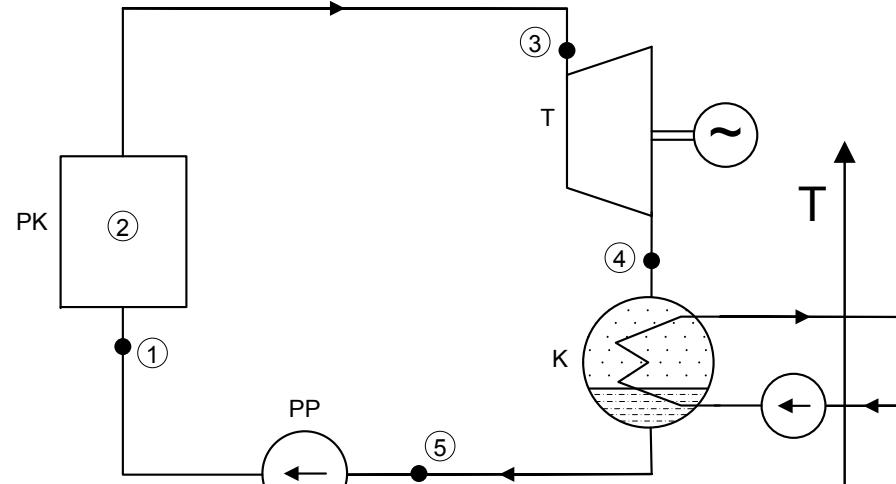
- proces sa suhom parom
- proces s pregrijanom parom
- proces s međupregrijanjem pare
- proces sa zagrijavanjem kondenzata
- utjecaj tlaka i temperature svježe pare
- kombinirana proizvodnja pare i električne energije

Ukratko

Pitanje, primjeri

Što treba znati (naučiti)

Neprovodivost Carnotovog kružnog procesa

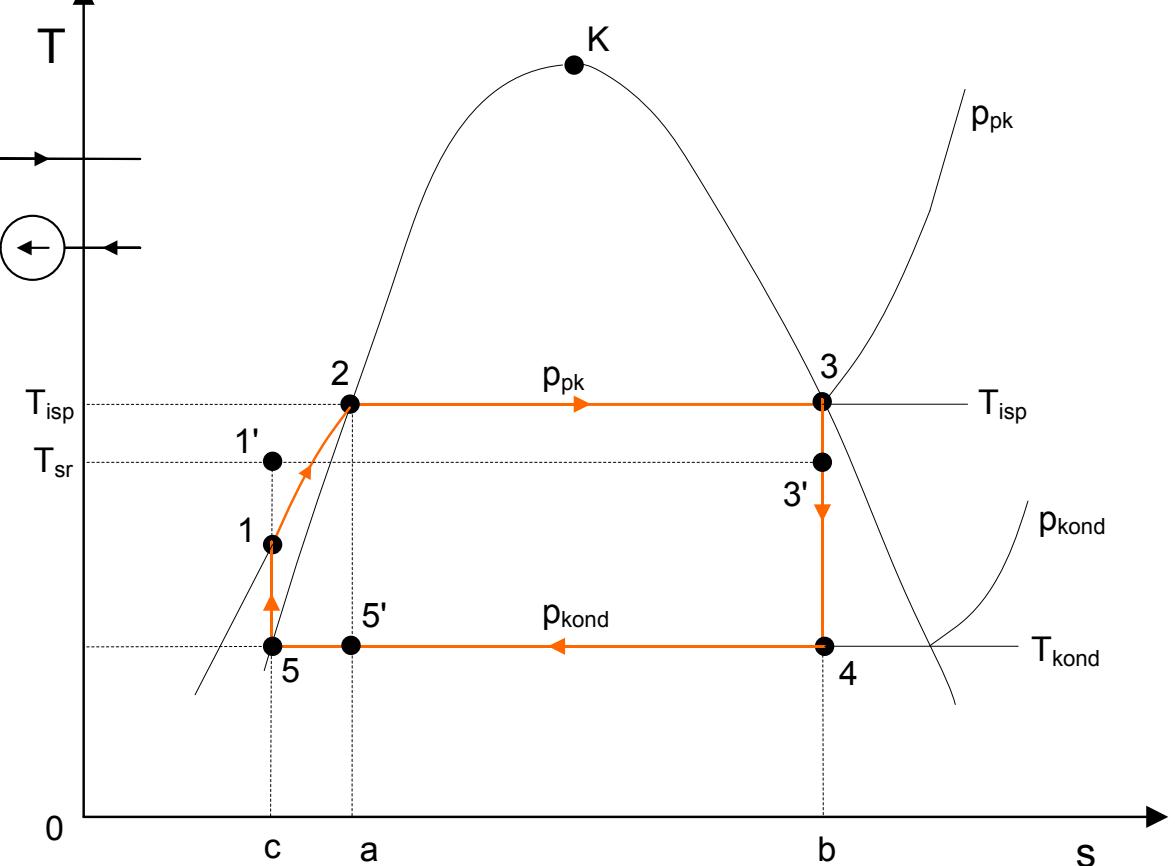


$$\eta_{ter} = 1 - \frac{|q_{odv}|}{q_{dov}}$$

$$\eta_{terCKP} = 1 - \frac{T_{kond}}{T_{isp}}$$

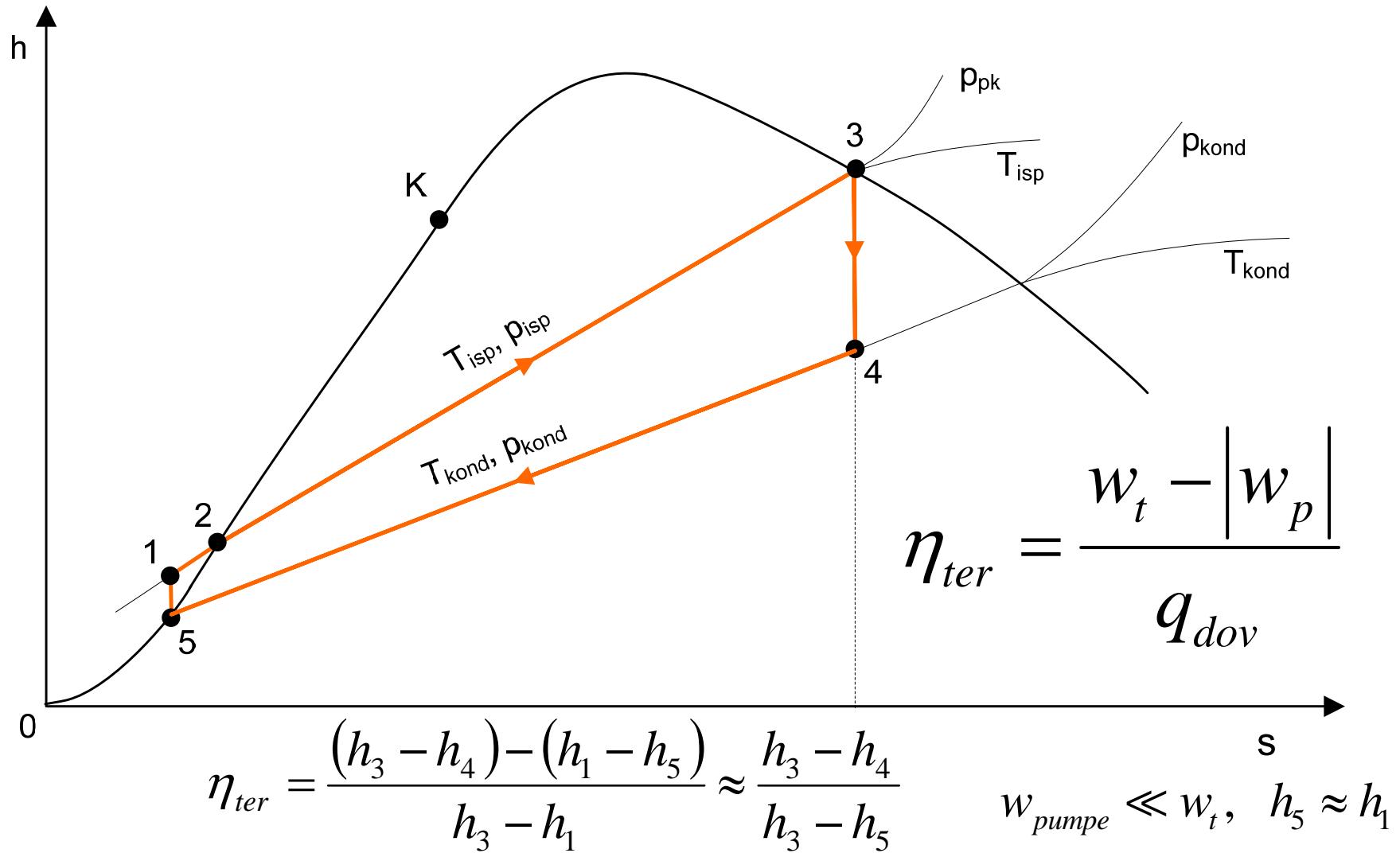
$$\eta_{ter} = 1 - \frac{T_{kond}}{T_{sr}}$$

$$T_{sr} < T_{isp}$$



Desnokretni Carnotov kružni proces s mokrom (suhom) parom

h,s – dijagram Rankineovog kružnog procesa

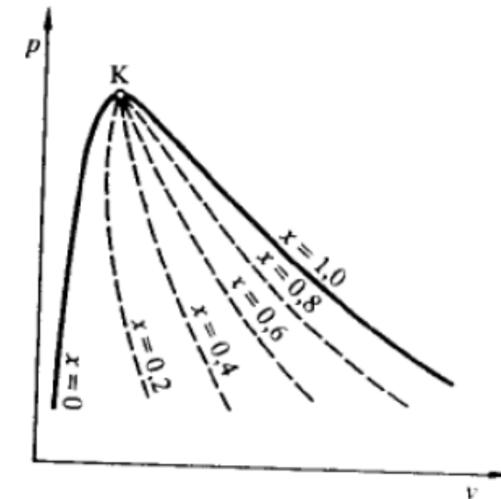
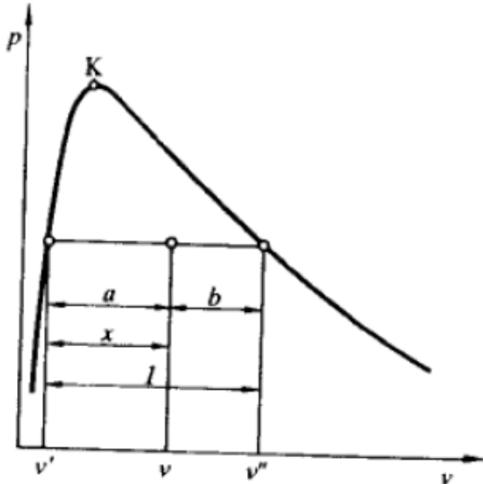


Sadržaj pare x (sadržaj vlage 1-x)

$$x = \frac{m''}{m' + m''}$$

$$V = m'v' + m''v''$$

$$m = m' + m''$$



$$v = \frac{V}{m} = \frac{m'}{m' + m''} v' + \frac{m''}{m' + m''} v''$$

$$\frac{v - v'}{v'' - v'} = \frac{x}{1} = \frac{a}{a + b}$$

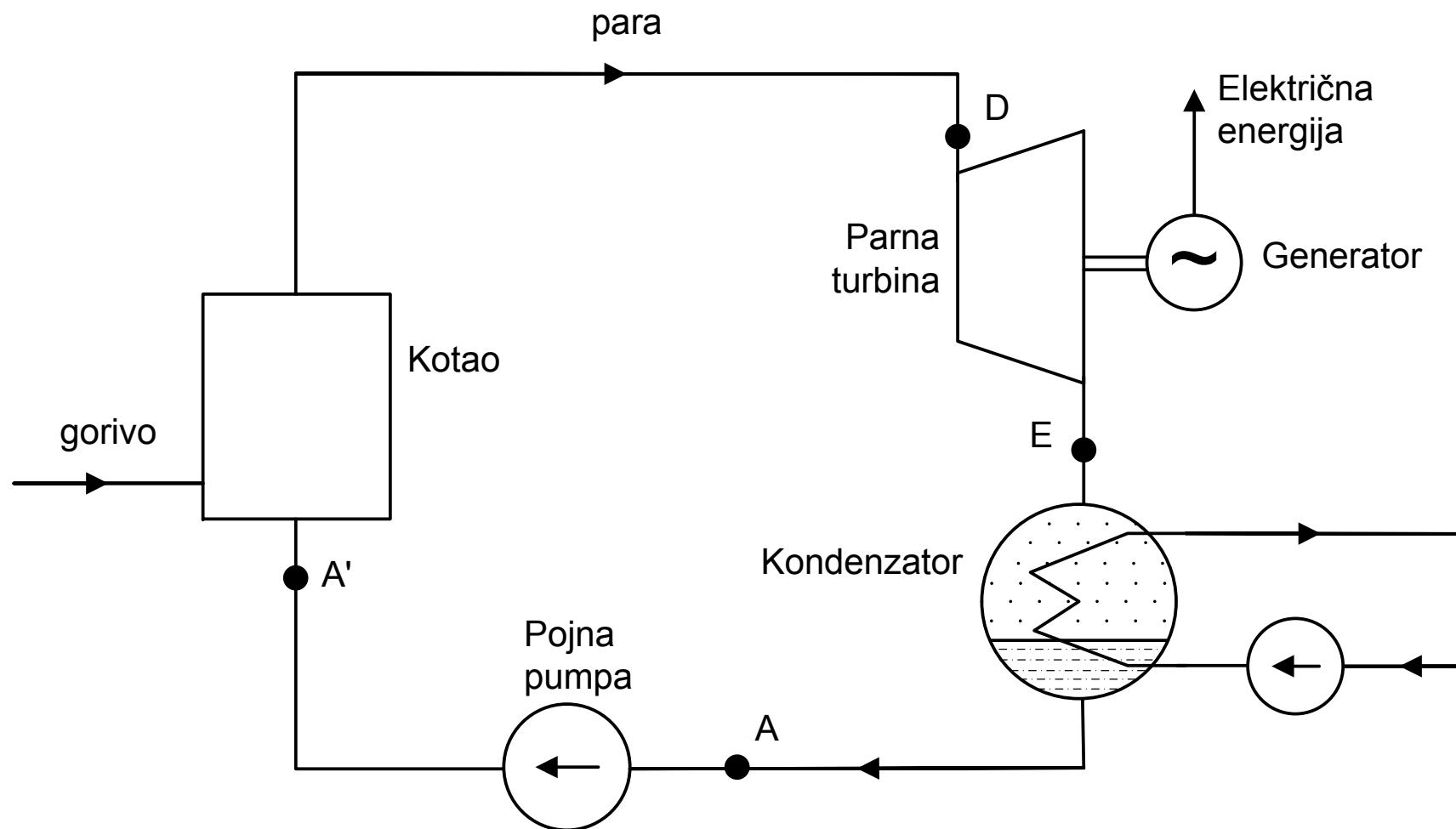
$$v = (1 - x)v' + xv'' = v' + x(v'' - v')$$

$$u = u' + x(u'' - u')$$

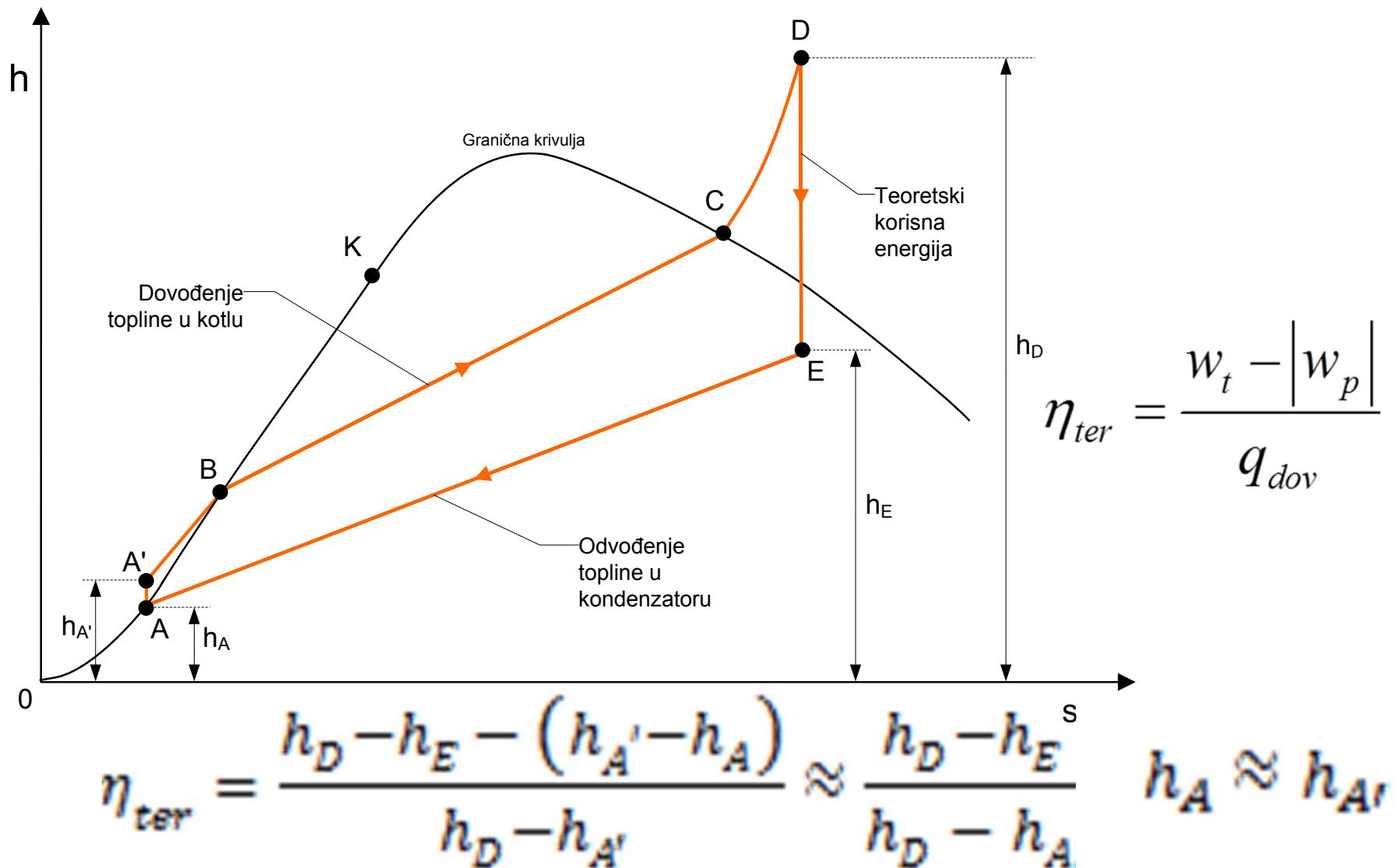
$$h = h' + x(h'' - h')$$

$$s = s' + x(s'' - s')$$

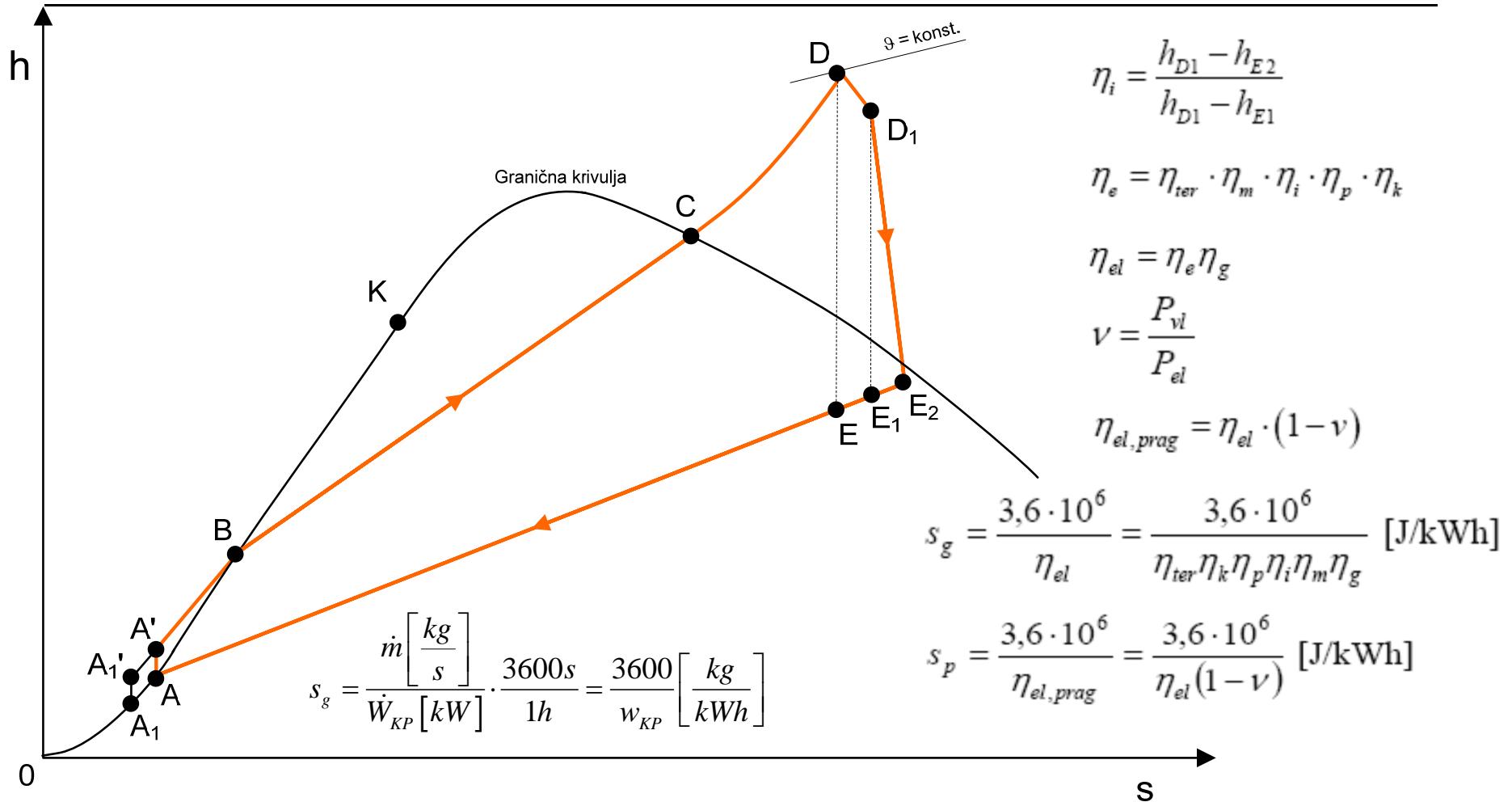
Shematski prikaz kružnog procesa u kondenzacijskoj termoelektrani



Povratljivi kružni proces u kondenzacijskoj termoelektrani

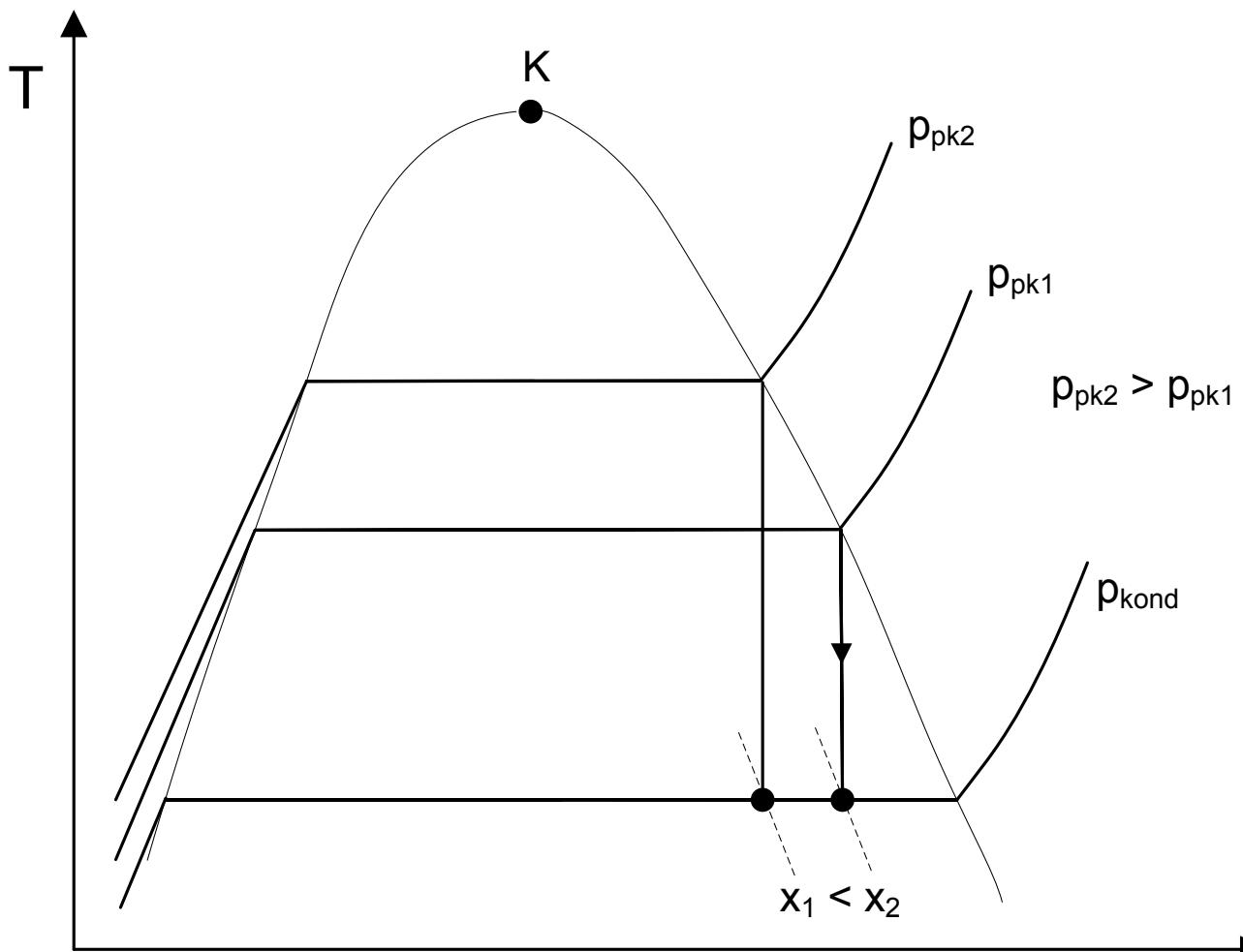


Realni kružni proces u kondenzacijskoj termoelektrani



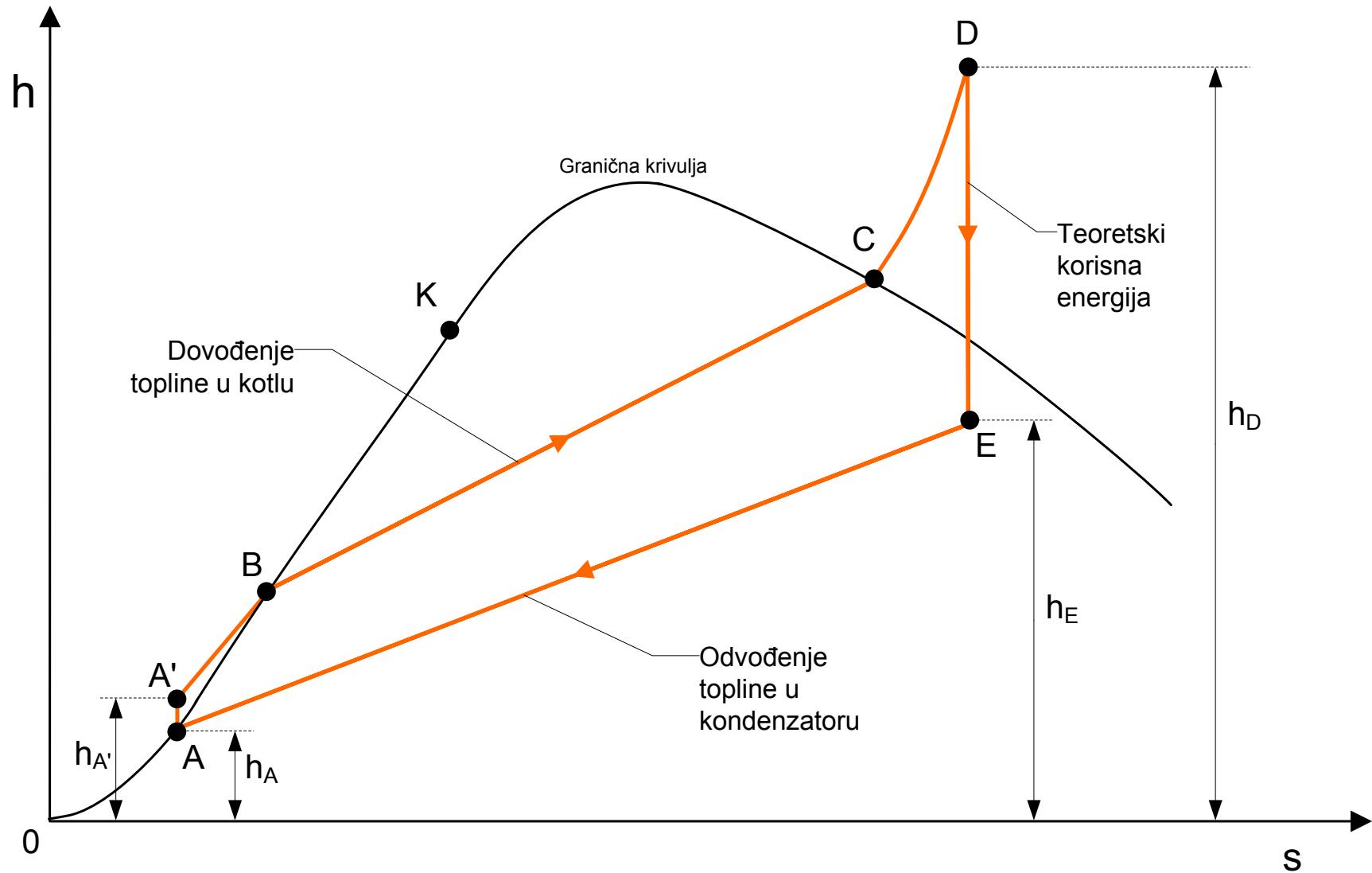
Odlučujući utjecaj na stupanj djelovanja termoelektrane ima termički stupanj djelovanja, koji je normalno i najmanji, pa je razumljivo nastojanje da se termički stupanj djelovanja poboljša (poveća).

Proces sa suhom parom

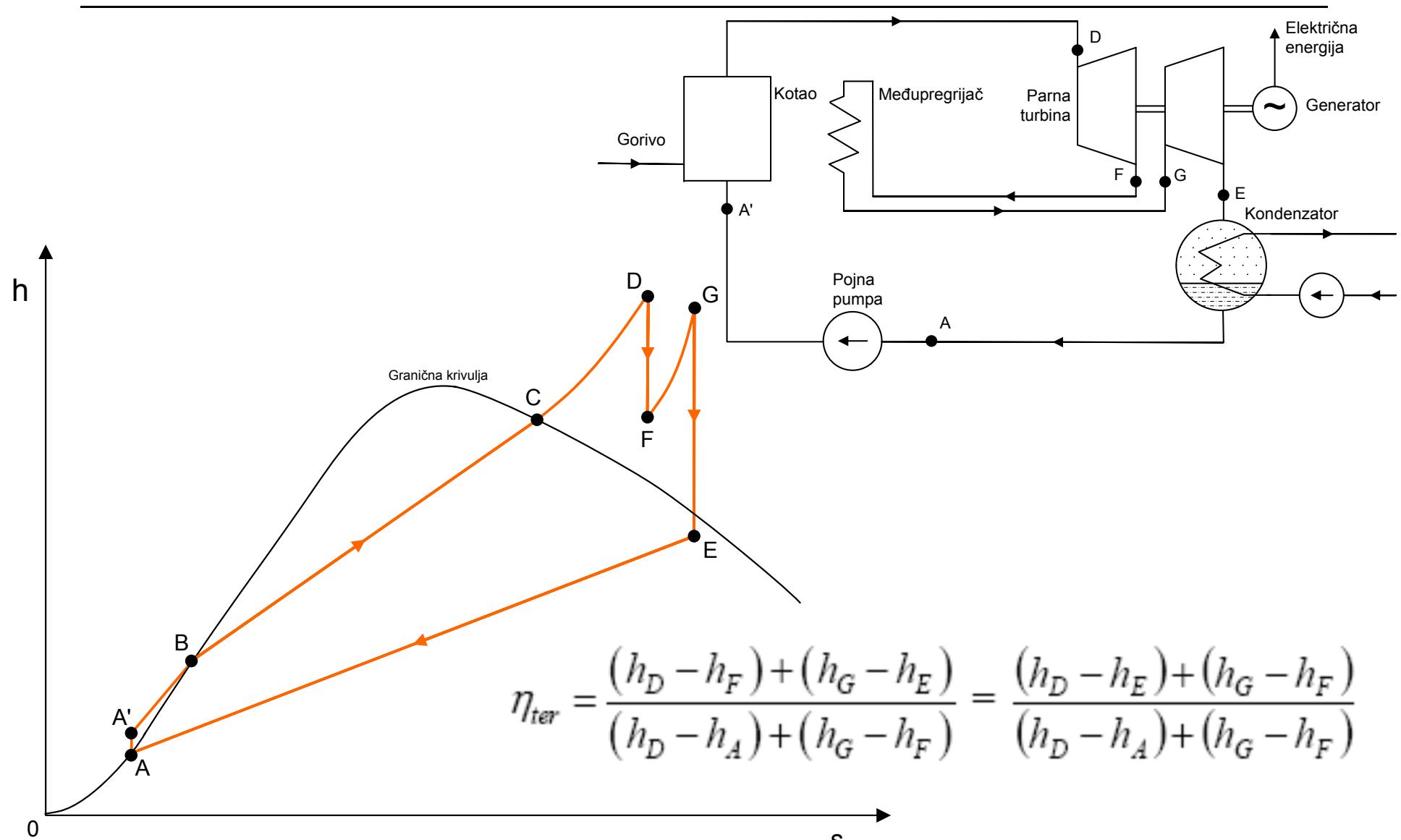


**Povećanje sadržaja vlage na kraju ekspanzije
uzrokovano povišenjem tlaka suhe pare**

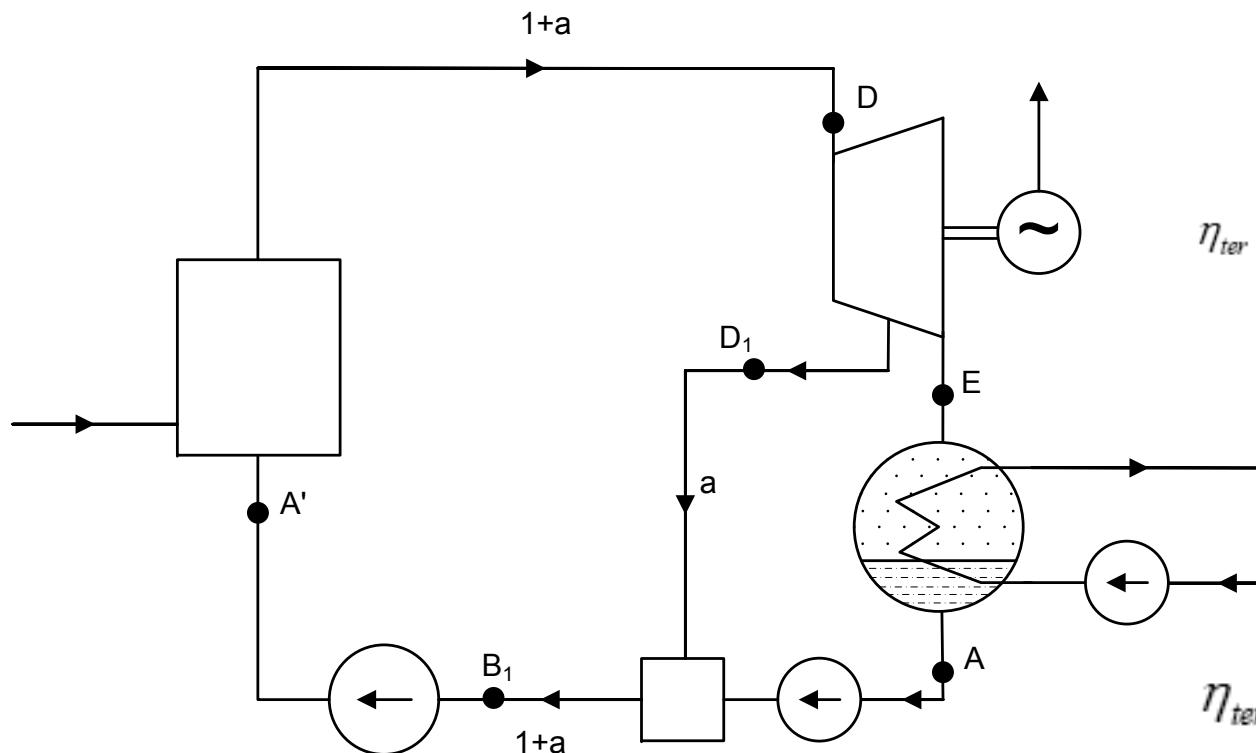
Proces s pregrijanom parom



Proces s međupregrijanjem pare



Proces sa zagrijavanjem kondenzata



$$a \cdot (h_{D1} - h_{B1}) = 1 \cdot (h_{B1} - h_A) + 1 \cdot (h_D - h_E) + a \cdot (h_D - h_{D1})$$

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

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

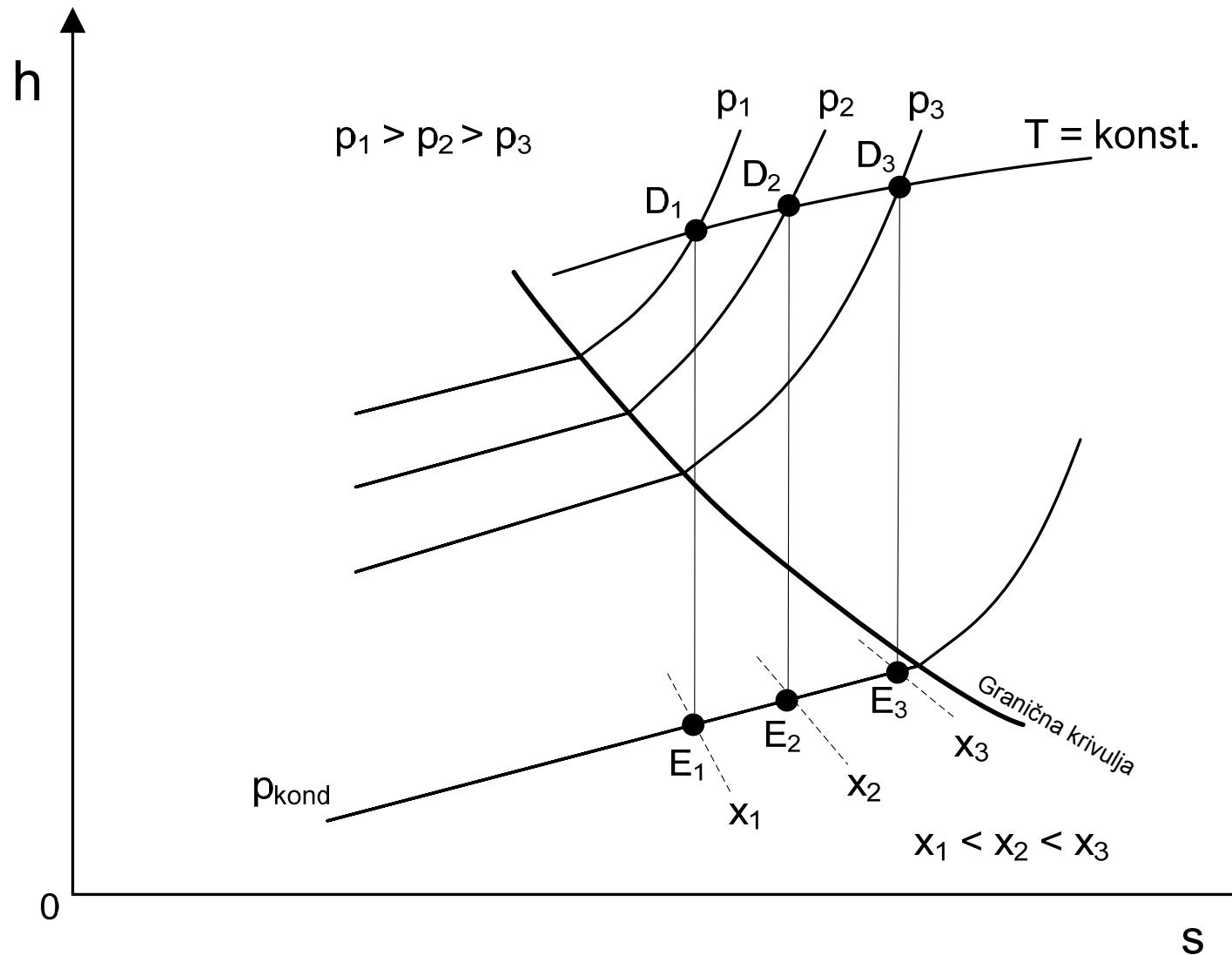
Uvaživši relaciju $a \cdot (h_{D1} - h_{B1}) = 1 \cdot (h_{B1} - h_A)$

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

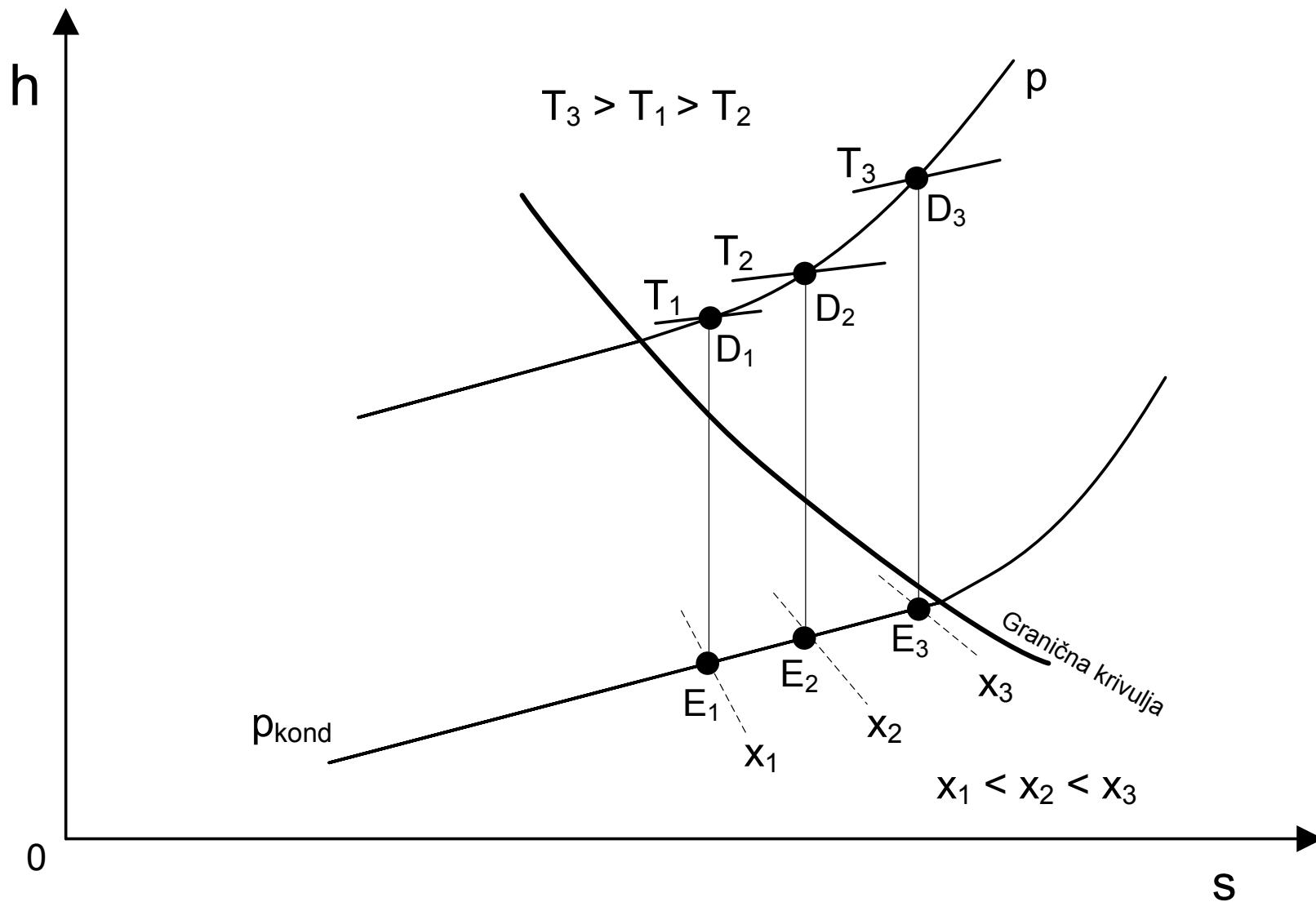
$$\eta_{ter} = \frac{h_D - h_E + a(h_D - h_{D1})}{(1+a)(h_D - h_{B1})}$$

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

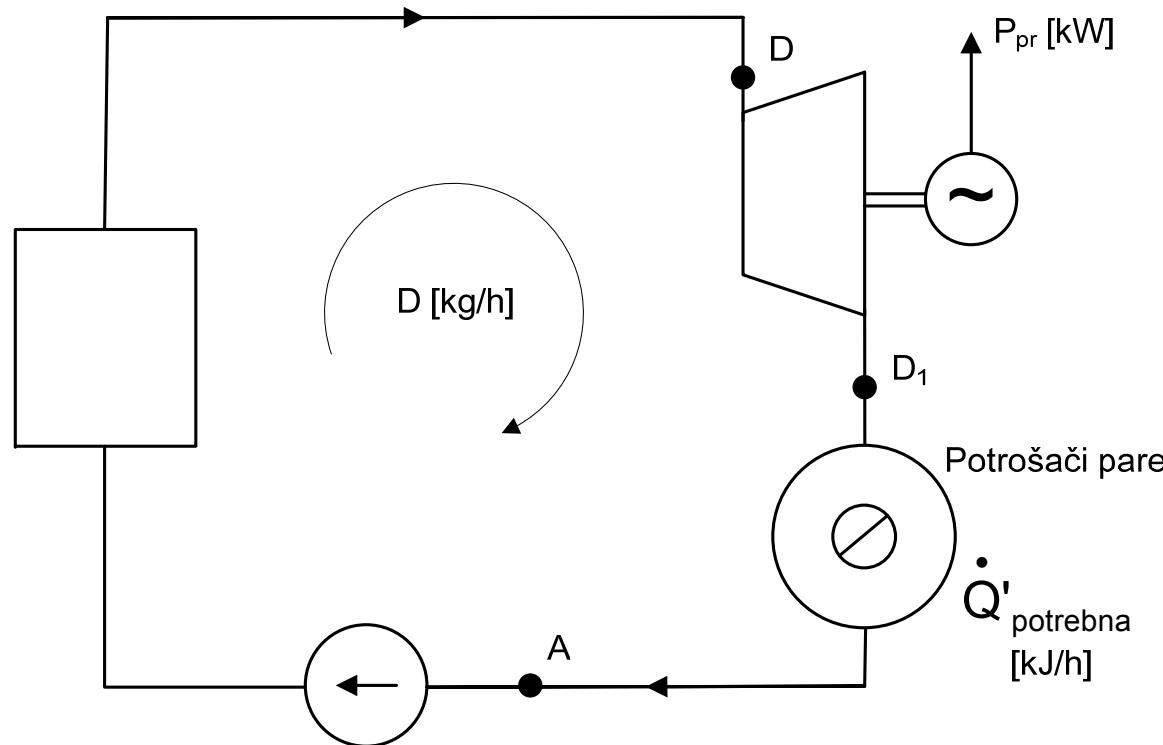
Utjecaj tlaka svježe pare



Utjecaj temperature svježe pare



Kombinirana proizvodnja pare i električne energije



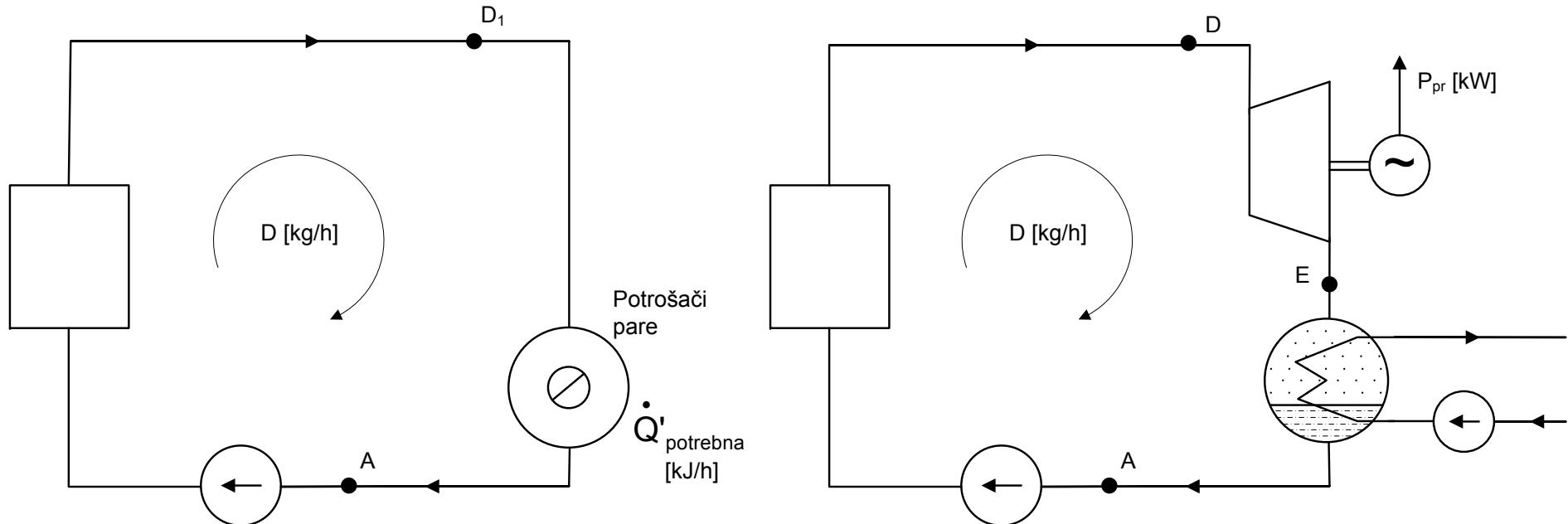
$$D = \frac{\dot{Q}'_p}{h_{D1} - h_A} [\text{kg}/\text{h}]$$

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

$$\dot{Q}'_{tr} = \dot{Q}'_p + P_{pr} \quad \dot{Q}'_{dov} = D(h_D - h_A) [\text{kJ}/\text{h}]$$

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

Odvojena proizvodnja pare i električne energije



$$D_p = \frac{\dot{Q}''_p}{h_{D1} - h_A} [\text{kg/h}] \quad D_e = \frac{P_{pr}}{h_D - h_E} [\text{kg/h}] \quad \dot{Q}''_{dov} = D_p(h_{D1} - h_A) + D_e(h_D - h_A)$$

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

Usporedba stupnjeva djelovanja

$$P_{pr} = P_{tr} \text{ i } \dot{Q}'_p = \dot{Q}''_p \quad D_e(h_D - h_E) = P_{tr} = P_{pr} = D(h_D - h_{D1})$$

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

$$P_{tr} = D_e(h_D - h_E) \quad D_e = \frac{P_{tr}}{h_D - h_E} \quad P_{tr} = P_{pr} \quad D = \frac{P_{pr}}{h_D - h_{D1}}$$

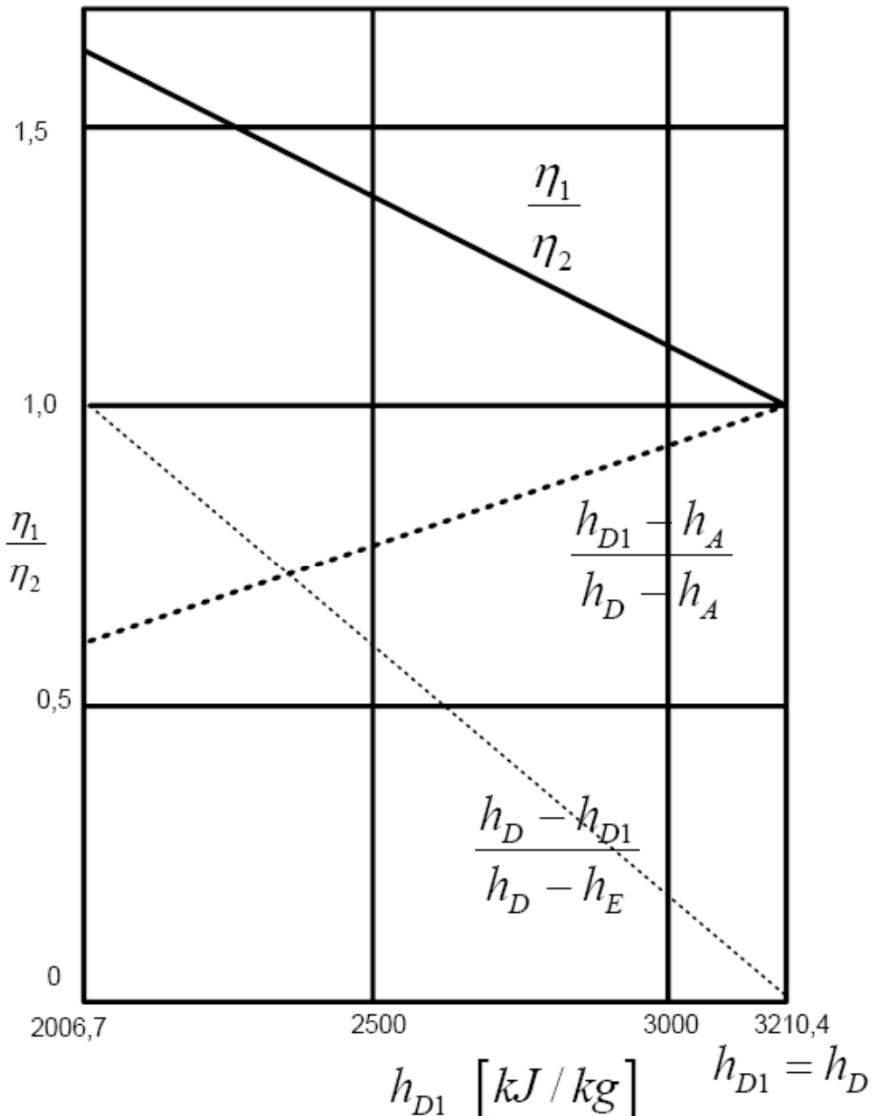
$$\eta_2 = \frac{(h_{D1} - h_A) + (h_D - h_{D1})}{(h_{D1} - h_A) + \frac{h_D - h_{D1}}{h_D - h_E}(h_D - h_A)}$$

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{h_{D1} - h_A}{h_D - h_A} + \frac{h_D - h_{D1}}{h_D - h_E}$$

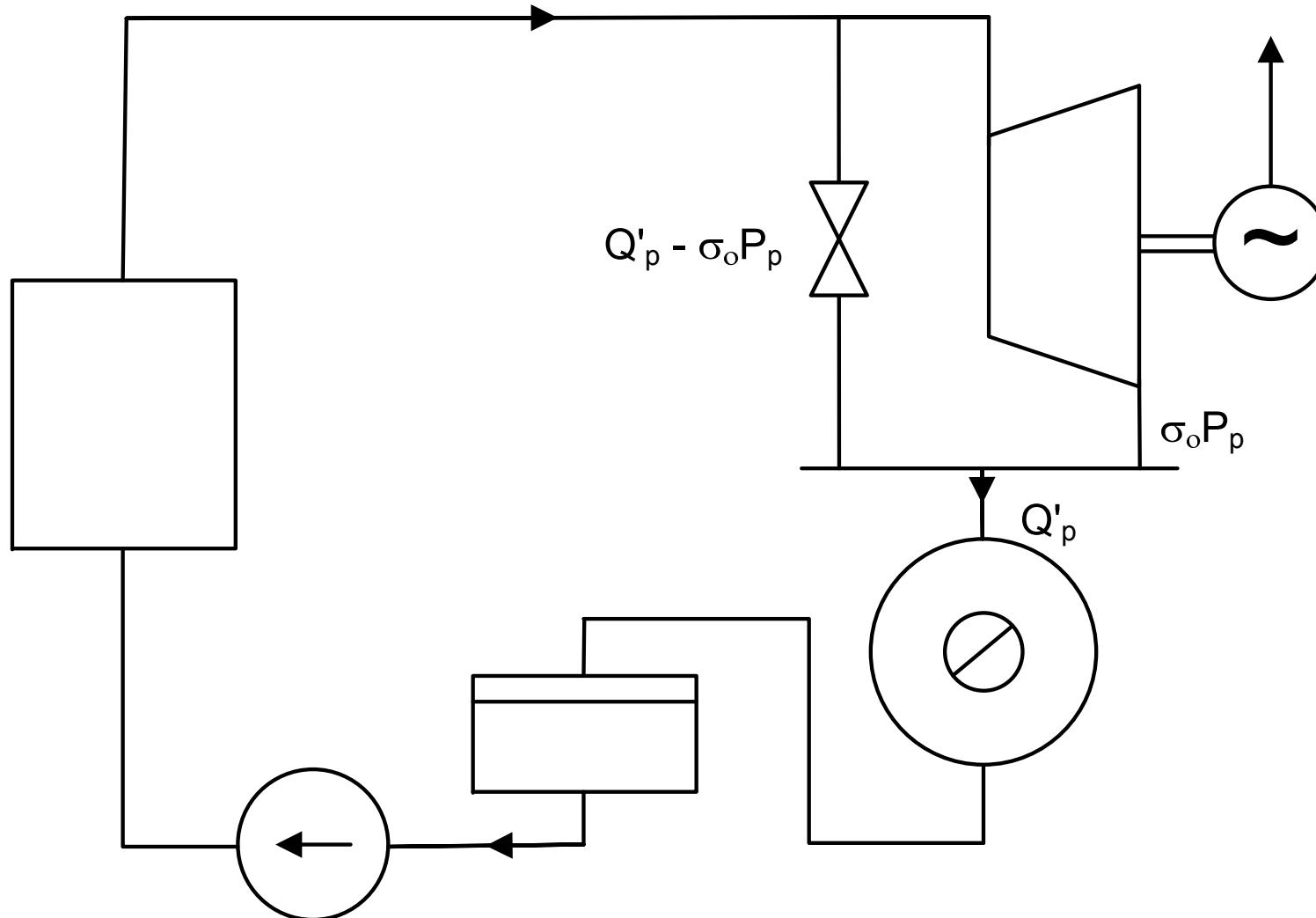
Usporedba stupnjeva djelovanja

- h_{D1} ovisi o potrebama parnih potrošača
- vrijednosti su h_D , h_E i h_A određene izvedbom termoelektrane
- h_{D1} se kreće u granicama h_D i h_E
- za sve $h_{D1} < h_D$ stupanj je djelovanja η_1 veći od η_2 jer je $\eta_1/\eta_2 > 1$

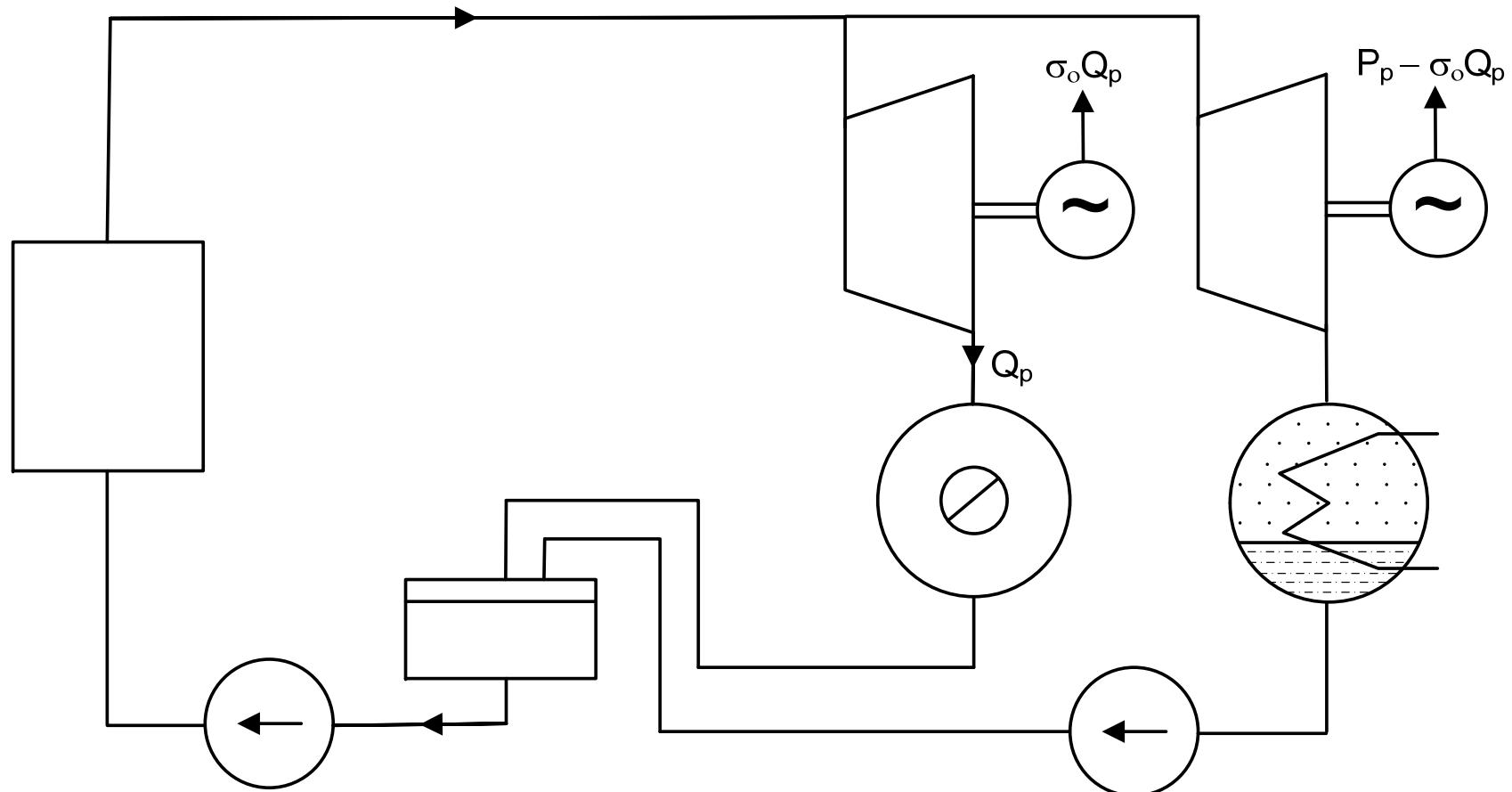
$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{h_{D1} - h_A}{h_D - h_A} + \frac{h_D - h_{D1}}{h_D - h_E}$$



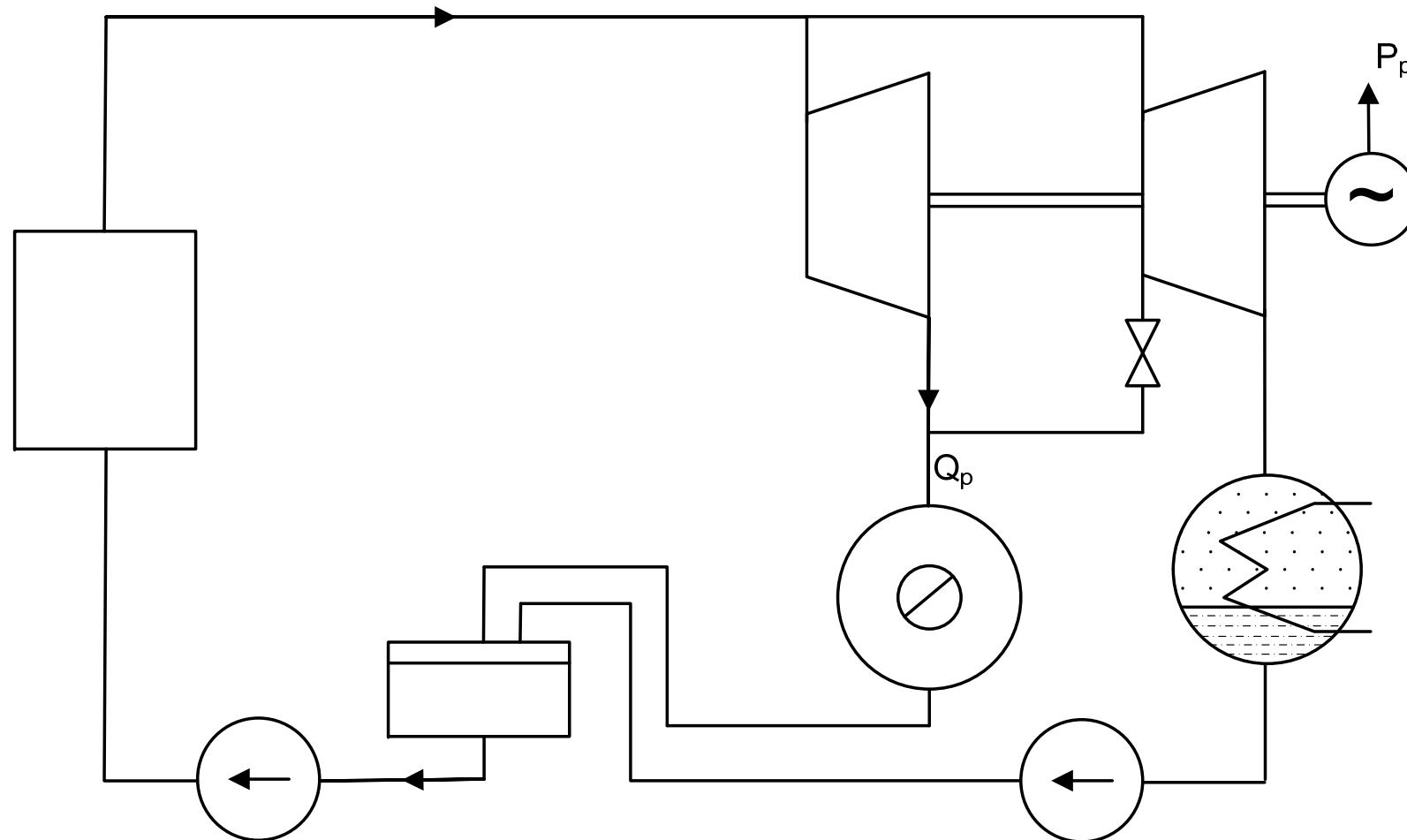
Različite sheme spoja



Različite sheme spoja



Različite sheme spoja



Ukratko

Govorili smo o Rankineovom kružnom procesu, procesu koji se, zbog nemogućnosti provođenja Carnotovog kružnog procesa, odvija u termoelektranama s parnim turbinama.

Opisali smo realne procese u termoelektrani i definirali pokazatelje takvih procesa: stupnjeve djelovanja.

Budući da je među njima najvažniji, i ujedno najlošiji (najmanji), termički stupanj djelovanja, predstavili smo procese njegovog povećanja.

Pitanje - zašto se mučiti?

Prijatelji, A i B , zahvaćeni snježnom mečavom u planini, utočište nalaze u trošnoj pastirskoj kolibi sa samo jednom prostorijom, srećom, opremljenoj sa željeznom peći i gomilom drva pripremljenoj za loženje.

A predloži da odmah zapale vatru, kako se ne bi smrznuli, no, B odbija, s obrazloženjem da ionako ne mogu povećati ukupnu energiju molekula u sobi pa čemu se onda mučiti bacajući drva u vatru? Koji je prijatelj u pravu?

[Uputa: oba, s obzirom na to što izriču. Zašto? Zašto onda svejedno grijemo prostorije iako nisu hermetički zatvorene (propuštaju zrak)?]

Primjer 1.

Spremnik obujma 2m^3 sadrži mokru paru pod tlakom 500 kPa:

$1,5\text{m}^3$ zasićene pare i $0,5\text{m}^3$ vrele kapljevine.

Odredite sadržaj pare i masu mokre pare u spremniku.

Iz tablica dobivamo:

$$v' = v_{\text{vode}} = 0,0011 \text{ m}^3/\text{kg};$$

$$v'' = v_{\text{pare}} = 0,375 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Vrijede odnosi:

$$V_{\text{vode}} = (1-x)m v_{\text{vode}} \quad \text{i} \quad V_{\text{pare}} = x m v_{\text{pare}}$$

Iz te dvije jednadžbe određujemo x:

Primjer 1.

$$x = \frac{v_{vode} V_{pare}}{v_{pare} V_{vode} + v_{vode} V_{pare}} =$$
$$= \frac{0,0011 \cdot 1,5}{0,375 \cdot 0,5 + 0,0011 \cdot 1,5} = 8,72 \cdot 10^{-3}$$

$$x = \frac{m''}{m} \Rightarrow m = \frac{m''}{x} \Rightarrow m'' = xm$$

$$V_{pare} = xm v_{pare}$$

$$m = \frac{V_{pare}}{x v_{pare}} = \frac{1,5}{8,72 \cdot 10^{-3} \cdot 0,373} = 461 kg$$

Primjer 2.

Snaga je parne turbine 5 MW. Tlak je vodene pare na ulazu u turbinu 2 MPa, temperatura 400°C , brzina 50 m/s, a geodetska visina 10 m. Na izlazu iz turbine tlak je vodene pare 15 kPa, sadržaj pare 90%, brzina 180 m/s, a geodetska visina 6 m.

- Usporedite veličine δh , δe_k i δe_p .
- Koliki je rad 1 kg vodene pare koji prostruji kroz turbinu?
- Koliki je maseni protok vodene pare kroz turbinu?

Na ulazu u turbinu entalpija je (pregrijane) pare 3248,7097 kJ/kg, a na izlazu, radi se očito o mokroj pari, vrijednosti su entalpije ove: $h' = 225,9742 \text{ kJ/kg}$ i $h'' = 2599,2252 \text{ kJ/kg}$.

Proces u parnoj turbini, koju smatrajte adijabatskim sustavom, promatrazte kao idealni, jednodimenzionalni, stacionarni, strujni proces.

Primjer 2.

Rj.

a) $h_2 = h' + x(h'' - h') = 225,9742 - 0,9(2599,2252 - 225,9742) \frac{kJ}{kg} =$

$$= 2361,9 \frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$\delta h = (h_2 - h_1) = (2361,9 - 3248,7097) \frac{kJ}{kg} = -886,81 \frac{kJ}{kg}$$

$$\delta e_k = \frac{(c_2^2 - c_1^2)}{2} = \frac{(180^2 - 50^2)}{2} \frac{m^2}{s^2} \left(\frac{1 \frac{kJ}{kg}}{1000 \frac{m^2}{s^2}} \right) = 14,95 \frac{kJ}{kg}$$

Primjer 2.

$$\delta e_p = g(z_2 - z_1) = 9,81 \frac{m}{s^2} (6 - 10)m \cdot \left(\frac{\frac{kJ}{kg}}{1000 \frac{m^2}{s^2}} \right) = -0,04 \frac{kJ}{kg}$$

b)

$$\begin{aligned}\dot{m} \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1 \right) &= \dot{W}_t + \dot{m} \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2 \right) / \dot{m} \Rightarrow \\ w_t &= - \left[(h_2 - h_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right] = -(\delta h + \delta e_k + \delta e_p) = \\ &= -(-886,81 + 14,95 - 0,04) \frac{kJ}{kg} = 871,9 \frac{kJ}{kg}\end{aligned}$$

Primjer 2.

c)

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}_t}{w_t} = \frac{5000 \frac{kJ}{s}}{871,9 \frac{kJ}{kg}} = 5,73 \frac{kg}{s}$$

Rasprava.

Primjer 3.

Termoelektrana radi između graničnih tlakova: 10 MPa na ulazu u turbinu i 20 kPa na ulazu u pumpu u kojima procese smatrajte izentropskim a Rankineov kružni proces idealnim. Odredite omjer tehničkih radova turbine i pumpe. Poznate su vrijednosti entalpija na ulazu i izlazu iz parne turbine: 4707,2 kJ/kg i 2608,9 kJ/kg, te specifični volumen kondenzata na ulazu u pojnu pumpu: 0,001017 m³/kg. Promjenu potencijalne i kinetičke energije vode u procesu upumpavanja vode u parni kotao zanemarite.

Rj.

$$\begin{aligned} w_{t \text{ turbine}} &= h_{\text{ulaz}} - h_{\text{izlaz}} = \\ &= 4707,2 \text{ kJ/kg} - 2608,9 \text{ kJ/kg} = 2098,3 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Primjer 3.

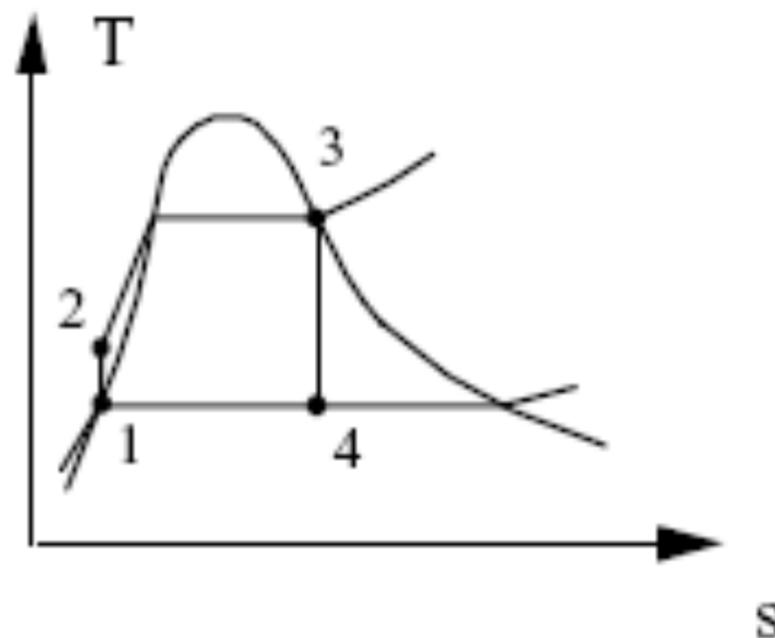
$$\left| w_{t \text{ pump}} \right| = \int_{p_{ulaza}}^{p_{izlaza}} vdp = 0,001017 \frac{m^3}{kg} (10.000 - 20) kPa = \\ = 10,15 \frac{kJ}{kg}$$

$$\frac{w_{t \text{ turbine}}}{w_{t \text{ pump}}} = \frac{2098,3}{10,15} = 206,7$$

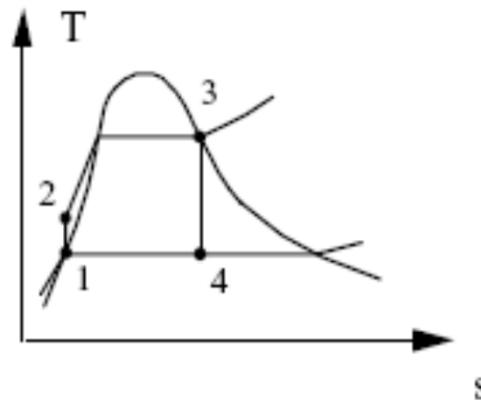
Primjer 4.

Rankineov je kružni proces zadan slikom; odvija se između tlakova 3,0 MPa i 10,0 kPa.

Koliki je termički (energetski) stupanj djelovanja termoelektrane? U proračun uključite i rad pumpe.



Primjer 4.



Iz tablica su dobiveni ovi podaci:

- za tlak **3,0 MPa**:

$$h_3 = h_3'' = 2802,3 \text{ kJ/kg}, s_3 = s_3'' = 6,18 \text{ kJ/kgK} = s_4$$

- za tlak **10,0 kPa**:

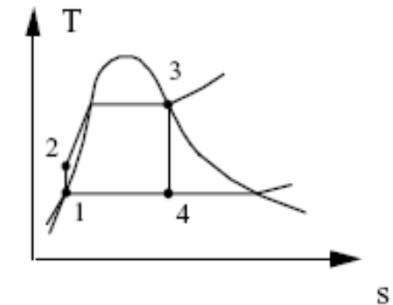
$$h_1 = h' = 191,83 \text{ kJ/kg}, h'' = 2584,79 \text{ kJ/kg},$$

$$v_1 = v' = 0,001 \text{ m}^3/\text{kg} = v_2,$$

$$s' = 0,65 \text{ kJ/kgK}, s'' = 8,15 \text{ kJ/kgK}$$

Primjer 4.

➤ rad pumpanja



$$|w_p| = h_2 - h_1 = \int vdp = v_1 (p_2 - p_1) = 0,001 (3000 - 10) = 2,99 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h_1 + |w_p| = 191,83 + 2,99 = 194,82 \text{ kJ/kg}$$

➤ dovedena toplina

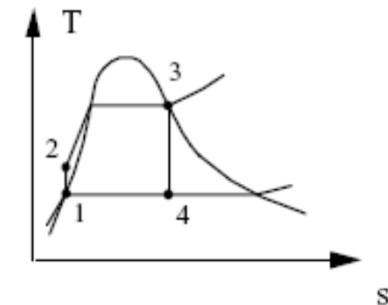
$$q_{dov} = h_3 - h_2 = 2802,3 - 194,82 = 2607,48 \text{ kJ/kg}$$

$$s_4 = s_3 = 6,18 = s' + x_4 (s'' - s') = 0,65 + x_4 \cdot 7,50 \Rightarrow x_4 = 0,74$$

$$h_4 = h' + x_4 (h'' - h') = 191,83 + 0,74 (2584,79 - 191,83) = 1962,62 \text{ kJ/kg}$$

Primjer 4.

➤ rad turbine



$$w_t = h_3 - h_4 = 2802,3 - 1962,62 = 839,68 \text{ kJ/kg}$$

➤ termički stupanj djelovanja termoelektrane

$$\eta_t = \frac{w_t - |w_p|}{q_{dov}} = \frac{839,68 - 2,99}{2607,48} = 0,321$$

(Uočite razliku između rada turbine i rada pumpe. Zanemarimo li rad pumpe, termički je stupanj djelovanja 0,322.)

Primjer 5.

1kg vode, početne temperature 25°C , zagrijava se, izložen utjecaju konstantnog tlaka okoline, električnom grijalicom na 90°C . Odredite energetski i eksergetski stupanj djelovanja procesa. Isparivanje vode i gubitke toplinske energije za vrijeme zagrijavanja vode zanemarite.

Rj.

1 kg vode smatramo sustavom.

$$q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12} \quad [\text{J/kg}]; \quad (\text{dq} = du + pdv = dh - vdp)$$

$q_{12} = 0$, a rad w_{12} ukupni je rad koji sustav izmjenjuje s okolicom. Rad se sastoji od dovedene električne energije (radi se o mehaničkom radu koji se dovodi u sustav pa je stoga negativan) i mehaničkog rada promjene volumena vode koja se zagrijava.

Primjer 5.

To je rad potiskivanja okolice, $p_{ok}(v_2 - v_1)$, koji se predaje u okolicu i stoga je pozitivan:

$$W_{12} = -W_{el.en} + p_{ok}(v_2 - v_1)$$

Dobivamo:

$$-W_{12} = W_{el.en} - p_{ok}(v_2 - v_1) = u_2 - u_1 \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} W_{el.en} &= u_2 - u_1 + p_{ok}(v_2 - v_1) = u_2 + p_{ok}v_2 - (u_1 + p_{ok}v_1) = \\ &= u_2 + p_2v_2 - (u_1 + p_1v_1) = h_2 - h_1 \quad (p_{ok} = p_1 = p_2) \end{aligned}$$

Iz tablica dobivamo:

$$u_1 = 105 \text{ kJ/kg}, h_1 = 105 \text{ kJ/kg}$$

$$u_2 = 377 \text{ kJ/kg}, h_2 = 377 \text{ kJ/kg}$$

(Očito, promjena je volumena vode toliko mala zbog zagrijavanja od 25 do 90°C da je mehanički rad potiskivanja okolice zanemarive veličine.)

Primjer 5.

Dobivamo:

$$w_{el.en} = 272 \text{ kJ/kg}; W_{el.en} = 272 \text{ kJ} (m = 1\text{kg})$$

Energetski je stupanj djelovanja dakle:

$$\eta_t = \frac{\text{dobiveni oblik energije (izlaz)}}{\text{dovedeni oblik energije (ulaz)}} = \frac{h_2 - h_1}{w_{el.en}} \cdot 100\% = \frac{272}{272} \cdot 100\% = 100\%$$

odnosno, energetski je stupanj djelovanja, stupanj djelovanja definiran na osnovi 1. glavnog stavka termodinamike, jednak 1, 100%.

Eksergetski stupanj djelovanja definiran je kao omjer eksergije dobivene iz procesa i eksergije dovedene u proces:

Primjer 5.

$$\zeta = \frac{\text{dobivena eksergija}}{\text{dovedena eksergija}}$$

Dovedena (ulazna) eksergija dovedena je električna energija, 272 kJ, a dobivena (izlazna) eksergija eksergija je 1kg vode čije se stanje promijenilo od početne temperature 25°C i tlaka p_{ok} do konačne temperature 90°C i tlaka p_{ok} :

$$\begin{aligned}\text{eksergija}_{\text{zagrijane vode}} &= u_2 - u_1 - T_{ok}(s_2 - s_1) + p_{ok}(v_2 - v_1) = \\ &= u_2 + p_2 v_2 - (u_1 + p_1 v_1) - T_{ok}(s_2 - s_1) = \\ &= h_2 - h_1 - T_{ok}(s_2 - s_1) [\text{J/kg}]\end{aligned}$$

Iz tablica dobivamo ($p_1 = p_2 = p_{ok}$):

$$s_1 = 0,367 \text{ kJ/kgK}; s_2 = 1,193 \text{ kJ/kgK},$$

pa je eksergija zagrijane vode:

Primjer 5.

eksergija_{zagrijane vode} =

$$= 377 - 105 - 300(1,193 - 0,367) = 24,2 \text{ kJ/kg},$$

a eksergetski je stupanj djelovanja

$$\zeta = \frac{24,2}{272} 100\% = 8,9\%$$

Dakle se, u ovom slučaju, preko 90% dovedene eksergije pretvara u anergiju u procesu pretvorbe u unutrašnju kaloričku energiju. Očito, zagrijavanje električnom energijom (eksergijom) eksergetski je nepovoljan proces.

Primjer 6.

Idealni plin, $R = 287 \text{ J/kgK}$, tlaka 1000 kPa , temperature 300 K , prigušuje se na 500 kPa . Koliki je gubitak mehaničkog rada? Zanemarite promjenu kinetičke i potencijalne energije za vrijeme procesa. Temperatura je okoline 25°C .

Rj.

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

$$q_{12} = 0; w_{t12} = 0, \delta e_{\text{kin}} = 0, \delta e_{\text{pot}} = 0 \Rightarrow$$

$$h_1 = h_2, dh = c_p dT, c_p = \text{konst.} \Rightarrow \mathbf{T = konst.}$$

Temperatura se IP ne mijenja za vrijeme procesa prigušivanja.

Primjer 6.

Promjena entropije i gubitak mehaničkog rada
(eksergije):

$$ds = \frac{dq}{T} = \frac{dh - vdp}{T} = \frac{-vdp}{T} = \frac{-Rdp}{p}$$

$$s_2 - s_1 = -R \ln \frac{p_2}{p_1} = 0,287 \ln \frac{500}{1000} = 0,2 \text{ kJ/kgK}$$

$$\begin{aligned} w_g &= T_{ok} \delta s_{uk} (\equiv T_{ok} \delta s_{AS}) = \\ &= 298,15 \cdot 0,2 = 59,6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Primjer 7.

Vodena para, tlaka 8 MPa, temperature 500 °C, prigušuje se adijabatski na tlak 6 MPa. Kolika je temperatura vodene pare iza prigušilišta? Promjenu kinetičke i potencijalne energije za vrijeme procesa prigušivanja zanemarite.

Rj.

Iz parnih tablica nalazimo da je entalpija pare na ulazu u prigušilište 3398,7743 kJ/kg, te da je temperatura pare tlaka 6 MPa i vrijednosti entalpije 3398,7743 kJ/kg **490,0520 °C**.

Ponašanje pare odstupa od ponašanja idealnog plina.

Primjer 7a.

Voda stacionarno struji kroz adijabatski ventil. Pritom joj se tlak snizuje od 51 na 1 bar. Ako je temperatura vode ispred ventila 25°C ($298,15\text{K}$), kolika je temperatura vode na izlazu iz ventila? Smatrajte da je volumen vode ($0,001\text{ m}^3/\text{kg}$) neovisan o temperaturi i tlaku, zanemarite (moguće) utjecaje promjene potencijalne i kinetičke energije tijekom strujanja kroz ventil, te računajte s konstantnom specifičnom toplinom vode jednakom $4,184\text{ kJ/kgK}$.

Rj.

Ventil je otvoreni sustav

➤ princip očuvanja mase:

$$m_u = m_i = m = \text{konst.}$$

Primjer 7a.

➤ princip očuvanja energije:

$$q_{12} = w_{12} = 0 \Rightarrow h_1 = u_1 + p_1 v_1 = h_2 = u_2 + p_2 v_2 \Rightarrow \\ c(T_2 - T_1) = -v(p_2 - p_1) \Rightarrow$$

$$T_2 - T_1 = \frac{v(p_1 - p_2)}{c} = \frac{0,001 \frac{m^3}{kg} (51-1) bar \frac{100k \frac{N}{m^2}}{1bar}}{4,184 \frac{kJ}{kgK}} =$$

$$= \frac{0,001 \cdot 50 \cdot 100 \frac{kJ}{kg}}{4,184 \frac{kJ}{kgK}} = 1,2 K \Rightarrow T_2 = (298,15 + 1,2) K = 299,35 K$$

Primjer 8.

U Rankineovom kružnom procesu tlak je pare na ulazu u turbinu 4MPa, a temperatura 500°C. Ako je temperatura u kondenzatoru 40°C, odredite termički stupanj djelovanja idealnog Rankineovog kružnog procesa i Carnotovog kružnog procesa koji bi se odvijao između istih temperatura. (Računajte s radom pumpe.) Kolika je toplinska energija odvedena iz termoelektrane? Iz tablica su dobiveni ovi podaci:

- za tlak 4 MPa i temperaturu 500°C:

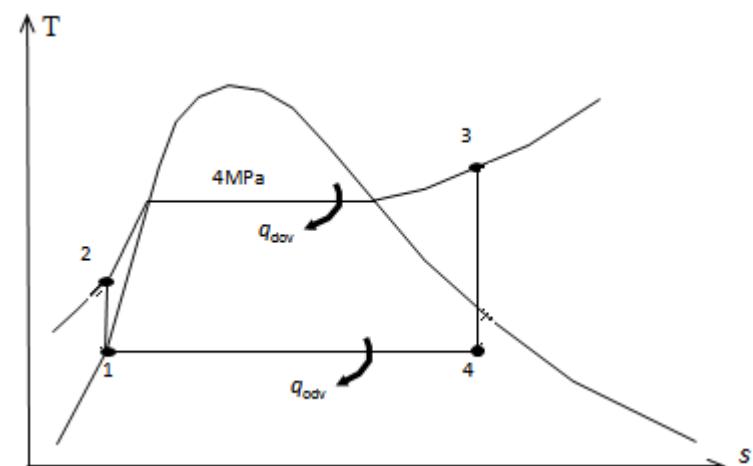
$$h=3444,9993 \text{ kJ/kg}, s=7,0910 \text{ kJ/kgK}$$

- za temperaturu zasićenja 40°C:

$$h'=167,4532 \text{ kJ/kg}, h''=2574,3754 \text{ kJ/kg},$$

$$v'=0,0010 \text{ m}^3/\text{kg}, p_{\text{kond}}=7,375 \text{ kPa},$$

$$s'=0,5721 \text{ kJ/kgK}, s''=8,2583 \text{ kJ/kgK}$$



Primjer 8.

Rj.

$$|w_p| = v'(p_2 - p_1) = 0,001 \cdot (4000 - 7,375) = 3,99 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_2 = h_1 + |w_p| = 167,4532 + 3,99 = 171,44 \frac{kJ}{kg}$$

$$\begin{aligned} q_{dov} &= h_3 - h_2 = (3444,9993 - 171,44) \text{ kJ/kg} = \\ &= 3273,56 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Primjer 8.

Rj.

$$w_t = h_3 - h_4, s_4 = s_3$$

$$x_4 = \frac{s_i - s_i^*}{s_i^* - s_i} = \frac{7,0910 - 0,5721}{8,2583 - 0,5721} = 0,848$$

$$\begin{aligned} h_4 &= h' + x_4(h'' - h') = 167,4532 + \\ &+ 0,848(2574,3754 - 167,4532) = 2208,52 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$w_t = (3444,9993 - 2208,52) \text{ kJ/kg} = 1236,48 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} q_{odv} &= h_4 - h_1 (\equiv h') = (2208,52 - 167,4532) \text{ kJ/kg} = \\ &= 2041,07 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Primjer 8.

$$\eta_{tRKP} = \frac{w_t - |w_p|}{q_{dov}} = \frac{1236,48 - 3,99}{3273,56} = 0,376$$

$$\eta_{tCKP} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \frac{40 + 273,15}{500 + 273,15} = 0,595$$

(Zanemarimo li mehanički rad potreban za pumpanje vode u parni kotao, termički je stupanj djelovanja idealnog Rankineovog kružnog procesa 0,377.)

Primjer 9.

Vodena para struji stacionarno i jednodimenzionalno kroz turbinu. Na ulazu u turbinu tlak je vodene pare 3 MPa, temperatura 450°C , maseni protok 8 kg/s, a na izlazu iz turbine tlak je pare 0,2 MPa, a temperatura 150°C . Prijelaz je toplinske energije iz turbine u okolicu tlaka 100 kPa i temperature 25°C snage 300 kW. Zanemarite promjenu kinetičke i potencijalne energije pare i odredite:

- a) realnu snagu turbine,
- b) povratljivu snagu turbine,
- c) eksnergetski stupanj djelovanja turbine,
- d) gubitak mehaničkog rada (snage) za vrijeme procesa u turbini i
- e) eksergiju pare na ulazu u turbinu.

Primjer 9.

Poznate su ove veličine stanja za vodenu paru i okolicu:

- ulaz u turbinu (3 MPa i 450 °C): $h = 3344$, 9 kJ/kg; $s = 7,0856$ kJ/kgK
- izlaz iz turbine (0,2 MPa i 150 °C): $h = 2769$, 1 kJ/kg; $s = 7,2810$ kJ/kgK
- stanje okolice (100 kPa i 25 °C): $h_{vode} = 104,83$ kJ/kg; $s_{vode} = 0,3672$ kJ/kgK

Rj.

a)

Realnu snagu turbine određujemo pomoću principa očuvanja energije:

Primjer 9.

$$\dot{m}h_1 = \dot{W}_t + |\dot{Q}_{odv}| + \dot{m}h_2 \Rightarrow$$

$$\dot{W}_t = \dot{m}(h_1 - h_2) - |\dot{Q}_{odv}| =$$

$$= 8 \frac{kg}{s} (3344,9 - 2769,1) \frac{kJ}{kg} - 300kW = 4306kW$$

b)

Povratljiva snaga turbine jednaka je maksimalnom radu između stvarnih stanja na ulazu i izlazu iz turbine (između tih stanja odvija se idealni proces za vrijeme kojeg nema gubitaka eksnergije)

Primjer 9.

$$\begin{aligned}\dot{W}_{pov\ t} &= \dot{m}[(h_1 - h_2) - T_{ok}(s_1 - s_2)] = \\ &= 8 \frac{kg}{s} \left[(3344,9 - 2769,1) \frac{kJ}{kg} - 298,15K(7,0856 - 7,2810) \frac{kJ}{kgK} \right] = \\ &= 4665 kW\end{aligned}$$

c)

Eksergetski je stupanj djelovanja turbine jednak omjeru realnog rada (snage) i povratljivog rada (snage)

$$\zeta = \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_{pov\ t}} = \frac{4306 kW}{4665 kW} = 0,923 (92,3\%)$$

Primjer 9.

d)

Razlika je između povratljivog rada i realnog rada jednaka gubitku mehaničkog rada:

$$\dot{W}_{pov\ t} - \dot{W}_t = 4665 - 4306 = 359 kW$$

(Taj gubitak mogli bismo odrediti određujući porast entropije adijabatskog sustava za vrijeme procesa u turbini:

$$\dot{W}_{gubitak} = T_{ok} \cdot \dot{\delta S}_{uk}$$

Primjer 9.

e)

Eksergija je pare na ulazu u turbinu jednaka maksimalnom radu koji bismo dobili za vrijeme povratljivog procesa izjednačavanja stanja vodene pare na ulazu u turbinu sa stanjima vode (koja bi nastala iz vodene pare) kada je ona u termodinamičkoj ravnoteži s okolicom:

$$\begin{aligned} eks &= (h_1 - h_{ok}) - T_{ok}(s_1 - s_{ok}) = \\ &= (3344,9 - 104,83) \frac{kJ}{kg} - 298,15K(7,0856 - 0,3672) \frac{kJ}{kgK} = \\ &= 1238 \frac{kJ}{kg} \Rightarrow \dot{Eks} = 8 \frac{kg}{s} \cdot 1238 \frac{kJ}{kg} = 9904 kW \end{aligned}$$

Primjer 9.

Prema tome, od raspoložive eksnergije vodene pare, turbina može iskoristiti samo (u ovom slučaju)

$$\frac{4306}{9904} \Rightarrow 43,5\%$$

za pretvorbu u tehnički rad (snagu).

Primjer 10.

Tlak je pare na ulazu u turbinu 4MPa, a temperatura 500°C . Na izlazu tlak je pare 100kPa, a sadržaj pare 1. Koliki je povratljivi rad turbine ako je temperatura okolice 25°C ? Iz tablica su dobiveni ovi podaci:

- **za tlak 4 MPa i temperaturu 500°C :**

$$h=3444,9993 \text{ kJ/kg}, s=7,0910 \text{ kJ/kgK}$$

- **za tlak 100kPa i $x = 1$:**

$$h = 2675,4442 \text{ kJ/kg}, s=7,3598 \text{ kJ/kgK}$$

Primjer 10.

Rj.

$$\begin{aligned} w_{\max} &= (h_{ul} - h_{iz}) - T_{ok}(s_u - s_i) = \\ &= (3444,9993 - 2675,4442) \text{kJ/kg} - \\ &\quad 298,15 \text{K} (7,0910 - 7,3598) \text{kJ/kgK} = \\ &= 849,7 \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

Primjer 11.

Tlak je pare na ulazu u turbinu 4MPa, a temperatura 500°C . Na izlazu iz turbine (realni proces) tlak je pare 100kPa, a sadržaj pare 1.

Odredite unutrašnji stupanj djelovanja turbine i eksergetski stupanj djelovanja procesa u turbini. Temperatura je okolice 25°C .

Iz tablica su očitane ove vrijednosti:

- **za tlak 4MPa i temperaturu 500°C :**

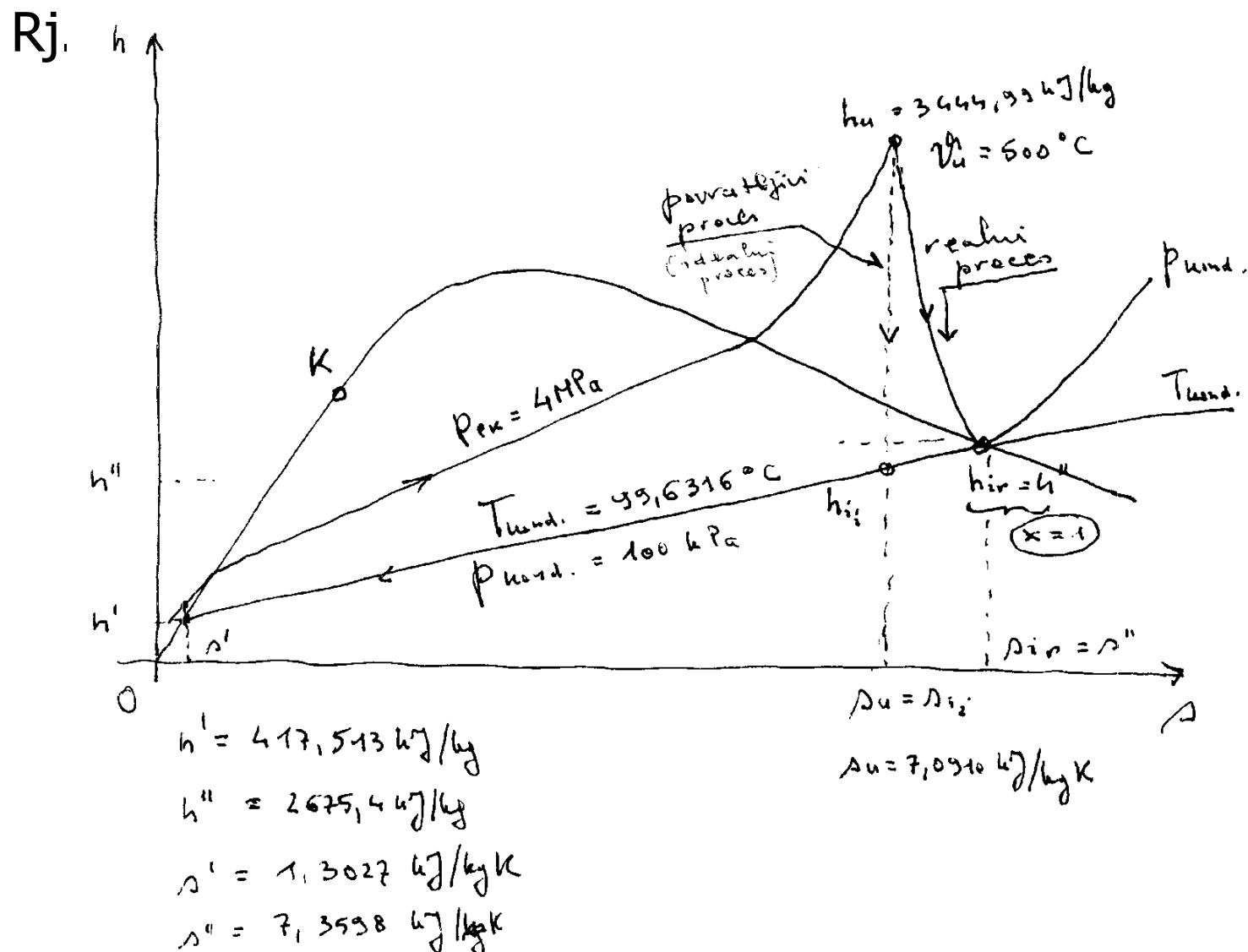
$$h=3444,99 \text{ kJ/kg}; s=7,0910 \text{ kJ/kgK}$$

- **za tlak 100kPa (stvarno stanje):**

$$h'=417,513 \text{ kJ/kg}, h''=2675,4 \text{ kJ/kg};$$

$$s'=1,3027 \text{ kJ/kgK}, s''=7,3598 \text{ kJ/kgK}$$

Primjer 11.



Primjer 11.

$$w_{tr} = h_{ul} - h_{izr} = 3444,9 - 2675,4 = 769,5 \text{ kJ/kg}$$

$$x_{idealni} = \frac{s_i' - s_i''}{s_i' - s_i'} = \frac{7,0910 - 1,3027}{7,3598 - 1,3027} = 0,9556$$

$$\begin{aligned} h_i &= h' + x_{idealni}(h'' - h') = 417,513 + \\ &+ 0,9556(2675,4 - 417,513) = 2575,15 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$w_{ti} = h_{ul} - h_{izi} = 3444,9 - 2575,15 = 869,75 \text{ kJ/kg}$$

- unutrašnji stupanj djelovanja turbine:

$$\eta_{ti} = \frac{w_{tr}}{w_{ti}} = \frac{769,5}{869,75} = 0,885$$

Primjer 11.

$$\begin{aligned} w_{pov} &= (h_{ul} - h_{izr}) - T_{ok}(s_u - s_i) = \\ &= (3444,99 - 2675,4) \text{ kJ/kg} - 298,15 \text{ K} \cdot \\ &\quad (7,0910 - 7,3598) \text{ kJ/kgK} = 849,7 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

- eksergetski stupanj djelovanja procesa u turbini:

$$\zeta = \frac{eks_i}{eks_u} = \frac{w_{tr}}{w_{pov}} = \frac{769,5}{849,7} = 0,906$$

Primjer 11. - dodatne napomene

Razlikujemo ove radove i stupnjeve djelovanja parne (plinske) turbine:

➤ **realni rad:**

$$w_{realni} = h_u - h_{iz \ realna} \left[\frac{J}{kg} \right]$$

➤ **idealni rad (izentropski):**

$$w_{idea \ ln i} = h_u - h_{iz \ idea \ ln a} \left[\frac{J}{kg} \right]$$

➤ **povratljivi rad:**

$$w_{povratljivi} = h_u - h_{iz \ realni} - T_{ok} \left(s_u - s_{iz \ realna} \right) \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Primjer 11. - dodatne napomene

- **maksimalni rad (eksergija vodene pare na ulazu u turbinu):**

$$w_{maksimalni} = eks = h_u - h_{ok} - T_{ok}(s_u - s_{ok}) \left[\frac{J}{kg} \right]$$

- **unutrašnji stupanj djelovanja turbine:**

$$\eta_u = \frac{w_{realni}}{w_{idealni}} = \frac{h_u - h_{iz_realna}}{h_u - h_{iz_idealna}}$$

- **eksergetski stupanj djelovanja:**

$$\zeta = \frac{eks_i}{eks_u} = \frac{w_{realni}}{w_{povratljivi}} = \frac{h_u - h_{iz_realna}}{h_u - h_{iz_realna} - T_{ok}(s_u - s_{iz_realna})}$$

**Što treba znati (naučiti) – 07 Postupci povećanja termičkog stupnja djelovanja u termoelektranama s parnim turbinama
(<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)**

- eksergetski stupanj djelovanja turbine
- eksergija pare na ulazu u turbina
- gubitak mehaničkog rada (snage) za vrijeme procesa u turbini
- kombinirana proizvodnja pare i električne energije
- neprovedivost Carnotovog kružnog procesa
- povratljiva snaga turbine,
- proces s međupregrijanjem pare
- proces s pregrijanom parom
- proces sa suhom parom
- proces sa zagrijavanjem kondenzata

**Što treba znati (naučiti) – 07 Postupci povećanja termičkog stupnja djelovanja u termoelektranama s parnim turbinama
(<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepre>)**

- Rankineov kružni proces (idealni i realni)
- realna snaga turbine,
- sadržaj pare
- sadržaj vlage
- specifični potrošak topline
- unutrašnji stupanj djelovanja turbine
- utjecaj tlaka i temperature svježe pare

Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim elektranama

Uvod i fizikalne osnove – I

Energijske tehnologije

FER 2011.

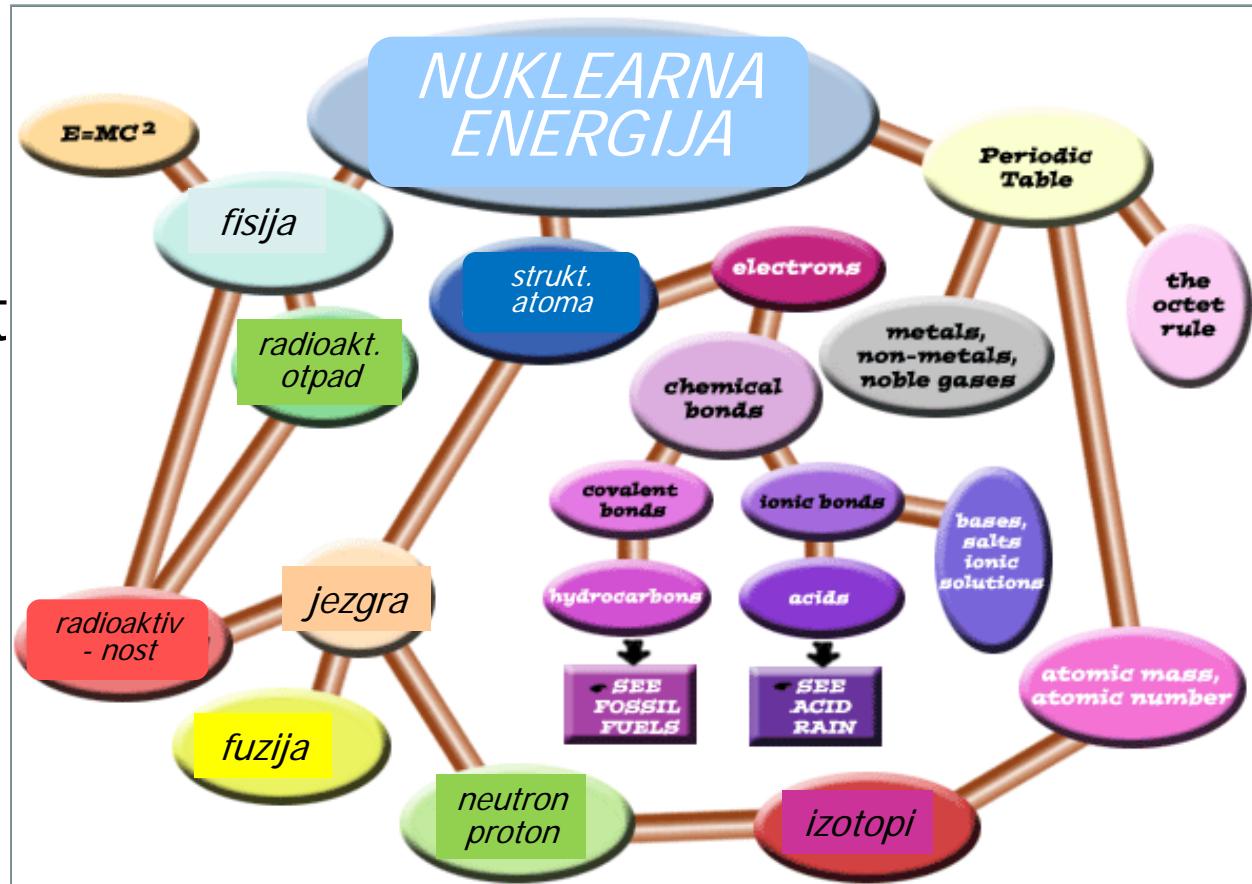


Gdje smo:

1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama
5. Geotermalna energija
- 6. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.**
7. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
8. Energija Sunca
9. Energija vjetra
10. Biomasa
11. Gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
12. Potrošnja električne energije
13. Prijenos i distribucija električne energije
14. Skladištenje energije
15. Energija, okoliš i održivi razvoj

Sadržaj

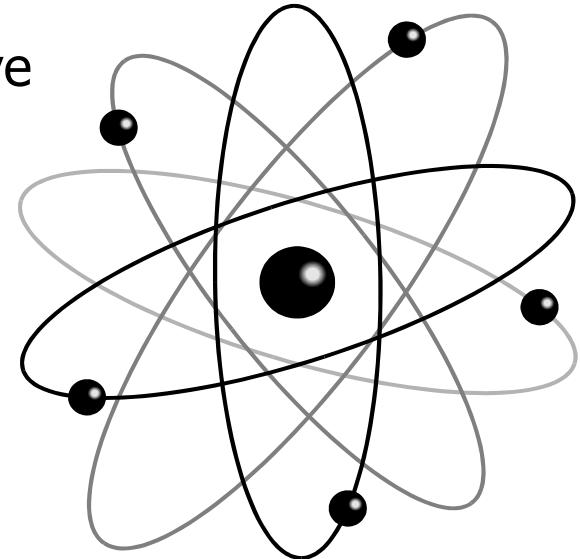
- Nuklearna fizika
- Građa atoma i jezgre
- Energija veze
- Radioaktivnost
- Fisija/fuzija



Atom i jezgra

- Nukleoni (zajedničko ime za sastavne dijelove jezgra)
 - protoni
 - neutroni

$A_Z X$



- Elektroni

Z Atomski broj = broj protona

A Maseni broj (približno i atomska masa u ajm)

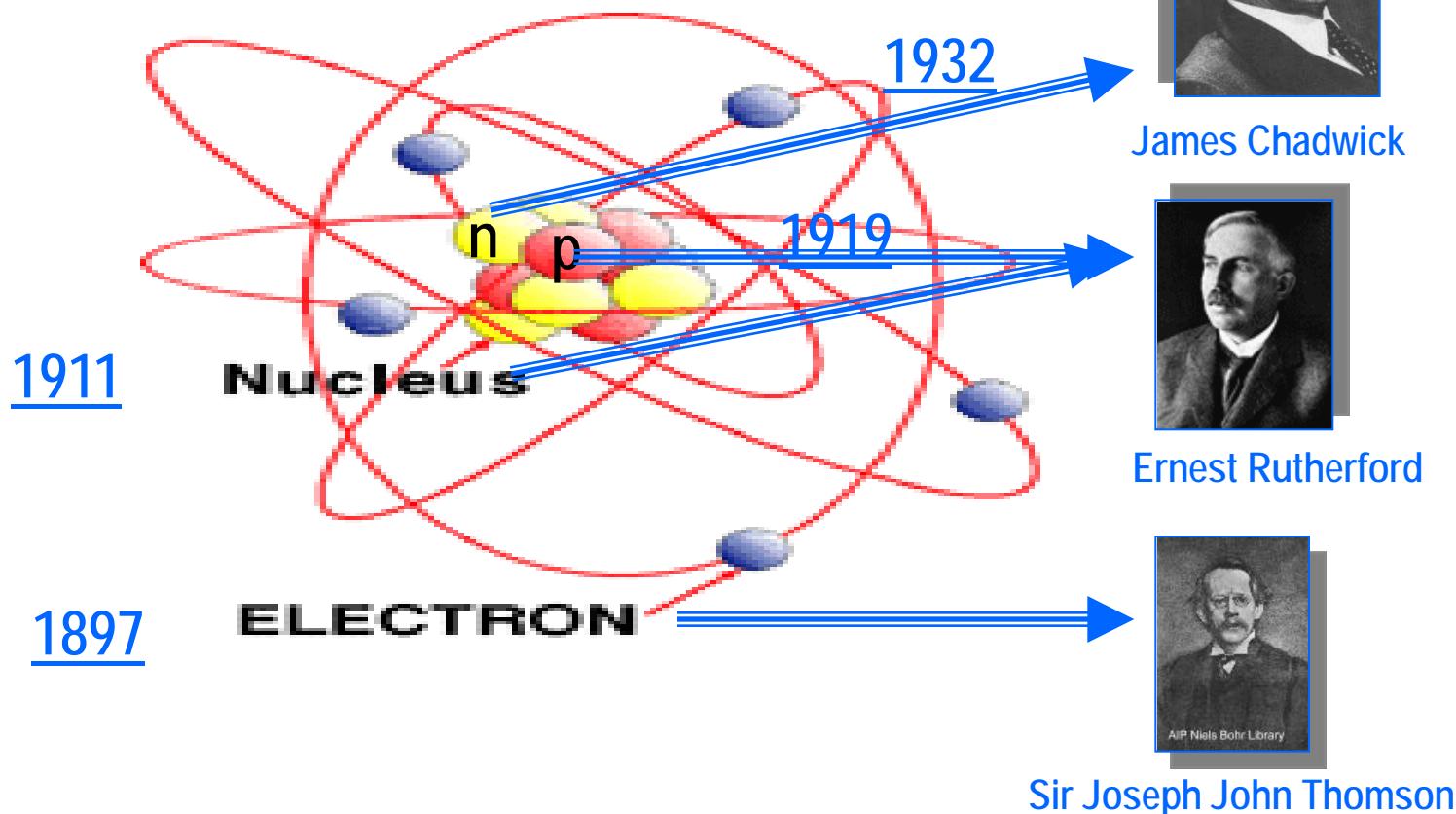
$$= \text{broj protona (Z)} + \text{broj neutrona (N)}$$

X = kemijski simbol elementa iz periodnog sustava

Aritmetika nukleona u jezgri

- Jezgra ima određeni broj *protona* (Z) i određeni broj *neutrona* (N), a time je određen i broj *nukleona* (maseni broj): $A = Z + N$
 - primjer: najzastupljeniji *izotop* ugljika ima 6 protona i 6 neutrona (oznaka ^{12}C ; 98.9% izotopska učestalost)
 - $Z = 6$; $N = 6$; $A = 12$
 - drugi stabilni *izotop* ugljika ima 6 protona i 7 neutrona (oznaka ^{13}C ; 1.1% izotopska učestalost)
 - $Z = 6$; $N = 7$; $A = 13$
 - nestabilni *izotop* ugljika ima 6 protona i 8 neutrona (oznaka ^{14}C ; vrijeme poluraspa 5730 godina)
 - Raspada se beta raspadom u ^{14}N
- *Izotopi* elementa imaju isti Z , različiti N
- U nuklearnim reakcijama naboj i suma mase-energije ostaju konstantni pa to ima utjecaja na aritmetiku nukleona prije i poslije reakcije

Zbivanja ključna za formiranje sadašnje slike o atomu i jezgri

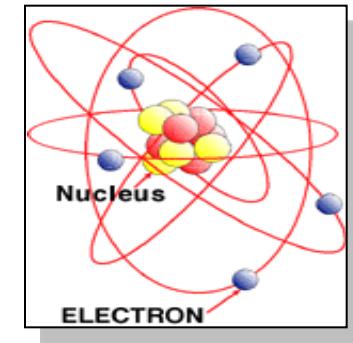


Grada atoma i atomske jezgre

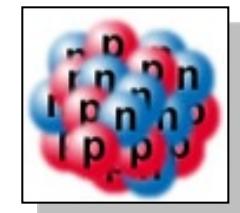
- **Trenutni stav:**

- Elektroni su u stalnom gibanju u putanjama oko jezgre u formi elektronskog oblaka,
- Nuklearna jezgra je sastavljena od protona i neutrona,
- Unutrašnju grdu protona i neutrona čine kombinacije čestica koje zovemo quark-ovi .

Atom

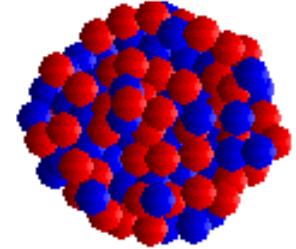


Atomska jezgra



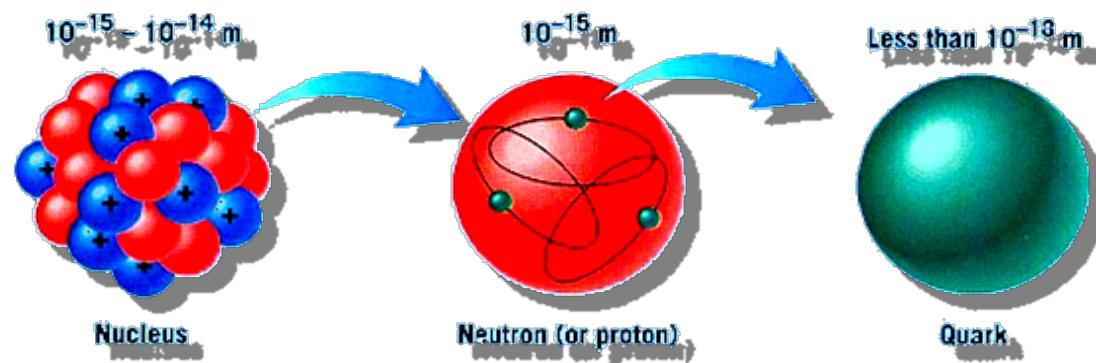
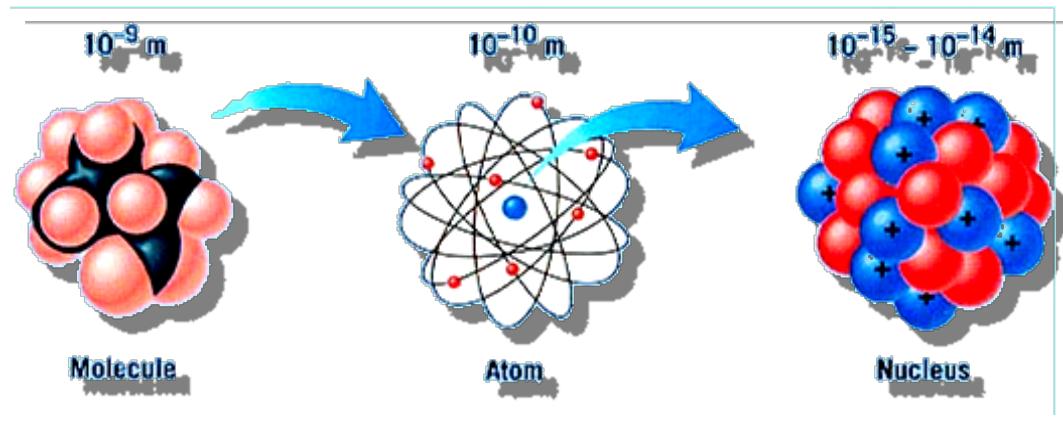
- Najjednostavnija je jezgra vodika, sastavljena od jednog protona.

O jezgri kvantitativno



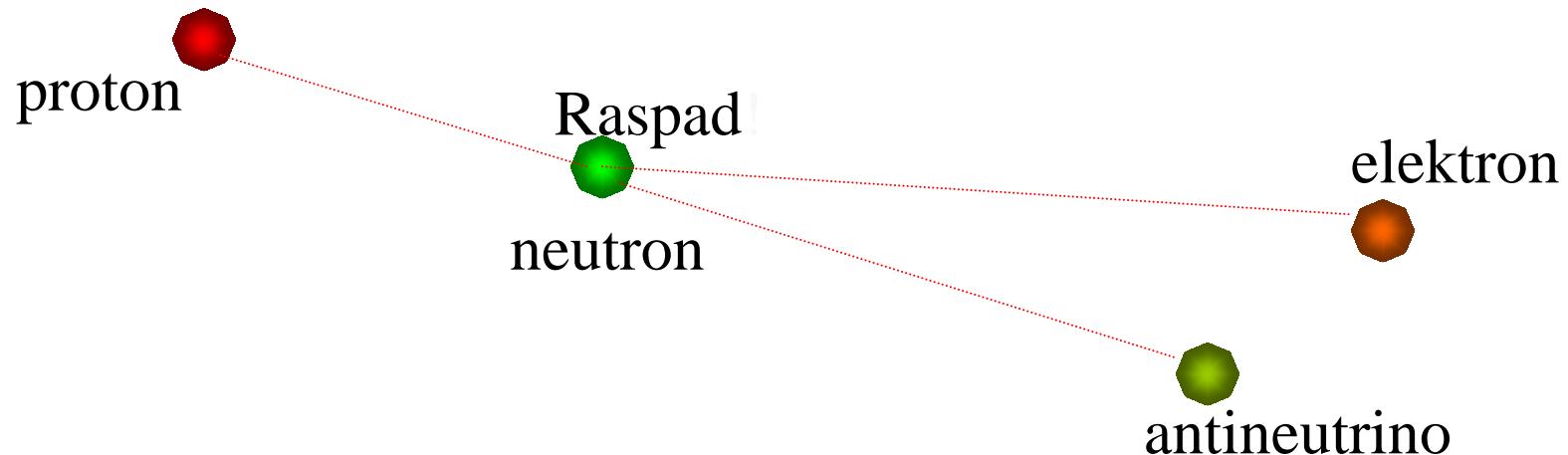
- Jezgra atoma se sastoji od protona i neutrona
 - Svaki je približno 2000 veće mase od elektrona, tako da jezgra čini većinu mase atoma
 - Atom je neutralan kad ima jednak broj protona u jezgri i elektrona u omotaču
 - proton ima pozitivni naboј; masa = 1,007276 a.m.u.
 - 1 a.m.u. = $1,6605 \times 10^{-27}$ kg
 - a.m.u. – atomic mass unit, a.j.m. – atomska jedinica mase
 - neutron nema naboja; masa = 1,008665 a.m.u.
 - proton je kao čestica stabilan (vodik)
 - neutron se raspada s vremenom poluraspada od 10,3 min (srednje vrijeme života 885,7 s)
 - Veličina jezgra je približno 0,00001 puta veličina atoma
 - atom je uglavnom prazan prostor

Karakteristične dimenzije



Kako se neutroni raspadaju?!

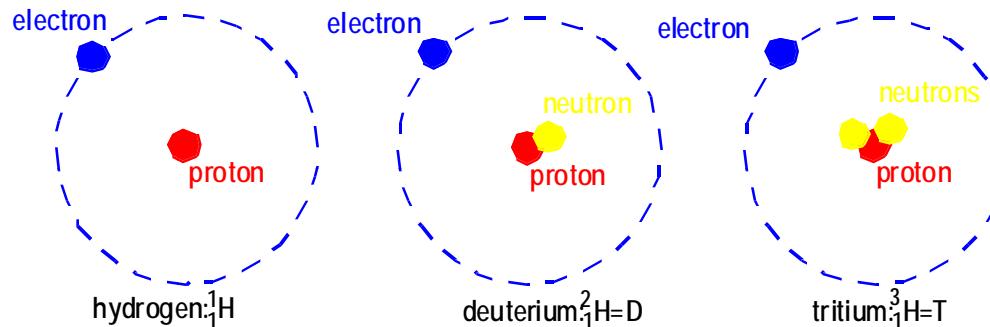
- neutron, koji je teži od protona, raspada se u niže energetsko stanje, ono protona
- Naboј je sačuvan pa nastaje i jedan elektron
 - Nastaje i antineutrino, čestica bez naboja, vrlo male mase



Energetska pozadina raspada neutrona

- Smatramo da raspadom upravlja slaba nuklearna sila
 - Zovemo ga i beta raspad
- Da li ovo znači da je neutron jednostavan spoj elektrona i protona?
 - Ne, ali se fenomenološki ponaša kao da je tako
- Sačuvanje mase i energije:
 - Masa neutrona je 1,008665 a.m.u.
 - Masa protona i elektrona je $1,007276 + 0,000548 = 1,007824$
 - Razlika je 0,000841 a.m.u.
 - u kg: $1,4 \times 10^{-30}$ kg = $1,26 \times 10^{-13}$ J = 0,783 MeV koristeći $E = mc^2$
 - 1 a.m.u. = $1,6605 \times 10^{-27}$ kg
 - 1 eV = $1,602 \times 10^{-19}$ J
 - Višak energije se javlja u obliku kinetičke energije čestica

Izotopi (atomi istog elementa s različitim brojem neutrona)



Notation:

A
Z Y

$A = Z + N$: atomic mass number
N: number of neutrons
Z: number of nuclear charge (atomic number)
Y: atomic symbol from Periodic Table (Fig.4)

Ukupni električni naboje jezgre = $+Ze$

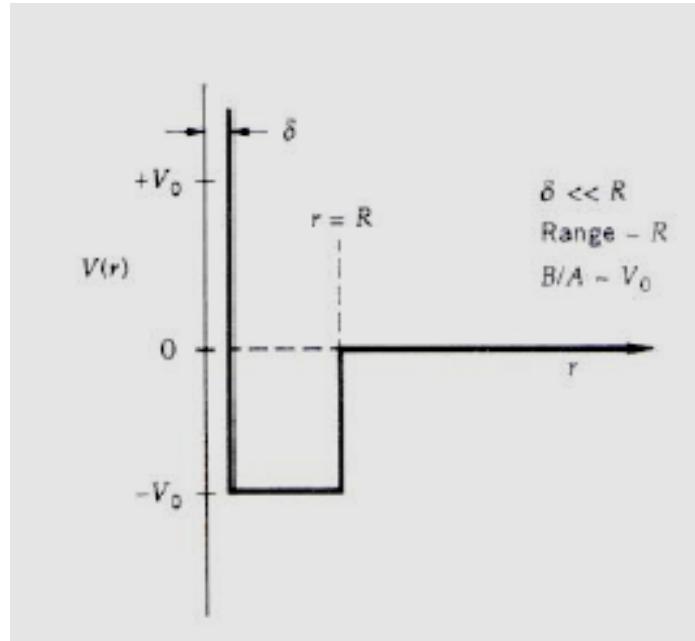
U neutralnom atomu broj elektrona = broj protona

- Naboje protona ($+e$) = $+1,60210 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- Naboje elektrona ($-e$) = $-1,60210 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Izotopi jednog elementa imaju isti broj protona a različit broj neutrona, kemijska i fizikalna svojstva su im praktično ista.

Nuklearne sile

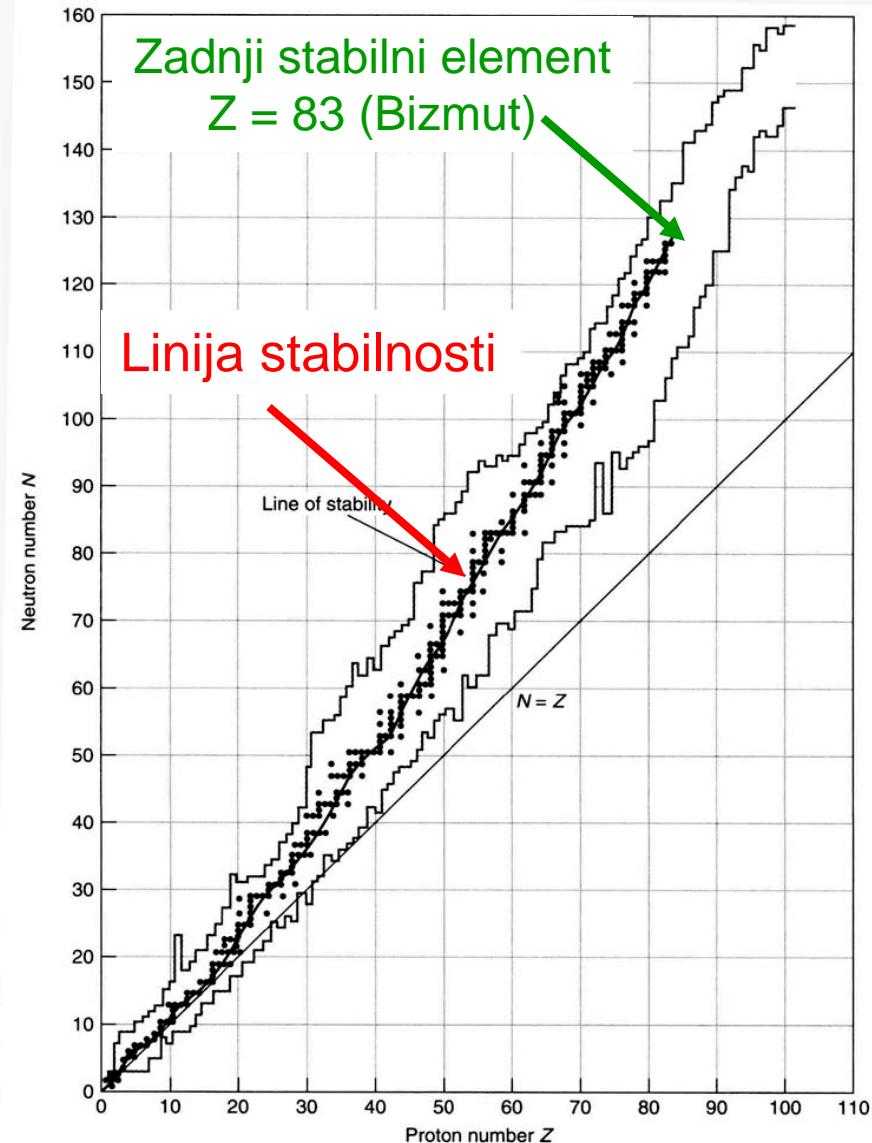
- Drže nukleone u jezgri na okupu
- Djeluju između kvarkova (jaka nukl. sila)
- Kratak domet (red veličine dimenzije nukleona)
- Privlačne i snažne (formiraju jezgru velike gustoće) ne ovise o naboju
- Na vrlo malim udaljenostima pokazuju odbojna svojstva (manje od 0,5 fm, 1 fm= 10^{-15} m)
- Djeluju između parova nukleona
- Pokazuju svojstvo zasićenja
- Ovise o parnosti broja nukleona i protona
- Pokazuju izraziti porast za takozvane magične brojeve (popunjenoš energetskih ljudski)
- Karakteristične energije su reda MeV
- Uz pretpostavku konstantne gustoće (10^{17} kg/m³) veličina jegra ovisi o broju nukleona



Potencijalna energija
neutrona vezanog u jezgri

Stabilnost građe jezgra ovisnost o omjeru broja neutrona i protona

- 3000 poznatih izotopa,
266 stabilnih!
- $Z > 83$ nema stabilnih elemenata
- Za male Z $N \approx Z$,
za velike Z $N > Z$.
(tumačenje - potreban veći broj neutrona da kompenzira odbojnu silu protona)
- Posebno su stabilna jezgra s magičnim brojevima nukleona $Z, N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$ (analogno elektronskim ljuškama)



Granice stabilnosti i radioaktivnost

- Nuklidi s viškom neutrona podložni su beta raspadu (neutron se pretvara u proton i beta česticu).
- Nuklidi s manje neutrona nego što odgovara liniji stabilnosti emitiraju pozitron ili apsorbiraju elektron iz omotača (jedan proton se pretvara u neutron).
- β^- i β^+ raspad uobičajeno prate emisije kvanta energije
- Teški nuklidi na vrhu krivulje stabilnosti problem svoje stabilnosti rješavaju emisijom alfa čestice.
- Navedene transformacije jezgre kojima jezgra prelazi u energetski stabilniju konfiguraciju nazivamo radioaktivni raspad a pojavu radioaktivnost.

Zakon radioaktivnog raspada

- Zakon radioaktivnog raspada opisuje kako se mijenja prosječni broj radioaktivnih jezgara N u vremenu.
- Brzina promjene broja radioaktivnih jezgara, dN/dt , se zove aktivnost, R , radioaktivnog izotopa i proporcionalna je trenutnom broju jezgara. Konstanta proporcionalnosti, λ , se zove **konstanta radioaktivnog raspada**

$$R = \frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$$\int_{No}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$\ln\left(\frac{N}{No}\right) = -\lambda t$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$R = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\lambda t}$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2$$

- Vrijeme za koje se početni broj jezgara smanji na pola zove se **vrijeme poluraspeda** $t_{1/2} = \text{half-life}$ (50% početnog).
 $\tau = 1/\lambda = \text{vrijeme života}$ (37% početnog)

Radioaktivnost: mjerne jedinice

Aktivnost: **Becquerel (Bq)** = 1 raspad / s

1 curie (Ci) = $3,7 \times 10^{10}$ raspada / s (Bq)
(brzina dezintegracije 1g radija)

Ekspozicijska doza: broj ionskih parova proizvedenih prolazom zračenja

Roentgen = $2,6 \times 10^{-4}$ C/kg_{air} (0,0084 J/kg)

Energetska doza, jedinica Gray (Gy): stara jedinica rad = 0,01 (Gy)

- Energija zračenja apsorbirana po jedinici mase tvari (J/kg)=(Gy)

Biološka doza, jedinica Sievert (Sv): stara jedinica rem = 0,01 (Sv)

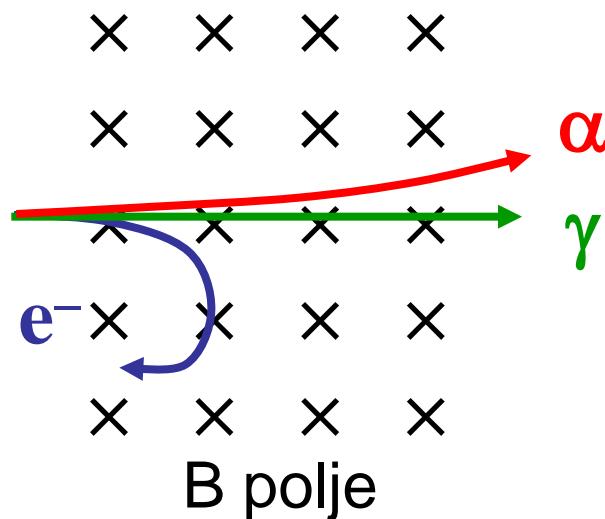
- Biološka doza = doza × faktor kvalitete ($\alpha = 10$, $\beta, \gamma = 1$)

Iznosi:

- 5 mSv/god = prirodno zračenje okoline, $\times 10$ zaposleni
- 100 mSv/god = granica nakon koje je porast raka primjetan
- 5 Sv = 50% smrtnosti unutar mjesec dana
- 10 Sv = fatalna doza unutar nekoliko tjedana**

Tip zračenja: α , β , γ

Tip zračenja	Naboj/Masa	Prodornost
alpha α = jezgra He ($2p + 2n$)	$+2q/4m_p$	list papira
beta β = elektron ili pozitron	$-q/m_e$ or $+q/m_e$	mm metala
gamma γ = visokoenergetski kvant	bez naboja	cm Pb



Radioaktivni nizovi u prirodi

- Uranij ($^{238}_{92}\text{U}$ i $^{235}_{92}\text{U}$) i Torij ($^{232}_{90}\text{Th}$)
 - postoje u prirodi ($t_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$, $0,7 \cdot 10^9$ i $14 \cdot 10^9$ godina)
 - završavaju olovom ($^{206}_{82}\text{Pb}$, $^{207}_{82}\text{Pb}$ i $^{208}_{82}\text{Pb}$ respektivno)
- Neptunij ($^{237}_{93}\text{Np}$)
 - ne postoji u prirodi ($t_{1/2} = 2,1 \cdot 10^6$ godina)
 - završava bizmutom ($^{209}_{83}\text{Bi}$)
- Postoje i drugi radioaktivni nizovi, npr.: $^{14}_6\text{C}$ i $^{40}_{19}\text{K}$

Izotopi od interesa za fisiju

Izotop	Izotopska učestalost (%)	Vrijeme poluraspada	raspad:
^{233}U	0	159 kgod	α
^{234}U	0,0055	246 kgod	α
^{235}U	0,720	704 Mgod	α
^{236}U	0	23 Mgod	α
^{237}U	0	6,8 dana	β^-
^{238}U	99,2745	4,47 Ggod	α
^{239}Pu	Nema ga u prirodi	24 kgod	α
^{232}Th	100	14 Ggod	α

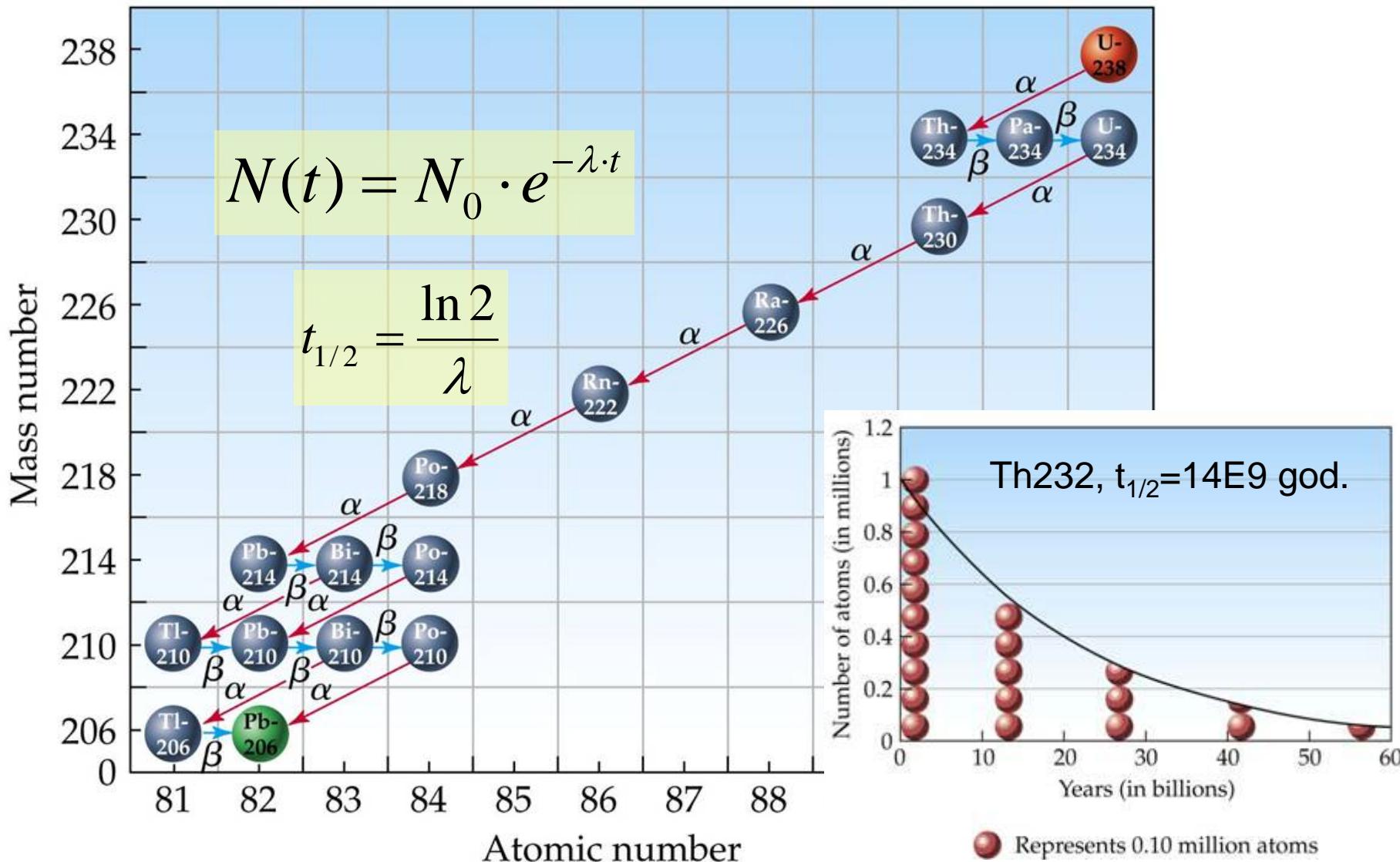
Uranova priča

- *Nema stabilnog izotopa urana:*
 - ^{235}U ima vrijeme poluraspada od 704 milijuna godina
 - ^{238}U ima vrijeme poluraspada od 4,5 milijardi godina (starost Zemlje)
- Teški elementi nisu nastali za vrijeme "Velikog praska" (Big Bang) (samo H, He, Li i manja količina Be)
- U zvijezdama nastaju elementi do željeza (Fe) prirodnom termonuklearnom fuzijom
- Smatra se da su elementi teži od Fe nastali eksplozijama Supernova
 - Masivne zvijezde koje eksplodiraju ili implodiraju kad potroše fuzijsko gorivo
- ^{235}U i ^{238}U su inicijalno imali jednaku zastupljenost

Radioaktivni raspad urana

- Izotopski sadržaj izotopa urana sugerira da je uran nastao prije otprilike 6 milijardi godina
 - Ako su ^{235}U i ^{238}U bili inicijalno jednako zastupljeni
 - sada bi trebali imati 39,8% početnog ^{238}U i 0,29% početnog ^{235}U
 - To rezultira sadašnjom izotopskom učestalošću ^{235}U od 0,72%
- Pu-239 ima prekratko vrijeme poluraspada (24000 godina) i zato ga danas nema u prirodi
- Th-232 ima vrlo veliko vrijeme poluraspada i jedan je od osnovnih izvora radioaktivnog dijela geotermalne topline

Grafički prikaz radioaktivnog niza



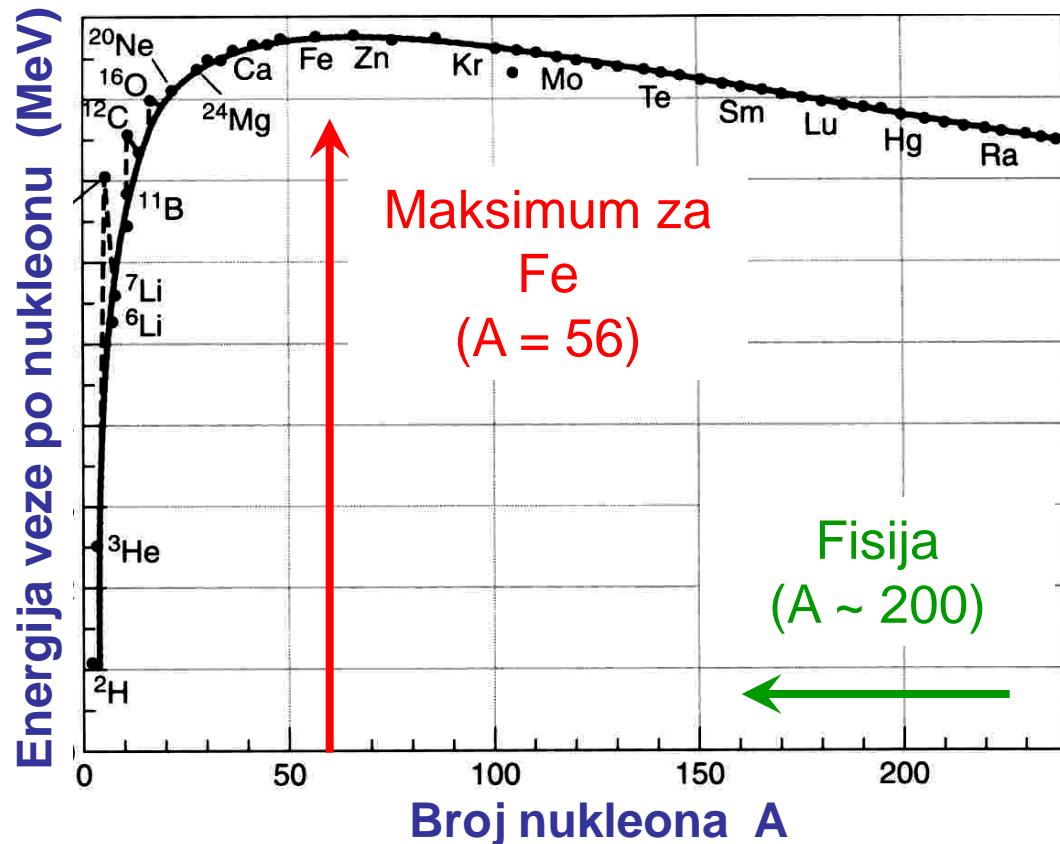
Energija vezanja

Energija vezanja je energetska ekvivalent defekta mase (razlika mase jezgre i ukupne mase pojedinačnih nukleona). Nuklidi s velikom energijom vezanja su stabilni.

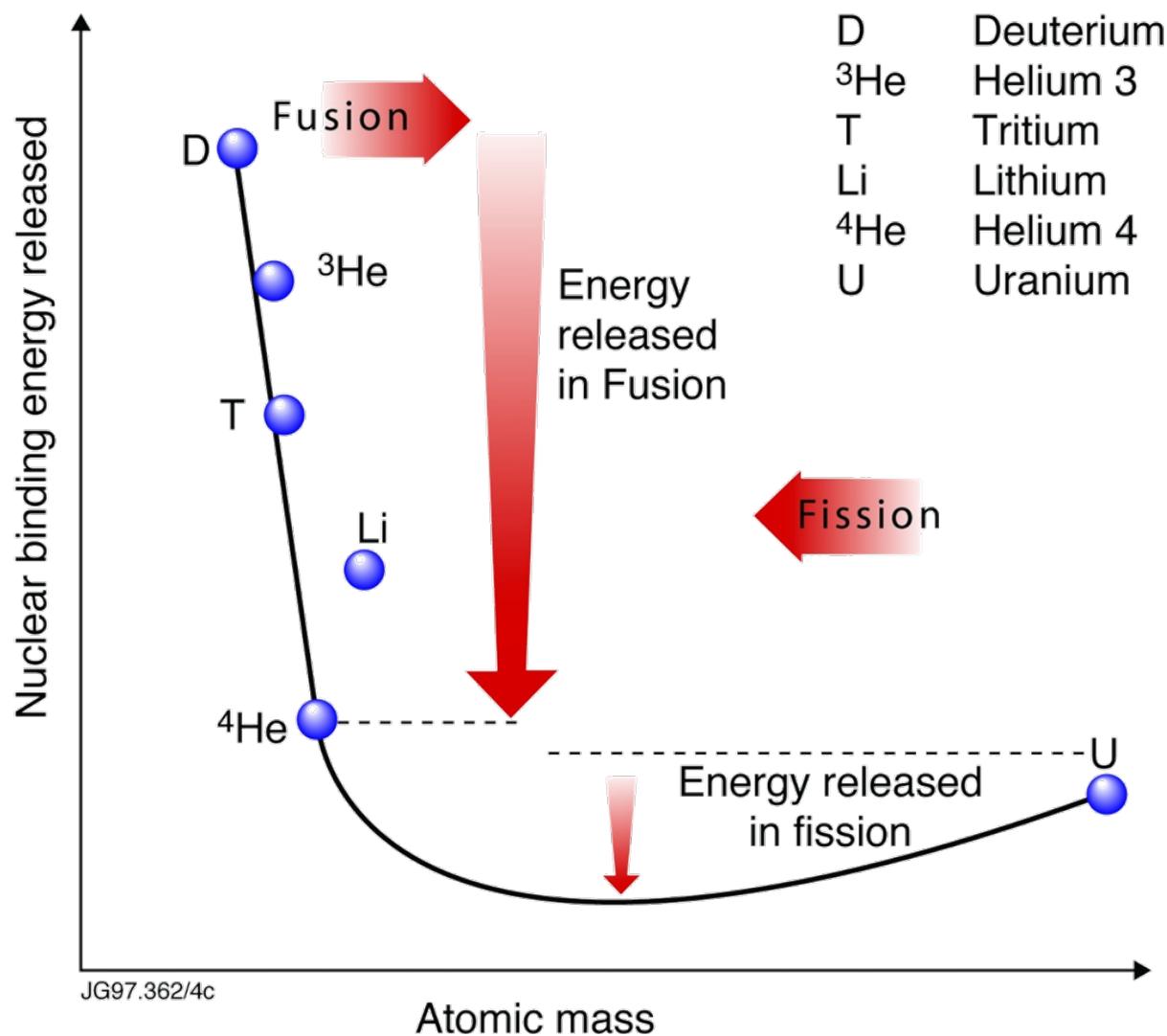
$$B_{\text{nuclear}} = [Z m_H c^2 + N m_n c^2] - [M_A c^2]$$

$m_H = 1,007825 \text{ ajm}$ i $m_n = 1,008665 \text{ ajm}$ (atomska jedinica mase)

- Energija vezanja se oslobađa kad se formira jezgra. Istu količinu energije je potrebno uložiti da se jezgra rastavi na sastavne dijelove.
- Energija vezanja po nukleonu ima maksimum za $A = 56$ ($\sim 8,5 \text{ MeV/nukleon}$).
- Sve reakcije koje vode nastanku nuklida s većom energijom veze od polaznih nuklida oslobađaju energiju.
- Razlikujemo energiju vezanja i energiju vezanja po nukleonu



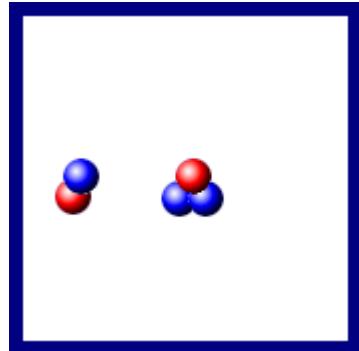
Oslobađanje energije vezanja - fisija/fuzija



Energija iz atomske jezgre

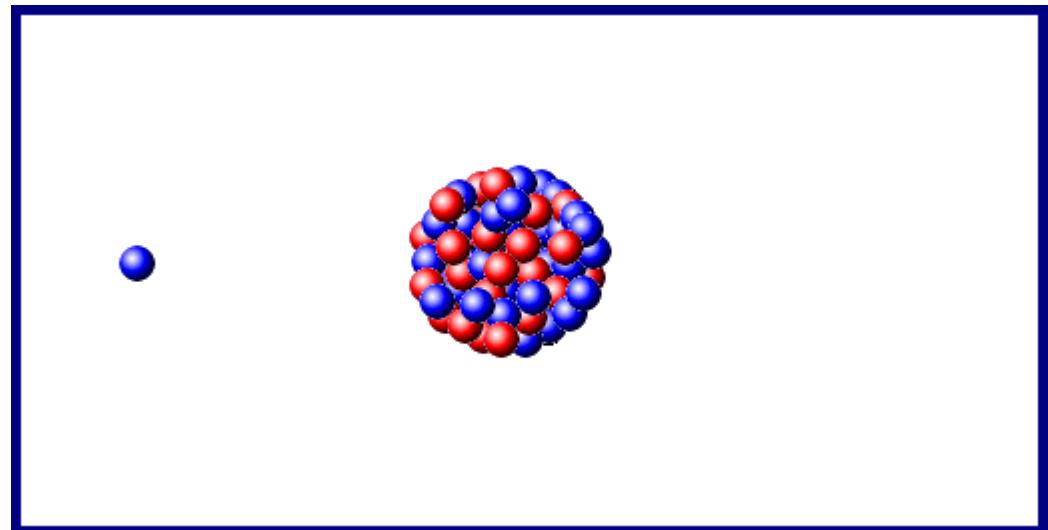
Fuzija

Spajanje manjih
jezgri u veću



Fisija

Raspad teških jezgri na
lakše

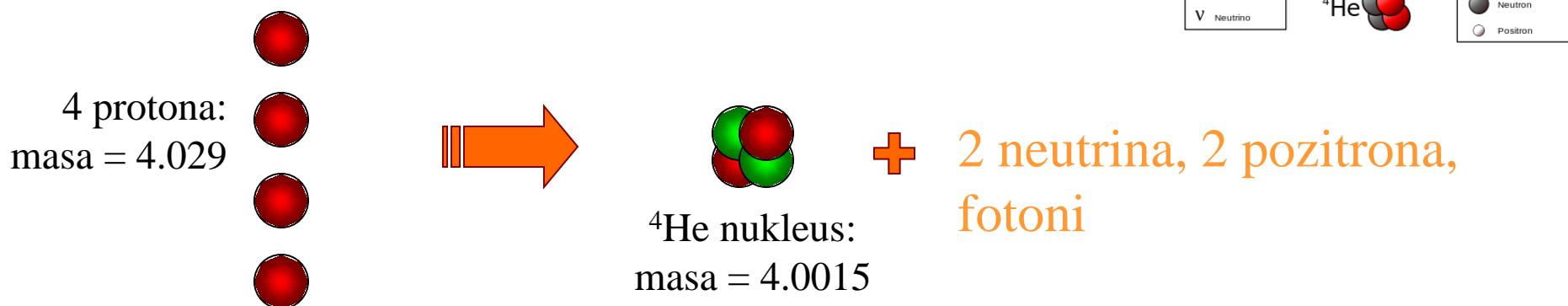


Fuzijske reakcije

Reaction		Ignition Temperature		Output Energy	
Fuel	Product	(millions of °C)	(keV)	(keV)	
D + T	${}^4\text{He} + \text{n}$ 	45	4	17,600	
D + ${}^3\text{He}$	${}^4\text{He} + \text{p}$ 	350	30	18,300	
D + D	${}^3\text{He} + \text{n}$ $\text{T} + \text{p}$ 	400	35	~4,000	
		400	35	~4,000	

Fuzija na Suncu

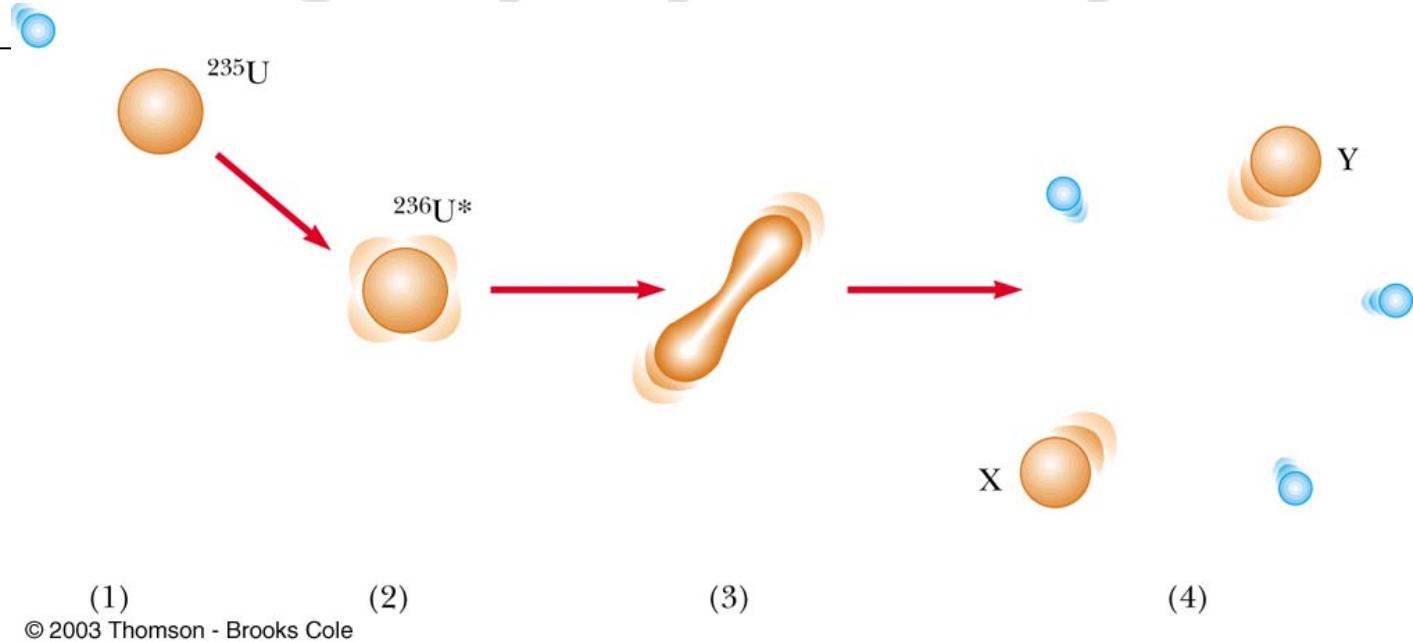
- Temperatura u centru oko 16 milijuna C
- Dovoljno kinetičke energije da približi protone (nadvlada odbojnu elektrostatsku silu) za nastanak D i He
- Stvarna reakcija se odvija u koracima
- Reakcija po molu daje ~20 milijuna puta više energije nego kemijske reakcije



$E=mc^2$ bilanca fuzije

- Jezgra He je lakša od sume 4 protona!
- Razlika masa $4,029 - 4,0015 = 0,0276$ a.m.u.
 - 0,7% mase nestaje, transformira se u energiju
 - 1 a.m.u. (atomic mass unit - ajm) je $1,6605 \times 10^{-27}$ kg
 - razlika je $4,58 \times 10^{-29}$ kg
 - što pomnoženo s c^2 daje $4,12 \times 10^{-12}$ J
 - 1 mol ($6,022 \times 10^{23}$ čestica) protona $\rightarrow 2,5 \times 10^{12}$ J
 - Tipična kemijska reakcija 100–200 kJ/mol
 - Nuklearna fuzija daje ~20 milijuna puta više energije!
 - približno 150 milijuna cal/g
 - 16 milijuna cal/g za uran, 10 cal/g za benzin

Sekvenca događaja tijekom fisije

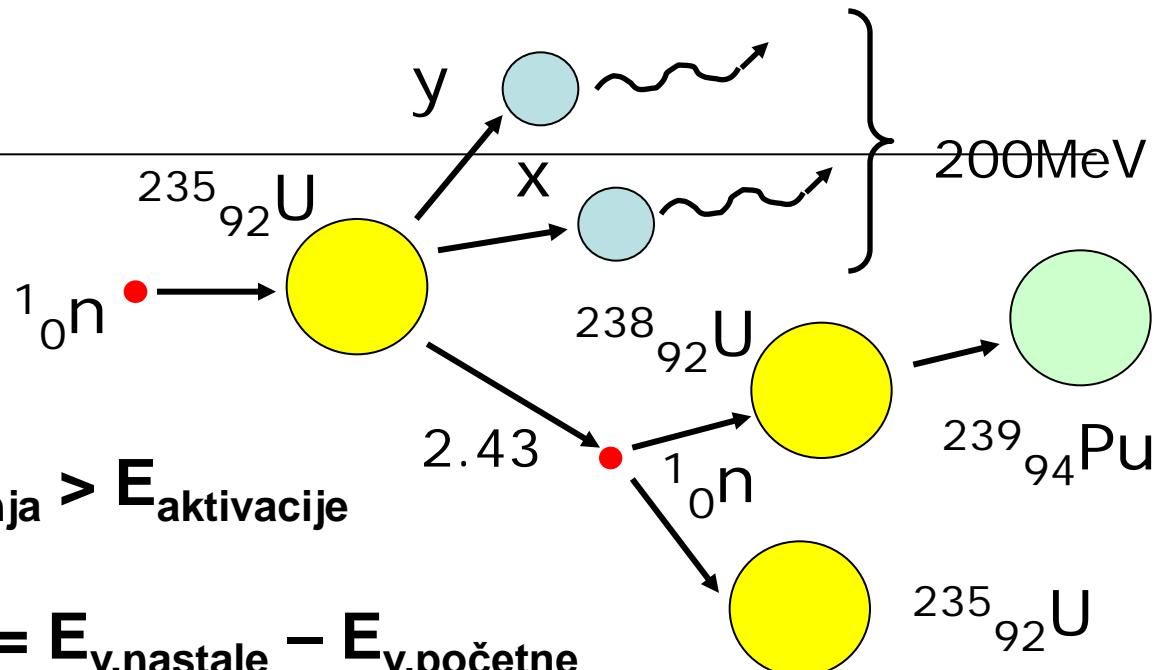


- Jezgra ^{235}U uhvati neutron
- Formira se složena jezgra $^{236}\text{U}^*$, koja raspolaže viškom energije (energija veze + kinetička energija neutrona) i počinje oscilirati i mijenjati oblik
- Za velika izobličenja jezgra $^{236}\text{U}^*$ privlačne nuklearne sile slabe i prevladavaju odbojne sile među protonima
- Jezgra se cijepa na dva dijela uz emisiju 2 do 3 neutrona i oslobođanje energije (proces fisije traje oko 1e-12 s)

Energija oslobođena u procesu fisije

- Energija veze za inicijalnu tešku jezgru je oko 7,2 MeV po nukleonu
- Energija veze za novonastale jezgre (fisijski fragmenti) je oko 8,2 MeV po nukleonu
- Fisijski fragmenti imaju manju energiju mirovanja nego početna jezgra, smanjenje mase po nukleonu rezultira u oslobađanju energije tijekom fisije
- Procjena oslobođene energije za U-235
 - 235 nukleona
 - Oslobađa se oko 1 MeV energije po nukleonu
 $(8,2 \text{ MeV} - 7,2 \text{ MeV})$
 - Ukupna oslobođena energija je oko 235 MeV
 - 85% navedene energije je kinetička energija fisijskih fragmenata
- Napomena: red veličine energije oslobođene pri kemijskim procesima je desetak eV

Fisija urana



Fisija: $\Delta E_{\text{vezanja}} > E_{\text{aktivacije}}$

$$\Delta E_{\text{vezanja.jezgre}} = E_{v.\text{nastale}} - E_{v.\text{početne}}$$

$E_{\text{aktivacije}} = \text{potrebna energija za fisiju}$

U235 – fisibilan

U238 – fisibilan s pragom

$$1 \text{ eV} = 1,60219 \times 10^{-19} \text{ J}$$

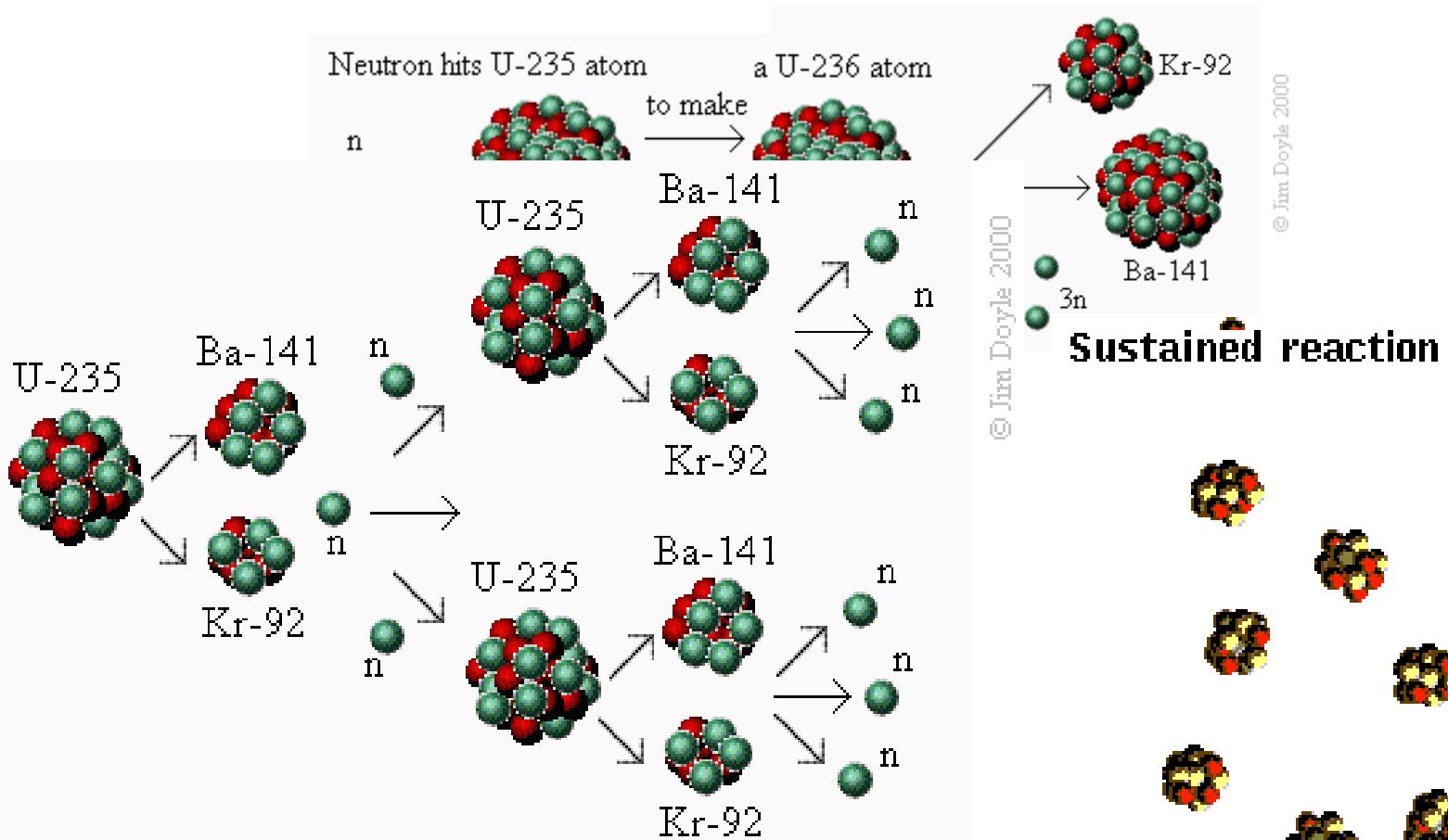
$$200 \text{ MeV} = 3,204 \times 10^{-11} \text{ J}$$

Energija iz fisije	
Kinetička fragmenata	83.5%
Trenutne γ -zrake	2.5%
Kinetička neutra	2.5%
β -raspad fragmenata	3.5%
γ zrake fragmenata	3.0%
Energija neutrina	5.0%

Fisijski, fisibilni i oplodni nuklearni materijali

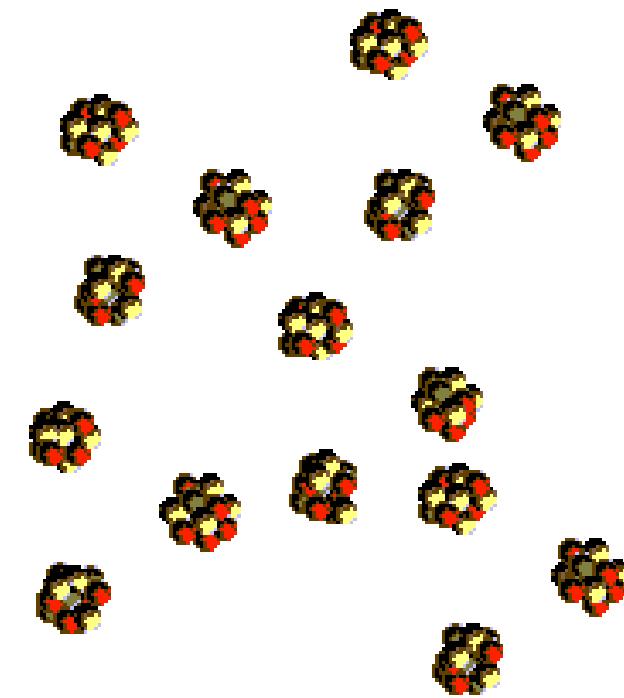
- Fisijski materijal – fisija je moguća neutronima bilo koje energije (U-233, U-235, Pu-239, Pu-241)
- Fisibilni materijal – fisija neutronima je moguća ali ovisi o energiji neutrona (oslobodjena energija veze + kinetička energija neutrona > energija aktivacije), (U-238, Pu-242 + svi fisijski nuklearni materijali)
- Oplodni materijal – materijal koji uhvatom neutrona prelazi u neki od fisijskih materijala, (Th-232, U-238)

Fisija urana i lančana reakcija



2000

Sustained reaction



Lančana reakcija

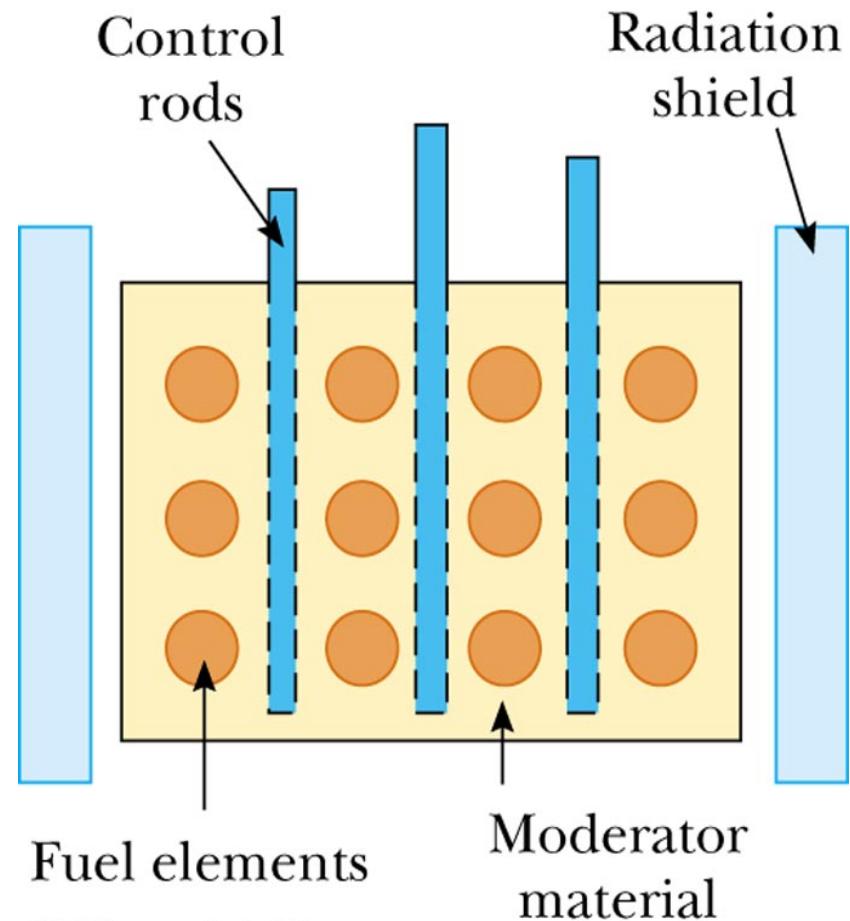
- Neutroni dobiveni fisijom služe za izazivanje novih fisija
- Slobodnih neutrona nema u prirodi (neutron van jezgra se raspada s vremenom poluraspada od oko 10,3 min) pa su neutroni nastali pri fisiji od velikog značaja za energetsku primjenu fisije
- **1942**: Fermi prva samoodržavajuća nuklearna lančana reakcija.
- Ovisno o uvjetima multiplikacije neutrona njihov broj može rasti ili padati
- Oslobođena energija je direktno proporcionalana broju reakcija fisije
- Nekontrolirani porast rezultira nuklearnom eksplozijom ali samo ako je koncentracija jezgara urana U-235 dovoljno velika da podrži porast broja neutrona po geometrijskoj progresiji

Nuklearni reaktor

- Nuklearni reaktor je sustav projektiran da omogući kontroliranu samoodržavajuću nuklearnu reakciju fisije
- Parametar koji opisuje tijek odvijanja procesa naziva se multiplikacijski faktor k .
- Definiran je kao omjer srednjeg broja neutrona u dvije susjedne generacije neutrona (prije i poslije fisije)
- Da bi se nuklearna reakcija mogla nadzirati njegova vrijednost k ne smije biti puno veća od 1
- Reaktor koji ima $k=1$ zovemo **kritičnim reaktorom** i on održava konstantan broj neutrona i snagu proizvedenu fisijom
- Ako je $k < 1$ broj neutrona i snaga reaktora će se s vremenom smanjivati i reaktor zovemo **podkritičnim** a ako je $k > 1$ broj neutrona u reaktoru i snaga reaktora će se povećavati i reaktor zovemo **nadkritičnim**
- Kako je k u praksi vrlo blizu 1 uvedena je veličina koja se naziva reaktivnost i definirana je kao $\rho = (k-1)/k$ i predstavlja relativno odstupanje reaktora od kritičnog stanja

Osnovni izgled reaktora

- Nuklearno gorivo je organizirano u gorivne elemente
- Moderator je materijal koji ima sposobnost usporavanja neutrona
- Rashladno sredstvo odvodi toplinu iz reaktora
- Posebni kontrolni elementi napravljeni od materijala koji apsorbiraju neutrone služe za nadzor broja neutrona raspoloživih za fisiju
- Nuklearno gorivo, moderator, rashladno sredstvo i kontrolni element čine jezgru reaktora
- Jezgra je okružena štitom od zračenja



© 2003 Thomson - Brooks Cole

Zadatak 1

Odredite ogrjevnu moć antracita u MJ/kg ako je poznato da se izgaranjem jednog atoma ugljika oslobađa 4,79 eV energije. Prepostaviti da je težinski udjel ugljika u antracitu 0,98 i da izgori kompletan ugljik.

Na isti način odredite ogrjevnu moć 1 kg prirodnog urana (izotopske učestalosti/udjeli su 99,282% za U-238, 0,712% za U-235, 0,006% za U-234) i 1 kg 3% obogaćenog UO_2 goriva.

Obogaćenje (e) je definirano kao maseni udjel U-235 u ukupnom uranu ($e = m_{\text{U-235}}/m_{\text{U}} * 100\%$).

Prepostaviti da se fisijom jezgra U-235 oslobodi 200 MeV energije.

Korisne definicije:

a_i atomski sadržaj ili izotopska učestalost izotopa i

w_i maseni udjel izotopa i

A_i atomska masa izotopa i

N_i broj jezgara izotopa i

n broj izotopa razmatranog elementa

$$a_i = \frac{N_i}{\sum_{j=1}^n N_j}$$

$$w_i = \frac{a_i A_i}{\sum_{j=1}^n a_j A_j}$$

$$w_i = \frac{A_i N_i}{\sum_{j=1}^n A_j N_j}$$

Zadatak 1: rješenje

- A) broj jezgara ugljika u 1 kg antracita=broj oksidacija

$$N_C = 0,98 \text{ m} \quad N_A/A_C = 0,98 * 1 * 6,022 \cdot 10^{26} / 12 = 4,918 \cdot 10^{25} \text{ atoma C}$$

Proizvedena energija: 4,79 eV $1,6 \cdot 10^{-19}$ J/eV $N_C = 37,69 \text{ MJ/kg}$

- B) broj jezgara U-235 u 1kg prirodnog urana=broj fisija

$$N_{235} = a_{235} \text{ m} \quad N_A / (a_{234}A_{234} + a_{235}A_{235} + a_{238}A_{238})$$

$$N_{235} = 0,00712 * 1 \text{ kg} * 6,022 \cdot 10^{26} / (0,00006 * 234 + 0,00712 * 235 + 0,9982 * 238) = 1,792 \cdot 10^{22} \text{ atoma}$$

Proizvedena energija: 200 MeV $1,6 \cdot 10^{-13}$ J/MeV $N_{235} = 57,34 \cdot 10^4 \text{ MJ/kg}$

- C) broj jezgara U-235 u 1kg 3% obogaćenog urana=broj fisija

Atomska masa uran metala $A_U^{-1} = 0,03/235 + 0,97/238$, $A_U = 237,91$

Obogaćenje $e = m_{U235} / m_U * 100\%$

Atomska masa UO_2 $A_{UO2} = 237,91 + 2 * 16 = 269,91$

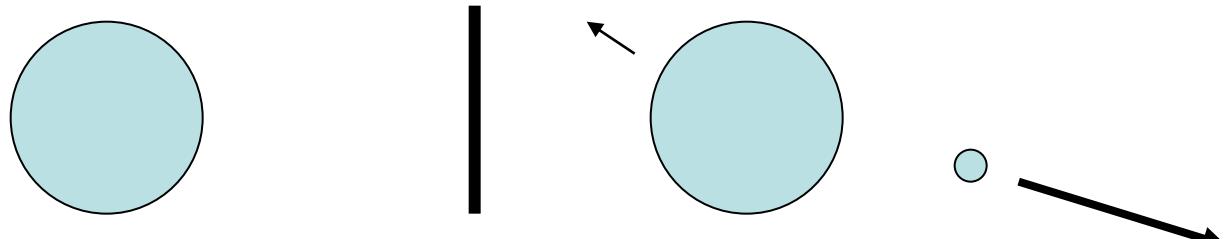
Težinski udjel urana u UO_2 $w_U = 237,91 / 269,91 = 0,8814$

$N_{235} = e w_U m_{UO2} N_A / A_{U235} = 0,03 * 0,8814 * 1 * 6,022 \cdot 10^{26} / 235 = 6,776 \cdot 10^{22}$

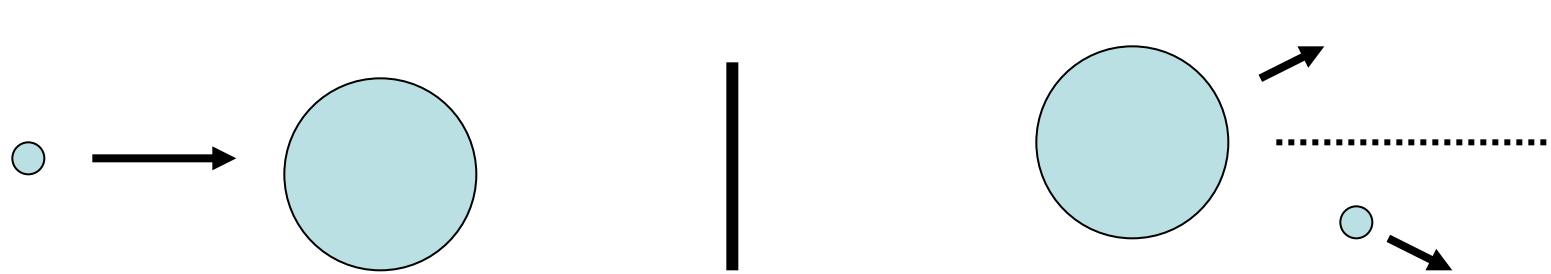
Proizvedena energija: 200 MeV $1,6 \cdot 10^{-13}$ J/MeV $N_{235} = 2,17 \cdot 10^6 \text{ MJ/kg}$

Dva tipa nuklearnih reakcija

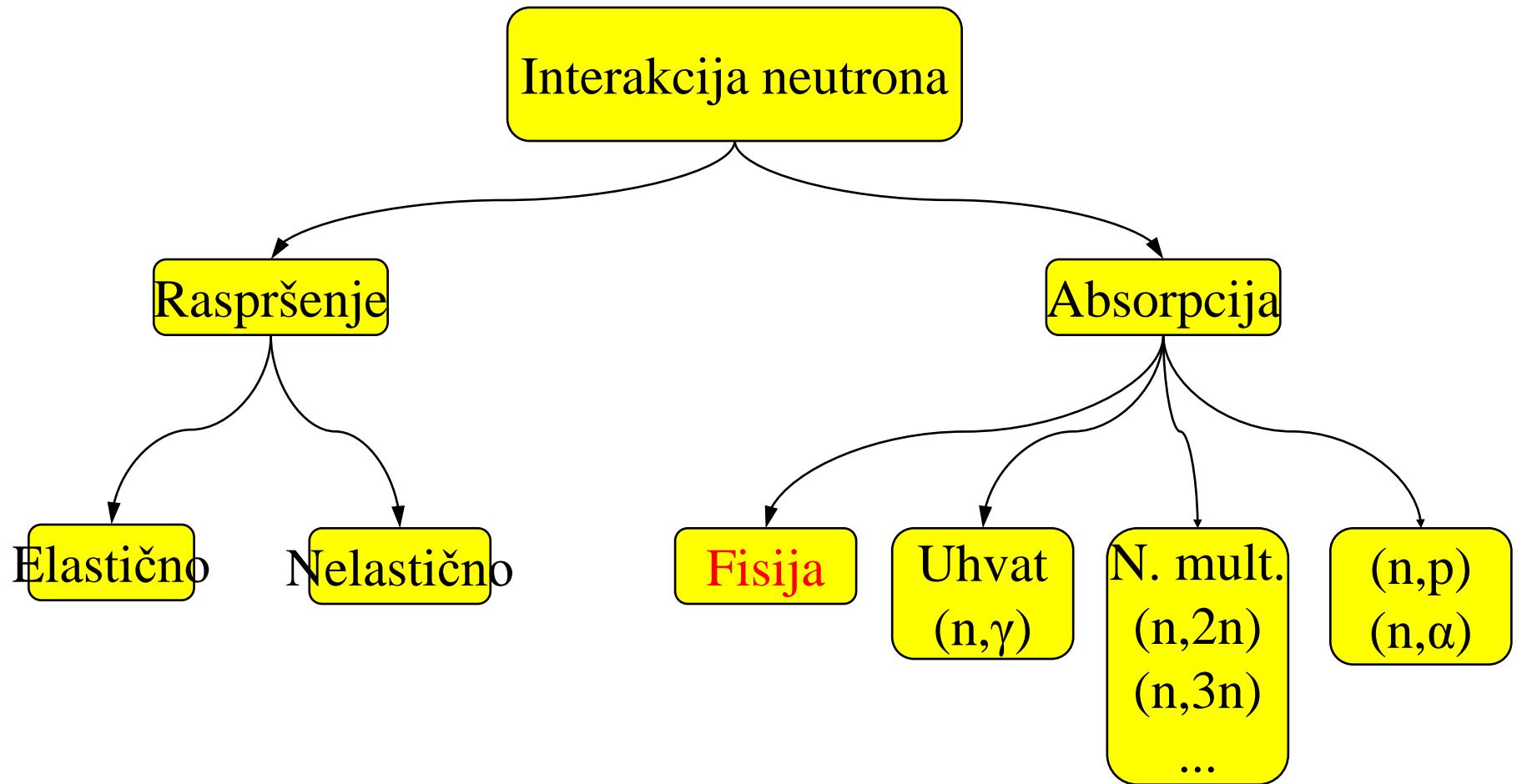
Radioaktivni raspad – jezgra se spontano raspada emitirajući česticu/kvant energije (α , β , γ -raspad)



Sudar neutrona i jezgre – raspršenje ili absorpcija

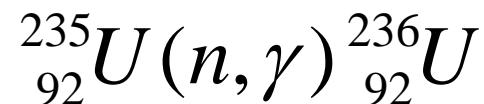
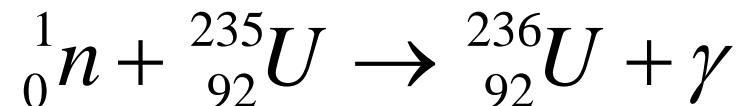


Interakcije neutrona s materijom



Način zapisivanja nuklearne reakcije

$$a + b \rightarrow c + d \quad a(b, c)d$$



Projektil, meta, rezultirajuća jegra, emitirana čestica

Energetski prinos nuklearne reakcije

$$E = mc^2$$

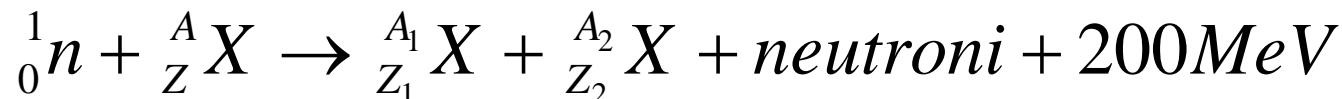
$$Q = [(M_a + M_b) - (M_c + M_d)] c^2$$

$Q > 0$ egzotermna, oslobađa se energija

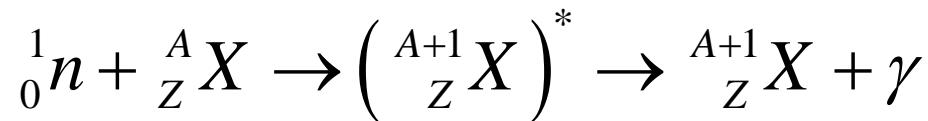
$Q < 0$ endotermna, potrebno je ulagati energiju

Najvažnije reakcije s neutronima

Nuklearna fisija (n, fis)



Radijativni uhvat (n, γ)



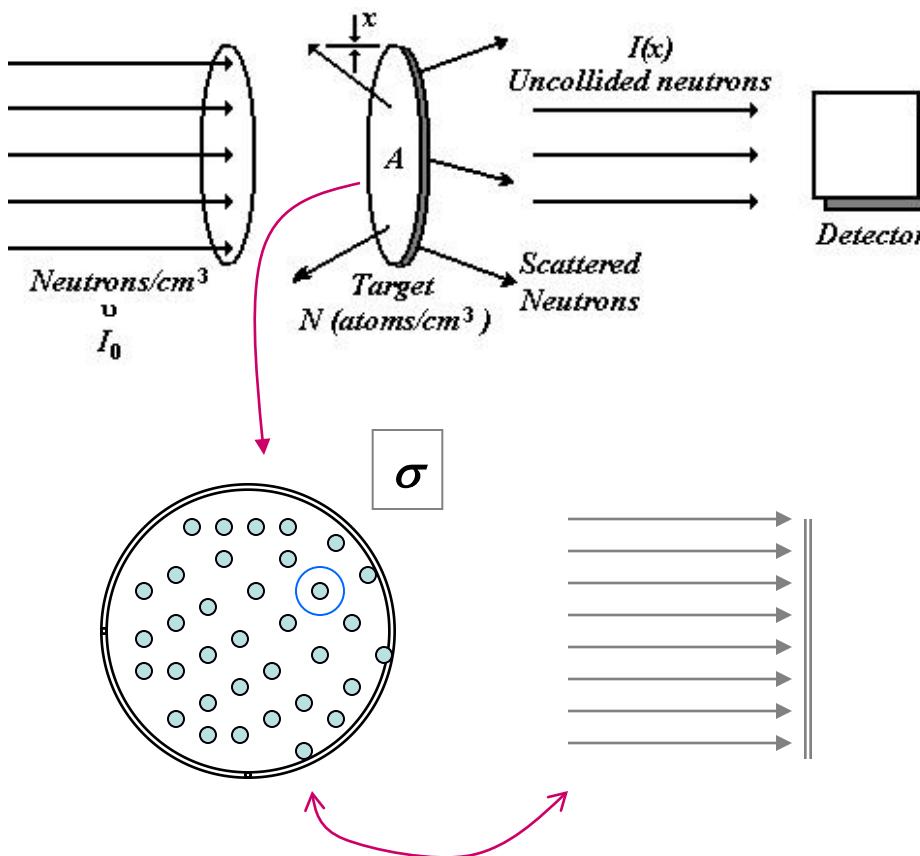
Raspršenje (n, n) or (n, n')



neelastično rasprešenje (n,n')

Mikroskopski udarni presjek za nuklearnu reakciju

Predstavlja vjerojatnost da dođe do nuklearne reakcije



Ovisi o čestici koja izaziva reakciju i njenoj energiji, tipu reakcije i materijalu mete. Ima dimenziju površine (cm², m², barn=10⁻²⁴ cm²).

Za velike energije se približava površini presjeka projekcije jezgre i projektila ali je kvantnomehanička veličina.
Oznaka: σ .

$$\sigma = \frac{\text{reaction / s nucleus}}{\text{neutrons / cm}^2 \text{s}} = \frac{\text{reaction cross section } (\text{cm}^2)}{\text{neutron nucleus}}$$

Gustoća reakcija

$$R = \sigma I N_A$$
$$\left[\frac{\#}{cm^2 s} \right] \quad \left[cm^2 \right] \left[\frac{\#}{cm^2 s} \right] \left[\frac{\#}{cm^2} \right]$$

Broj sudara u jedinici vremena
po jedinici površine (R)
proporcionalan je intenzitetu
neutrona u snopu (I) i plošnoj
gustoći jezgara mete (N_A) –
konstanta proporcionalnosti
zove se neutronski mikroskopski
udarni presjek (σ)

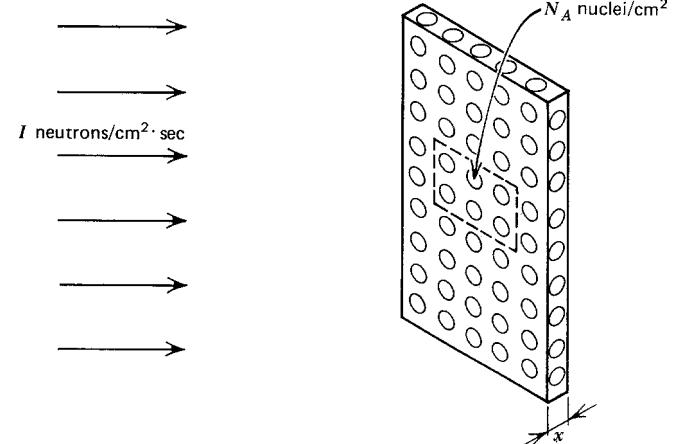


FIGURE 2-1. A monoenergetic neutron beam incident normally upon a thin target.

Ukupni mikroskopski udarni presjek

- **Udarni presjek je aditivna veličina**
- **Ukupni udarni presjek je suma presjeka za pojedine reakcije (parcijalni udarni presjeci):**
 - elastično + neelastično raspršenje, uhvat + fisija, emisija nabijene čestice, emisija neutrona

$$\sigma_t(E) = \left\{ \begin{array}{ll} \sigma_s(E) & \text{elastično raspršenje} \\ +\sigma_{in}(E) & \text{neelastično raspršenje} \\ +\sigma_c(E) & \text{uhvat} \\ +\sigma_f(E) & \text{fisija} \\ +\sigma_{n,2n}(E) & (n,2n) \text{ reakcija} \end{array} \right\} = \sigma_s(E) \quad \text{raspršenje}$$
$$= \sigma_a(E) \quad \text{absorpcija}$$

Makroskopski udarni presjek za reakciju

Smanjenje intenziteta
neutronske struje po jedinici
dužine
jednako je broju reakcija s
materijalom mete. Broj neutrona
u snopu se smanjuje po
eksponencijalnom zakonu.

$$\frac{dI(x)}{dx} = -N\sigma_t I(x)$$

$$I(x) = I_0 e^{-N\sigma_t x}$$

Produkt mikroskopskog udarnog
presjeka i gustoće jezgara mete
zove se makroskopski udarni
presjek.

Ima značenje inverznog srednjeg
slobodnog puta između dvije
reakcije.

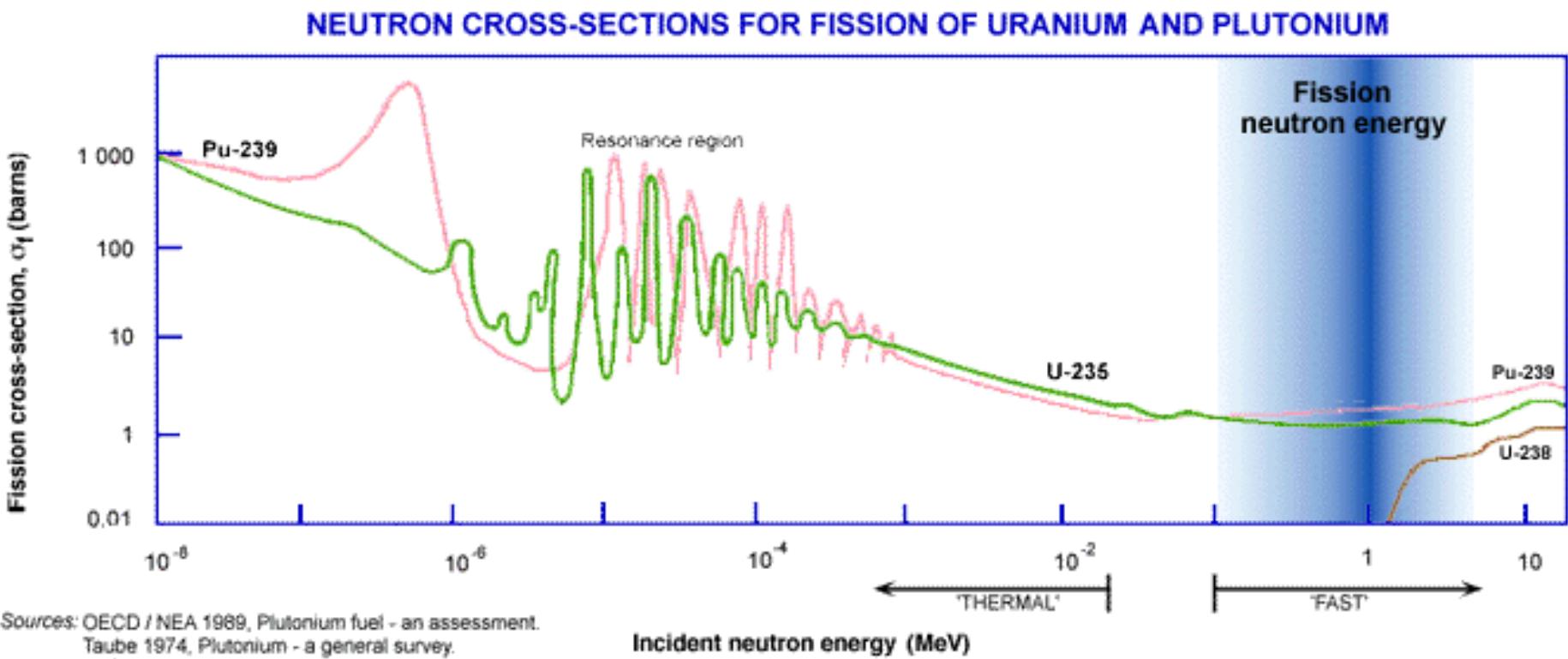
$$\Sigma_t \equiv N \sigma_t$$

$$[\text{cm}^{-1}] = [\#/ \text{cm}^3] [\text{cm}^2]$$

Udarni presjek za fisiju

Udarni presjek ovisi o energiji i uglavnom se smanjuje s porastom energije neutrona

Veća je vjerojatnost izazivanja fisije sporim neutronima



Snaga nuklearnog reaktora

- Ovisi o broju fisija u jedinici vremena i o energetskom prinosu fisije
- Broj fisija u jedinici volumena i jedinici vremena jednak je produktu neutronskog toka i makroskopskog udarnog presjeka za fisiju
- Neutronski tok Φ je broj neutra na koji u jedinici vremena prođe kroz jediničnu površinu u reaktoru (skalarna je veličina)
- Makroskopski udarni presjek je produkt gustoće jezgara fisibilnog materijala i mikroskopskog presjeka za fisiju

$$v \approx 2.5 \text{ n/fiss}$$

$$\varepsilon_f \approx 200 \text{ MeV/fiss}$$

$$\text{MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$P_{\text{thermal}} = N_{\text{fission}} \cdot \varepsilon_f = \Phi \cdot \Sigma_{\text{fission}} \cdot V \cdot \varepsilon_f$$

$$[\text{W}] = [\#\text{fiss/s}] \cdot [\text{MeV/fiss}] \cdot [\text{J/MeV}]$$

Zadatak 2

- SNAP (Systems for Nuclear Auxilliary Power) generator koristi kao toplinski izvor reakciju $_{94}^{Pu}238 \rightarrow _{92}^{U}234 + _2^4He$. Inicijalno punjenje sadrži 475 g Pu²³⁸C. Gustoća PuC je 12,5 g/cm³. Vrijeme poluraspada za $_{94}^{Pu}238$ je 86 godina a za $_{92}^{U}234$ je $2,47 \cdot 10^5$ godina. Atomske mase su za Pu²³⁸ 238,0496 ajm, $_{92}^{U}234$ 234,0409 ajm, $_2^4He$ 4,0026 ajm i C¹² 12,01 ajm. Odrediti početnu volumnu gustoću toplinske snage i ukupnu toplinsku snagu izvora.
- $1 \text{ ajm} \approx 1,660538782 (83) \times 10^{-27} \text{ kg} \approx 931,494027 (23) \text{ MeV/c}^2$ ($c=299\ 792\ 458 \text{ m/s}$)

Zadatak 2: rješenje

- Odrediti snagu i volumnu gustoću termoionskog generatora u kome kao izvor topline služi alfa emiter



- Odrediti energetski prinos reakcije preko defekta mase
 $\Delta m = 238,0496 - 234,0409 - 4,0026 = 6,1 \cdot 10^{-3}$ ajm
- Energetski ekvivalent defekta mase od 1 ajm je 931,49 MeV, $\Delta E = 6,1 \cdot 10^{-3}$ ajm * 931,49 MeV/ajm = 5,682 MeV
- Konstanta radioaktivnog raspada
 $\lambda = \ln 2 / T = \ln 2 / (86 * 365 * 24 * 3600) = 2,556 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$
- Atomska masa PuC $A_{\text{PuC}} = 238,0496 + 12,01 = 250,0596$
- Broj jezgara Pu u jedinici volumena
- $N = \rho N_A / A_{\text{PuC}} = 12,5 * 6,022 \cdot 10^{23} / 250,0596 = 3,01 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$

Zadatak 2: rješenje

- Aktivnost izvora

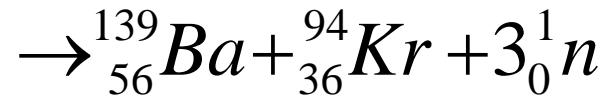
$$A = \lambda N = 2,556 \cdot 10^{-10} \cdot 3,01 \cdot 10^{22} = 7,69 \cdot 10^{12} \text{ raspad/cm}^3\text{-s}$$

- Volumna gustoća snage je $A \cdot \Delta E = 6,994 \text{ W/cm}^3$

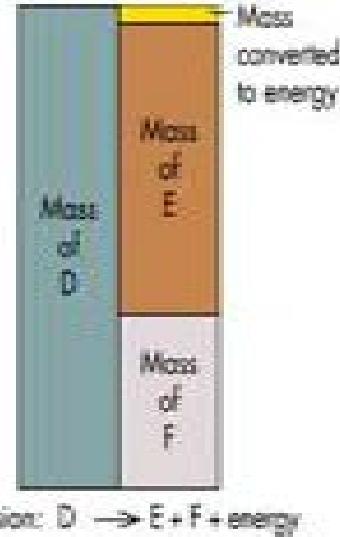
- Ukupna snaga izvora je

$$6,994 \text{ W/cm}^3 \cdot m / \rho = 265,8 \text{ W}$$

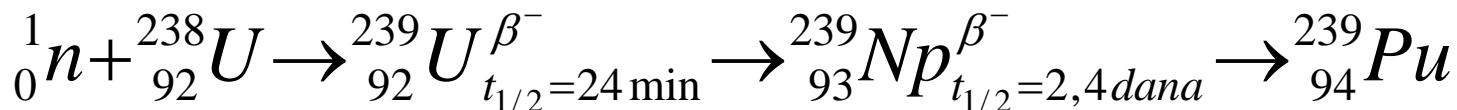
Fisijski produkti



fisija



$_0^1n (> 1 MeV) + {}_{92}^{238}U \rightarrow \text{fisijski produkti, neutroni}$



uhvat

Veći dio neutrona se pojavi neposredno nakon fisije i zovemo ih **promptni neutroni**.

Manje od 1% neutrona je rezultat raspada fisijskih produkata i zovemo ih **zakašnjeli neutroni** (prosječno vrijeme kašnjenja par sekundi).

Ostatna toplina

- Fisijom nastaju nova jezgra – neposredno nakon fisije zovemo ih fisijski fragmenti, kasnije fisijski produkti
- Postoji stotinjak načina na koji se teška jezgra može cijepati
- Novonastala jezgra su beta i gama radioaktivna jer imaju višak neutrona obzirom na broj protona Z
- Približno 180 MeV energije se oslobodi neposredno pri fisiji a oko 20 je posljedica radioaktivnog raspada fisijskih produkata
- Brzina osobađanja te zakašnjele energije ovisi o konstantama radioaktivnog raspada fisijskih produkata
- Radioaktivnost fisijskih produkata i pripadajuća toplina (zovemo je **ostatna toplina**) osnovni su sigurnosni problem u reaktoru
- Zaustavljanjem lančane reakcije ovaj izvor ne nestaje
- Neposredno nakon obustave reaktora ostatna toplina iznosi približno 6% nominalne snage na kojoj je reaktor radio
- Zbog velikog broja fisijskih produkata iznos ostatne topline uzimamo u obzir aproksimativnim relacijama

Ostatna toplina - izvor

^{80}Br fizijski produkt, energetski prinos

β^- raspad: $^{80}\text{Br} \rightarrow {}^{80}\text{Kr} + e^- + \bar{\nu}_e$

$$\begin{aligned} Q(\beta^-) &= M({}^{80}\text{Br})c^2 - M({}^{80}\text{Kr})c^2 \\ &= 79,918528 \text{ uc}^2 - 79,916377 \text{ uc}^2 \end{aligned}$$

$$Q(\beta^-) = (0,002151 \text{ uc}^2) (931,5 \text{ MeV/uc}^2) = \underline{\text{2,00 MeV}}$$



$$Q (\text{MeV}) = \left[Mass\left({}^A_Z X\right) - Mass\left({}^A_{Z+1} D\right) \right] c^2$$

*electron mass included in daughter nucleus

Ostatna toplina

**Generirana snaga
nakon obustave reaktora:
ostatna toplina posljedica je
radioaktivnog raspada fizijskih produkata**

P_0 – snaga reaktora prije obustave

t_0 – vrijeme rada reaktora na snazi P_0

τ – vrijeme rada i obustave

(empirijska relacija - vremena su u danima)

$$P = P_0 \cdot 0,0061 \cdot \left[(\tau - t_0)^{-0,2} - \tau^{-0,2} \right]$$

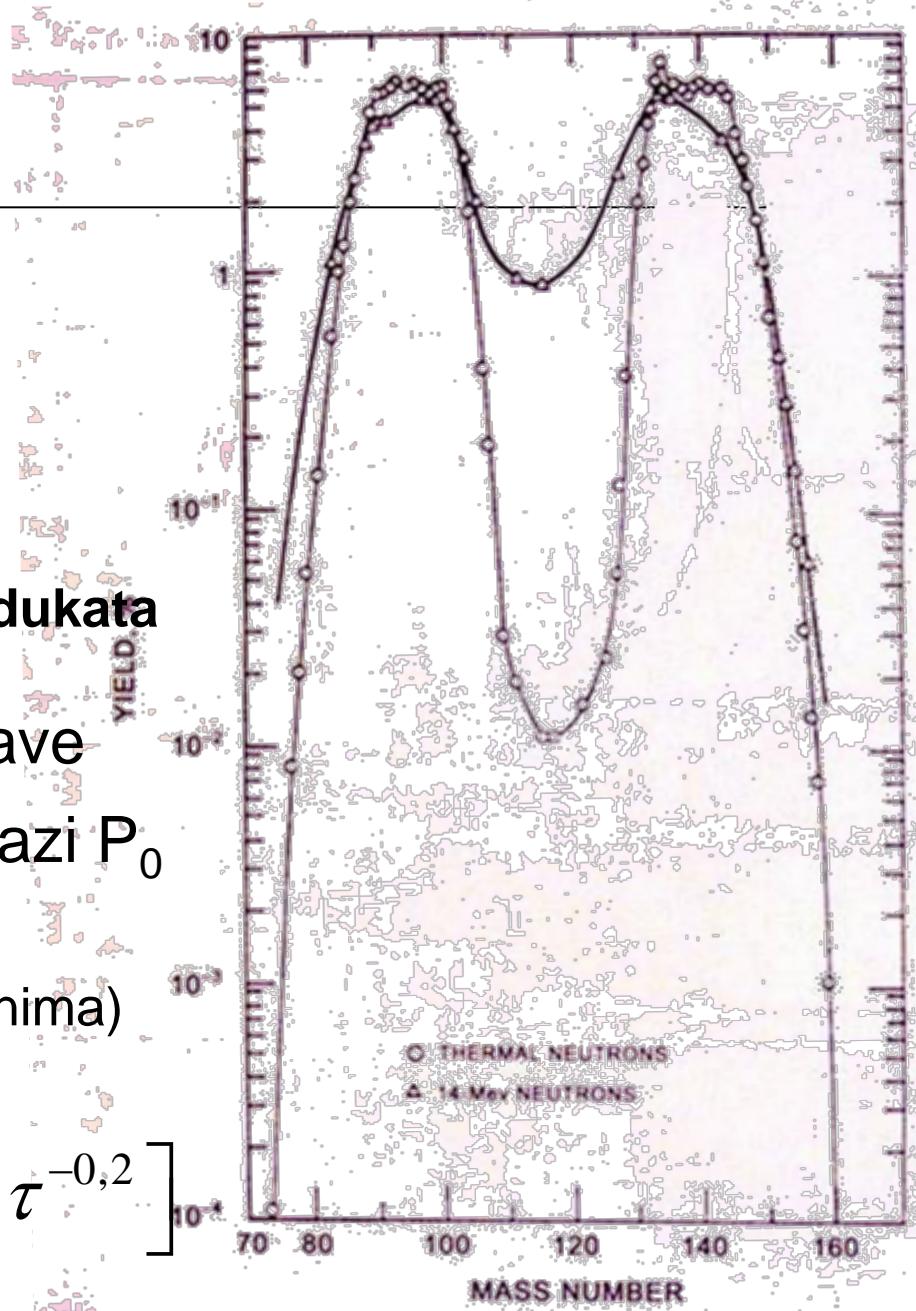
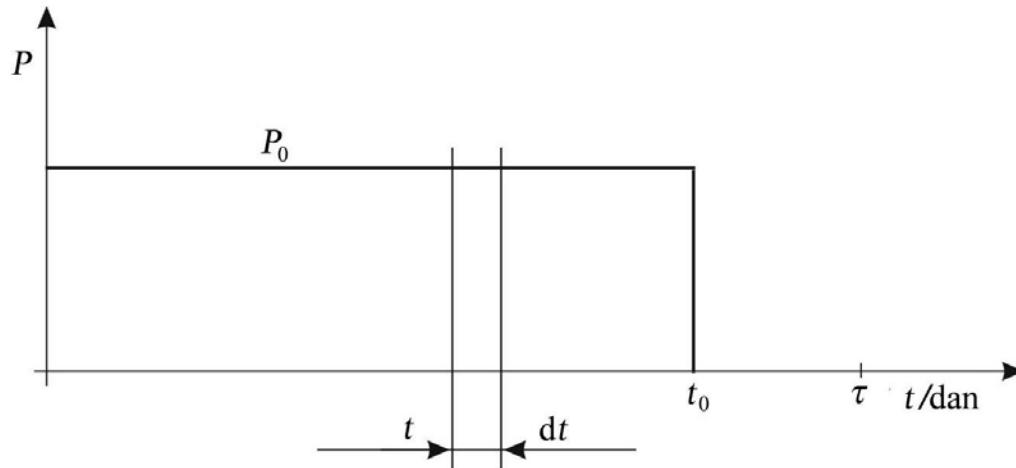


Fig. 1.9. Yield versus mass number for ^{235}U fission. (From Ref. 15).

Snaga u obustavljenom reaktoru



- Vrijeme rada (na konstatnoj snazi) i vrijeme obustave (dan)
- Za slučaj više odvojenih perioda pogona sumiraju se snage u željenom trenutku nakon obustave
- Za odrediti oslobođenu energiju potrebno je integrirati

$$P = P_0 \cdot 0,0061 \cdot \left[(\tau - t_0)^{-0,2} - \tau^{-0,2} \right]$$

Zadatak 3

- Jezgra nuklearnog reaktora sastavljena je od 193 gorivna elementa, svaki s 517,4 kg UO₂ goriva. Prosječno težinsko obogaćenje je 2,78% U-235. Srednji neutronski tok u jezgri reaktora je $2,327 \cdot 10^{17} \text{ n}/(\text{m}^2\text{s})$ na punoj snazi. Reaktor je radio 6 mjeseci na 95% pune snage. Izračunati koliki je porast temperature hladioca u jezgri reaktora treći dan nakon obustave, ako je maseni protok sustava za odvođenje ostatne topline (RHR) 163 kg/s. Udarni presjek za fisiju u U-235 je $\sigma_f = 582 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$, energija oslobođena pri fisiji je 200 MeV, a specifični toplinski kapacitet hladioca $c_p = 4,2 \text{ kJ/kgK}$.

Zadatak 3: rješenje

- Ukupna masa UO_2
- $m = 193 \text{ FA} * 517,4 \text{ kg/FA} = 99858,2 \text{ kg}$
- Toplinska snaga reaktora je
- $P = 200 * 1,6 \cdot 10^{-13} * N_{235} \sigma_{235} \Phi$
- Broj jezgara U-235 je
- $N_{235} = e m \frac{238}{270} N_A / 235 =$
 $0,0278 * 99858,2 * 238 / 270 * 6,022 \cdot 10^{26} / 235 = 6,27 \cdot 10^{27}$
- $P = 3,2 \cdot 10^{-11} 6,27 \cdot 10^{27} 582 \cdot 10^{-28} 2,327 \cdot 10^{17} = 2717 \text{ MW}$

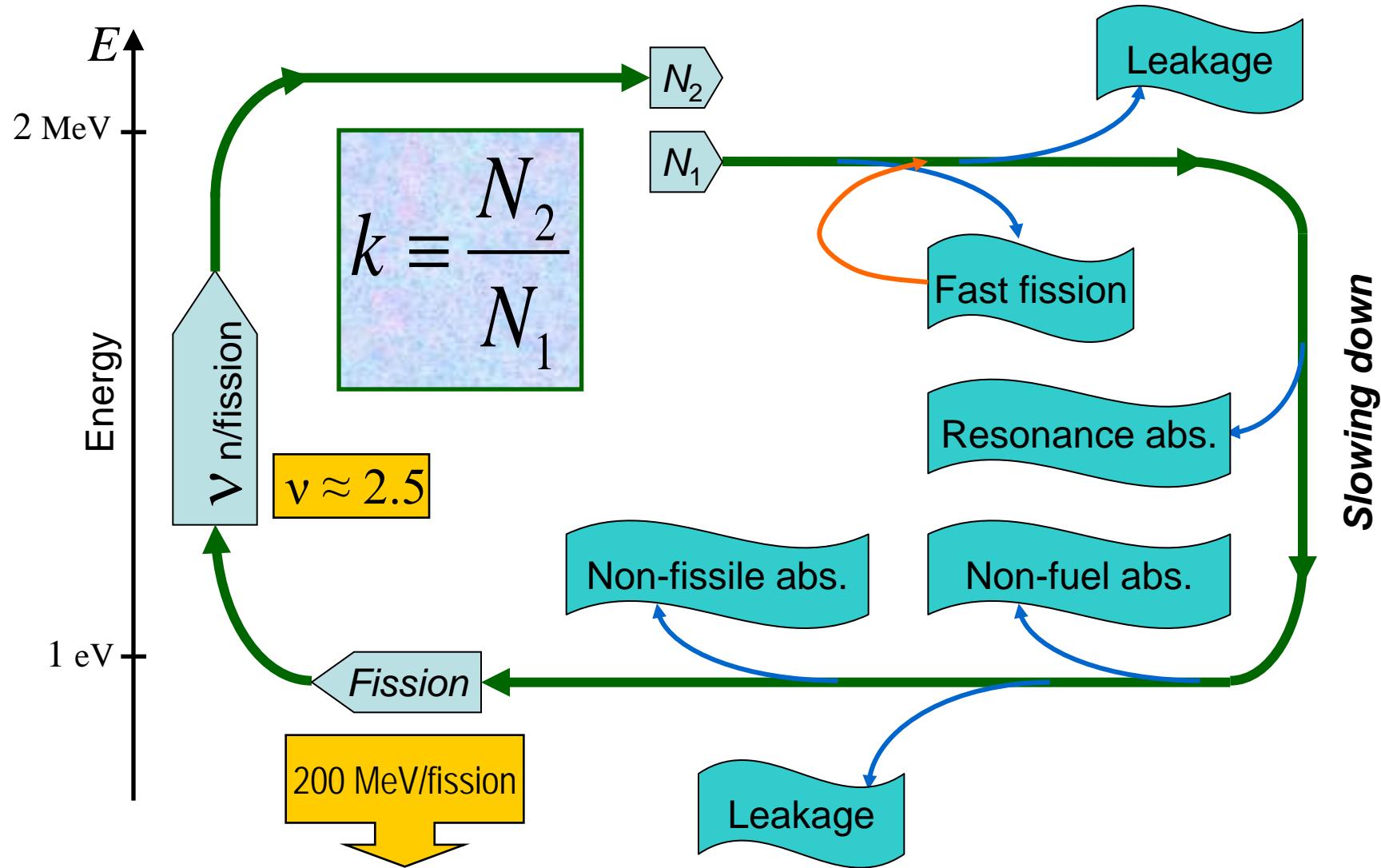
Zadatak 3: rješenje

- $P(t)/P_0 = 6,1 \cdot 10^{-3} ((183-180)^{-0.2} - 183^{-0.2}) = 0,00274$
- $P(t) = 0,00274 * 0,95 * 2717 \text{ MW} = 7,07 \text{ MW}$
- Ako imamo više intervala rada na snazi odgovarajuće ostatne topline se zbrajaju
- Porast temperature rashladnog sredstva odredimo iz

$$P = m c_p \Delta T$$

- $\Delta T = 7,07 \cdot 10^6 / (4,2 \cdot 10^3 * 163) = 10,33 \text{ K}$

Ciklus neutrona u reaktoru



Ciklus neutrona u reaktoru

- Ciklus neutrona počinje fisijom a završava proizvodnjom iduće generacije neutrona nakon vremena koje se zove *vrijeme života neutrona*
- Omjer broja neutrona u dvije susjedne generacije je *faktor multiplikacije*
- Neutron u reaktoru može biti apsorbiran, izazvati fisiju ili pobjeći van granica reaktora
- Neutron nastaje kao brzi neutron (energija oko 1 MeV) i treba ga usporiti jer se time povećava vjerojatnost fisije
- Najveći broj fisija u termičkim reaktorima izazivaju termički (spori) neutroni energije od 0,0253 eV do 0,625 eV
- Proces snižavanja energije događa se tijekom elastičnih sudara neutrona i materijala koji se zove *moderator*

Ciklus neutrona u reaktoru

- Neutroni su unutar reaktora podvrgnuti procesu difuzije (struje od mesta veće gustoće prema mjestu niže gustoće)
- Za kritičnost reaktora bitne su dvije vrste neutrona
- Promptni neutroni nastaju direktno pri fisiji
- Zakašnjeli neutroni su rezultat raspada fizijskih produkata
- Udjel zakašnjelih neutrona u ukupnom broju neutrona je od 0,22% do 0,65%
- Najveći broj zakašnjelih neutrona se pojavi unutar 70 s nakon procesa fisije
- Zakašnjeli neutroni su bitni za kontrolu reaktora

Što treba znati (naučiti) – 10 O prijepornostima nuklearne elektroenergetike i energetskim pretvorbama i procesima u nuklearnim elektranama (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepr>)

- Što su nukleoni
- Što su izotopi i što je izotopska učestalost
- Granice stabilnosti i radioaktivnost
- Defekt mase
- Energija veze i energija veze po nukleonu
- Prijeklo energije oslobođene u reakciji i tip promjene za reakcije fisije i fuzije
- Tijek reakcije fisije, energetski prinos reakcije i što nastaje fisijom
- Što je lančana reakcija
- Što su promptni a što zakašnjeli neutroni
- Što je ostatna toplina

Što treba znati (naučiti) – 10 O prijepornostima nuklearne elektroenergetike i energetskim pretvorbama i procesima u nuklearnim elektranama (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepr>)

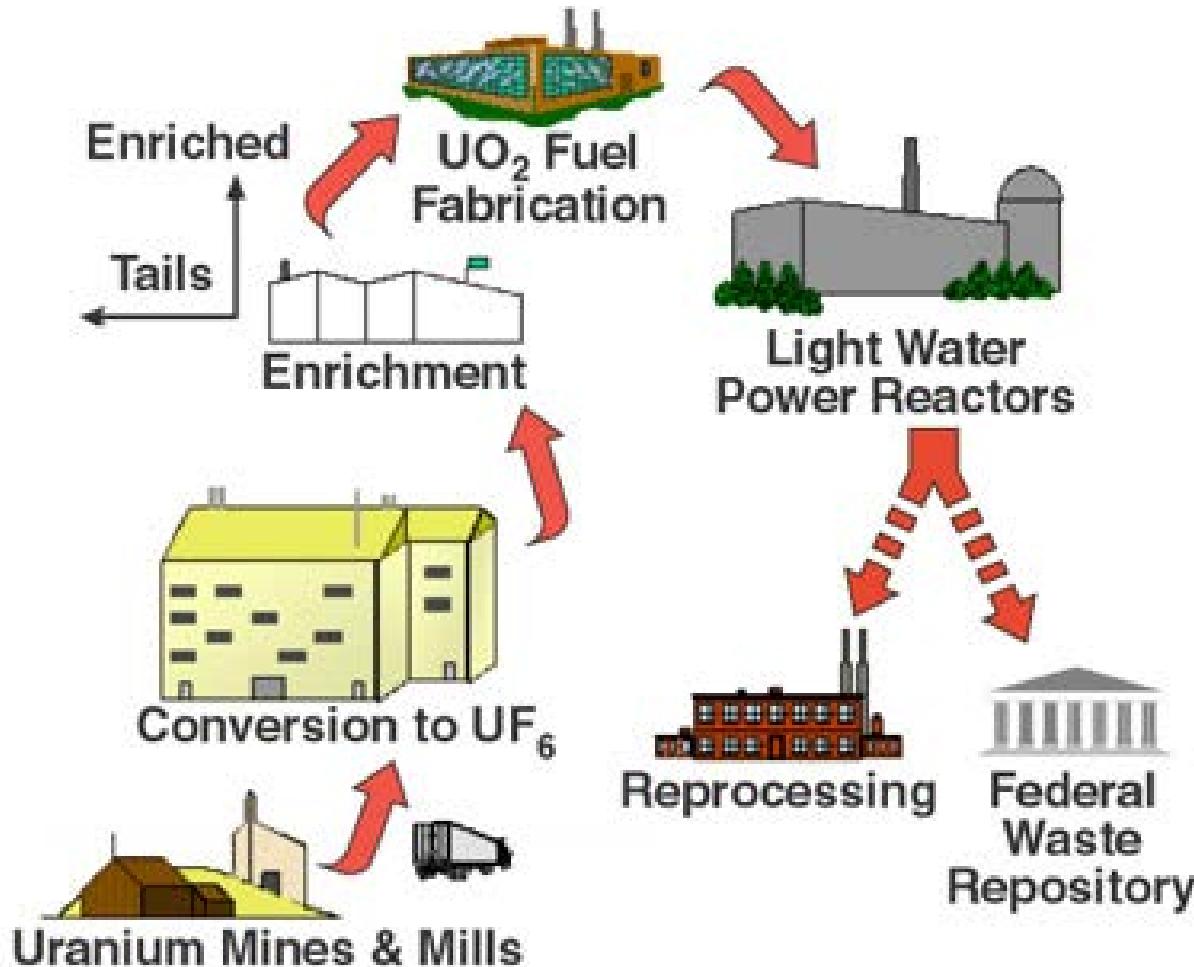
- Što je energija aktivacije
- Što su fisiji, što fisibilni, a što oplodni materijali
- Što je faktor multiplikacije a što reaktivnost
- Što je reaktor koji su mu osnovni dijelovi
- Što su kritične dimenzije reaktora
- Što je obogaćenje a što obogaćivanje nuklearnog goriva
- Navesti vrste interakcije neutrona s materijom
- Što je udarni presjek za reakciju (mikroskopski, makroskopski)
- Kakva je energetska ovisnost udarnog presjeka za absorpciju neutron u gorivu
- Što je neutronski tok

Što treba znati (naučiti) – 10 O prijepornostima nuklearne elektroenergetike i energetskim pretvorbama i procesima u nuklearnim elektranama (<http://www.fer.unizg.hr/predmet/enepr>)

- Što je ciklus neutrona a što vrijeme života neutrona u reaktoru
- Što je moderator
- Što je difuzija neutrona

Dodatak

Nuklearni gorivni ciklus

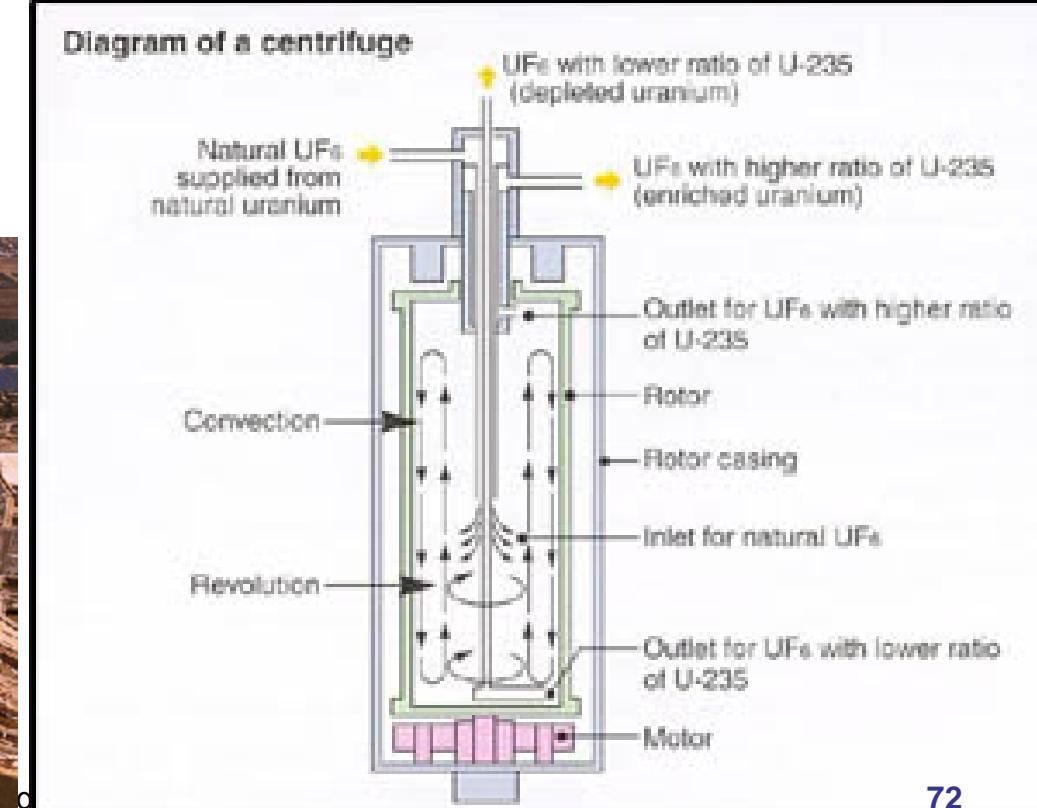
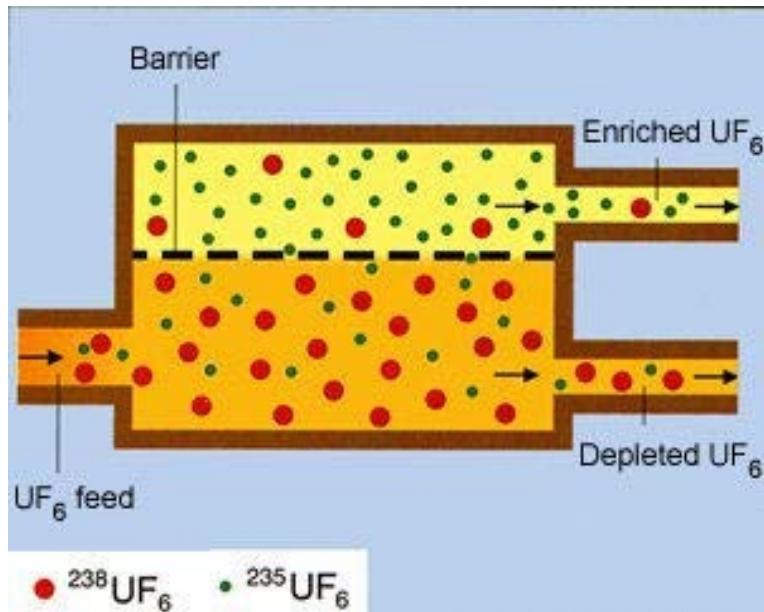


Obogaćenje (proces povećanja izotopskog udjela)

- Plinska difuzija
 - UO_2 pretvoren u uran heksafluorid
 - Difuzija kroz porozne (polupropusne) membrane
 - Kinetička energija ovisi o temperaturi
 - Manja masa – veća brzina
 - Izotop manje mase difundira brže kroz membranu
 - Velik broj kaskada
 - Veliki potrošak energije
- Centrifuge
 - Centrifugalna sila
 - Izotop veće mase ide na periferiju centrifuge
 - Manja potrošnja energije
- Lasersko obogaćenje
 - Energetski pobudni nivoi ovise o izotopu
 - Još u fazi razvoja

Obogaćivanje urana

(postupak povećanja težinskog udjela U-235)

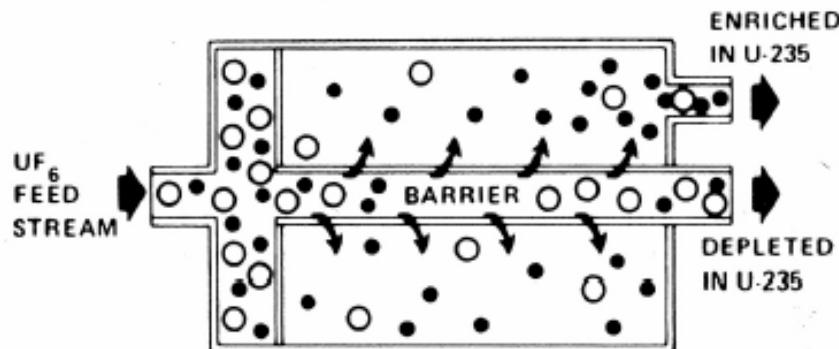


Obogaćenje – plinska difuzija

- Koristi plinoviti uran heksafluorid UF_6
 - Plinska difuzija
 - Lakše molekule imaju veću brzinu za istu kinetičku energiju
 - $E_k = \frac{1}{2} mv^2$
 - za $^{235}\text{UF}_6$ i $^{238}\text{UF}_6$
 - $^{235}\text{UF}_6$ češće udaraju u poroznu barijeru

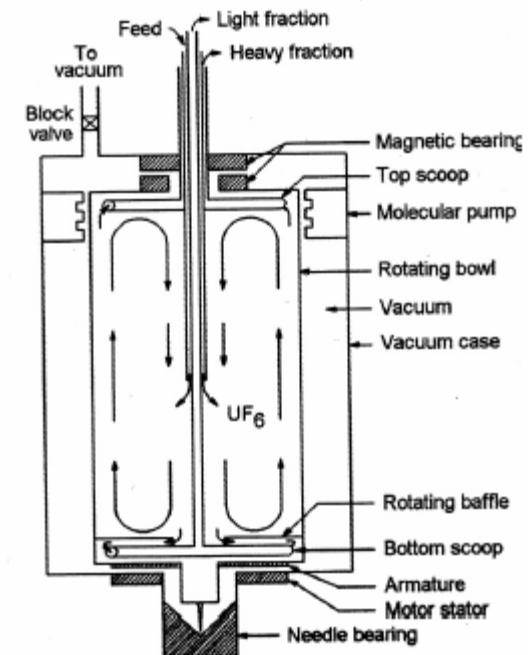
$$m_{235} v_{235}^2 = m_{238} v_{238}^2$$

$$v_{235} / v_{238} = \left(\frac{m_{238}}{m_{235}} \right)^{1/2} = \left(\frac{314}{311} \right)^{1/2} = 1.0043$$



Obogaćenje – plinska centrifuga

- Centrifugalna sila potiskuje teže molekule $^{238}\text{UF}_6$ prema zidu dok centralni dio sadrži više lakših molekula $^{235}\text{UF}_6$
 - Teži plin se skuplja pri vrhu
- Obogaćeni UF_6 konvertira se u UO_2 u dva stupnja
 - $\text{UF}_6(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{UO}_2\text{F}_2 + 4\text{HF}$
 - $2\text{UO}_2\text{F}_2 + 6\text{NH}_4\text{OH} \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7 + \text{NH}_4\text{F} + 3\text{H}_2\text{O}$
- Kalcinacija u zraku da se proizvede U_3O_8 koji se grijanjem u struji vodika reducira na UO_2



Atomska i molekularna masa

- Atomska masa je definirana kao relativna masa atoma u odnosu na dvanestinu mase izotopa C¹²
- Atomska masa elementa je definirana kao srednja masa mješavine izotopa koji ga sačinjavaju:

$$A = \sum a_i A_i / 100$$

$a_i \rightarrow$ izotopska učestalost ($N_i / \sum N_i$), %

$A_i \rightarrow$ atomska masa izotopa i

Atomska i molekularna masa - primjer

- Odrediti atomsku masu kisika ako je poznat njegov izotopski sastav:

Isotop	Učestalost (%)	Atomska masa
^{16}O	99,8	15,99492
^{17}O	0,04	16,99913
^{18}O	0,20	17,99916

- $A = \Sigma (a_i A_i)/100$
- $A = 0,998 \times 15,99492 + 0,04 \times 16,99913 + 0,20 \times 17,00016 = 16,0037$
- Atomska masa atoma je bezdimenzionalna veličina

• Gram-mol je količina elementa koja ima masu u gramima jednaku odgovarajućoj atomskoj masi

• Primjer: jedan gram mol kisika u opisanom primjeru ima masu od 16,0037 grama.

Atomska i molekularna masa

- **Molekularna masa je definirana kao relativna masa molekule u odnosu na dvanestinu mase izotopa C¹²**
- Molekularna masa je suma atomskih masa atoma koji sačinjavaju molekulu.
- Primjer za ozon: O₃, 3 x 16,0037 = 48,0112
- Broj atoma ili molekula u gram molu je neovisan o promatranoj tvari i zove se Avogadrov broj
- $N_A = 6,02217 \times 10^{23}$ atoma(molekula)/mol
- U masi od m grama ima N atoma prema izrazu:

$$N = m \cdot N_A / A$$

Gustoća atoma/molekula

- **gustoća atoma ($1/\text{cm}^3$), broj atoma u cm^3**

$$N = \rho N_A / A$$

- **Atomska jedinica mase** (oznaka *ajm* ili *amu* (atomic mass unit)) je definirana kao:
 $1 \text{ ajm} = m(^{12}\text{C}) / 12$

Primjer

Odrediti gustoću jezgara izotopa ^{238}U za uran slijedećeg sastava i gustoće $\rho = 19 \text{ g/cm}^3$

Izotop	Učestalost (%)	Atomska masa
^{234}U	0,0055	234,0409456
^{235}U	0,7200	235,0439231
^{238}U	99,274	238,0507826

Gustoća jezgara ^{238}U .

- **Gustoća jezgara**

$$N = \rho N_A / A$$

- $A = \sum a_i A_i = 238.028$

- $N_{238} = (19 \text{ g/cm}^3) \times (6,022 \times 10^{23} \text{ 1/mol}) \times (0,99274) / 238,028(\text{g/mol})$
 $= 0,048 \times 10^{24} \text{ atom/cm}^3$

Obogaćenje U²³⁵

- Maseni udjel U-235 u uranu
- Obično se označava s e (enrichment)
- Odrediti broj jezgara U-235 u 1 kg 3% obogaćenog UO₂ goriva (prepostaviti da su približne atomske mase U-235, U-238 i O, 235, 238 i 16, respektivno.)
- Atomska masa 3% obogaćenog urana je
- $1/A_U = e/A_{U-235} + (1-e)/A_{U-238}$, $A_U = 237,9$
- Atomska masa UO₂ je $237,9 + 2 \cdot 16 = 269,9$
- $N_{U-235} = 1 \cdot 237,9 / 269,9 \cdot 0,03 \cdot N_A / A_{U-235} = 6,776e22$

Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim elektranama

Tipovi Nuklearnih elektrana – II

Energijske tehnologije

FER 2011.

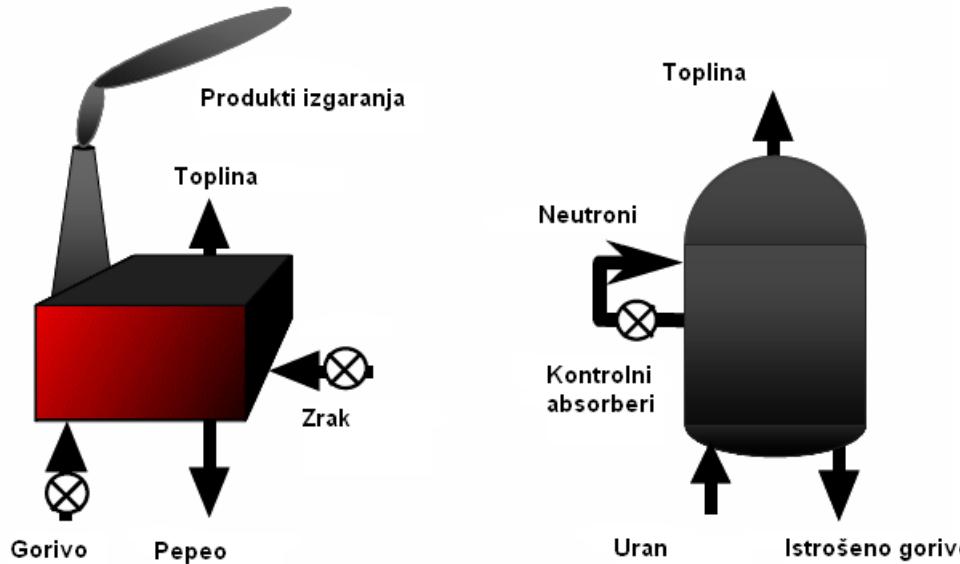


1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama
5. Geotermalna energija
- 6. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.**
7. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
8. Energija Sunca
9. Energija vjetra
10. Biomasa
11. Gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
12. Potrošnja električne energije
13. Prijenos i distribucija električne energije
14. Skladištenje energije
15. Energija, okoliš i održivi razvoj

Sadržaj

- Podjela nuklearnih elektrana
- PWR elektrane
- BWR elektrane
- Teškovodni reaktori
- Brzi reaktori
- Sigurnost nuklearnih elektrana
- Dodatak: Fuzijski uređaji

Usporedba klasične i nuklearne termoelektrane



Toplinska snaga reaktora ovisi o broju neutrona prisutnih u reaktoru

Proizvedena i odvedena toplina trebaju biti uravnotežene

Toplinu je potrebno odvoditi i iz obustavljenog reaktora

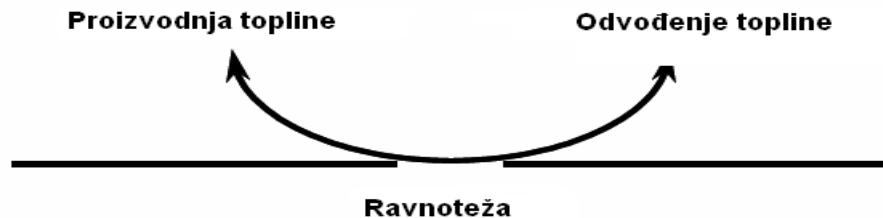
Gorivo u reaktoru je raspoloživo u svakom trenutku u ukupnom iznosu
Njegovo izgaranje je potrebno kontrolirati

Gorivo se mijenja u intervalima od 12 ili više mjeseci

Gorivo se izgaranjem ne promijeni vidljivo

Mjera starosti jezgre i proizvedene energije je veličina koja se zove odgor (MWd/tU) – proizvedena energija po jedinici mase goriva

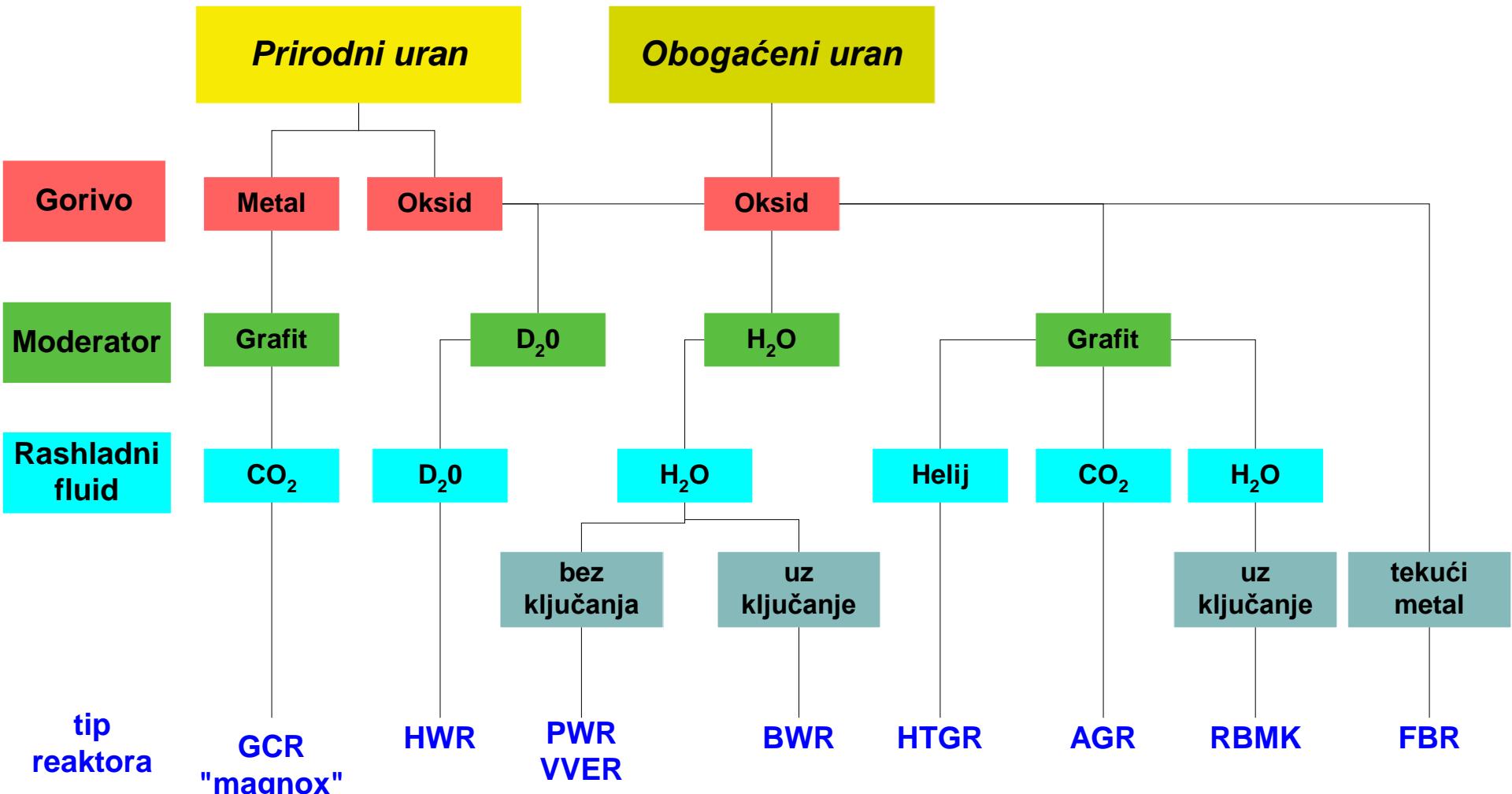
Cilj projektiranja reaktora → Osigurati hlađenje goriva u svim uvjetima



Tipovi reaktora

- **Reaktori se mogu podijeliti:**
 - prema tipu goriva
 - korištenom hladiocu (rashladnom sredstvu)
 - potrebi za usporavanje neutrona
 - brzi reaktori
 - **termički reaktori (tip moderatora)**
 - namjeni reaktora
 - istraživački reaktori,
 - proizvodnja električne energije i/ili topline,
 - proizvodnja nuklearnog materijala
 - proizvodnja vodika
 - desalinizacija
- **Da se osigura lančana reakcija potrebno je:**
 - imati odgovarajuću količinu goriva (kritična masa)
 - ograničiti apsorpciju neutrona
 - ograničiti bijeg neutrona (kritične dimenzije reaktora i reflektor)

Kriteriji za podjelu NE



Gorivo

- U-235 gorivo – obogaćenje (maseni udjel U-235 u uranu):
 - prirodni uran: 0.7% U-235, 99.3% U-238
 - obogaćeni U-235 (do 5% težinski)
- Mješavina urana i plutonija Pu-239 (MOX – Mixed OXide)
- U-233 gorivo (moguća proizvodnja u reaktoru iz torija-232)
- **Forme goriva:**
- metal, keramika (oksid npr UO_2 , PuO_2 , uran karbid, uran nitrit)
- cilindrične tablete, šipke, kuglice, homogena mješavina uranovih soli
- U sadašnjim NE koristi se približno 1% potencijala fisijске energije
- Odgor goriva se izražava u MWd/tU (tipično za LWR oko 60 GWd/tU)
- U teškovodnim reaktorima približno 50% energije dolazi iz iz fisije Pu
- U lakovodnim reaktorima na kraju ciklusa oko 30-40% energije dolazi od Pu

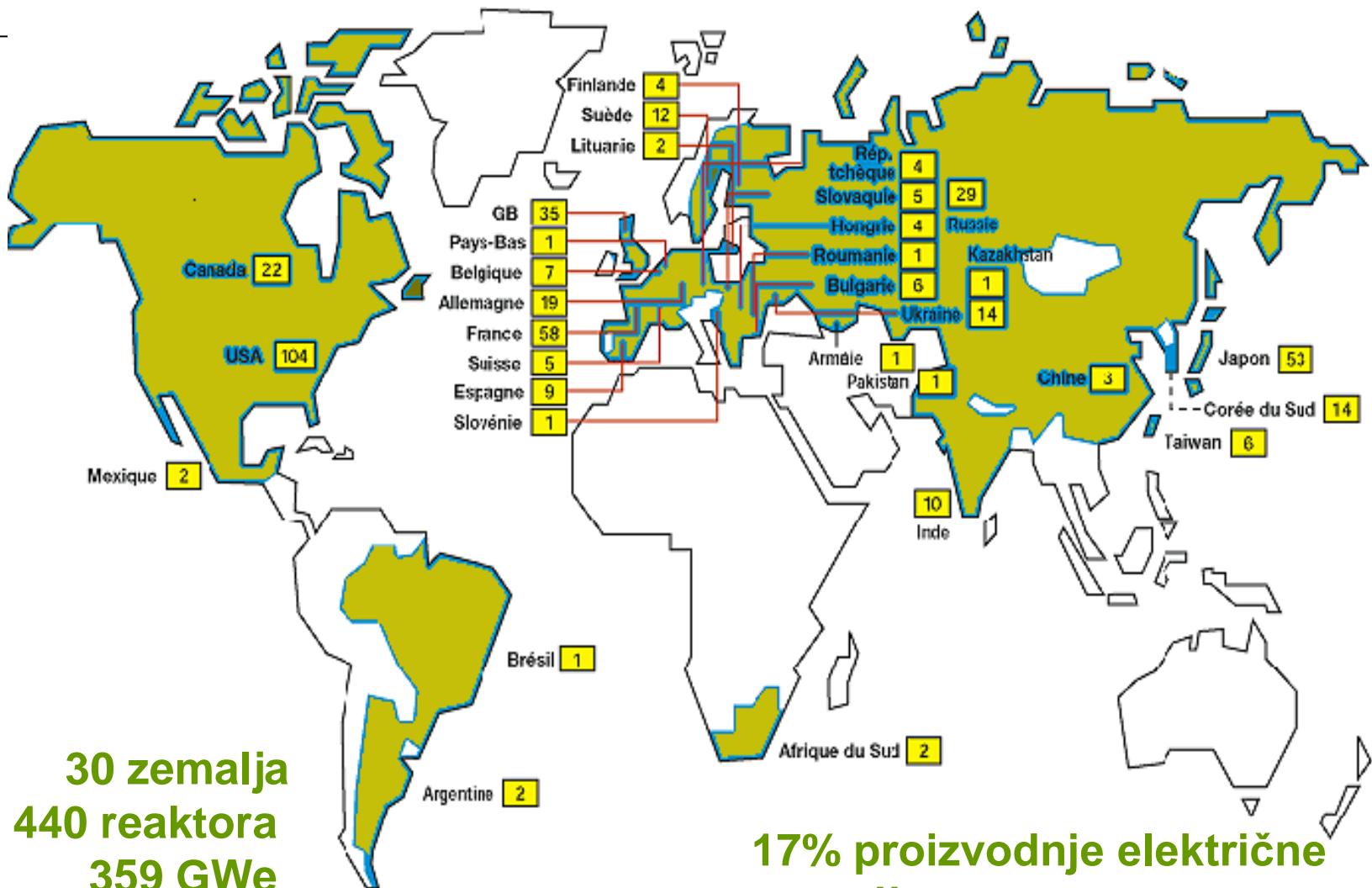
Moderator

- Koristi se u reaktorima s termičkim neutronima (energija ispod 0.625 eV) da se poveća vjerojatnost fisije
- Usporiti neutrone elastičnim sudarima uz minimalnu apsorpciju
- **Obična voda** (H_2O) – lakovodni reaktori (LWR- Light Water Rector): reaktor s vodom pod tlakom PWR (Pressurized Water Reactor) i reaktor s vodom koja ključa BWR (Boiling Water Reactor), dobro usporava neutrone ali ih i apsorbira, traži obogaćeno gorivo, kompaktna jezgra
- **Teška voda** (D_2O) – teškovodni reaktori (HWR Heavy Water Reactor), manje efikasno usporavanje i mala apsorpcija neutrona, zastupljenost u prirodi: na 6700 atoma običnog vodika dođe jedan atom deuterija, reaktor većih dimenzija, može koristiti prirodni U
- **grafit** (C) – grafitom moderirani reaktori, manje efikasno usporavanje i mala apsorpcija neutrona, reaktor velikih dimenzija, može koristiti prirodni U
- **berilij** (Be) – specijalne izvedbe reaktora
- **bez moderatora** – razne izvedbe brzih reaktora

Rashladno sredstvo

- Odvesti toplinu iz jezgre reaktora i osigurati uvjete za realizaciju nekog kružnog procesa (Rankine, Brayton)
- Obična voda
- Teška voda
- Plin: CO₂, helij
- Tekući metali: natrij, olovo, olovo-bizmut
- Rastopljene soli
- Homogena i heterogena konfiguracija reaktora:
 - kriterij, postoji li jasna granica između moderatora/rashladnog sredstva i goriva
 - U heterogenoj konfiguracije lakše je postići kritičnu masu (moguća je samoodrživa nuklearna reakcija)

Zastupljenost NE u svijetu



**30 zemalja
više od 440 reaktora
359 GWe**

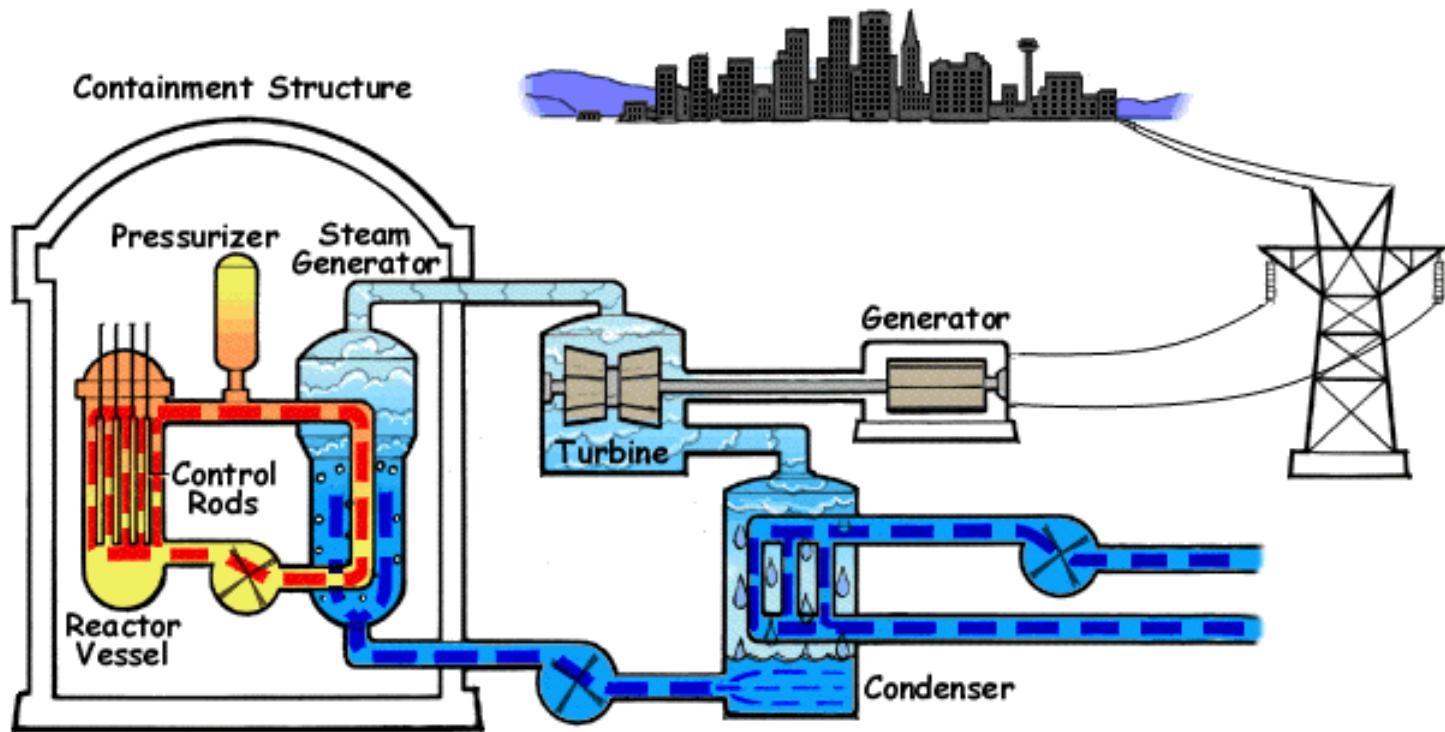
**17% proizvodnje električne
energije**

7% udjel u primarnoj energiji

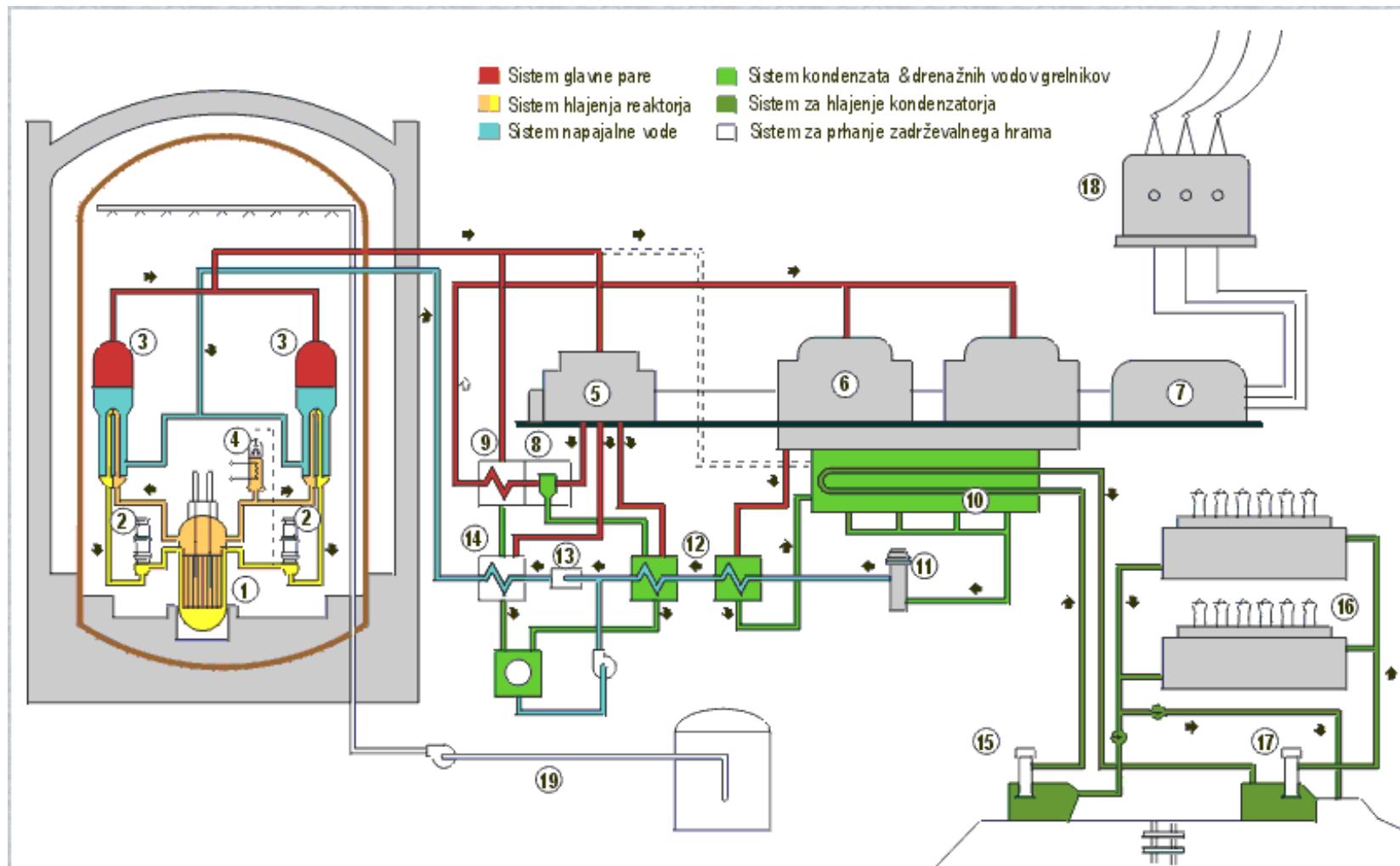
Generacije NE

- Podjela nuklearnih elektrana prema projektnim karakteristikama odnosno prema vremenu ulaska u komercijalni pogon u 4 generacije:
 - prva generacija uključuje prototipna postrojenja koja su u pogon ulazila pedesetih godina 20. stoljeća
 - nuklearna energetska postrojenja u pogonu krajem 20. i početkom 21. stoljeća elektrane su druge generacije (tu pripada i NE Krško)
 - treća generacija nuklearnih elektrana su postrojenja napredne izvedbe koja koriste poboljšanja postojeće tehnologije da poboljšaju sigurnost i ekonomičnost, kao što je npr. intenzivnija upotreba pasivnih sigurnosnih sustava
 - elektrane četvrte generacije ući će u pogon nakon 30-te godina 21. stoljeća i koriste napredne tehnologije

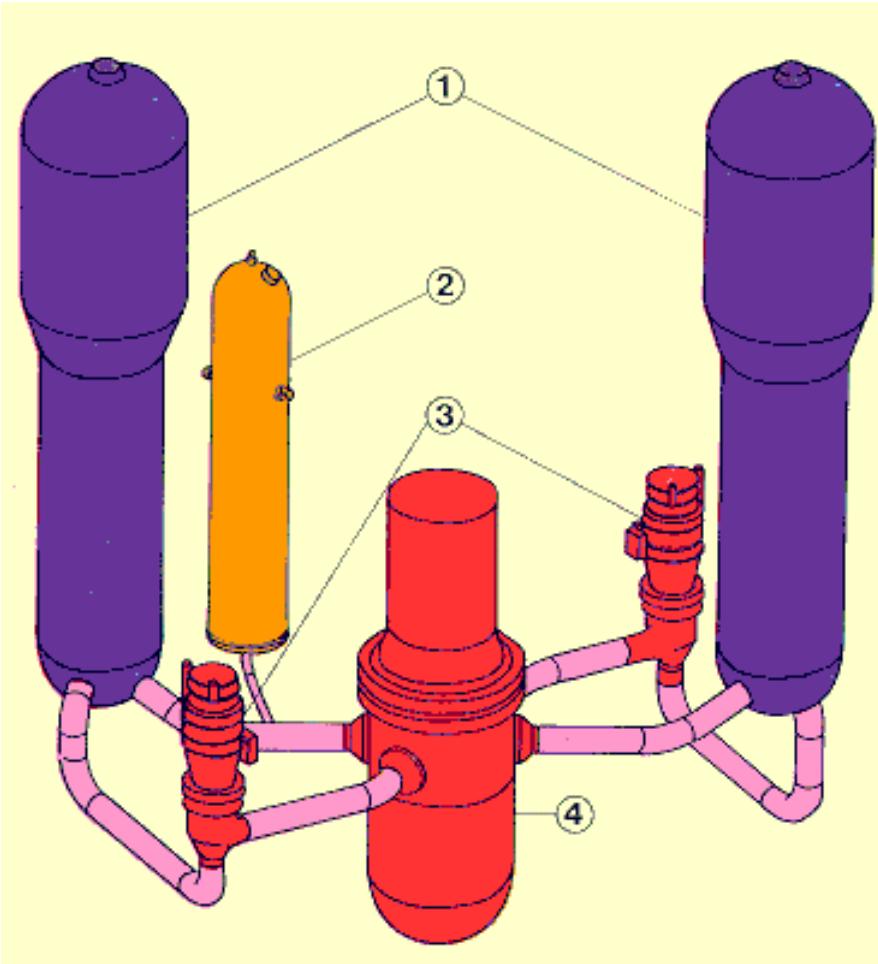
NE PWR – princip rada



Funkcionalna shema NE Krško



Primarni rashladni krug



Primarni i sekundarni krug

Koncepcija rashladne petlje

Približna snaga po jednoj
petlji 300 MWe

Izmjena goriva za vrijeme
obustave svakih 12, 15 ili
18 mjeseci

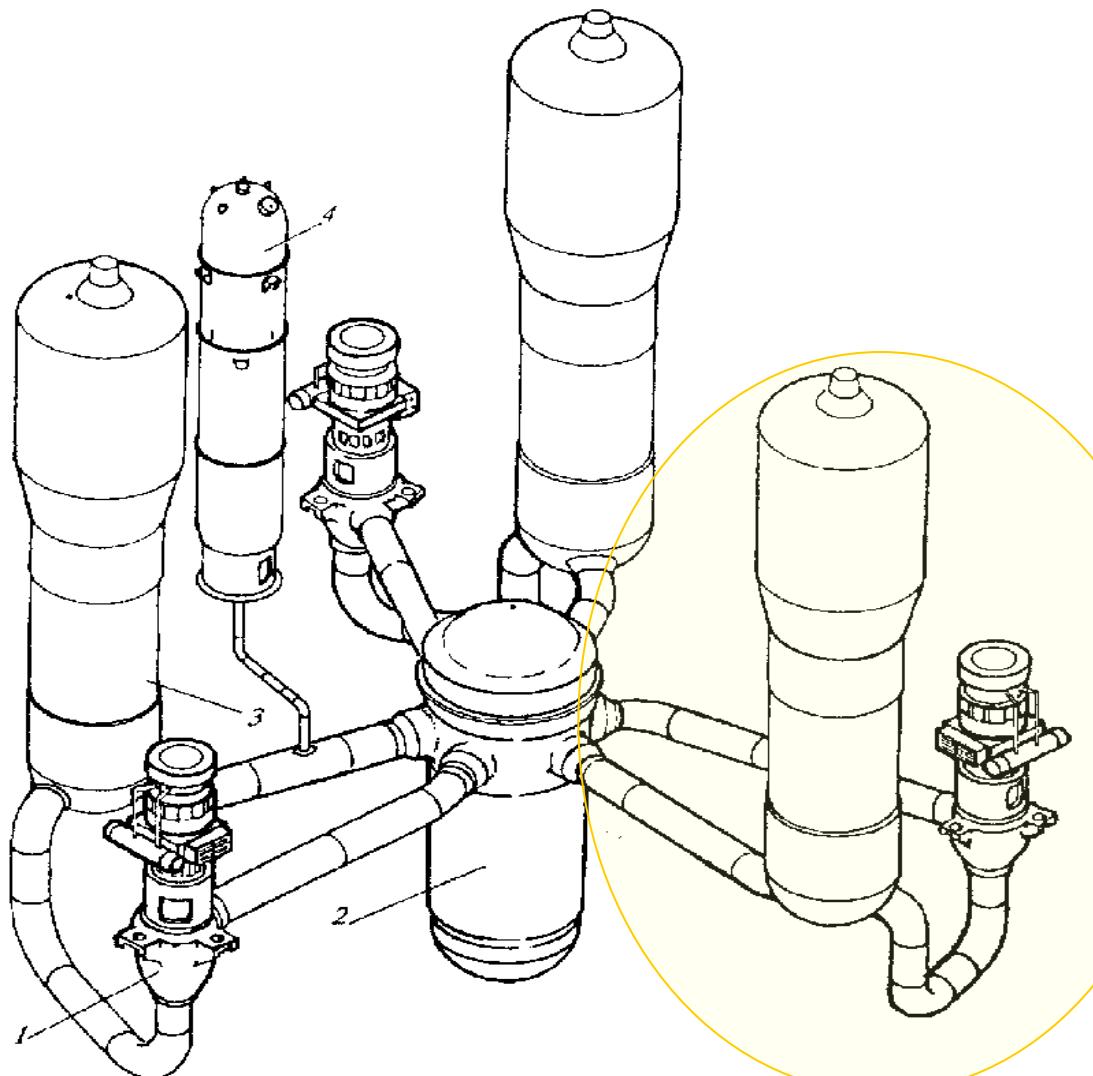
Količina goriva u jezgri: oko
90 t U za NE 1000 MWe

Obogaćenje U-235 do 5%

Stupanj djelovanja oko 33%

PWR – glavne komponente

- Komponente su organizirane u rashladne petlje
- Petlju čine:
 - parogeneratori
 - tlačnik
 - reaktorske pumpe
 - cjevovodi
- Reaktorska posuda je zajednička za više petlji



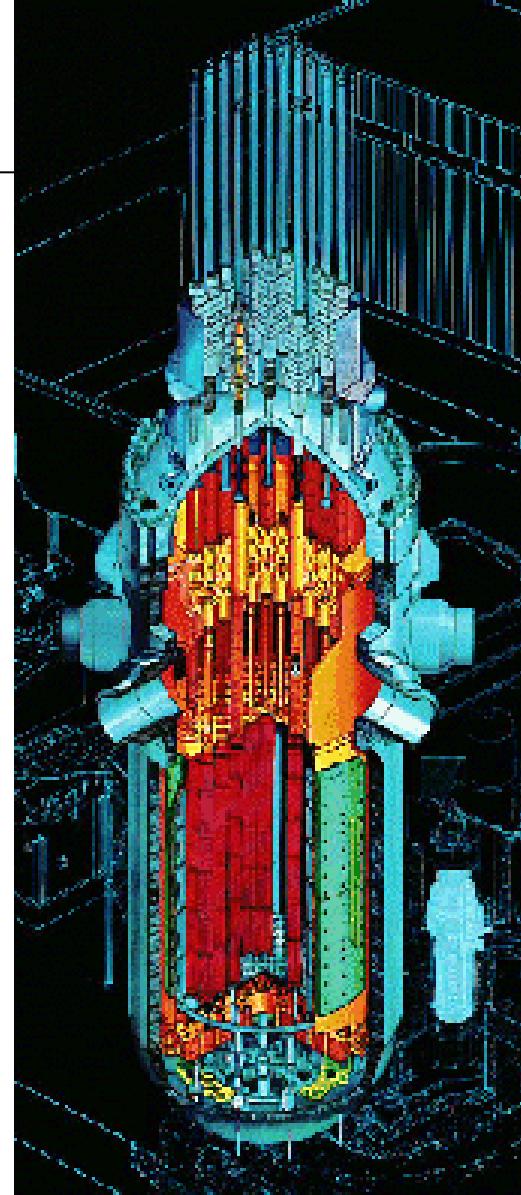
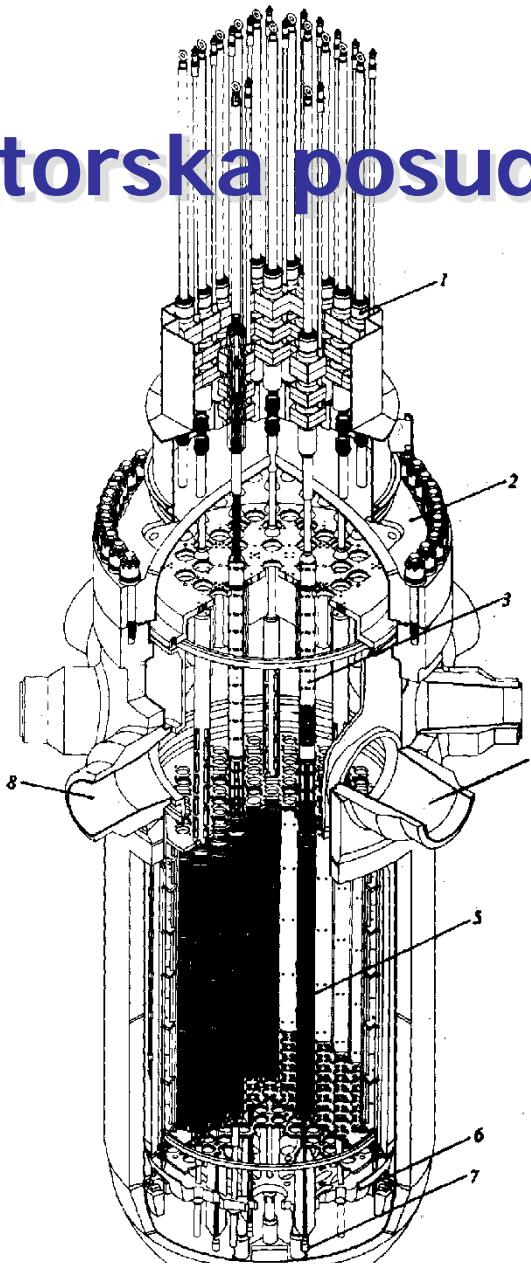
Slika 3.2.2. Prostorni raspored osnovnih komponenata reaktorskog postrojenja s tlakovodnim reaktorom (PWR) i tri rashladna kruga: 1 – cirkulacijska pumpa, 2 – nuklearni reaktor, 3 – parogenerator, 4 – tlačnik.

Tipični parametri PWR-a:

- snage 500 do 1500 MWe
- tlak 15 do 16 MPa
- prosječna temp. hладиоца 580 K
- promjena temp. u reaktoru i parogeneratoru 40 do 50 K
- protok po rashl. krugu $6 \text{ m}^3/\text{s}$

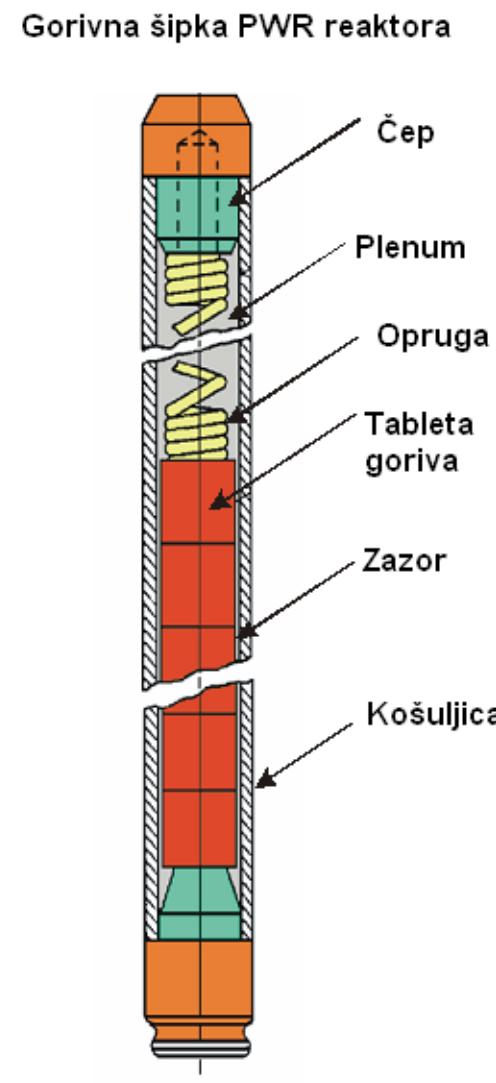
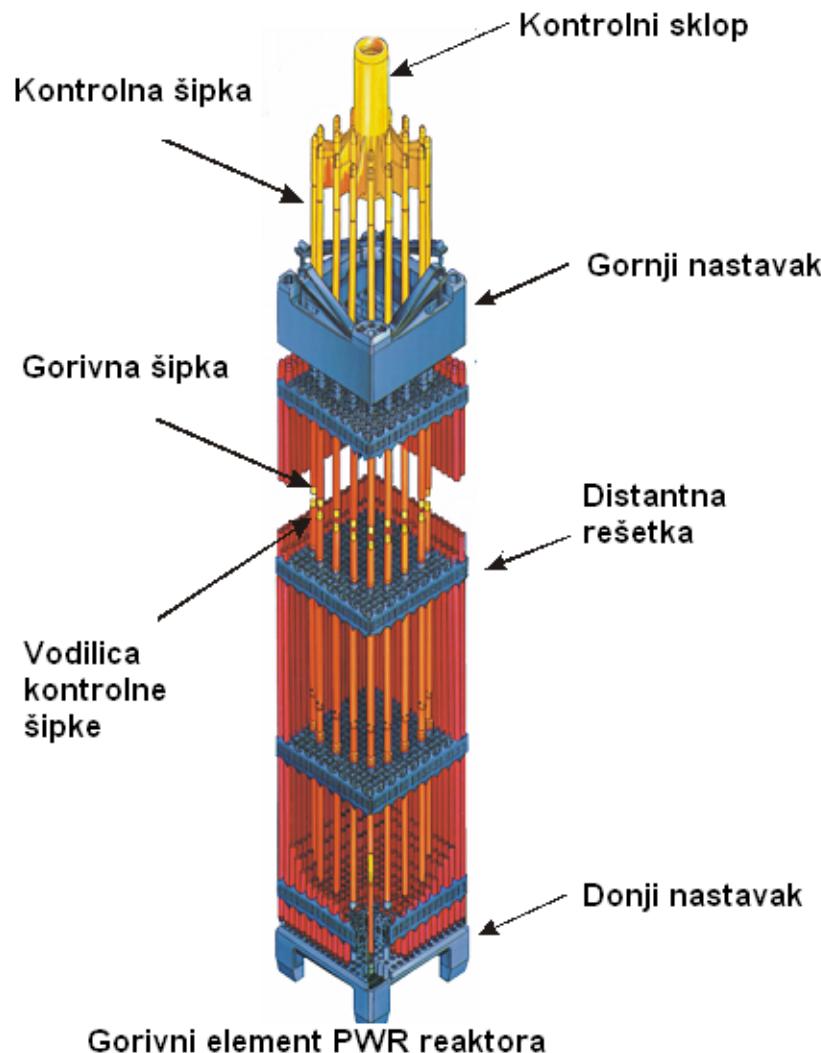
**Snaga petlje oko 300 MWe
izvedbe s 2, 3 i 4 petlje**

Reaktorska posuda

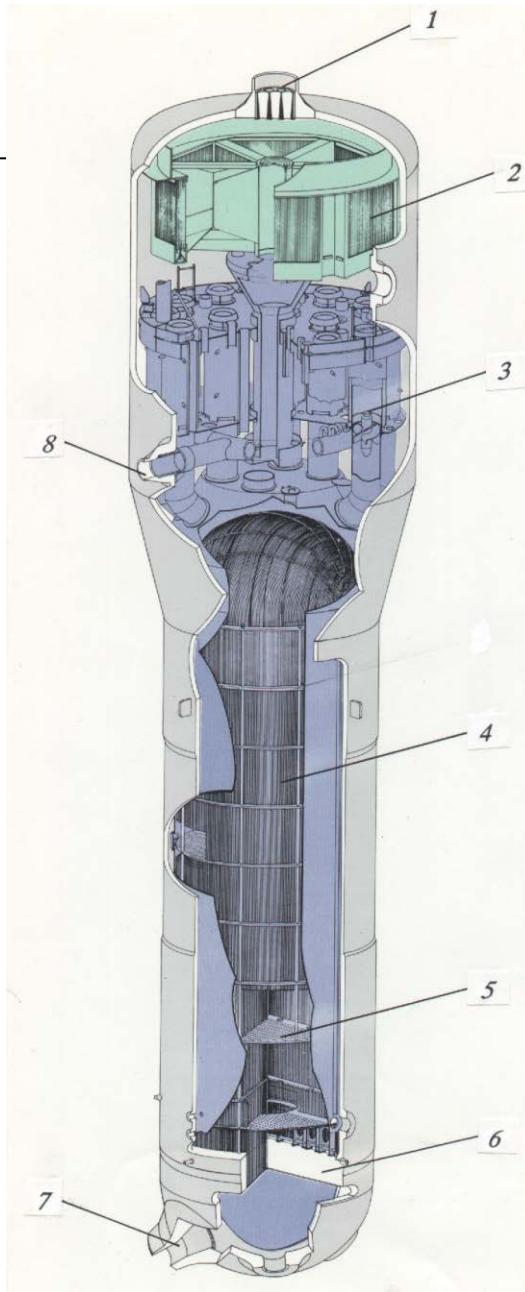


Slika 3.3.5. Tlakovodni reaktor (PWR): 1 – elektromagneti za pogon regulacijskih sklopova, 2 – poklopac reaktorske posude, 3 – vodilice regulacijskih sklopova, 4 – ulaz rashladnog sredstva, 5 – gorivni element, 6 – donja potpora jezgre, 7 – neutronski detektori.

Gorivni element i gorivna šipka

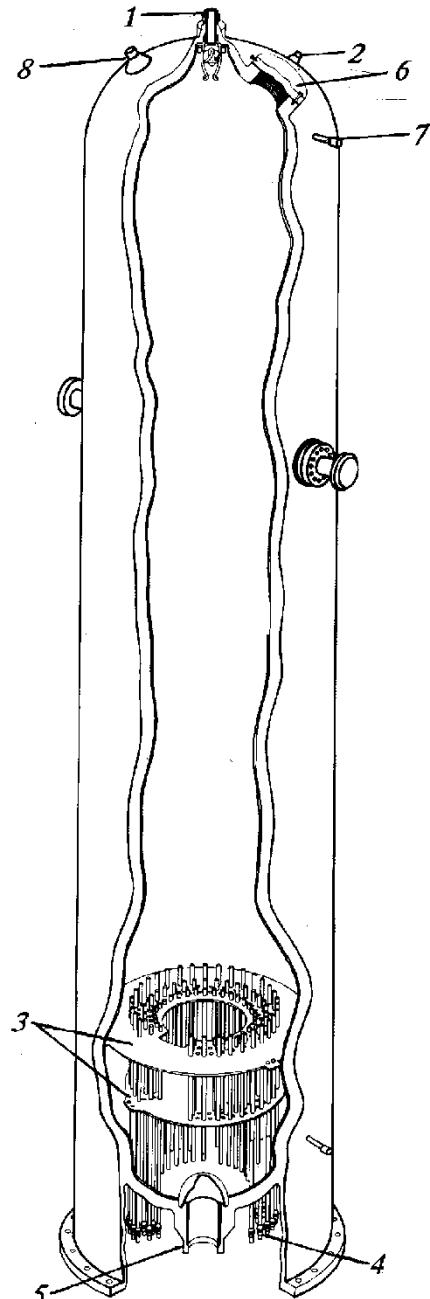


Parogenerator



Parogenerator PWR-a:

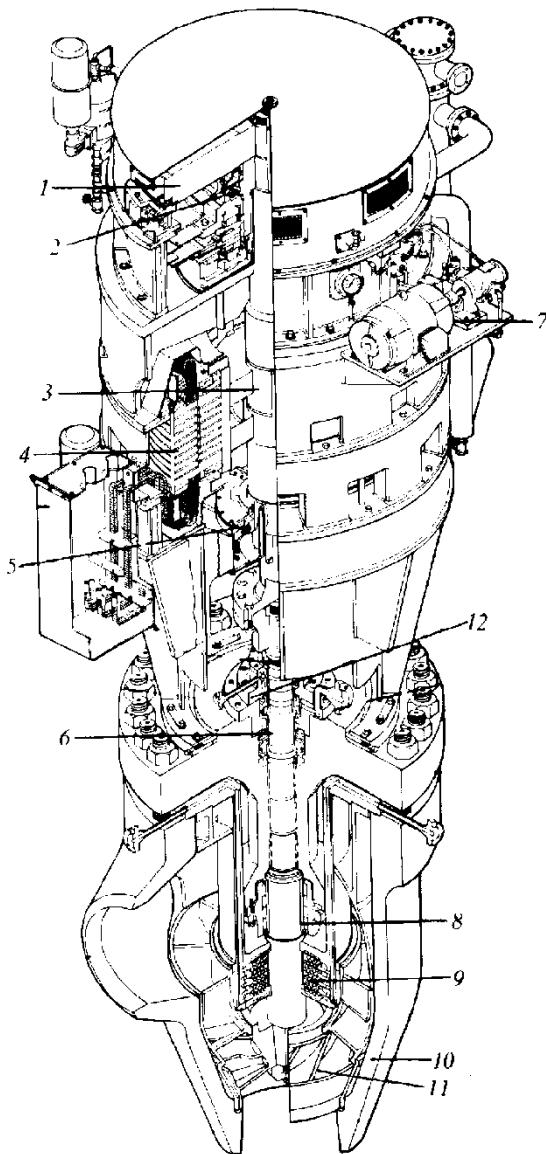
1. izlaz pare
 2. sušionik pare
(promjena smjera protoka)
 3. separator vlage
(rotacijsko kretanje, centrif.s.)
 4. cijevni snop
 5. potporna rešetka
 6. cijevna stijenka
 7. ulaz primarnog fluida
 8. ulaz pojne vode
- Masa oko 350 t



- Osigurava konstantan tlak

- volumen posude 40-60 m³
- promjer 2-2,5 m
- debljina stijenke 100 mm
- snaga el. grijanja 1 - 2 MW

Rashladna pumpa



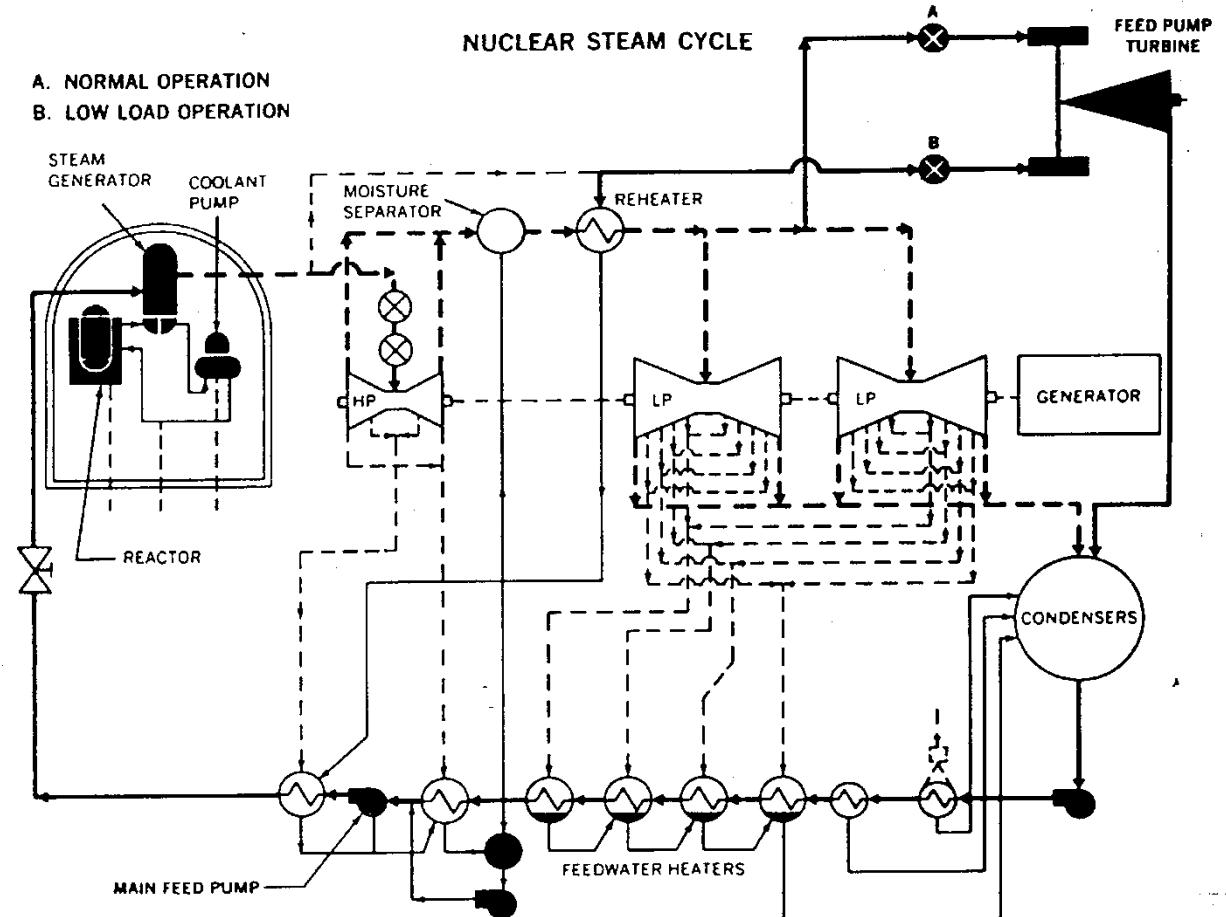
Cirkulira rashladno sredstvo:

- centrifugalna pumpa
- pogonjena asinkronim motorom
- snaga pogonskog motora 6 do 7 MW
- protok kroz pumpu oko $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$
- razlika tlaka fluida na pumpi 0,9 - 1 MPa
- visina 8,5 m
- masa oko 100 tona

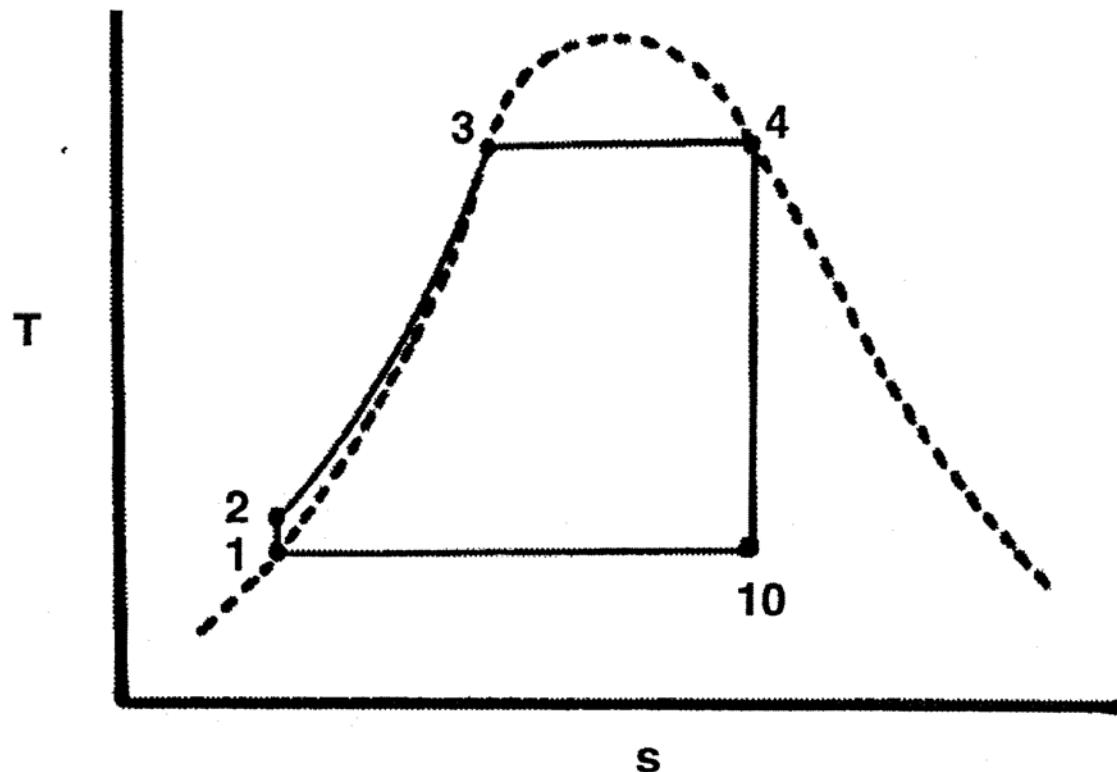
Slika 3.3.16. Pumpa rashladnog fluida reaktora: 1 – zamašnjak, 2 – gornji radijalni ležaj, 3 – osovina motora, 4 – stator motora, 5 – donji radijalni ležaj, 6 – osovina pumpe, 7 – pumpa za ulje, 8 – ležaj pumpe, 9 – hladnjak, 10 – kućište pumpe, 11 – rotor pumpe, 12 – brtve na osovini.

Sekundarni dio NE

- Rankineov ciklus sa zasićenom parom
- Niži tlakovi i temperature nego za odgovarajuću TE



Rankine-ov ciklus sa zasićenom parom



Dovedena toplina $q_{in} = h_4 - h_2$

Rad turbine $w_{turb} = h_4 - h_{10}$

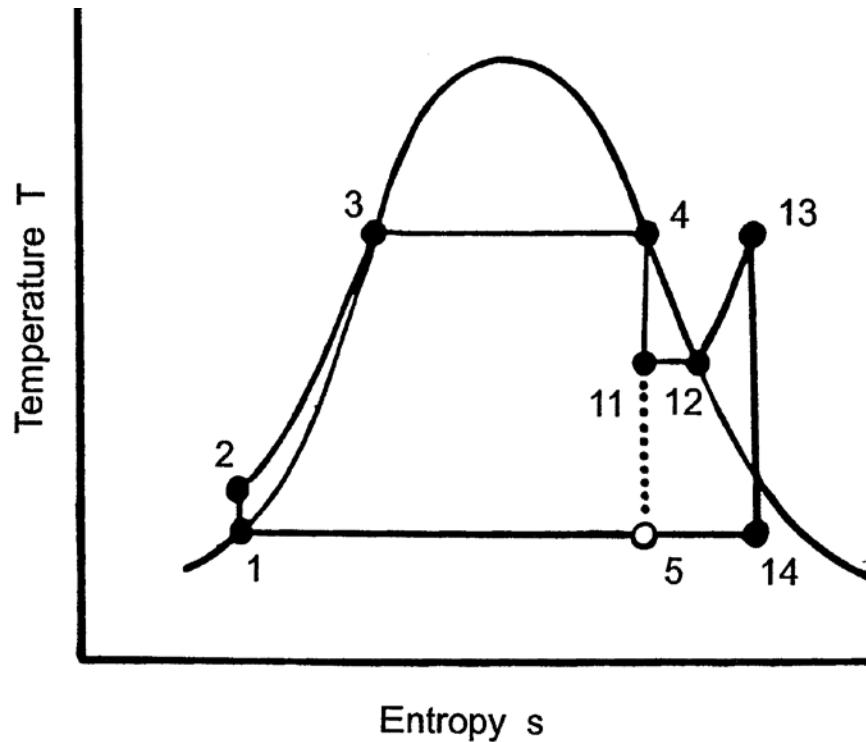
Rad pumpe $w_{pump} = h_1 - h_2$

Odvedena toplina $q_{out} = h_{10} - h_1$

Stupanj djelovanja

$$\eta = (w_{turb} - |w_{pump}|) / q_{in}$$

Rankine-ov ciklus sa zasićenom parom, separacijom i pregrijanjem pare



Dovedena toplina $q_{in} = h_4 - h_2 + h_{13} - h_{12}$ Rad turbine $w_{turb} = h_4 - h_{11} + h_{13} - h_{14}$

Rad pumpe $w_{pump} = h_1 - h_2$

Odvedena toplina $q_{out} = h_{14} - h_1$

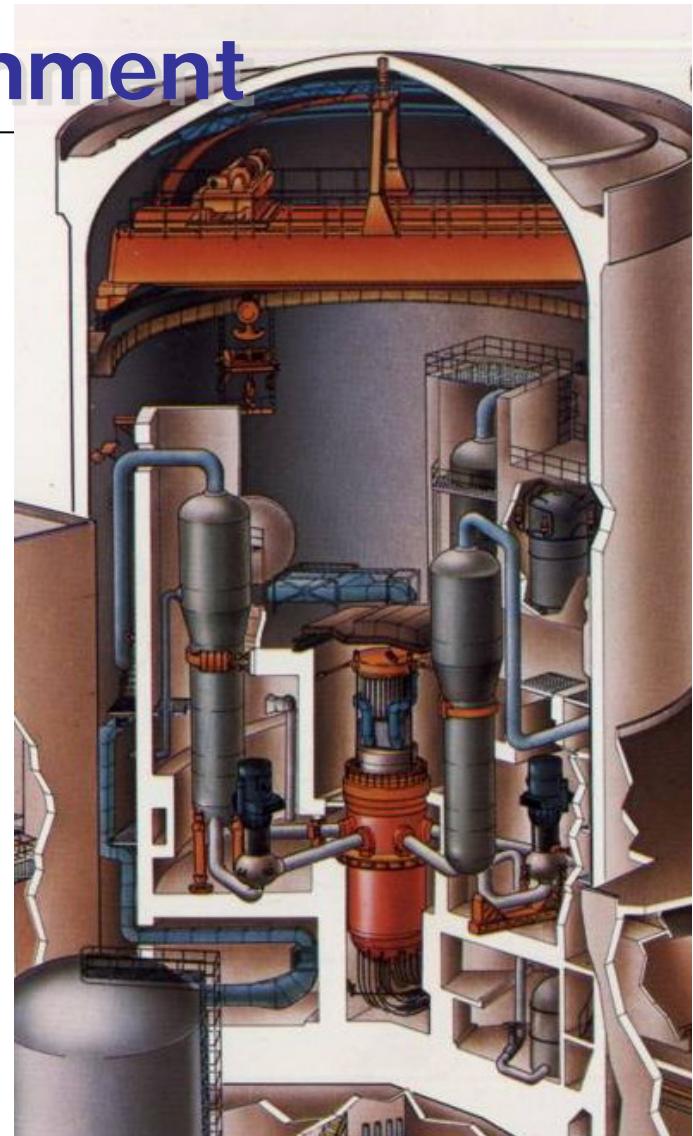
Stupanj djelovanja

$$\eta = (w_{turb} - |w_{pump}|)/q_{in}$$

Zaštitna zgrada - kontejnment

Zaštiti primarni krug od vanjskog djelovanja (projektirana da izdrži pad aviona)

Zaštiti okolinu od radioaktivnog zagađenja u slučaju kvara u postrojenju (nepropusna do nadtlaka od 3 bara)



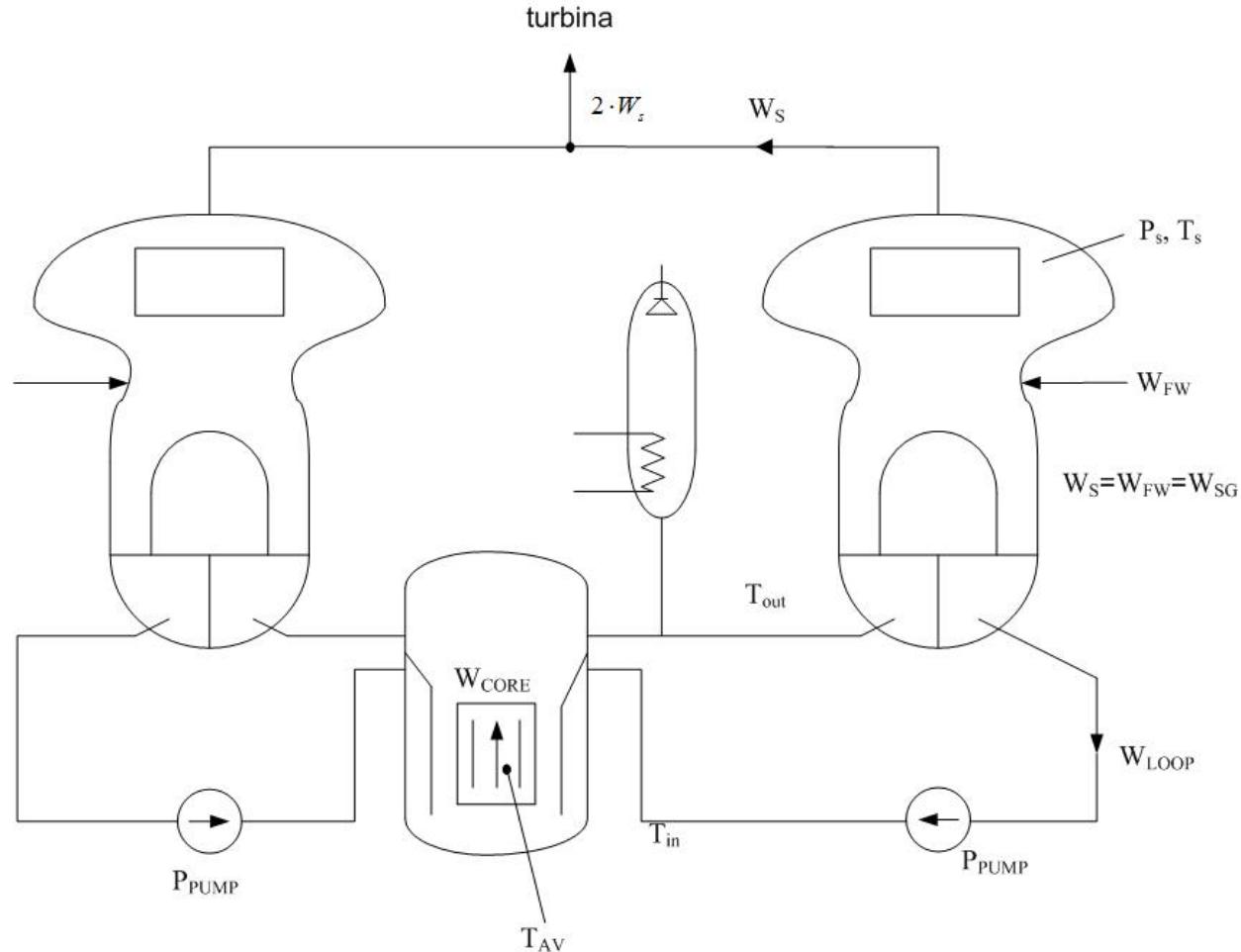
Razmještaj objekata na lokaciji NE



Zadatak: PWR

- Nuklearna elektrana s 2 rashladne petlje i PWR reaktorom ima električnu snagu na pragu 632 MWe. Ako je ukupna efikasnost pretvorbe toplinske energije u električnu (uzevši u obzir sve gubitke i vlastitu potrošnju) $\eta=33.58\%$, izračunati: toplinsku snagu jezgre, protok pare po parogeneratoru, ukupni protok primarnog rashladnog sredstva i srednju temperaturu hladioca na primarnoj strani.
- Poznati su sljedeći podaci: svaka od dvije primarne pumpe unosi u sustav po 3 MW toplinske energije, temperatura hladioca na ulazu u jezgru je $T_{ul}=560.3$ K, entalpija pojne vode je $h_{vode}=9.508 \cdot 10^5$ J/kg, entalpija zasićene pare u parogeneratoru je $h_{pare}=2.78868 \cdot 10^6$ J/kg, tlak i srednja temperatura na sekundarnoj strani parogeneratora su $p_s=5.6$ MPa i $T_s=544.24$ K. Prepostaviti da je efektivni specifični toplinski kapacitet primarnog hladioca $c_p=5.8855$ kJ/kgK, a da je efektivni toplinski otpor za prijelaz topline kroz cijevi parogeneratora $R_T=0.037$ K/MW.

Zadatak: PWR - rjesenje



Zadatak: PWR - rješenje

Stupanj djelovanja

$$\eta = P_E / (P_{jezgre} + 2P_{pumpe}),$$

Snaga jezgre

$$P_{jezgra} = P_E / \eta - 2P_{pumpe} = 632,03358 - 2 * 3 = 1876 \text{ MW}$$

Snaga parogeneratora

$$P_{PG} = 0,5 P_{jezgre} + P_{pumpe} = 938 + 3 = 941 \text{ MW}$$

m_{PG} – maseni protok pare u parogeneratoru

h_{pare} – h_{vode} – entalpija zasićene pare i pojne vode

$$P_{PG} = m_{PG} (h_{pare} - h_{vode}), \text{ pa je}$$

$$m_{PG} = P_{PG} / (h_{pare} - h_{vode}) = 941 \cdot 10^6 / (2,78868 \cdot 10^6 - 9,508 \cdot 10^5) = 512 \text{ kg/s}$$

T_{sr} i T_s srednja temperatura primarne i sekundarne strane

R_T – ekvivalentni toplinski otpor parogeneratora

$$P_{PG} = (T_{sr} - T_s) / R_T, \text{ pa je}$$

$$T_{sr} = P_{PG} * R_T + T_s = 941 * 0,037 + 544,24 = 579,05 \text{ K.}$$

Porast temperature hladioca u jezgri

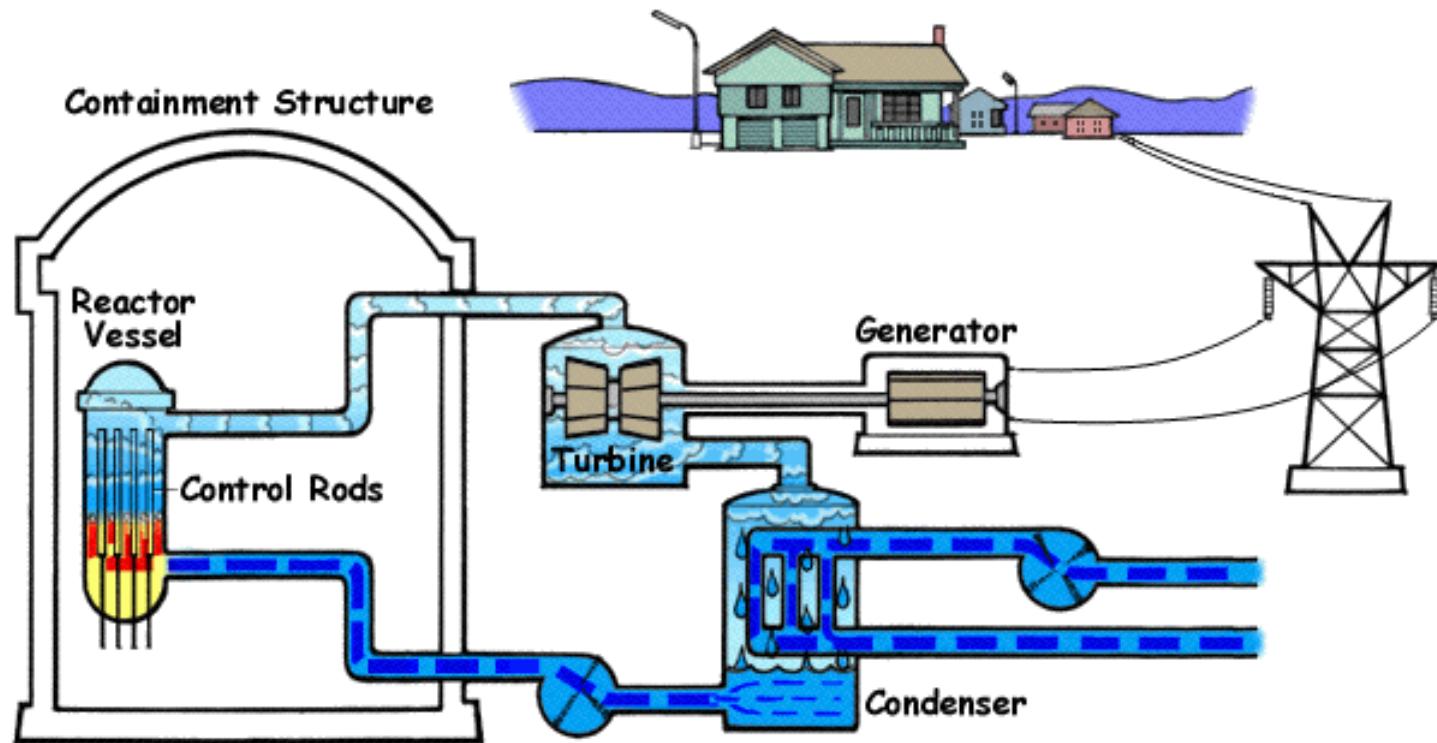
$$\Delta T_{jezgre} = 2 (T_{sr} - T_{ul}) = 2 (579,05 - 560,3) = 37,5 \text{ K}$$

$$P_{jezgra} = m_{jezgra} c_p \Delta T_{jezgra}, \text{ pa je}$$

Maseni protok kroz jezgru

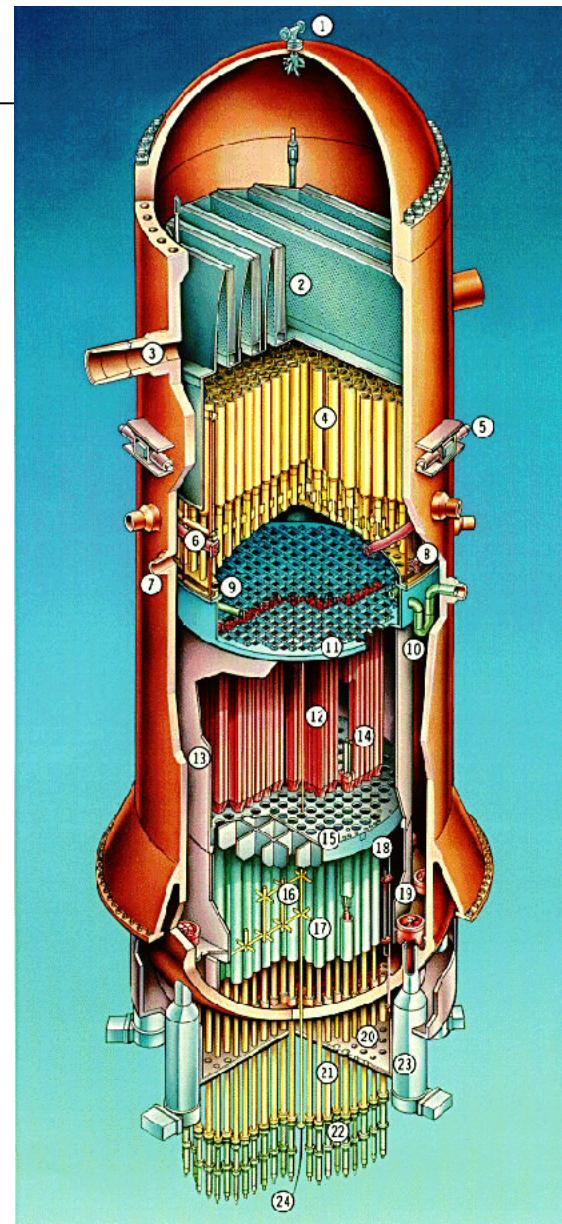
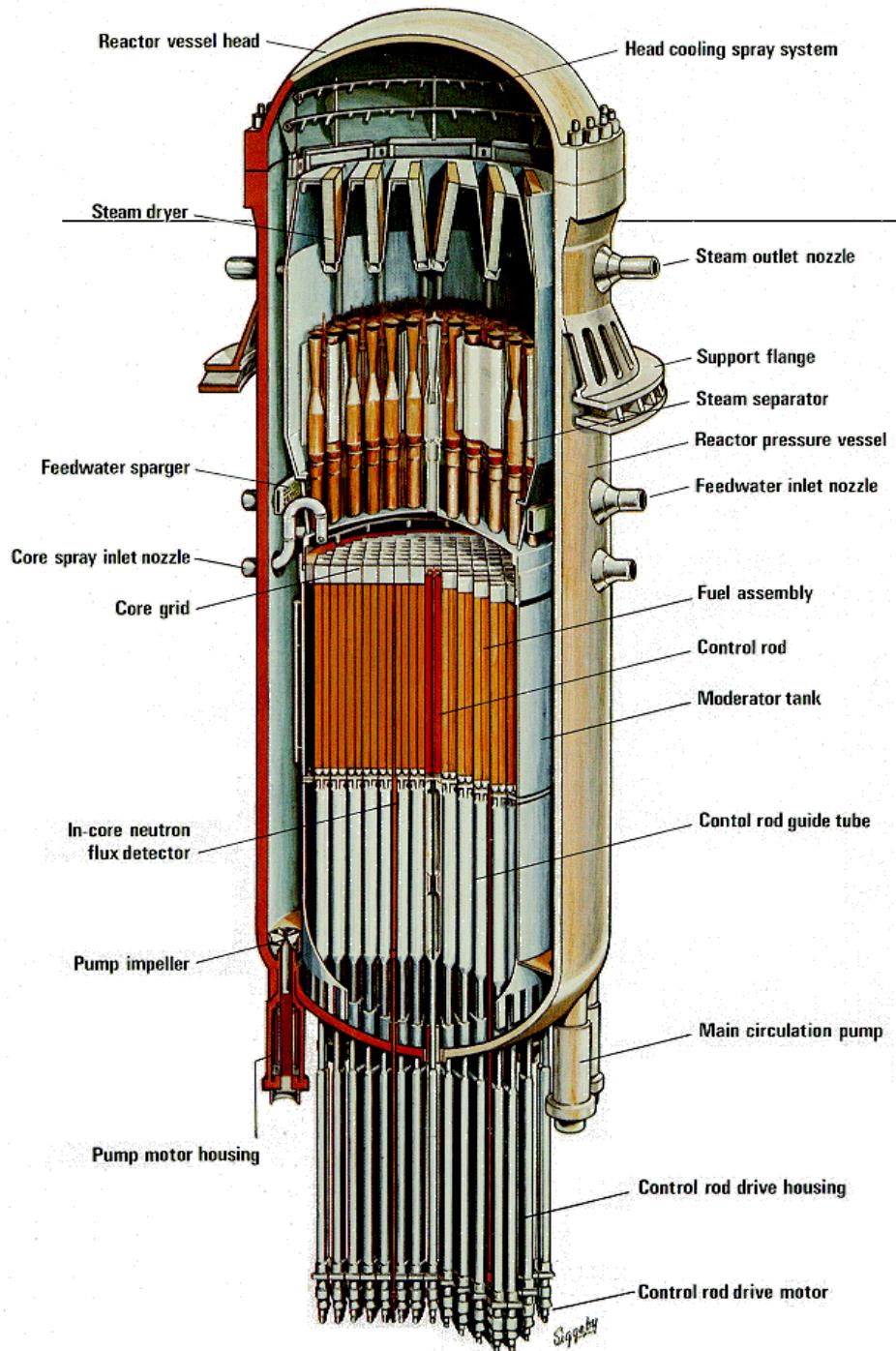
$$m_{jezgra} = P_{jezgra} / (c_p \Delta T_{jezgra}) = 1876 \cdot 10^6 / (5,8855 \cdot 10^3 * 37,5) = 8500 \text{ kg/s.}$$

NE BWR – princip rada



BWR - ukratko

- Drugi tip reaktora po brojnosti,
- Jedinične snage od 300 do 1600 MWe
- Voda isparava u reaktoru
- Direktni ciklus, moguća kontaminacija turbine
- Mješavina vode i pare u posudi, niža gustoća snage u odnosu na PWR
- Velika posuda, sve su komponente unutra
- Regulacijske šipke ulaze u jezgru s donje strane
- Recirkulacijske petlje omogućuju regulaciju snage i odgovarajuće hlađenje goriva
- Izvedbe kontejnmenta – manji nego PWR kontejnment, aktivna kondenzacija pare u bazenima
- Nije pogodan za nuklearnu propulziju zbog postojanja nivoa vode u jezgri, pa je razvijen isključivo za proizvodnju električne energije
- Ostala svojstva slična kao PWR



Strujanje hladionika u posudi BWR-a

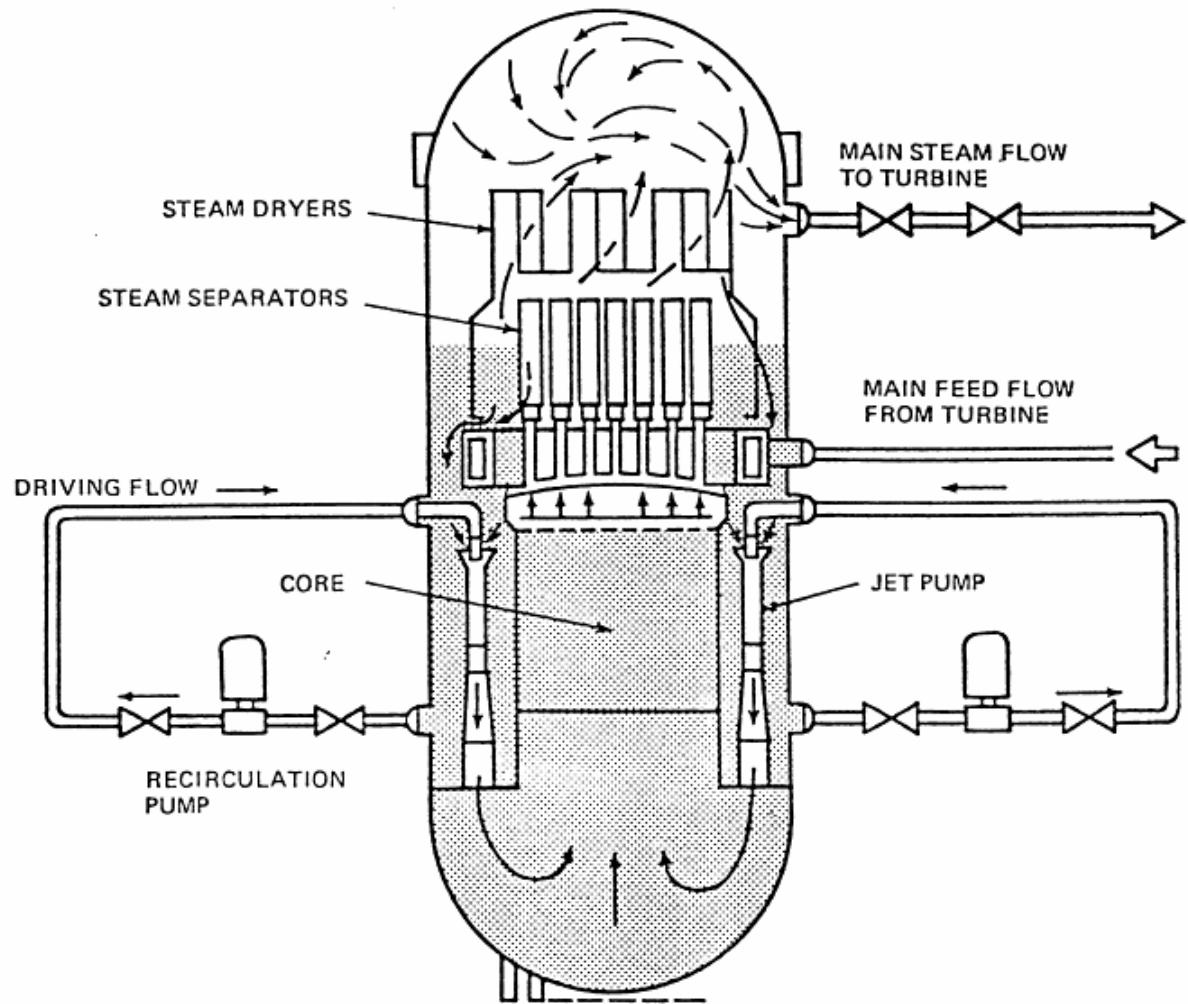
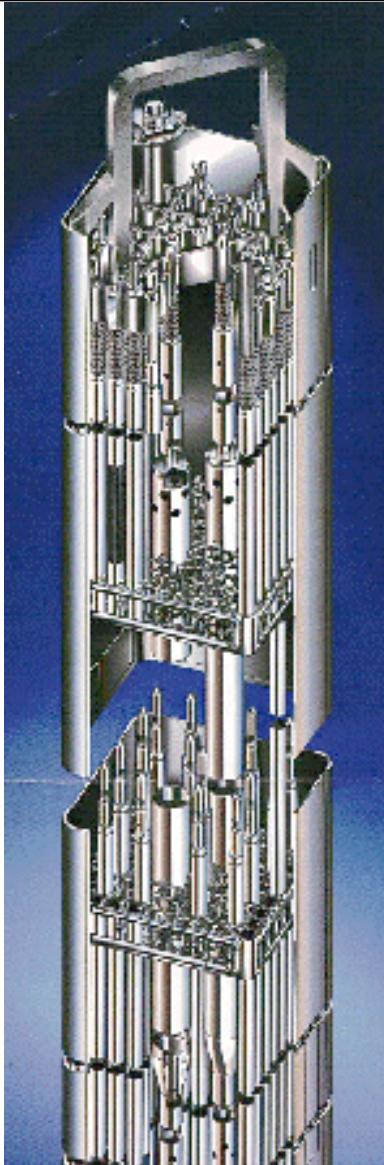


Figure 10-17 BWR reactor vessel internal flow paths.

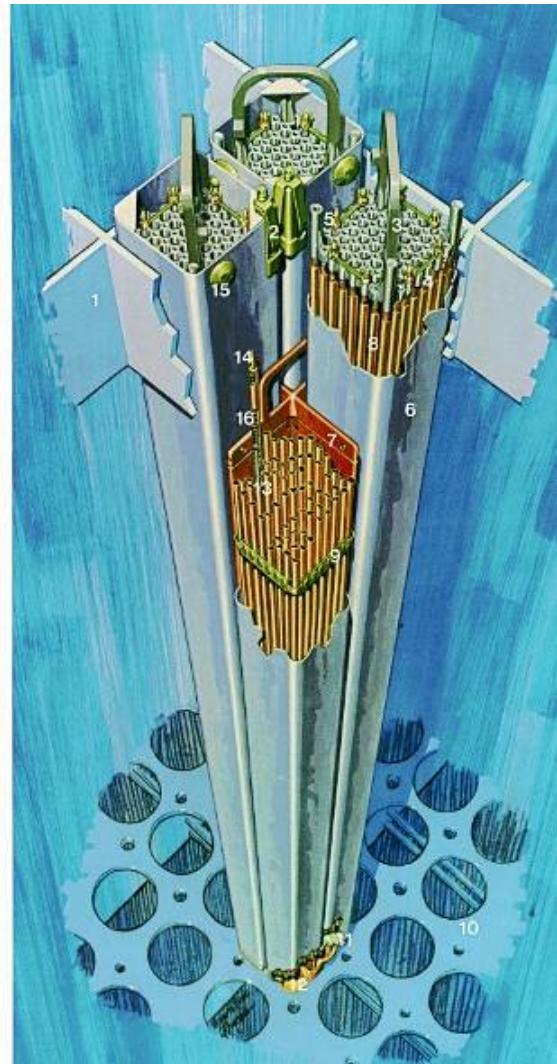
Gorivni element BWR reaktora



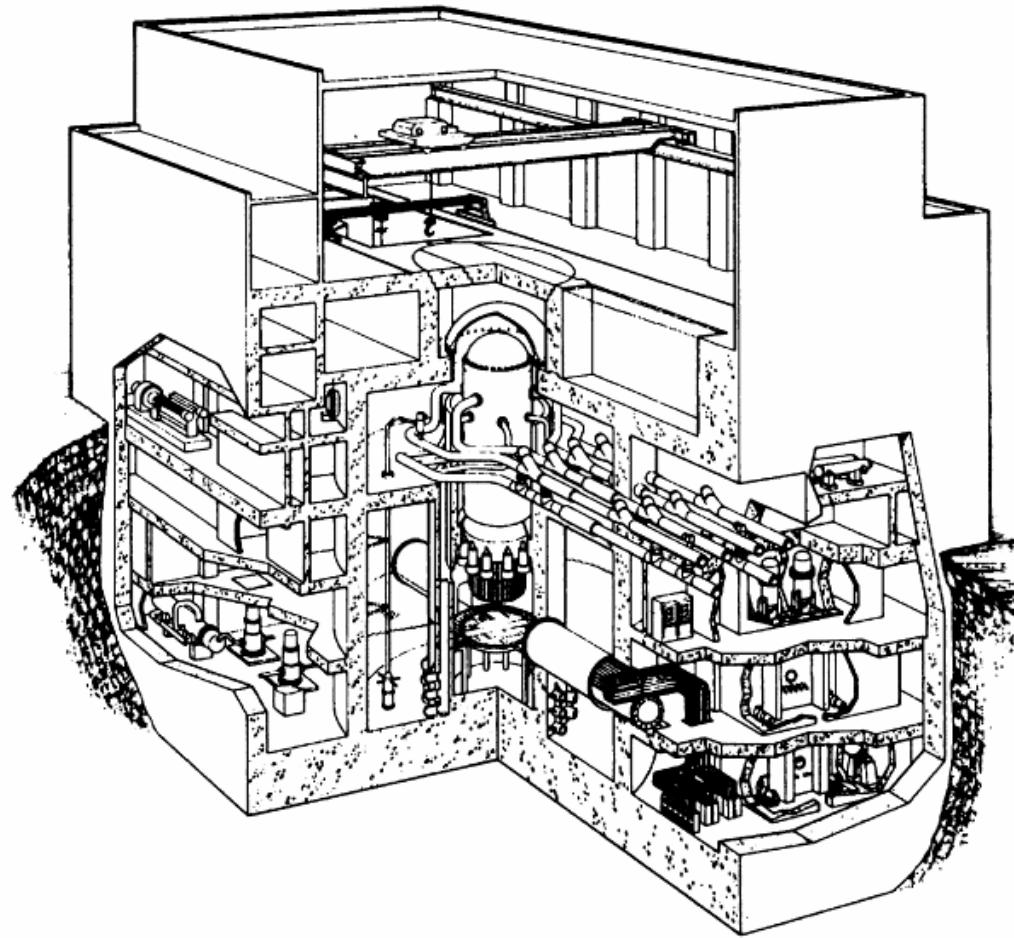
BWR/6 FUEL ASSEMBLIES & CONTROL ROD MODULE

- 1.TOP FUEL GUIDE
- 2.CHANNEL FASTENER
- 3.UPPER TIE PLATE
- 4.EXPANSION SPRING
- 5.LOCKING TAB
- 6.CHANNEL
- 7.CONTROL ROD
- 8.FUEL ROD
- 9.SPACER
- 10.CORE PLATE ASSEMBLY
- 11.LOWER TIE PLATE
- 12.FUEL SUPPORT PIECE
- 13.FUEL PELLETS
- 14.END PLUG
- 15.CHANNEL SPACER
- 16.PLENUM SPRING

GENERAL  ELECTRIC



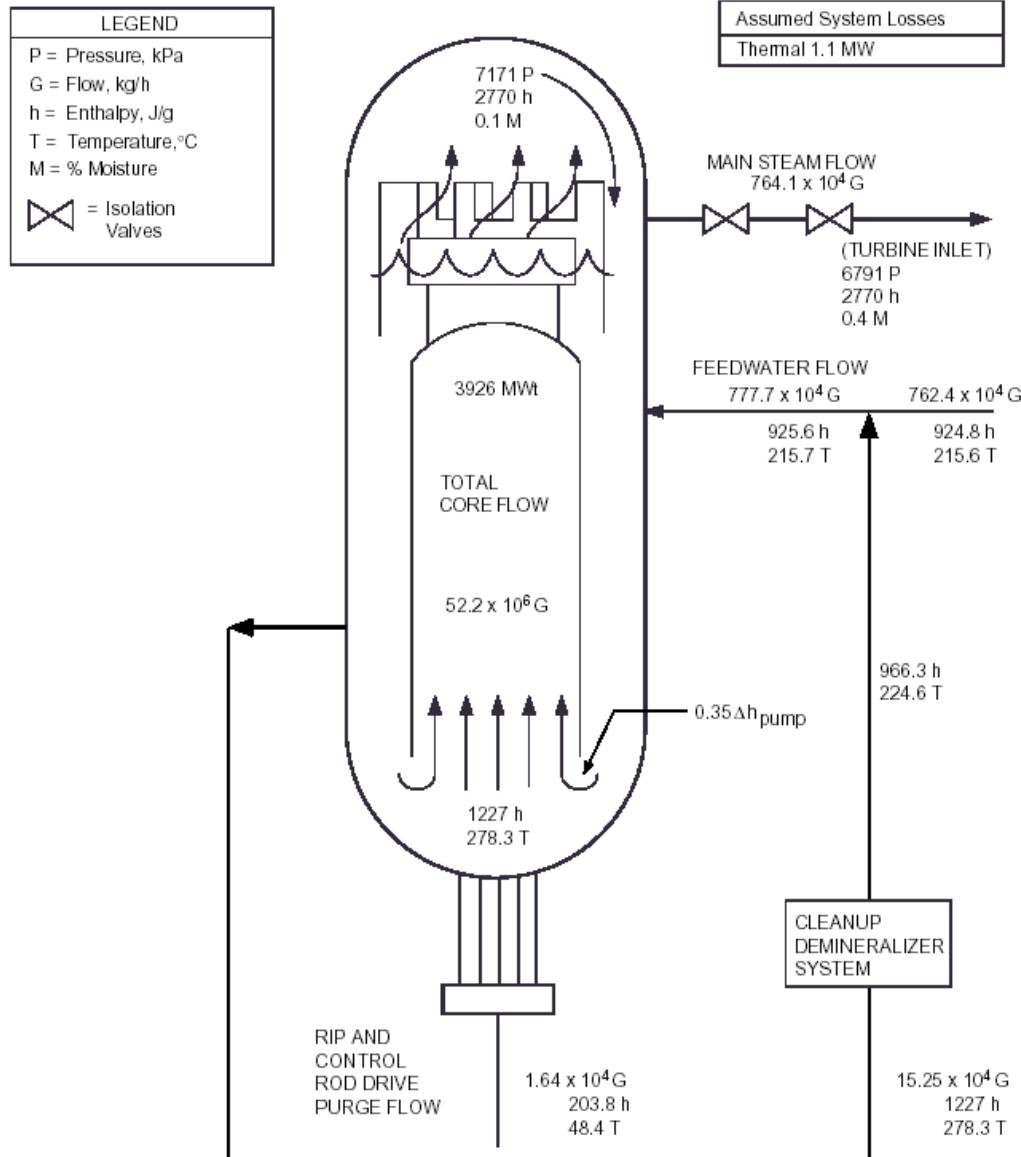
Reaktorska zgrada BWR reaktora



Slika 4.6.1. Postrojenje naprednog kipućeg reaktora (ABWR).

Zadatak 2: BWR reaktor

- BWR reaktor u stacionarnom stanju na punoj snazi proizvodi $m_{\text{pare}} = 760 \cdot 10^4 \text{ kg/h}$ pare s udjelom vlage 0,1% pri tlaku 7,2 MPa. Entalpija pojne vode temperature 216 °C je $h_{\text{vode}} = 926,7 \text{ kJ/kg}$ a entalpije zasićene vode i pare na tlaku od 7,2 MPa su $h_f = 1278 \text{ kJ/kg}$ i $h_g = 2770 \text{ kJ/kg}$. Izračunati termičku snagu jezgre i potrebnu masu UO_2 goriva obogaćenja $e = 4\%$ ako se zna da je srednji tok termičkih neutrona u reaktoru $\Phi = 3,8 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{s}$ a mikroskopski udarni presjek za fisiju $\sigma_f = 580 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$. Pri fisiji se oslobodi 200 MeV energije. Zanemariti gubitke topline iz reaktora i porast energije fluida zbog rada pumpanja recirkulacijskih pumpi.



Toplinska bilanca
BWR reaktora koji
je poslužio kao
podloga za podatke
u zadatku

Zadatak 2: BWR reaktor – rješenje

- Maseni sadržaj pare u proizvedenoj pari je
 $x = 1 - 0,001 = 0,999$
- Entalpija proizvedene vlažne pare je
$$h_{\text{pare}} = (1-x) h_f + x h_g = 0,001 * 1278 + 0,999 * 2770 \text{ h}_{\text{pare}} = 2768,5 \text{ kJ/kg}$$
- Snaga jezgre je $P_{\text{jezgre}} = m_{\text{pare}} (h_{\text{pare}} - h_{\text{vode}})$
$$P_{\text{jezgre}} = 760 \cdot 10^4 / 3600 * (2768,5 - 926,7)$$

$$P_{\text{jezgre}} = 3888,26 \text{ MW}$$
- Ta je snaga rezultat $N * \Phi * \sigma_f$ fisija u svakoj sekundi.
N je broj jezgara U-235 u reaktoru.
- $P_{\text{jezgre}} = 200 * 1,6 \cdot 10^{-13} * N * \Phi * \sigma_f$
$$P_{\text{jezgre}} = 3,2 \cdot 10^{-11} * N * 3,8 \cdot 10^{13} * 580 \cdot 10^{-24} = 3888,26 \cdot 10^6 \text{ W}$$
- Potrebni broj jezgara U-235 u jezgri iznosi $N = 5,51 \cdot 10^{27}$

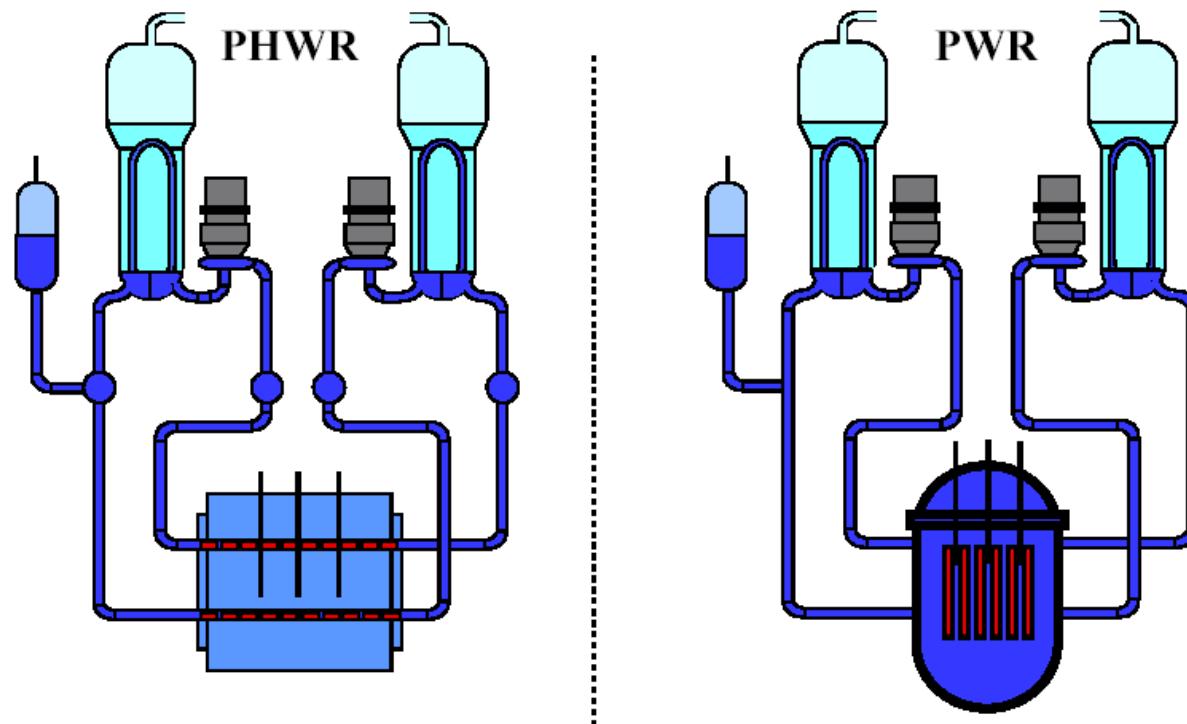
Zadatak 2: BWR reaktor – rješenje

- Broj jezgara U-235 u masi UO_2 m_{UO_2} je
$$N = e * A_{\text{U}} / A_{\text{UO}_2} * m_{\text{UO}_2} N_A / A_{\text{U}235}$$
- Računajući s približnim atomskim masama atomska masa urana je
$$1/A_{\text{U}} = e/A_{\text{U}235} + (1-e)/A_{\text{U}238}$$
.
Za $e = 0,04$ A_{U} je 237,88 a atomska masa UO_2 ,
 $A_{\text{UO}_2} = A_{\text{U}} + A_{\text{O}_2} = 237,88 + 32 = 269,88$.
- Za obogaćenja do 10% uobičajeno je računati s približnim atomskim masama $A_{\text{U}} = 238$ i $A_{\text{UO}_2} = 270$.
Relativna greška u masenim udjelima urana u UO_2 je tom prilikom mala $(238/270 - 237,88/269,88) / (237,88/269,88) = 0,006\%$.
- $N = 0,04 * 238/270 * m_{\text{UO}_2} * 6,022 \cdot 10^{23} / 235 = 5,51 \cdot 10^{27}$,
 $m_{\text{UO}_2} = 60982,5 \text{ kg}$.
- Odgovarajuća masa urana je
$$m_{\text{U}} = m_{\text{UO}_2} * A_{\text{U}} / A_{\text{UO}_2} = 60982,5 * 238/270 = 53755 \text{ kg}$$

HWR CANDU (CANada Deuterium Uranium)

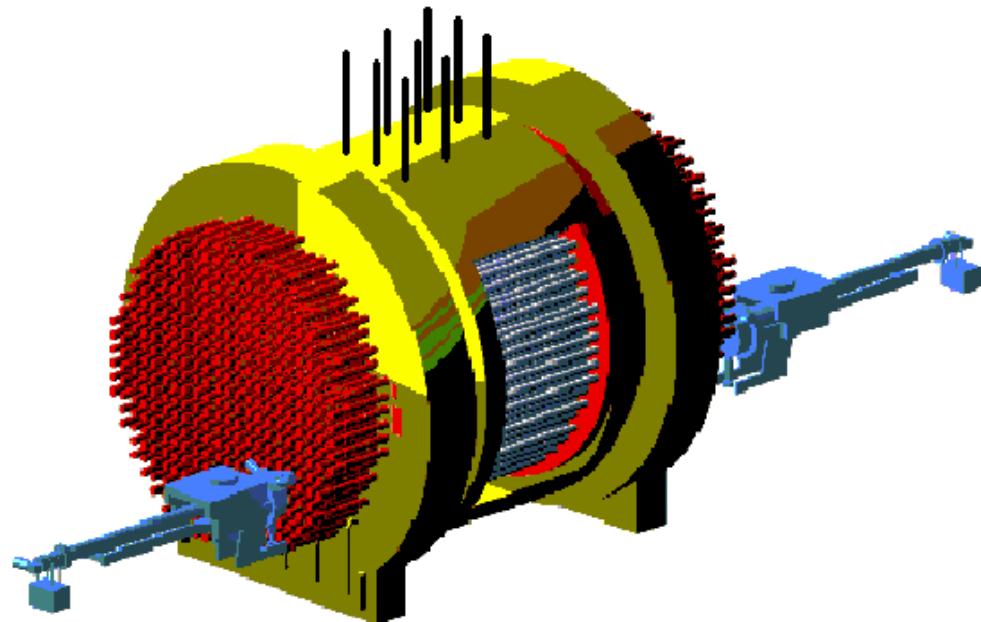
- Prirodni ili slabo obogaćeni uran
- Teška voda je moderator i hladilac
- Dva rashladna kruga kao i PWR
- Horizontalni rashladni kanali po tlakom
- Moderator se nalazi u posudi kroz koju prolaze tlačne cijevi (kalandrija)
- Veliki volumen reaktora
- Niski odgor (3 do 4 puta manji nego PWR i odgovarajuće više proizvedenog istrošenog goriva)
- Izmjena goriva bez zaustavljanja

Sličnosti i razlike PWR i CANDU reaktora

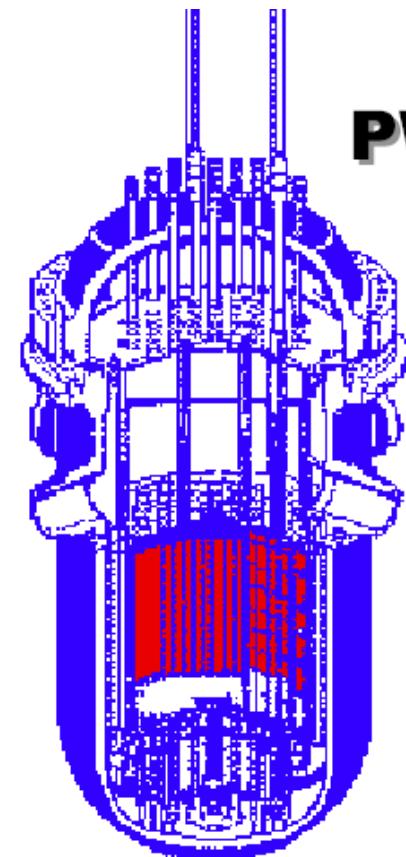


Reaktorska posuda CANDU i PWR

CANDU



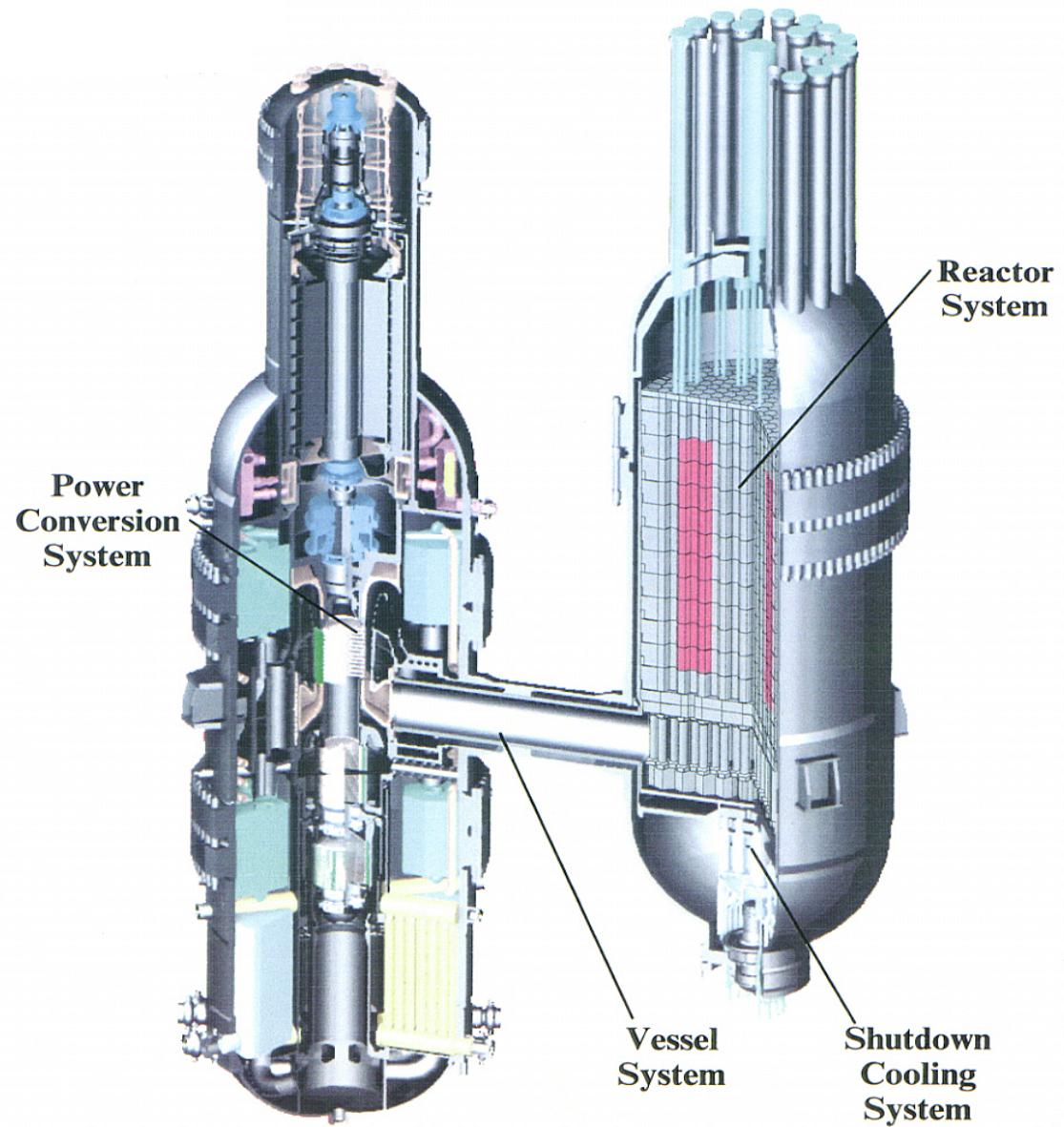
PWR



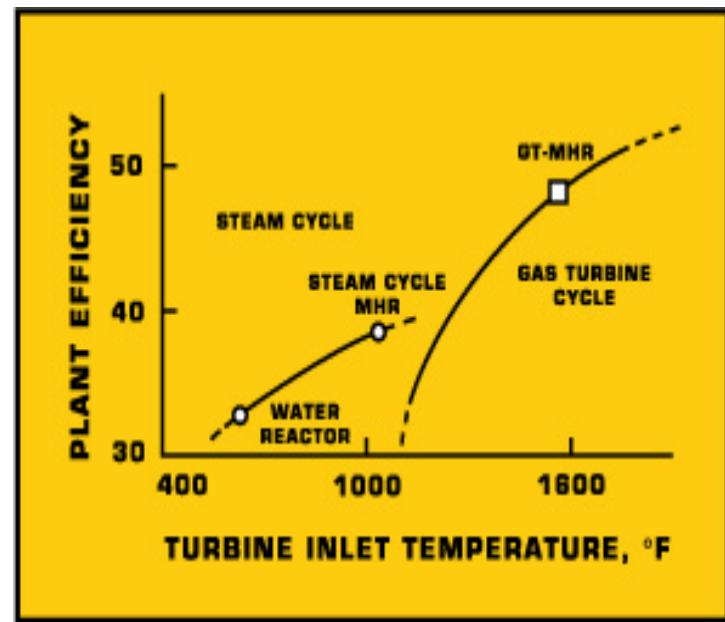
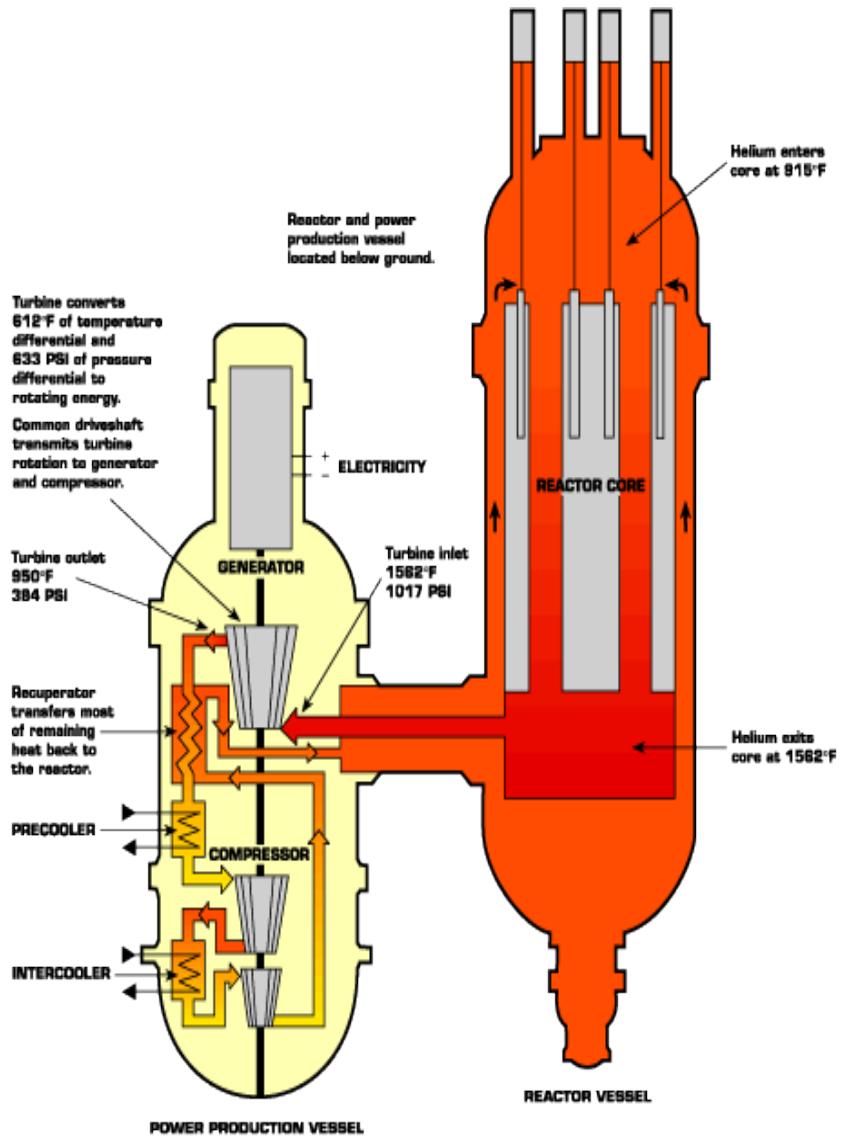
Plinom hlađeni reaktori

- Prošlost i budućnost
- Moderator je grafit
- Nekad hlađeni s CO_2 , danas uglavnom He
- Relativno veliki volumen jezgre
- Moguća izvedba s Rankineovim (prošlost) i Braytonovim ciklusom (budućnost)
- Mogućnost proizvodnje procesne pare
- Visokotemperaturne izvedbe će se koristiti za industrijsku proizvodnju vodika

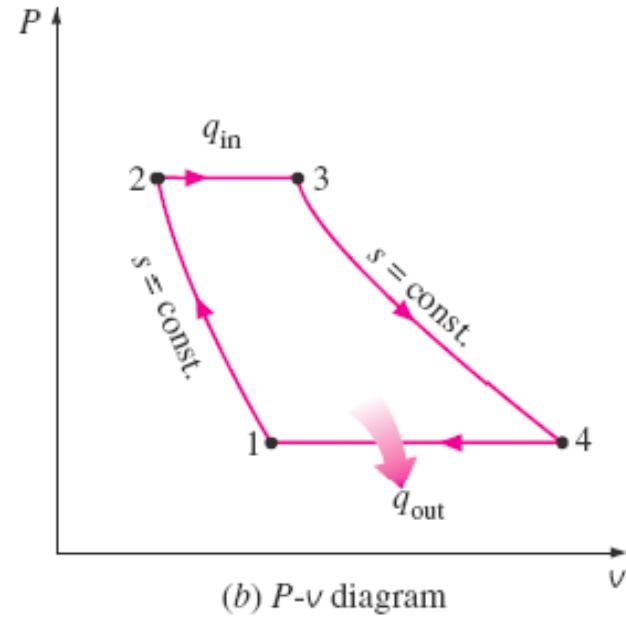
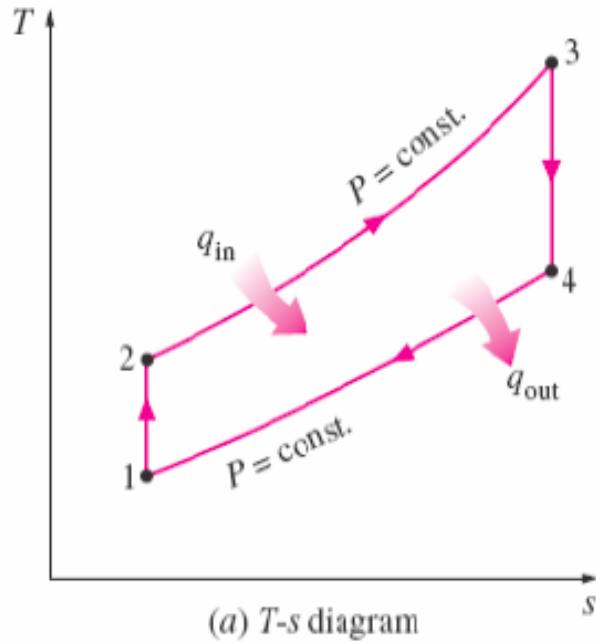
Reaktorska posuda i sustav za pretvorbu energije – Modularni He reaktor 286 MWe



Modularni reaktor hlađen He



Brayton (Joule) ciklus



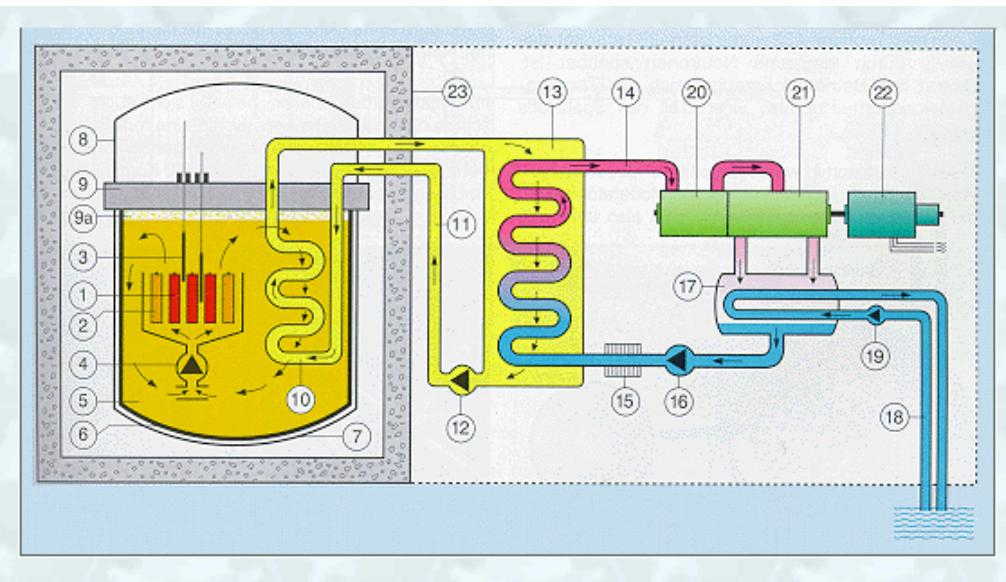
$\eta_{th} = W_{net}/Q_{in} = 1 - Q_{out}/Q_{in}$
 omjer kompresije $r_p = p_2/p_1$

$$\eta_{th, \text{Brayton}} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$

Brzi oplodni reaktori

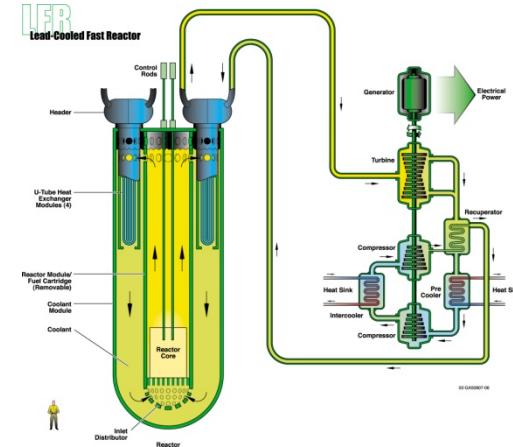
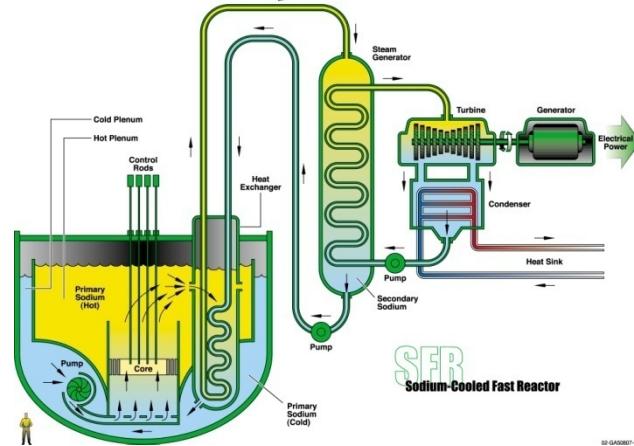
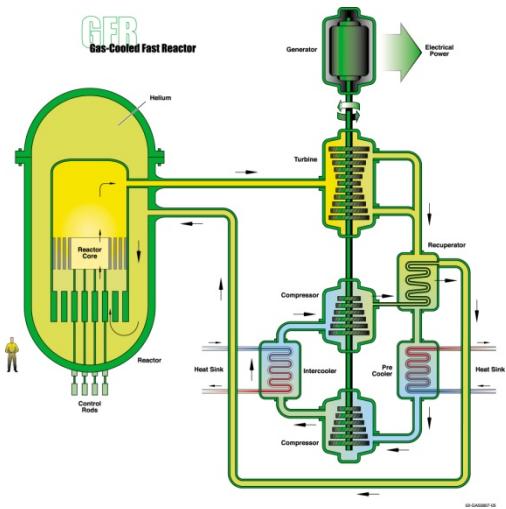
- Ne trebaju moderator
- Proizvode Pu-239 iz U-238 ili U-233 iz Th-232
- Uhvatom neutra na nastaje novi fisibilni materijal
- Moguća je veća proizvodnja nego potrošnja goriva
- Potrebna prerada goriva
- Zbog manjih udarnih presjeka, potreba za većim obogaćenjem goriva (15 do 20%)
- Velika gustoća snage
- Hlađenje tekućim metalom ili plinom
- U slučaju Na hlađenja obično 3 rashladna kruga

Bazenski brzi reaktor (Phenix) , 250MWe



1 Fuel (fissile material)	9 Cover	17 Condenser
2 Fuel (breeder material)	10 Na/Na heat exchanger	18 Cooling water
3 Control rods	11 Secondary Na	19 Cooling water pump
4 Primary Na pump	12 Secondary Na pump	20 High pressure turbine
5 Primary Na coolant	13 Steam generator	21 Low pressure turbine
6 Reactor vessel	14 Fresh steam	22 Generator
7 Protective vessel	15 Feedwater pre-heater	23 Reactor building
8 Reactor cover	16 Feedwater pump	

Izvedbe budućih brzih reaktora



Hlađen plinom

850°C / visoki tlak

Hlađen natrijem

550°C / niski tlak.

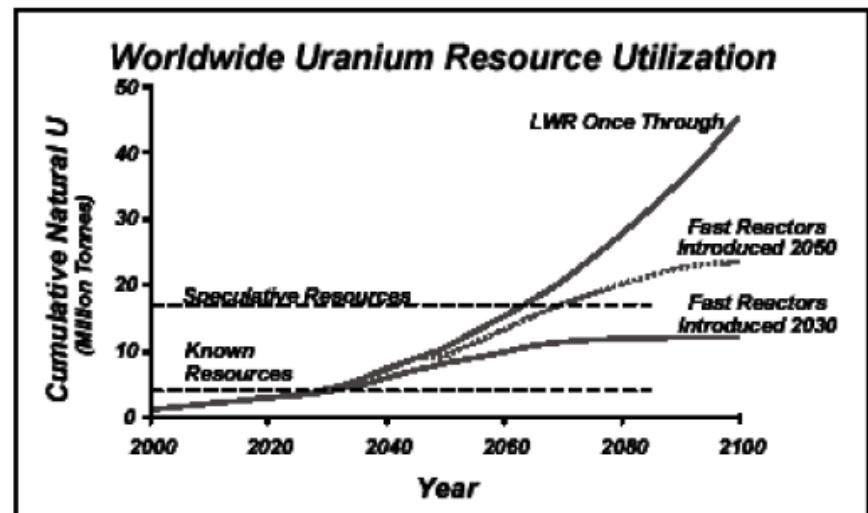
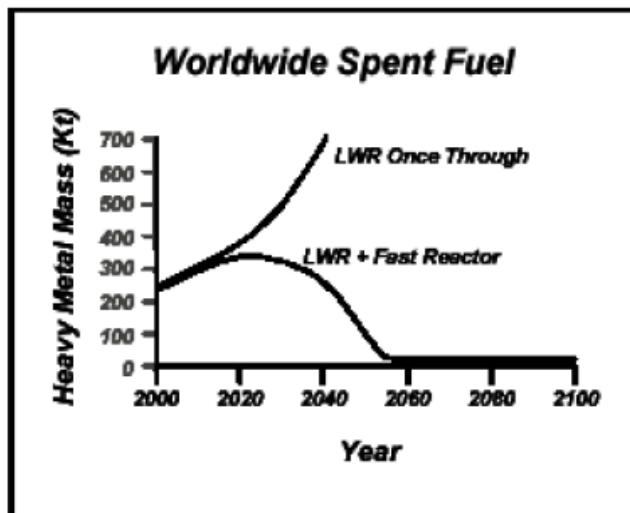
Hlađen olovom

$550/800^{\circ}\text{C}$ / niski tlak.

Rezerve nuklearnog goriva i problem istrošenog goriva

Koncept rješenja problema:

- Oplodni reaktori povećavaju rezerve goriva
- Transmutacija i izgaranje aktinida smanjuju dugovječnost i količinu visokoaktivnog otpada



Što treba znati

- Kako se reaktori mogu podijeliti po tipu goriva
- Kako se reaktori mogu podijeliti po namjeni
- Koje se vrste moderatora koriste u termičkim reaktorima
- Koje se vrste hladionica koriste u nuklearnim reaktorima
- Što je potrebno za osiguranje lančane reakcije
- Koja je kombinacija gorivo-moderator hladilac prisutna u PWR reaktoru
- Koja je kombinacija gorivo-moderator hladilac prisutna u BWR reaktoru
- Koja je kombinacija gorivo-moderator hladilac prisutna u CANDU reaktoru
- Kakva je to heterogena konfiguracija reaktorske jezgre
- Što je odgor

Što treba znati

- Koje su generacije reaktori sada u pogonu
- Koliko rashladnih krugova ima PWR reaktor
- Što je rashladna petlja
- Koje su osnovne komponente PWR reaktora
- Čemu služi tlačnik
- Koji su intervali izmjene goriva u energetskom reaktoru
- Što je gorivni element
- Od čega se sastoji goriva šipka
- Koja je uloga generatora pare
- Koji ciklus radnog medija koriste lakovodne nuklearne elektrane

Što treba znati

- Čemu služi kontejnment
- Kako se regulira snaga PWR reaktora
- Koliko rashladnih krugova ima BWR reaktor
- Kako se regulira snaga BWR reaktora
- Što je recirkulacija u BWR reaktoru
- Koliko rashladnih krugova ima CANDU reaktor
- Kako izgleda reaktorska posuda CANDU reaktora
- Kako se mijenja gorivo u CANDU reaktoru
- Koji ciklus koriste plinom hlađeni nuklearni reaktori
- Koja im je osnovna prednost
- Koji je rashladni medij najčešće korišten u modernim plinom hlađenim reaktorima

Što treba znati

- Što rade oplodni reaktori
- Kakvo obogaćenje goriva koriste
- Što je transmutacija nuklearnog goriva

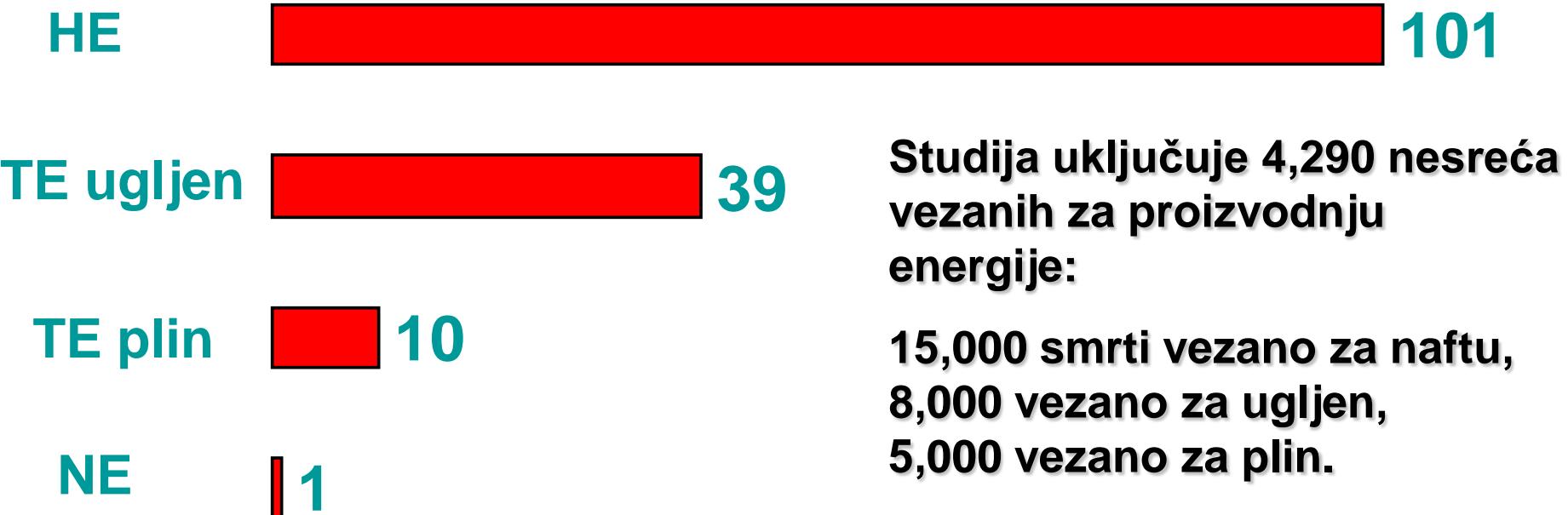
Sigurnost nuklearnih elektrana

Sigurnost nuklearnih elektrana

- Zanemarive emisije u normalnom pogonu
- Konzervativan projekt s visokim stupnjem sigurnosti
- Visoki zahtjevi na kvalitetu materijala i ugradnje
- Da bi se postigao siguran pogon potrebno je:
 - spriječiti nagle poraste snage
 - osigurati odvođenje ostatne topline
 - spriječiti ispuštanje radioaktivnog materijala
 - pospremiti na siguran način istrošenog gorivo

Sigurnosne statistike različitih načina proizvodnje električne energije

Broj smrti u nesrećama po 1000 TWh proizvedene električne energije



*uključuje Černobil

**Izvor: Paul Scherrer Institute,
Švicarska, 2001**

Principi sigurnosnih mjera u nuklearnim elektranama

- **Nuklearna eksplozija reaktora je onemogućena projektom**
- **U svojoj jezgri nuklearni reaktor sadrži veliku količinu radioaktivnih tvari, pretežno fizijskih proizvoda.**
- **Sigurnost se u osnovi odnosi na onemogućenje širenja radioaktivnih materijala unutar postrojenja i u okoliš**
- **Do akcidentnog ispuštanja uglavnom dolazi samo ako dođe do pregrijanja goriva**
- **Sigurnost nuklearne elektrane se postiže nizom mjera u fazi projektiranja, gradnje i tijekom pogona.**

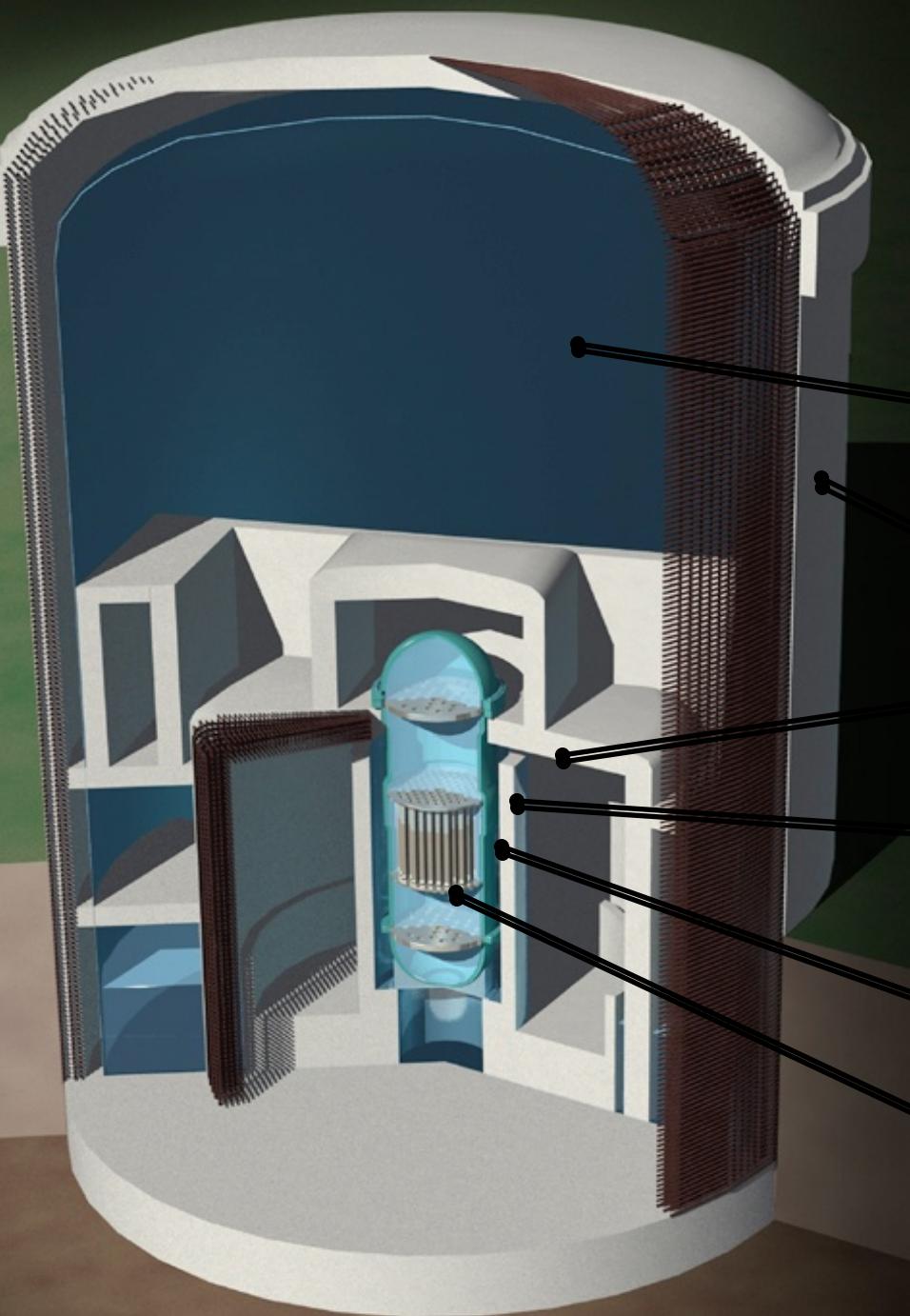
Obrana po dubini

- **Osnova filozofije projektiranja nuklearne elektrane sa stajališta sigurnosti je tzv. obrana po dubini.**
- **Obrana po dubini prepostavlja postojanje višestrukih barijera za širenje radioaktivnosti i sigurnosnih sustava koji osiguravaju njihovu nepropusnost**
- **Barijere u smislu zaštite okoliša djeluju serijski, jedna nakon druge.**
- **Izgubljenu funkciju jednog sustava važnog za sigurnost automatski preuzima drugi.**
- **Bitni sustavi su u najmanju ruku udvojeni**
- **Sustavi mogu biti aktivni ili pasivni (kako dobivaju energiju potrebnu za izvršavanje sigurnosne funkcije)**
- **Barijere možemo razmatrati kao stvarne fizičke barijere ugrađene u nuklearnu elektranu i kao fizičke i administrativne mjere koje se poduzimaju u nuklearnoj elektrani za zaštitu tih barijera.**

Obrana po dubini

- **Fizičke barijere su:**
 - matrica nuklearnog goriva
 - obloga gorivnog elementa
 - primarni rashladni krug
 - zaštitna posuda (kontejnment)
- **Tehnički sustavi koji osiguravaju funkciju fizičkih barijera:**
 - **sustav za zaštitno hlađenje jezgre reaktora (štiti gorivne elemente od pregrijanja)**
 - **sustav za ograničavanje porasta tlaka u kontejnменту (štiti zaštitnu posudu od previsokog tlaka i temperature)**

Višeslojna zaštita



Kontejnmentska posuda

4 cm čelika

Kontejnmentska zgrada

1 m prenapregnutog betona

Unutrašnja betonska struktura

1.5 m prenapregnutog betona

Biološki štit

1,2 m teškog betona +
4 cm čelika

Reaktorska posuda

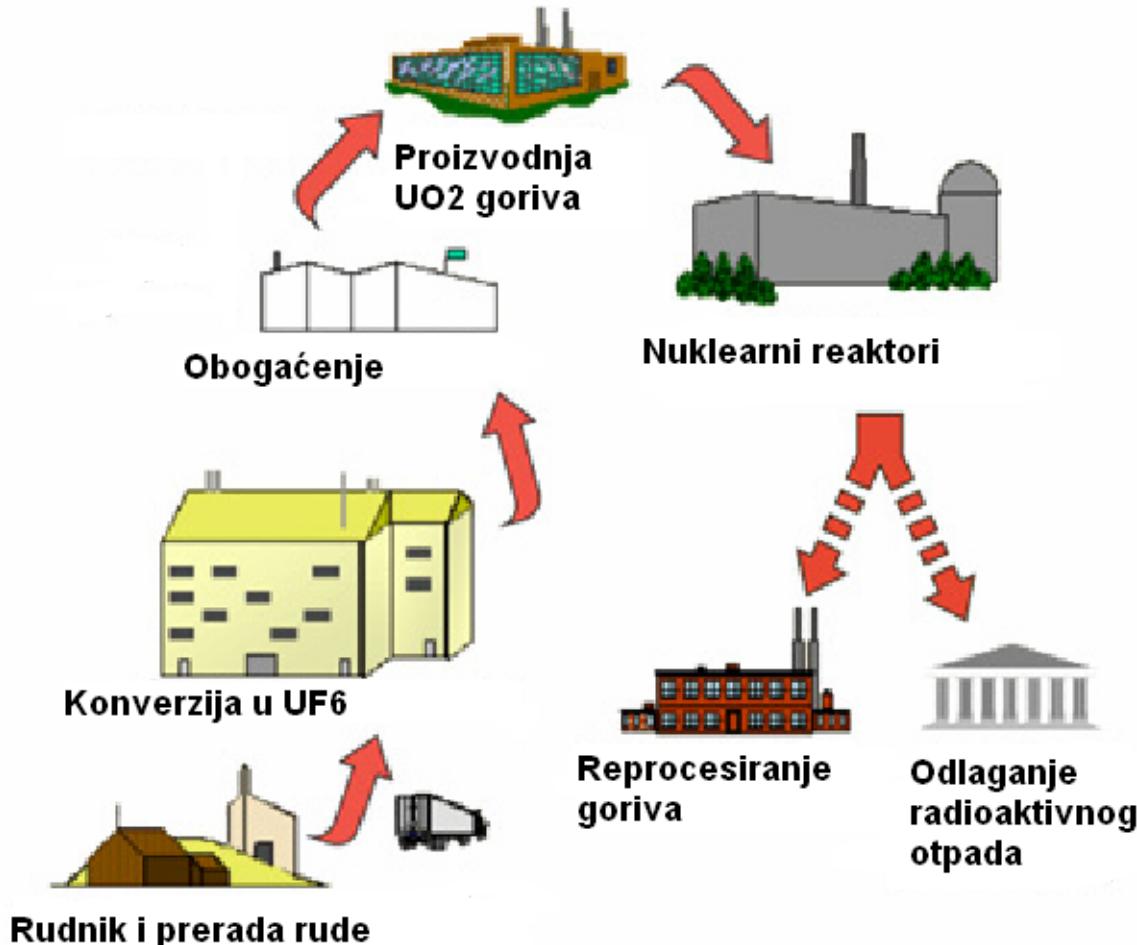
20 cm čelika

Matrica goriva + košuljica

Odlaganje istrošenog goriva

Nuklearni gorivni ciklus

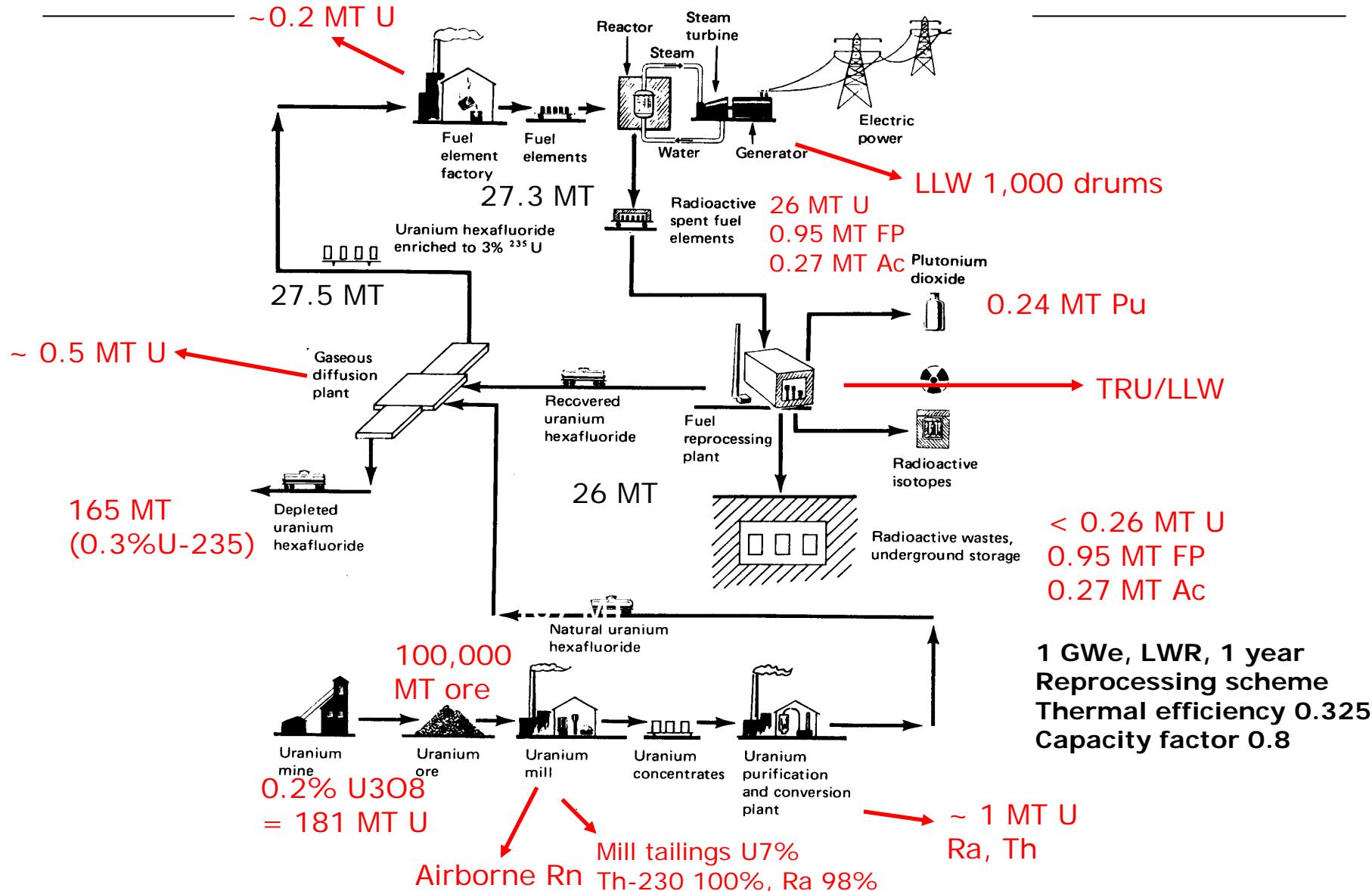
- Obuhvaća sve aktivnosti od vađenja urana do konačnog odlaganja radioaktivnog otpada



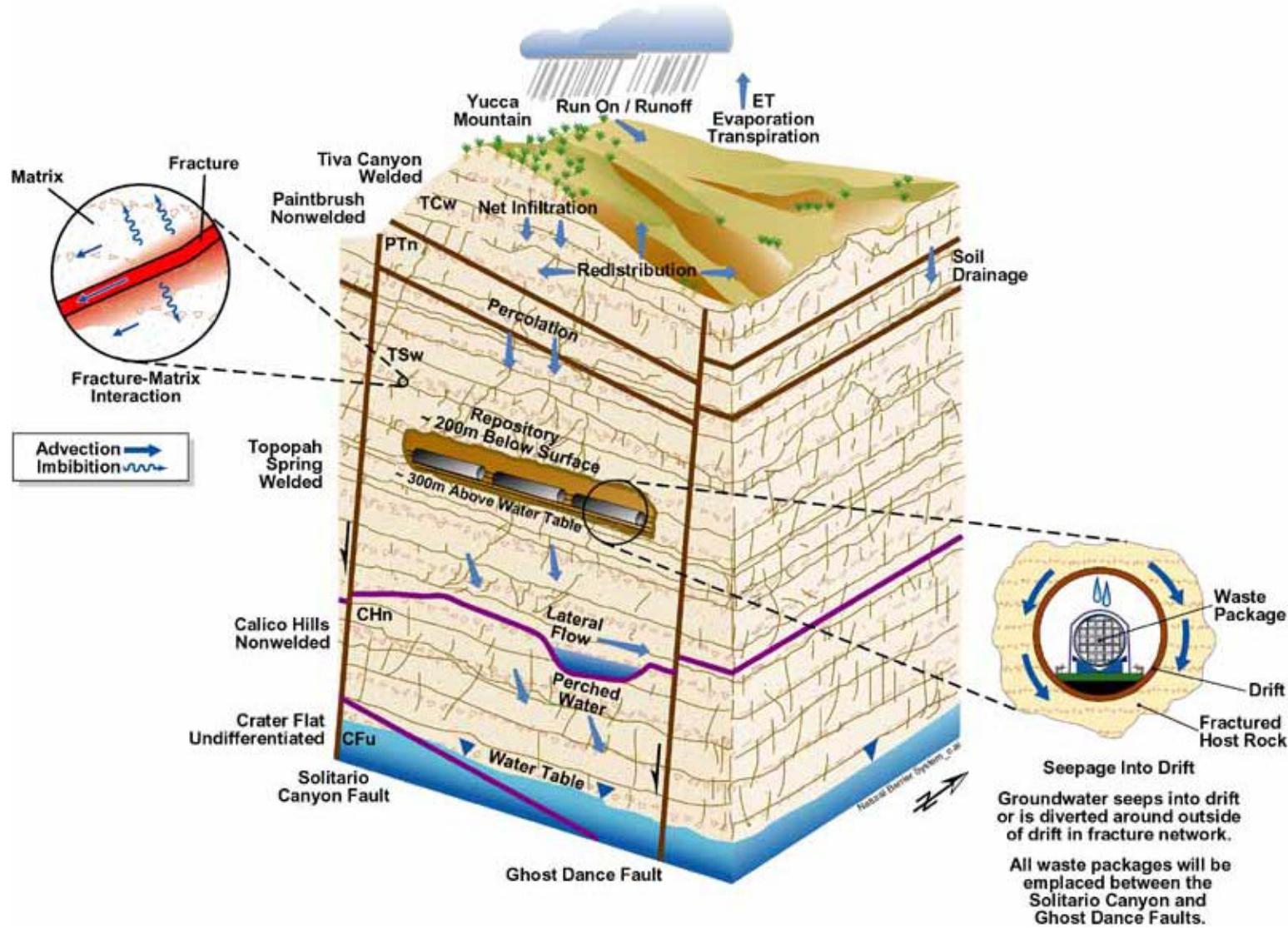
Istrošeno gorivo

- Gorivo provede 3 godine u reaktoru
 - svake godine se mijenja približno trećina
 - spremi se privremeno u bazen za istrošeno gorivo
- Reprocesiranje
 - kemijsko izdvajanje neiskorištenog uranija i plutonija
 - drobljenje tableta goriva, otapanje u dušičnoj kiselini
 - organska otapala za uranij i plutonij
 - opasnost za proliferiranja (širenja) nuklearnih materijala
 - 30% povećanje dostupne energije (cijena NE)
 - važno za tehnologiju oplodnih reaktora
 - smanjuje problem odlaganja radioaktivnog otpada
- Transmutacija istrošenog goriva
 - dodatno izlaganje toku neutrona
 - smanjuje količinu radioaktivnog otpada
 - smanjuje aktivnost i udjel dugoživućih izotopa

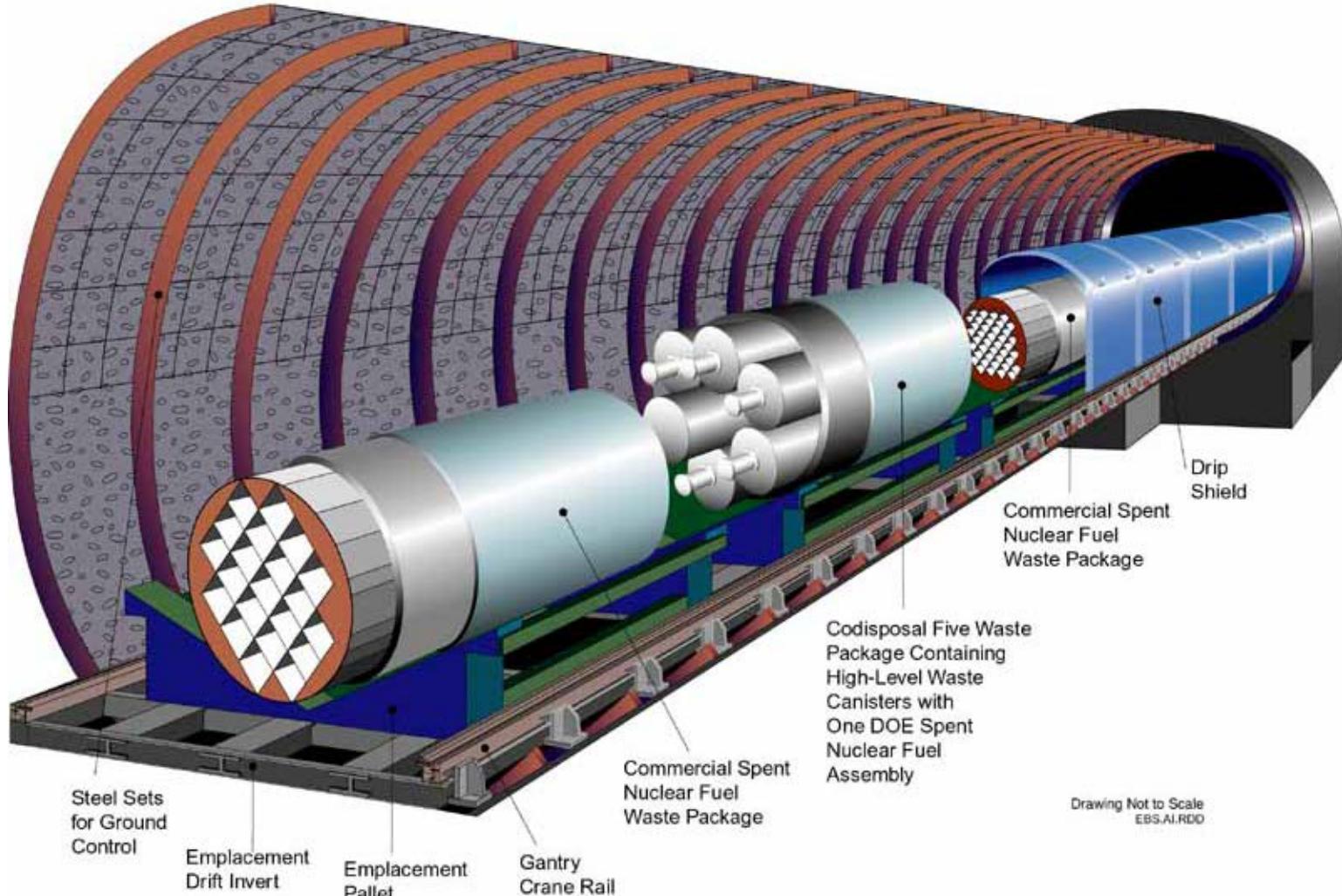
Mase materijala u nuklearnom gorivom ciklusu (istrošeno gorivo i radioaktivni otpad)



Trajno odlagalište - sustav prirodnih barijera



Trajno odlagalište - sustav inženjerskih barijera

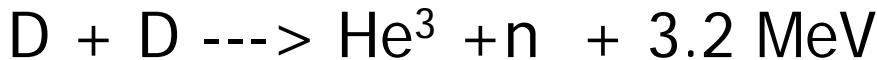


Dodatak - Nuklearna fuzija

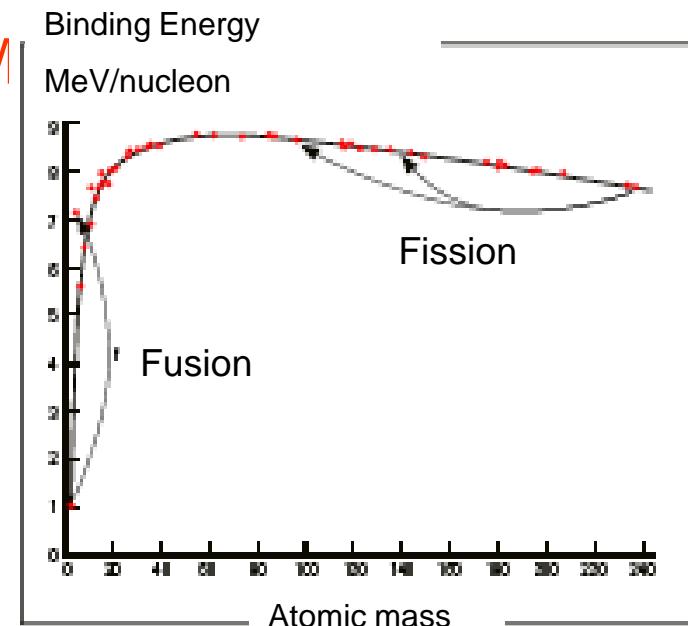
Nuklearna fuzija

- **Spajanje lakših jezgara u teže uz oslobođanje energije**
- **Prvi kandidat za fuzijske uređaje je D-T reakcija**
- **Potrebno je postići i održavati temperaturu od desetak miliona K**
- Problem održavanja plazme – elektromagnetsko ograničavanje
- **Tokamak uređaji i inercijalni fuzijski uređaji**
- Problem materijala (visoke temperature i veliki fluks brzih neutrona)
- **Komercijalna primjena nije moguća prije sredine stoljeća a i onda će biti ograničena na uski krug zemalja**

Fuzijske reakcije



U reaktoru koji koristi D-T reakciju tricij se proizvodi u oplodnom omotaču iz litija uhvatom brzih neutrona



Koji su razlozi za razvoj fuzije?

- o Praktično neiscrpan izvor energije (velike rezerve D i Li)
- o Nema emisije stakleničkih plinova
- o Smanjena proizvodnja radioaktivnog otpada u odnosu na fisiju
- o Povoljna sigurnosna svojstva

Udarni presjeci (vjerojatnosti)

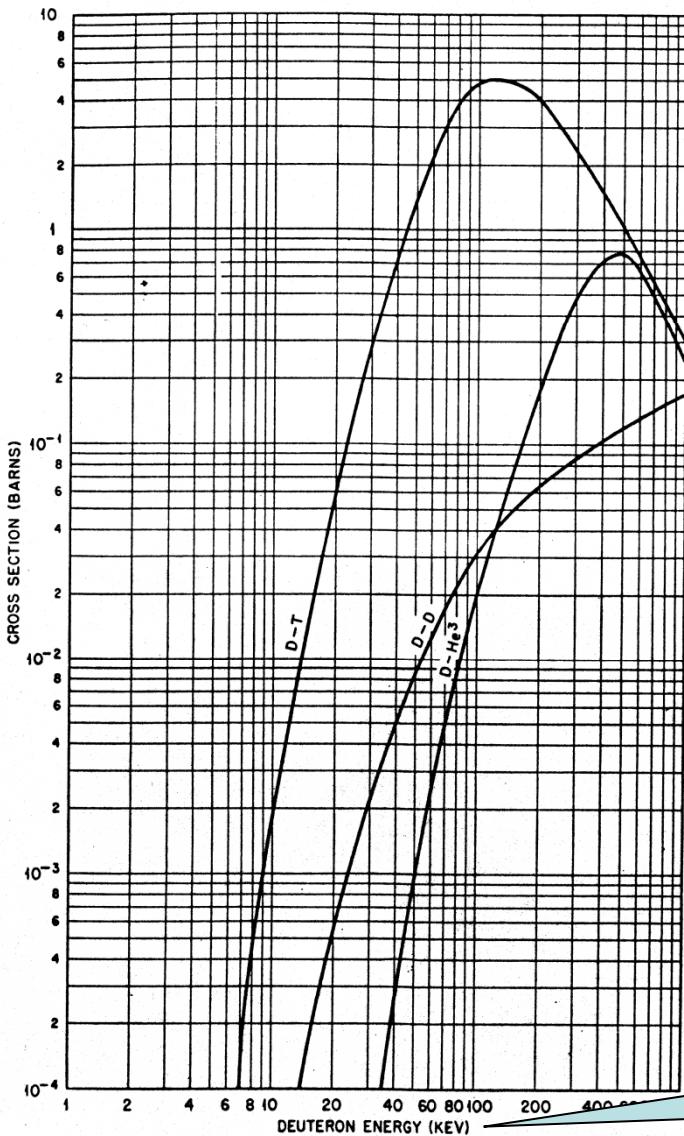
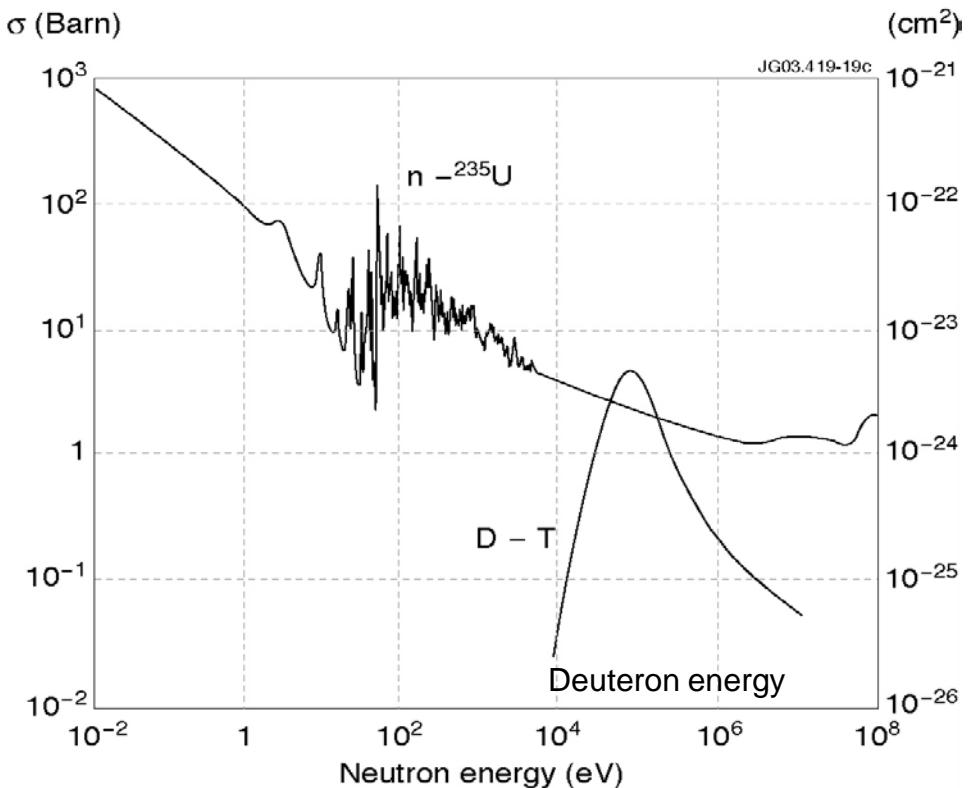


FIG. 2.3. Cross sections for D-T, D-D (total), and D-He³ reactions.

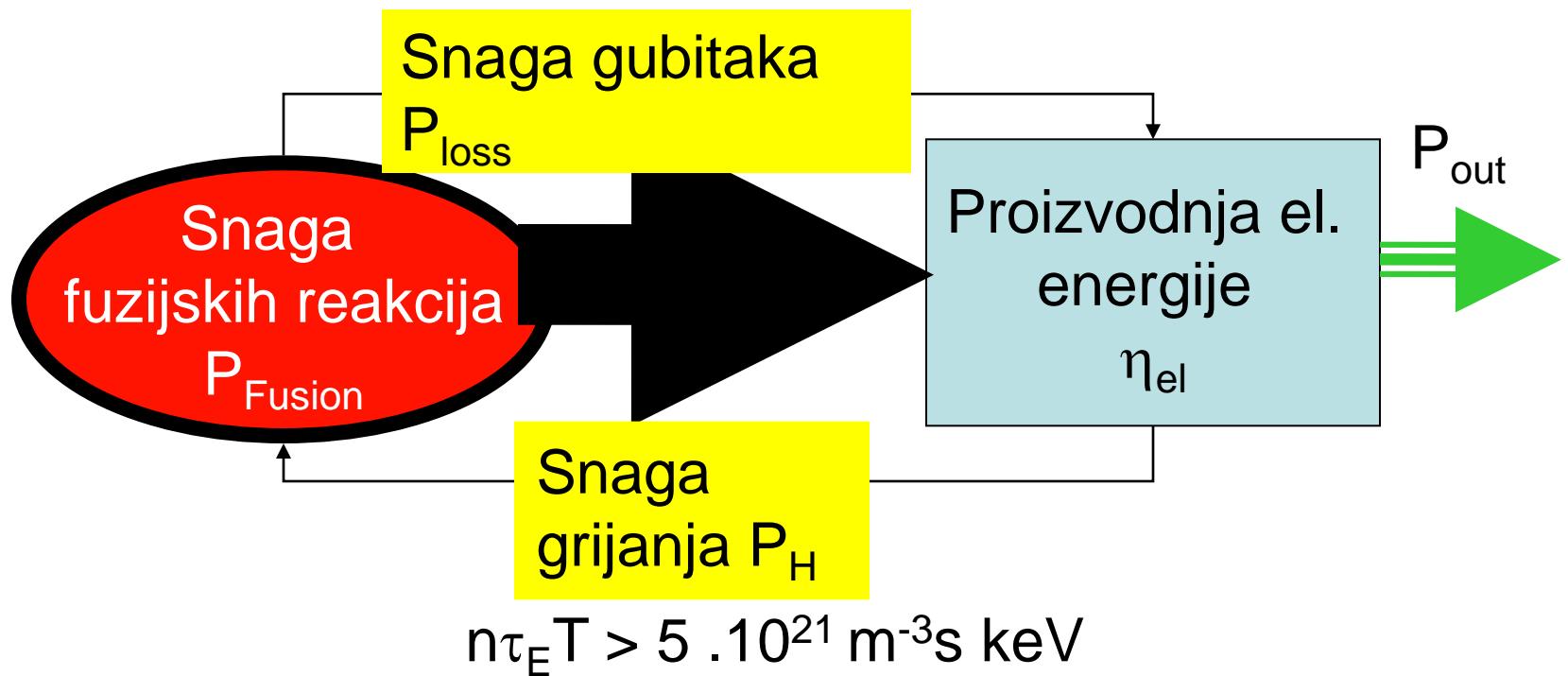


1 keV is equivalent to 10^7 °K

e: Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim elektranama

Uvjeti za izvedbu fuzijskog reaktora

- Bilanca topline

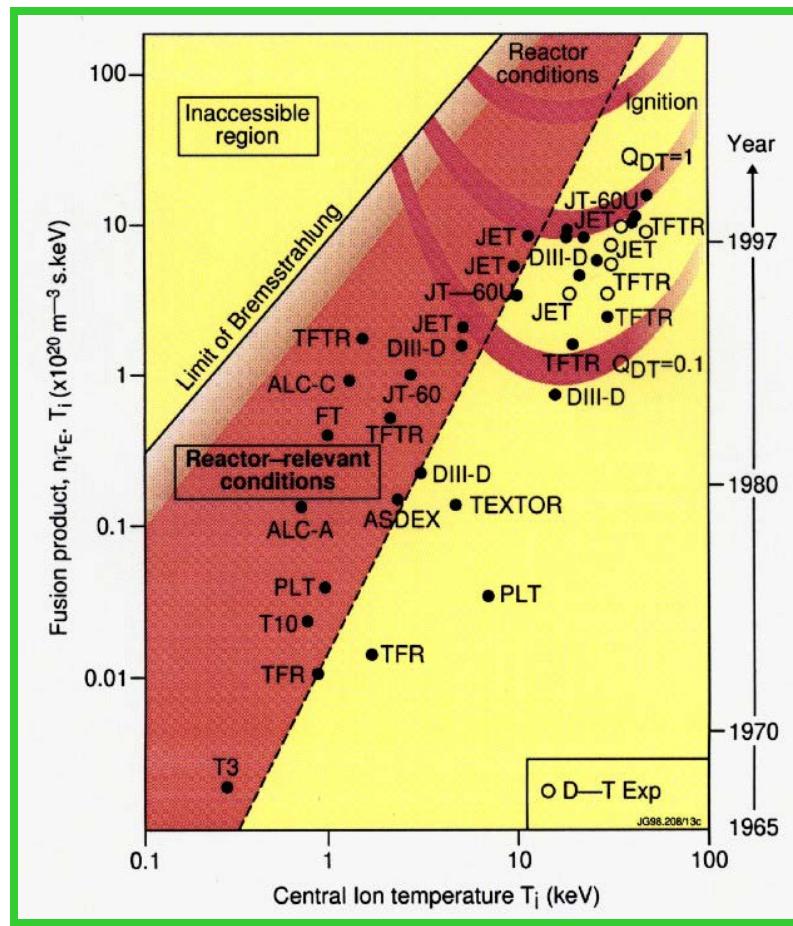


n = gustoća šestica, T = temperatura,
 τ_E = vrijeme održavanja plazme

Uvjeti za izvedbu fuzijskog reaktora

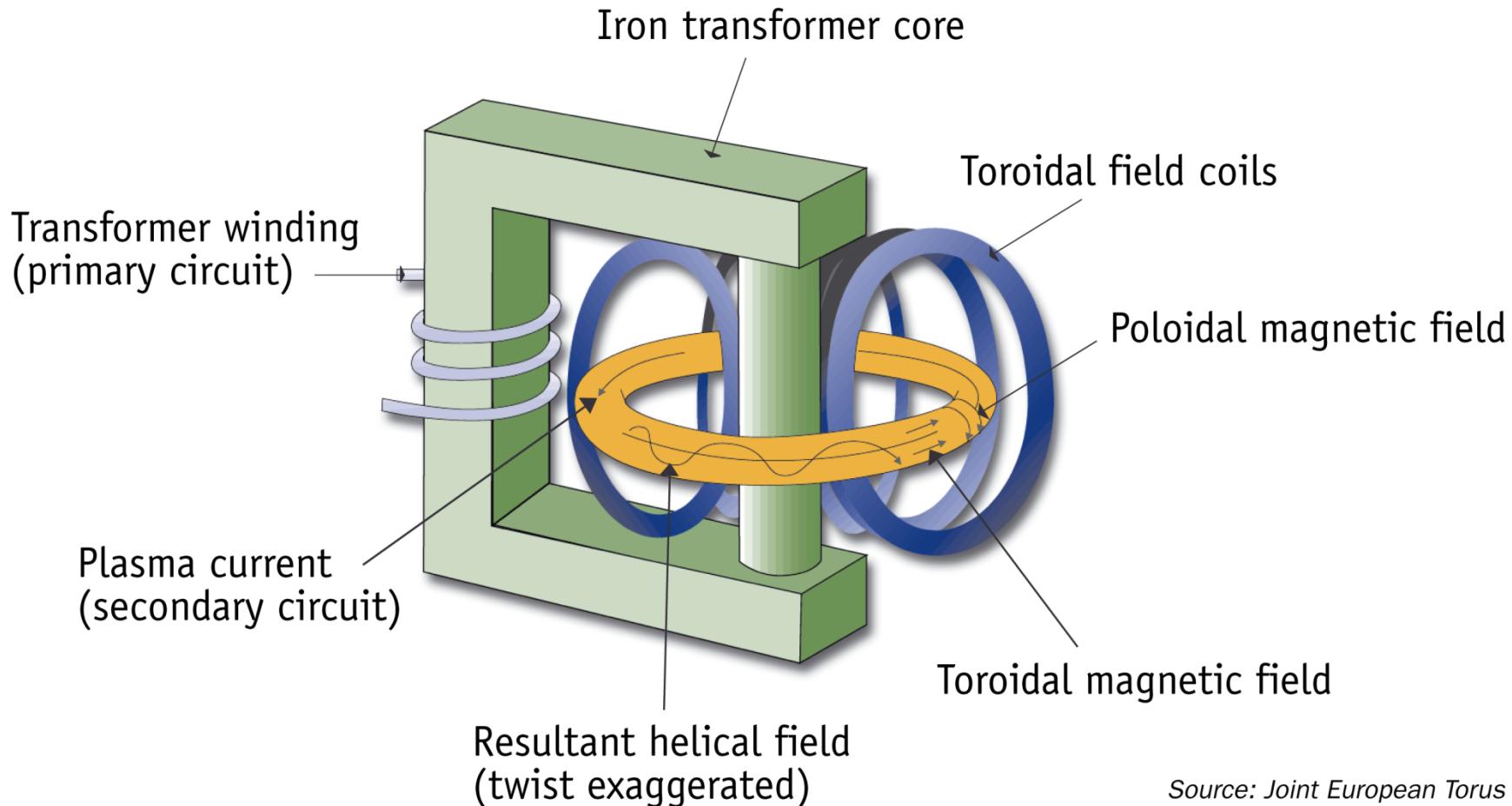
- Temperatura u području od 100 MK.
- Na temperaturi $10^4\text{-}10^5$ K, materija je u stanju plazme (ionizirani globalno neutralni plin).
- Stvaranje, održavanje i ograničavanje plazme na 10^8 K (inicijalno niski tlak):
 - ograničavanje magnetskim poljem;
 - grijanje RF valovima (170 GHz, 5 GHz, i 50 MHz za ITER) i ubacivanjem snopova neutralnih čestice velike energije

Status fuzijskih uređaja



Fuzijski uređaj tokamak tipa

Simple diagram of a Tokamak fusion reactor



Source: Joint European Torus

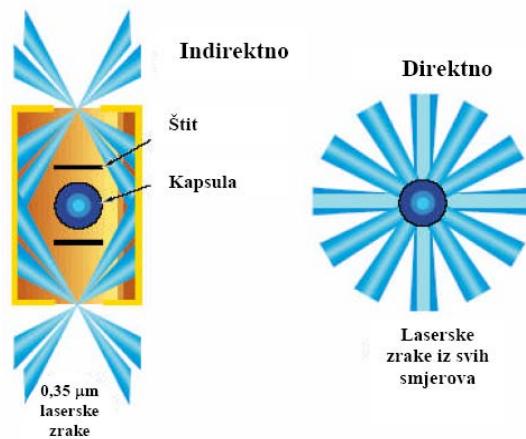
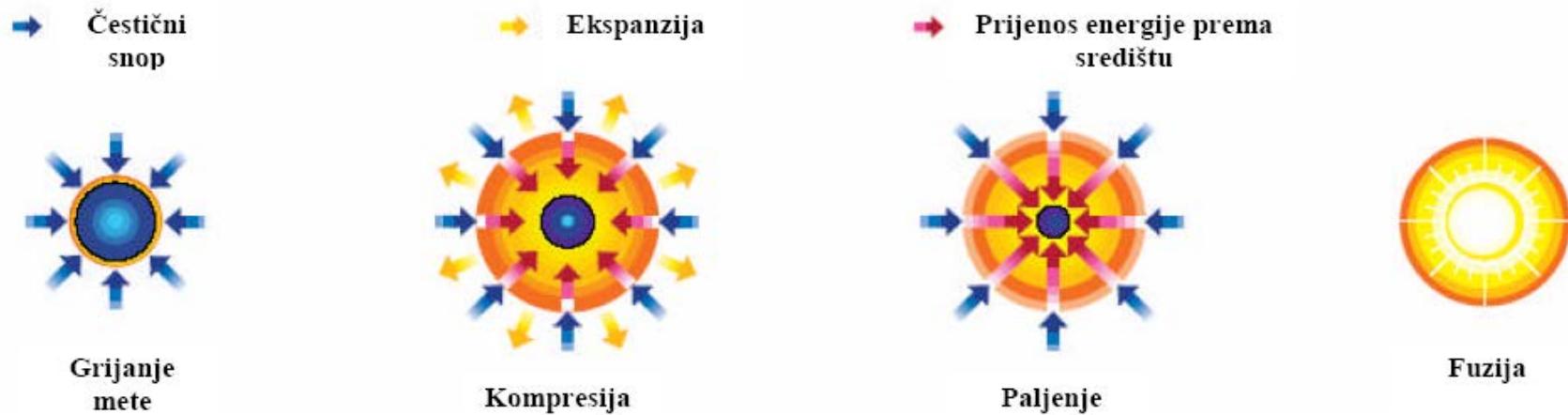
Fuzijski uređaji s inercijalnim ograničavanjem plazme

- Laserski snopovi ili čestični snopovi fokusiraju se na površinu mete promjera nekoliko milimetara koja sadrži malu količinu fuzijskog D-T goriva
- Isparivanje i ioniziranje površinskog sloja mete dovodi do formiranja plazme.
- Kako ovaj sloj isparenog materijala ekspandira prema van tako se po principu akcije i reakcije (efekt se može usporediti s lansiranjem mnogo malih raketa ili projektila s površine kuglice) formira tlačna fronta koja ekspandira prema unutrašnjosti mete i komprimira je grijući unutrašnje slojeve materijala.

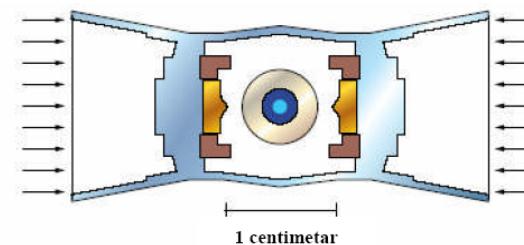
Fuzijski uređaji s inercijalnim ograničavanjem plazme

- Centralni dio mete komprimira se do gustoće koja je nekoliko tisuća puta veća od gustoće tekućeg stanja materijala mete i paljenje nuklearne reakcije počinje kad se dostigne temperatura od oko sto milijuna stupnjeva.
- Fuzijska reakcija se brzo širi kroz komprimirani materijal mete proizvodeći energiju koja je tipično nekoliko puta veća od energije deponirane u meti pod djelovanjem inicijalnog snopa.
- Vrijeme unutar kojeg se odvija fuzijska reakcija u ovakovom sustavu je ograničeno jedino inercijom samog goriva pa se zato za skup ovakvih postupaka koristi ime fuzija s inercijalnim ograničenjem plazme.

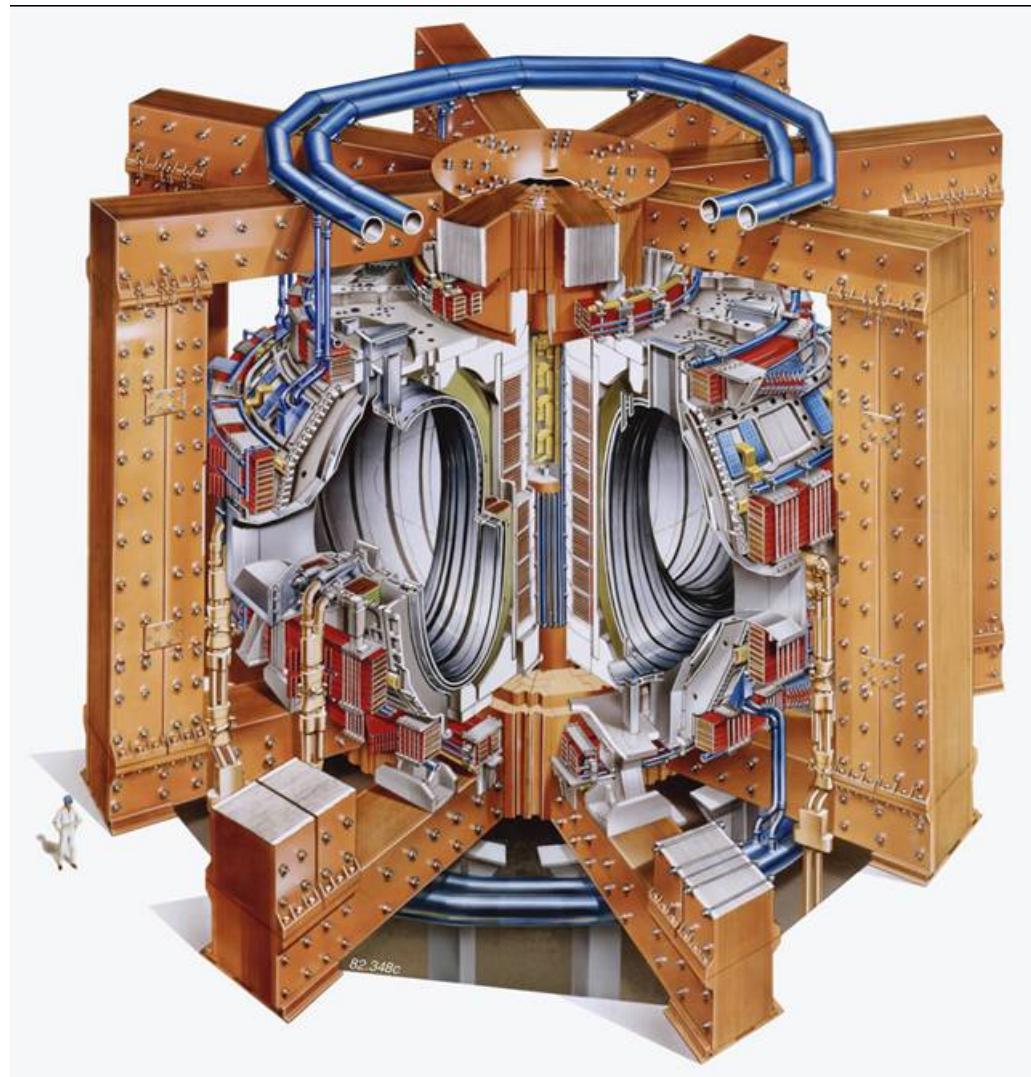
Princip rada inercijalne fuzije



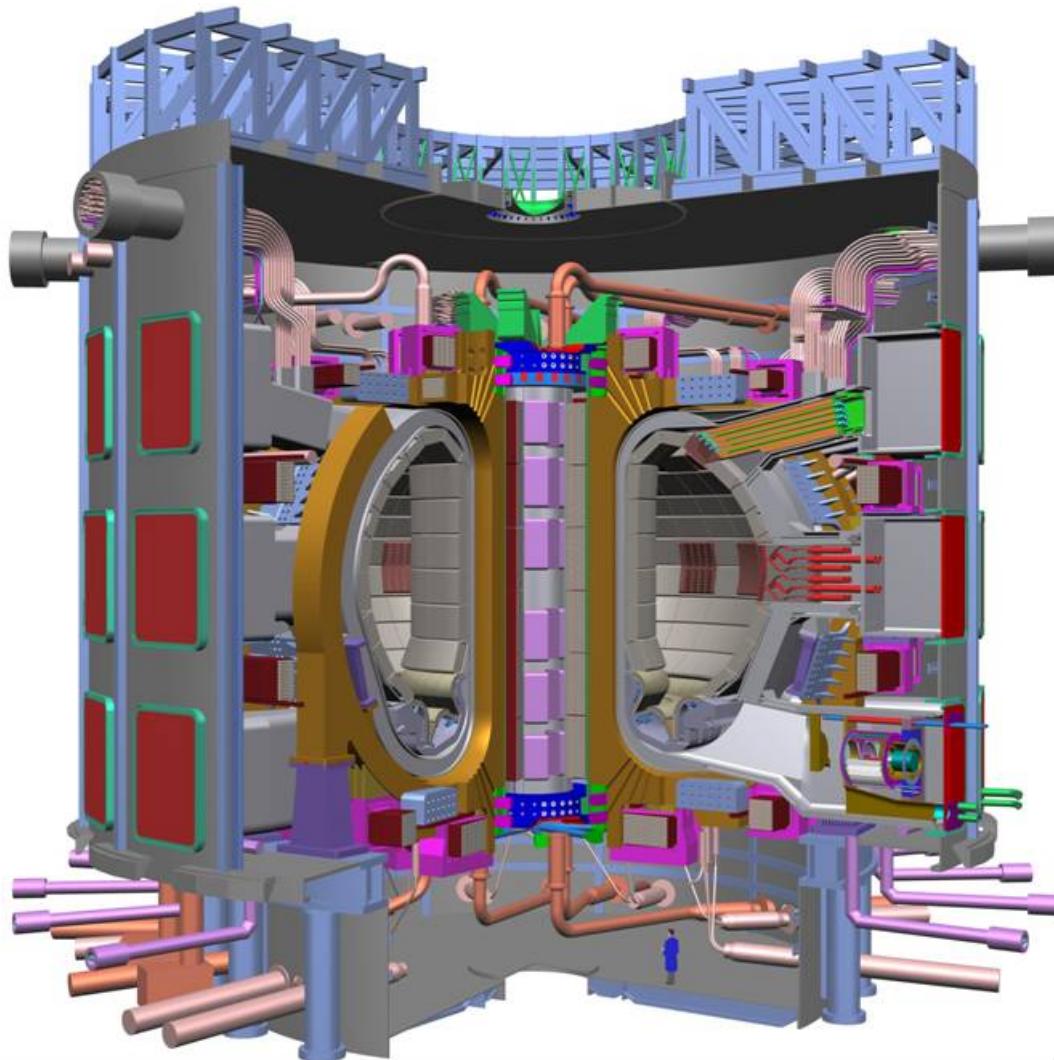
Indirektno i direktno obasjavanje mete laserom i meta za snop teških iona



JET (Joint European Torus)

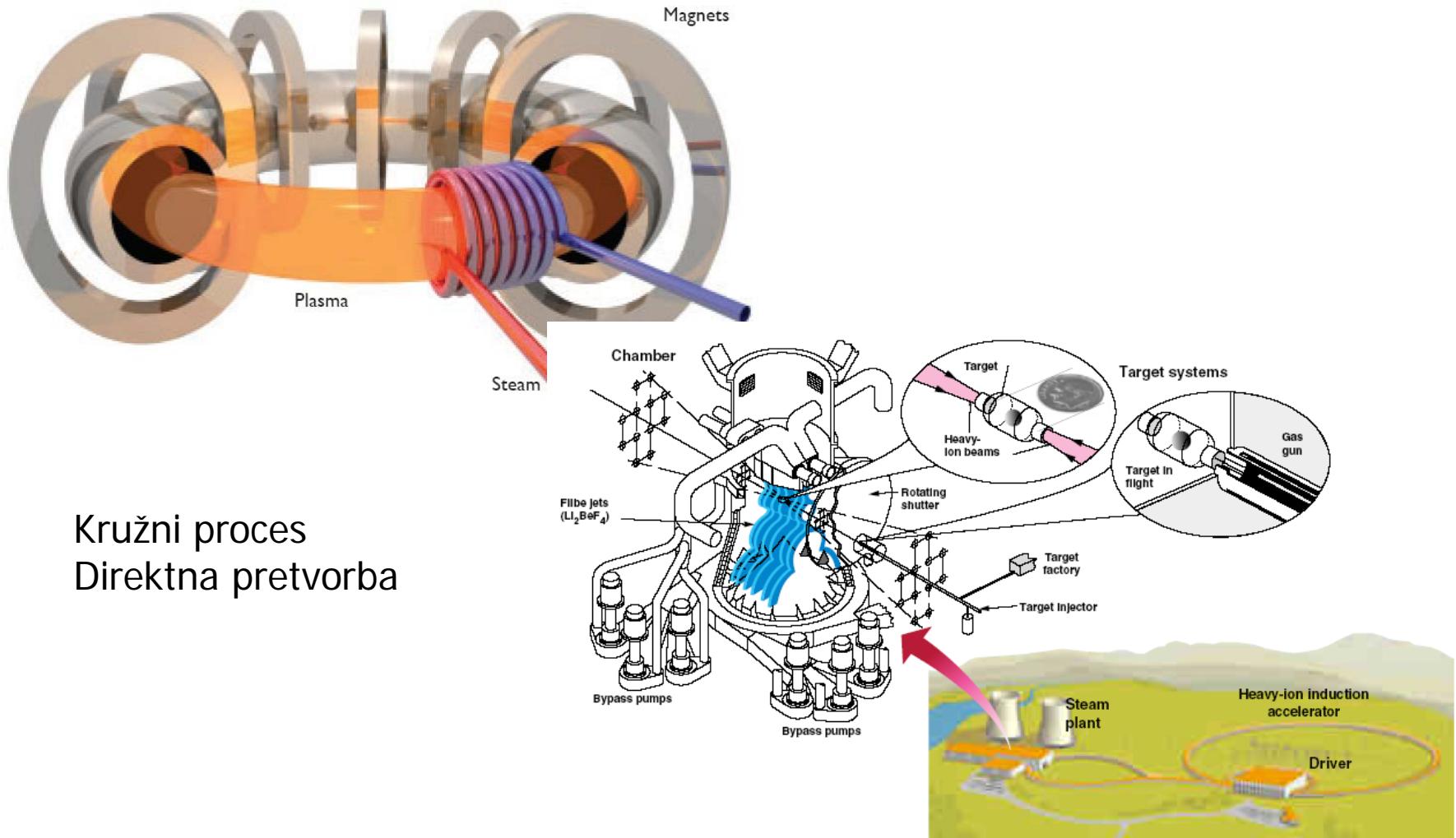


ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)



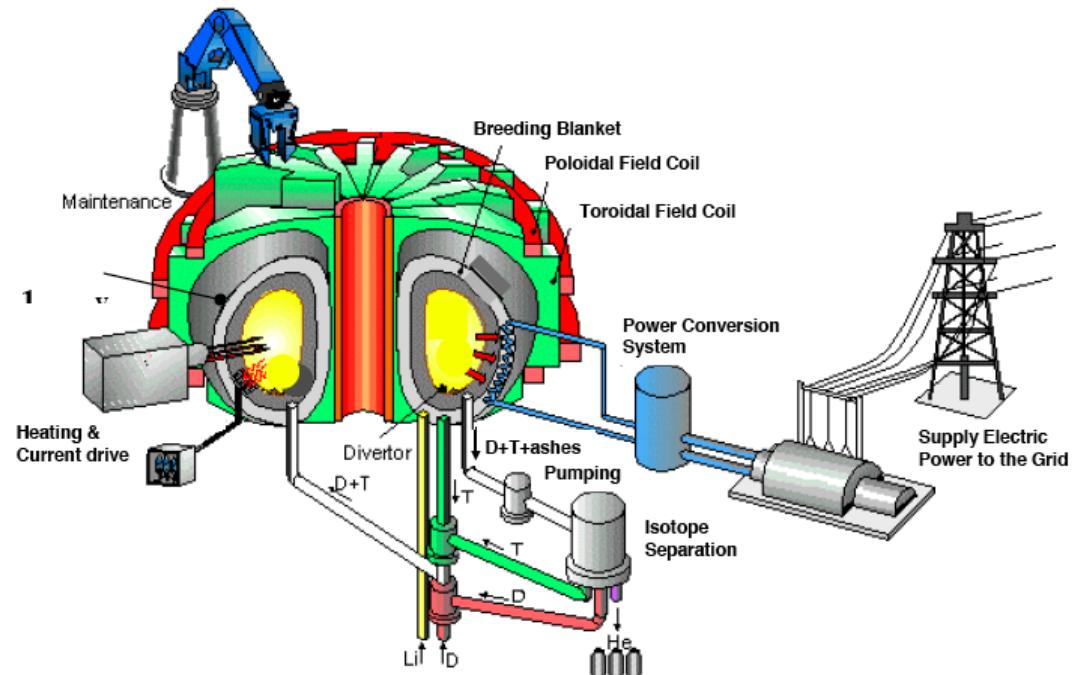
Fusion power	500 MW
Heat flux at 1 st wall	0.57 MW/m ²
Confinement time	≥ 300 s
Plasma radius (torus)	6.2 m
Plasma radius (cross)	2.0 m
Plasma current (ind)	15 MA
Toroidal field at 6.2 m	5.3 T
Plasma volume	837 m ³
Plasma area	678 m ²

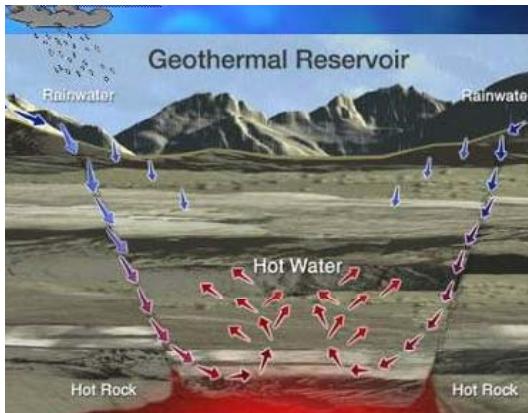
Fuzijska elektrana, tip pretvorbe?



Konceptualna studija fuzijske NE

- Nastavak ITER projekta
- Definirati parametre fuzijske elektrane i potrebnii razvoj
- Ocijeniti sigurnost i utjecaj na okoliš
- Ocijeniti ekonomski aspekte projekta
- Posebni projekt za tokamak a posebni za inercijalnu fuziju





Geotermalna energija

Korištenje podzemne topl. energije za proizvodnju el. energije i grijanje

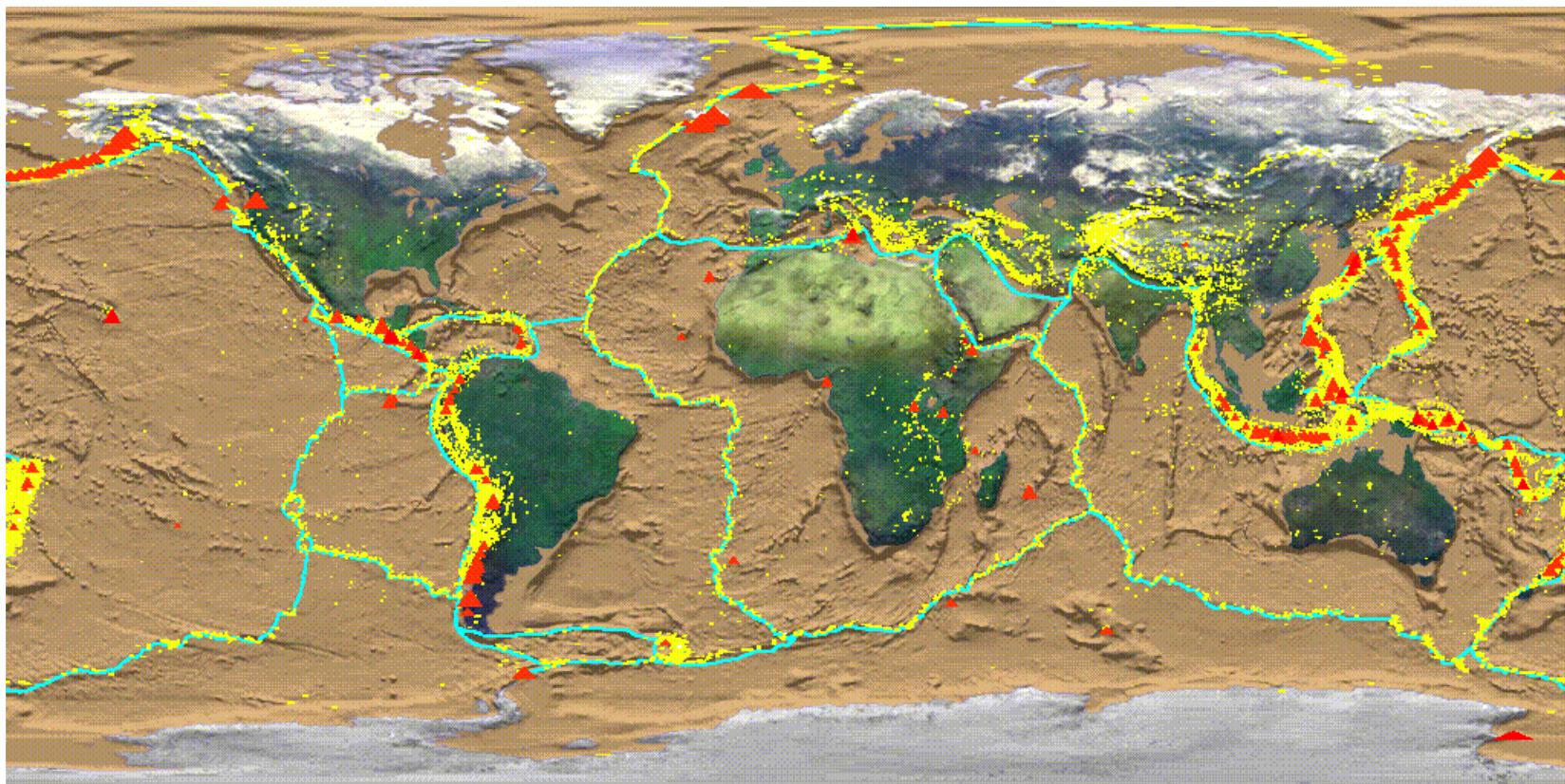
Energijske tehnologije

FER 2013.

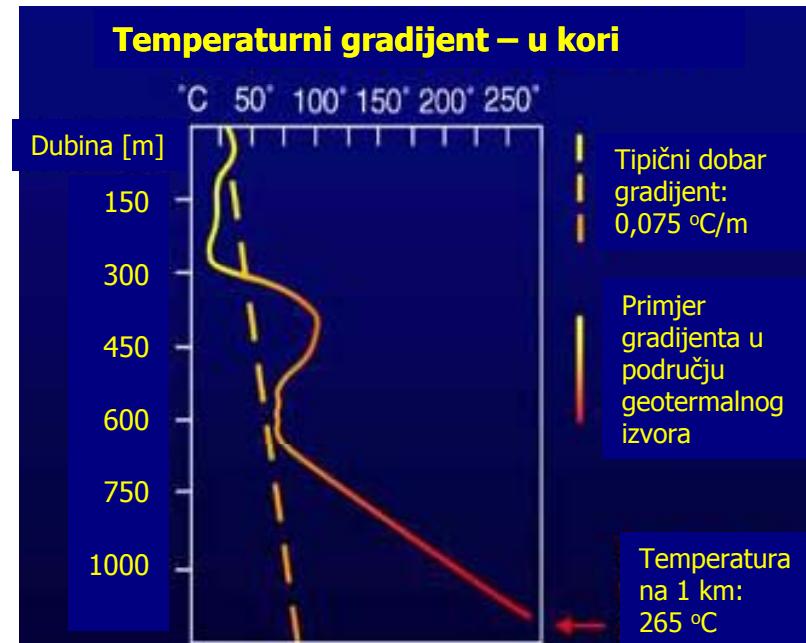
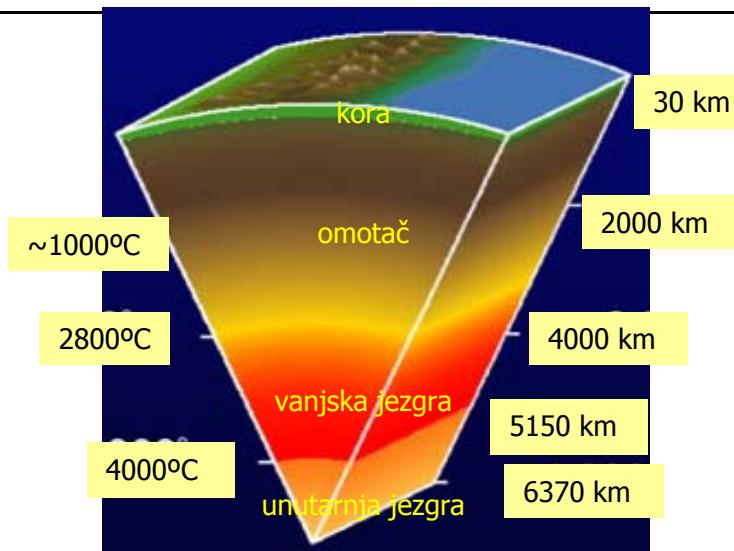


Sadržaj

- Porijeklo
- Potencijal
- Korištenje:
 - Grijanje
 - Proizvodnja el. en.
 - Toplinske pumpe



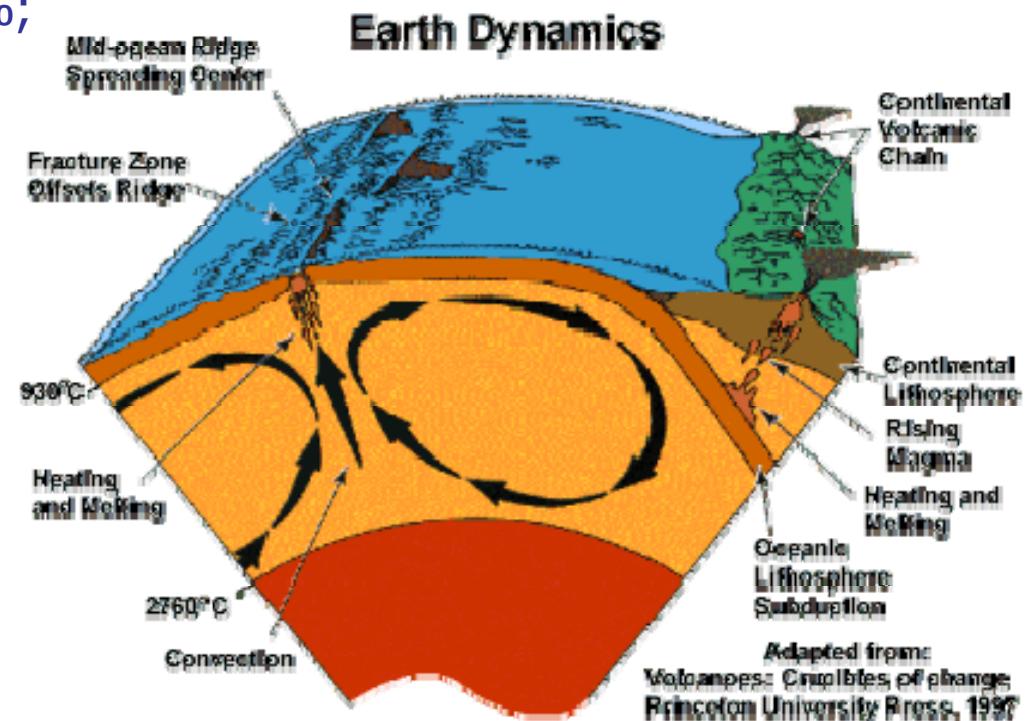
Temperature u Zemlji



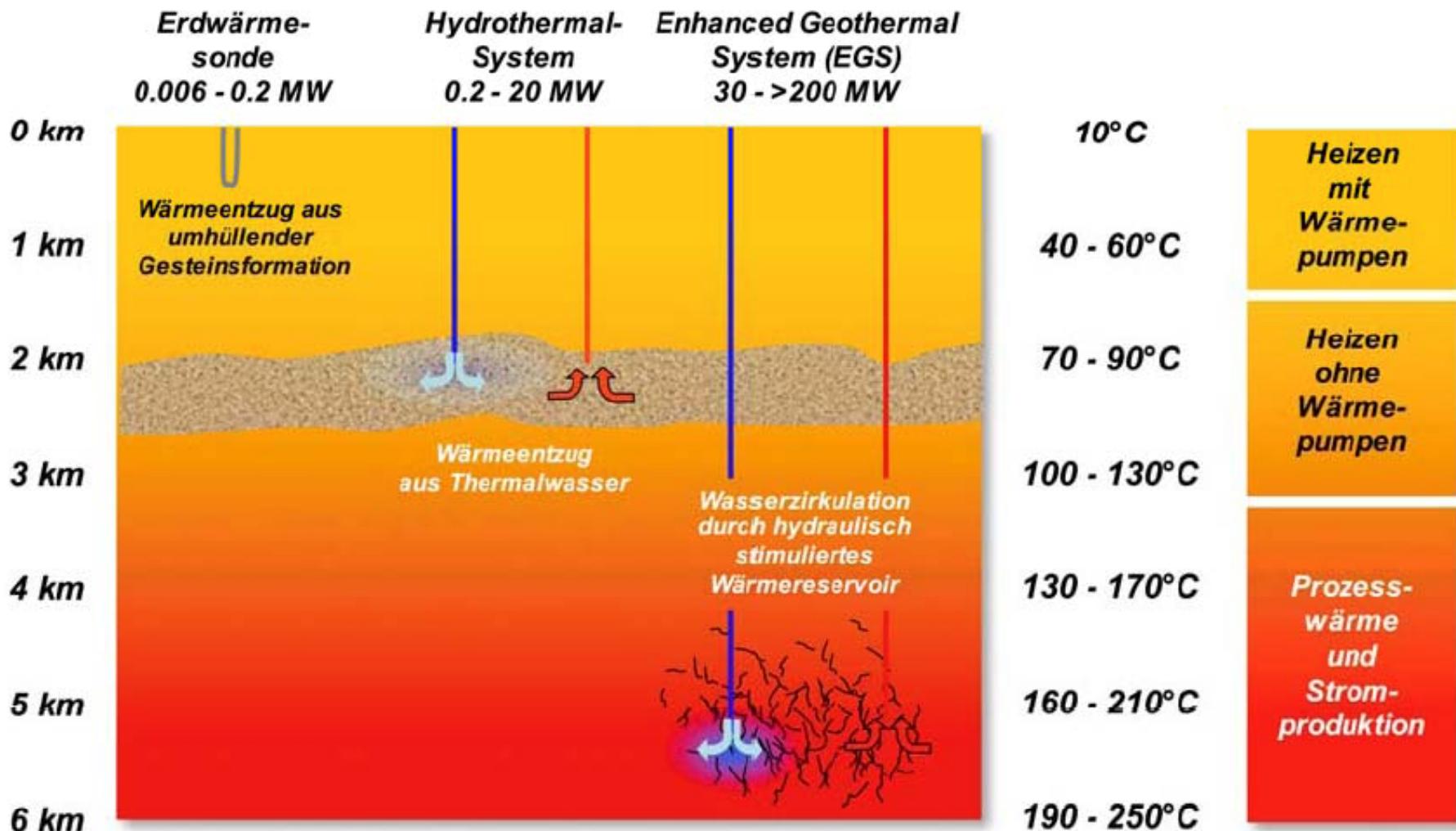
Geotermalna energija je energija sadržana u formi topline (UKE) ispod površine zemlje

Unutrašnja kalorička energija Zemlje

- Enormna količina energije
 - Samo mali dio dostupan
- Na površini $0,06 \text{ W/m}^2$
 - Izvorna toplina i drugi procesi (~60%)
 - Radioaktivni raspad (~40%; $\text{U}_{235,238}$, Th_{232} , K_{40})
 - Površina za 100W?
- Litosfera: kondukcija
 - prijelaz topline bez pomicanja materije
- Omotač: konvekcija
 - prijenos topline gibanjem materije (nema radioaktivnosti)
- Izvor za korištenje:
 - Vruće suhe stijene
 - Voda na velikim dubinama i pod velikim tlakom
 - Voda/para na manjim dubinama



Klasifikacija geotermalnih izvora



Dobri i nedostupni izvori

Vruće suhe stijene

- Dubina i temperatura:
 - 2,5 do 6 km
 - od 150 do 300 °C
- Najveći i najteži izvor za korištenje
 - Stijene slabo vode toplinu
 - Potrebno je izlomiti stijene i dovesti vodu
 - Eksplozije (nuklearne!?)
 - Voda pod tlakom
- Istražuje se

Voda na velikoj dubini i velikom tlaku

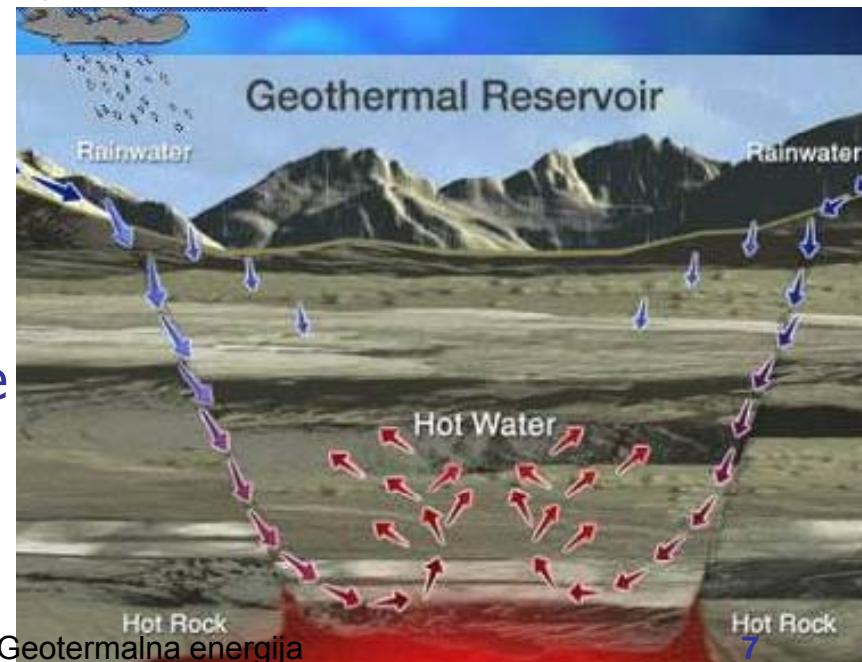
- Dubina i temperatura:
 - 2,5 do 9 km
 - oko 160 °C i veliki tlak (>1000 bar)
- Ostale karakteristike
 - Velika slanost (4-10%)
 - Zasićeno prirodnim plinom
 - Najviše metana CH₄
 - Oko 5x više plina volumno
 - Potencijal za kombinirano korištenje
- Istražuje se

Voda/para na manjim tlakovima i dubinama

- Dubina, temperature i tlakovi:
 - do 5 km, do preko 300 °C, do 8 bara
- Parni izvori su najpoželjniji ali malobrojni
 - Para sama izlazi van iz bušotine (oko 200 °C)
 - Geysers (SAD) i Larderello (Italija)
- Vodeni izvori se najčešće koriste
 - Voda izlazi sama ili se pumpa
 - Velike koncentracije otopina (i preko 25000 ppm)
- Komercijalno se koriste
 - ne zahtijevaju posebno napredne tehnologije za bušenje i eksploraciju

ppm – *parts per million* (dijelova u milijun)

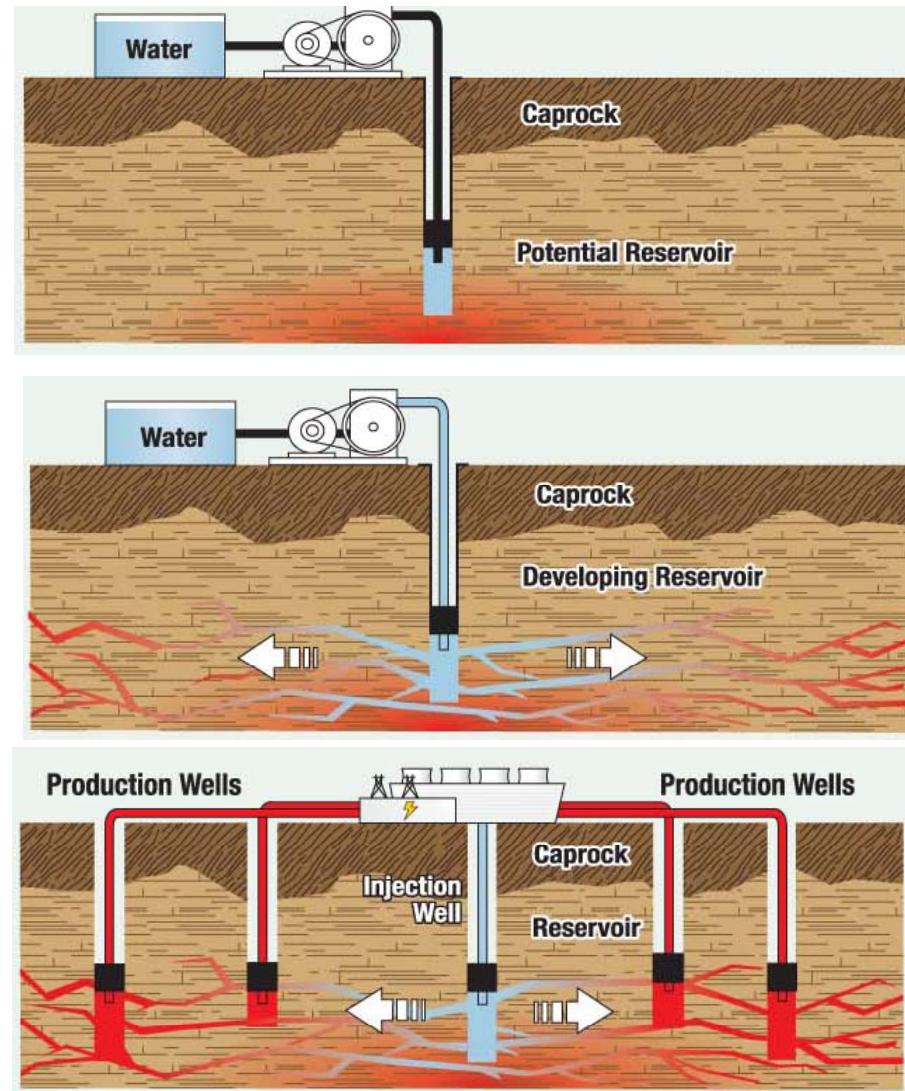
Energijske tehnologije: Geotermalna energija



Napredni geotermalni sustav (EGS)

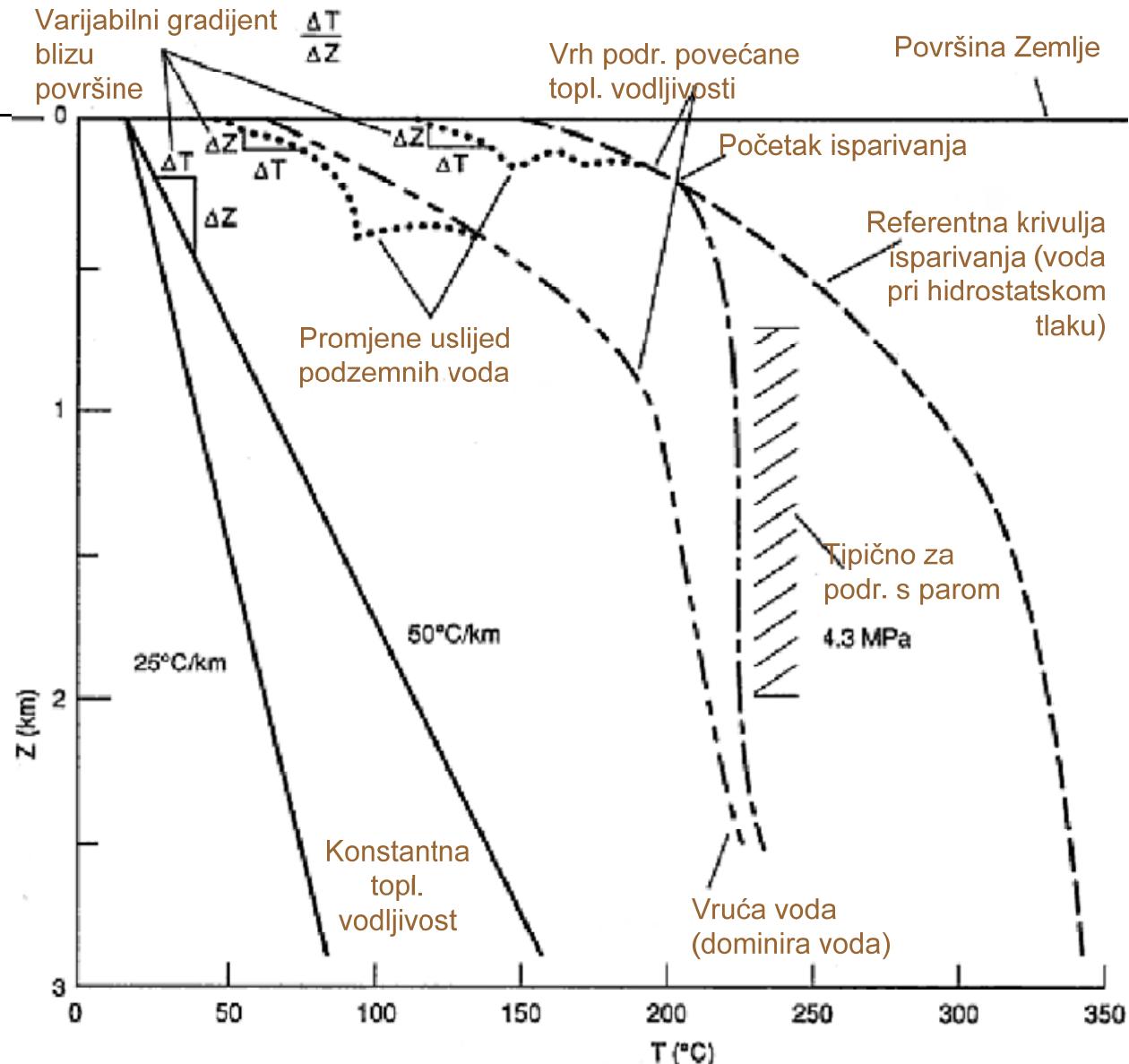
- Koristi energiju suhih stijena
- Veliki energetski potencijal
- Velika dubina, 3-6 km
- Ograničena vodljivost stijena
- Ispod je uobičajenog nivoa podzemnih voda
- Inicijalna bušotina koristi vodu pod tlakom (>160 bar) za lomljenje stijena
- Dodatne proizvodne bušotine

- Za $T=200$ C binarni ciklus ili jednostruko separiranje
- Za $T=250$ C dvostruko separiranje pare
- Za $T=400$ C jednostruka ili višestruka ekspanzija

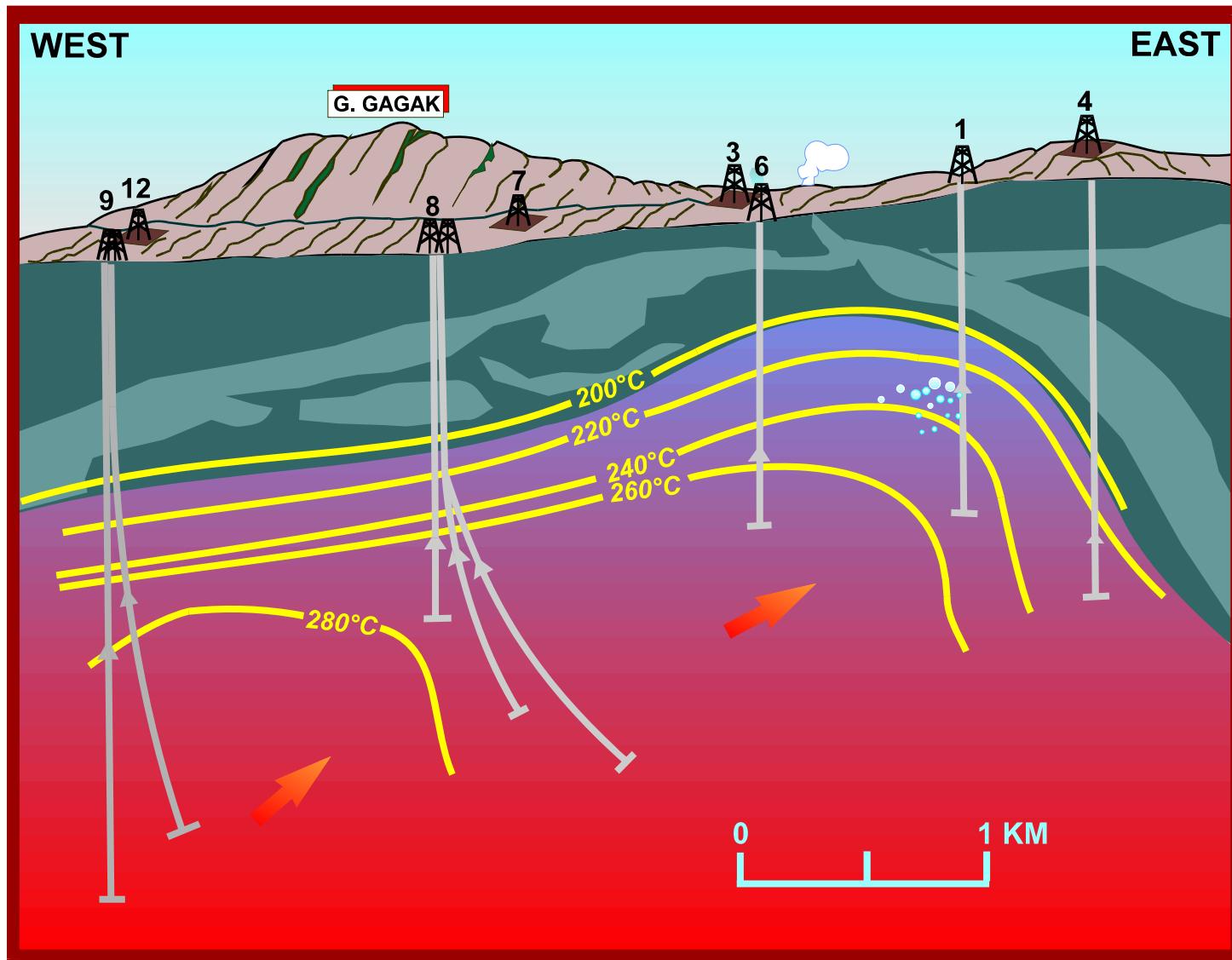


Porast tempera- ture u Zemlji

Geotermalne prilike i vodljivost tla određuju gradijent rasta temperature u tlu.

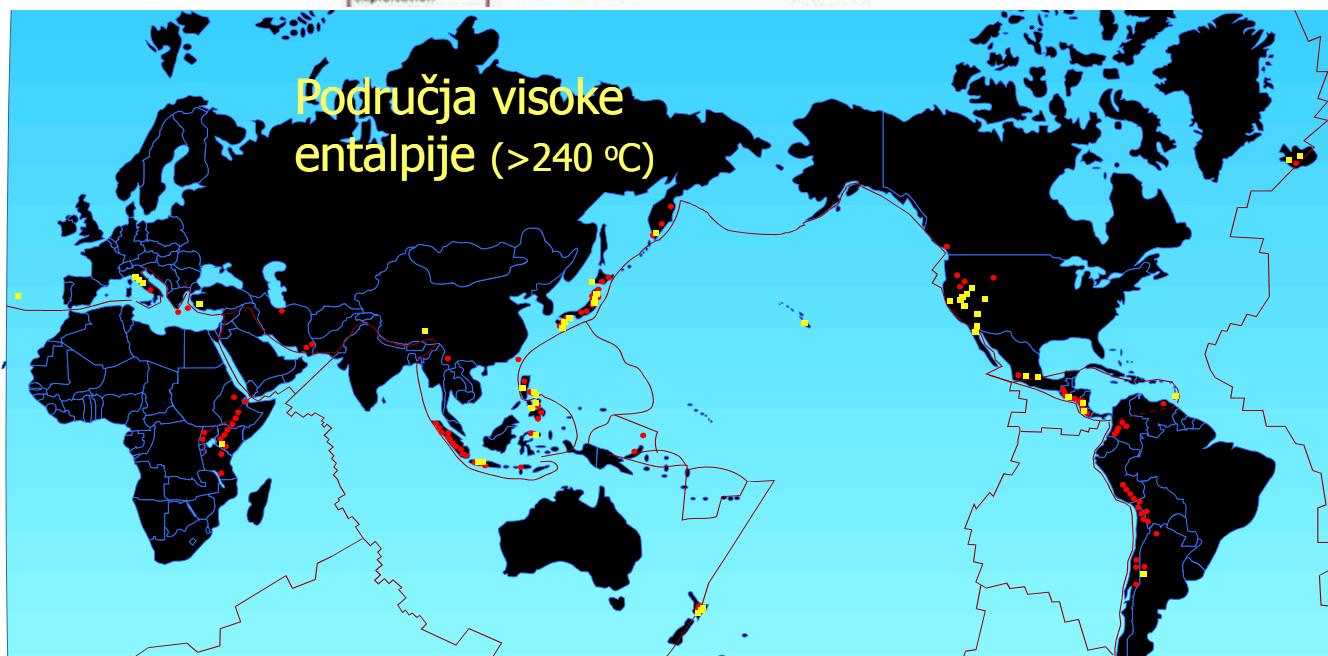
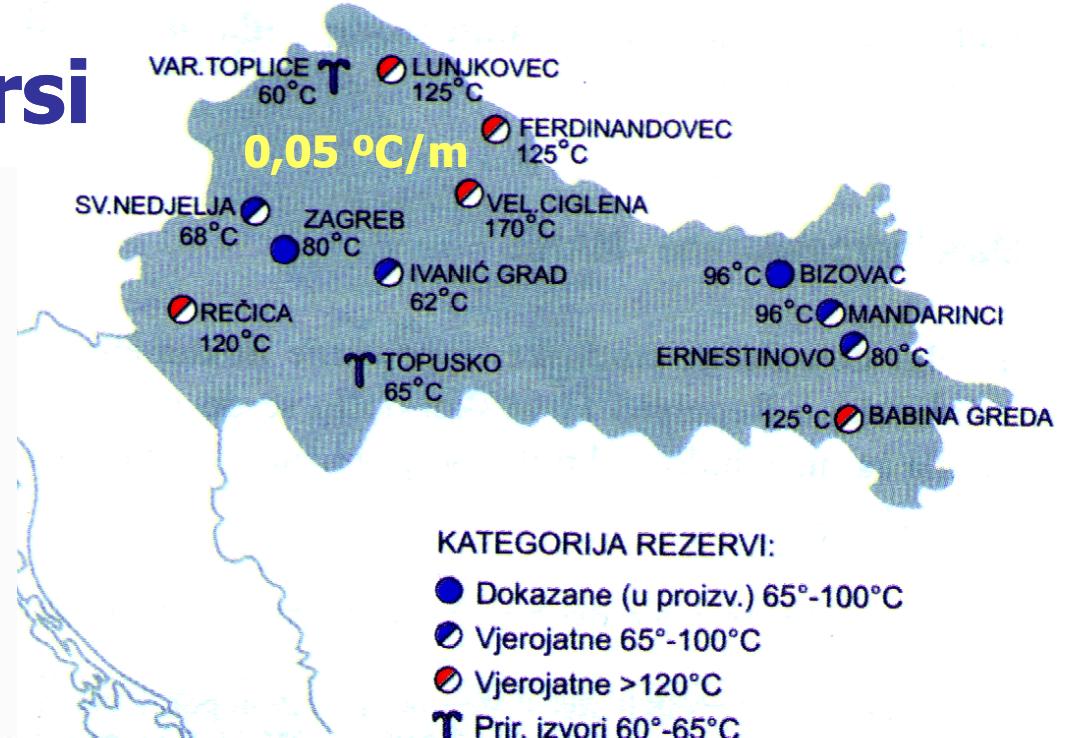
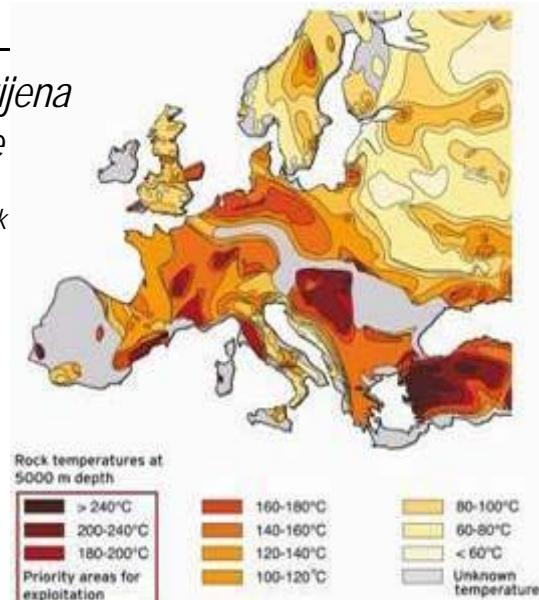


Presjek jednog geotermalnog nalazišta - Awibengkok, Indonezija



Geotermalni resursi

Temperatura stijena
na 5 km dubine
(EEIG "Heat Mining",
European Hot Dry Rock
Project)"



INA od 1976. napravila
više od 50 dubokih
bušenja.

Temperaturni gradijent
ide i do $0,07^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

Temperature u rasponu
od $40 - 170^{\circ}\text{C}$.

Procjene:

$\sim 50 \text{ MW}_e$

$\sim 800 \text{ MW}_t$

Direktno korištenje



A fish farm in Colorado



Greenhouse in Colorado

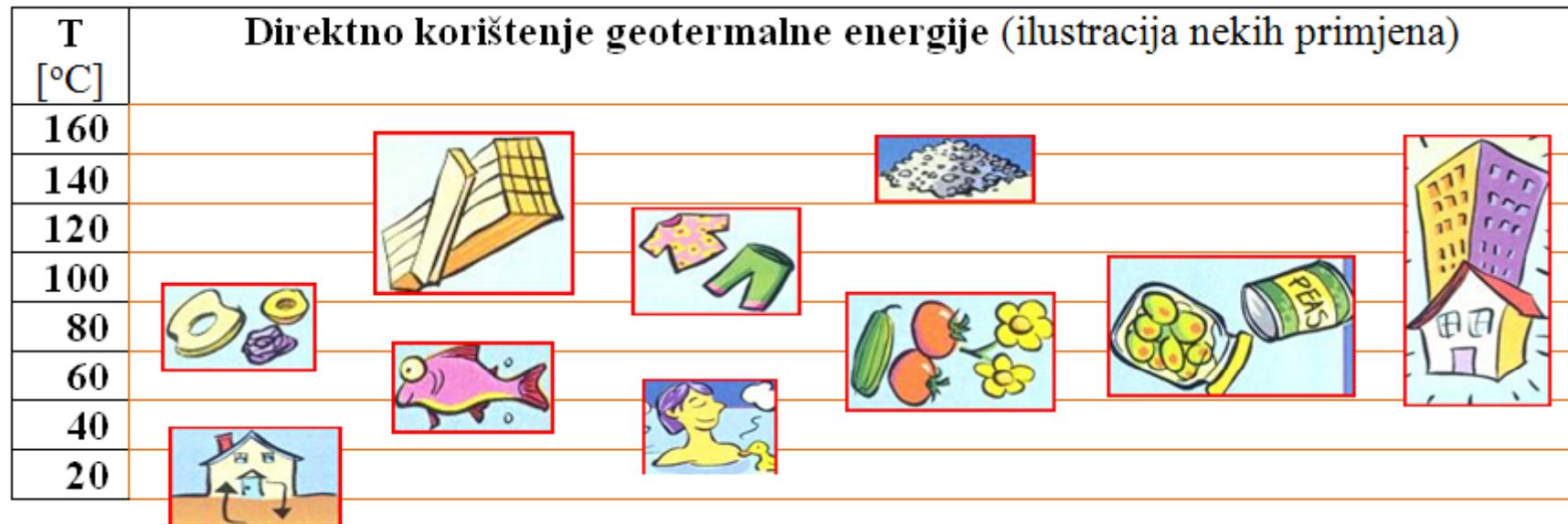


Crop dehydration plant in Nevada.



Najstariji način korištenja geotermalne energije:

- Samostalno ili
- Komplementarno proizvodnji el. en.



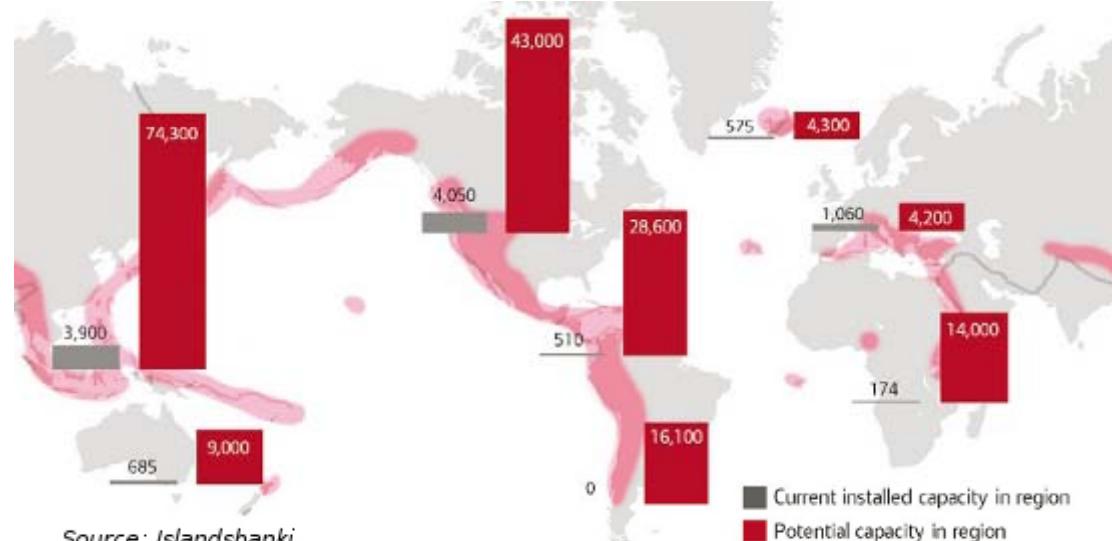
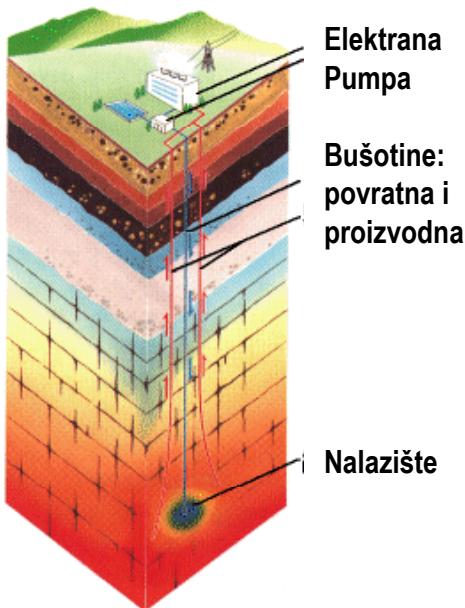
Direktno korištenje geotermalne energije

	Snaga MWt			Energija TW/god.			Faktor opterećenja		
	2005	2000	1995	2005	2000	1995	2005	2000	1995
Toplinske pumpe	15 723	5 275	1 854	86 673	23 275	14 617	0.17	0.14	0.25
Direktno grijanje	4 158	3 263	2 579	52 868	42 926	38 230	0.40	0.42	0.47
Staklenici	1 348	1 246	1 085	19 607	17 864	15 742	0.46	0.45	0.46
Akvakultura	616	605	1 097	10 969	11 733	13 493	0.56	0.61	0.39
Poljoprivreda - sušenje	157	74	67	2 013	1 038	1 124	0.41	0.44	0.53
Industrija	489	474	544	11 068	10 220	10 120	0.72	0.68	0.59
Kupanje	4 911	3 957	1 085	75 289	79 546	15 742	0.49	0.64	0.46
Hlađenje/topljenje snijega	338	114	115	1 885	1 063	1 124	0.18	0.30	0.31
Ostalo	86	137	238	1 045	3 034	2 249	0.39	0.70	0.30
Ukupno	27 825	15 145	8 664	261 418	190 699	112 441	0.30	0.40	0.41

Source: Lund et al., 2005.



Geotermalna električna energija



Geothermal Electricity and Combined Heat & Power, EGEC, European Geothermal Energy Council 2009.

$$P_{2010} = 10 \text{ GW}_e$$

$$W = 60 \text{ TWh}_e$$

Porast od $\sim 7,5\%/\text{god.}$

Potencijal:

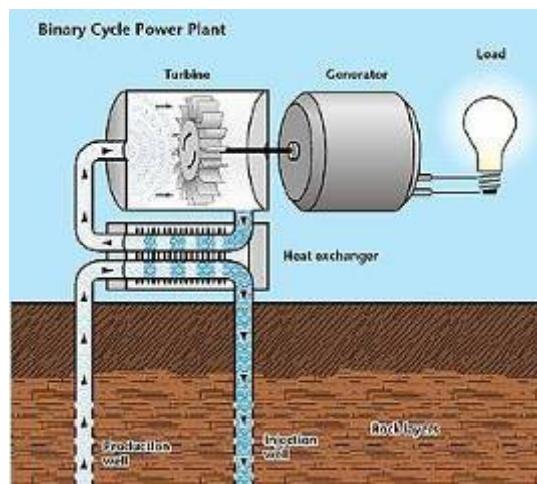
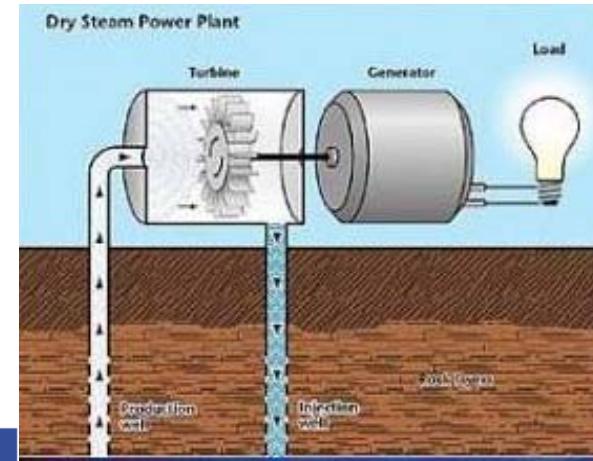
- 70 GW s današnjom tehnologijom
- Dvostruko više s naprednim tehnologijama
- Ukupno se procjenjuje na nekoliko tisuća GW



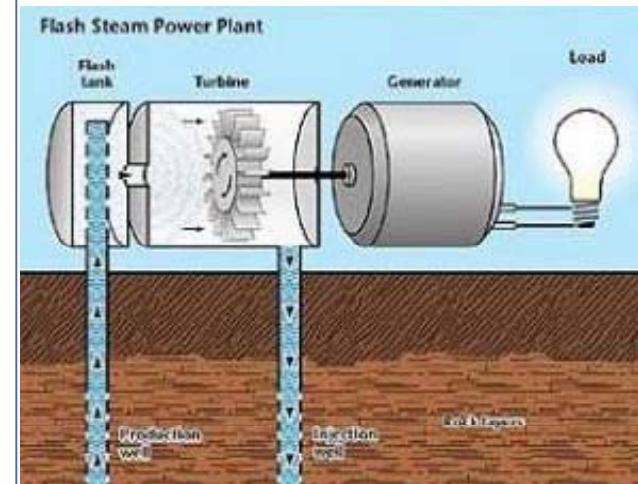
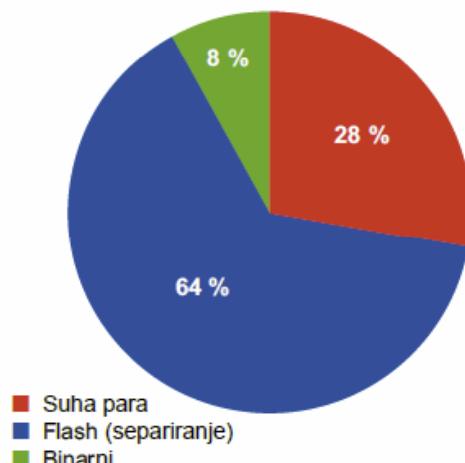
First Geothermal Power Plant, 1904, Larderello, Italy

Geotermalne elektrane

- Elektrane na suhu paru
- Elektrane sa separiranjem pare “Flash steam”
- Elektrane s binarnim ciklusom



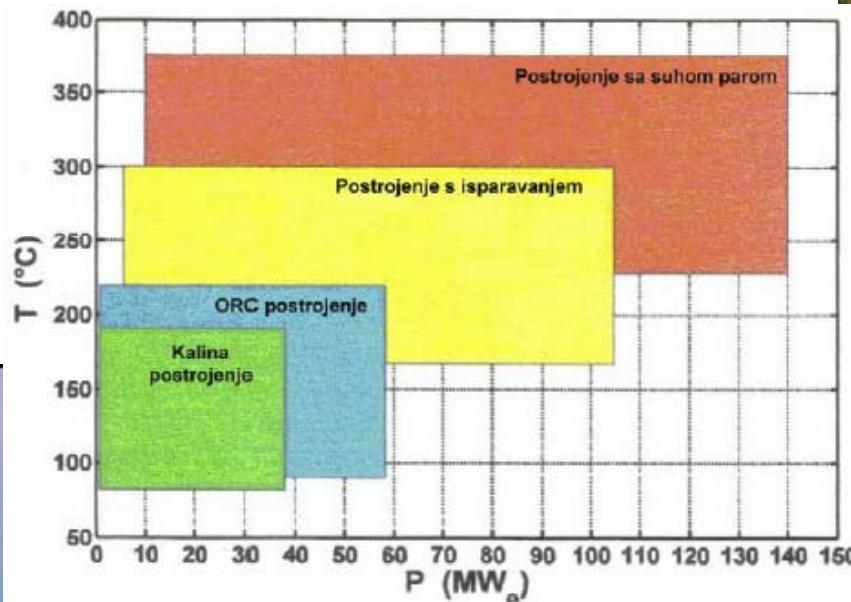
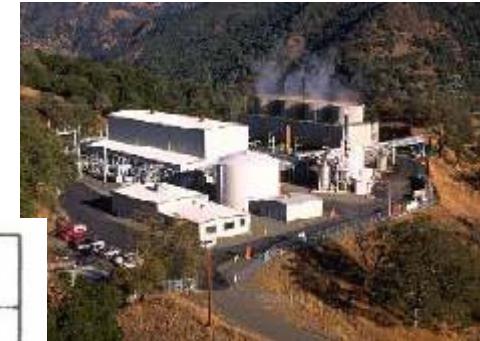
Geotermalna energija u svijetu
udio korištenih elektrana - 2009



Geothermal Electricity and Combined Heat & Power,
EGEC, European Geothermal Energy Council 2009.

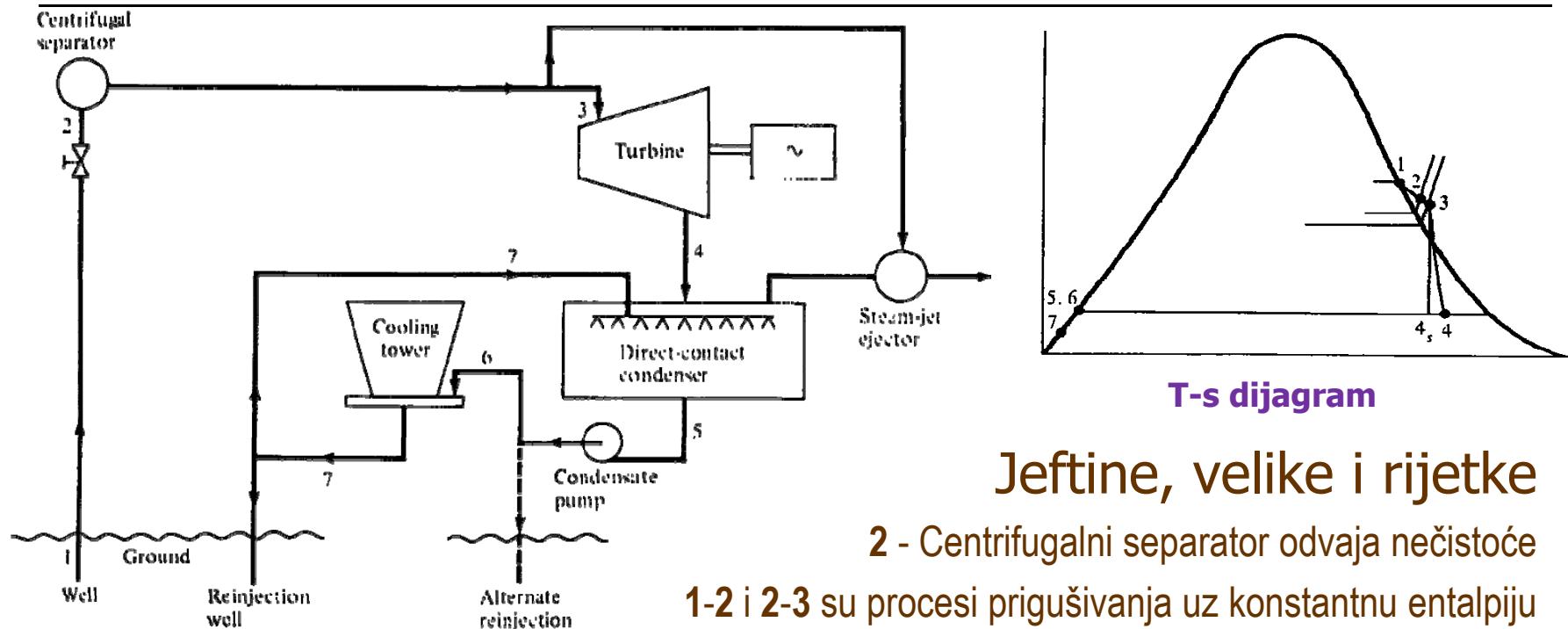
Geotermalne elektrane -

AIDLIN – dvije jedinice na suhu paru, 20 MWe
Calpine, Sonoma, California, SAD



LEATHERS – dvostruko separiranje , 38 MWe
CalEnergy Operating Company
Calipatria, California, SAD

Elektrane na suhu paru



T-s dijagram

Jeftine, velike i rijetke

2 - Centrifugalni separator odvaja nečistoće

1-2 i 2-3 su procesi prigušivanja uz konstantnu entalpiju

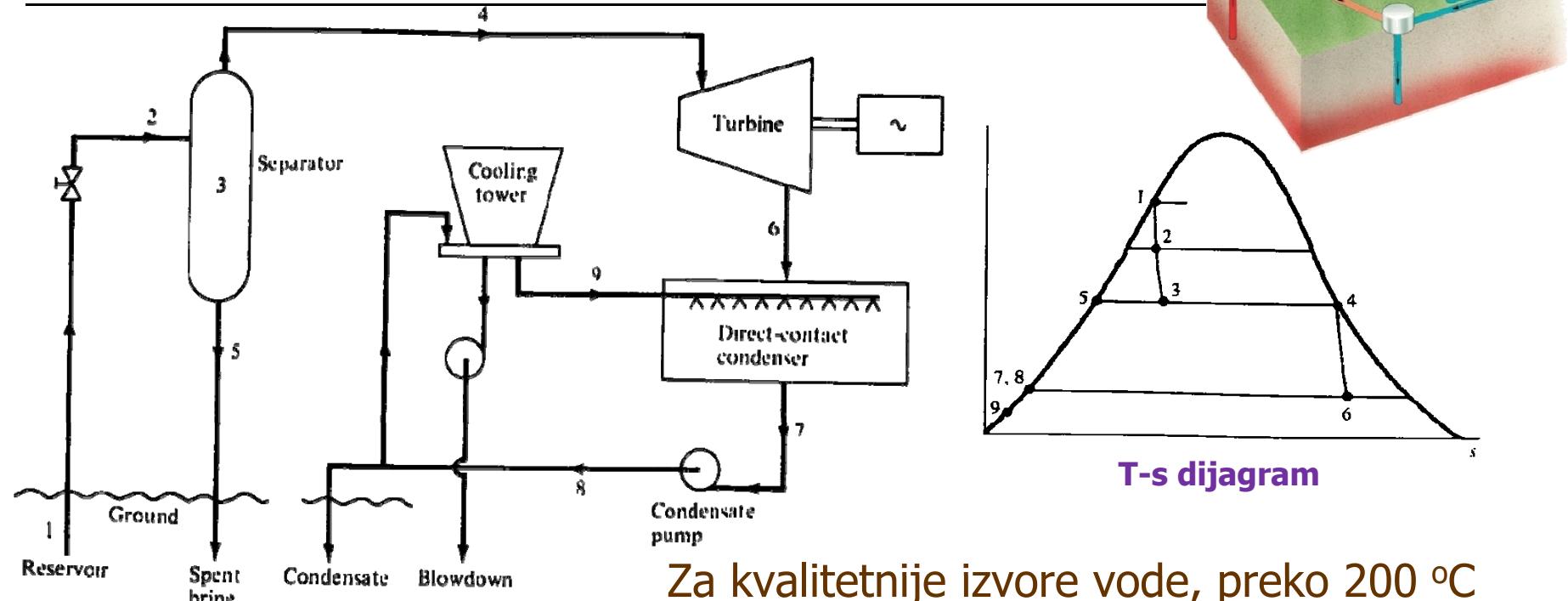
4 - izlaz iz turbine se miješa s recirkuliranim (5, 7) rashladnom vodom u kondenzatoru s direktnim kontaktom i višak se vraća u zemlju

Nekondenzibilni plinovi (CO_2 , NH_4 , H_2S) se moraju ukloniti iz kondenzatora zbog korozije i tlaka parnim ejektorom (za pogon se izdvaja dio pare).

Elektrane u pogonu (jedinice npr. 100 MW): Geysers (SAD), Larderello (Italija), Matsukawa (Japan)

Za smanjivanje potrebnog rashladnog protoka tlak u kondenzatoru je visok (~135 kPa) što uz male temperature dodatno umanjuje termički stupanj djelovanja.

Elektrane sa separiranjem pare (*Flash steam*)



Za kvalitetnije izvore vode, preko 200 °C

Salinitet i do 280000 ppm.

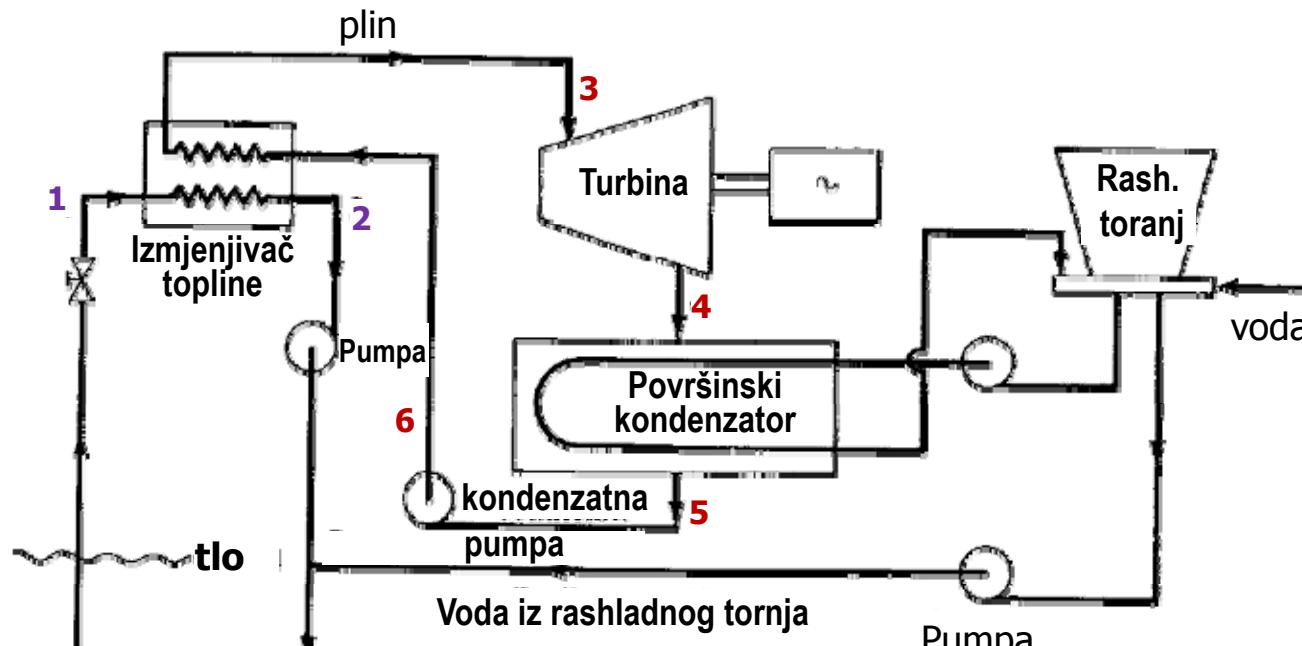
1-234-5 su procesi prigušivanja uz konstantnu entalpiju

Problemi: Znatno veći potrebni protoci (utjecaj na okolno zemljишte te dimenzije i degradiranje postrojenja zbog dodatnih sastojaka)

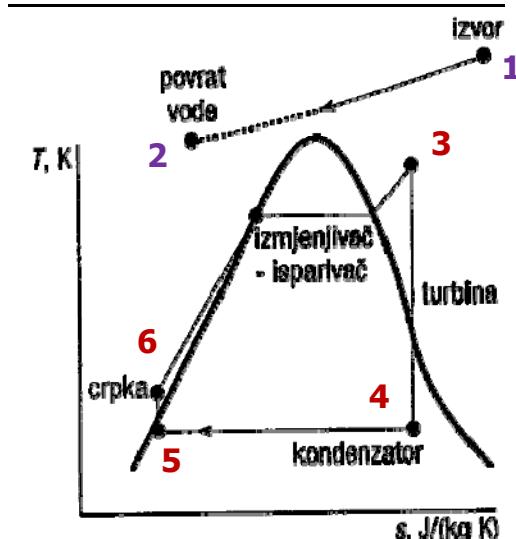
Elektrane u pogonu (jedinice od 10-50 MW): Italija, Japan, Novi Zeland, Meksiko, SAD

Termički stupanj djelovanja još manji zbog niske temperature i niske kvalitete pare.

Elektrane s binarnim ciklusom



Proizvodna i povratna bušotina



T-s dijagram

Za manje kvalitetne izvore (ispod 200 °C)

Unapređenje za veći stupanj djelovanja.

Proces se provodi kao Rankineov organski – radni fluid ima nisku temperaturu isparivanja
(izobutan C_4H_{10} , freon12, amonijak ili propan)

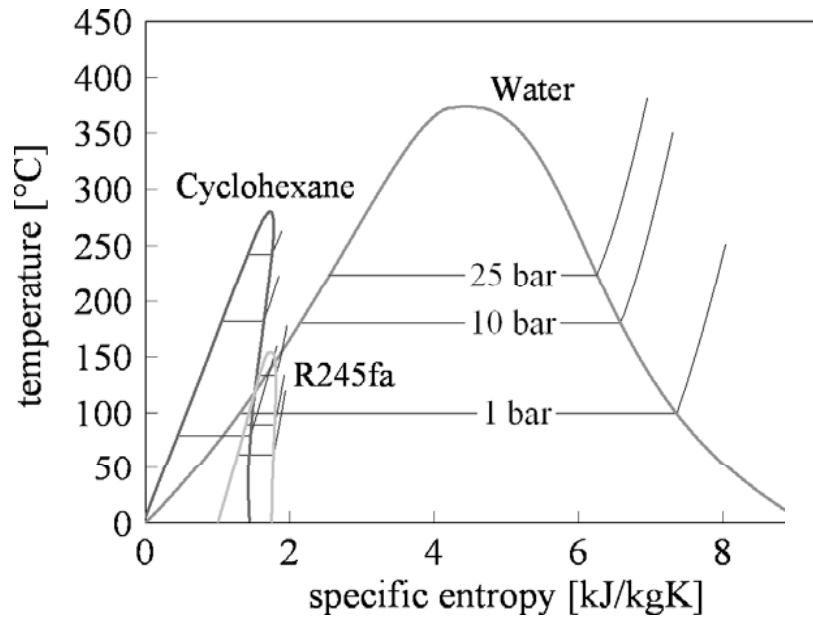
Vlastita potrošnja u elektrani je oko 35%.

Demonstracijske elektrane u pogonu (jedinice oko 10 do 50 MW) u SAD-u.

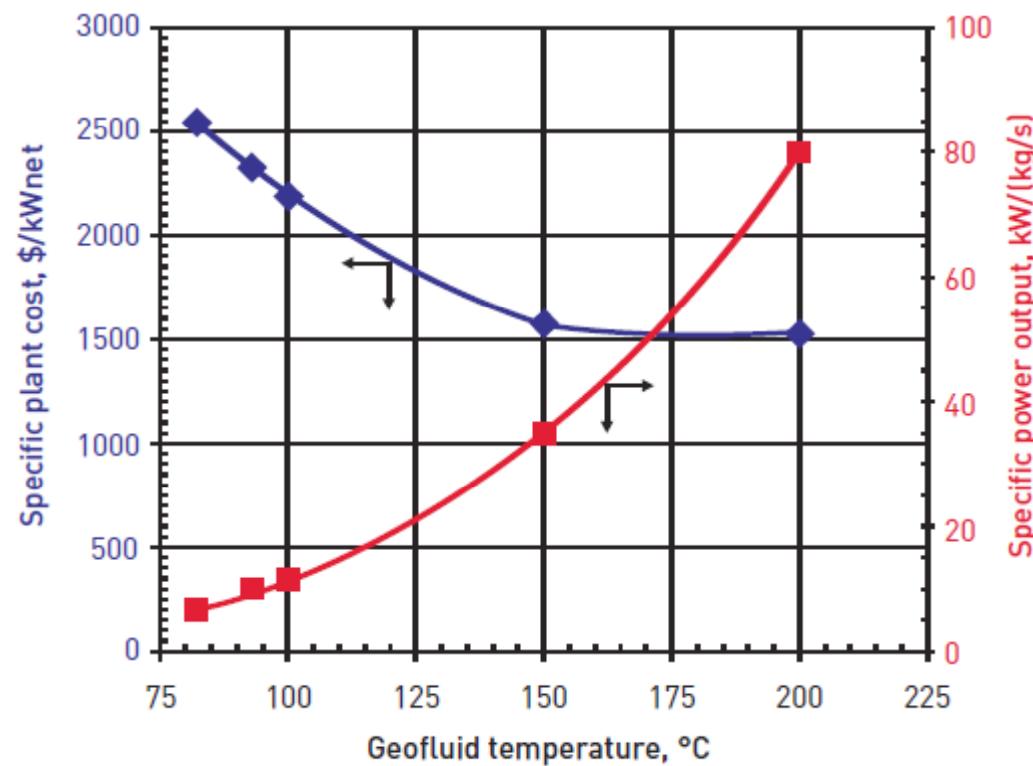
Rješenje za uvjete u HR.

Proračun za ovaj proces provodi se kao i za Rankineov s vodom, ali s parametrima radnog medija.

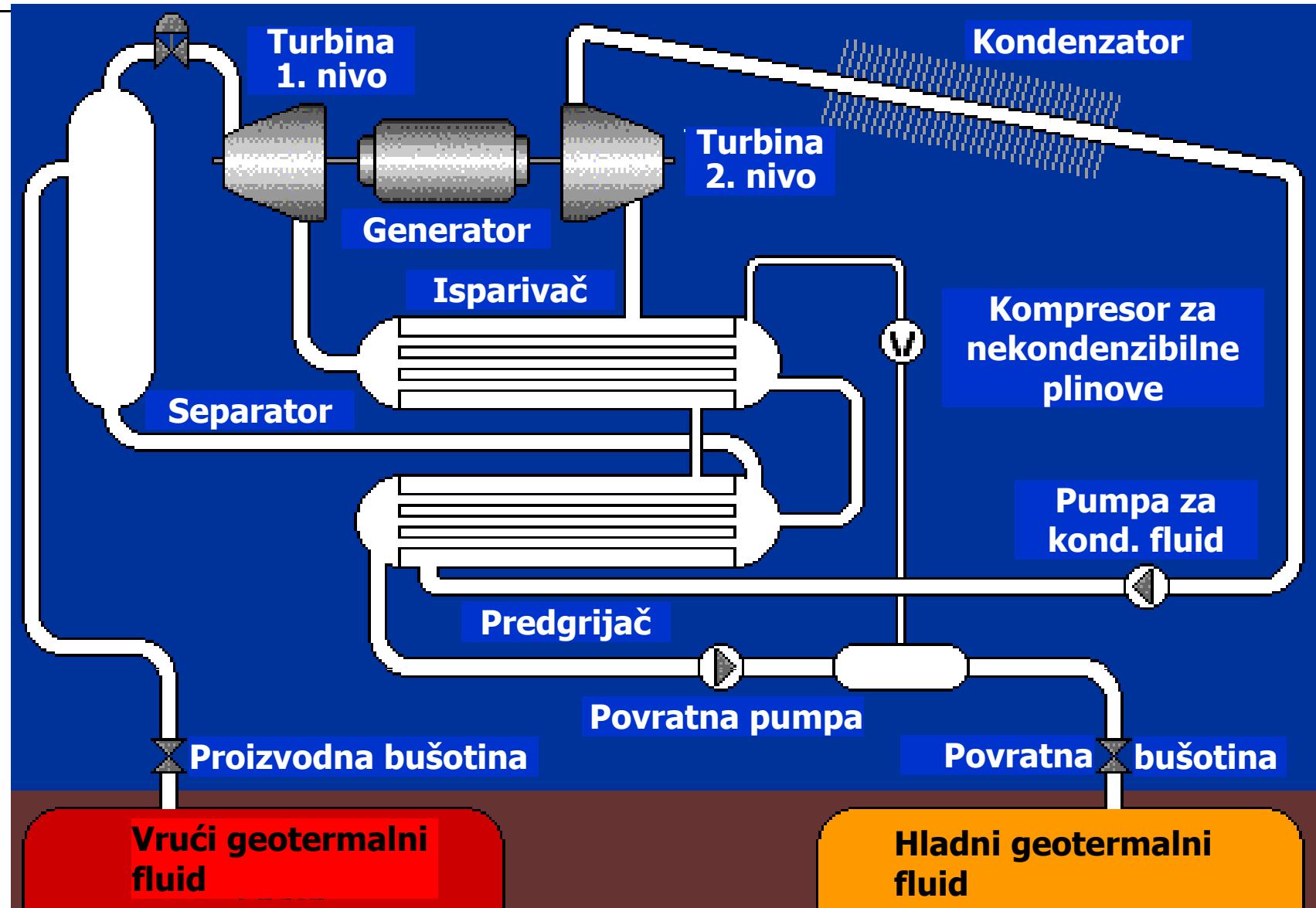
T-S dijagram za vodu, R245fa i cikloheksan



Specifična cijena i specifična snaga 1 MW binarne elektrane ovisno o temperaturi geotermalnog izvora



Elektrana sa separiranjem pare i binarnim ciklusom



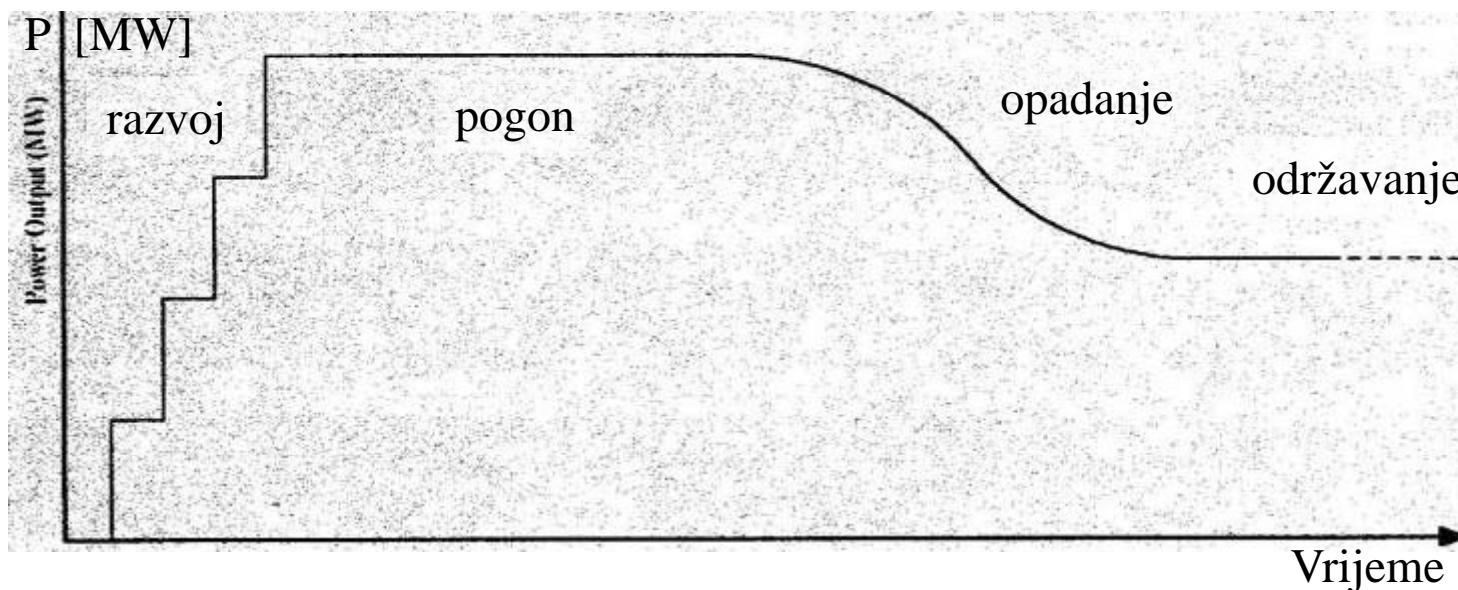
Bušenje, testiranje i korištenje izvora



- Bušotine od ~200 m do ~4 km za određivanje temp. gradijenta i karakteristika nalazišta.
- Nalazište može smanjiti toplinsku snagu nakon nekog vremena (5, 10, 15 godina) i tada treba dodati bušotinu ili koristiti se manjim kapacitetom.
- Planirani radni vijek je oko 30 godina.



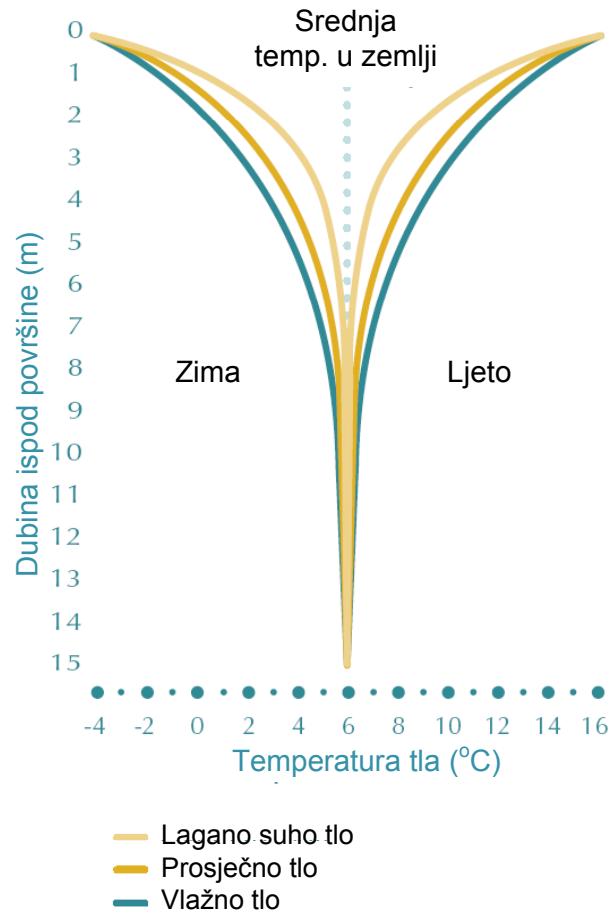
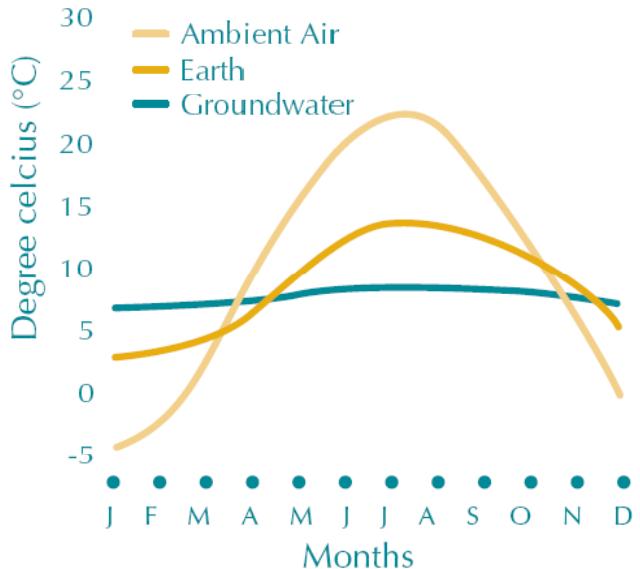
- Moderne metode bušenja smanjuju troškove: jedna široka (>60 cm) rupa oko 500 m i onda dvije kilometarske na razne strane za uzimanje i povrat vode



Utjecaj na okoliš i recikliranje

- Agresivnost i velika koncentracija otopljenoga u vodi otežavaju rad postrojenja i smanjuju životni vijek
- Rješenje je u izdvajanju i korištenju:
 - H_2S za proizvodnju sumporne kiseline
 - Metali poput cinka kao sirovina
 - Različite naslage za građevinarstvo
- Utjecaj na okoliš se može minimizirati vraćanjem svega u buštinu uz pozornost da to ne umanji prinos

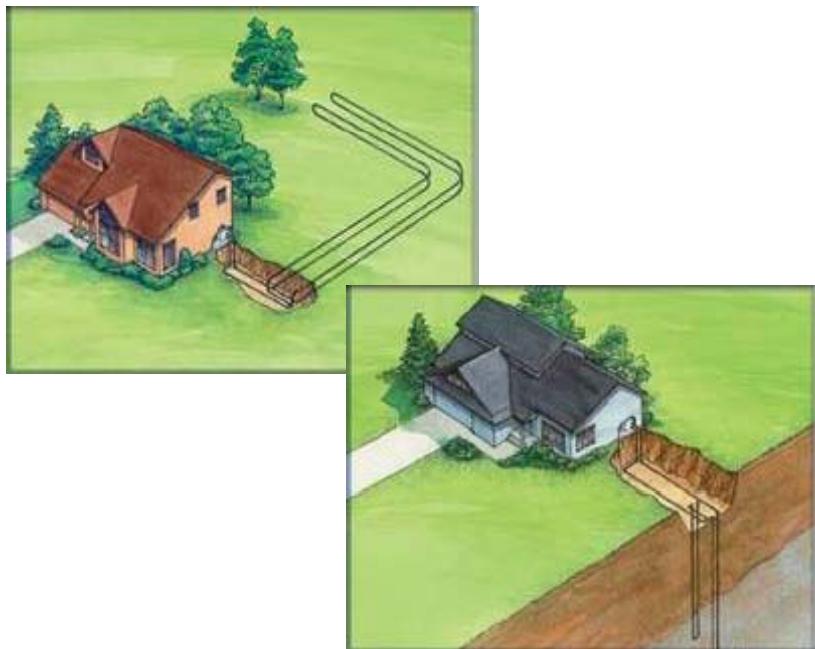
Toplinska pumpa: grijanje i hlađenje



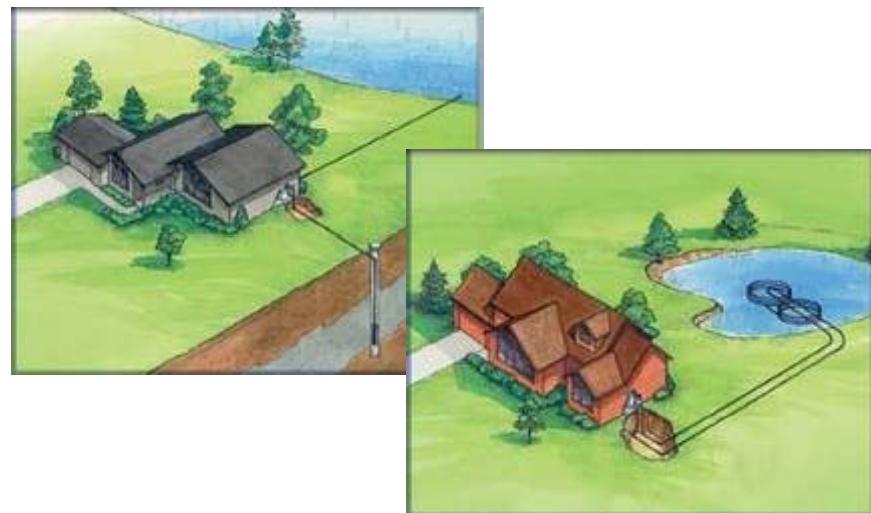
- Temperatura tla
 - konstantna od Sunčevog zračenje i zbog slabe toplinske vodljivosti tla
 - konstantnija kroz godinu na većoj dubini i kod manje vlažnog tla
 - Time je relativna razlika prema temperaturi okolice razmjerno velika i konstantna tijekom većeg dijela godine
 - Pogodno za grijanje toplinskog pumpom i
 - Hlađenje klima uređajima

Razne vrste sustava toplinske pumpe

Horizontalni kružni: zauzima najviše zemlje, jeftinije, male zgrade, ali temperatura dosta varira



Otvoreni: jeftinije, problemi s vodom



Vertikalni: stjenovito tlo, skuplji, treba manje zemlje, visoka efikasnost

Ovisno o izvedbi faktor preobrazbe iznosi oko 50% Carnotovog:

$$f.p. = q_{dov}/w_t$$

Praktično se postiže faktor preobrazbe od 3 do 5.

Ukratko

Korištenje geotermalne energije nije varijabilna i može imati opravdanje kao cjeloviti gospodarski program:

- proizvodnja el. en., komunalno grijanje, turizam i poljoprivreda.

Ekonomičnost ovisi o karakteristikama bušotine i potporama – rizik može biti veliki.

Udio GE u proizvodnji el. en. nije veliki, ali postoji potencijal za povećanje.

GE je ekološki prihvatljiv izvor uz dužnu brigu.

Tehnologija za korištenje GE je zrela sa značajnim iskustvom.

Položaj izvora GE određuje mjesto korištenja.

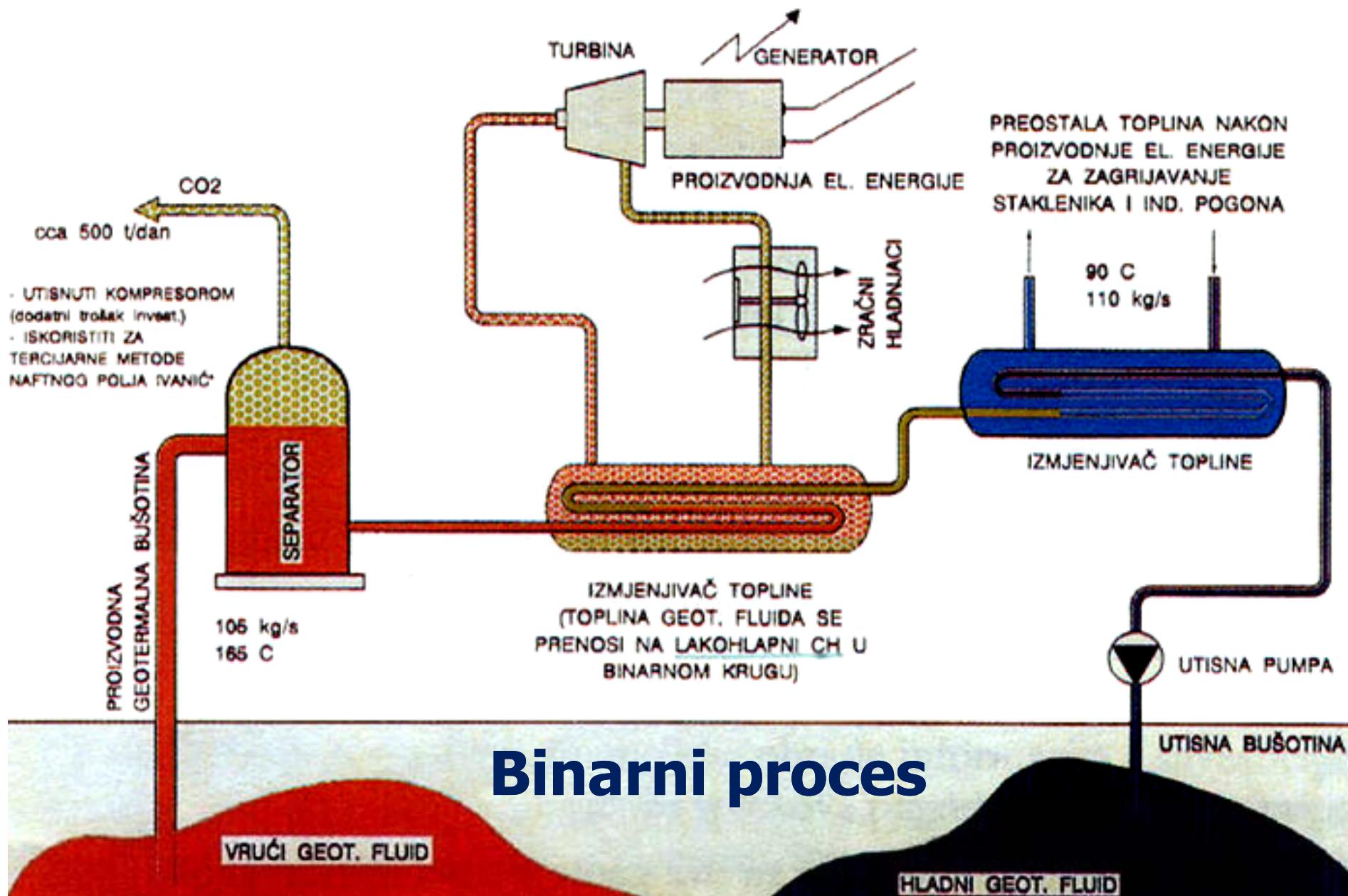


Cerro Prieto, Mexico



Imperial Valley, California

GEOTERMALNO POLJE VELIKA CIGLENA

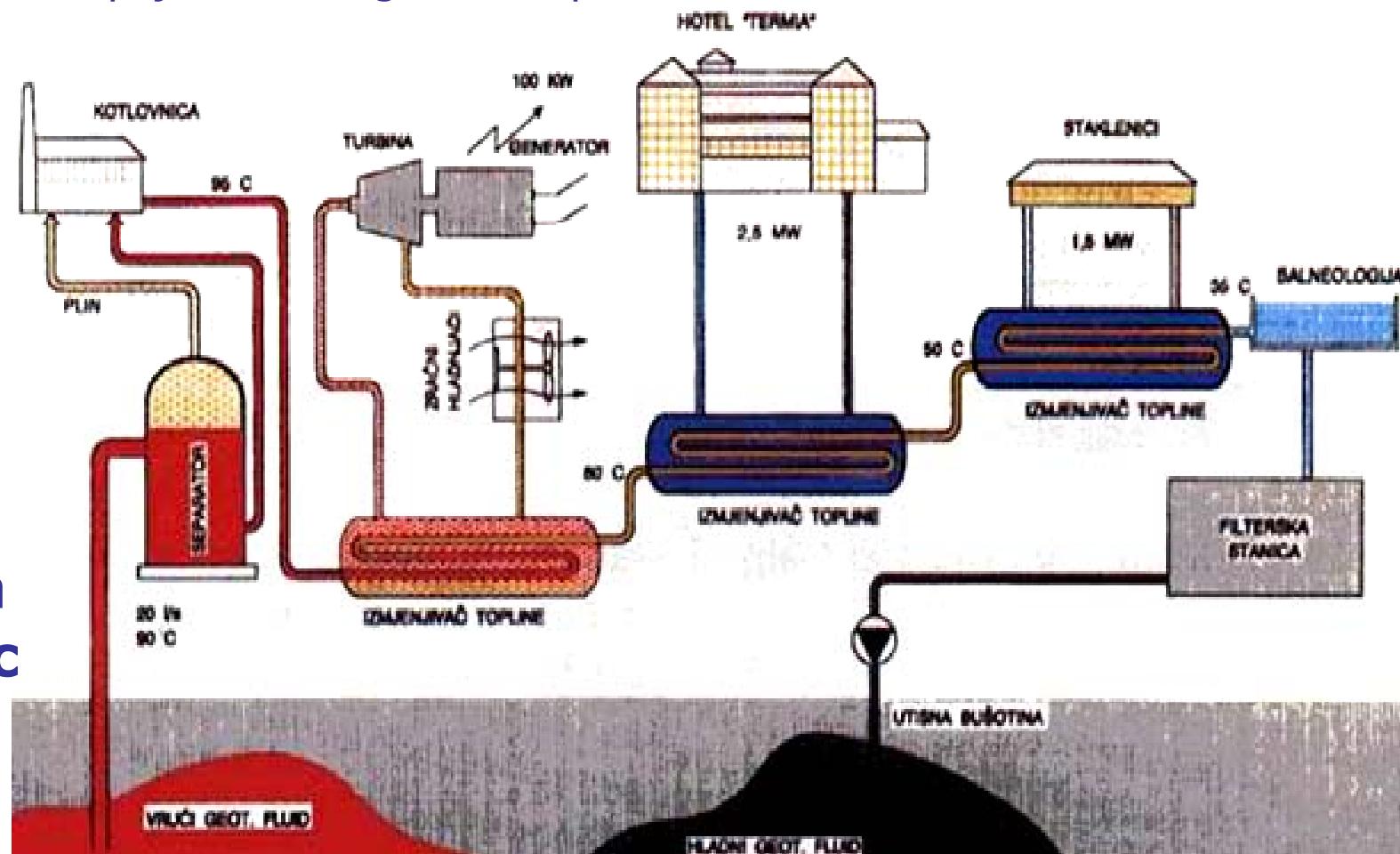


Proizvodnja el. en. i korištenje topline

Bolji stupanj djelovanja može se osigurati kombiniranim procesima:

- **Dogrijavanjem** medija iz geotermalnog izvora prirodnim plinom iz samog izvora ili nekim drugim gorivom
- **Predgrijavanjem** toplinskom energijom iz geotermalnog izvora kondenzata prije ulaska u generator pare konvencionalne termoelektrane

**Plan za
Bizovac**



Registrar OIEKPP

– planirano geotermalno postrojenje

Prema registru OIEKPP 11.02.2011. planirano je samo jedno geotermalno postrojenje električne snage 4,71 MW.

