

Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama

Osnovno o pretvorbama i procesima u termoelektranama

Energijske tehnologije
FER 2008.



Gdje smo:

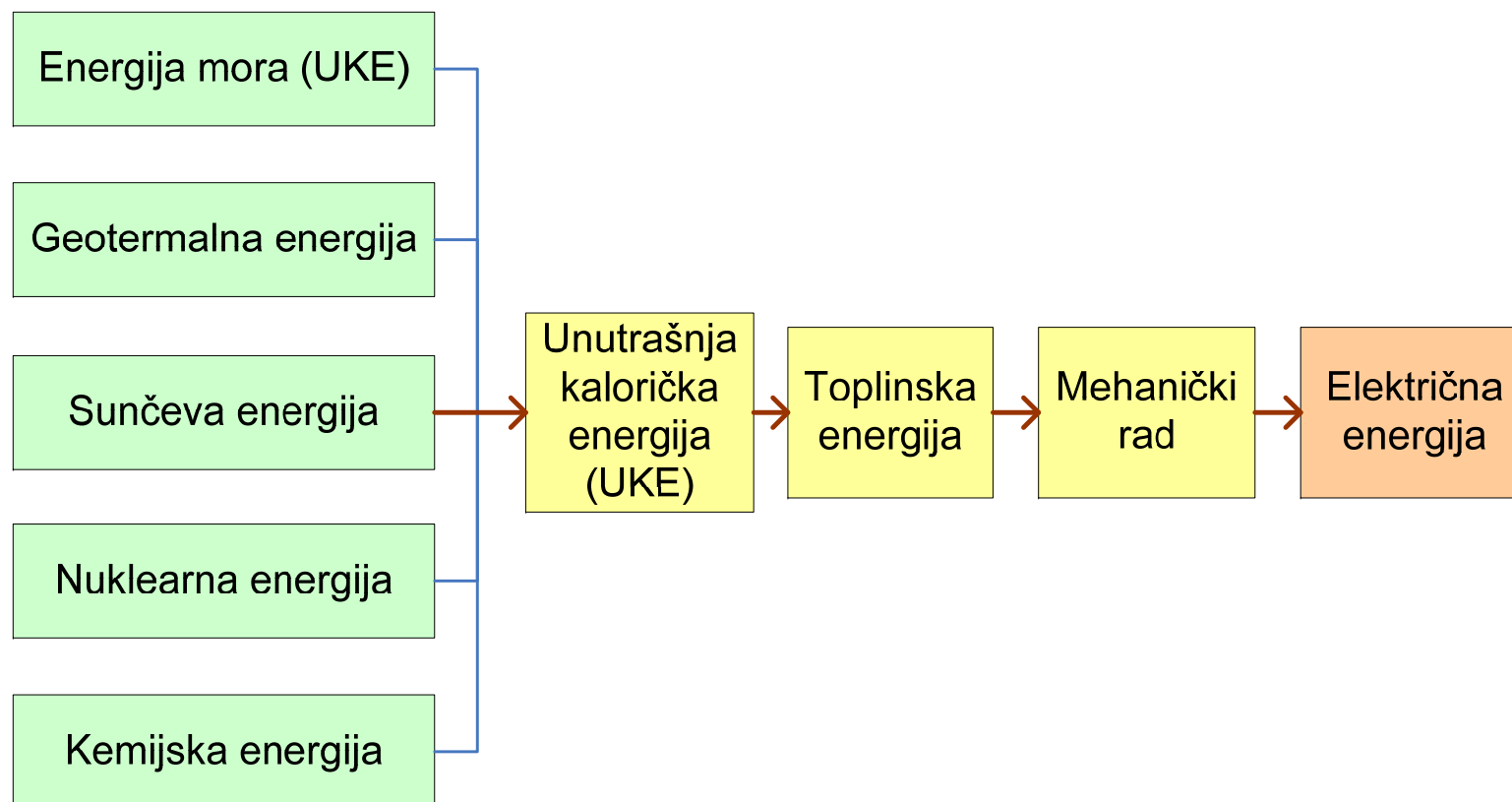
1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
- 4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama**
5. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
6. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
7. Energija Sunca
8. Energija vjetra
9. Geotermalna energija
10. Biomasa
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

- 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

Što su termoelektrane?

Energetske pretvorbe u termoelektranama

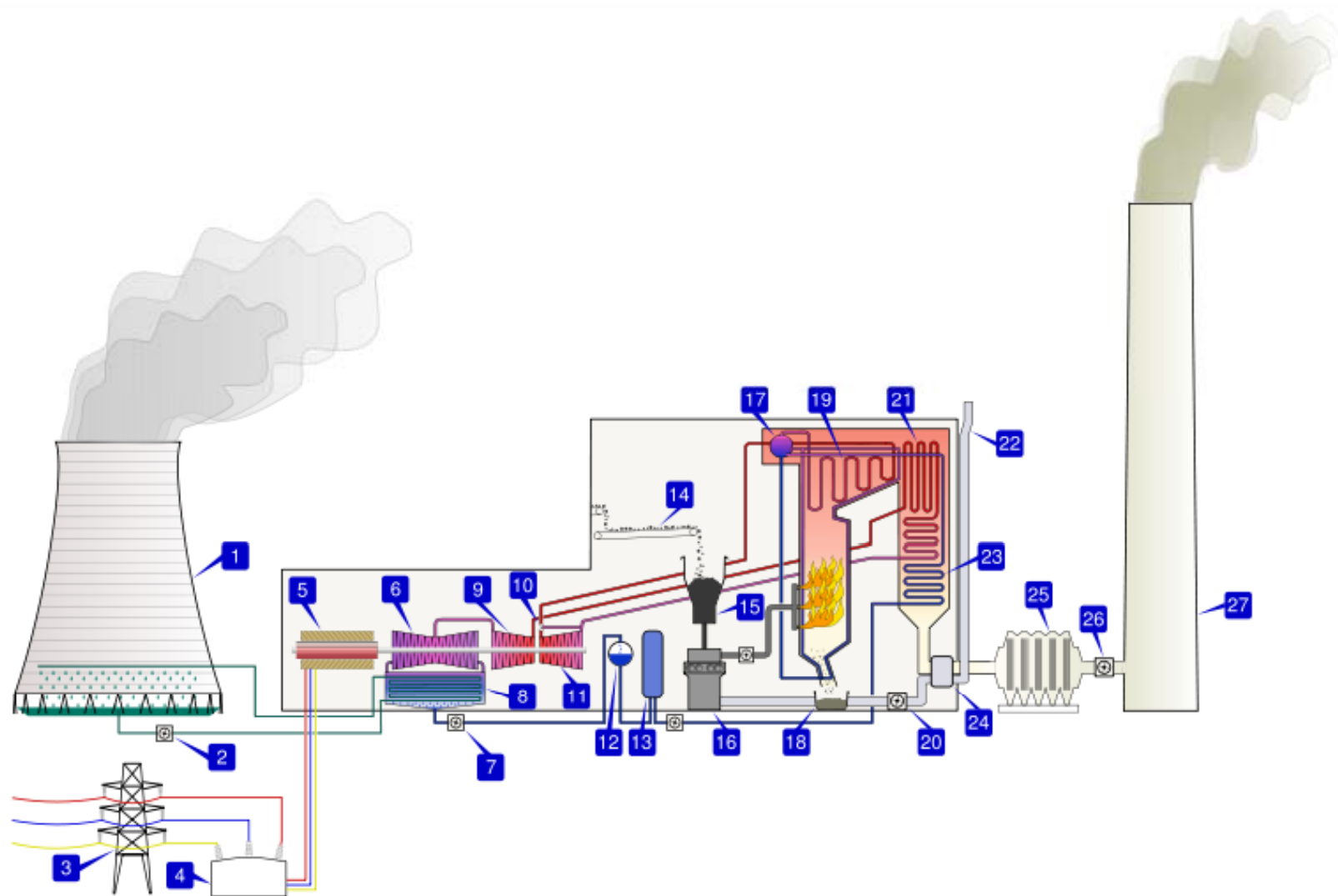


Podjela termoelektrana – prema primarnim oblicima energije

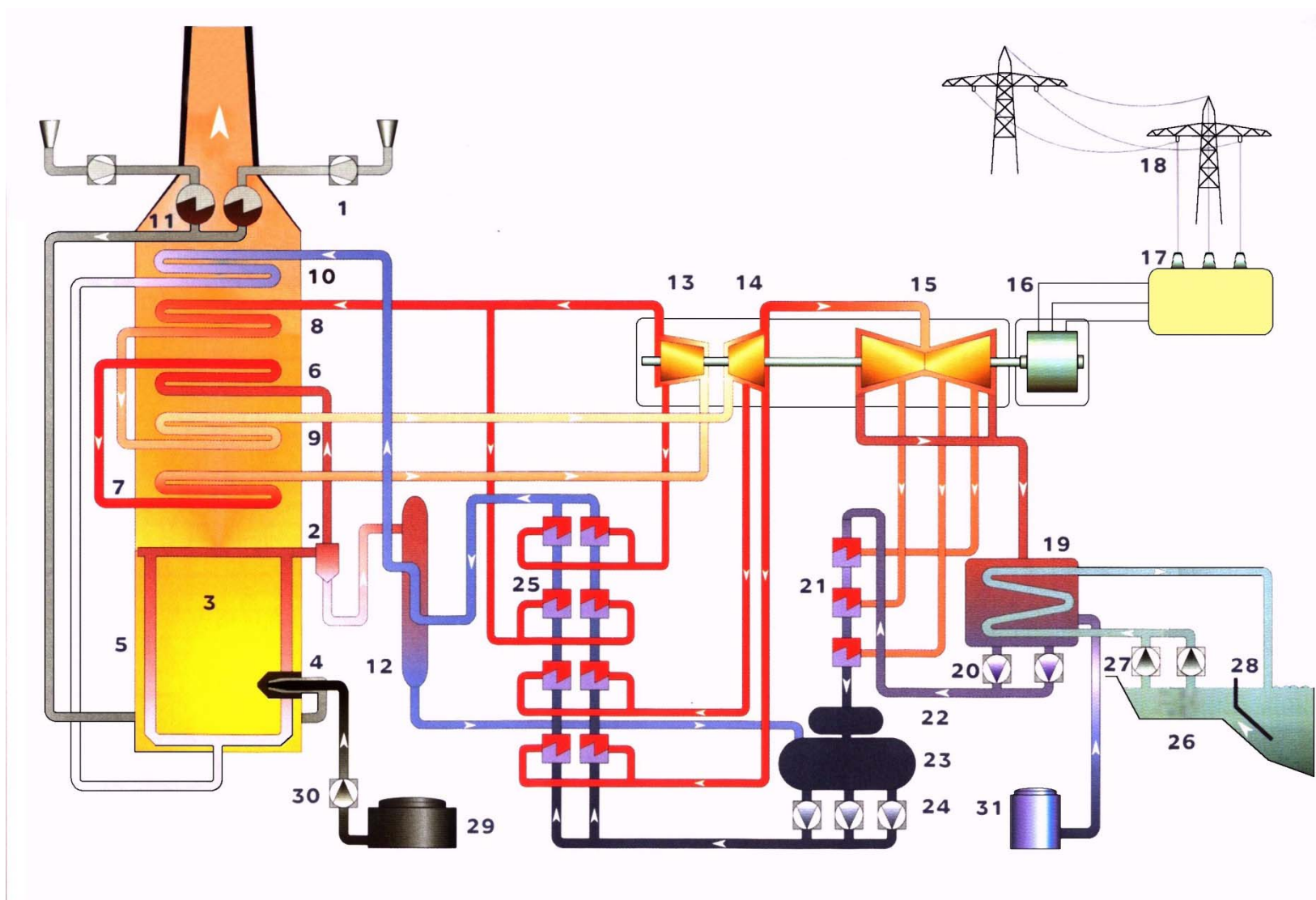
- konvencionalne („klasične“)
- nuklearne (fisija, fuzija)
- solarne (sunčane):
fotonaponske elektrane (ne ubrajaju se u termoelektrane) i
solarne termoelektrane
- geotermalne

Danas se iz termoelektrana namiruje više od 80% svjetskih potreba za električnom energijom, a oko 18% iz hidroelektrana.

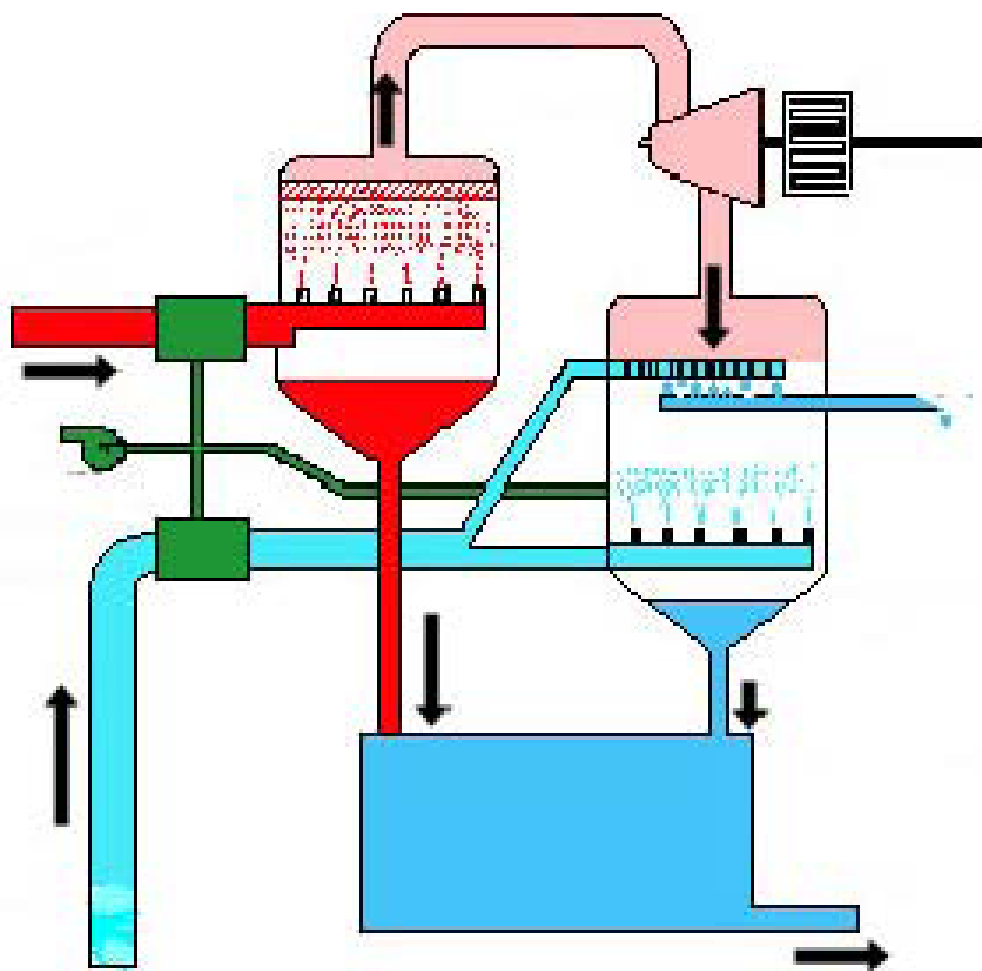
Shema termoelektrane ložene ugljenom



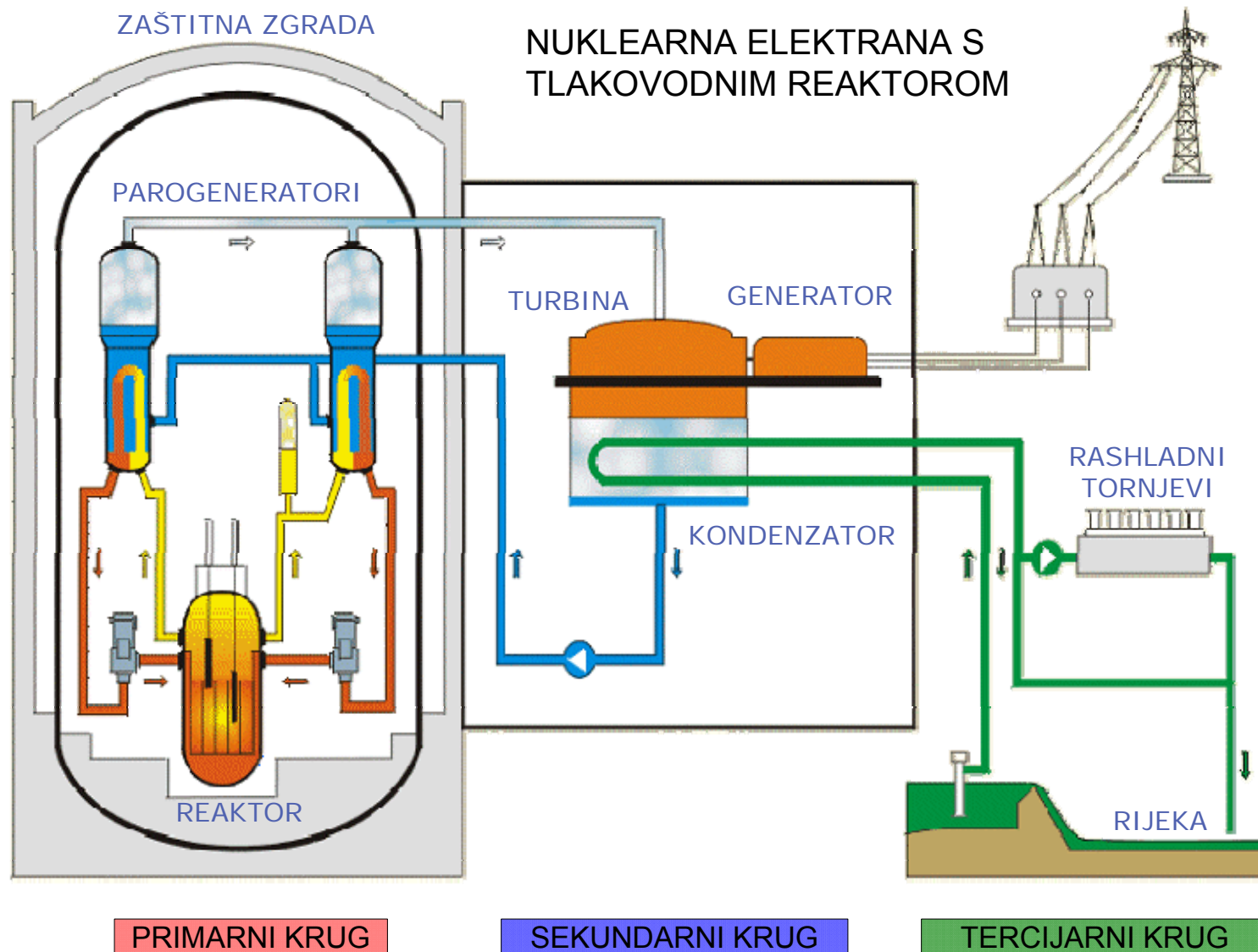
Shema termoelektrane ložene mazutom



Pretvorba UKE mora u el. energiju



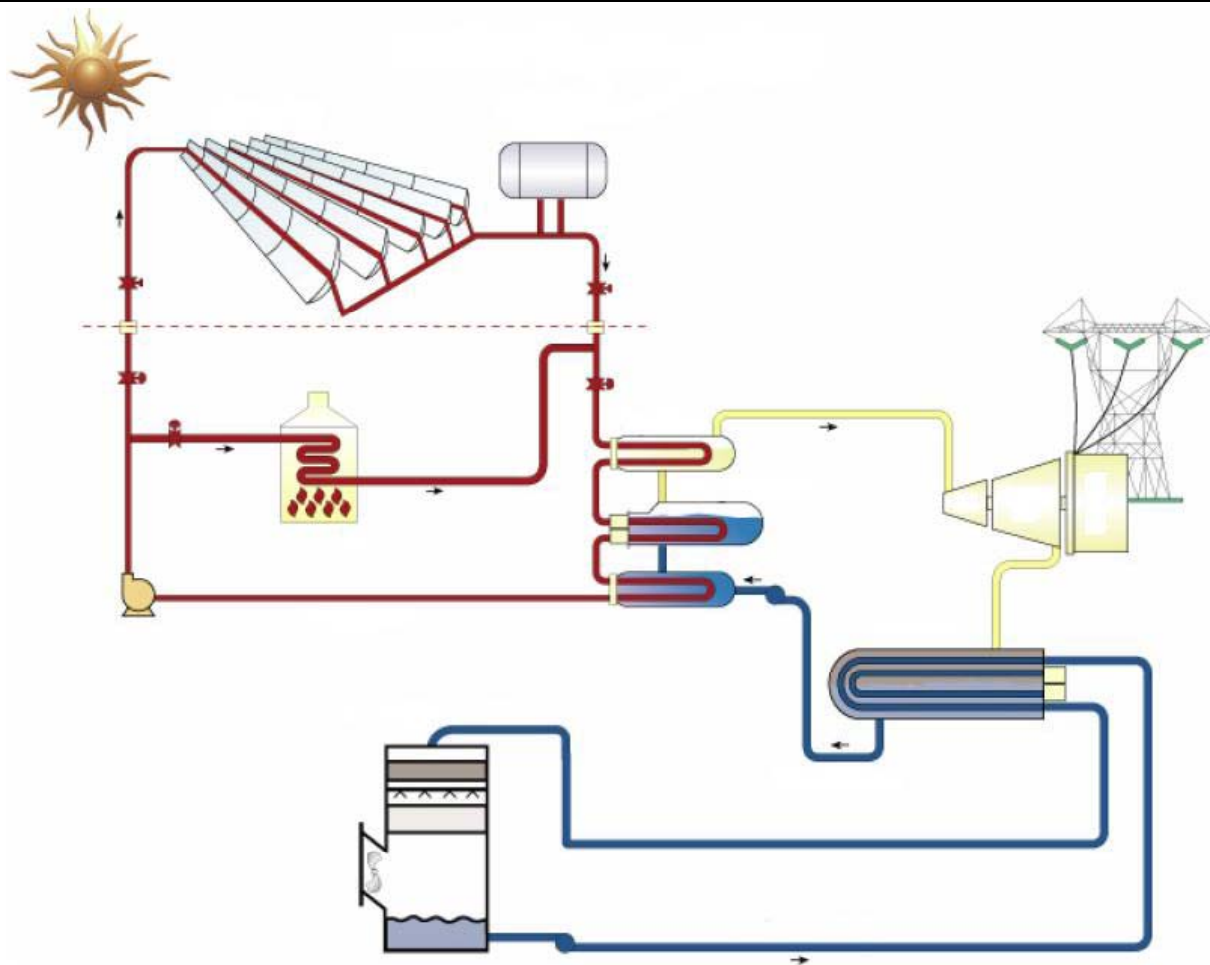
Shema nuklearne elektrane



Solarna termoelektrana

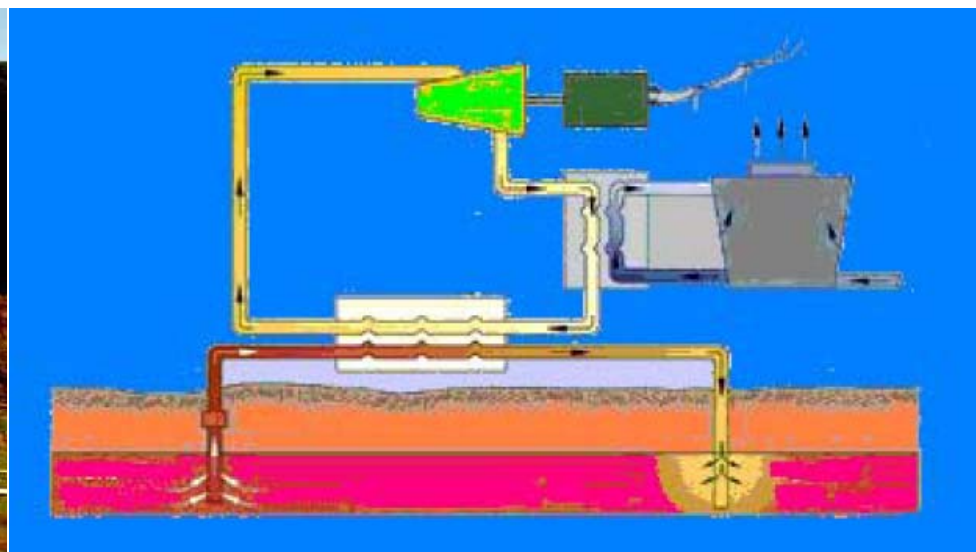
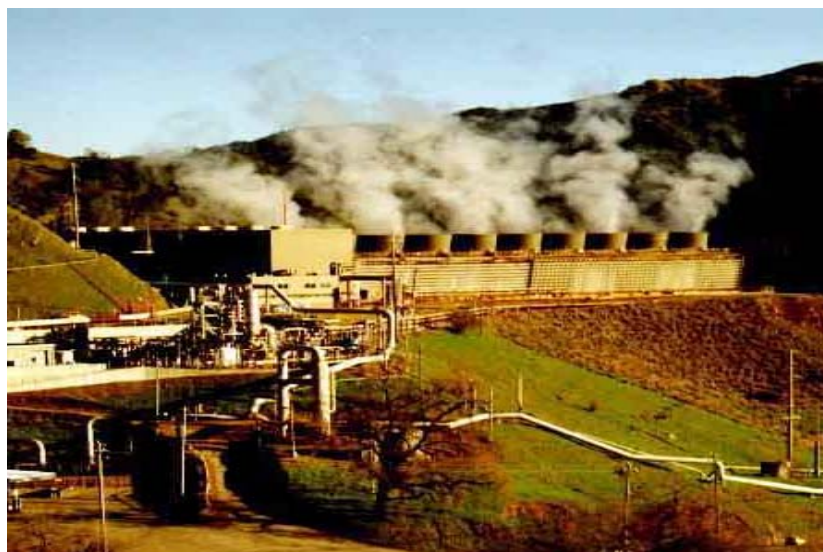


Solarna termoelektrana



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

Geotermalna termoelektrana



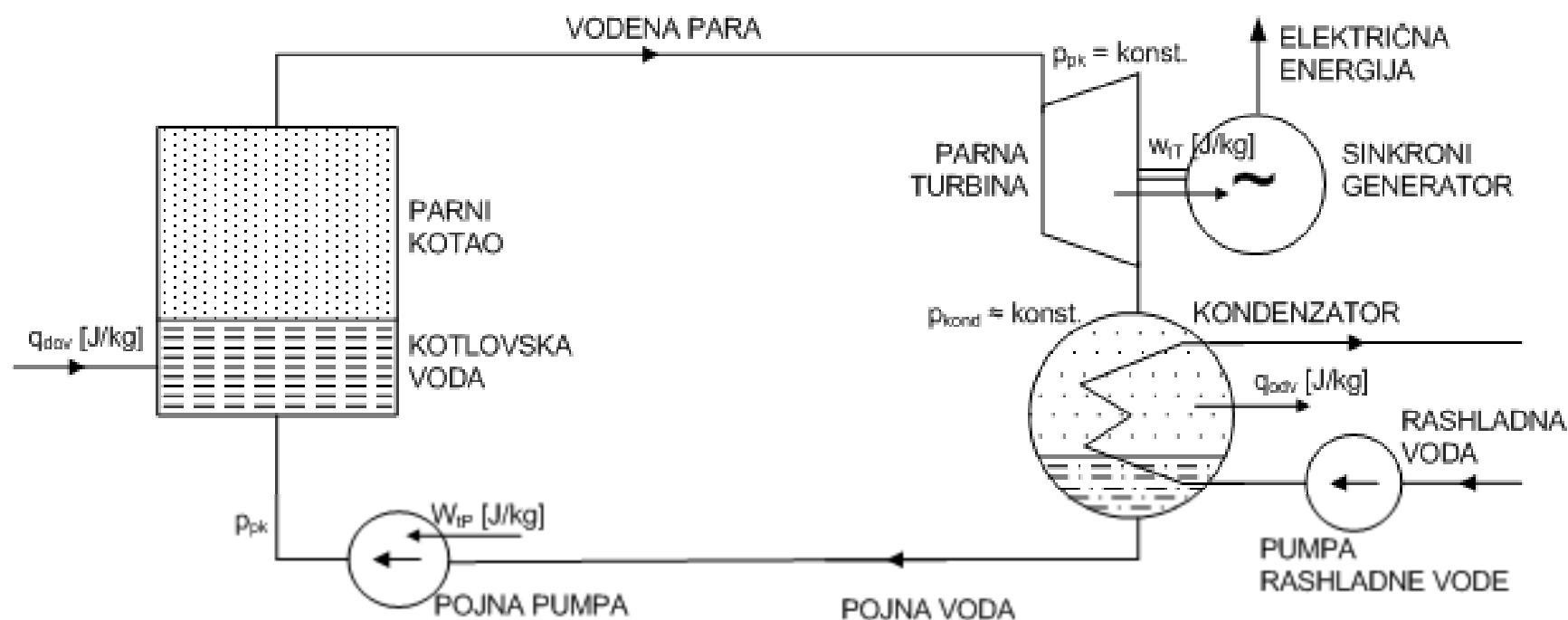
Podjela termoelektrana – prema pogonskim strojevima

- termoelektrane s:
 - parnim turbinama (nekada je to bio parni stapni 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

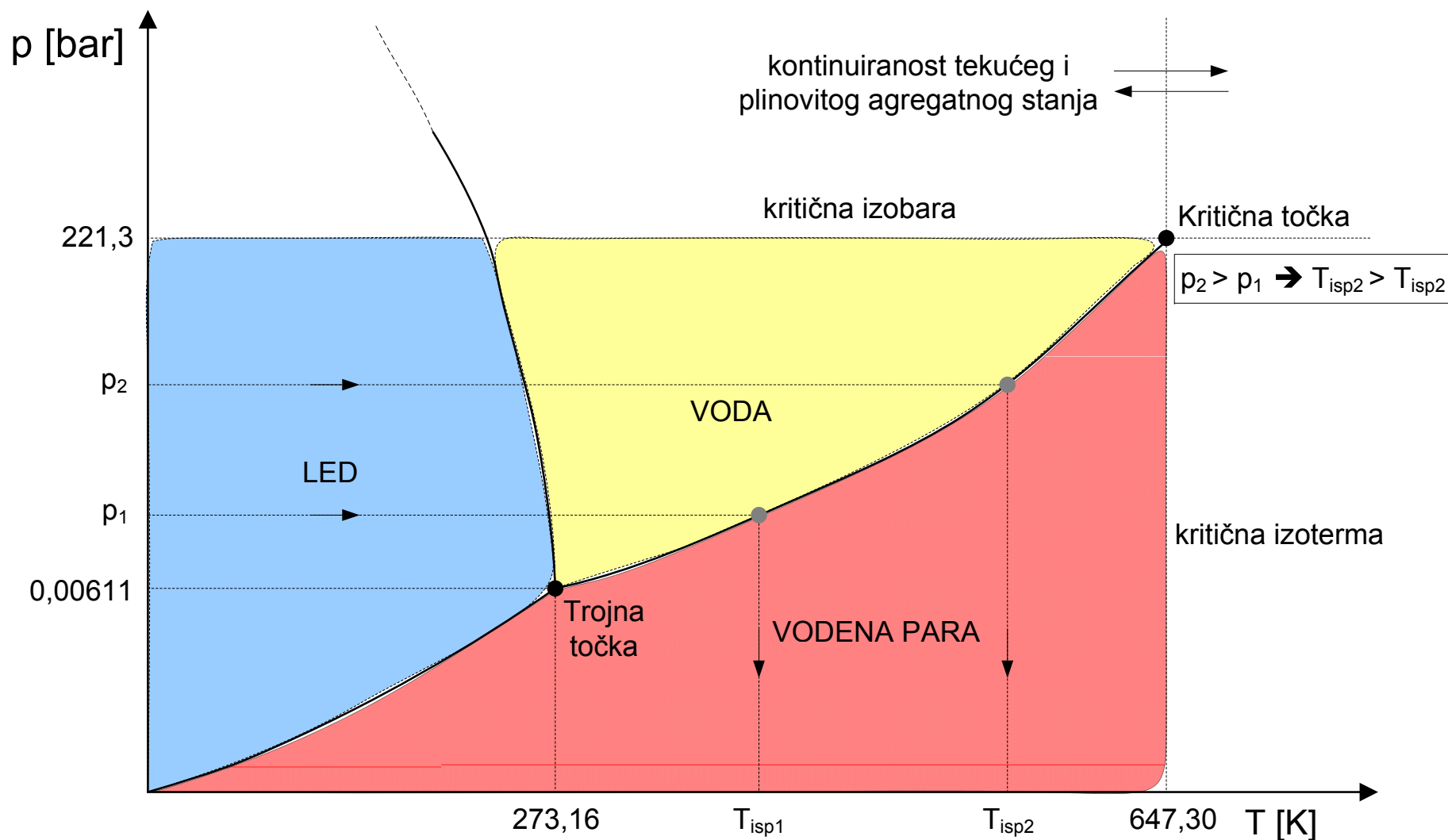
Energetske pretvorbe u termoelektrani s parnom turbinom – proces u ložištu

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

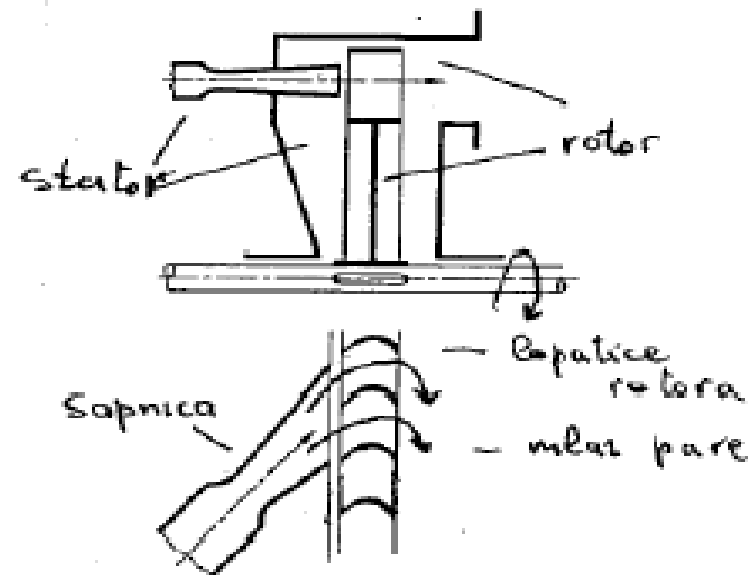
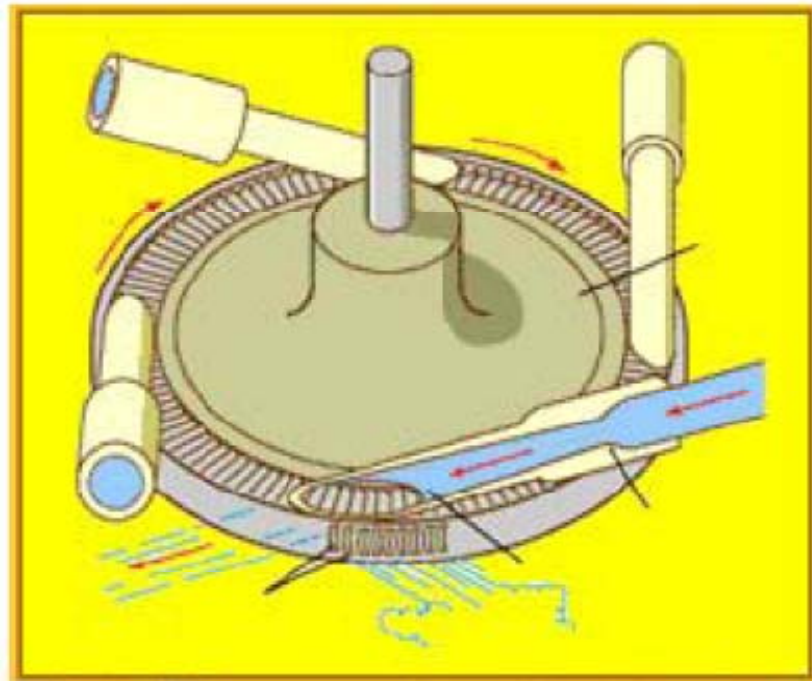
Energetske pretvorbe u termoelektrani s parnom turbinom – shema termoelektrane – opis pretvorbi i procesa



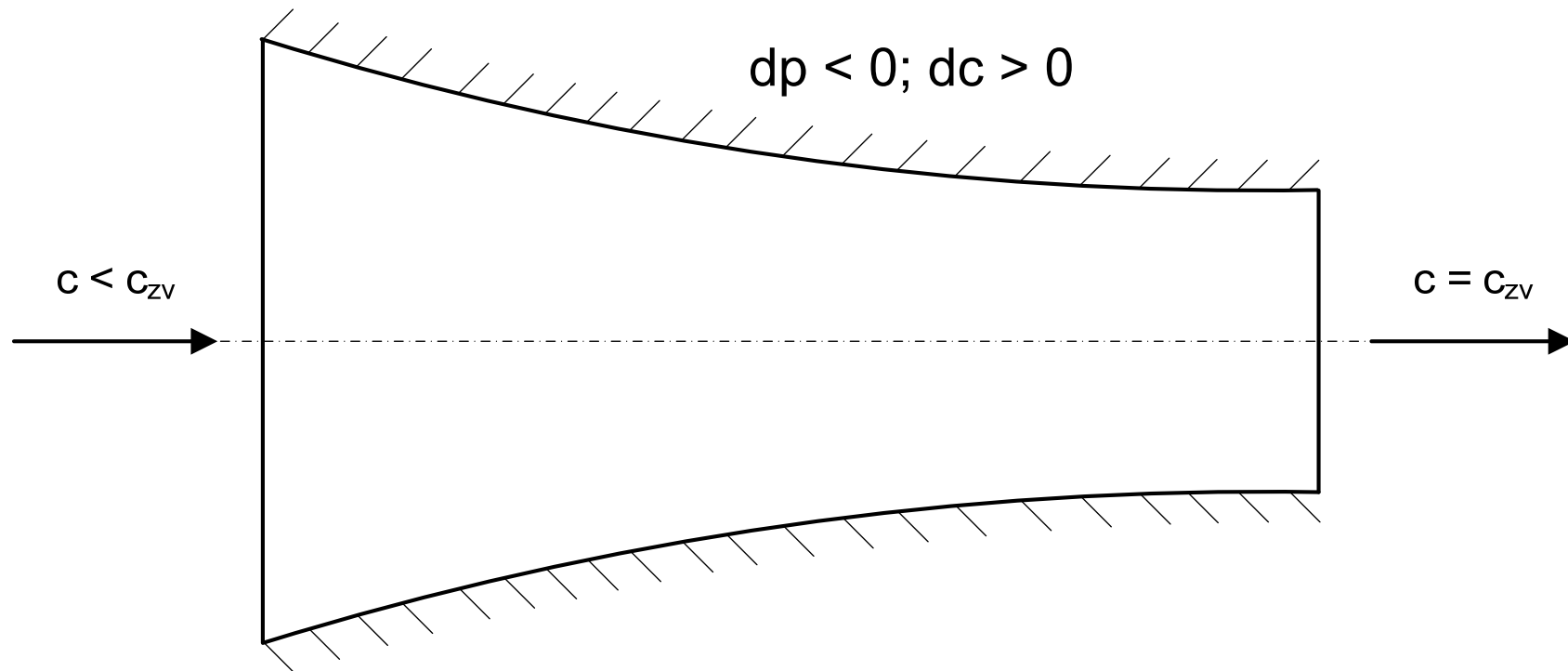
Agregatna stanja vode – ovisnost temperature isparivanja o tlaku



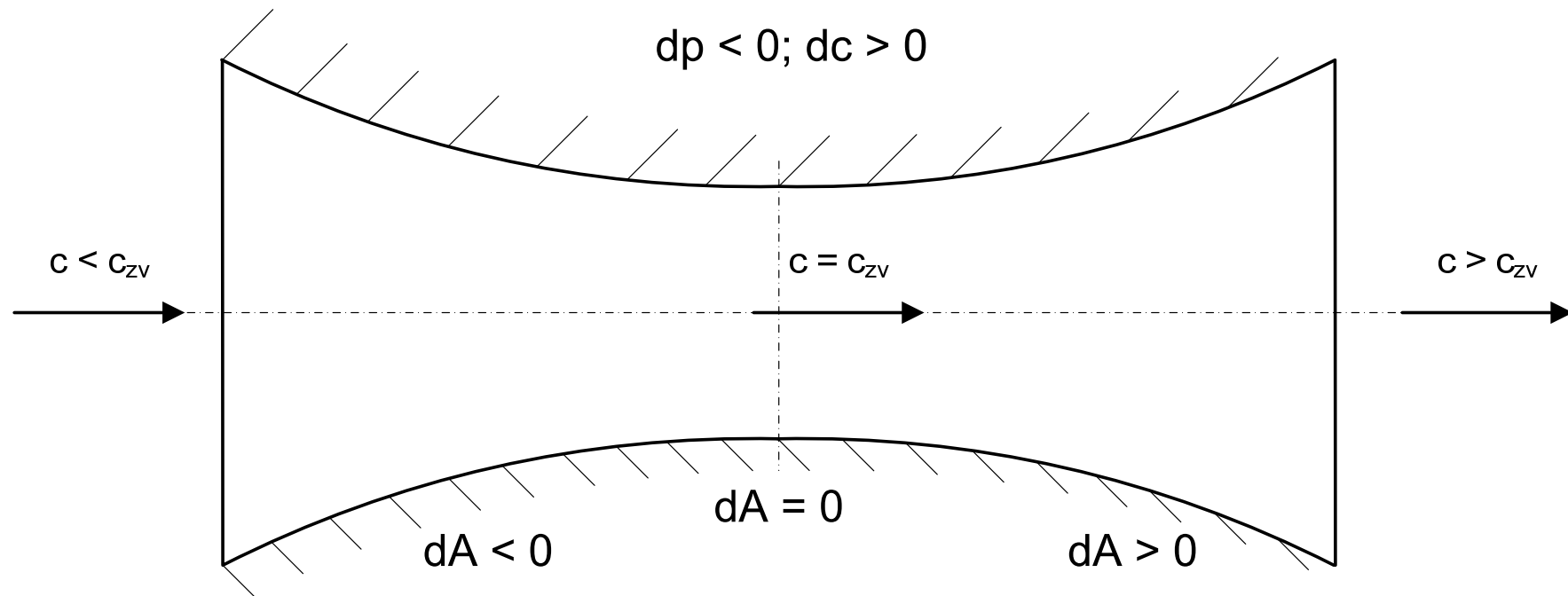
Energetske pretvorbe u parnoj turbini - skica najjednostavnije parne turbine



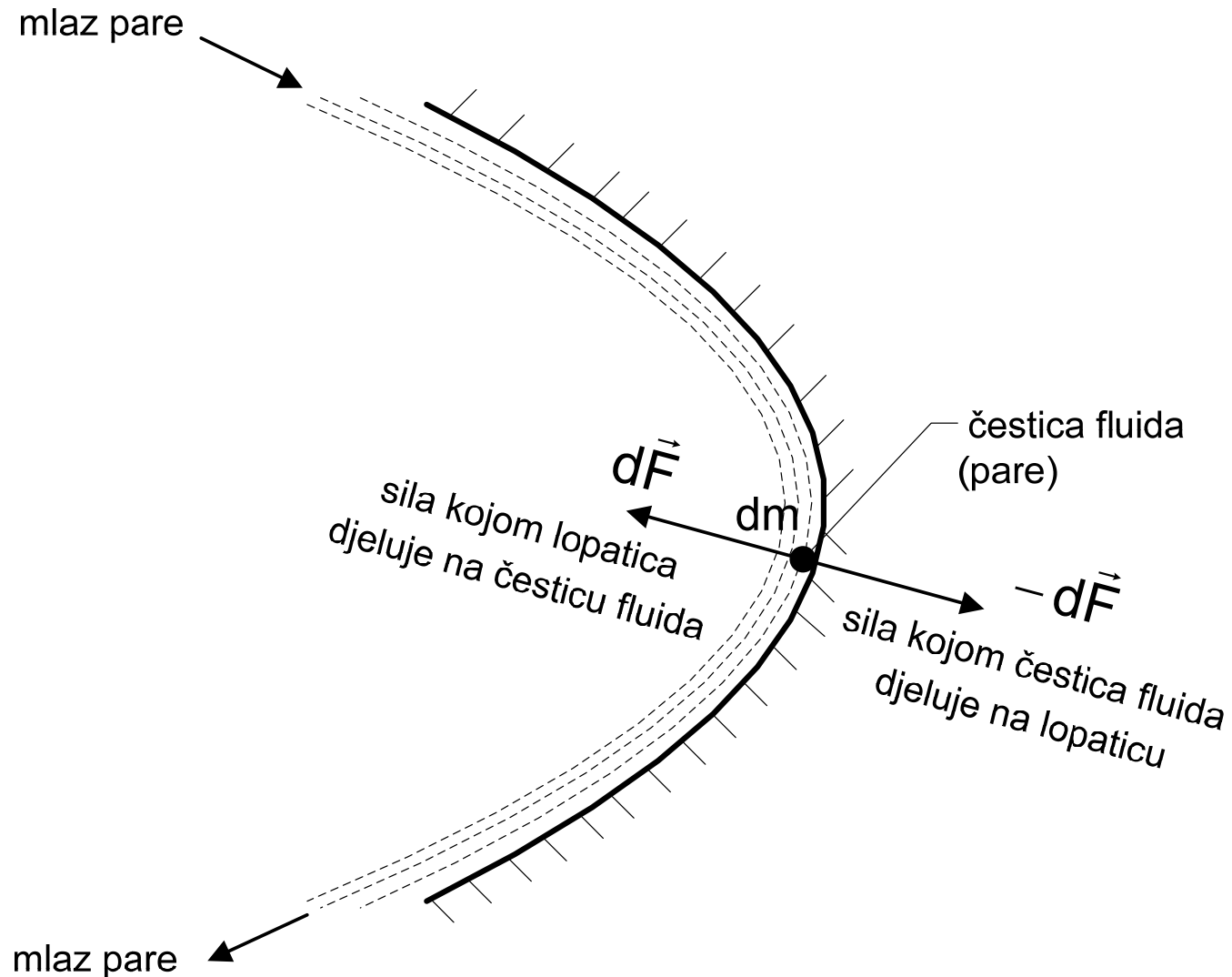
Energetske pretvorbe u parnoj turbini – proces u konvergentnoj sapnici



Energetske pretvorbe u parnoj turbini – proces u de Lavalovoj sapnici



Energetske pretvorbe u parnoj turbini – proces u rotoru



Nuklearna elektrana „Krško“ (2 jedinice rashladnih tornjeva)



2008.

Energijske tehnologije: Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama

21

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

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

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

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 – preduvjeti izmjene energije

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

Takva su međudjelovanja određena i ograničena principom očuvanja energije.

Mehanički rad zatvorenog krutog sustava

Promatramo sustav čija je masa m kg, a minus je predznak dogovoren:

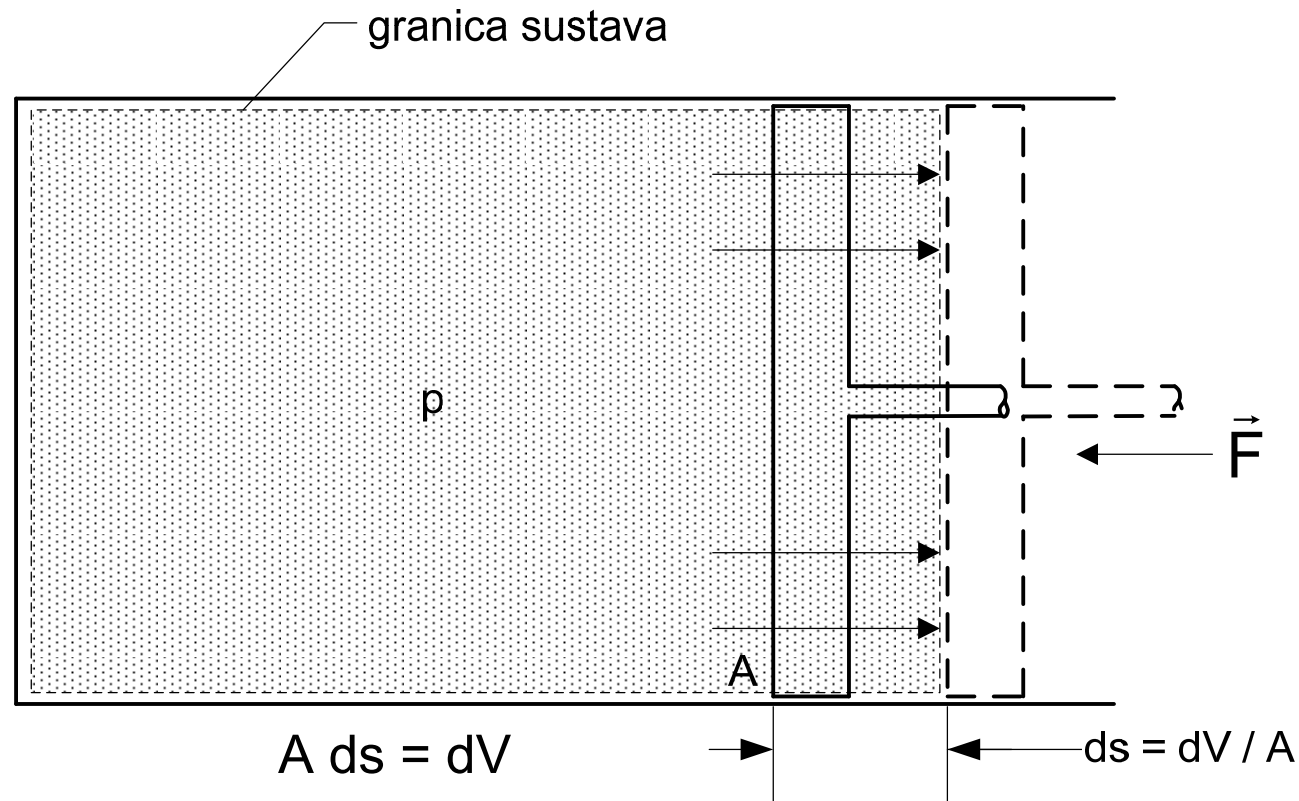
$$\frac{W_{12}}{m} = w_{12} = - \int_1^2 \frac{\vec{F}}{m} \cdot d\vec{s} \left[J / kg \right]$$

Dobivamo:

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

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

Mehanički rad mirujućeg zatvorenog sustava



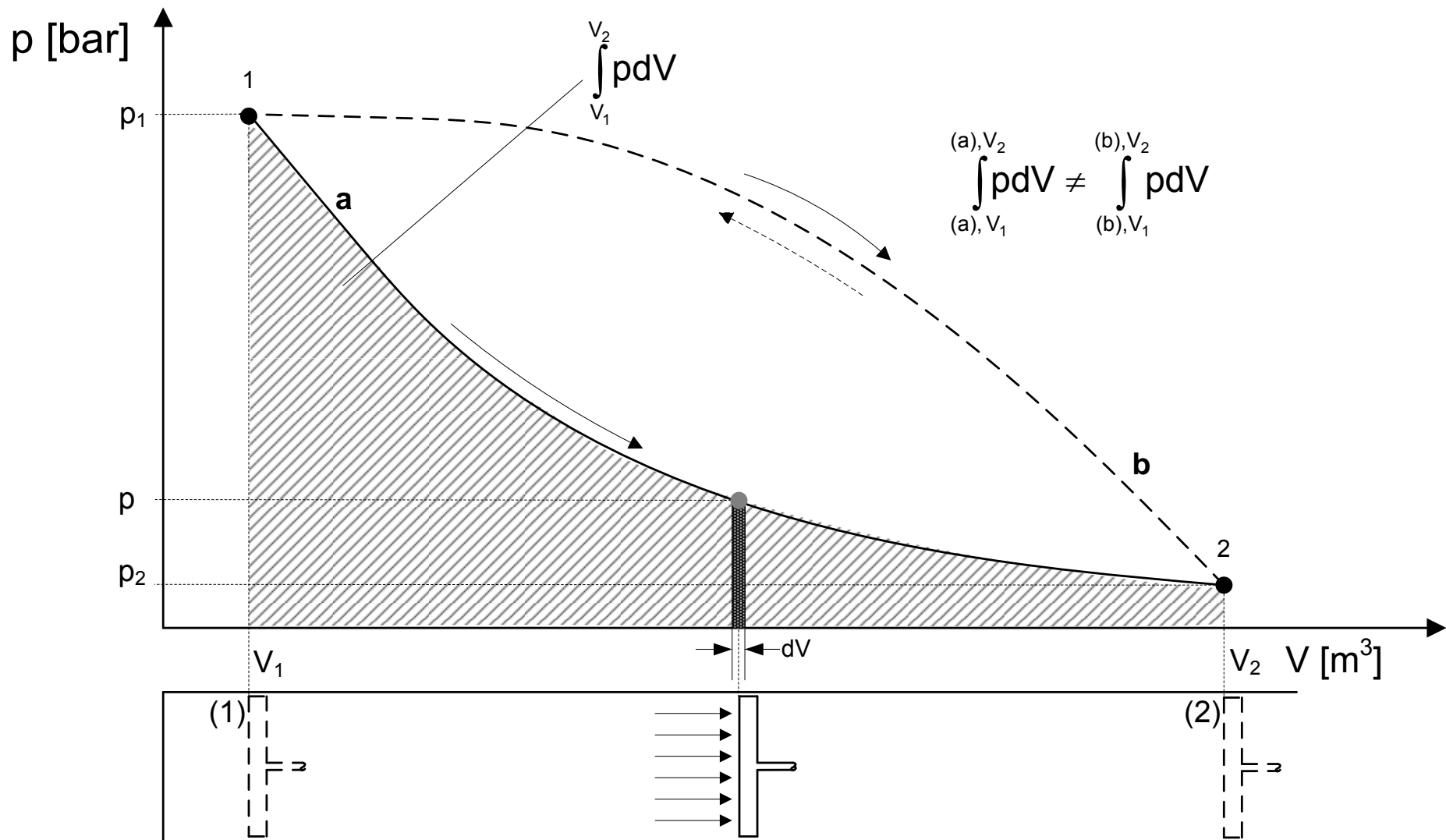
Mehanički rad promjene volumena

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

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

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

Mehanički rad promjene volumena nije veličina stanja



Mehanički rad promjene volumena nije veličina stanja

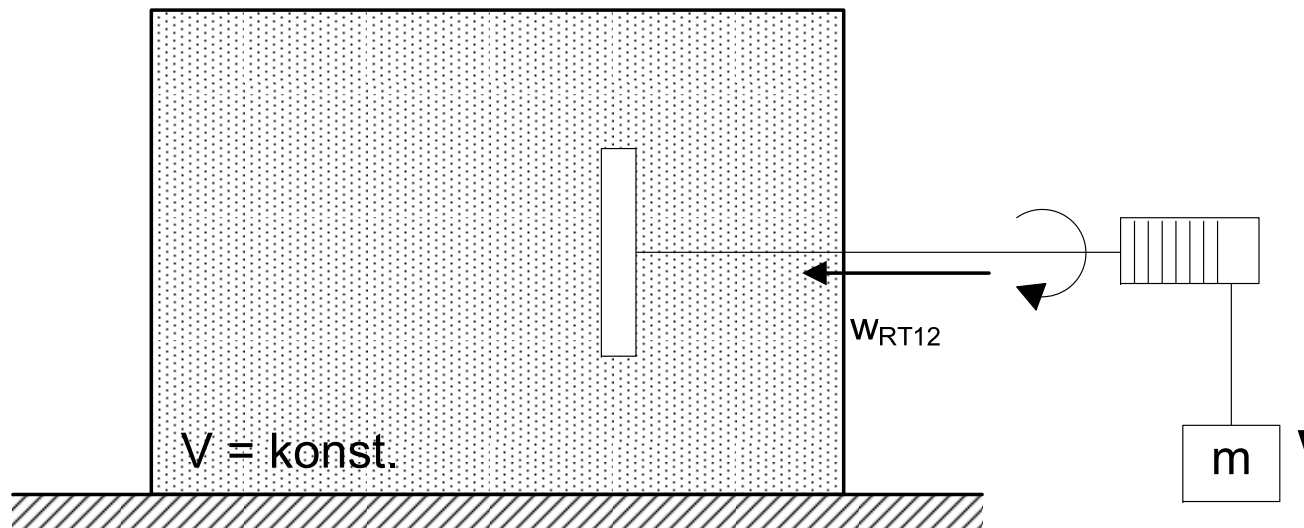
$$\int_1^2 dw \neq w_2 - w_1,$$

nego je

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

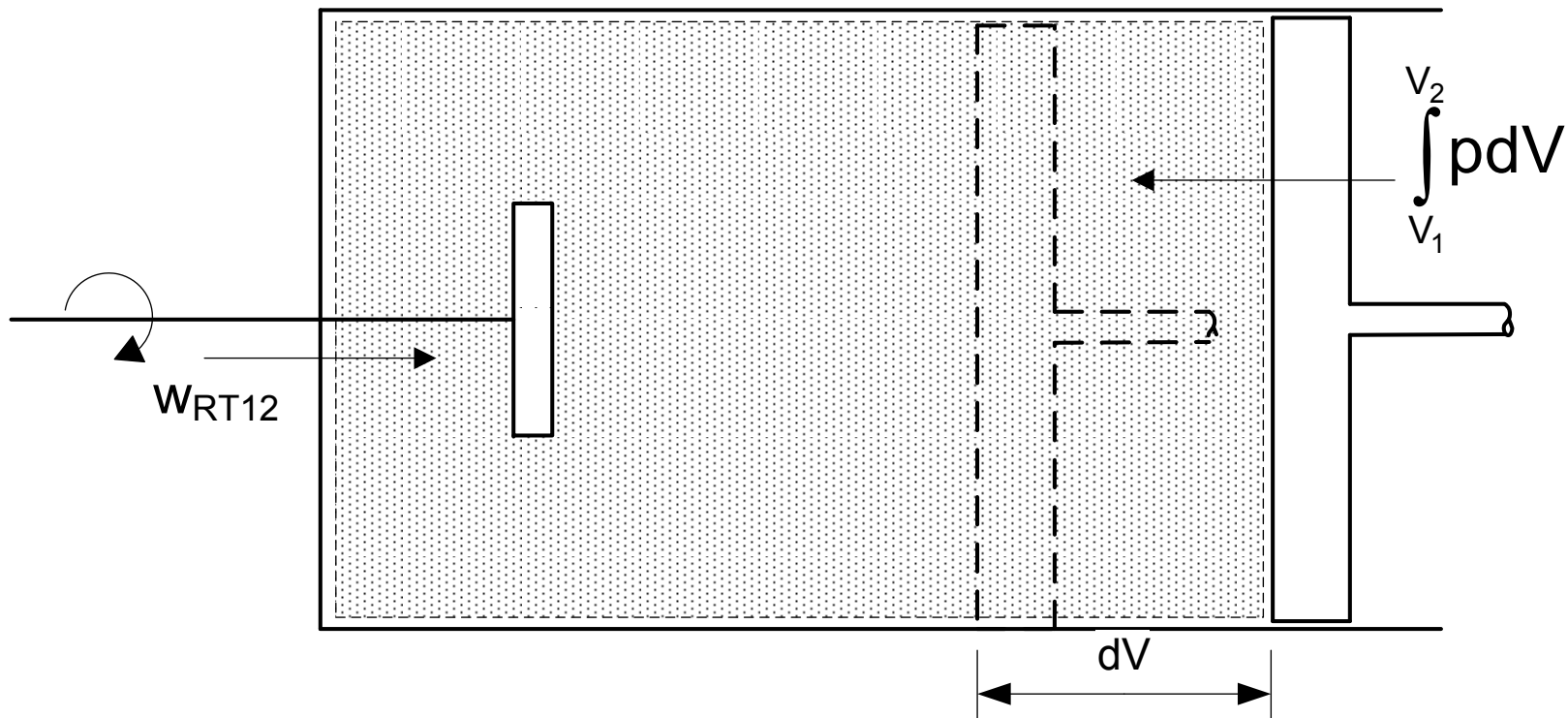
Rad trenja

- 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

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



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:

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

Jednadžba je analitički oblik

prvog glavnog stavka termodinamike za mehanički rad zatvorenog sustava.

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:

$$w_{RT12} \leq 0$$

- to potvrđuju opažanja

Mehanički povratljivi i nepovratljivi procesi

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

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

Primjena principa očuvanja energije – unutrašnja kalorička energija

- u mirujućem 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):

$$Q_{12} = U_2 - U_1 + W_{12} \text{ [J], odnosno}$$

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

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

Toplinska energija - diferencijalni oblik jednadžbi

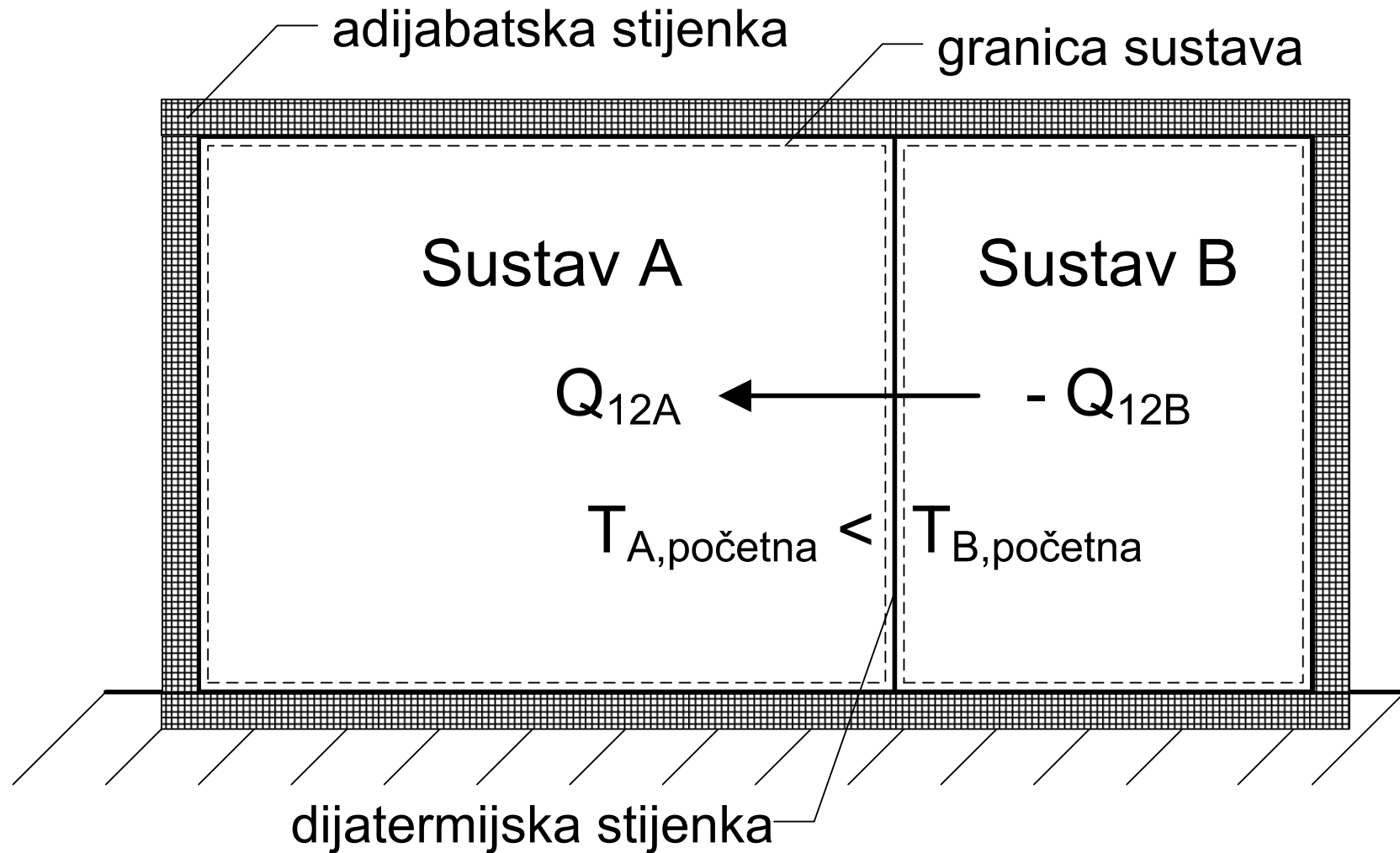
$$\mathbf{dQ = dU + dW [J], odnosno dq = du + dw [J/kg]}$$

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, $\mathbf{\bar{d}q = du + \bar{d}w}$, ili još na koji drugačiji način, što međutim ne ćemo raditi.

Okolnosti prijelaza toplinske energije



Postulati toplinske ravnoteže

- $T_{\text{Apočetna}} < T_{\text{Bpočetna}}$
- $T_{\text{Akonačna}} = T_{\text{Bkonačna}}$
- dva ravnotežna postulata (prvi postulat /izjednačenje temperatura/ i "nulti stavak termodinamike")
- $Q_{12} = U_2 - U_1 + W_{12}$
- $Q_{12} = 0$ i $W_{12} = 0$
- $U_2 - U_1 = 0, U_2 = U_1$

Prijelaz toplinske energije - odnosi

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

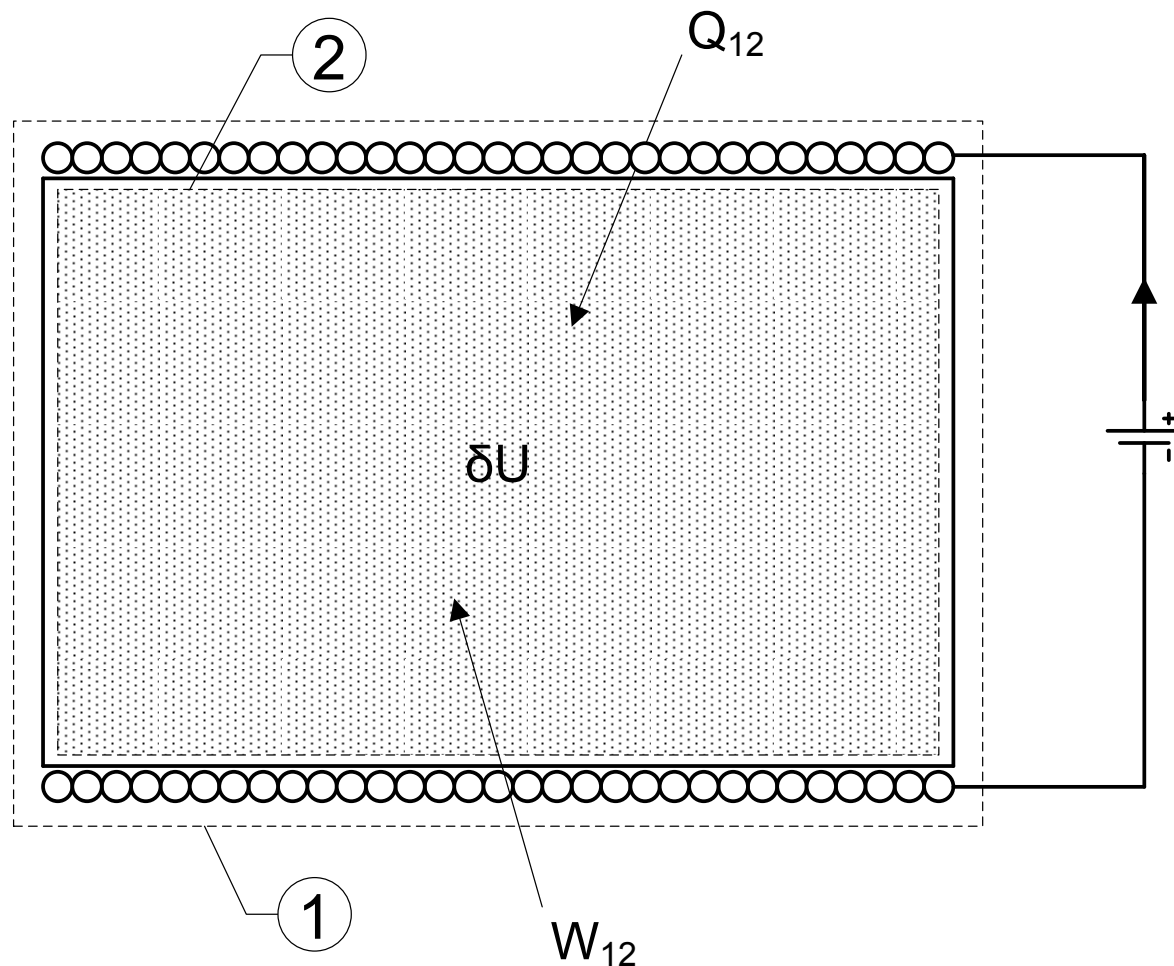
Prijelaz toplinske energije - zaključci

- 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 jednaka 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 (neizbježno, nužno) uzrokuje porast temperature (može, no ne mora)
- nije „ono“ što je uvijek nazočno kad raste (kad se mijenja) temperatura
- poput mehaničkog rada toplinska je energija prijelazni oblik energije: postoji samo u vremenu trajanja međudjelovanja između sustava
- poput mehaničkog rada ona je događanje, ne materija
Svojom su prirodom toplinska energija i mehanički 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:

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

1. glavni stavak termodinamike za zatvoreni sustav

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

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

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

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

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 procese u termoelektrani

- termoelektrana je zatvoreni sustav (fluid u termoelektrani promatramo kao zatvoreni sustav) podvrgnut **kružnom procesu**
- $Q_{12} = W_{12}$ [J], odnosno $q_{12} = w_{12}$ [J/kg]
($u_2 - u_1 = \delta u = 0$: zašto?)
(Za zatvoreni je sustav podvrgnut kružnom procesu mehanički rad predan u okolicu proporcionalan toplinskoj energiji preuzetoj iz okoline.)
- $q_{12} = q_{dov} + q_{odv}$
- $w_{12} = w_{turbine} + w_{pumpe}$
- $q_{dov} - |q_{odv}| = w_{turbine} - |w_{pumpe}|$
- $w_{turbine} = q_{dov} - |q_{odv}|$ [J/kg]

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

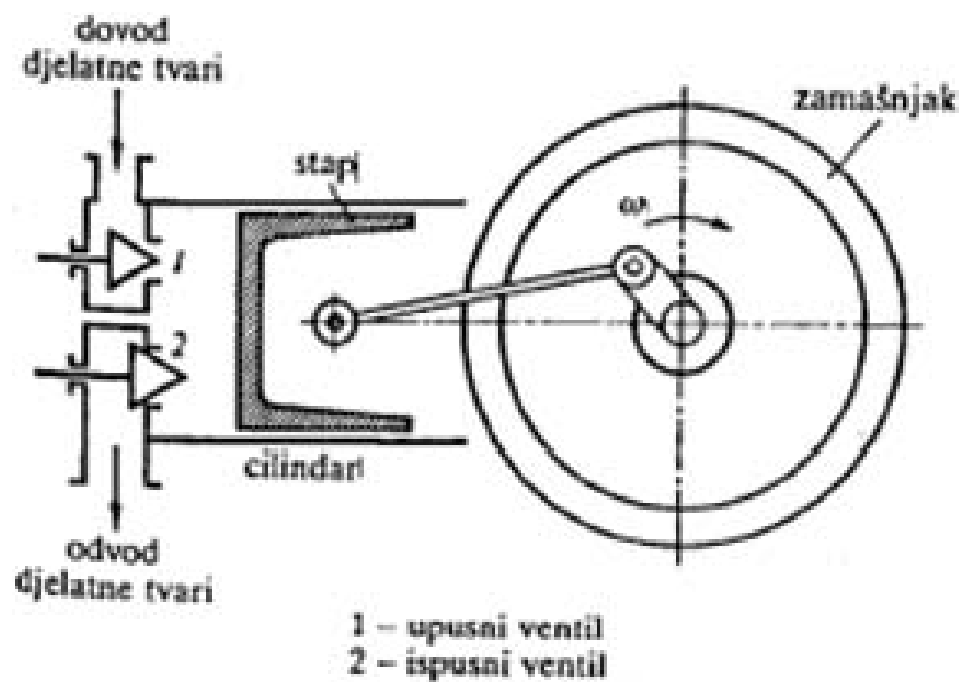
- parni kotao
- parna turbina
- kondenzator
- pumpa
- cijevi

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
- plin ili para koja se dovodi i odvodi iz sustava naziva se **djelatnom tvari (djelatnim medijem)**

Primjer je otvorenog sustava stapni parni stroj prikazan na slici.

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 točki presjeka, vrijednosti su promatrane fizikalne veličine (brzine, akceleracije, gustoće, tlaka, temperature itd.) jednake
- primjer: dvodimenzionalno strujanje fluida kroz cijev, što je poseban slučaj realnog, trodimenzionalnog strujanja. Trebali bismo računati s ovakvom funkcijom brzine:

Jednodimenzionalno strujanje

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

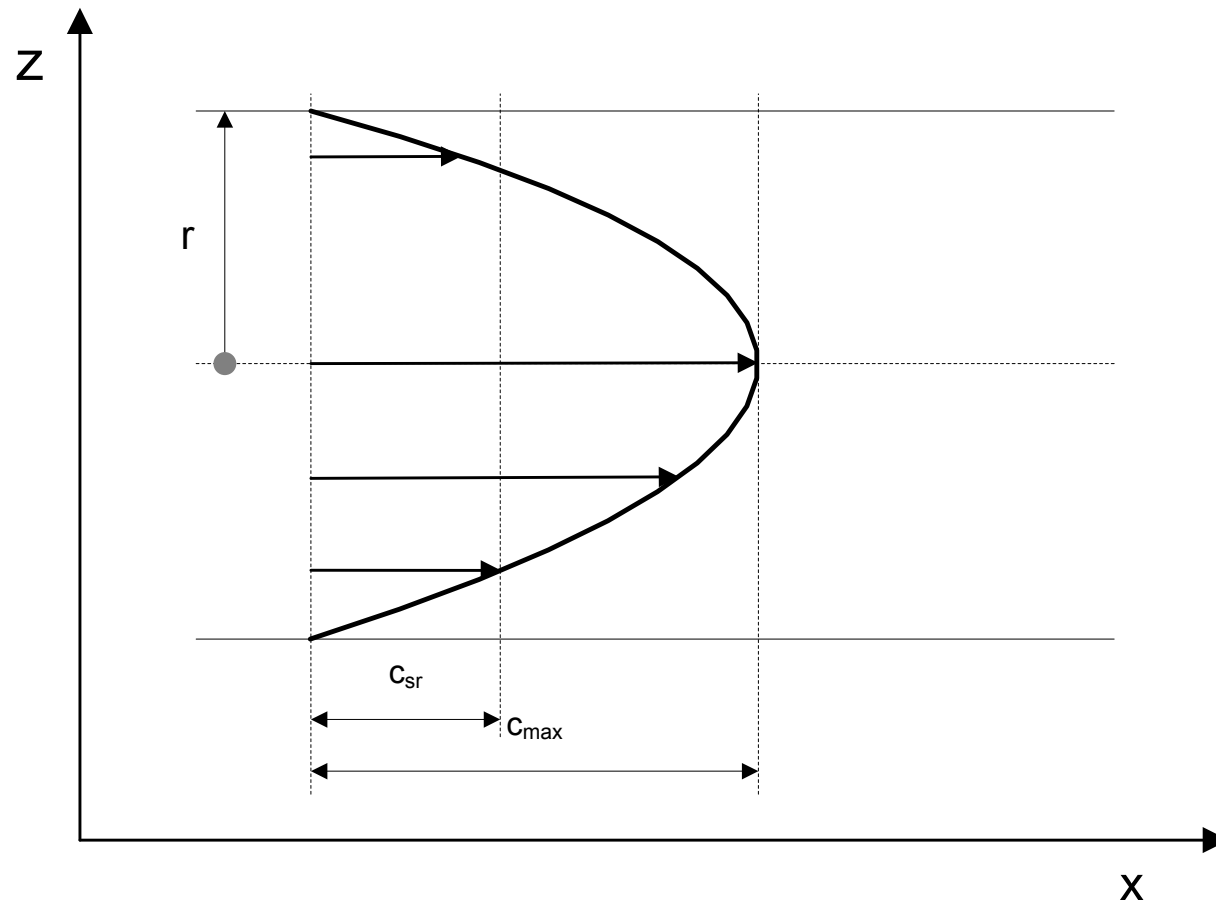
Pojednostavnjujemo pristup aproksimirajući dvodimenzionalno strujanje s jednodimenzionalnim:

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

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

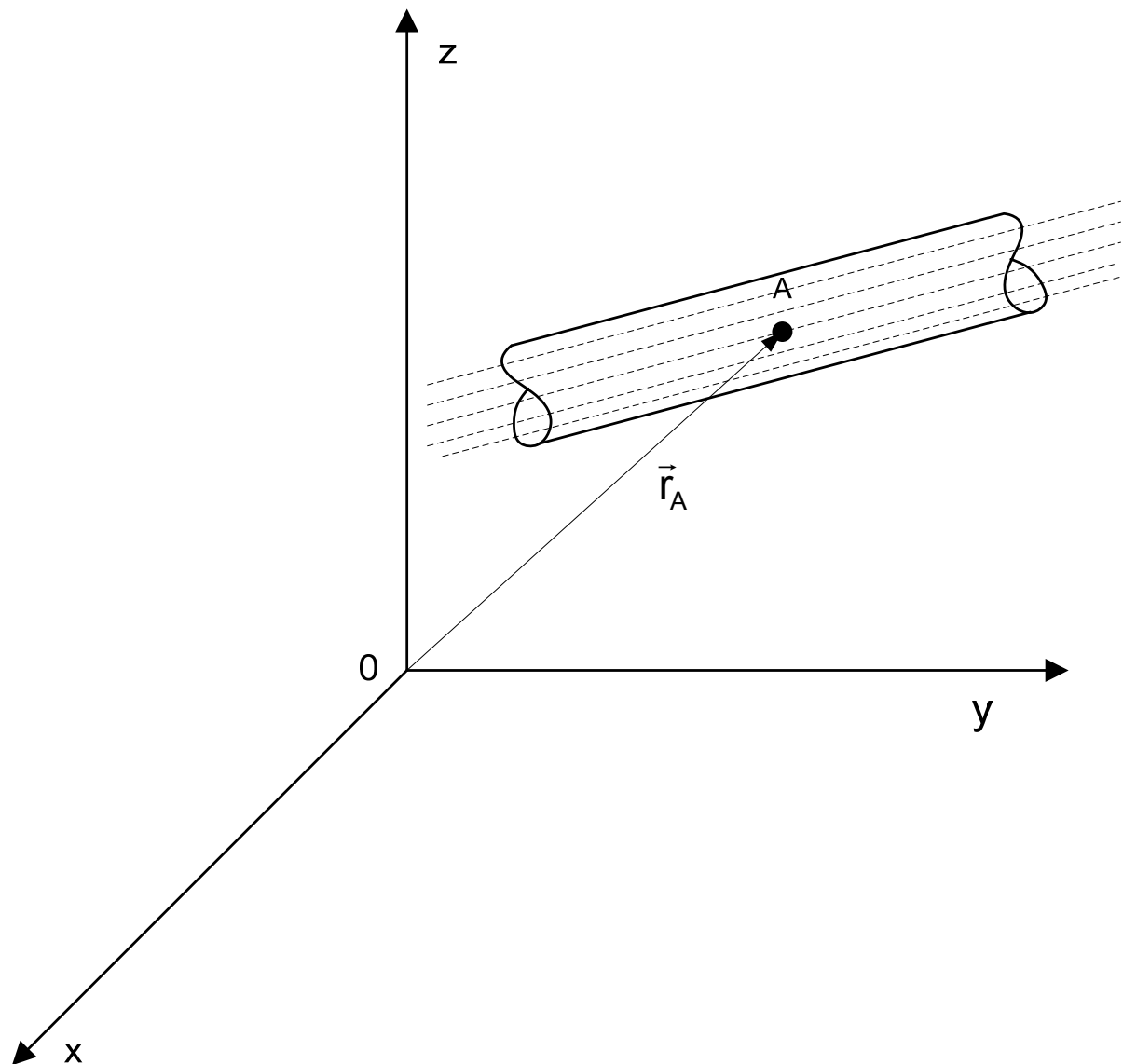
Stacionarno strujanje

- 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_{t12} [J] odnosno w_{t12} [J/kg])
- pojavljuje na osovini turbostroja (parna ili plinska turbina, pumpa,...) odnosno na osovini stapnog (parnog) stroja
- kako odrediti tehnički rad različitih otvorenih sustava (stapnih 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

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

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

Princip očuvanja mase za otvoreni sustav – analitički oblik

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Analitički oblik principa očuvanja mase za JSSP otvorenih sustava

➤ 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)

- 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:

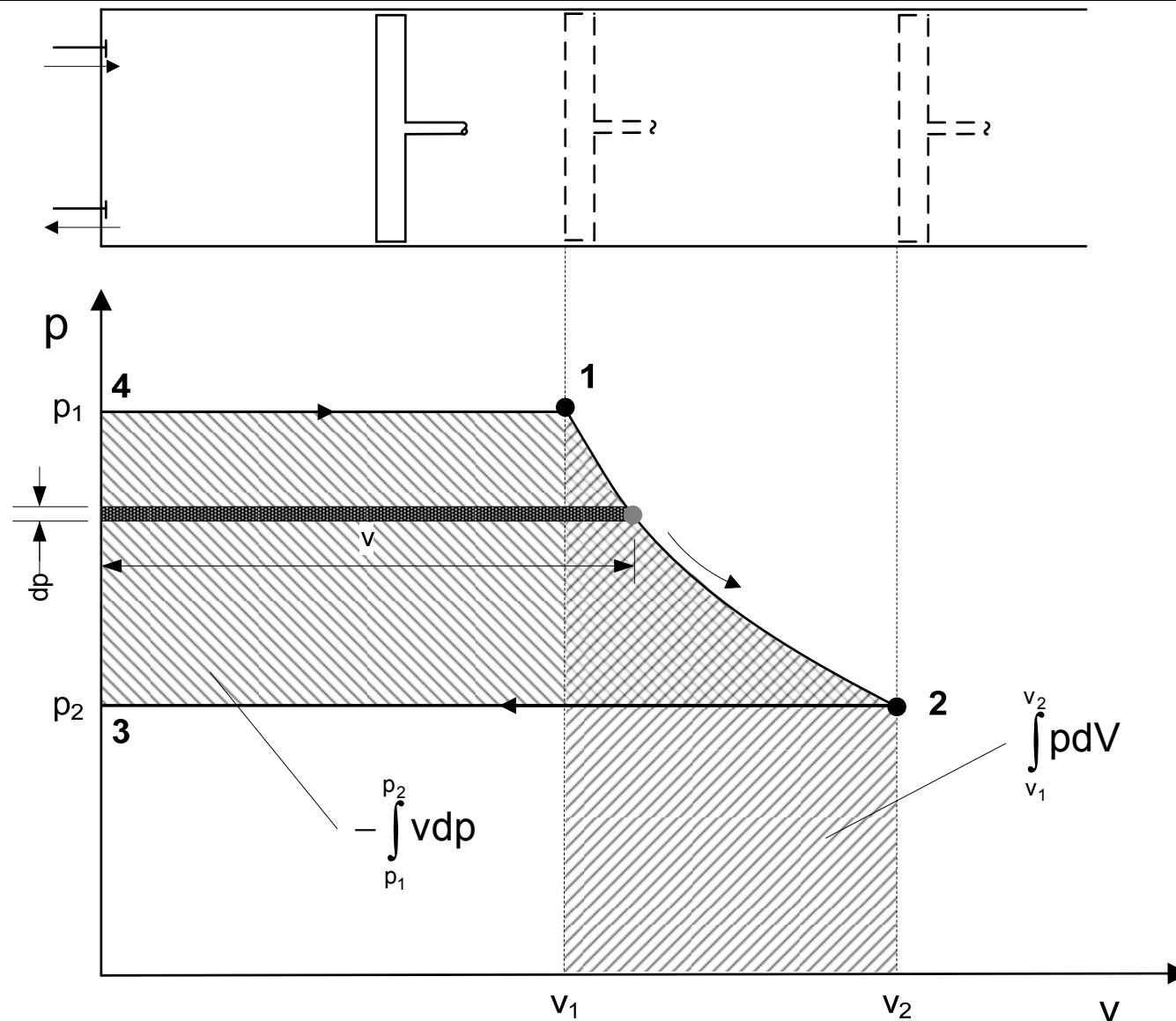
$$\dot{Q}_{KV} = \frac{d}{dt} \iiint_{KV} \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right) \rho dV + \oint_{KP} \left(u + pv + \frac{c^2}{2} + gz \right) \rho \vec{c}_r d\vec{A} + \dot{W}_{KV} \quad [\text{J/s}]$$

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“.

Proces među stalnim tlakovima



Tehnički rad stapnog stroja

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

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

Tehnički rad stapnog stroja

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

$$\int_{p_1}^{p_2} v dp .$$

Budući da površina ne može biti negativna, to vrijedi:

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

Veza mehaničkog rada promjene volumena i tehničkog rada

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

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

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

Tehnički rad parne turbine

U termoelektranama, međutim, stapni je parni stroj istisnut parnim turbinama. (***Zašto?***)
Možemo li relacijom za mehanički rad stapnog stroja odrediti tehnički rad turbine? Na to ćemo pitanje dobiti odgovor primijenimo li prvi glavni stavak termodinamike za jednodimenzionalne, stacionarne, strujne procese na proces u stapnom stroju i turbini. No prije toga morat ćemo izvesti analitički oblik stavka.

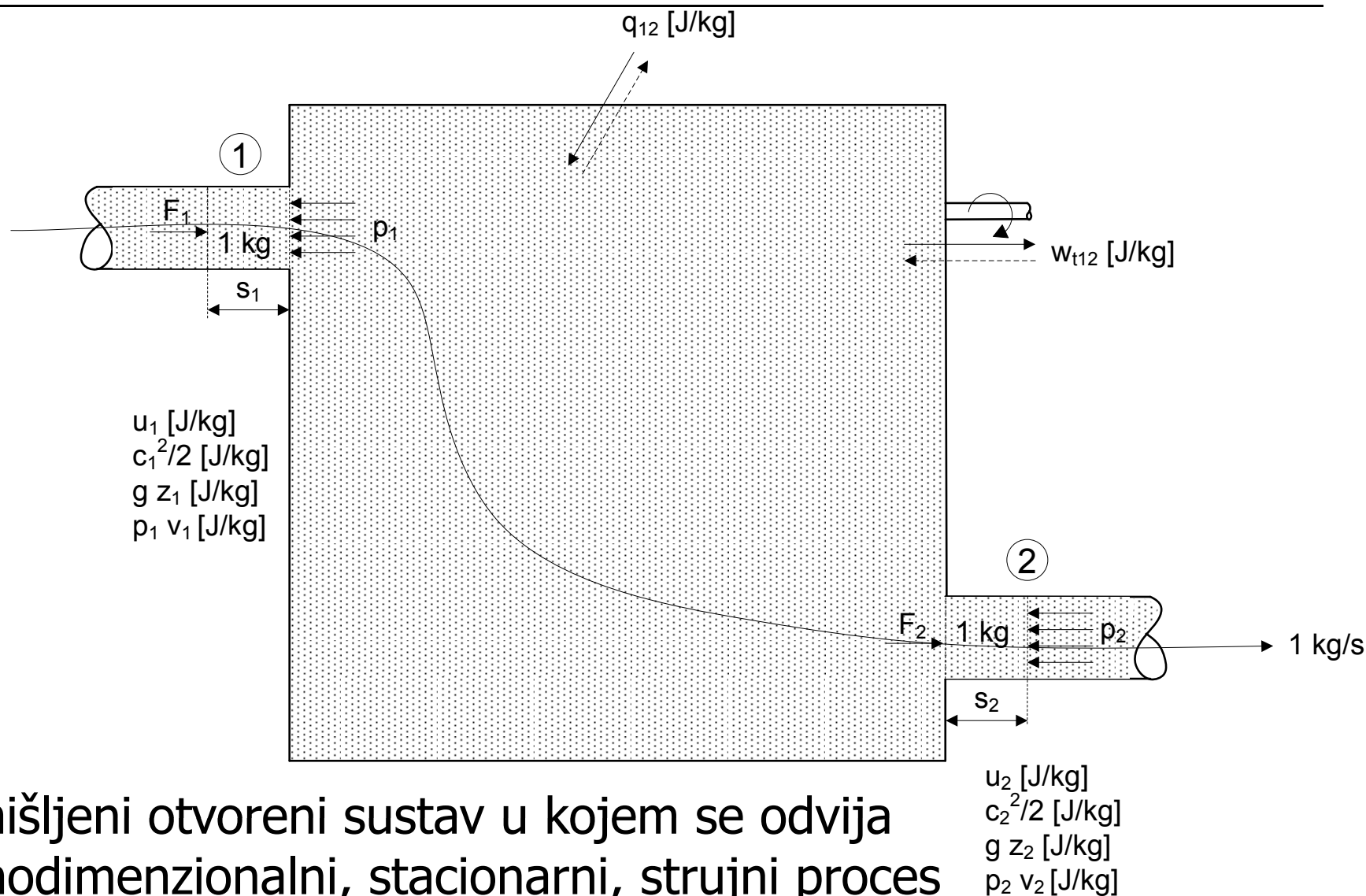
Prvi glavni stavak termodinamike za JSS processe otvorenih sustava

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

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

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 ustrojava u otvoreni sustav.

Rad strujanja, entalpija

Na izlazu iz otvorenog sustava rad je strujanja:

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

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?

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

Istovjetnost relacija

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

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

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

$$h = u + pv$$

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

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

$$du + p dv = dq = dh - v dp$$

Istovjetnost relacija

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

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

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

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

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

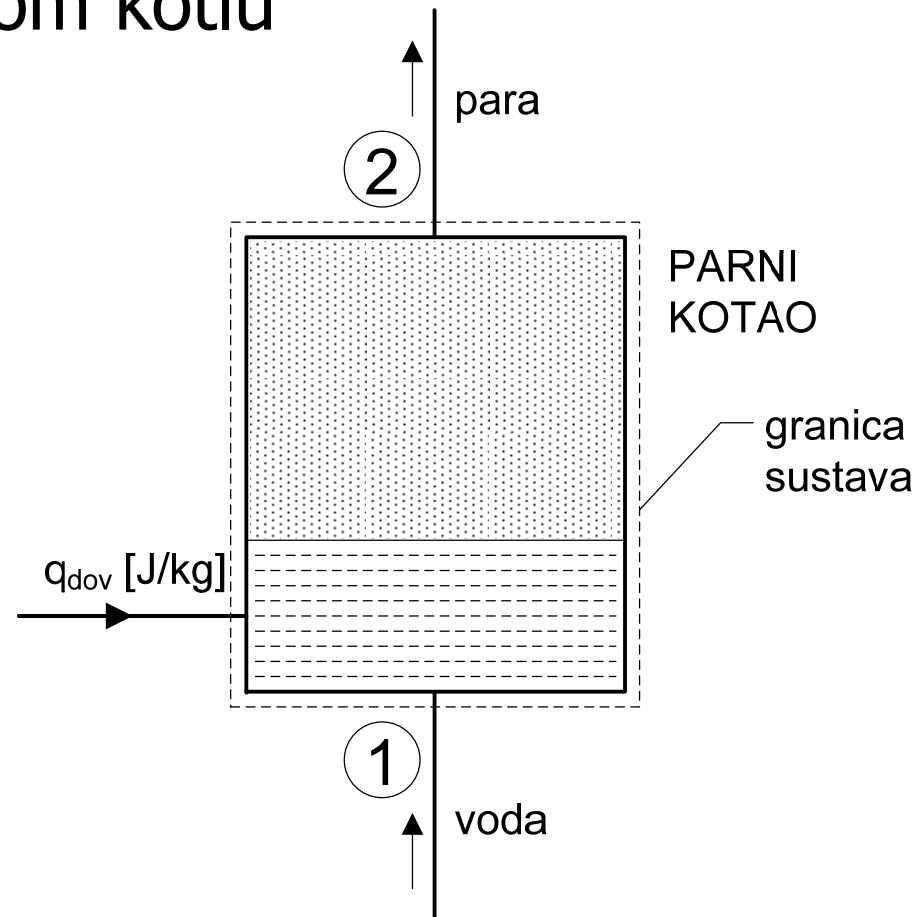
Istovjetnost relacija

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 i hidroelektrana

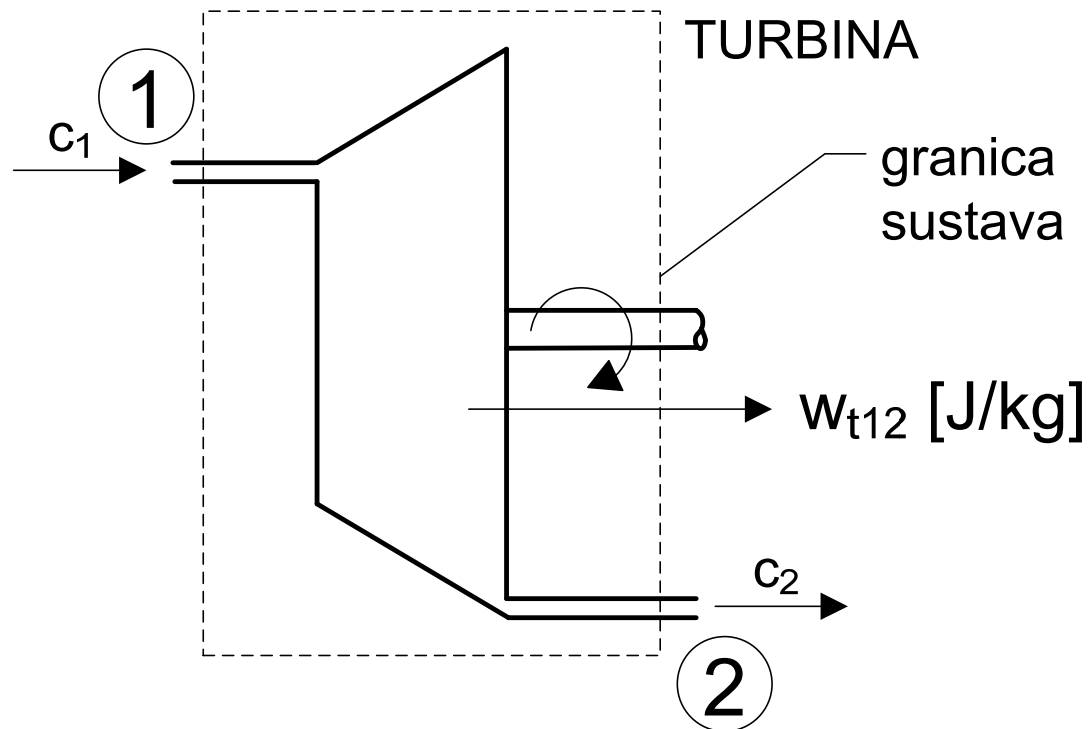
Proces u parnom kotlu



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

JSS procesi otvorenih sustava termoelektrana i hidroelektrana

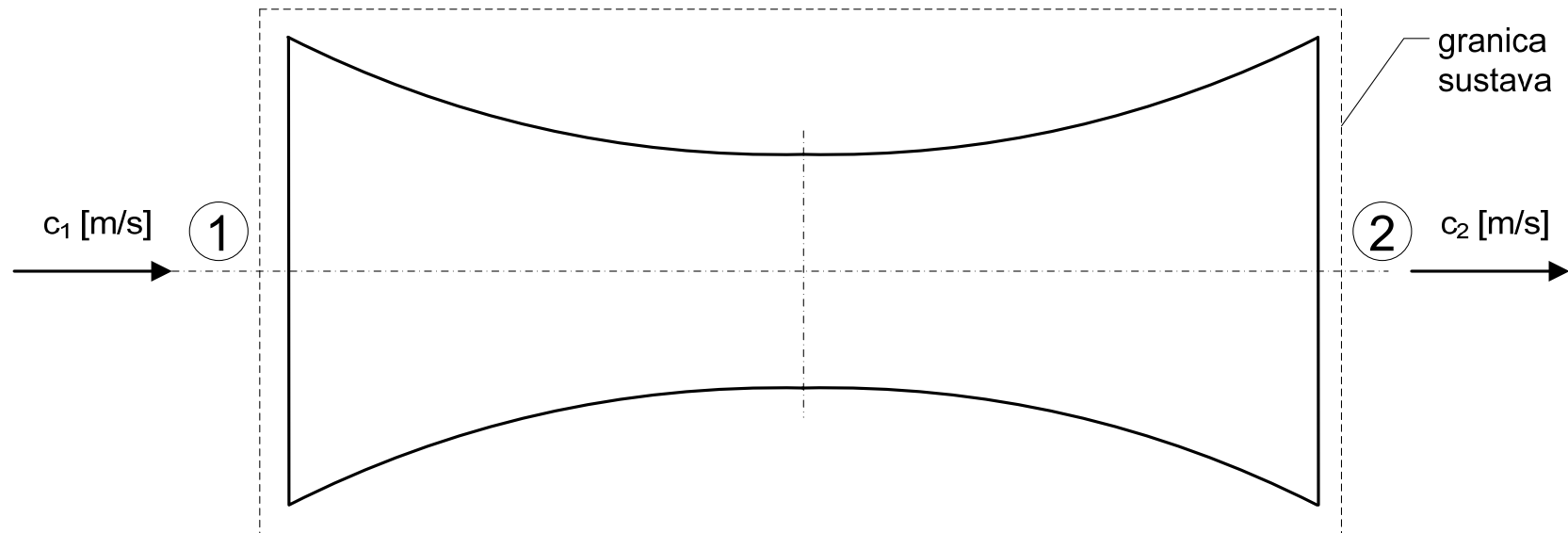
Proces u parnoj ili plinskoj turbini



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

JSS procesi otvorenih sustava termoelektrana i hidroelektrana

Brzina plina na izlazu iz de Lavalove sapnice

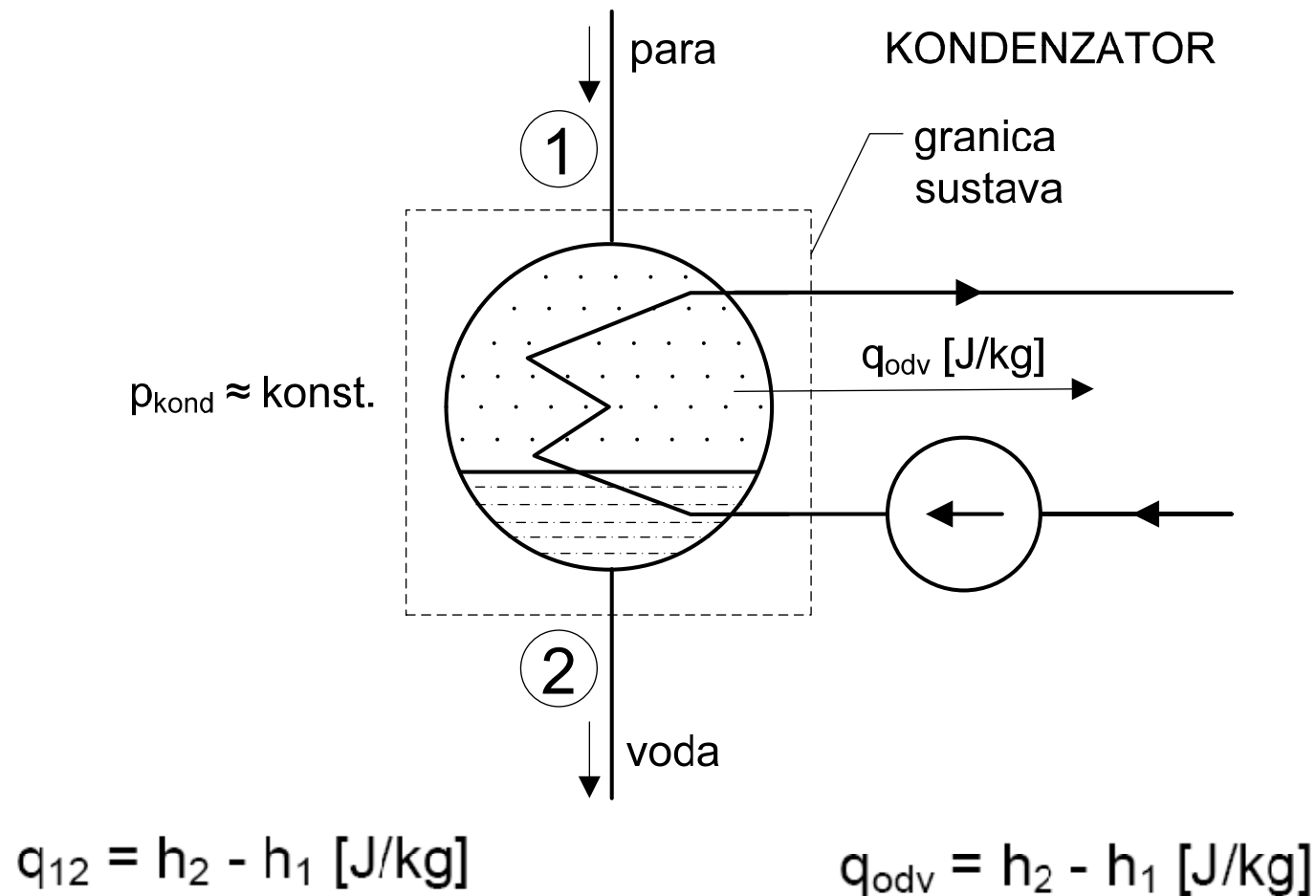


$$c_2^2 = 2(h_1 - h_2) + c_1^2$$

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

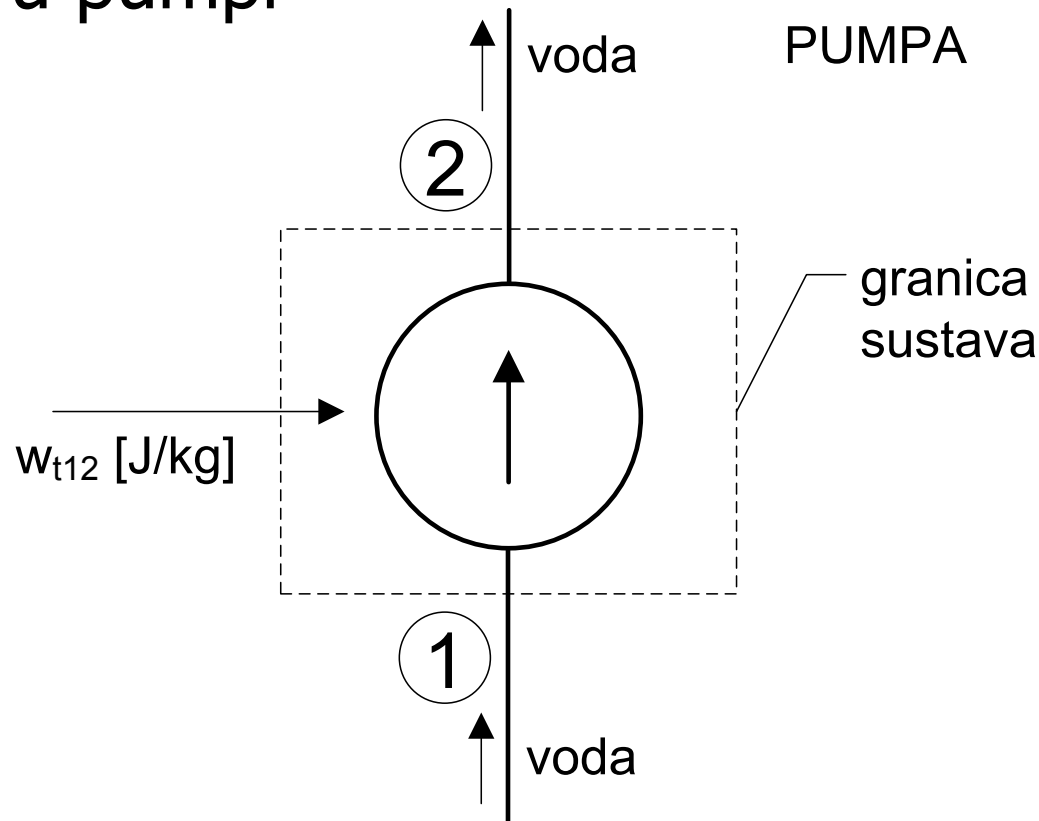
JSS procesi otvorenih sustava termoelektrana i hidroelektrana

Proces u kondenzatoru



JSS procesi otvorenih sustava termoelektrana i hidroelektrana

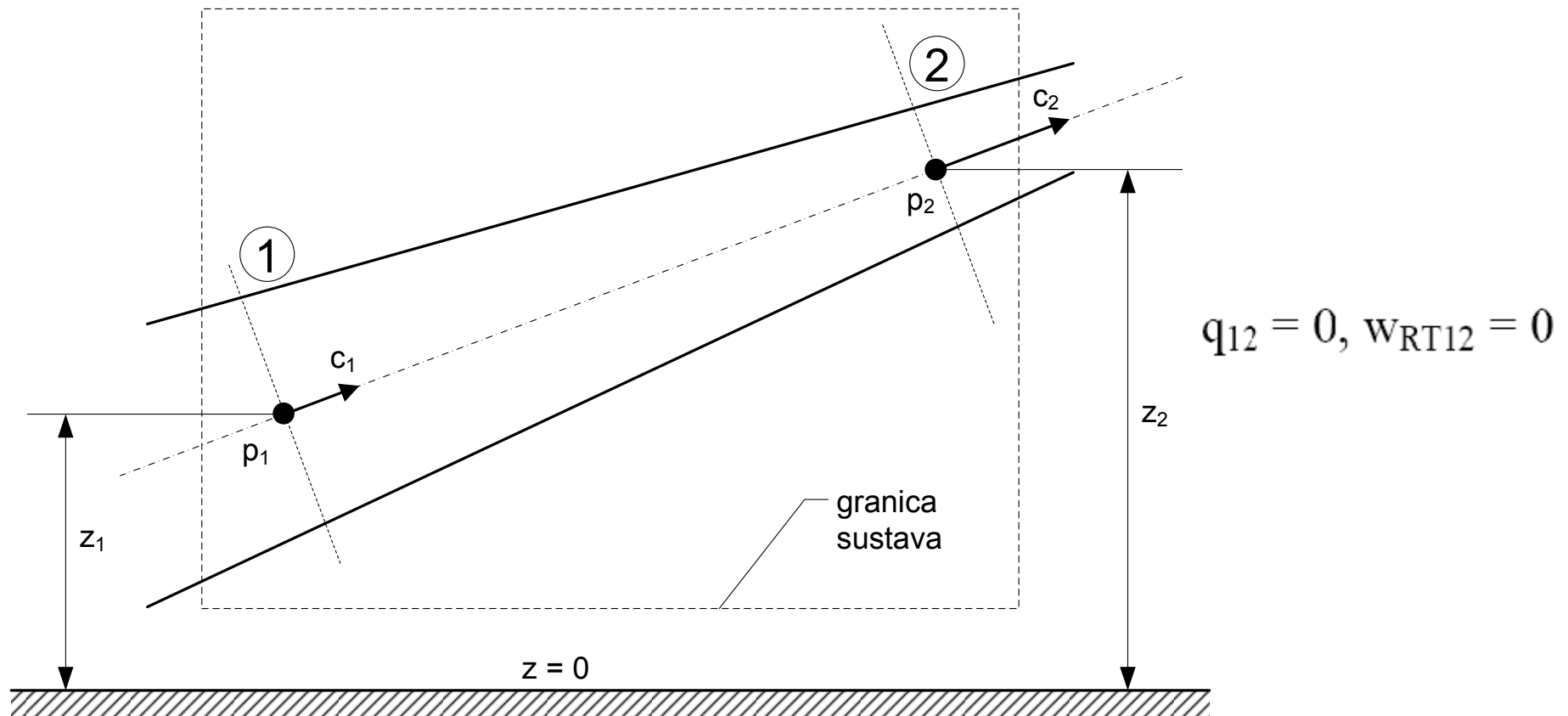
Proces u pumpi



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

JSS procesi otvorenih sustava termoelektrana i hidroelektrana

Strujanje vode u cjevovodu: **Bernoullieva** jednačba



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

JSS procesi otvorenih sustava termoelektrana i hidroelektrana

Strujanje vode u cjevovodu: **Bernoullieva jednačba**

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

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

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

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

JSS procesi otvorenih sustava termoelektrana i hidroelektrana

Tehnički rad vodne turbine

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

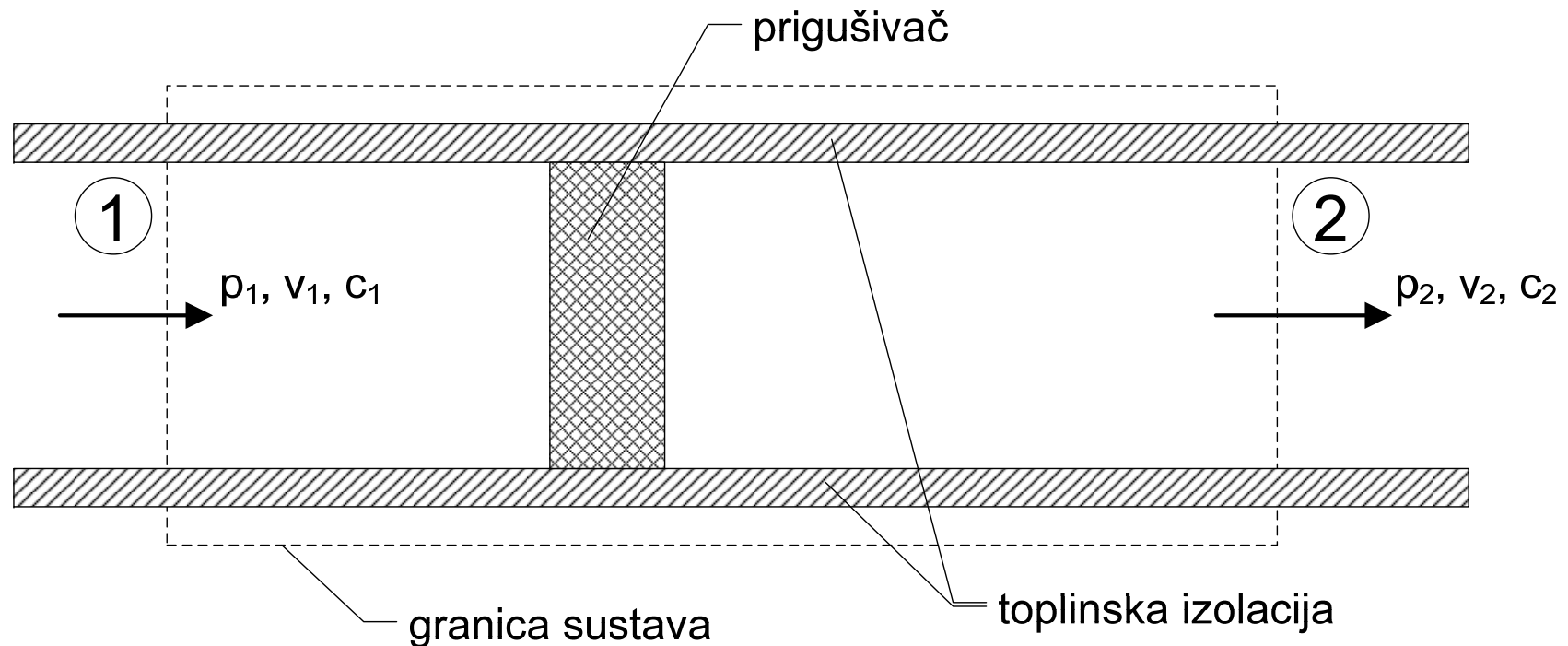
$$w_{t12} = -v(p_2 - p_1) - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \text{ [J/kg]}$$

$v = \text{konst.}$

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

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

Proces prigušivanja



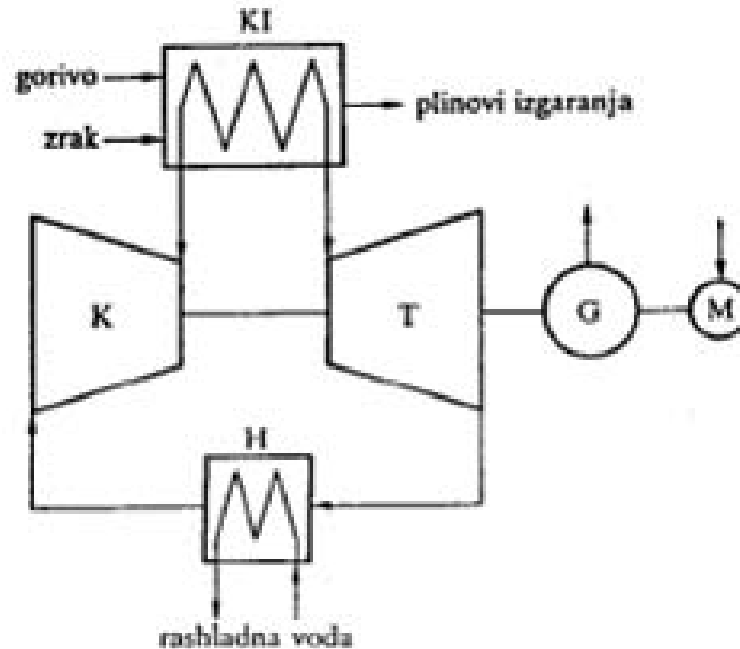
$$q_{12} = 0 \text{ i } w_{t12} = 0 \quad \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2 \approx 0) \quad z_1 = z_2$$

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

Osnove rada termoelektrana s plinskom turbinom – zatvoreni proces

- s energetske je gledišta „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 okoline.)
- 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



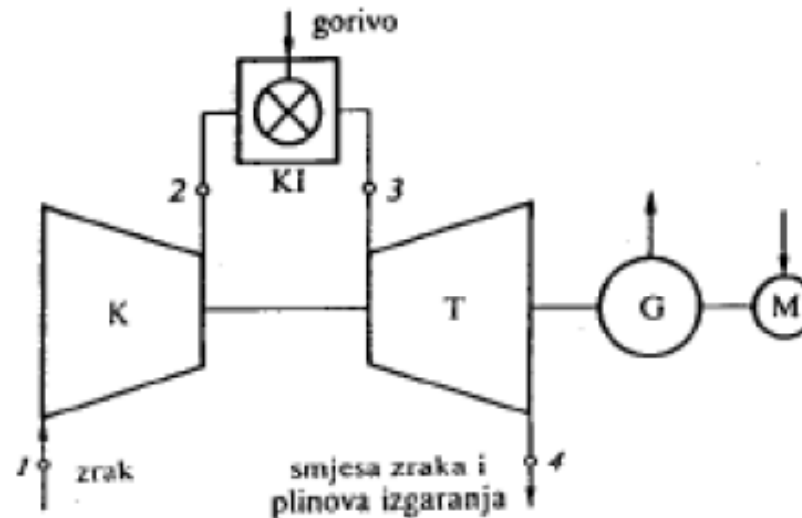
Shema najjednostavnije izvedbe termoelektrane s plinskom turbinom i zatvorenim procesom:

K – kompresor, KI – komora za izgaranje, T – turbina,
H – hladnjak, G – sinkroni generator, M – motor za
stavljanje postrojenja u pogon

Osnove rada termoelektrana s plinskom turbinom – otvoreni proces

Prednost je zatvorenog proces, 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



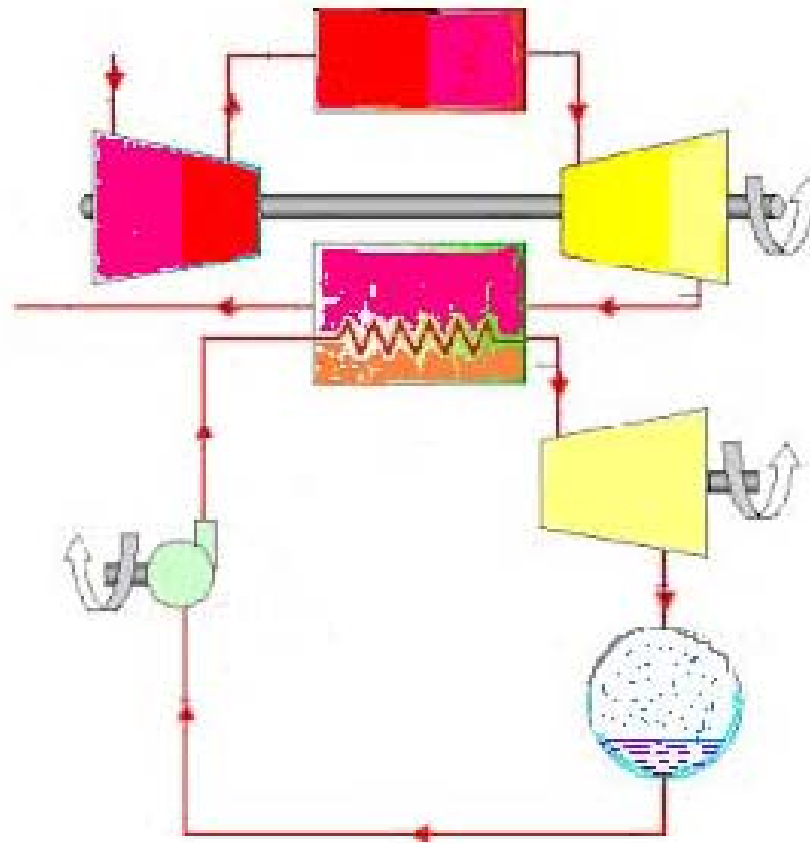
Shema najjednostavnije izvedbe termoelektrane s plinskom turbinom i otvorenim procesom:

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

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

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

**No, kako odrediti 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 postaviti matematičke modele 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.

Primjer

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

Početno kamen je 10,2 m iznad vode i kamen i voda su na temperaturi okoline. 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 - 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:

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

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 - rješenje

Dakle je $\delta E_{\text{kin}} = 1\text{kJ}$, a $\delta E_{\text{pot}} = -1\text{kJ}$. (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):

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

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

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

Primjer - 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 - 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 okolici.

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

Pitanje

S terase zgrade visoke 100 m tri jednake kugle (masom i obujmom) izbace se s istom početnom brzinom, 100 m/s, u tri različita smjera:

- a) vertikalno (okomito) uvis,
- b) vertikalno (okomito) nadolje, i
- c) horizontalno (vodoravno).

Koja će kugla s najvećom brzinom udariti o tlo, zanemarimo li otpor zraka?

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.