

Ograničenja pretvorbama i pretvorbe oblika energije u eksergiju (mehanički rad)

Drugi glavni stavak termodinamike, entropija, gubici mehaničkog rada, eksergija oblika energije, određivanje eksergije

Energijske tehnologije

FER 2008.



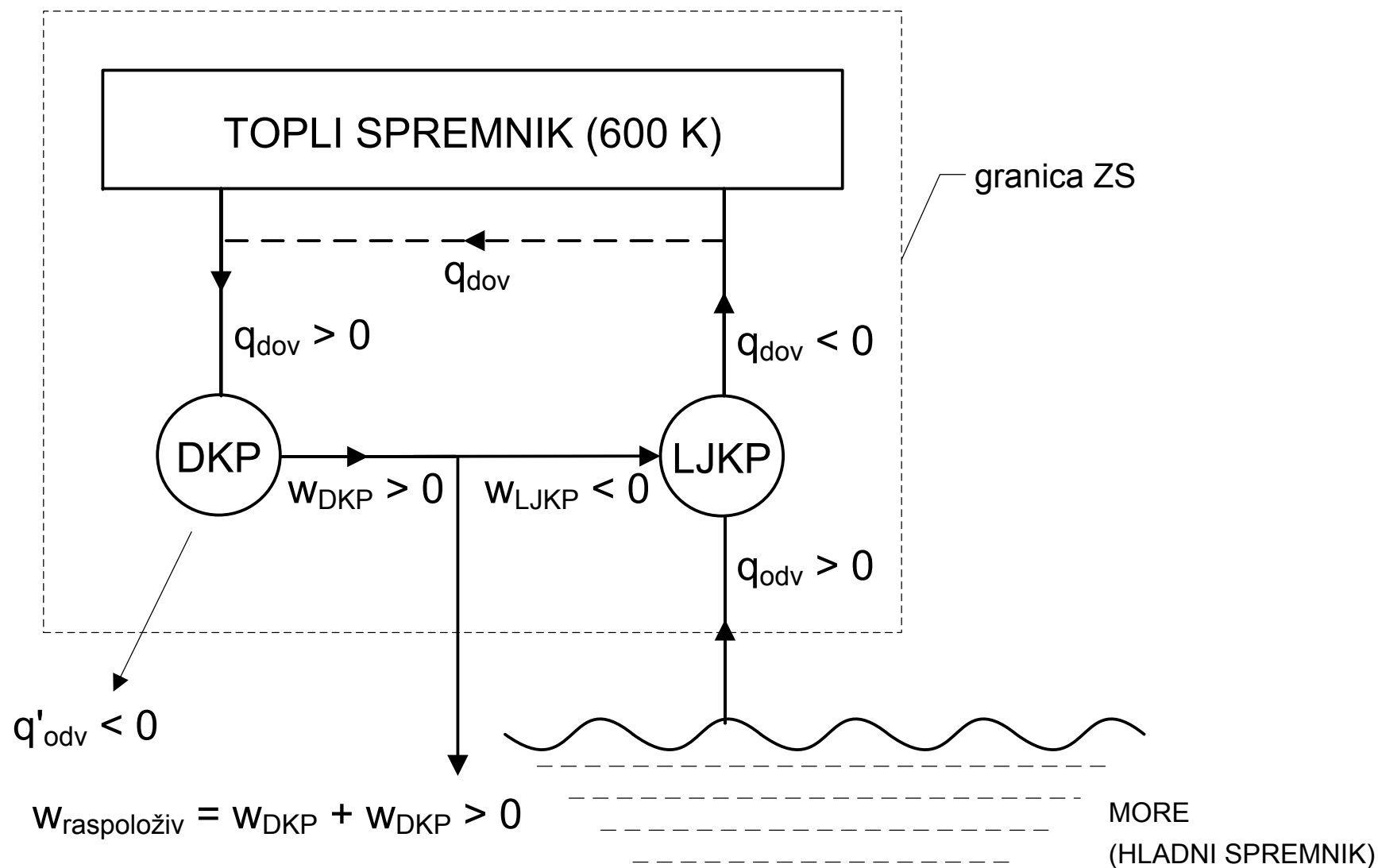
Gdje smo:

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 en.
13. Prijenos i distribucija el. en.
14. Skladištenje energije
15. 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

Perpetuum mobile druge vrste



Mehanički rad zajedničkog rada kružnih procesa: ljevokretnog i desnokretnog

$$W_{LJKP} = q_{dov} + q_{odv} < 0$$

$$W_{DKP} = q_{dov} > 0$$

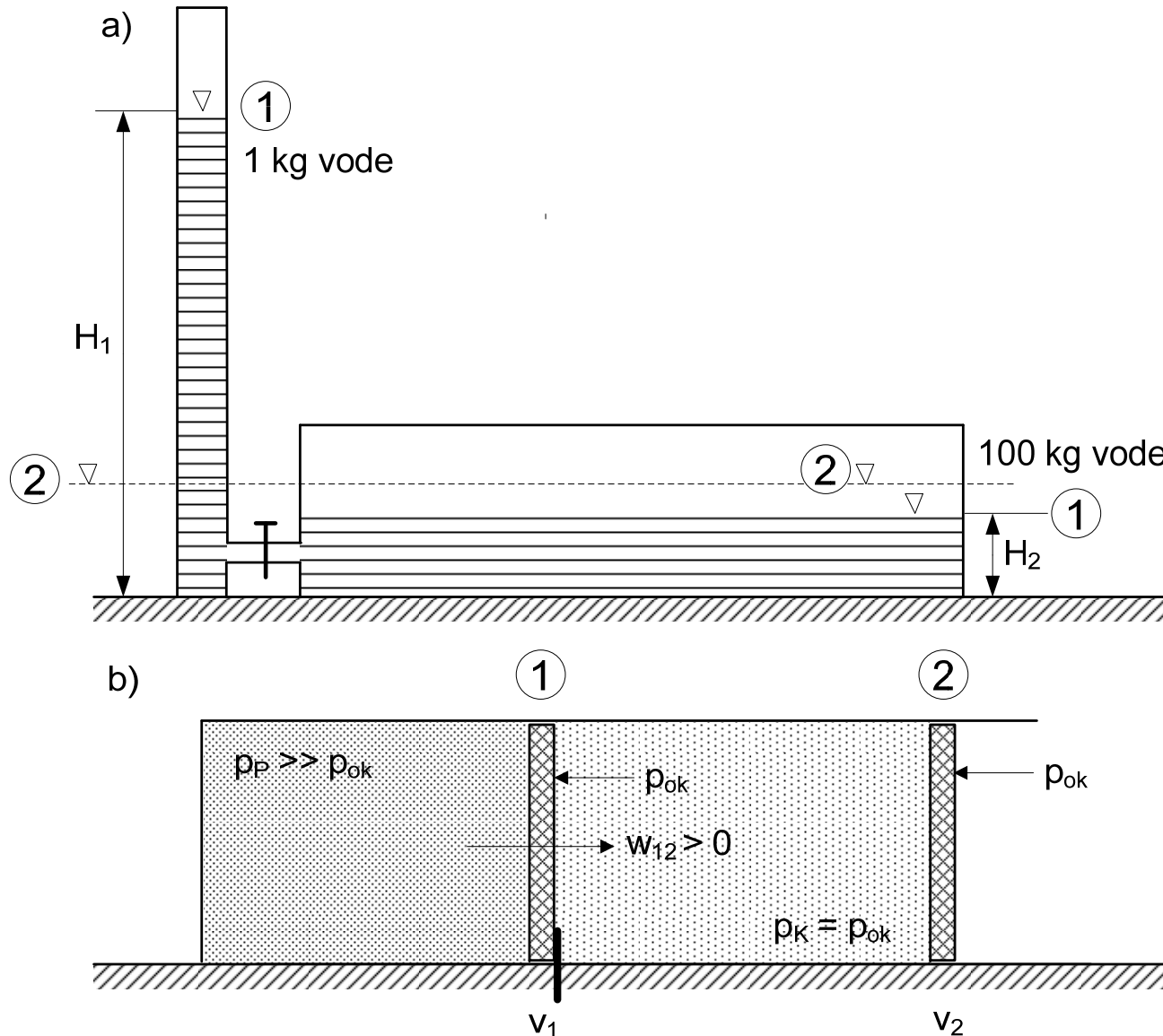
$$W_{raspoloživ} = W_{DKP} + W_{LJKP} = q_{odv} > 0.$$

$$q_{odv} > |q'_{odv}|$$

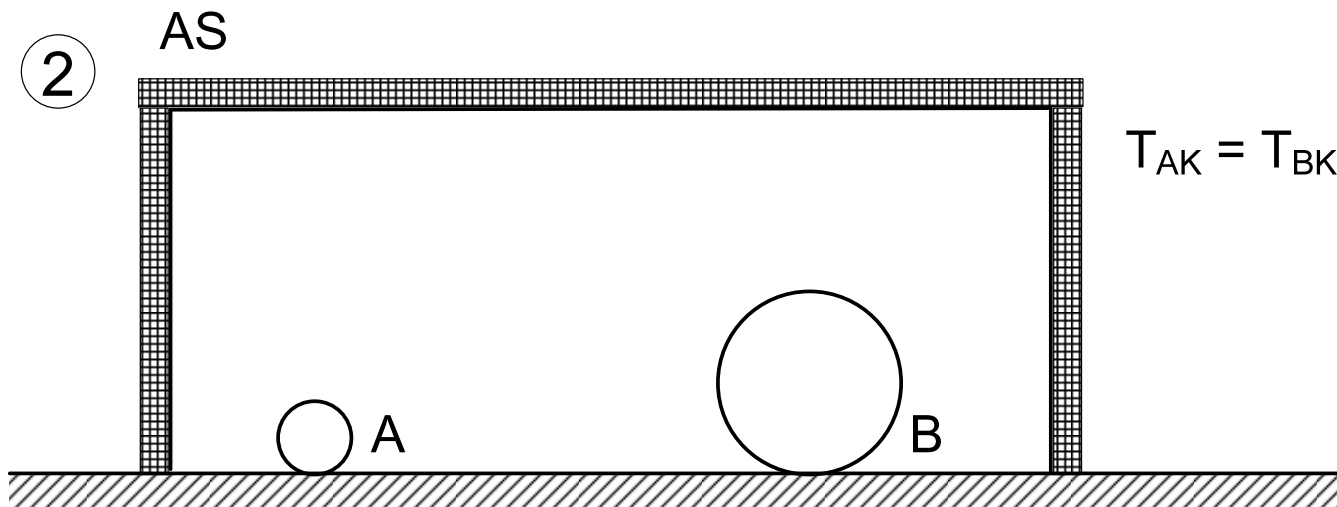
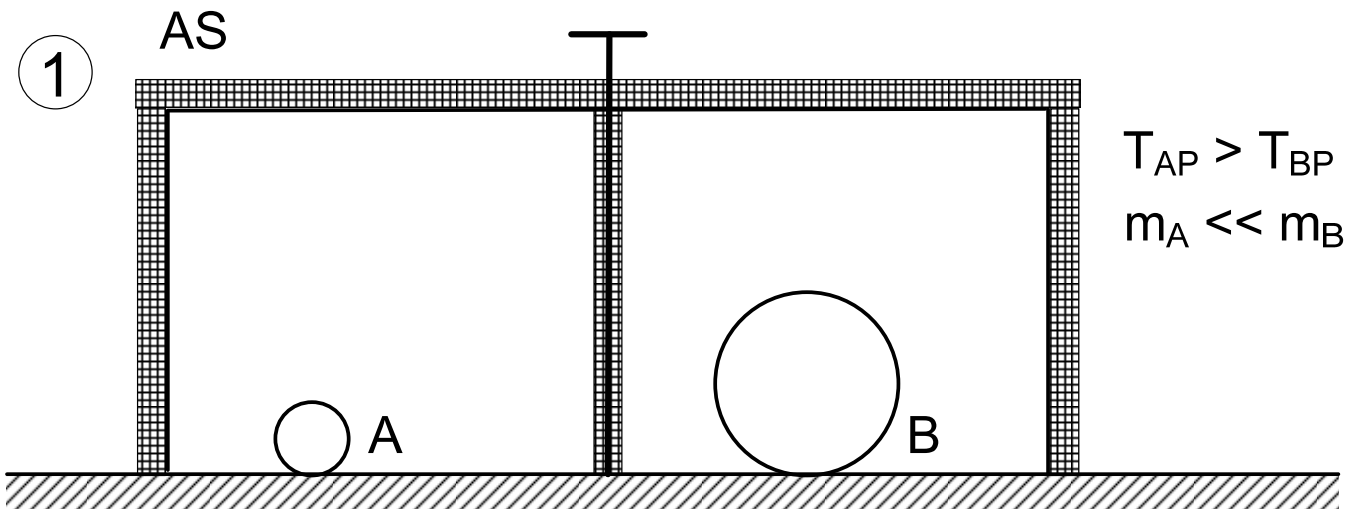
$$W_{LJKP} = q_{dov} + q_{odv} \quad W_{DKP} = q_{dov} + q'_{odv}$$

$$W_{raspoloživ} = W_{DKP} + W_{LJKP} = q_{odv} + q'_{odv} = q_{odv} - |q'_{odv}| > 0$$

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, samopoticajni, 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 okolini, odnosno i u sustavu i okolini

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 je moguće provoditi kružni proces sa samo jednim toplinskim spremnikom, je li je moguće svu (toplinsku) energiju dovedenu u (kružni) proces, ili neki sličan proces odnosno procese, trajno pretvarati u mehanički rad?
- je li je moguće unutrašnju kaloričku energiju akumulirana u okolici (u podsustavima okolice: 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 toplije, 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

$$ds = \frac{dq}{T} + \frac{d}{T} (\text{anergija nastala u nepovratljivim procesima}) =$$
$$= \frac{dq}{T} + ds_{\text{proizvedena}} \quad [\text{J/kgK}] \quad dS = \frac{dQ}{T} + dS_{\text{proizvedena}} \quad [\text{J/K}]$$

$$ds_{AS} = \frac{dq}{T} + \frac{|dw_{\text{trenja}}|}{T} > 0$$

$$ds_{\text{pov}} = \frac{dq_{\text{povratljivo}}}{T} \equiv \left(\frac{dq}{T} \right)_{\text{povratljivo}}$$

$$ds_{AS} = 0$$

$$ds = \frac{dq}{T}$$

Promjena entropije, povratljivost i nepovratljivost

- ostaje li entropija AS konstantna ($ds_{AS} = 0$), za vrijeme energetske procesa, u adijabatskom se 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)

Princip rasta entropije

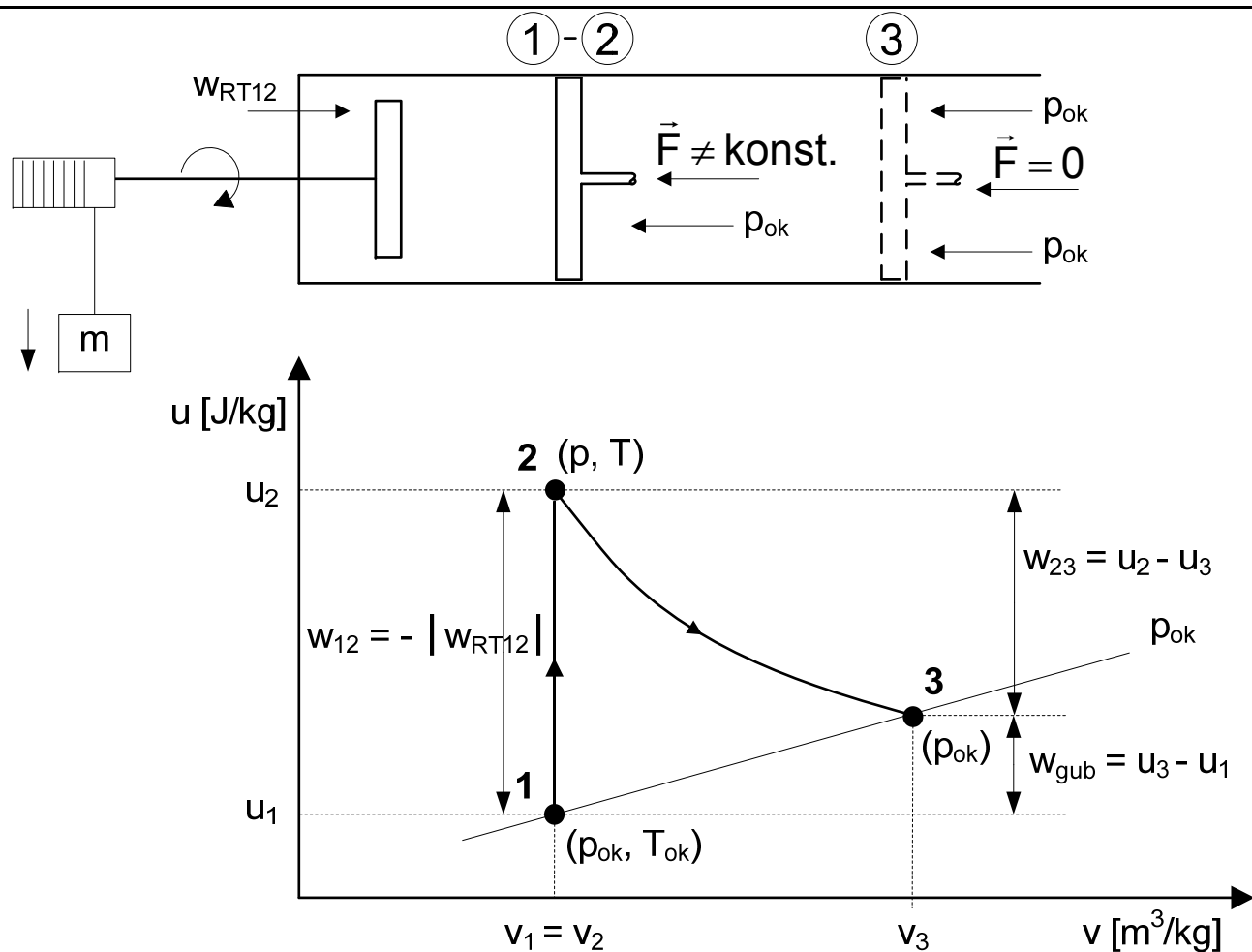
- još neke od formulacija drugog glavnog stavka termodinamike

$$ds_{AS} \geq 0$$

**Svi su prirodni procesi nepovratljivi.
Povratljivi su procesi samo idealizirani
granični slučajevi nepovratljivih procesa.**

**Entropija adijabatskog sustava raste s
vremenom dosežući svoju maksimalnu
vrijednost.**

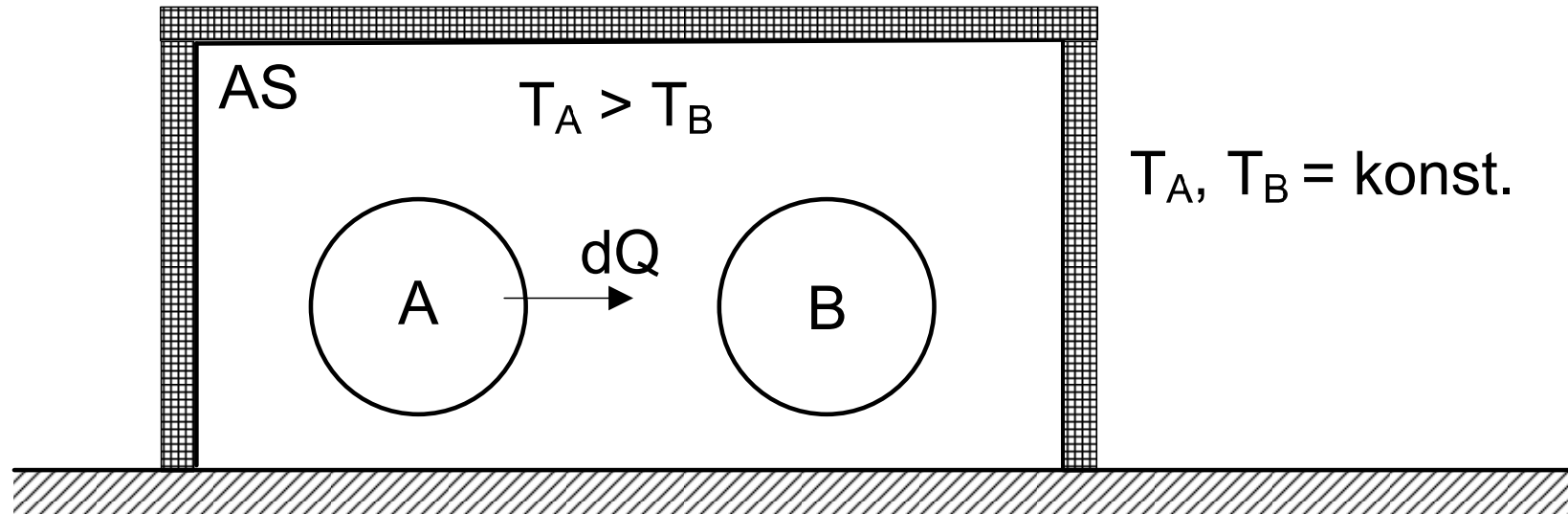
Entropija i nepovratljivost - rad trenja



$$q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12} = u_2 - u_1 - |W_{RT12}| = 0 \quad W_{12} = -|W_{RT12}| < 0$$

$$|W_{RT12}| = u_2 - u_1 \quad q_{23} = u_3 - u_2 + w_{23} = 0 \quad W_{23} = u_2 - u_3$$

Entropija i nepovratljivost – prijelaz toplinske energije preko konačne razlike temperatura



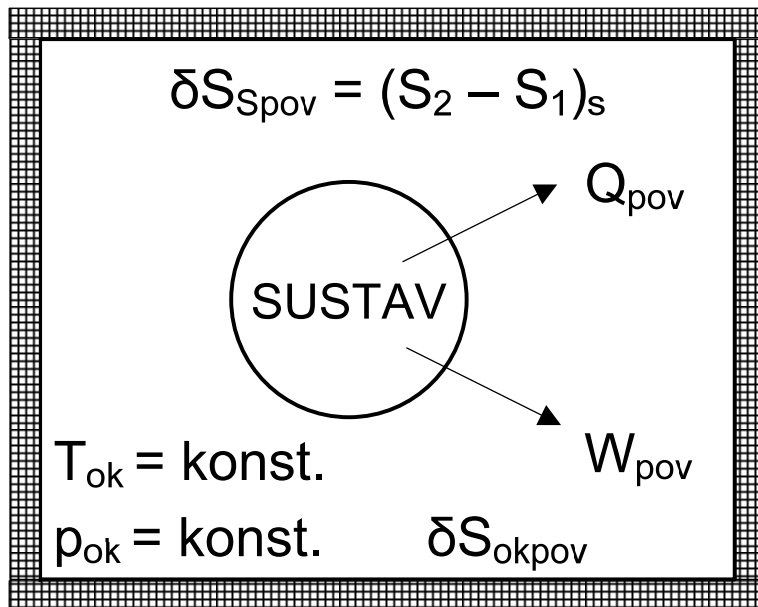
$$-dQ_A = dQ_B = dQ$$

$$dS_A = \frac{dQ_A}{T_A} = -\frac{dQ}{T_A} < 0, \quad dS_B = \frac{dQ_B}{T_B} = \frac{dQ}{T_B} > 0$$

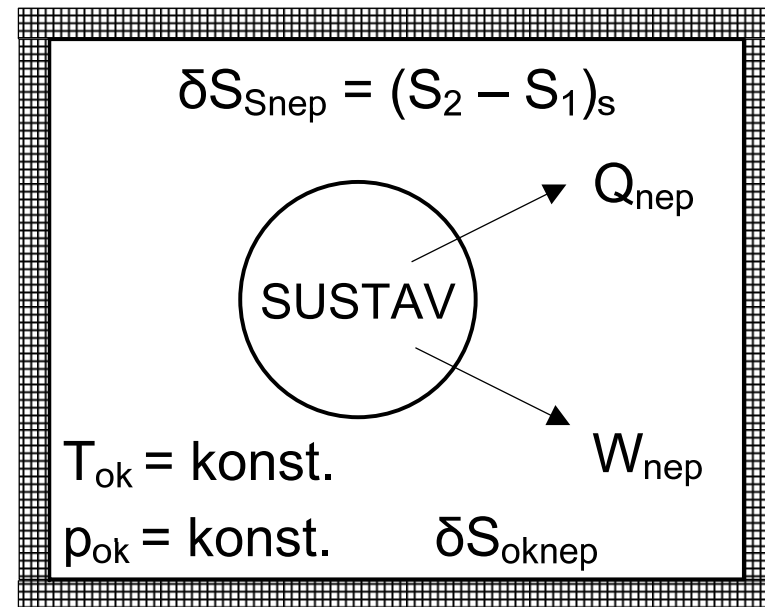
$$dS_{AS} = dS_A + dS_B = \frac{T_A - T_B}{T_A T_B} dQ$$

Što je s energetskeg 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?

$$\delta S_{ASpov} = \delta S_s + \delta S_{okpov} = (S_2 - S_1)_s + \delta S_{okpov} = 0$$

$$\delta S_{ASnep} = \delta S_s + \delta S_{oknep} = (S_2 - S_1)_s + \delta S_{oknep} = \delta S_{uk} > 0$$

$$(S_2 - S_1)_s = - \delta S_{okpov}$$

$$\delta S_{uk} = \delta S_{oknep} - \delta S_{okpov}$$

$$U_1 - U_2 \text{ (} E_1 - E_2 \text{)} = Q_{pov} + W_{pov}:$$

$$U_1 - U_2 \text{ (} E_1 - E_2 \text{)} = Q_{nep} + W_{nep}$$

$$Q_{pov} + W_{pov} = Q_{nep} + W_{nep} \quad W_{pov} - W_{nep} = Q_{nep} - Q_{pov}$$

$$W_{pov} - W_{nep} = T_{ok} (\delta S_{oknep} - \delta S_{okpov}) = T_{ok} [\delta S_{oknep} + (S_2 - S_1)_s]$$

Što je s energetskeg stajališta porast entropije?

$$W_{\text{pov}} - W_{\text{nep}} = W_{\text{gubitak}} = T_{\text{ok}} \cdot \delta S_{\text{uk}} > 0$$

$$\delta S_{\text{uk}} = \delta S_{\text{oknep}} + \delta S_s = \frac{Q_{\text{nep}}}{T_{\text{ok}}} + (S_2 - S_1)_s$$

$$(S_2 - S_1)_s:$$

$$ds = \frac{dq}{T} \qquad dS = \frac{dQ}{T}$$

Promjena entropije sustava

$$ds_s \equiv ds = \frac{dq}{T} = \frac{du + pdv}{T} = \frac{dh - vdp}{T} \qquad ds = \frac{dq}{T} = c \frac{dT}{T}$$

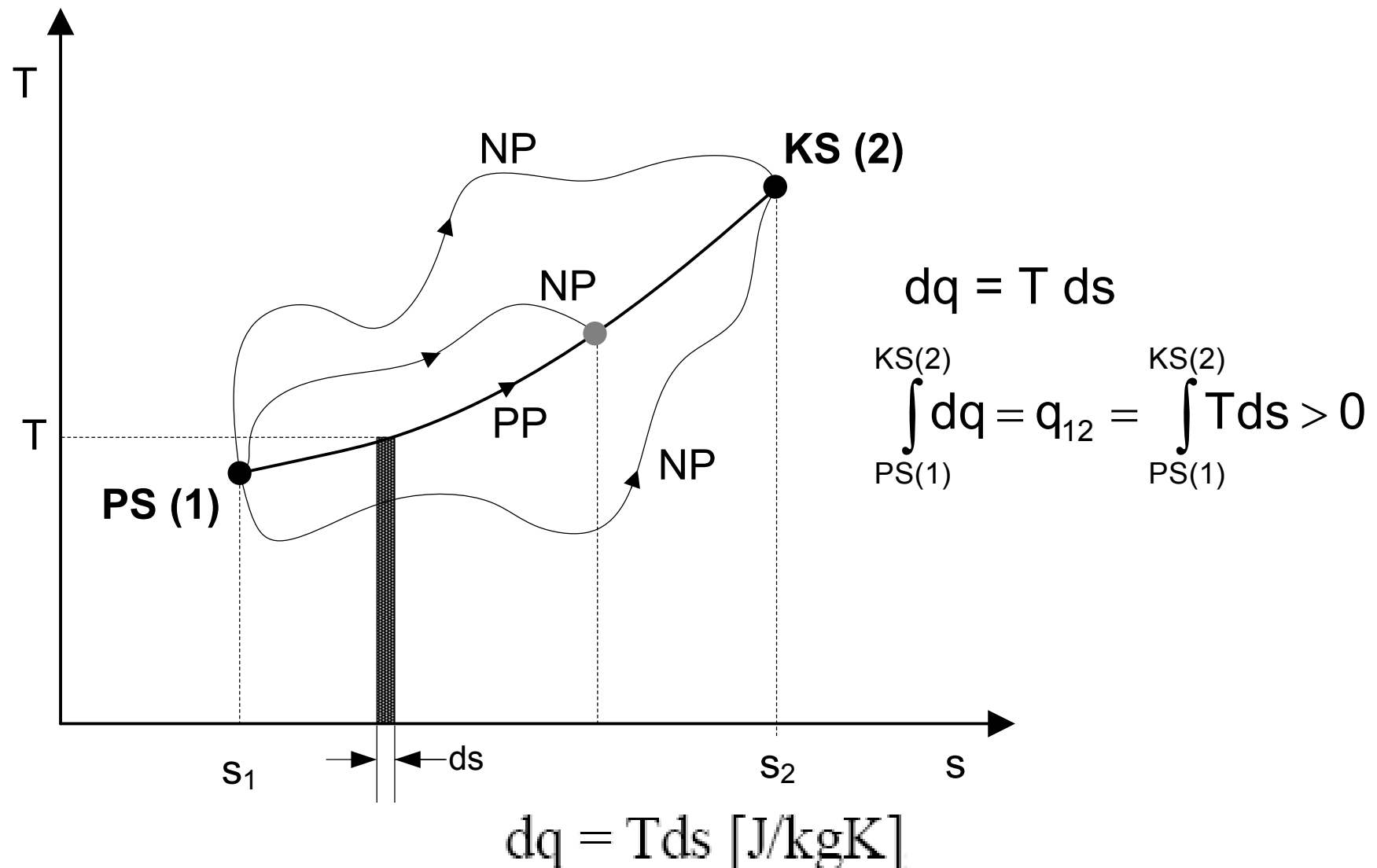
$$du = c_v dT; dh = c_p dT \text{ i } pv = RT \qquad c_v = c_p = c$$

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v} = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}$$

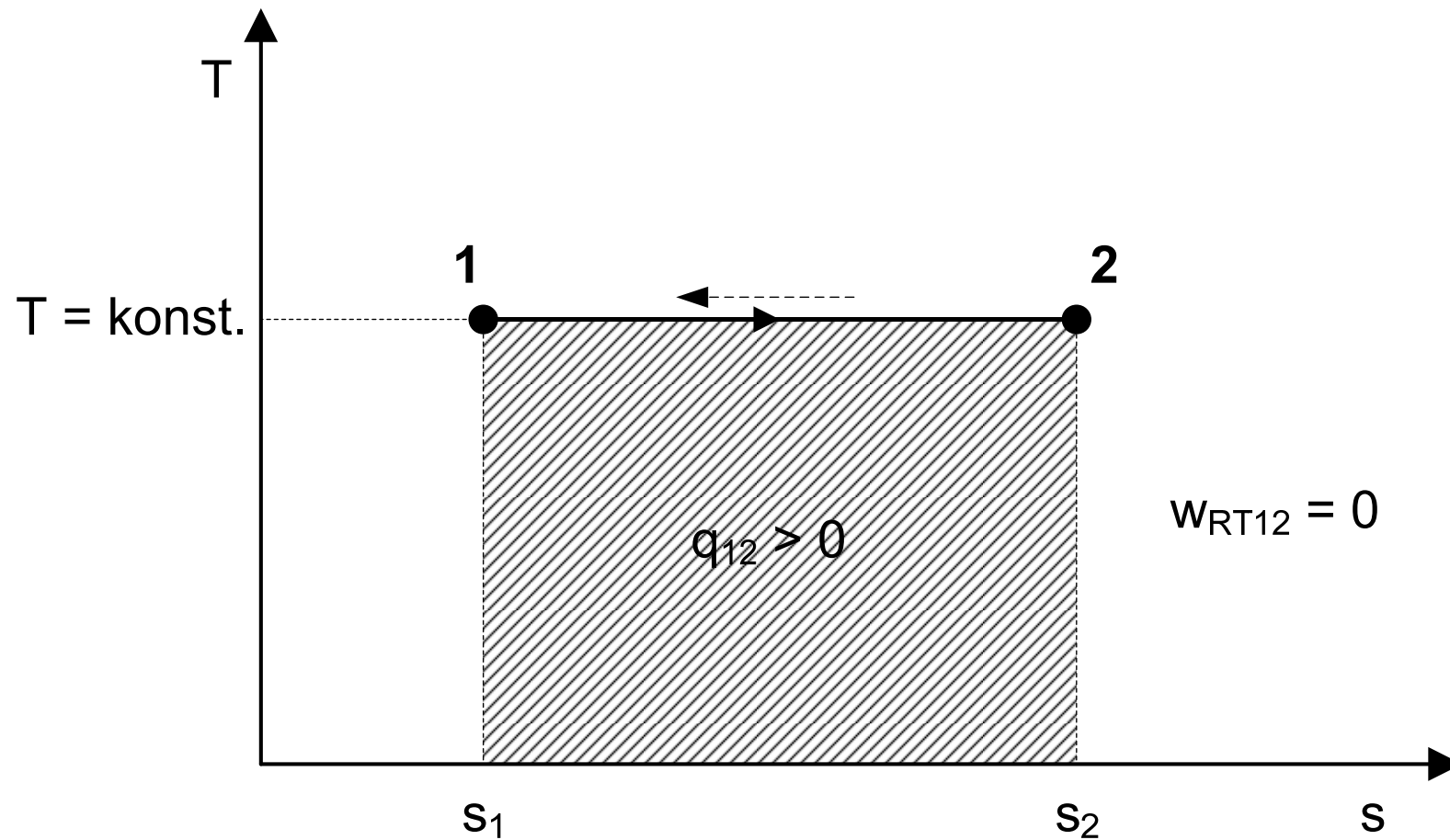
$$\int_{s_1}^{s_2} ds = c_v \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} + R \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = c_p \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} - R \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p}$$

$$(s_2 - s_1)_s \equiv s_2 - s_1 = \delta s_s \equiv \delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

T,s – dijagram

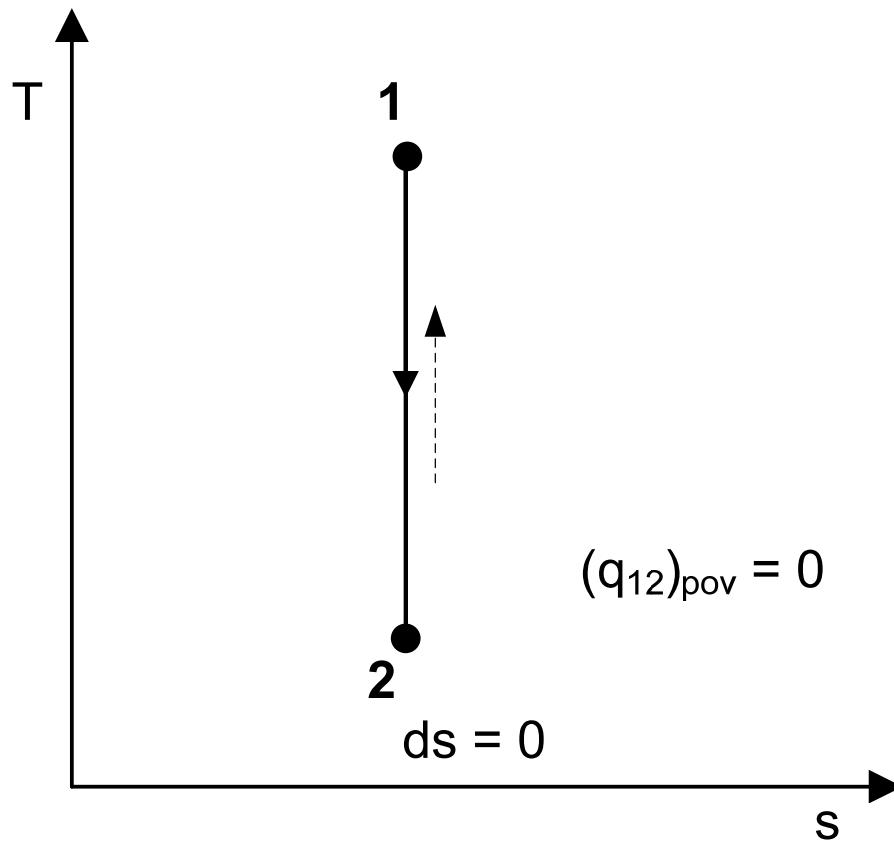


Izotermni proces



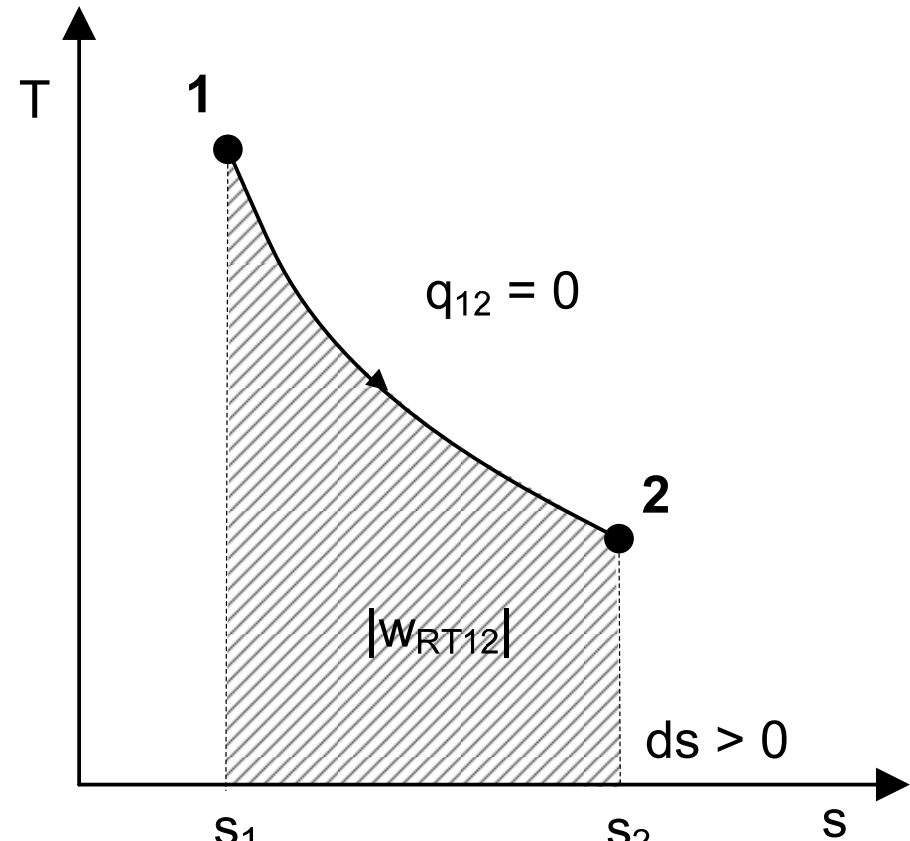
$$\delta s_T = R \ln \frac{v_2}{v_1} = -R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Izentropski i adijabatski proces



(a)

$$ds_{pov} = \frac{dq_{povratljivo}}{T} = 0 \text{ jer } q_{12} = 0$$

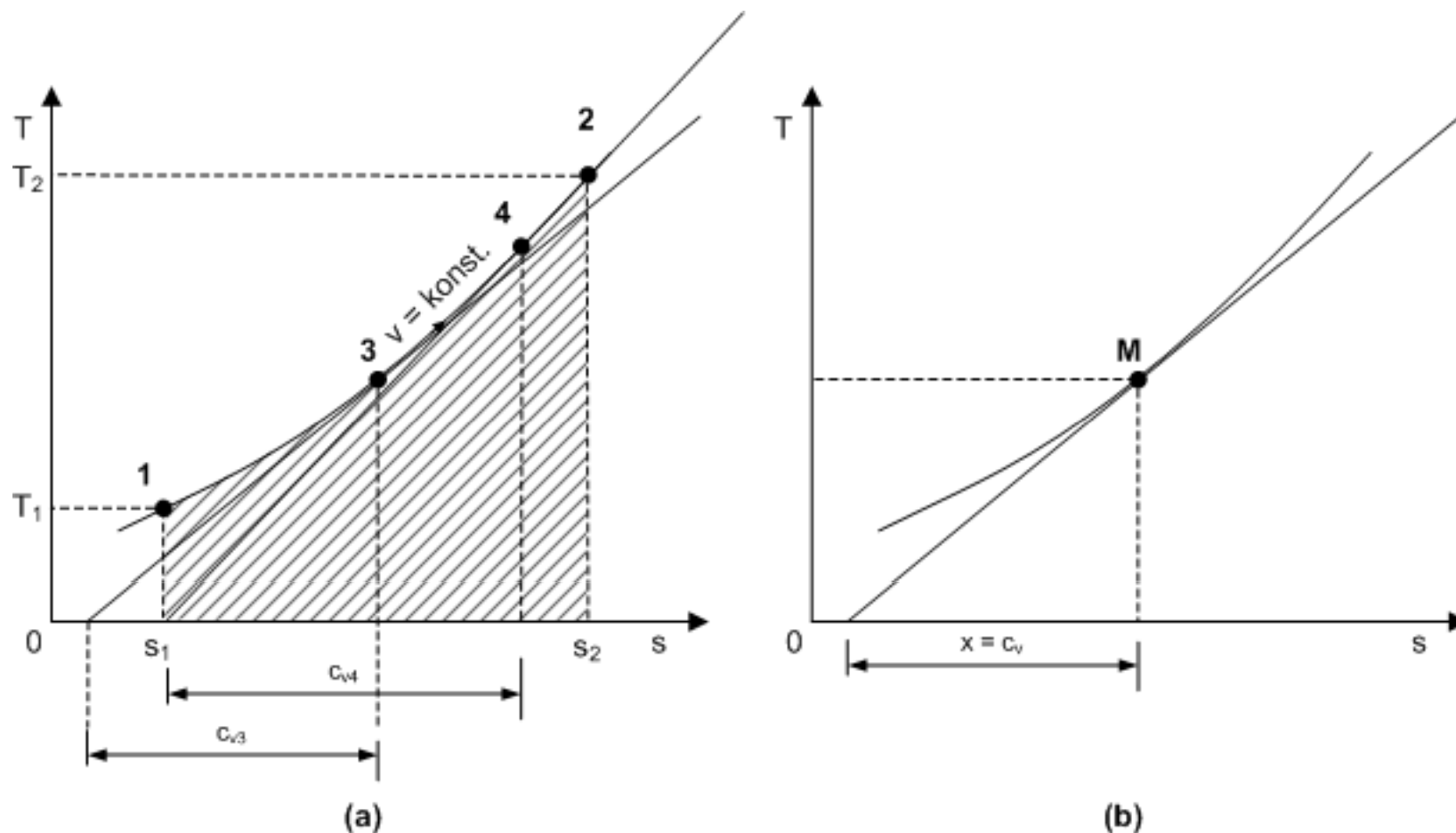


(b)

$$|w_{RT12}| = \int_1^2 T ds \quad ds = \frac{|dw_{trenja}|}{T}$$

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

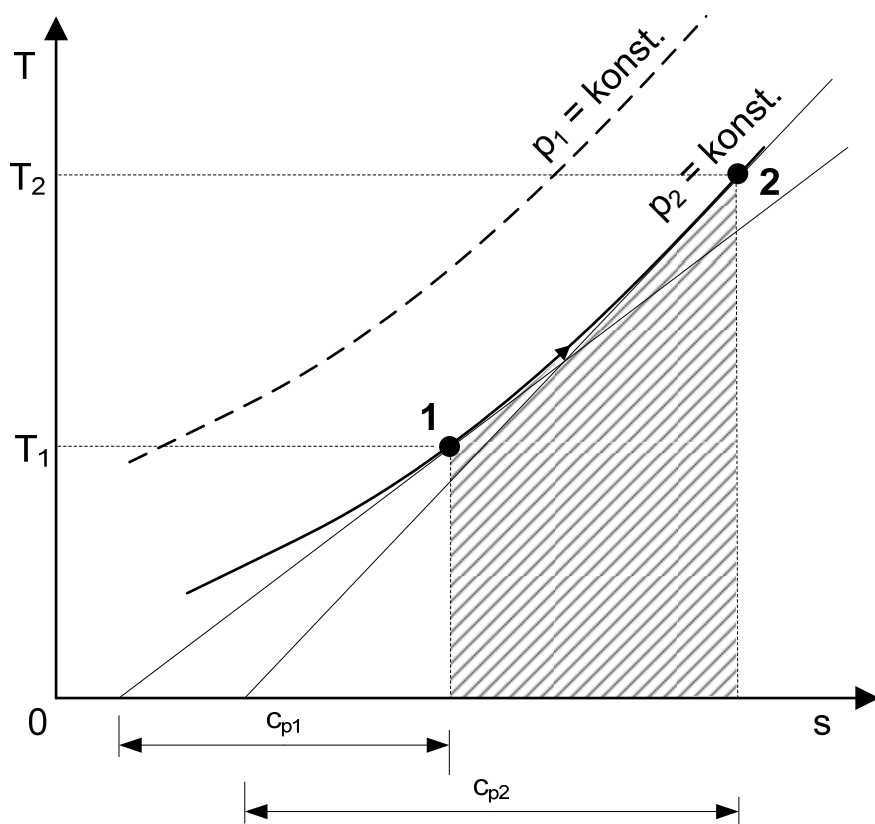
$$Tds = xdT \quad Tds = dq$$

$$dq = Tds = xdT \quad dq = c_v dT$$

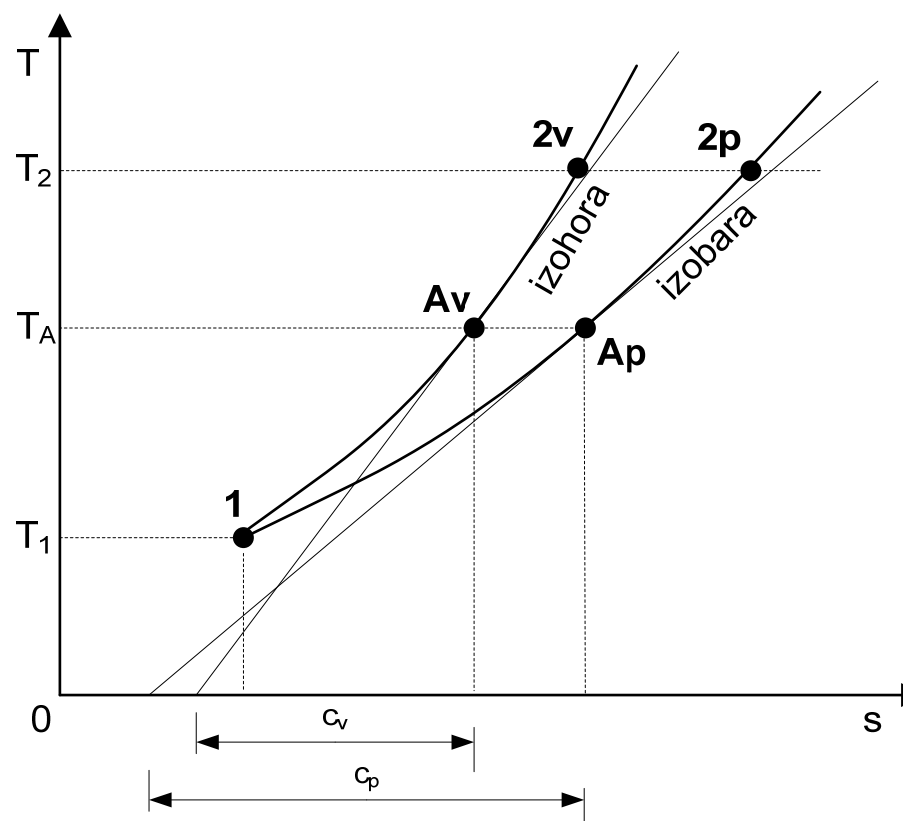
$$X = c_v$$

Izobarni proces

$$s_p = c_p \ln T + s_{p0}$$

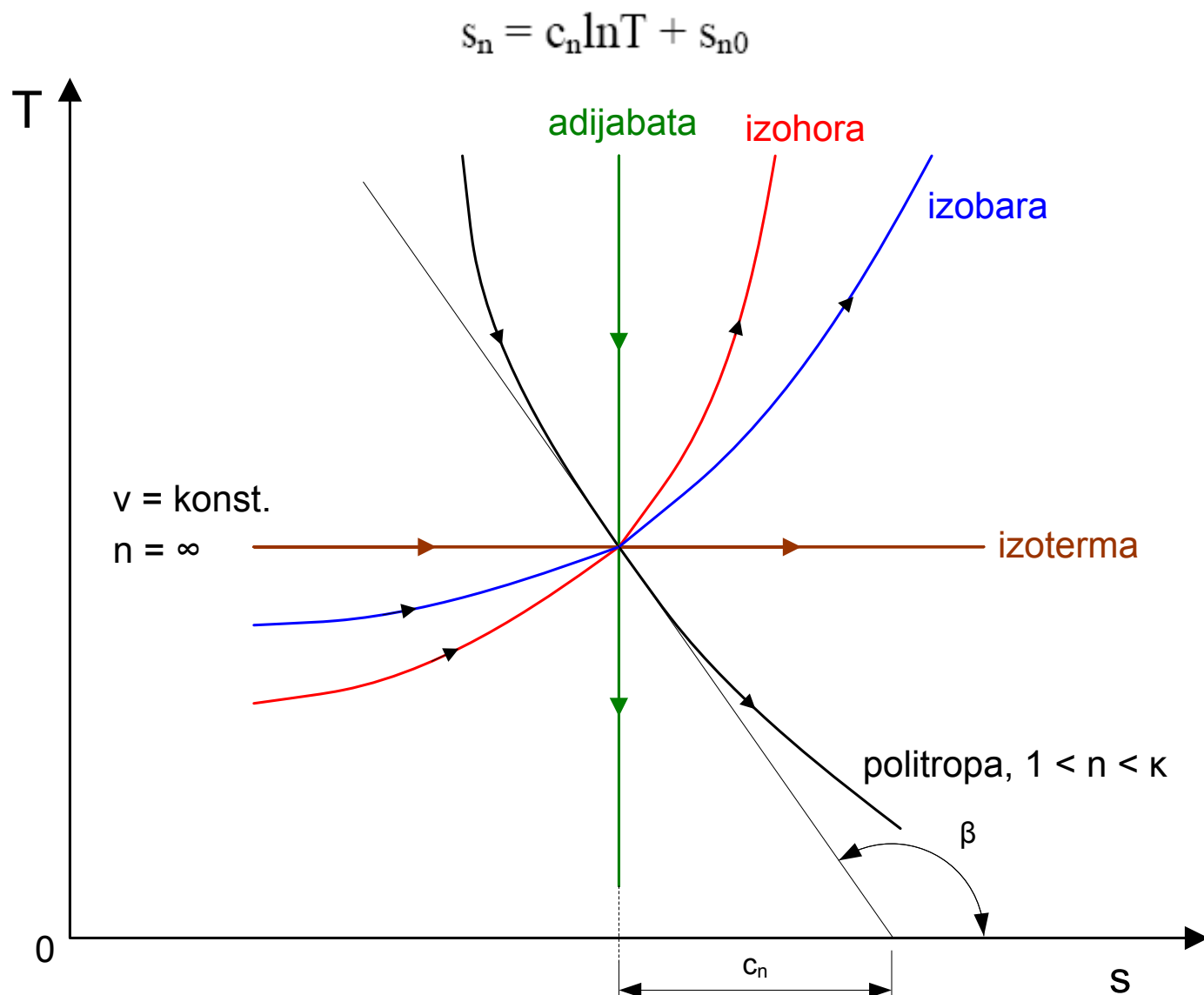


(a)

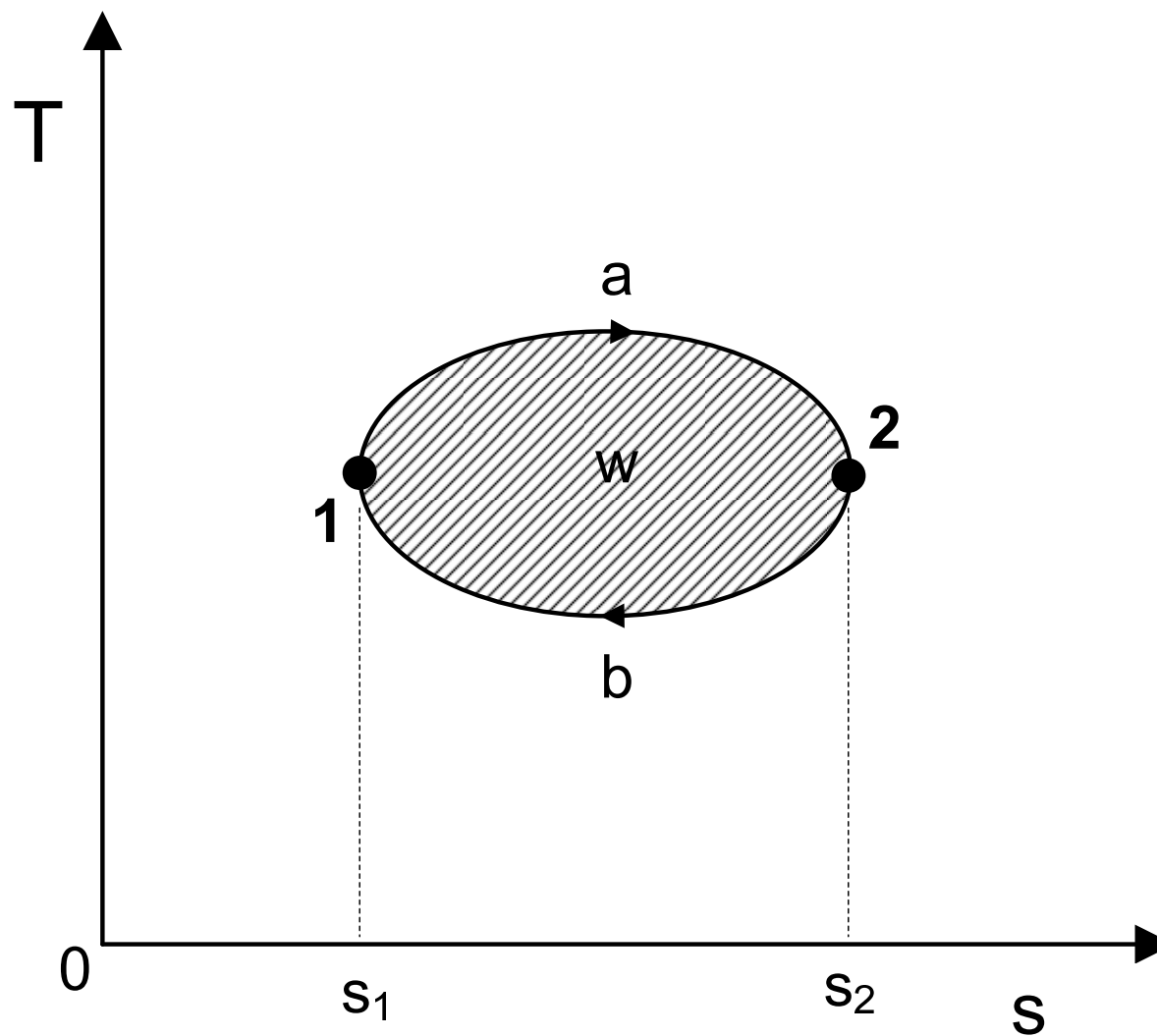


(b)

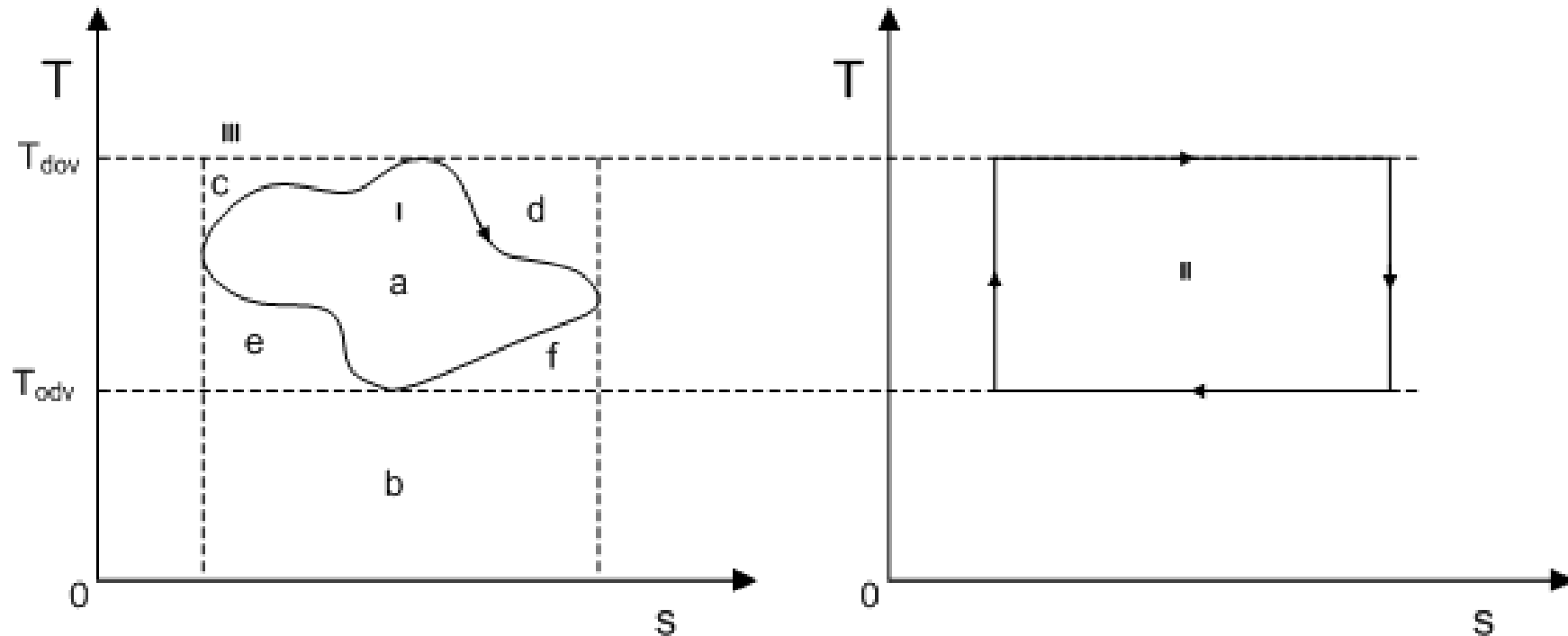
Politropski proces ($1 < n < \kappa \Rightarrow c_n < 0$)



Kružni proces



Usporedba termičkih stupnjeva djelovanja



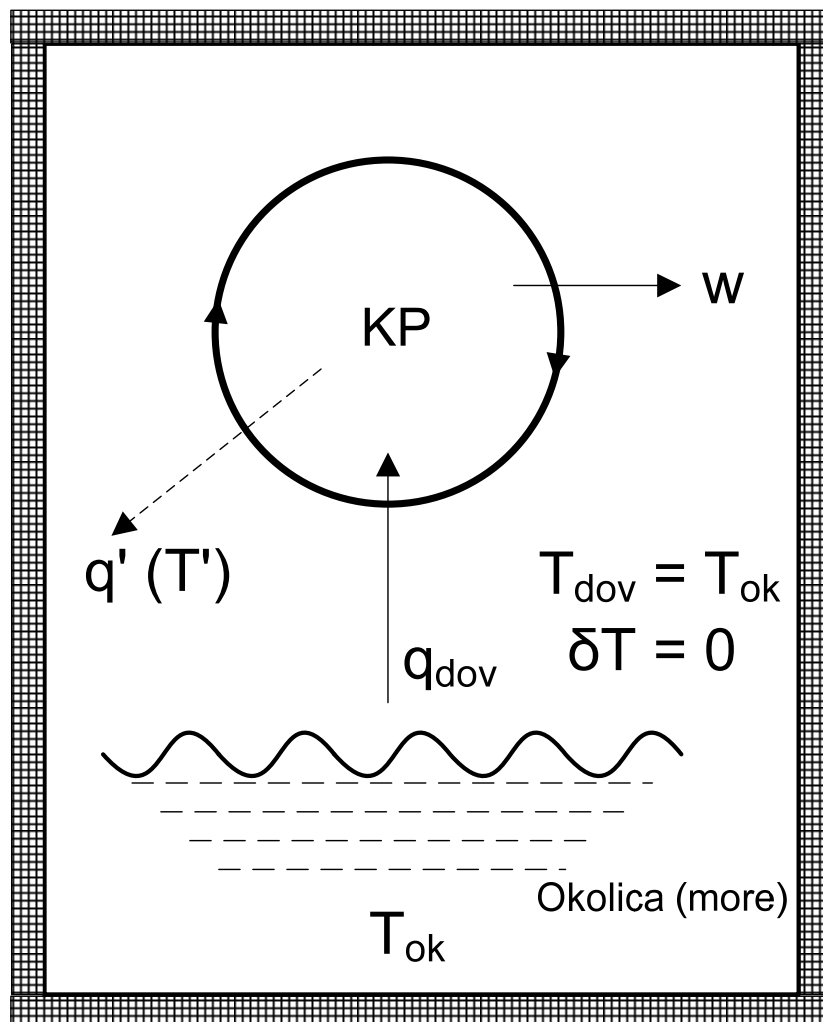
$$\eta_{tCKP}^{II} = \eta_{tCKP}^{III} = \frac{T_{dov} - T_{odv}}{T_{dov}} = 1 - \frac{|Q_{odv}^{III}|}{Q_{dov}^{III}} = 1 - \frac{b}{a + b + c + d + e + f}$$

$$\eta_t^I = 1 - \frac{|Q_{odv}^I|}{Q_{dov}^I} = 1 - \frac{b + e + f}{a + b + e + f}$$

$$\eta_{tCKP} > \eta_t$$

Primjena 2. glavnog stavka termodinamike

AS

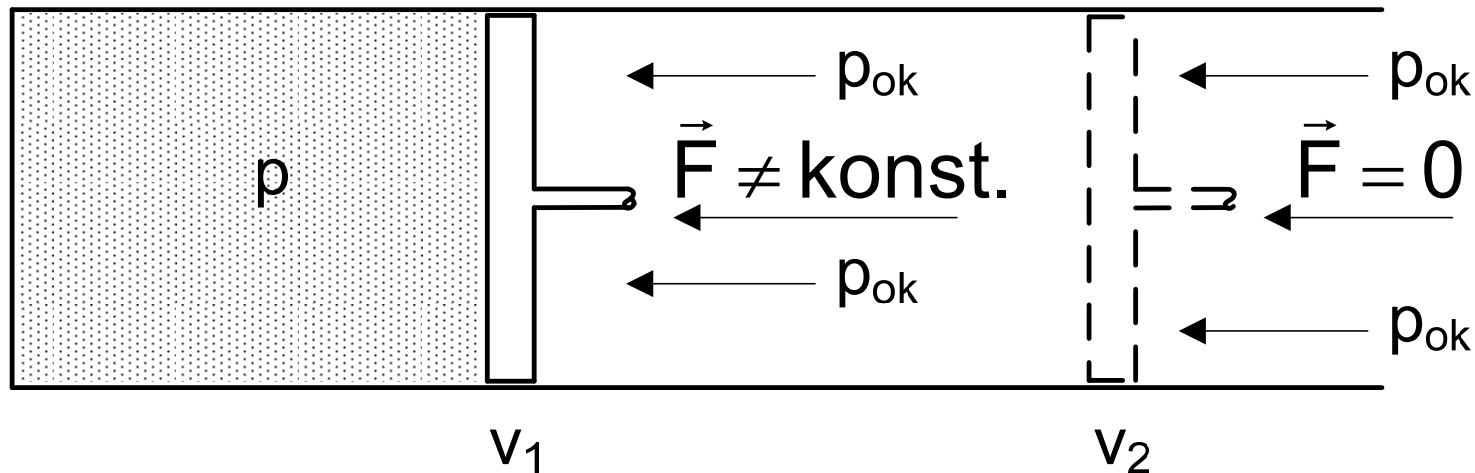


$$\delta S_{AS} \equiv \delta S_{uk} = \delta S_{KP} + \delta S_{ok} = 0$$

$$\delta S_{ok} = \frac{q_{dov}}{T_{ok}} < 0$$

$$\delta S_{ok} = \frac{q'}{T_{ok}} - \frac{|q_{dov}|}{T_{ok}}$$

Primjena 2. glavnog stavka termodinamike



$$W_{12\text{korisni}} = \int_{v_1}^{v_2} p dv - p_{ok}(v_2 - v_1) = \int_{v_1}^{v_2} (p - p_{ok}) dv$$

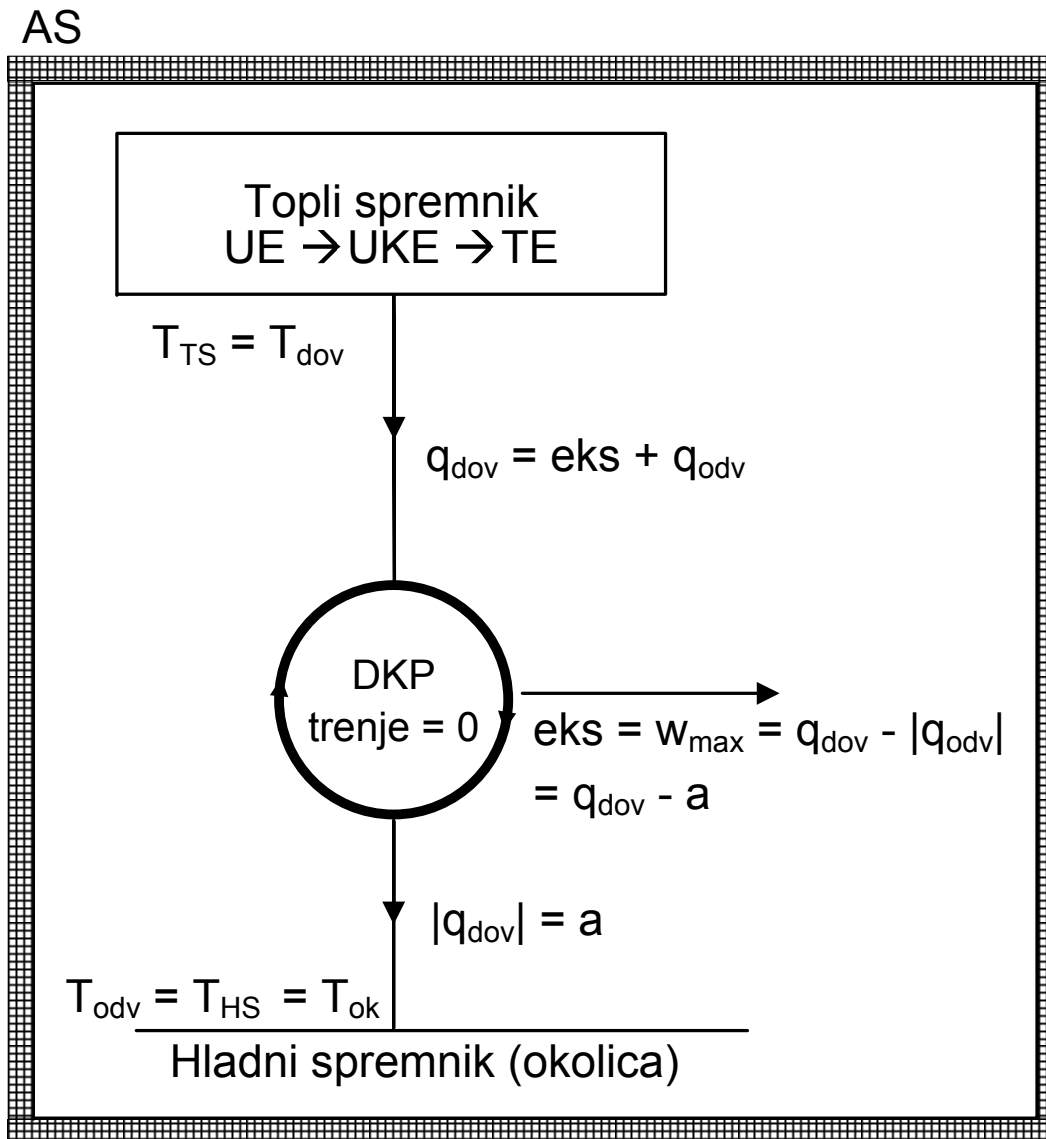
$$\int_{v_1}^{v_2} p dv = w_{\text{plina}}$$

- stanje okolice (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 eksergiju?
2. Koliko maksimalno rada možemo dobiti iz takvog sustava? (Kolika je eksergija energije?)
3. Kako se mora odvijati proces da iz takvog sustava dobijemo maksimalni rad (eksergiju)?

Eksergija toplinske energije (unutrašnje energije)



Eksergija toplinske energije (unutrašnje energije)

$$\delta S_{AS} = \delta S_{TS} + \delta S_{KP} + \delta S_{ok} \quad \delta S_{TS} + \delta S_{ok} = 0 \quad - \delta S_{TS} = \delta S_{ok}$$

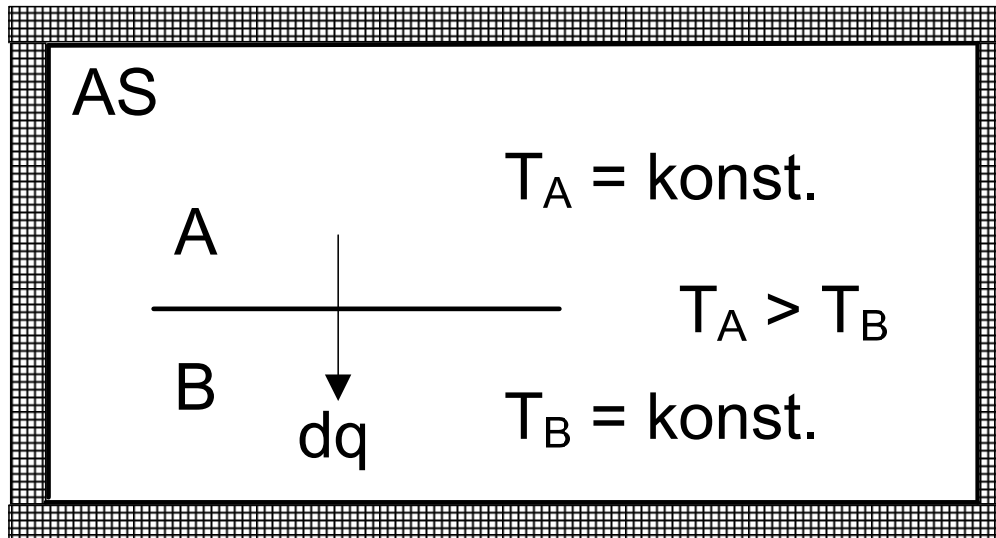
$$\delta S_{TS} = - \int_{PS(1)}^{KS(2)} \frac{dq_{dov}}{T_{dov}} < 0 \quad \delta S_{ok} = \frac{|q_{od}|}{T_{ok}} = \frac{a}{T_{ok}} > 0$$

$$\int_{PS(1)}^{KS(2)} \frac{dq_{dov}}{T_{dov}} = \frac{a}{T_{ok}} \text{ odnosno } a = T_{ok} \int_{PS(1)}^{KS(2)} \frac{dq_{dov}}{T_{dov}}$$

$$eks = w_{\max} = q_{dov} - a = q_{dov} - T_{ok} \int_{PS(1)}^{KS(2)} \frac{dq_{dov}}{T_{dov}} = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_{ok}}{T_{dov}} \right) dq_{dov}$$

$$eks = w_{\max} = \left(1 - \frac{T_{ok}}{T_{dov}} \right) q_{dov} = \eta_{tCKP} q_{dov}$$

Gubici eksergije pri prijelazu toplinske energije



$$\text{deks}_A = \left(1 - \frac{T_{ok}}{T_A}\right) dq \quad \text{deks}_B = \left(1 - \frac{T_{ok}}{T_B}\right) dq$$

$$\text{deks}_{\text{gub}} = dw_{\text{gub}} = \text{deks}_A - \text{deks}_B = T_{ok} \frac{T_A - T_B}{T_A T_B} dq = T_{ok} ds_{\text{uk}}$$

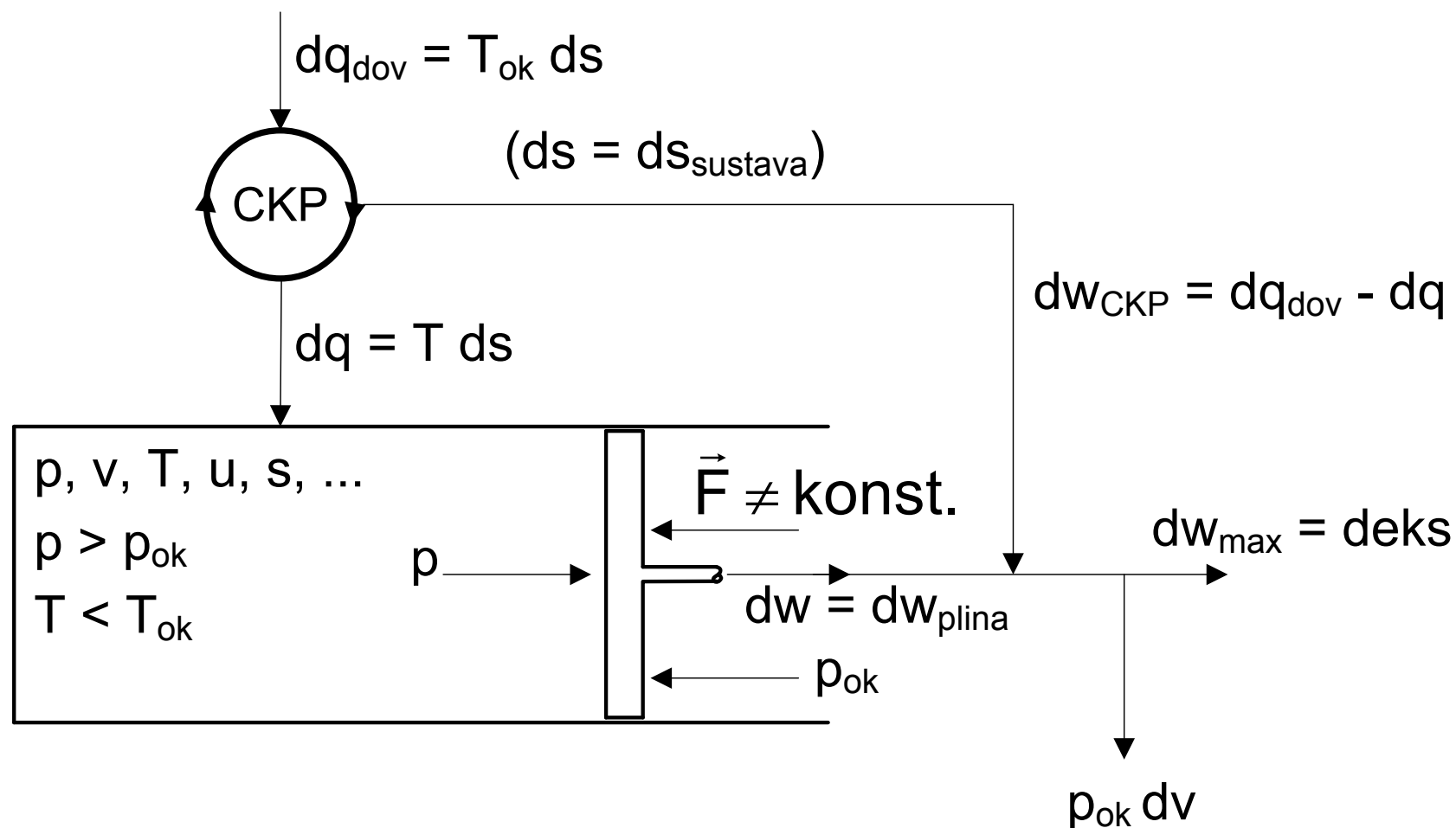
$$ds_{AS} = ds_A + ds_B = \frac{T_A - T_B}{T_A T_B} dq \quad W_{\text{gubitak}} = T_{ok} \cdot ds_{\text{uk}}$$

Eksergijski stupanj djelovanja

$$\zeta = \frac{Eksergija_{dob}[J]}{Eksergija_{dov}[J]} = \frac{eks_{dob}[J/kg]}{eks_{dov}[J/kg]}$$

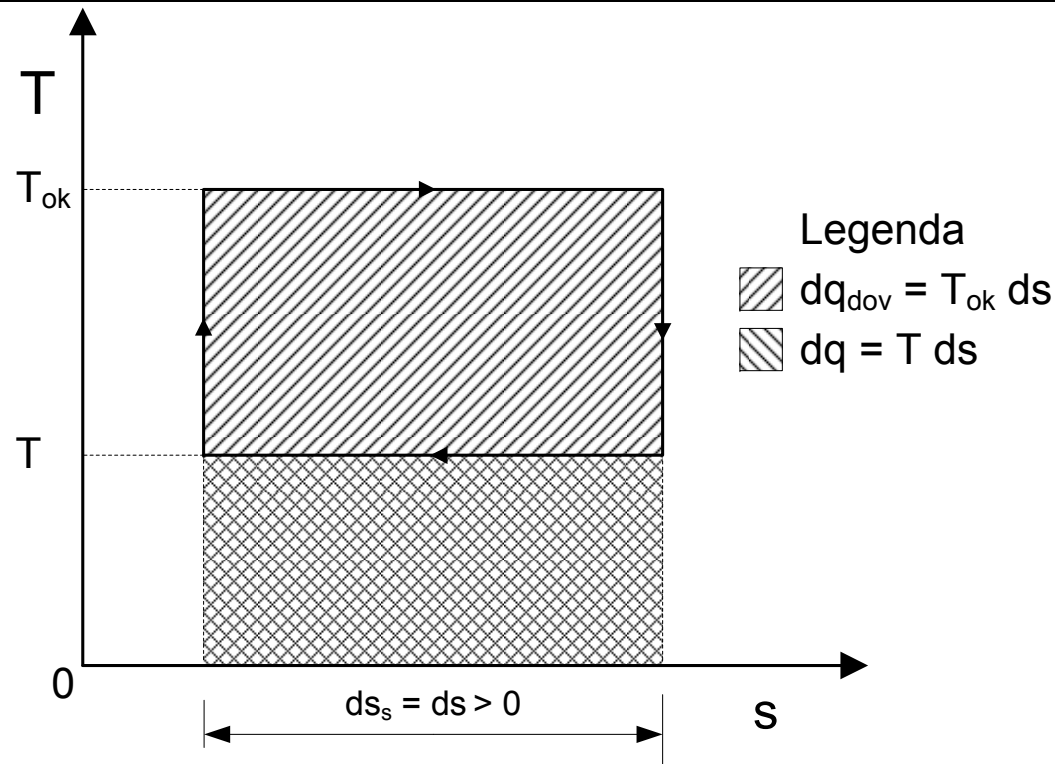
$$\zeta = \frac{w}{eks} \quad \text{Carnotov kružni proces}$$

Eksergija unutrašnje kaloričke energije (zatvorenog sustava)



$$\begin{aligned}
 deks &= dw_{max} = dw + dw_{CKP} - p_{ok}dv = \\
 &= dw + dq_{dov} - dq - p_{ok}dv = dw + T_{ok}ds - dq - p_{ok}dv
 \end{aligned}$$

Eksergija unutrašnje kaloričke energije (zatvorenog sustava)

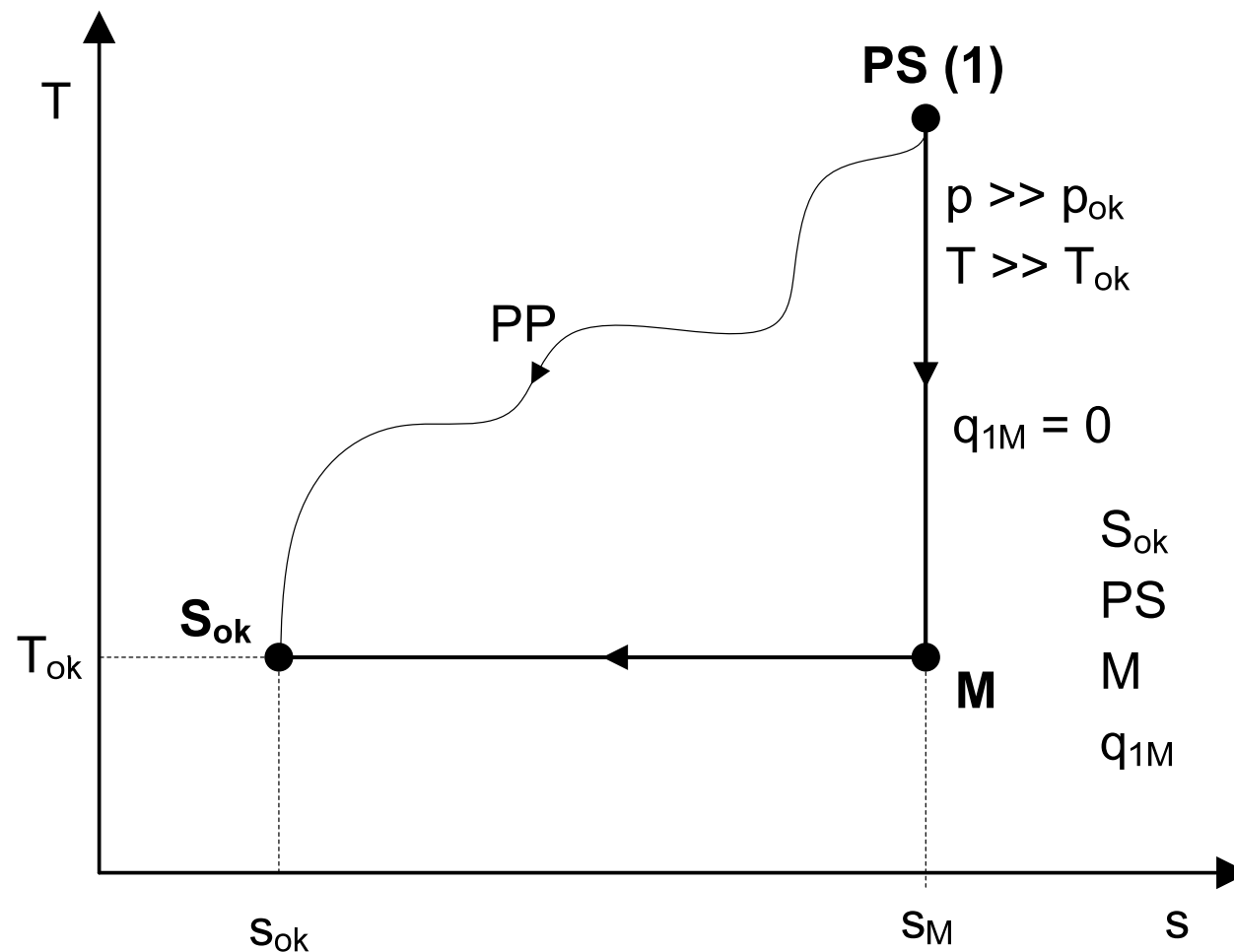


$$deks = dw_{\max} = - (du - T_{ok}ds + p_{ok}dv) \quad dq = dw + du \quad -dq + dw = - du$$

$$\int_{PS}^{KS} deks = \int_{PS}^{KS} dw_{\max} = - \int_{PS}^{KS} (du - T_{ok}ds + p_{ok}dv) = \int_{KS}^{PS} (du - T_{ok}ds + p_{ok}dv)$$

$$eks = w_{\max} = u - u_{ok} - T_{ok}(s - s_{ok}) + p_{ok}(v - v_{ok}) \text{ [J/kg]}$$

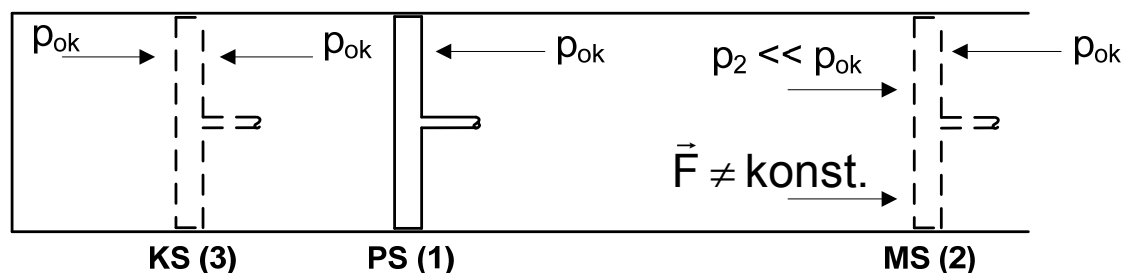
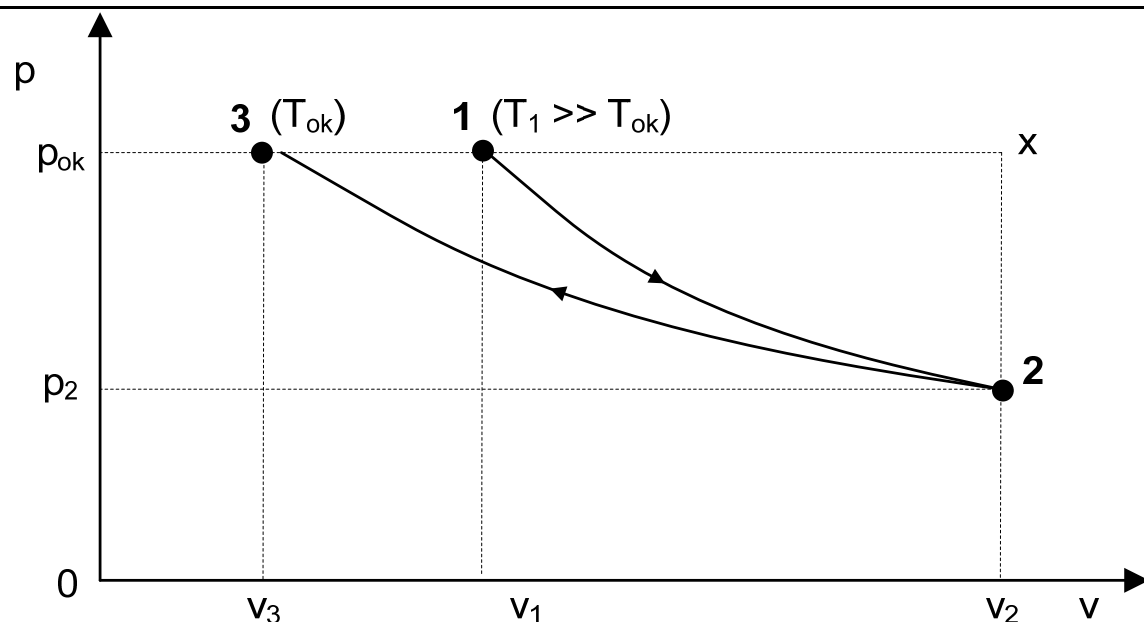
Eksergija unutrašnje kaloričke energije (zatvorenog sustava)



stanje okolice
početno stanje
međustanje
izentropski proces

$$deks_{gub} = T_{ok} \frac{T_{odv} - T_{ok}}{T_{odv} T_{ok}} dq = \left(1 - \frac{T_{ok}}{T_{odv}} \right) dq$$

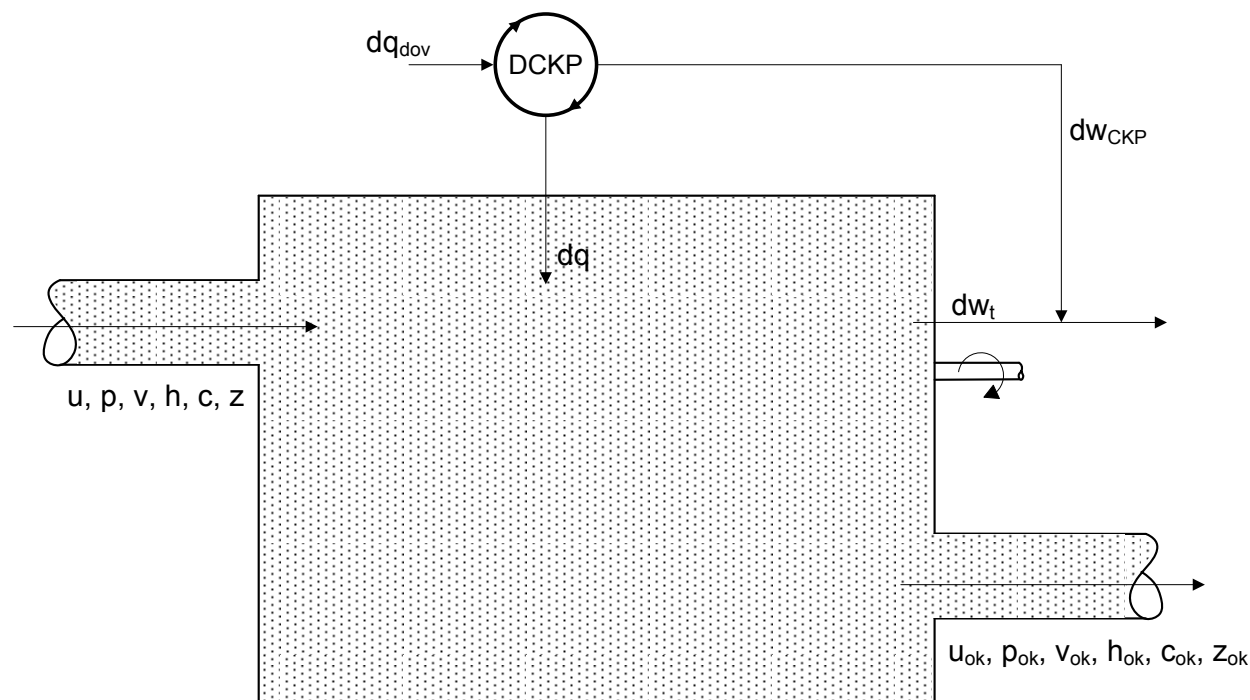
Eksergija plinova izgaranja



$$eks = w_{\max} = u_1 - u_3 - T_{ok}(s_1 - s_3) + p_{ok}(v_1 - v_3) \text{ [J/kg]}$$

$$u_1 - u_3 = c_v (T_1 - T_{ok}), \quad s_1 - s_3 = c_p \ln \frac{T_1}{T_{ok}}, \quad p_{ok}(v_1 - v_3) = R(T_1 - T_{ok})$$

Eksergija entalpije (otvorenog sustava)



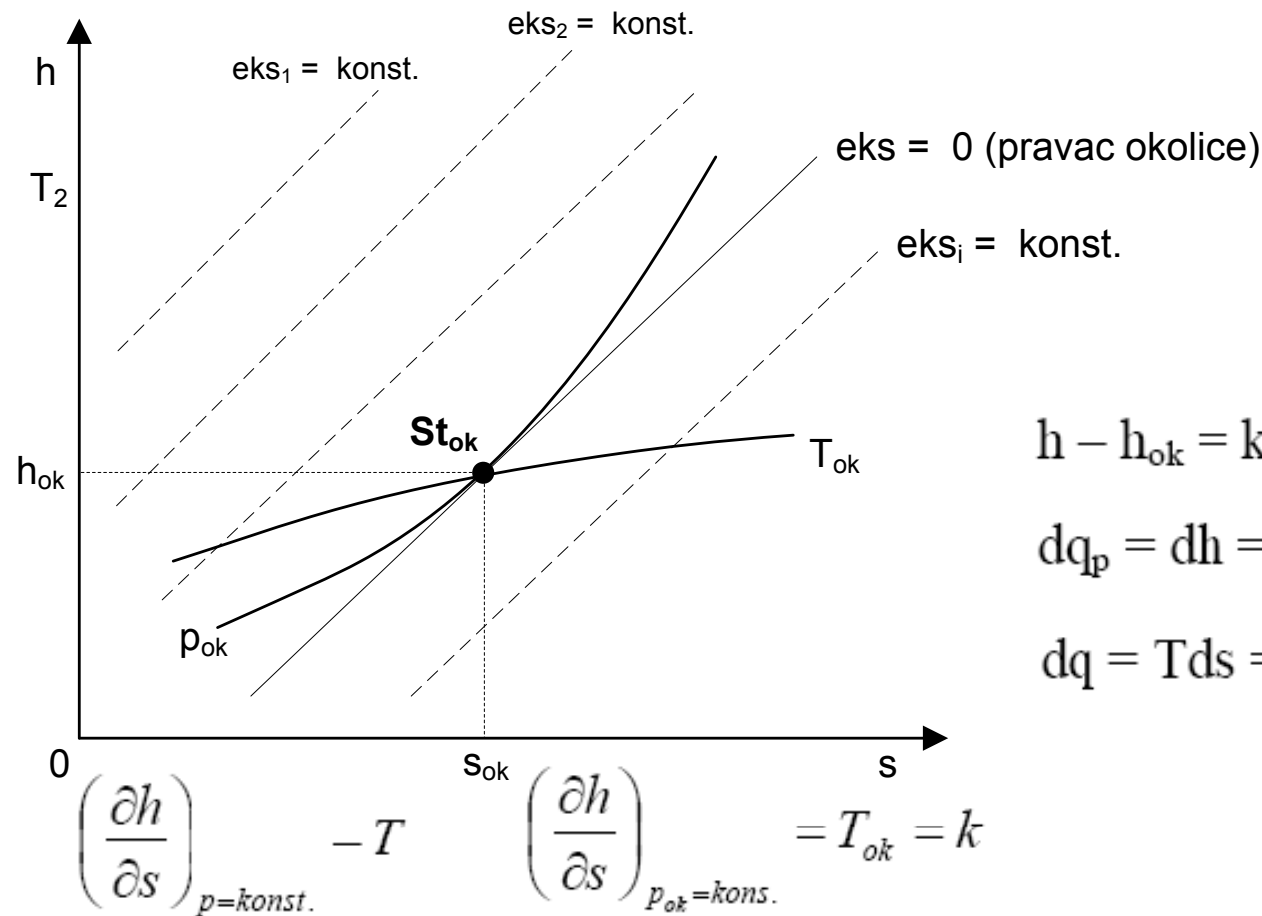
$$dw_{max} = deks = dw_t + dw_{CKP} = dw_t + T_{ok}ds - dq = - (dq - dw_t - T_{ok}ds)$$

$$dq - dw_t = dh$$

$$\int_{PS}^{KS} dw_{max} = \int_{PS}^{KS} deks = - \int_{PS}^{KS} (dh - T_{ok}ds) = \int_{KS}^{PS} (dh - T_{ok}ds) =$$

$$w_{max} = eks = h - h_{ok} - T_{ok}(s - s_{ok})$$

Određivanje eksergije pomoću h,s - dijagrama



$$h - h_{ok} = k(s - s_{ok}) = T_{ok}(s - s_{ok})$$

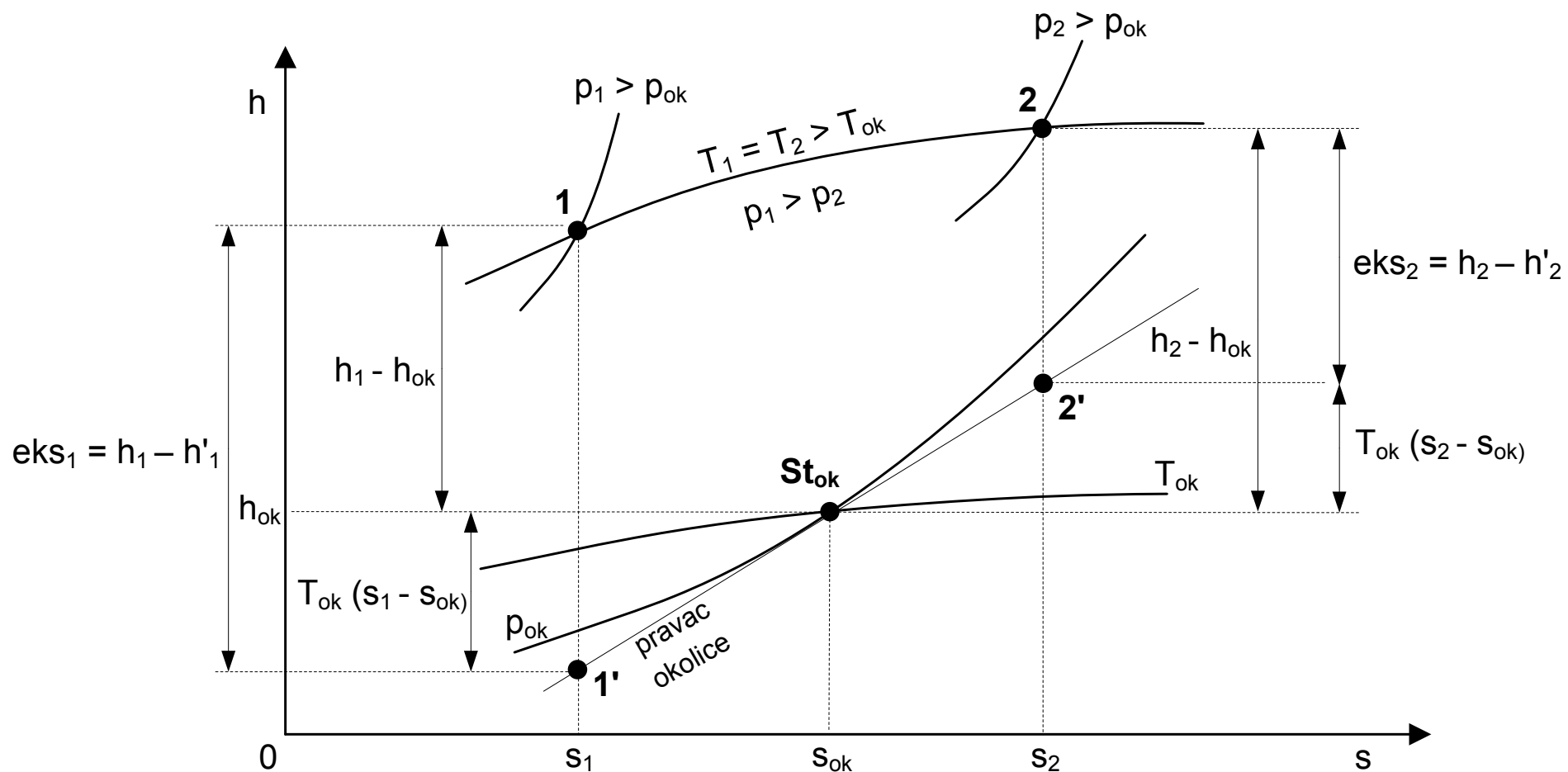
$$dq_p = dh = Tds$$

$$dq = Tds = dh - vdp = dh$$

$$eks = h - h_{ok} - T_{ok}(s - s_{ok}) \quad eks = 0$$

$$h - h_{ok} = T_{ok}(s - s_{ok})$$

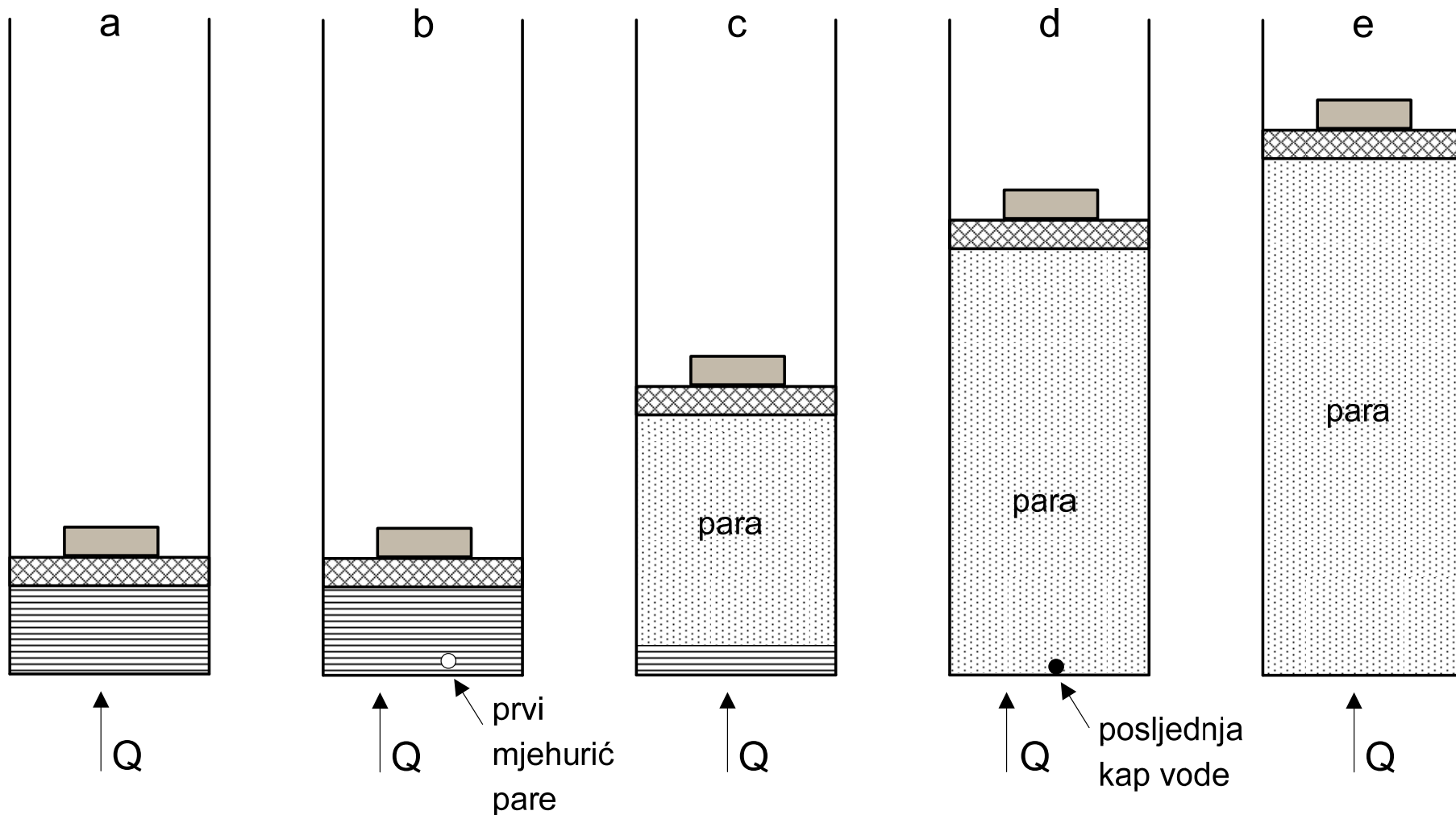
Eksergija plina



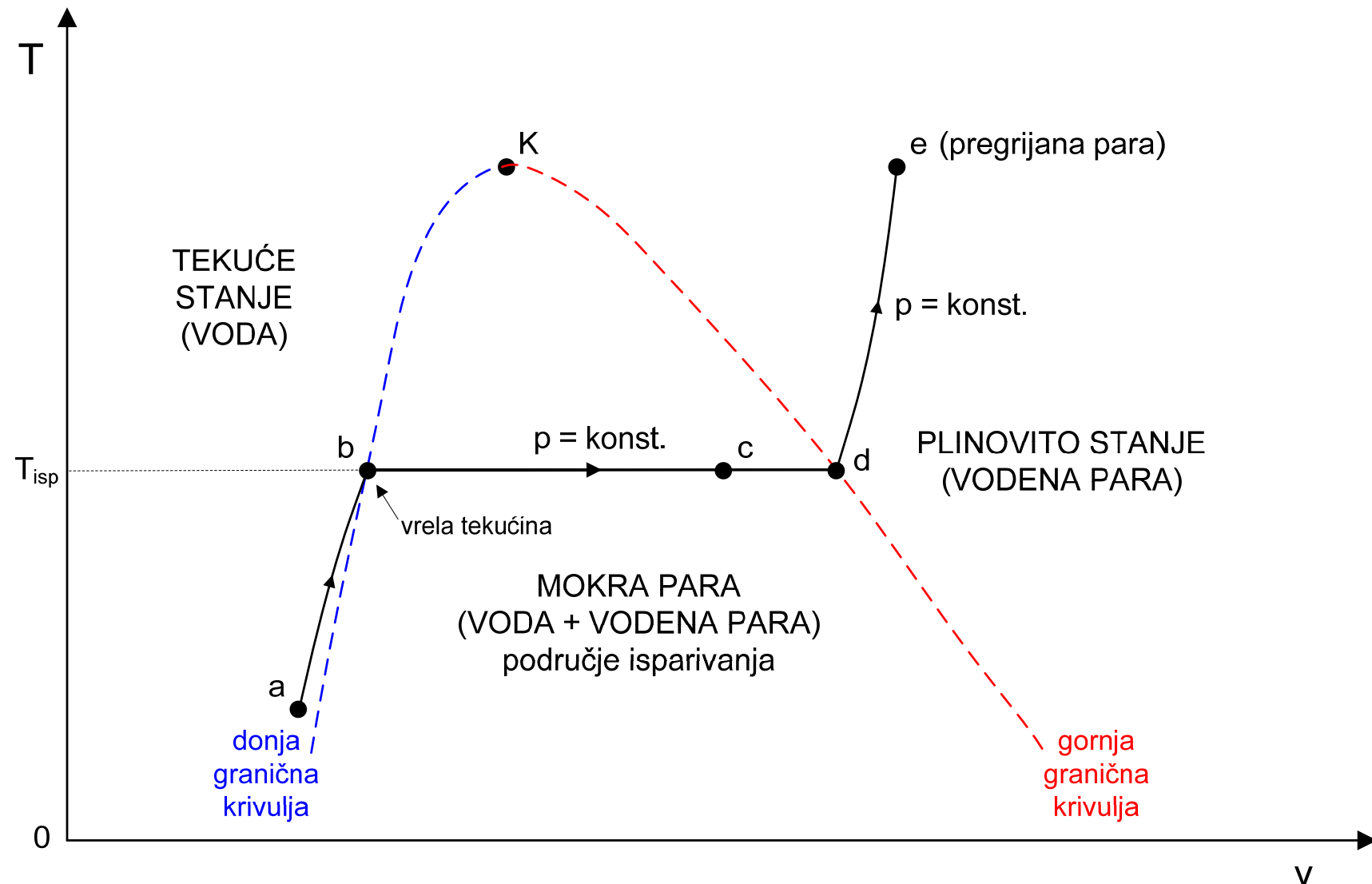
$$eks_1 = h_1 - h_{ok} - T_{ok}(s_1 - s_{ok}) = h_1 - h'_{1'}$$

$$eks_2 = h_2 - h_{ok} - T_{ok}(s_2 - s_{ok}) = h_2 - h'_{2'}$$

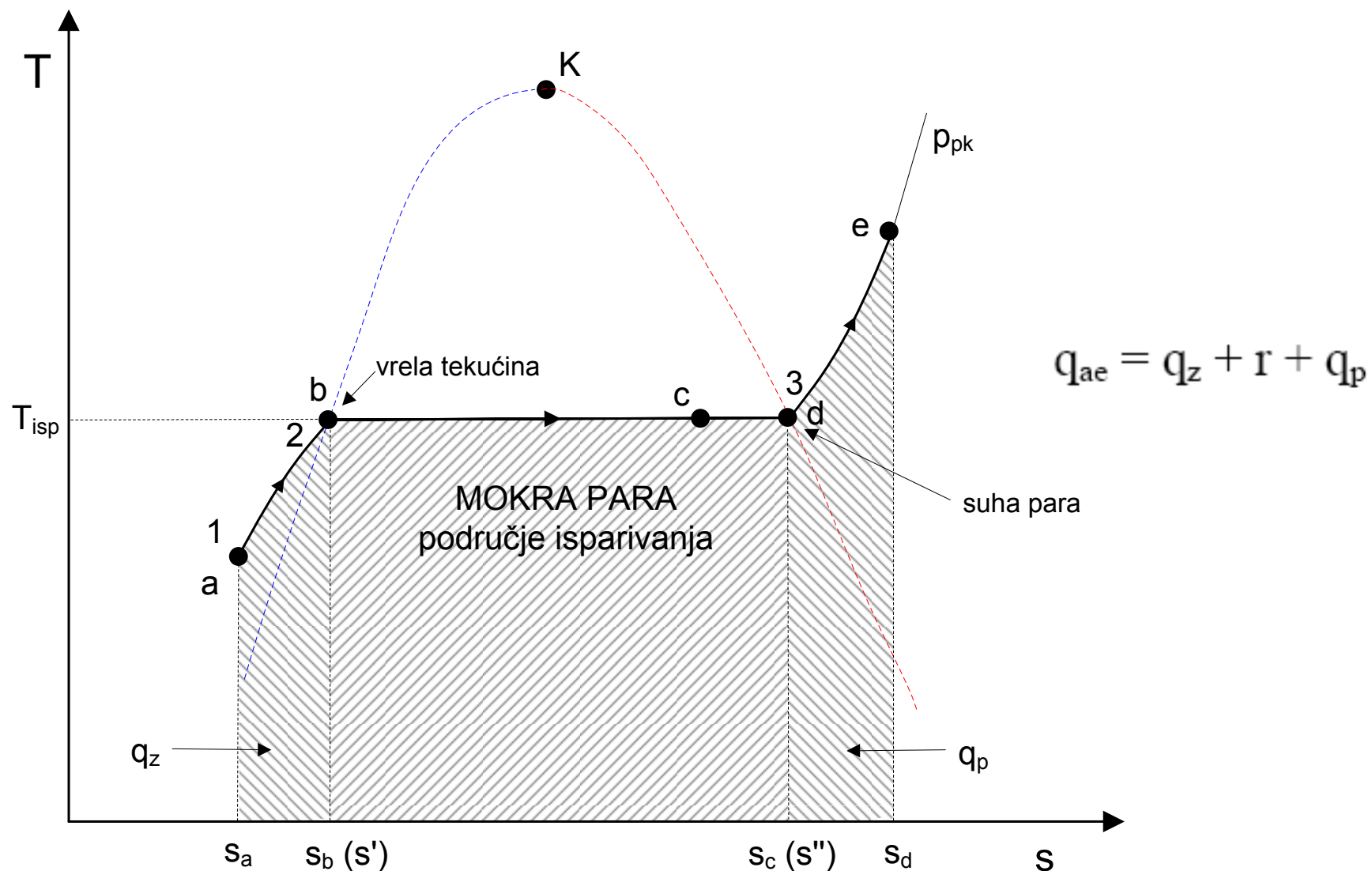
Eksergija vodene pare – proces isparivanja



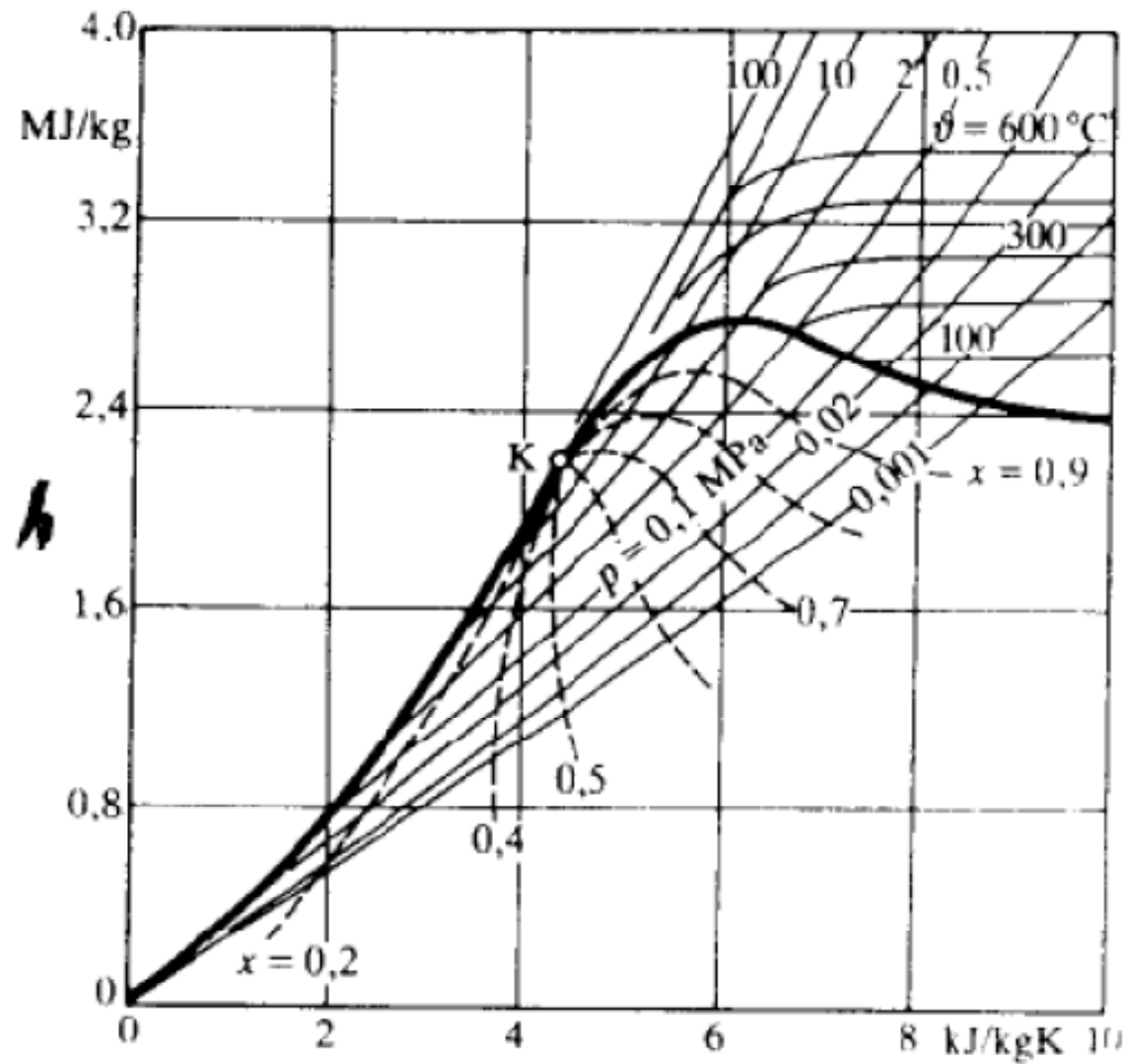
Proces zagrijavanja isparivanja vode, pregrijanja pare



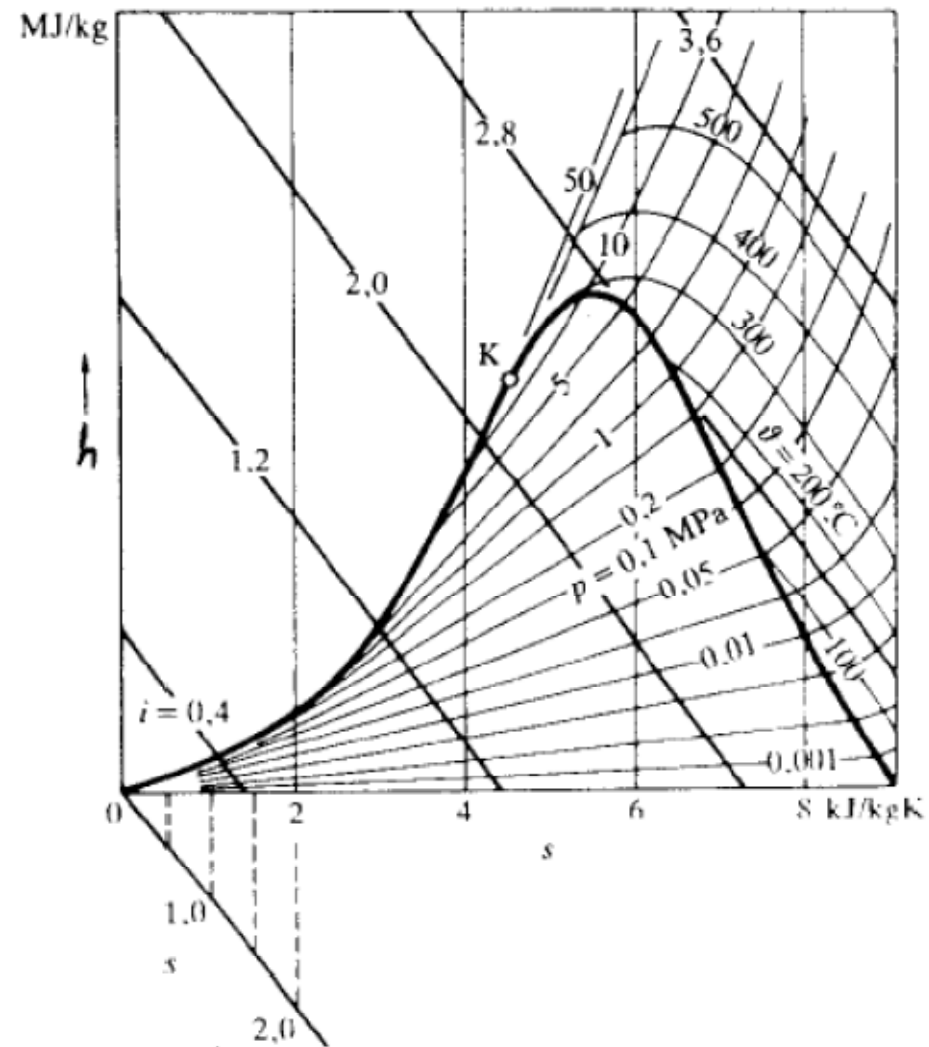
Toplinska energija za zagrijavanje, isparivanje i pregrijavanje



h,s – dijagram za vodu



Kosokutni h,s – dijagram za vodu

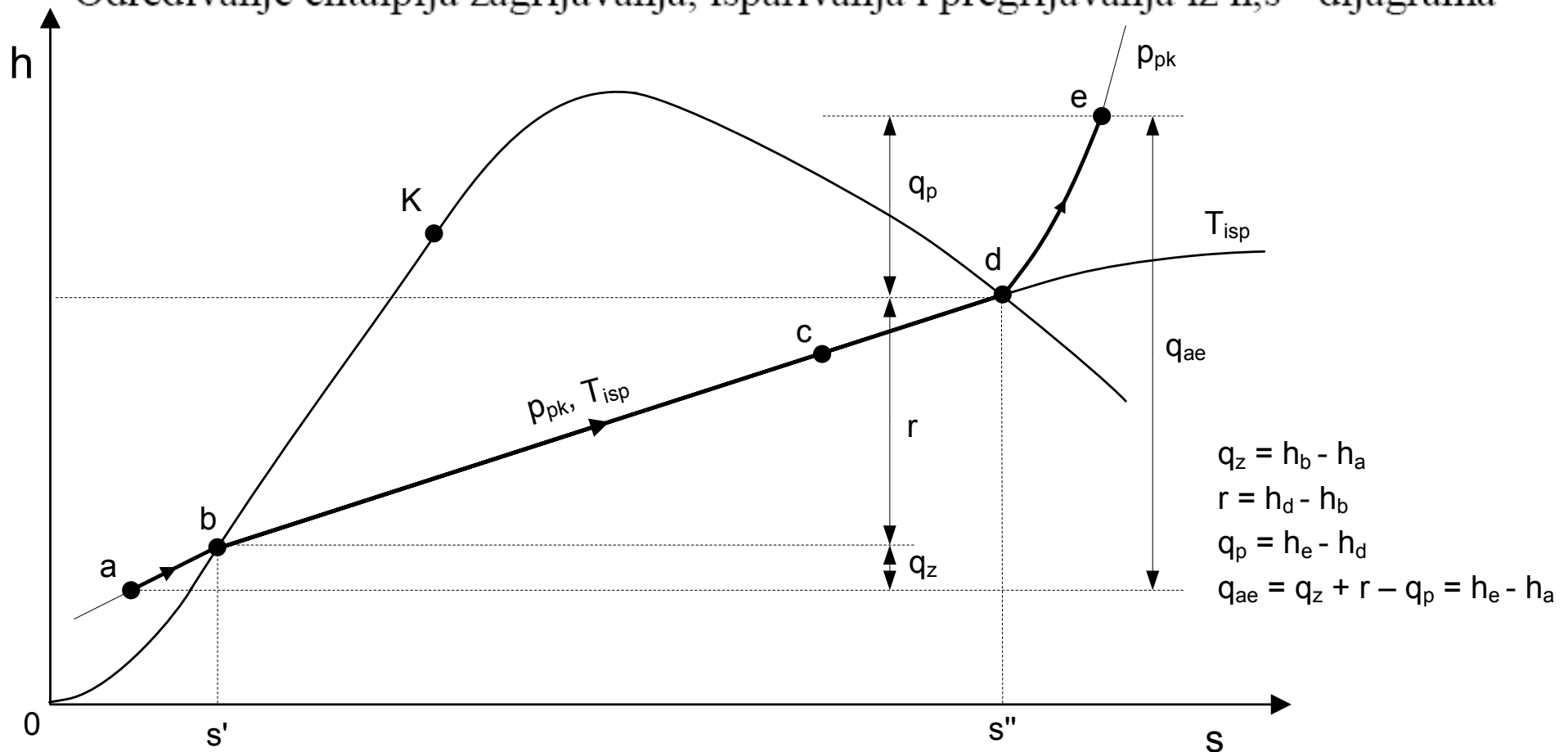


Entalpija zagrijavanja, isparivanja i pregrijavanja

$$dq = dh \quad vdp = dh \quad (dp = 0)$$

$$q_{ae} = q_z + r + q_p = (h_b - h_a) - (h_d - h_b) - (h_e - h_d)$$

Određivanje entalpija zagrijavanja, isparivanja i pregrijavanja iz h,s - dijagrama



Entalpija zagrijavanja, isparivanja i pregrijavanja

$$h_b - h_a = h' - h_a = c(T_{\text{isp}} - T_a)$$

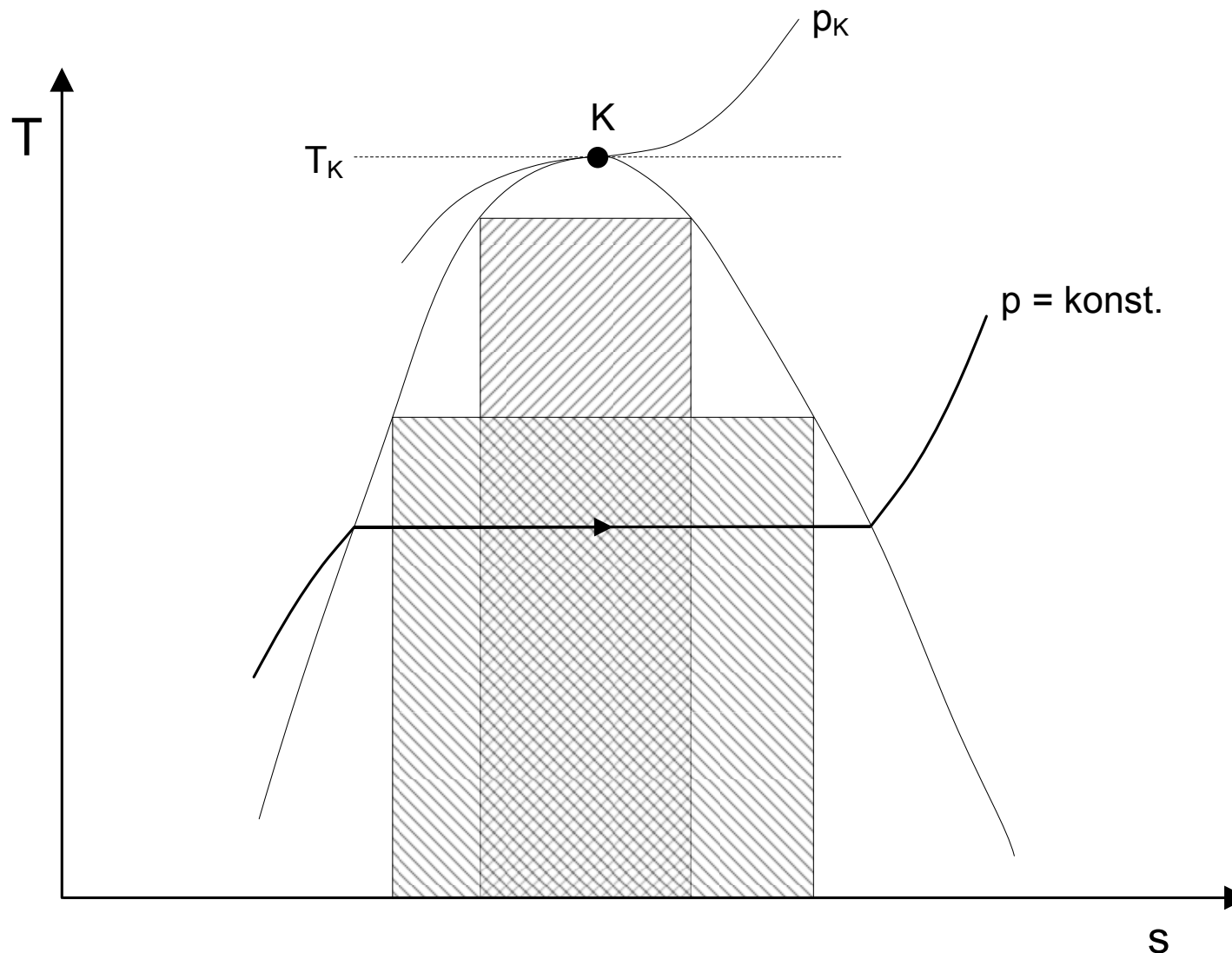
$$h_e - h_d = h_e - h'' = c_p (T_e - T_{\text{isp}})$$

$$T_d - T_b = T'' - T' = 0 \quad (T'' = T' = T_{\text{isp}})$$

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_p \approx \frac{r}{\delta T = 0} \rightarrow \infty$$

$$r = h_d - h_b = h'' - h' = u'' - u' + p(v'' - v')$$

Entalpija isparivanja u T,s – dijagramu



Entalpija zagrijavanja, isparivanja i pregrijavanja, mehanički rad promjene volumena i promjena UKE za vrijeme procesa

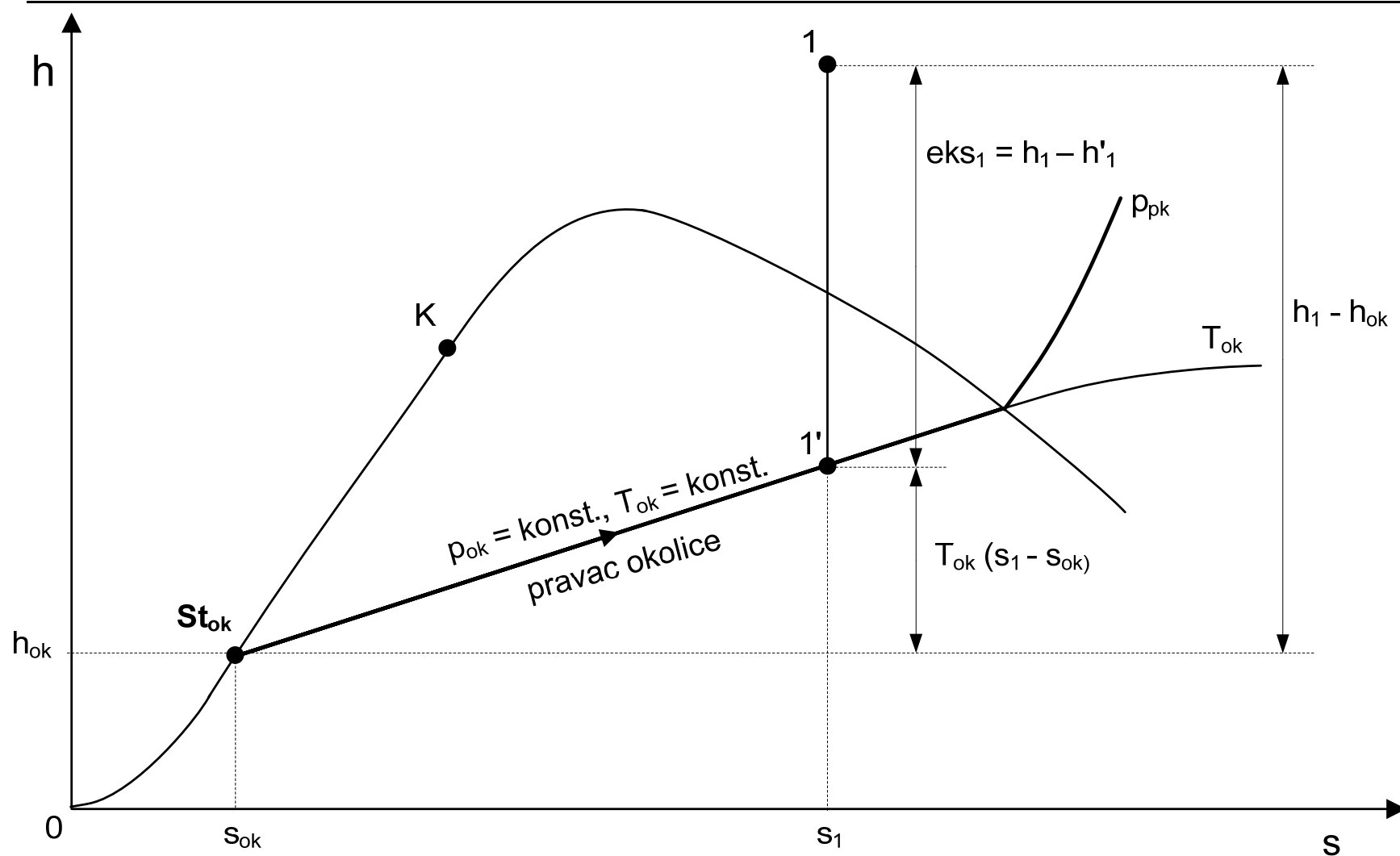
$$q_{ae} = q_z + r + q_p = \int_{s_a}^{s_b} T ds + \int_{s_b}^{s_d} T ds + \int_{s_d}^{s_e} T ds$$

$$r = \int_{s_b}^{s_d} T ds = T'(s_d - s_b) = T'(s'' - s')$$

$$w_{ae} = \int_{v_a}^{v'} p dv + \int_{v'}^{v''} p dv + \int_{v''}^{v_e} p dv = p(v' - v_a) + p(v'' - v') + p(v_e - v'') - p(v_e - v_a)$$

$$u_e - u_a = q_{ae} - w_{ae} = h_e - h_a - p(v_e - v_a)$$

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.