Energetski procesi s idealnim plinom

Procesi u zatvorenim i otvorenim sustavima, kružni procesi

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

- 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

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 $pv^n = konst.$

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

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

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

$pv = RT$ i $pv^n = konst.$

$$pv^n = konst.\ [J/kg] \qquad 0 \leq n \leq \infty$$

- kad **n** poprimi vrijednost nula ($n = 0 \Rightarrow p = konst.$), radi se o **izobarnom procesu** odnosno o promjeni stanja idealnog plina uz konstantni tlak,
- kad **n** poprimi vrijednost jedan ($n = 1 \Rightarrow pv = konst.$) radi se o **izotermnom procesu** ($pv = RT = konst. \Rightarrow T = konst.$/) odnosno o promjeni stanja idealnog plina uz konstantnu temperaturu,
- kad **n** poprimi vrijednost κ ($n = \kappa = \dfrac{c_p}{c_v} \Rightarrow q_{12} = 0$), radi se o **adijabatskom procesu** odnosno o promjeni stanja idealnog plina bez dovođenja i odvođenja toplinske energije,
- kad **n** poprimi vrijednost beskonačno ($n = \infty \Rightarrow v = konst.$) 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: $n = n \neq 0, 1, \kappa, \infty \Rightarrow pv^n = konst.$) radi se o **politropskom procesu** odnosno o promjeni stanja idealnog plina po politropama.

Jednadžbe analize

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

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

$$q_{12} + u_1 + p_1v_1 + \frac{1}{2}c_1^{\,2} + gz_1 = w_{t12} + u_2 + p_2v_2 + \frac{1}{2}c_2^{\,2} + gz_2 \text{ odnosno}$$

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

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

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

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

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

Jednadžbe analize

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

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

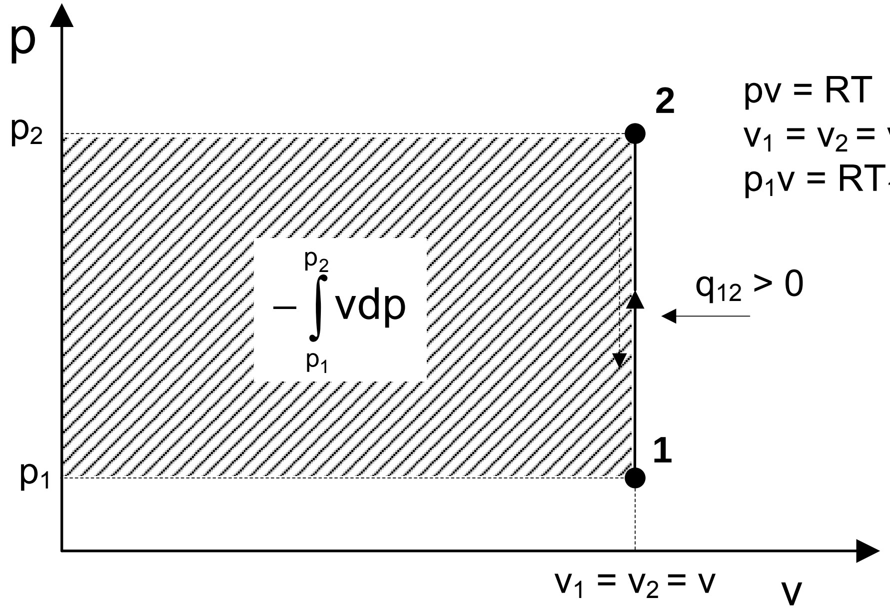
$$c_p = c_v + R,\ \kappa = \frac{c_p}{c_v},\ c_v = \frac{R}{\kappa - 1} \text{ i } c_p = \frac{\kappa R}{\kappa - 1}$$

Izohorni proces, $n = \infty$

$$pv^n = p_1 v_1^n = p_2 v_2^n = \text{konst.}$$

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

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



$pv = RT$
$v_1 = v_2 = v$
$p_1 v = RT_1 = p_2 v = RT_2$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{p_1}{p_2}$$

$$dw = pdv = 0 \ (dv = 0)$$

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

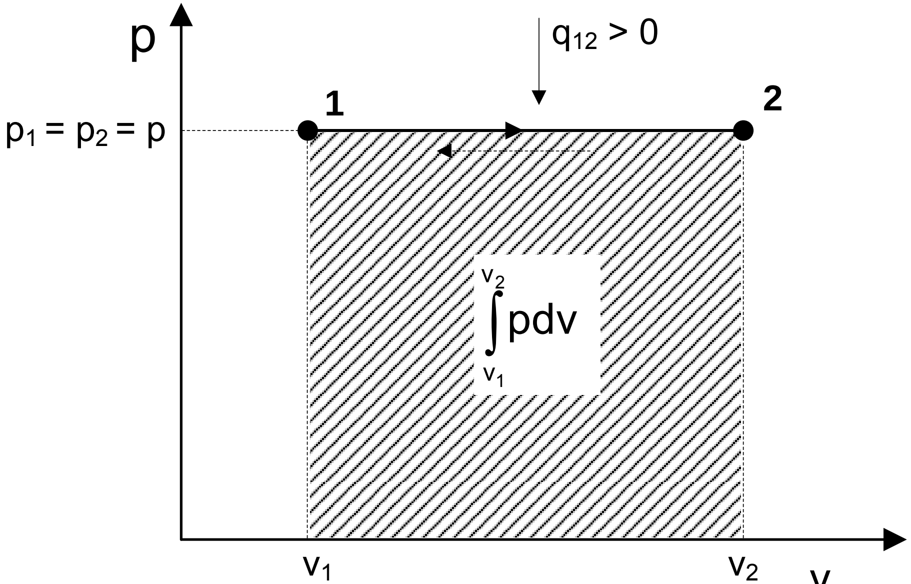
$dq = du + pdv$ ili $dq = dh - vdp$ $\qquad dq = c_v dT$, dakle $q_{12} = c_v(T_2 - T_1)$ $\quad T_2 > T_1,\ q_{12} > 0$

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

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



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

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

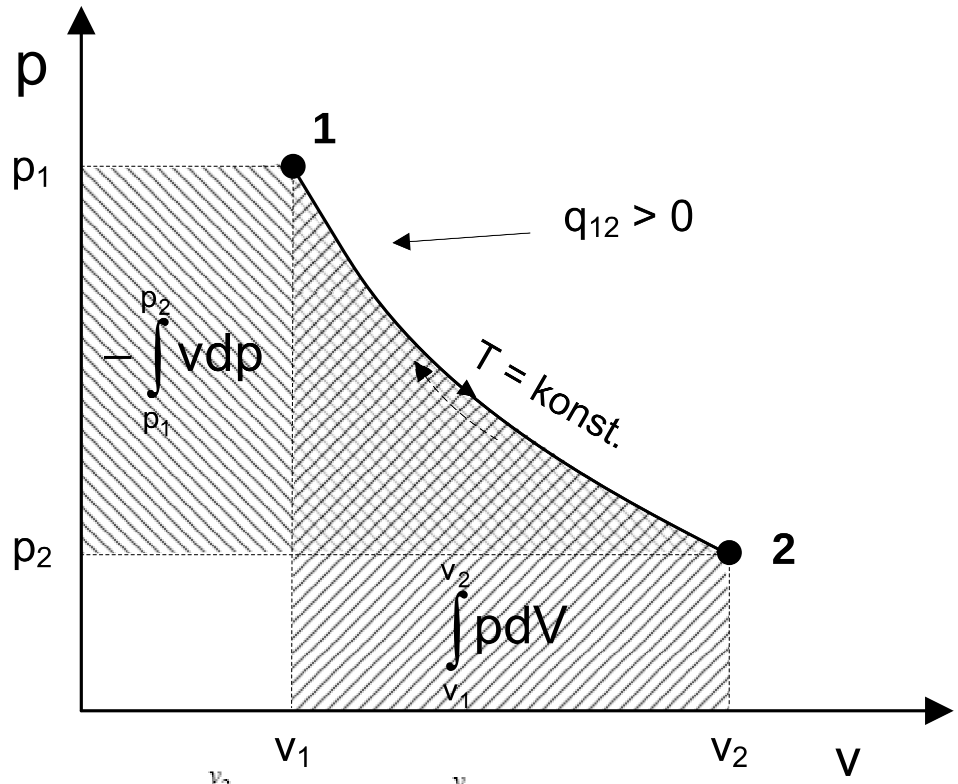
$$dw = pdv \text{ odnosno } w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1)$$

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

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

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

Izotermni proces, n = 1



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

$$pv = p_1v_1 = p_2v_2 \text{ odnosno } \frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

$$p = \frac{p_1v_1}{v} = \frac{p_2v_2}{v} = \frac{RT}{v}$$

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = p_1v_1 \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = p_1v_1 \ln\frac{v_2}{v_1} = p_1v_1 \ln\frac{p_1}{p_2} = RT\ln\frac{v_2}{v_1} = RT\ln\frac{p_1}{p_2}$$

$$(p_1v_1 = p_2v_2 = RT)$$

$$w_{t12} = -\int_{p_1}^{p_2} vdp - \frac{1}{2}(c_2^{\,2} - c_1^{\,2}) - g(z_2 - z_1) = p_1v_1 \ln\frac{v_2}{v_1} - \frac{1}{2}(c_2^{\,2} - c_1^{\,2}) - g(z_2 - z_1)$$

Izotermni proces, n = 1

$$\int pdv = -\int vdp$$

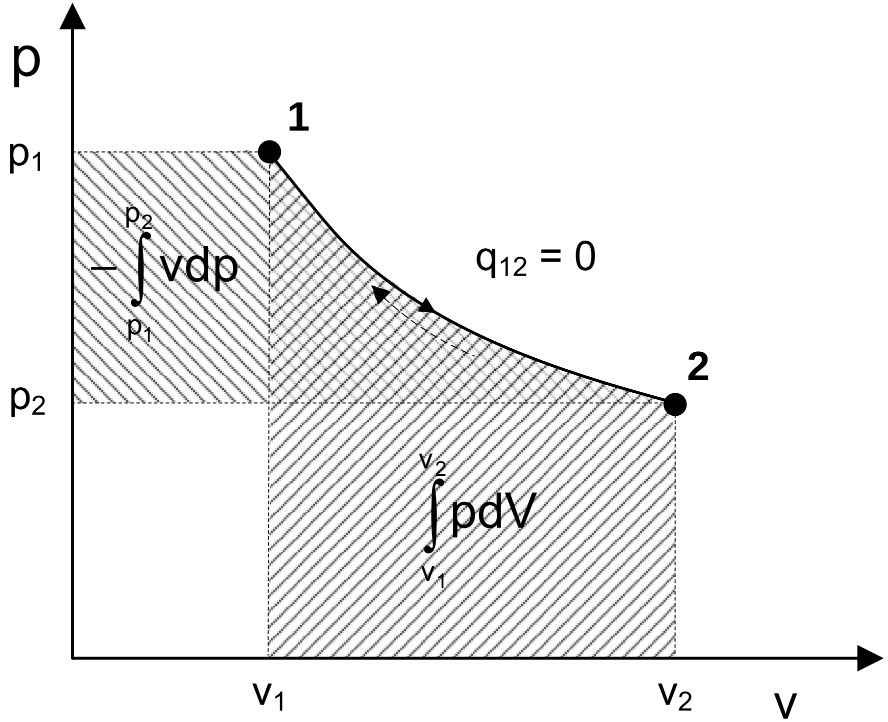
$$\mathrm{pdv + vdp = RdT = 0 \ (dT = 0,\ jer\ je\ T = konst.)}$$

$$\mathrm{pdv = -vdp}$$

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

$$\mathrm{q_{12} = w_{12}} = \int_{v_1}^{v_2} pdv = \mathrm{p_1 v_1} \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = \mathrm{p_1 v_1} \ln \frac{v_2}{v_1} = \mathrm{p_1 v_1} \ln \frac{p_1}{p_2} = \mathrm{RT} \ln \frac{v_2}{v_1} = \mathrm{RT} \ln \frac{p_1}{p_2}$$

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



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

$dq = du + pdv = dh - vdp$

$0 = du + pdv = dh - vdp$

$du + pdv = 0$, odnosno $c_v dT = -pdv$ (I)

$dh - vdp = 0$, odnosno $c_p dT = vdp$ (II)

Dijeljenjem (II) s (I) dobivamo:

$$\frac{c_p}{c_v} = \kappa = -\frac{vdp}{pdv} \quad \text{(III)}. \qquad \kappa\frac{dv}{v} = -\frac{dp}{p} \qquad \int \kappa\frac{dv}{v} = -\int\frac{dp}{p} + C$$

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

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

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

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p dv \text{ i } w_{t12} = -\int_{p_1}^{p_2} v dp - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1)$$

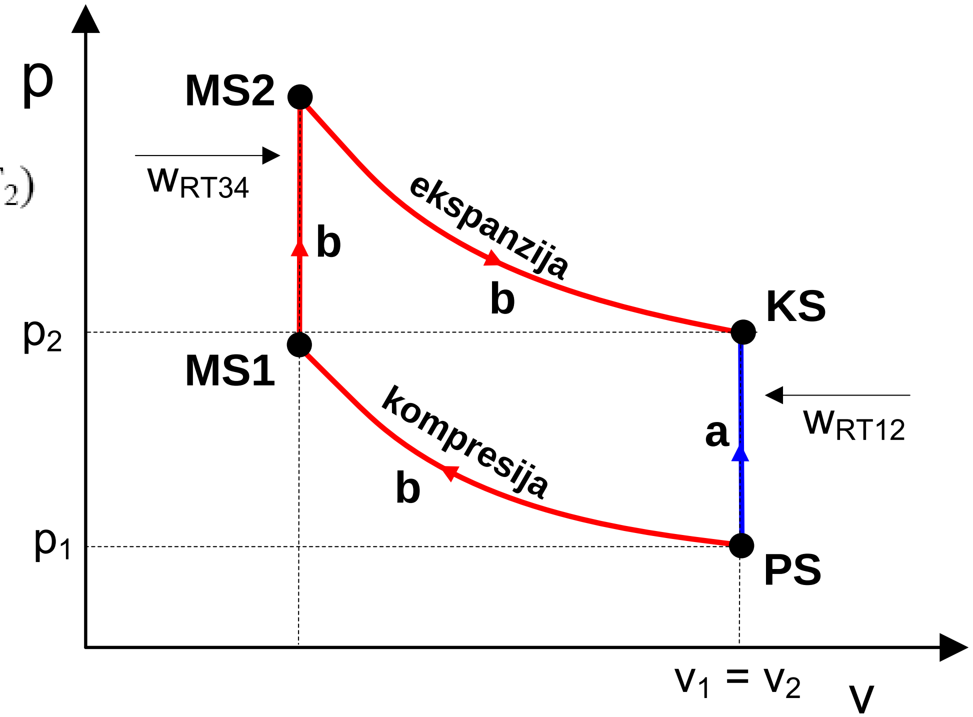
$$p = \frac{p_1 v_1^\kappa}{v^\kappa} \quad (p_1 v_1^\kappa = \text{konst.}) \qquad w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p_1 v_1^\kappa \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^\kappa} = \frac{p_1 v_1^\kappa}{\kappa - 1}\left(\frac{1}{v_1^{\kappa-1}} - \frac{1}{v_2^{\kappa-1}}\right)$$

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

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

$$-\int_{p_1}^{p_2} v dp = -\int_{h_1}^{h_2} dh = -\int_{T_1}^{T_2} c p dT = c_p (T_1 - T_2)$$

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



Adijabatski proces - odnosi između tlakova, volumena i temperatura

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

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

$$p_1 v_1^{\kappa} = p_2 v_2^{\kappa} = pv^{\kappa}:$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$vdp + npdv = 0 \qquad pv = RT \text{ /dif.} \Rightarrow vdp + pdv = RdT$$

$$vdp + npdv = 0$$
$$-vdp - pdv = -RdT$$

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

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

$(R = c_p - c_v,\ \kappa = c_p/c_v)$

Politropski proces – izmijenjena toplinska energija

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

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

Nameće se zaključak da relacija $c_v \frac{n-\kappa}{n-1}$ mora biti „politropska specifična toplina“. Označit ćemo je s indeksom **n**: $c_n = c_V \frac{n-\kappa}{n-1}$

n upućuje da postoji beskonačno mnogo specifičnih toplina budući da n poprima sve vrijednosti između nule (uključivo) i beskonačnog (uključivo): $0 \leq n \leq \infty$.

I, doista, poprimi li **n** vrijednosti $0 \leq n \leq \infty$ dobivamo:

Specifične topline

- $n = 0 \Rightarrow c_n = c_v \cdot \kappa = c_p$ (izobarni proces, specifična toplina uz konstantni tlak),
- $n = 1 \Rightarrow c_n = \infty = c_{izotermna}$ (izotermni proces, specifična toplina uz konstantnu temperaturu beskonačno je velika: toplinska se energija dovodi (odvodi) a da se pritom temperatura sustava ne mijenja),
- $n = \kappa \Rightarrow c_n = 0 = c_{adijabatska}$ (adijabatski proces: adijabatska je specifična toplina jednaka nuli budući da se toplinska energija ne dovodi niti odvodi),
- $n = \infty \Rightarrow c_n = c_v$ (izohorni proces, specifična toplina uz konstantni volumen), i, konačno
- $0 < n < \infty$ $(n \neq 0, 1, \kappa, \infty) \Rightarrow c_n = c_v \dfrac{n-\kappa}{n-1}$ (politropska specifična toplina).

Politropski proces – izmijenjena toplinska energija

Integrirajući diferencijalnu jednadžbu

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

dobivamo toplinsku energiju koja se izmjenjuje za vrijeme politropskog procesa:

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

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

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 $q_{12} > 0$.

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

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

$T_2 < T_1$, jer je $n > 1$, a $v_2 > v_1$.

Negativna specifična toplina ?

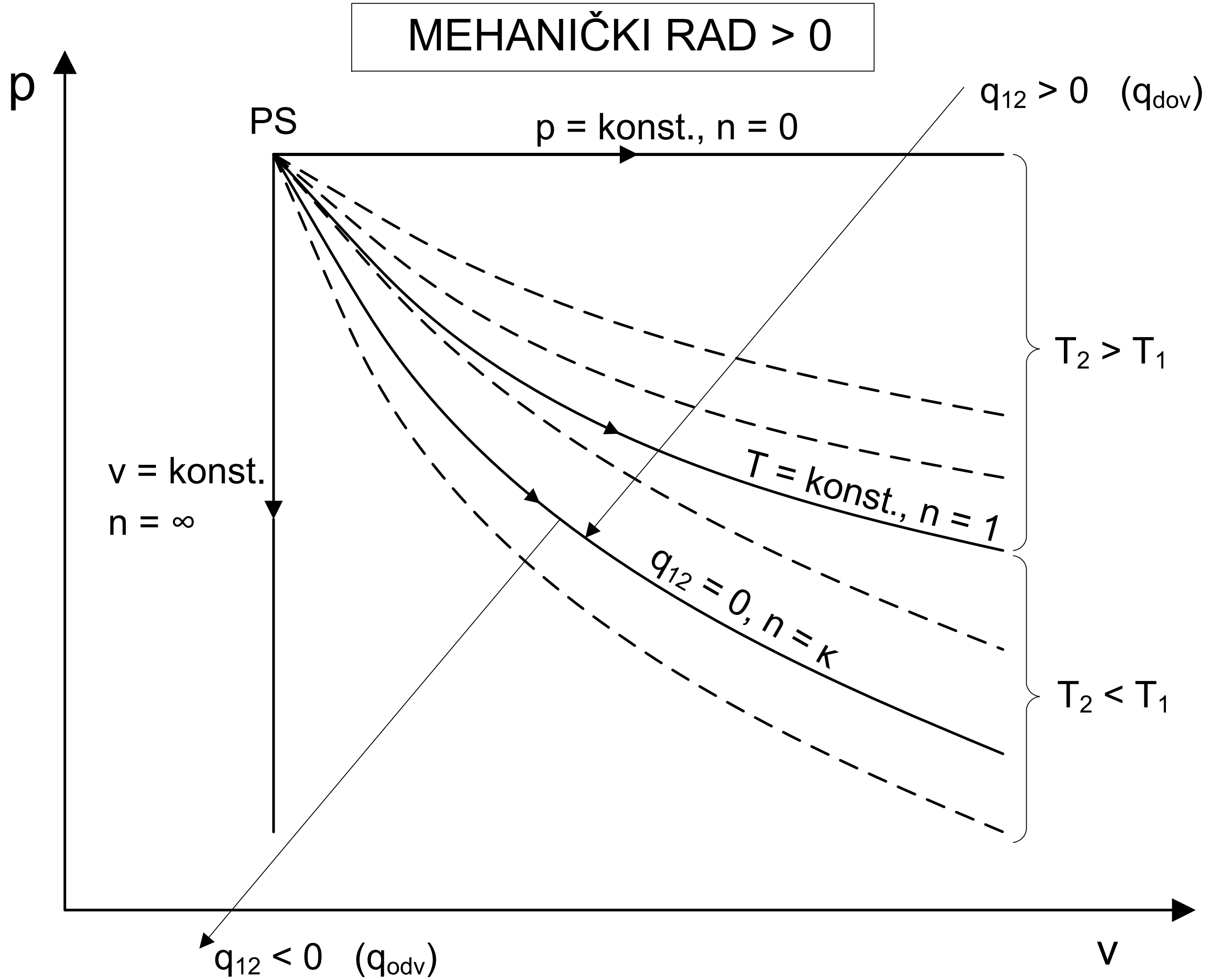
- što znači negativna politropska specifična toplina?

➢ negativna specifična toplina 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**: $\mathbf{1 < n < \kappa}$, 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

a)



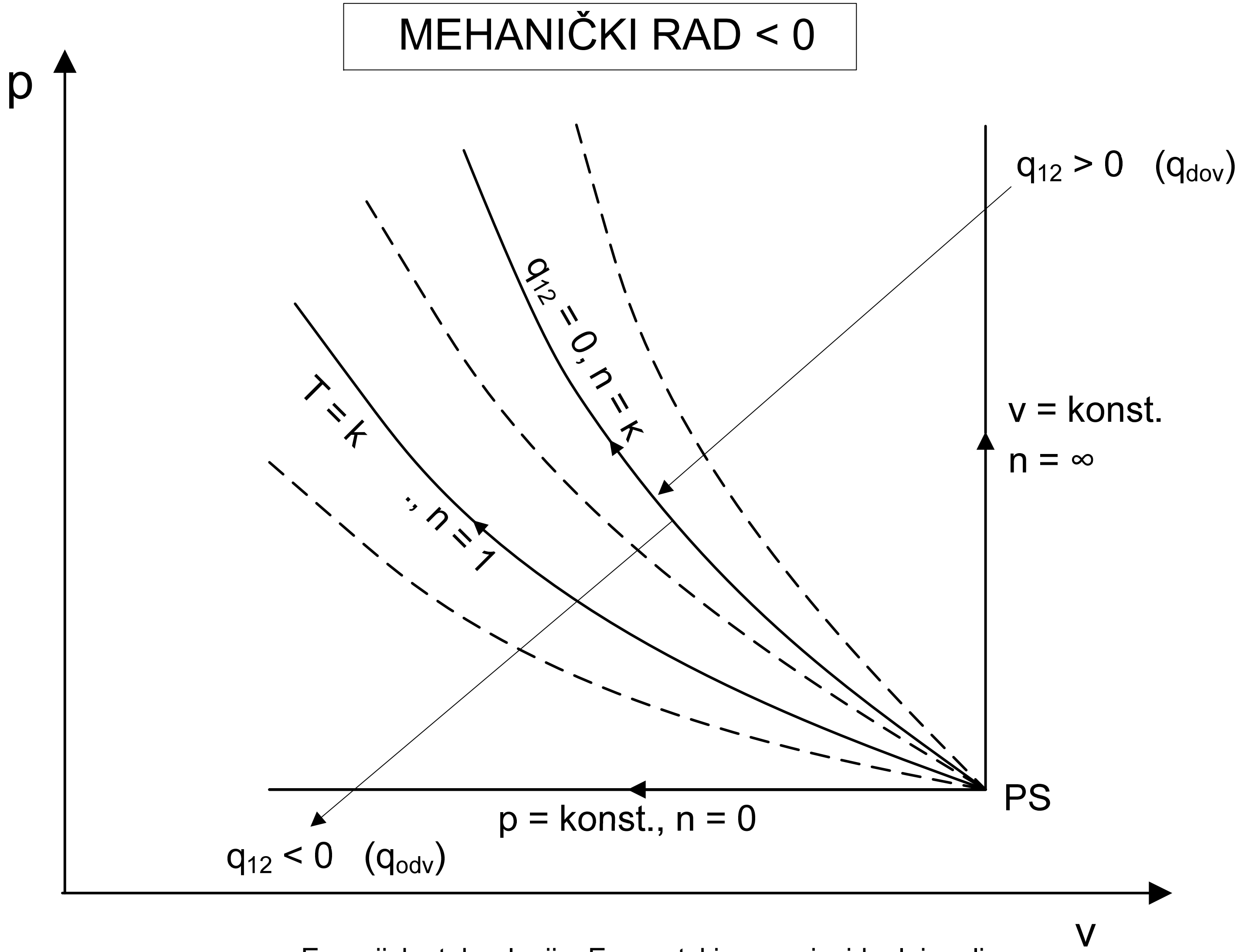
Usporedba procesa – dobivanje mehaničkog rada, dovođenje i odvođenje toplinske energije

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

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

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

b)



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**:

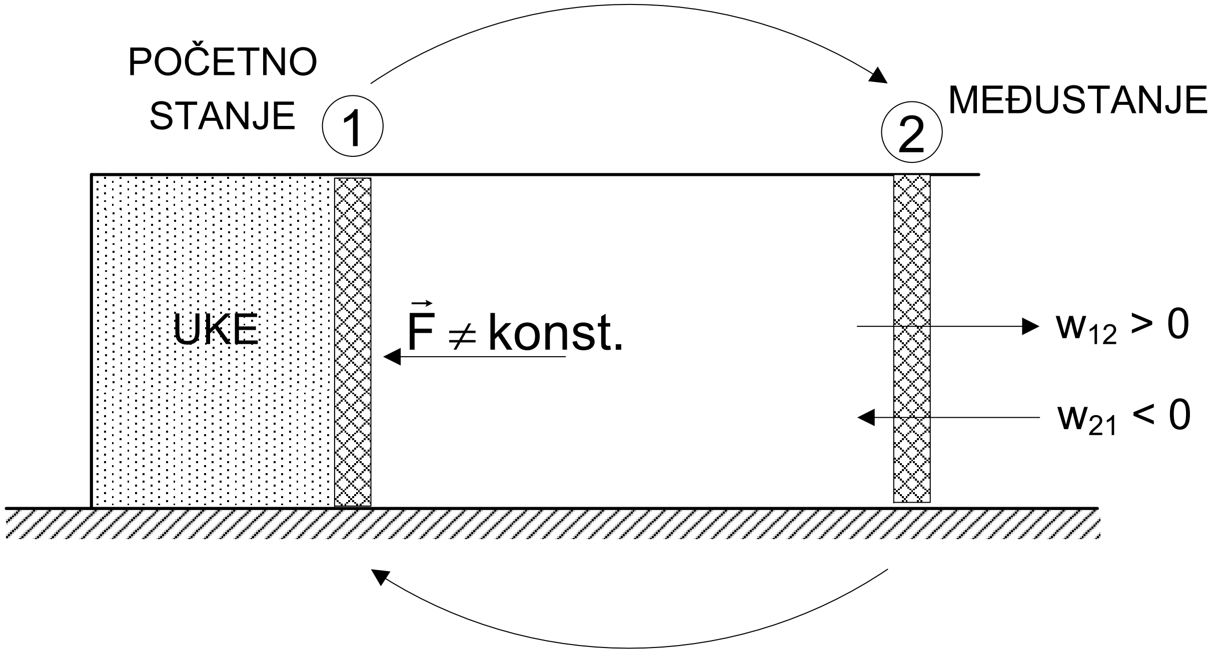
- $\kappa < n \leq \infty$ toplinska se energija mora dovoditi u proces ($q_{12} = q_{dov} > 0$).
- $n = \kappa$ toplinska se energija niti dovodi niti odvodi ($q_{12} = 0$, adijabatski proces),
- $0 \leq n < \kappa$ toplinska se energija mora odvoditi iz procesa ($q_{12} = q_{odv} < 0$).

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 je kružni proces sastavljen od povratljivih ili nepovratljivih procesa, odnosno radi li se o zatvorenom, otvorenom itd. sustavu

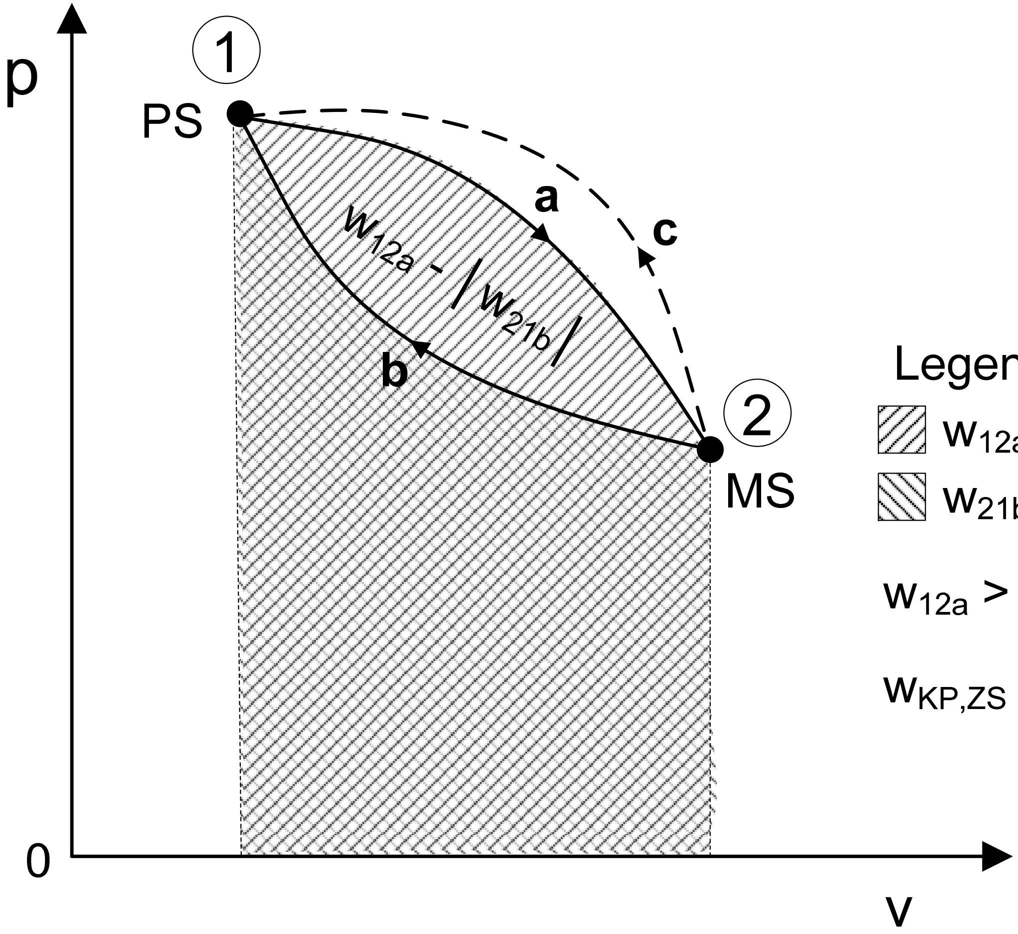
Kružni procesi zatvorenih sustava

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



$$w_{12} > |w_{21}| \ ?$$

Kružni procesi zatvorenih sustava



Legenda

w_{12a}

w_{21b}

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

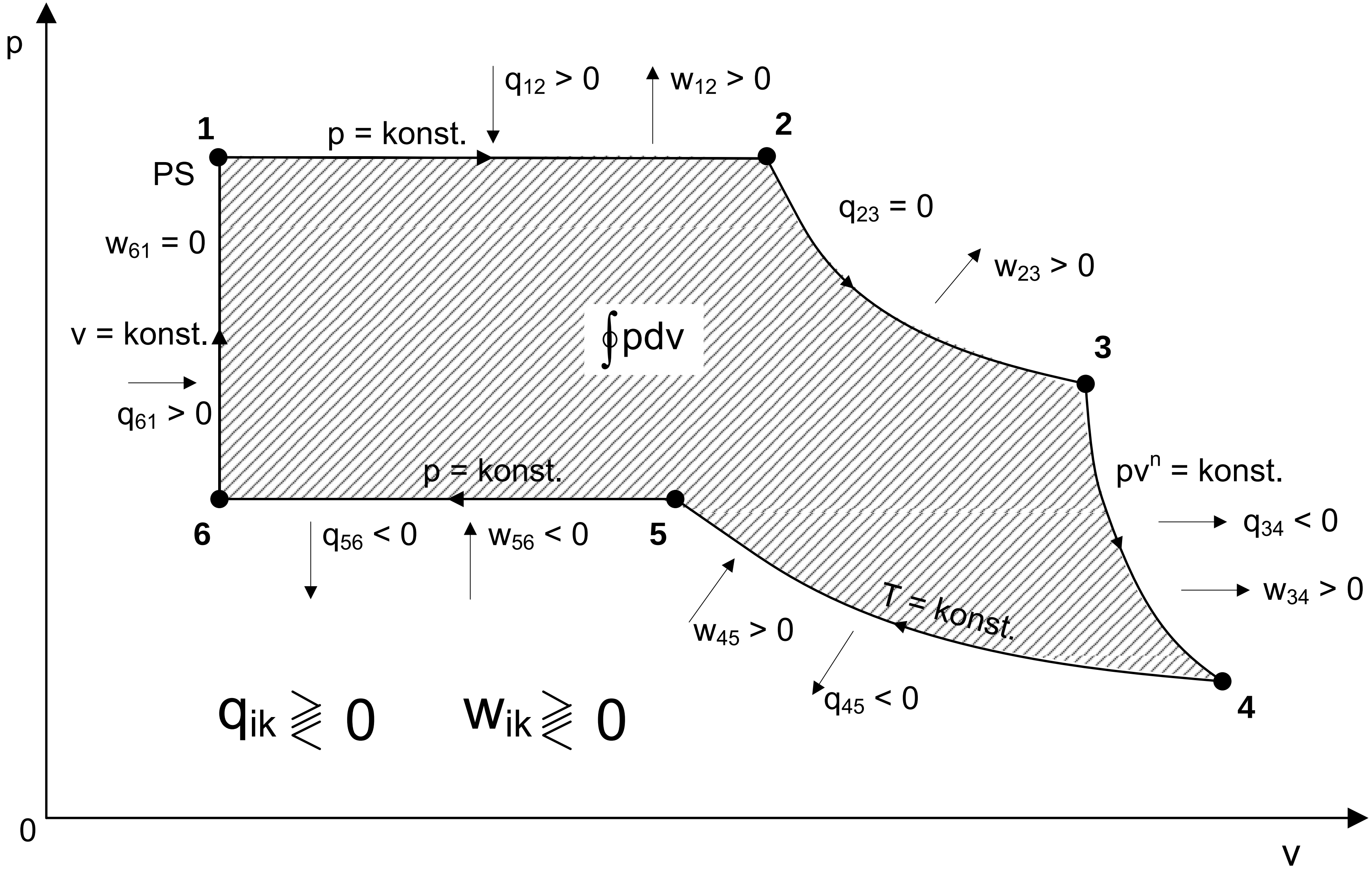
$w_{KP,ZS} = w_{12a} - |w_{21b}| > 0$

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

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

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

Kružni procesi zatvorenih sustava



Kružni procesi zatvorenih sustava

$$q_{12} = w_{12} + u_2 - u_1$$
$$q_{23} = w_{23} + u_3 - u_2$$
$$q_{34} = w_{34} + u_4 - u_3$$
$$\ldots$$
$$q_{61} = w_{61} + u_1 - u_6$$

$$q_{ik}$$

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

$$q_{12} + q_{23} + q_{34} + \ldots + q_{61} = w_{12} + w_{32} + w_{34} + \ldots + w_{61}$$

$$w_{KP_{ZS}} = \sum w_{ik} = \sum q_{ik} \text{ [J/kg]}$$

Koliki je $w_{KP_{ZS}}$?

Mehanički rad kružnog procesa zatvorenog sustava

$$\mathrm{w_{ik}} = \int_{v_i}^{v_k} p\,dv \quad \text{(zanemarujemo trenje)}$$

$$w_{KP_{ZS}} = \sum w_{ik} = \int_{v_1}^{v_2} p\,dv + \int_{v_2}^{v_3} p\,dv + \ldots + \int_{v_n}^{v_1} p\,dv = \oint p\,dv$$

$$\oint p\,dv = w_{KP_{ZS}} + \sum \left| w_{RTik} \right.$$

$$w_{povKP_{ZS}} = \oint p\,dv \quad \text{mehanički povratljivi proces (ne postoji trenje)}$$

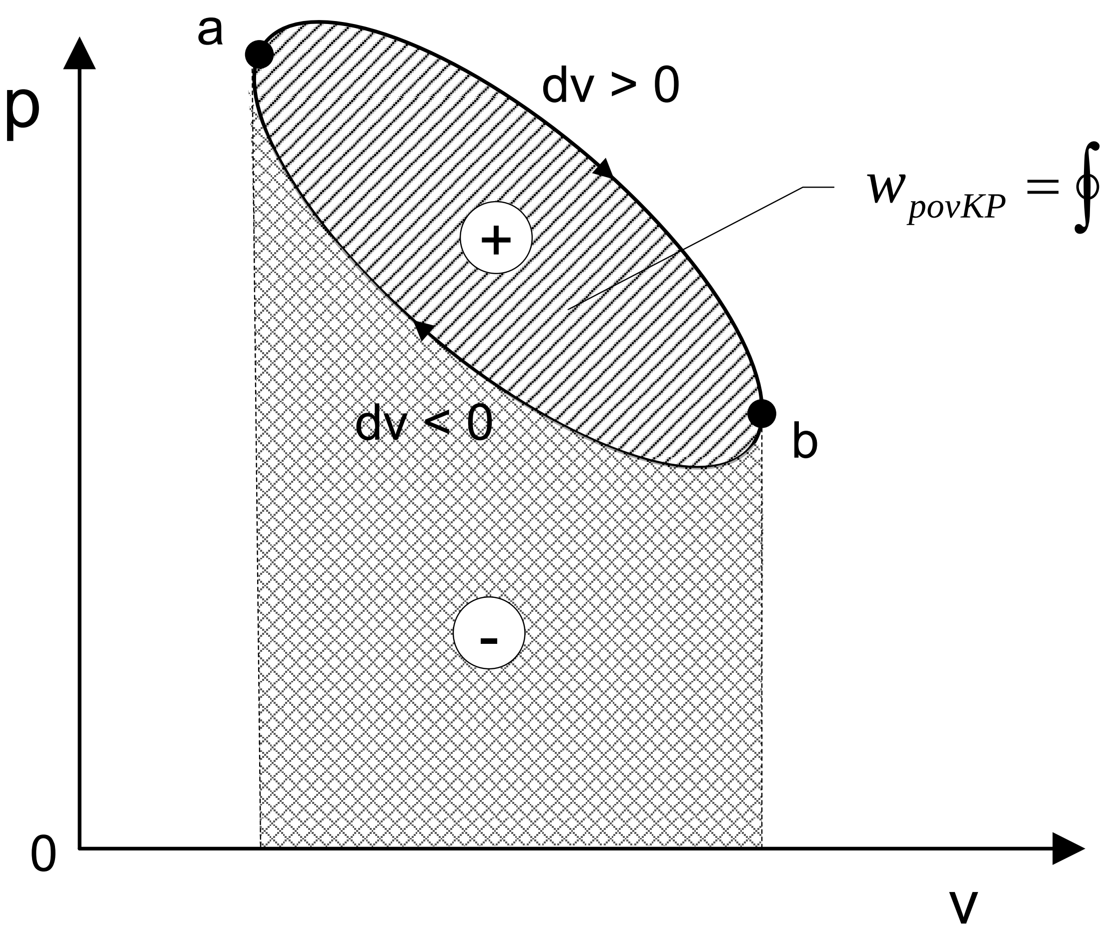
Mehanički rad kružnog procesa zatvorenog sustava

$$\sum q_{ik} = \sum q_{ik_{dov}} + \sum q_{ik_{odv}} = q_{dov} + q_{odv} = q_{dov} - |q_{odv}|$$

$$w_{povKP_{ZS}} = \oint p dv = q_{dov} - |q_{odv}|$$

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**.

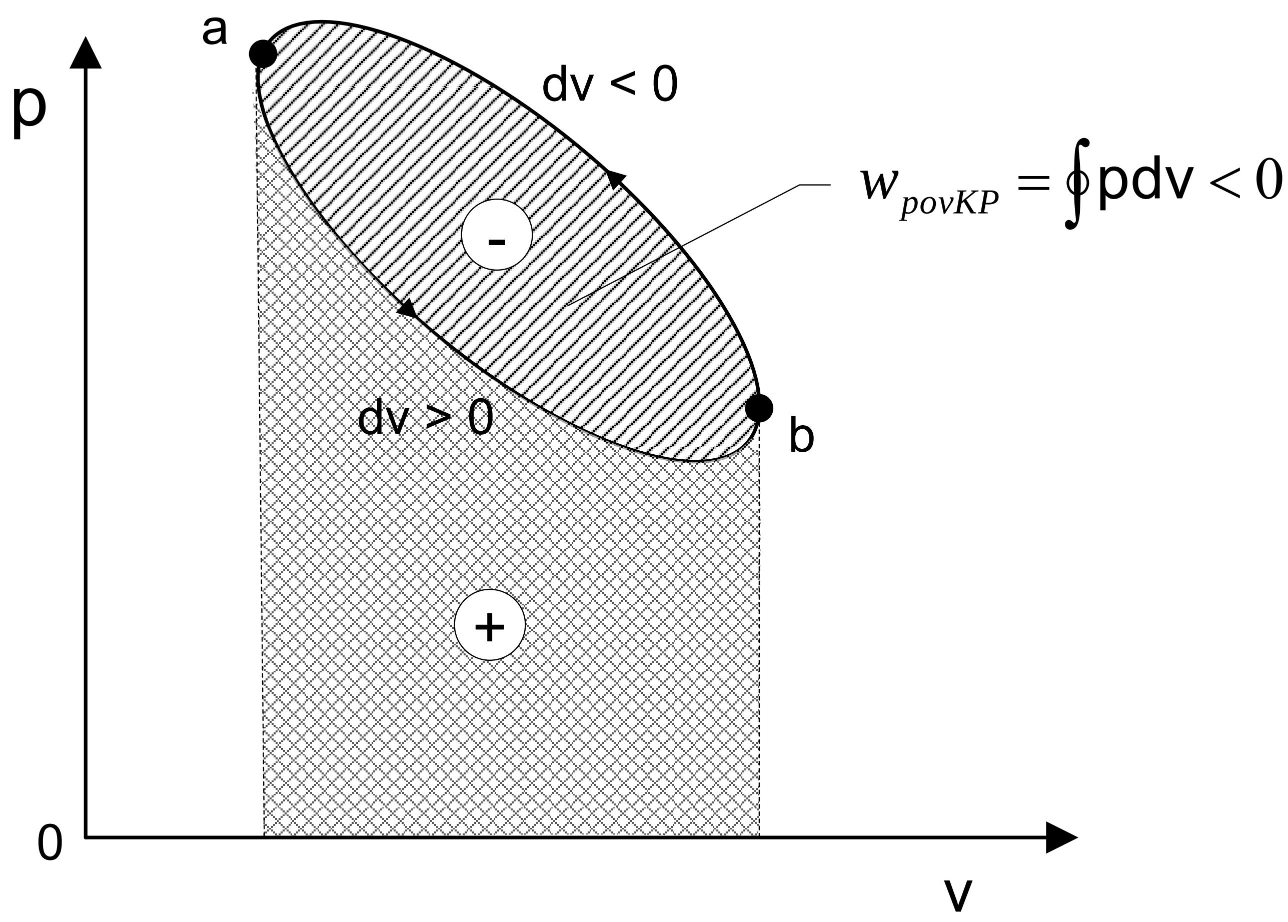
Desnokretni kružni proces



$$w_{povKP} = \oint pdv > 0$$

$$w_{DKP} = \int_a^b pdv - \left| \int_b^a pdv \right| > 0 \text{ jer je } \int_a^b pdv > \left| \int_b^a pdv \right|$$

Ljevokretni kružni proces



$$w_{LJK} = \int_a^b pdv + \int_b^a pdv = \int_a^b pdv - |\int_b^a pdv| < 0 \text{ jer je } \int_a^b pdv < |\int_b^a pdv|$$

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:

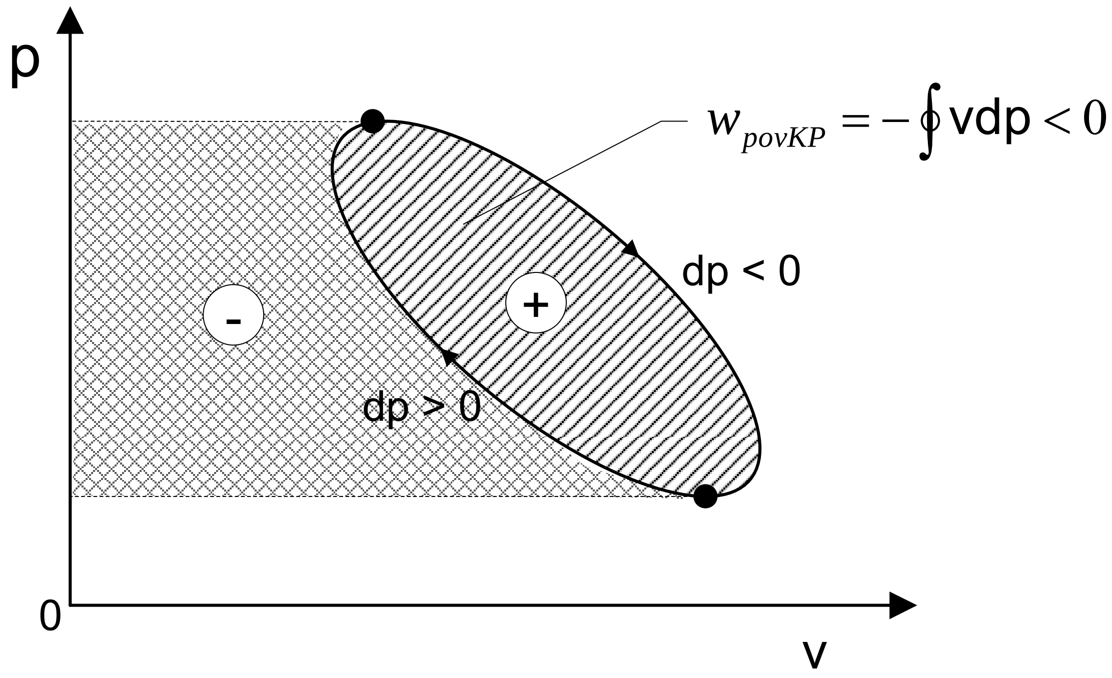
$$w_{KP_{OS}} \equiv w_{t_{KP}} ?$$

Mehanički rad desnokretnog kružnog procesa otvorenih sustava

- princip očuvanja energije (1. glavni stavak termodinamike za otvoreni sustav)

$$w_{KP_{OS}} \equiv w_{t_{KP}} = \sum w_{t\,ik} = \sum q_{tik} \ \text{[J/kg]}$$

$$w_{tik} = -\int_{p_i}^{p_k} v\,dp - \frac{1}{2}(c_k^2 - c_i^2) - g(z_k - z_i)$$



$$w_{t_{KP}} = -\oint v\,dp = \sum w_{t\,ik} = w_{t_{turbine}} + w_{t_{pumpe}} = w_{t_{turbine}} - \left|w_{t_{pumpe}}\right| = \sum q_{tik} \ \text{[J/kg]}$$

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:

$$\sum q_{tik} \equiv \sum q_{ik} = \sum q_{ik_{dov}} + \sum q_{ik_{odv}} = \mathrm{q}_{\mathrm{dov}} + \mathrm{q}_{\mathrm{odv}} = \mathrm{q}_{\mathrm{dov}} - |\mathrm{q}_{\mathrm{odv}}|$$

Mehanički rad kružnih procesa

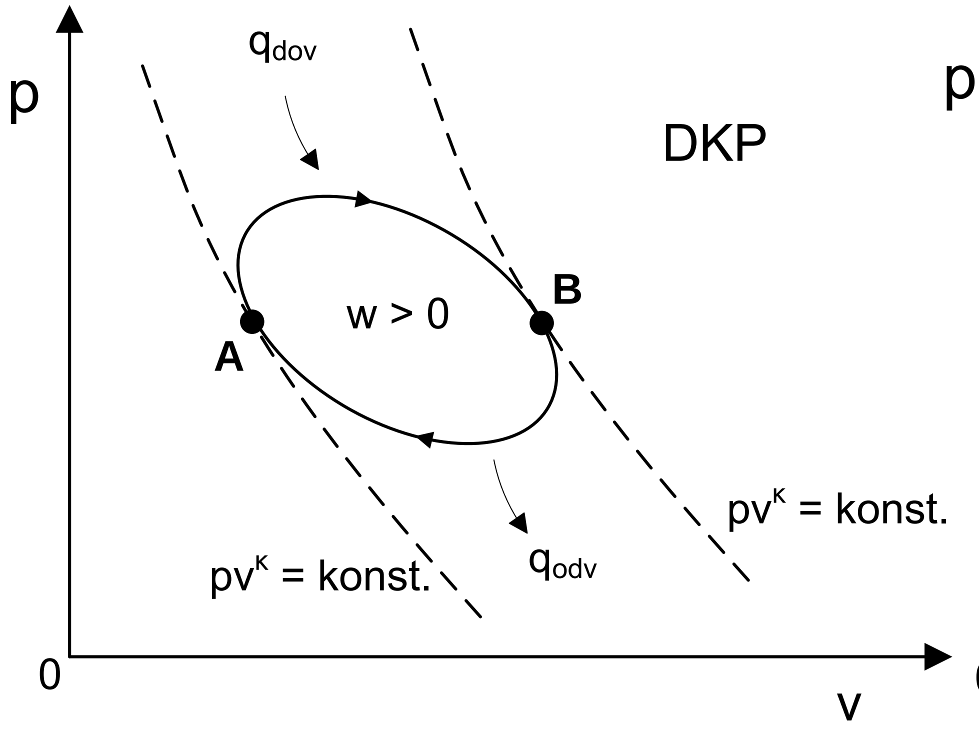
- jer vrijedi i da je

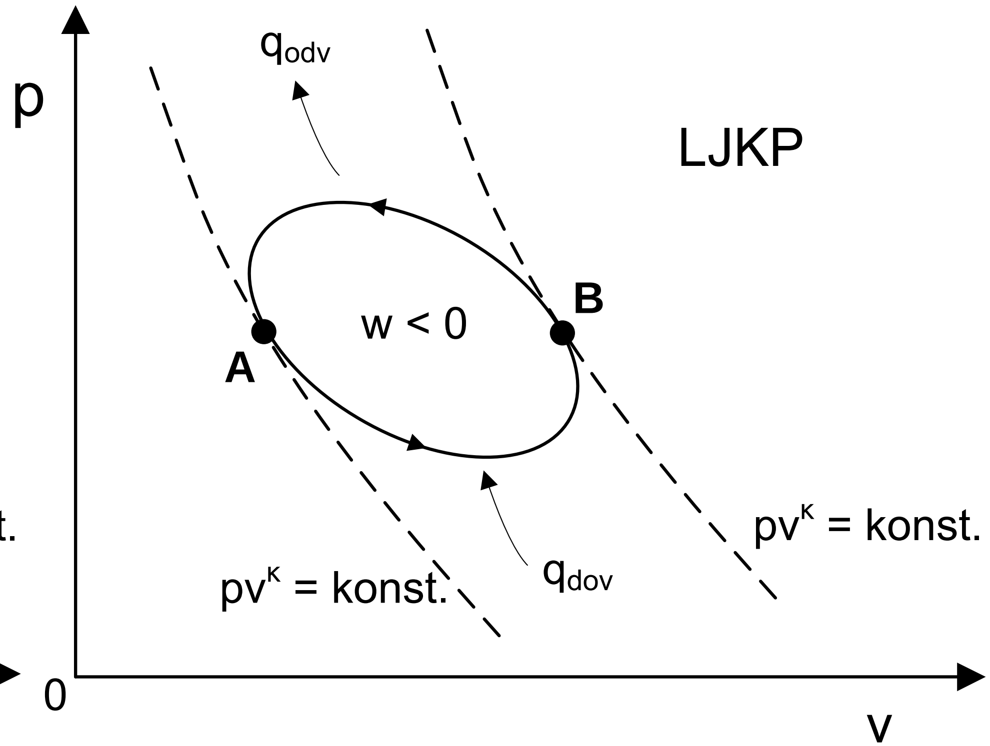
$$w_{t_{KP}} = \sum q_{tik} = \sum q_{ik} \text{ , a } w_{KP_{ZS}} = \sum q_{ik}$$

- 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:

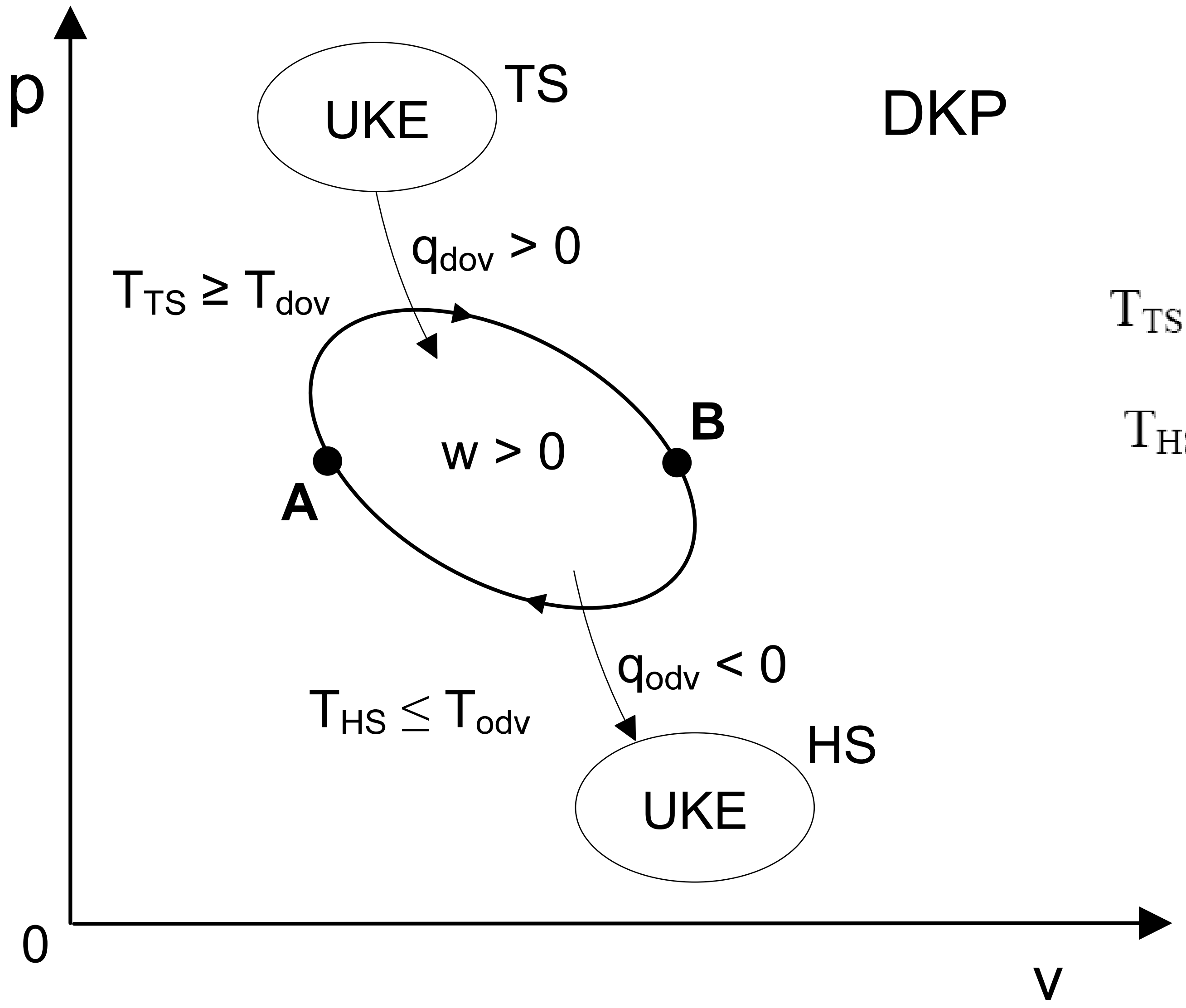
$$w_{KP_{ZS}} = w_{t_{KP}} = \mathrm{w_{KP}} = \mathrm{w} = \oint pdv = -\oint vdp = \mathrm{q_{dov}} + \mathrm{q_{odv}} = \mathrm{q_{dov}} - |\mathrm{q_{odv}}|$$

Kružni proces bez dovođenja, odvođenja toplinske energije?





Toplinski spremnici i prijelaz toplinske energije u i iz kružnog procesa



$$T_{TS} \geq T_{\max_{KP}} \equiv T_{dov}$$

$$T_{HS} \leq T_{\min_{KP}} \equiv T_{odv}$$

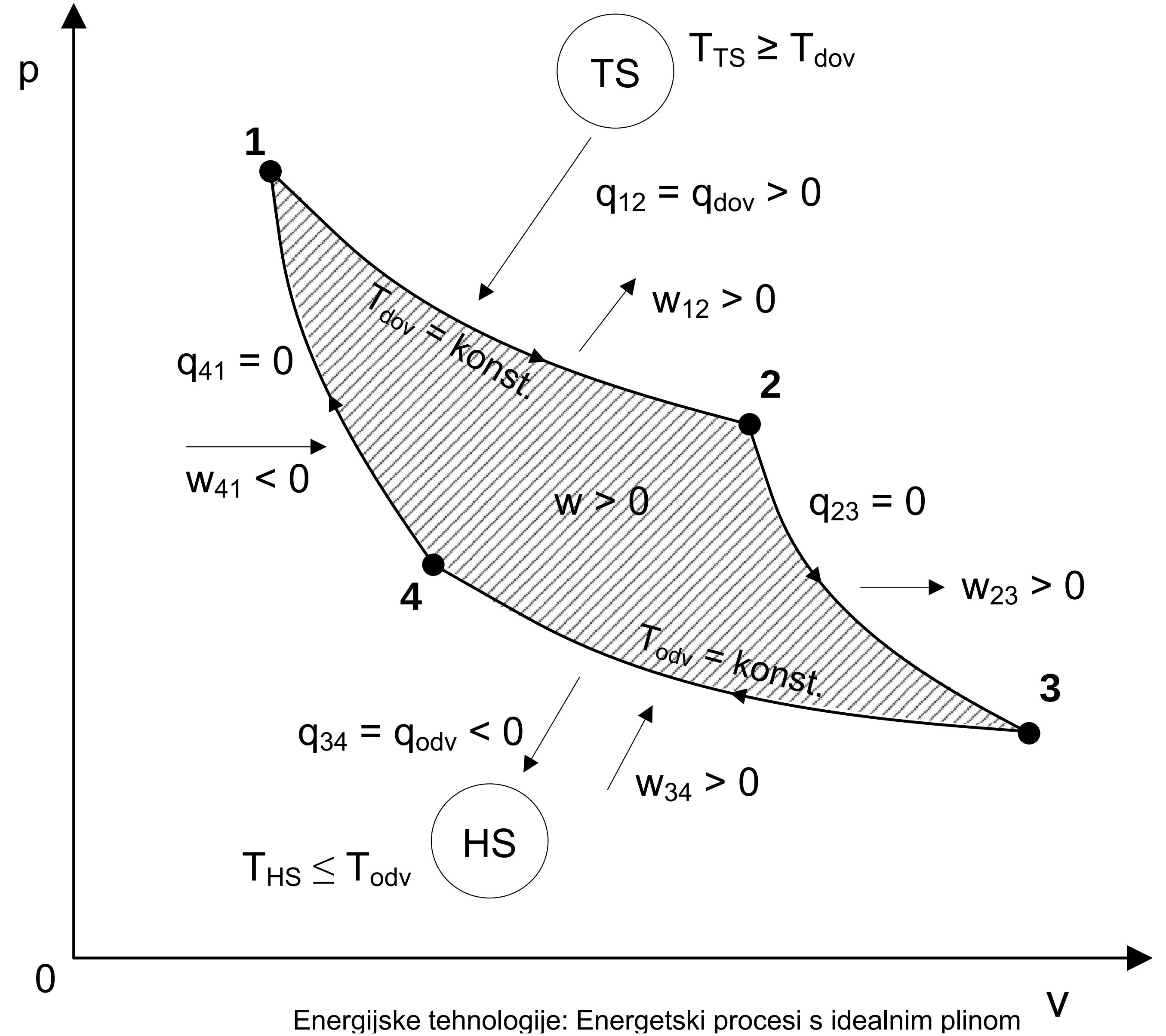
Termički (energetski) stupanj djelovanja

$$w = q_{dov} - |q_{odv}| \ [J/kg]$$

$$\eta_t = \frac{w}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} + q_{odv}}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} - |q_{odv}|}{q_{dov}} = 1 - \frac{|q_{odv}|}{q_{dov}}$$

η_{tmax} $\quad$ q_{odv} $\quad$ $q_{odv_{min}}$?

Carnotov desnokretni kružni proces



Mehanički rad DCKP

$$w = \oint p dv = - \oint v dp = q_{dov} + q_{odv} = q_{dov} - |q_{odv}| \text{ [J/kg]}$$

$$q_{12} = RT_{dov} \ln \frac{v_2}{v_1} = q_{dov} > 0, \qquad q_{34} = RT_{odv} \ln \frac{v_4}{v_3} = - RT_{odv} \ln \frac{v_3}{v_4} = q_{odv} < 0.$$

$$\frac{T_{dov}}{T_{oav}} = \left(\frac{v_3}{v_2}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{v_4}{v_1}\right)^{\kappa-1} \qquad \frac{v_3}{v_2} = \frac{v_4}{v_1} \text{ ili } v_1 v_3 = v_2 v_4$$

$$w = q_{dov} - |q_{odv}| = RT_{dov} \ln \frac{v_2}{v_1} - RT_{odv} \ln \frac{v_3}{v_4} = R(T_{dov} - T_{odv}) \ln \frac{v_2}{v_1} \text{ [J/kg]} > 0$$

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:

$$\mathrm{w} = \oint p\,dv = \int_{v_1}^{v_2} p\,dv + \int_{v_2}^{v_3} p\,dv + \int_{v_3}^{v_4} p\,dv + \int_{v_4}^{v_1} p\,dv =$$

$$= \mathrm{RT_{dov}} \ln\frac{v_2}{v_1} + \mathrm{c_v(T_{dov} - T_{odv})} + \mathrm{RT_{odv}} \ln\frac{v_4}{v_3} + \mathrm{c_v(T_{odv} - T_{dov})} = \mathrm{R(T_{dov} - T_{odv})} \ln\frac{v_2}{v_1}$$

Dakako, isti bismo rezultat dobili računamo li rad kružnog procesa i prema izrazu $\mathrm{w} = -\oint v\,dp$.

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 desnokretnom kružnom procesu pretvara u mehanički rad jednaka:

$$w = \eta_{tCKP}\, q_{dov} = \left(1 - \frac{T_{odv}}{T_{dov}}\right) q_{dov} \text{ [J/kg]}$$

$\eta_{tCKP} = f(T)$ Je li je to iznenađujući 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 $|q_{odvmin}| > 0$, termički stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa ne može biti jednak jedan.
- to slijedi i iz ovakve analize ...

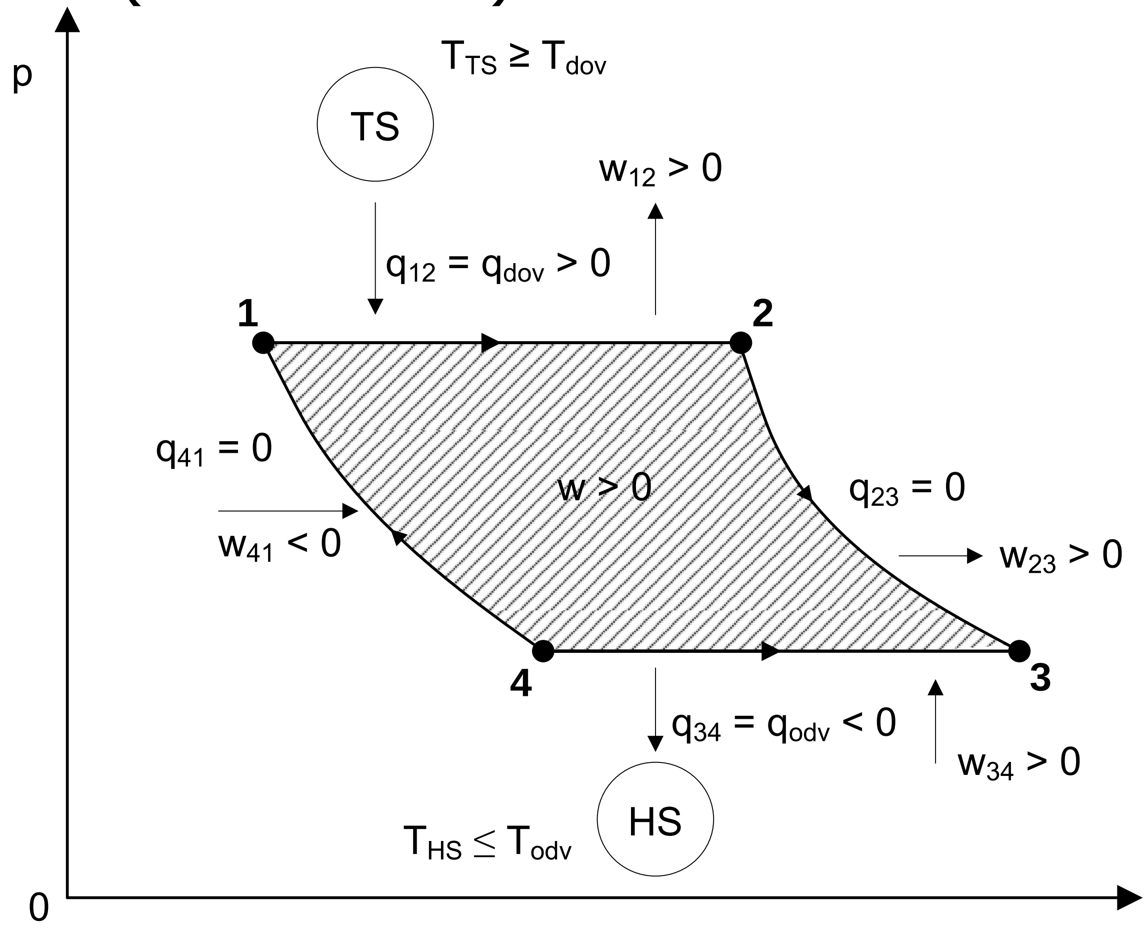
$T_{odv} >> 0\ K$ $\quad$ $T_{odv} >> 0\ K?$ $\quad$ T_{ok}

$\eta_{tCKP} = 1?$ $\quad$ $T_{dov} = \infty$?

Zašto se Carnotov kružni proces ne provodi u tehničkoj praksi?

Jouleov (*Braytonov*) desnokretni kružni proces

- Za tehničku je praksu 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

$$w = q_{dov} - |q_{odv}| = c_p\,(T_2 - T_1) - c_p\,(T_3 - T_4)\ [J/kg]$$

$$\eta_{tJKP} = \frac{w}{q_{dov}} = 1 - \frac{|q_{odv}|}{q_{dov}} = 1 - \frac{T_3 - T_4}{T_2 - T_1} = 1 - \frac{T_4}{T_1}\,\frac{\left(\frac{T_3}{T_4} - 1\right)}{\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)} = 1 - \frac{T_4}{T_1}$$

Za Jouelov kružni proces vrijedi ovaj odnos između temperatura procesa:

$$T_1 T_3 = T_2 T_4$$

pa je razlomak $\dfrac{\left(\frac{T_3}{T_4} - 1\right)}{\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)}$ 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

$$T_{maxCKP} = T_{maxJKP} = T_{max} \quad T_{minCKP} = T_{minJKP} = T_{min}$$

$$T_{maxCKP} = T_{dov} \quad T_{maxJKP} = T_2$$

$$T_{minCKP} = T_{odv} \quad T_{minJKP} = T_4$$

$$\eta_{tCKP} = 1 - \frac{T_{odv}}{T_{dov}} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \qquad \eta_{tJKP} = \frac{w}{q_{dov}} = 1 - \frac{T_4}{T_1} = 1 - \frac{T_{min}}{T_1}$$

$$T_1 < T_{maxJKP} = T_2$$

$$\eta_{tJKP} < \eta_{tCKP}$$

Primjene desnokretnog Jouleovog kružnog procesa

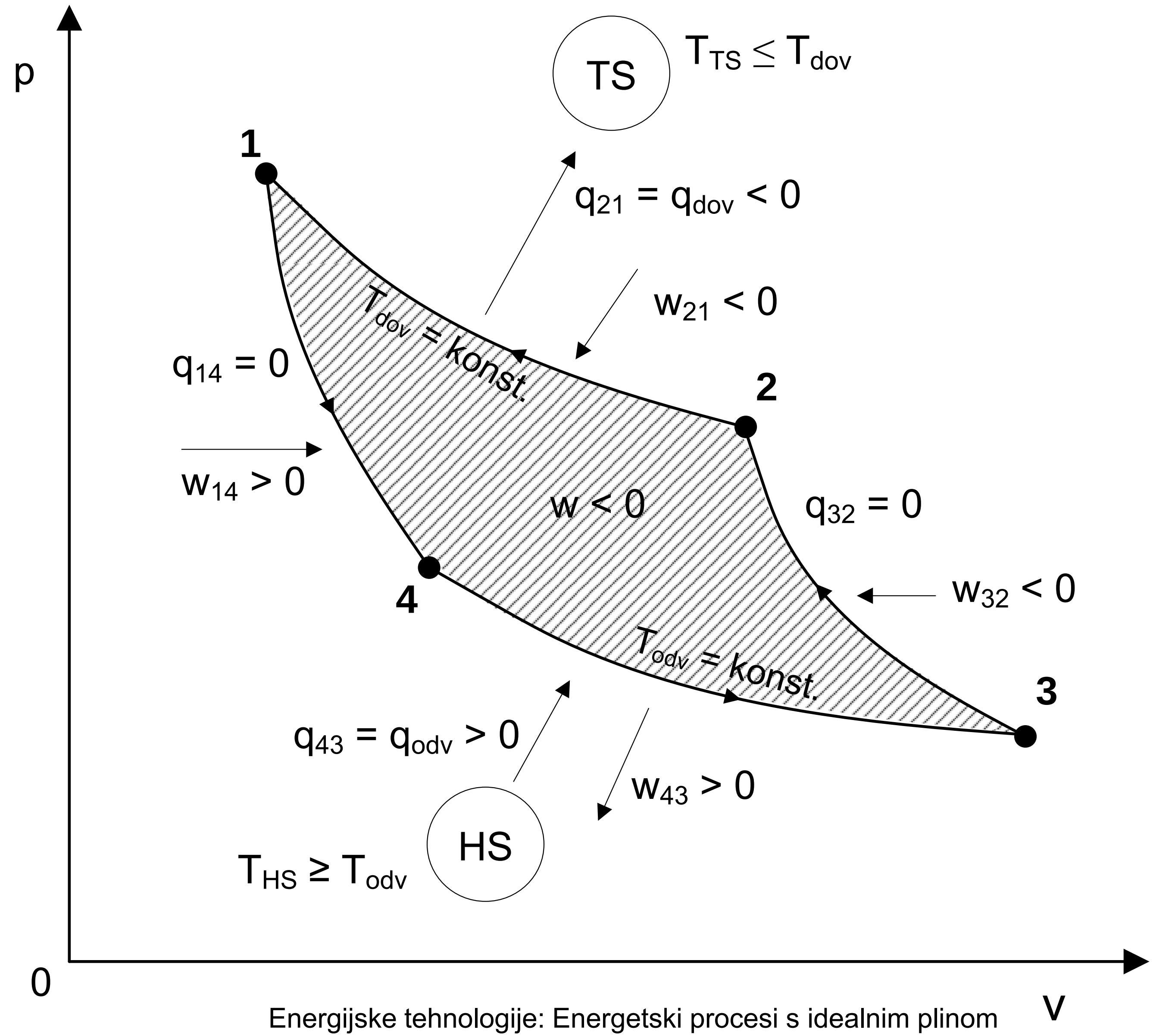
- u termoelektranama s plinskim turbinama, odnosno u termoelektranama sa spojnim procesima
- pogon reaktivnih (mlaznih) motora velikih zrakoplova

$$\vec{F} \approx -\dot{m}\left(\vec{c}_{izlplinova} + \vec{c}_{zrakoplova}\right) \text{ [N]}$$

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

$$w = \oint p dv = - \oint v dp = q_{dov} + q_{odv} = q_{odv} - |q_{dov}| =$$

$$= RT_{odv} \ln \frac{v_3}{v_4} - RT_{dov} \ln \frac{v_2}{v_1} = R(T_{odv} - T_{dov}) \ln \frac{v_2}{v_1} \ [J/kg]$$

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 ^{o}C, temperatura vode (jezera) 2 ^{o}C
- temperaturu prostorija kuće održavati na 20 ^{o}C
- T_{odv} = 275,15 K, a T_{dov}= 293,15 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

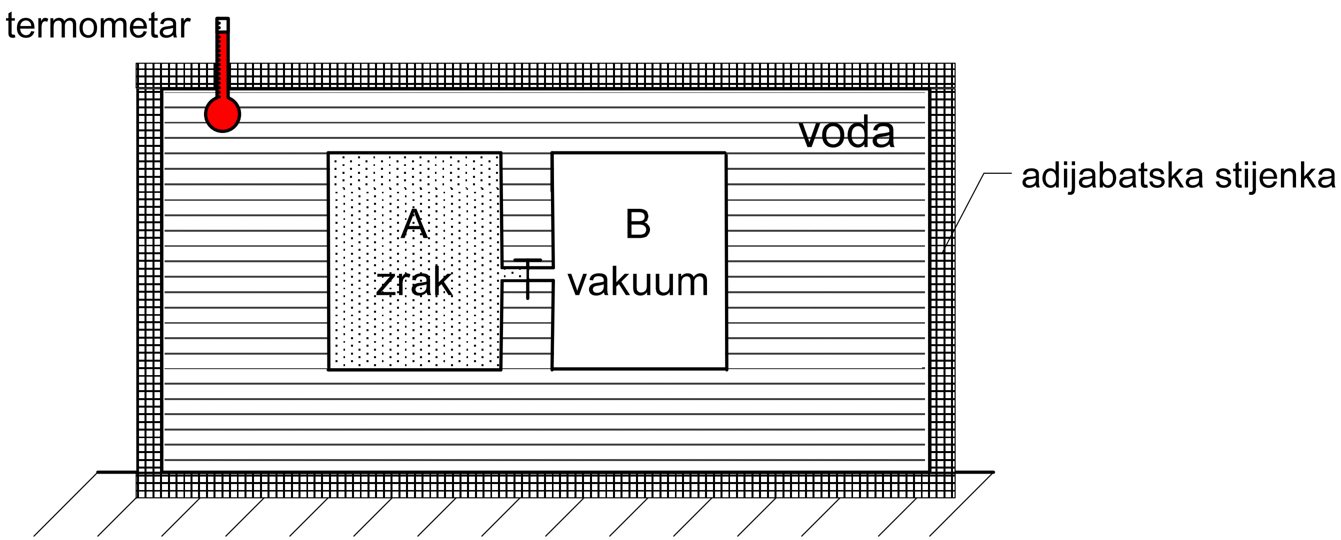
  (U suprotnom morali bismo rabiti dva izraza, ovisno o tome koji kružni proces analiziramo.)

- 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 $|q_{dov}| > q_{odv}$

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?

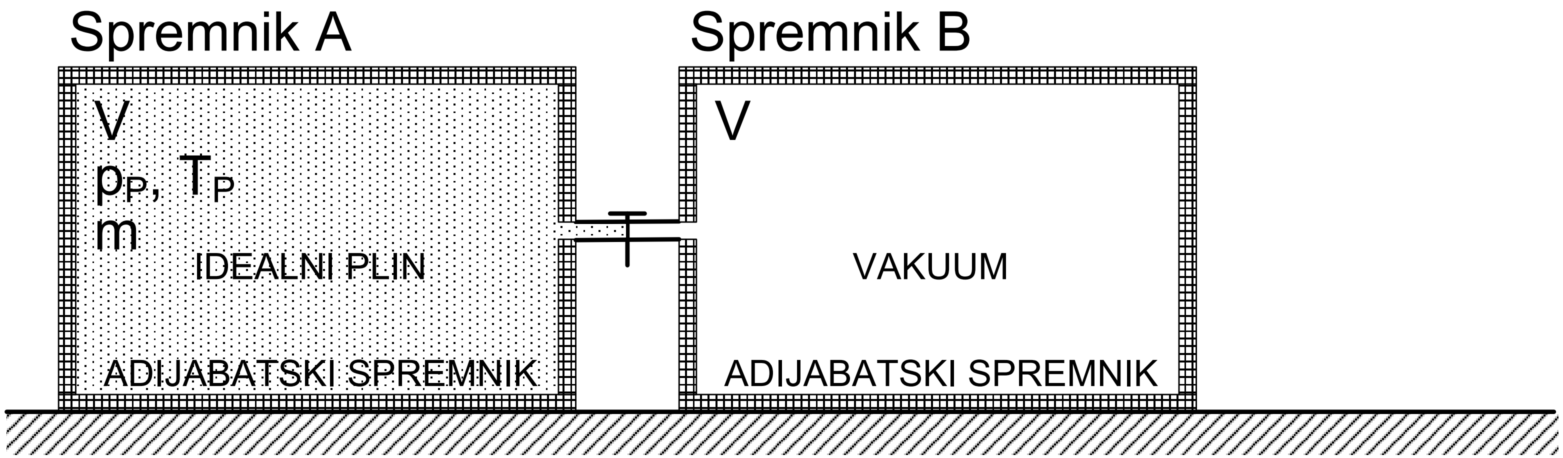


Zadatak

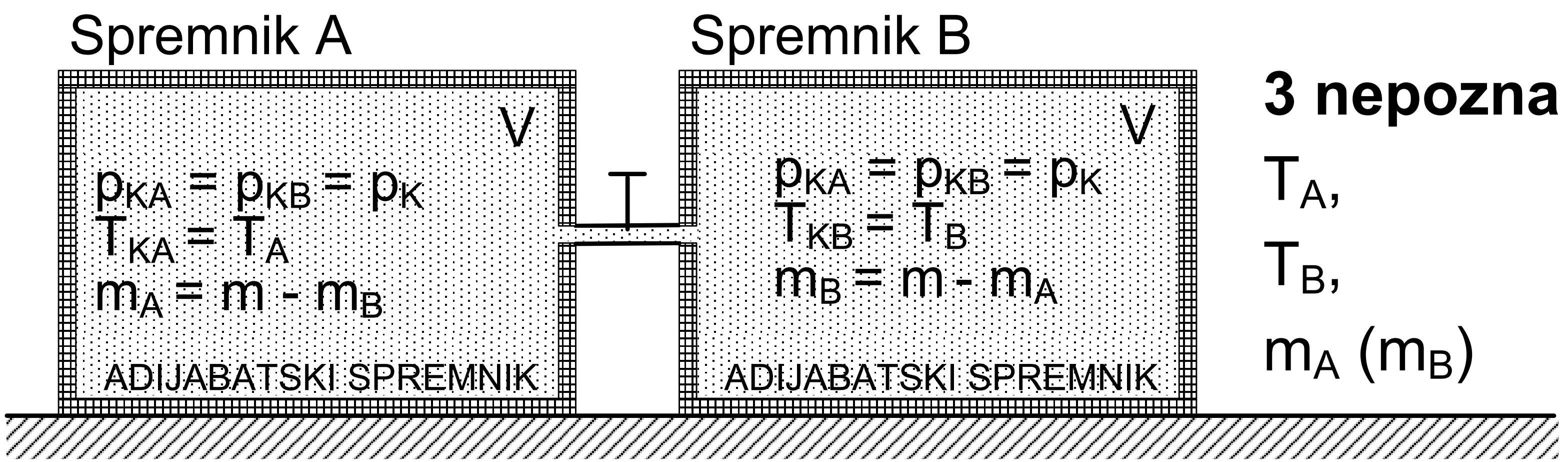
Dva kruta spremnika, A i B, svaki obujma 0,5 m^3, adijabatski su sustavi povezani sa cijevi zanemarivog obujma u kojoj se nalazi ventil. Početno se u spremniku A nalazi idealni plin (c_v = 472 J/kgK, κ = 1,4) tlaka 10 bara i temperature 21°C, ventil je u spojnoj cijevi zatvoren, a spremnik je B zrakoprazan. 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)



3 nepoznanice:

T_A,

T_B,

m_A (m_B)

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:

$$p_k = \frac{m_k R T_k}{V} = konst.$$

(m_k = konst, R = konst, V = konst, T_k = 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:

$Q_{12} = U_2 - U_1 + W_{12}$; $Q_{12} = 0$, $W_{12} = 0$, $U_2 = U_1$

Ukupni se sadržaj unutrašnje kaloričke energije (UKE) stanja 1 i 2 sastoji od UKE spremnika A i B u oba stanja:

$U_1 = U_{1A} + U_{1B} = U_{1A}$ ($U_{1B} = 0$), a $U_2 = U_{2A} + U_{2B}$

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:

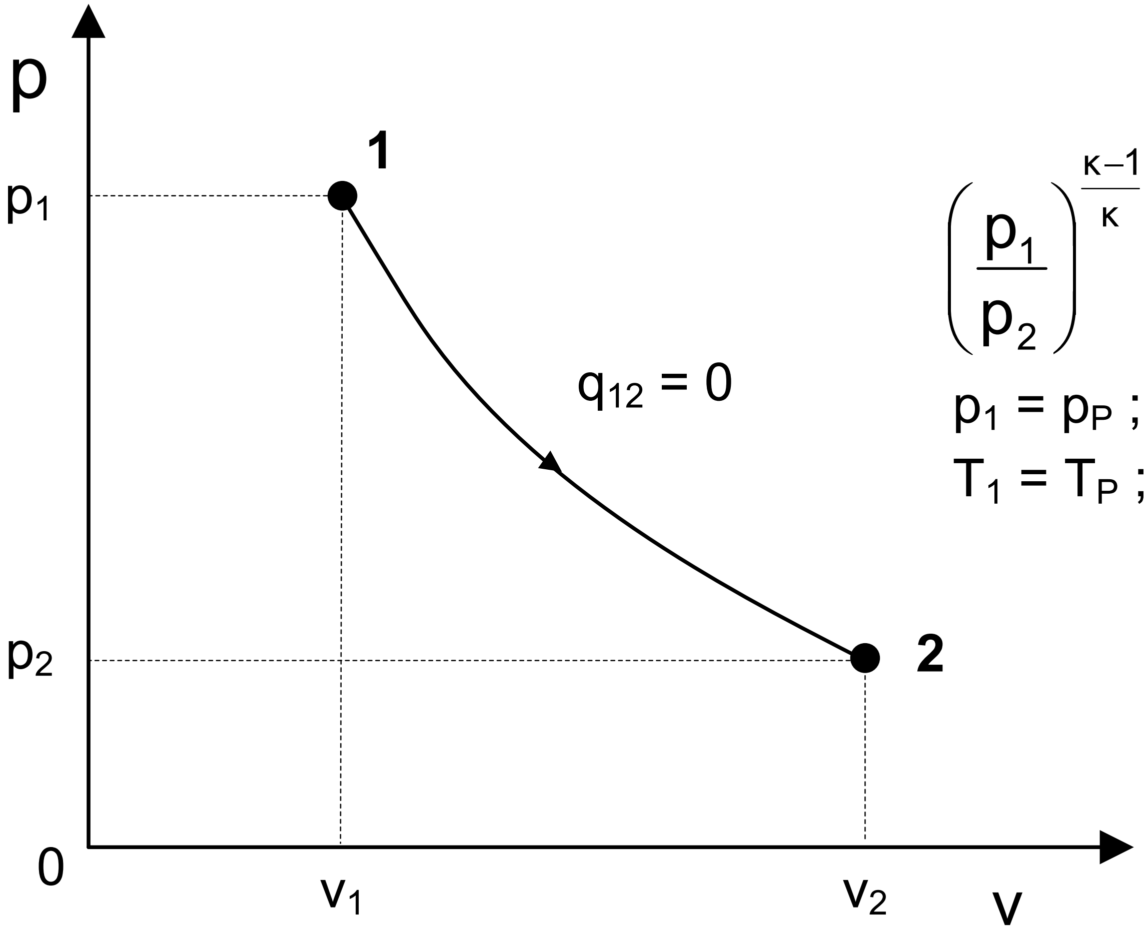
Zadatak - rješenje

$$p_k = \frac{p_p}{2} = \frac{m_A R T_A}{V} = \frac{m_B R T_B}{V} \Rightarrow m_A T_A = m_B T_B \to (2) \Rightarrow m_A T_A = m_B T_B = \frac{m T_P}{2} (3)$$

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 izentropskim procesom, slika.

Zadatak - rješenje



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

$p_1 = p_P$; $p_2 = 0{,}5\, p_P$

$T_1 = T_P$; $T_2 = T_A$

$$T_A = \frac{T_p}{2^{\frac{0,4}{1,4}}} = 241{,}3K \qquad /Tp = (273{,}15 + 21)K/$$

Zadatak - rješenje

Dalje je (konačno stanje u spremniku A):

$$\frac{p_p}{2}\cdot V = m_A R T_A \Rightarrow m_A = \frac{500000\cdot 0,5}{188,8\cdot 241,3} = 5,51 kg$$

(R = c_v(κ-1) = 188.8 J/kgK)

Iz (1):

$$m_B = m - m_A = \frac{1000000\cdot 0,5}{188,8\cdot 294,15} - 5,51 = 3,49 kg$$

Iz (3):

$$T_B = \frac{m_A T_A}{m_B} = 380,96 K$$

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 ($h = u + pv = c_pT$) i ona se u spremniku B pretvara u unutrašnju kaloričku energiju ($u = c_vT$):

$h = u$, $c_pT = c_vT'$; $T' = \frac{c_p}{c_v} T \rightarrow \frac{c_p}{c_v} > 1 \Rightarrow T' > T$.

Primjeri

Idealni plin, R = 287 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.

$$q_{12} = \delta u + \int_{v_1}^{v_2} p dv - \left| w_{RT12} \right|$$

$$\delta u = c_v \delta T = 0 \Leftrightarrow T = konst.$$

Primjeri

Odvedena toplinska energija q_{12}:

$$\int_{v_1}^{v_2} p dv = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = 0{,}287 \frac{kJ}{kgK} \cdot 300K \cdot \ln 2 =$$

$$= 59{,}69 \frac{kJ}{kg}$$

$$q_{12} = 59{,}69 \frac{kJ}{kg} - 75 \frac{kJ}{kg} = -15{,}31 \frac{kJ}{kg} = q_{odv}$$

Primjeri

Odredite koliki se dio toplinske energije dovedene u proces izobarne ekspanzije idealnog plina (κ= 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 (κ= 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

Idealni plin, R = 287 J/kgK, κ= 1,4, pod tlakom 50 bara, temperature 300 K, volumena 0,5 m³, nalazi se u cilindru sa stapom pomičnim bez trenja. Plinu se dovodi rad trenja iznosa 30 MJ za vrijeme adijabatskog procesa konstantnog tlaka. Odredite konačnu temperaturu plina.

Rj.

$$Q_{12} = \delta U + \int_{V_1}^{V_2} p dV - \left| W_{RT12} \right| ; Q_{12} = 0$$

$$m = \frac{p_1 V_1}{R T_1} = \frac{50 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} \cdot 0{,}5 m^3}{287 \frac{J}{kgK} \cdot 300 K} = 29 kg$$

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 ($R = 287$ 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

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \Rightarrow \frac{n-1}{n} = \frac{\ln \dfrac{T_2}{T_1}}{\ln \dfrac{p_2}{p_1}} =$$

$$= \frac{\ln \dfrac{450K}{300K}}{\ln \dfrac{10bar}{1bar}} = 0{,}176 \Rightarrow n = 1{,}2$$

Primjeri

- uloženi meh. rad i izmijenjena top. energija

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{287 \cdot 450}{10 \cdot 10^5} = 0{,}129 \frac{m^3}{kg}$$

$$w_{12} = \frac{R}{n-1}\left(T_1 - T_2\right) =$$

$$= \frac{287}{1{,}2-1}\left(300-450\right) = -215.250 \frac{J}{kg}$$

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

$$= \frac{287}{1{,}4-1} \cdot \frac{1{,}2-1{,}4}{1{,}2-1} \cdot 150 = -107.625 \frac{J}{kg}.$$

Primjeri

Kružni se proces motora odvija s idealnim plinom

(R = 287 J/kgK, κ= 1,4) ovako:

1. plin se adijabatski komprimira s tlaka 1 bar i temperature 20 ^{0}C na tlak 30 bara;
2. izobarno ekspandira na dvostruki volumen;
3. izotermno ekspandira na početni volumen;
4. izohorno se hladi do početnog stanja.

Odredite rad kružnog procesa i izmijenjenu 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.

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} = 293{,}15 \left(\frac{30}{1} \right)^{0{,}286} = 775{,}44K$$

$$T_3 = T_2 \frac{v_3}{v_2} = 775{,}44 \cdot 2 = 1550{,}9K$$

$$p_4 = \frac{p_3 v_3}{v_4} = 5{,}57bar$$

Primjeri

Rj.

$$w_{12} = c_v\left(T_1 - T_2\right) = \frac{R}{\kappa - 1}\left(293{,}15 - 775{,}44\right) =$$

$$= \frac{287}{1{,}4 - 1}\left(293{,}15 - 775{,}44\right) = -346.043{,}1\frac{J}{kg}$$

$$w_{23} = p_2\left(v_3 - v_2\right) = 30 \cdot 10^5\left(0{,}156 - 0{,}078\right) =$$

$$= 234.000\frac{J}{kg}$$

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.

$$q_{dov} = q_{23} + q_{34}$$

$$q_{23} = c_p\left(T_3 - T_2\right) = \frac{\kappa R}{\kappa - 1}\left(T_3 - T_2\right) =$$

$$= \frac{1{,}4 \cdot 287}{1{,}4 - 1}\left(1550{,}9 - 775{,}44\right) = 778.949{,}57\,\frac{J}{kg}$$

$$q_{34} = w_{34} = 788.019{,}49\,\frac{J}{kg}$$

$$q_{dov} = 1.566.969{,}06\,\frac{J}{kg}$$

$$\eta_t = \frac{w_{KP}}{q_{dov}} = \frac{657.976{,}39}{1.566.969{,}06} = 0{,}42$$

$$\eta_{tCKP} = 1 - \frac{293{,}15}{1550{,}9} = 0{,}81.$$

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 desno i ljevokretni kružni procesi zatvorenih i otvorenih sustava.