

Termodinamika

**FIZIKA
PSS-GRAD
9. prosinca 2025.**



WILEY

Copyright © 2015 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

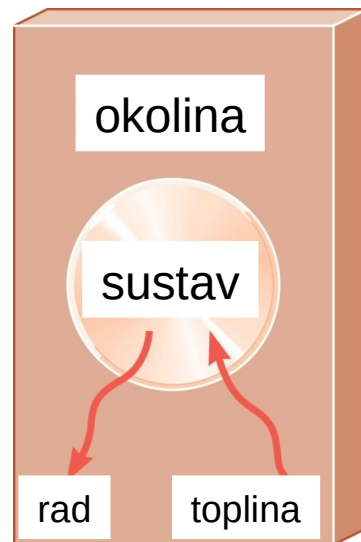
15.1 Termodinamički sustavi i njihova okolina

Termodinamika je područje fizike proizašlo iz temeljnih zakona za toplinu i rad.

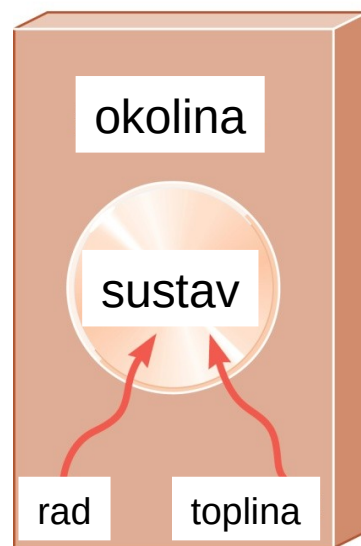
Skup razmatranih objekata nazivamo **sustavom**, a sve ostalo **okolinom**.

Stijenke koje ne dopuštaju tok topline nazivamo **adijabatskim stijenkama**.

Za razumijevanje termodinamike potrebno je opisati **stanje sustava**.



(a)

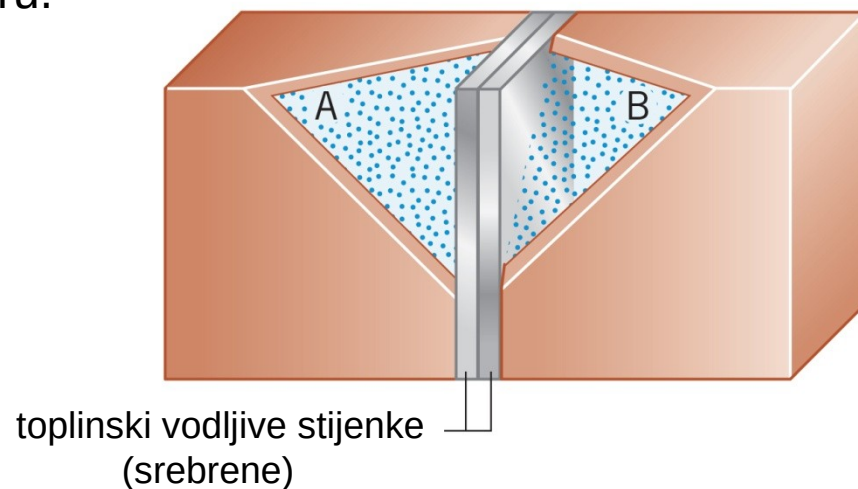
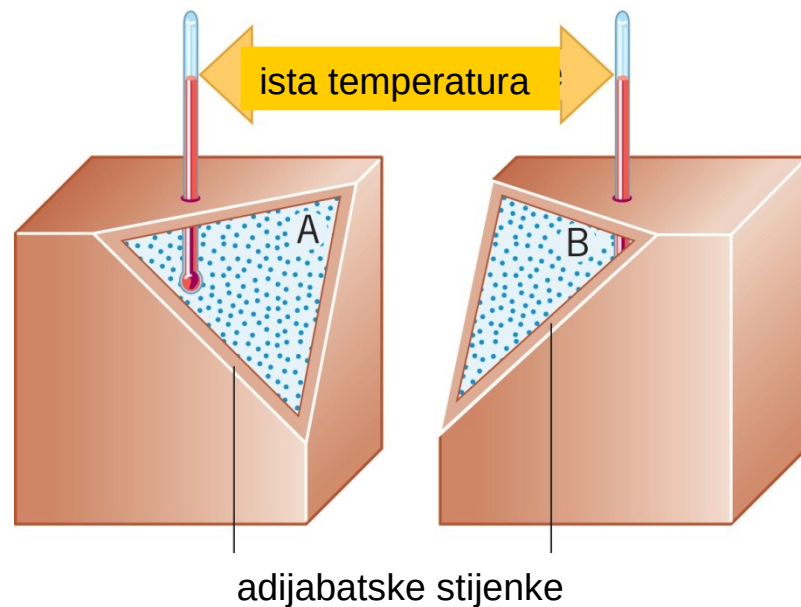


(b)

15.2 Nulti zakon termodinamike

Dva su sustava u **toplinskoj ravnoteži** ako između njih ne postoji toplinski tok nakon što su dovedena u dodir.

Temperatura je pokazatelj toplinske ravnoteže u smislu da nema toplinskog toka između dva sustava u dodiru koja imaju istu temperaturu.

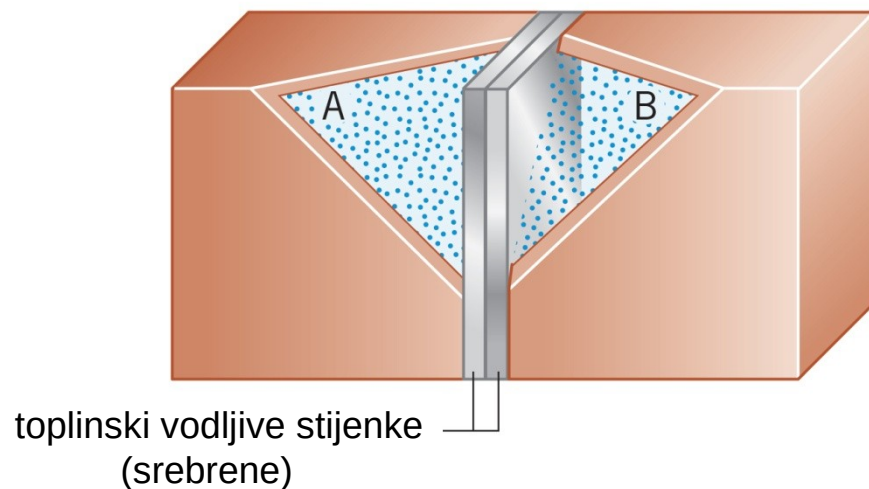
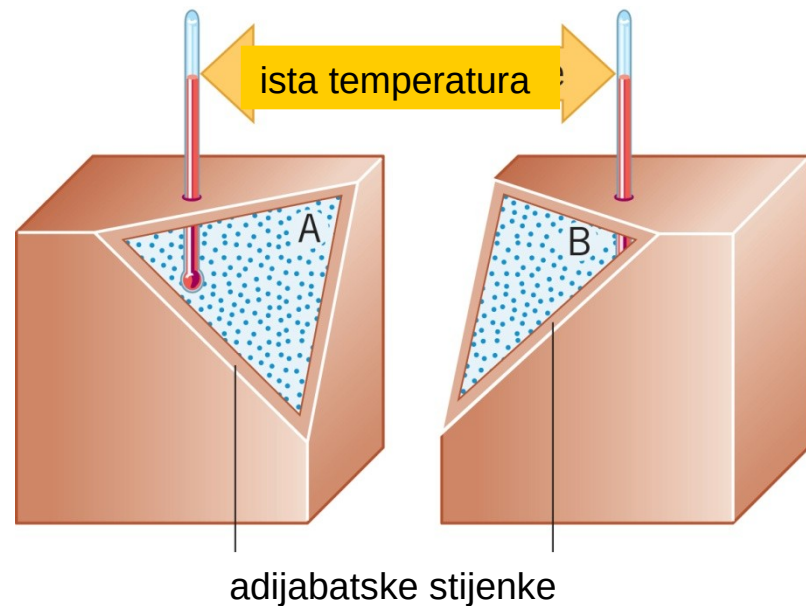


WILEY

15.2 Nulti zakon termodinamike

NULTI ZAKON TERMODINAMIKE

Ako su dva sustava u toplinskoj ravnoteži s trećim sustavom onda su u toplinskoj ravnoteži i međusobno.



WILEY

15.3 *Prvi zakon termodinamike*

Pretpostavimo da sustav prima toplinu (i da se ne događa ništa drugo).

Prema zakonu očuvanja energije, promjena unutrašnje energije je:

$$\Delta U = U_k - U_p = Q$$

Toplina je pozitivna kad sustav prima toplinu, a negativna kad sustav predaje toplinu.

15.3 *Prvi zakon termodinamike*

Ako sustav obavlja rad na okolinom, a toplinskog toka nema, onda će se (prema zakonu očuvanja energije) njegova unutrašnja energija smanjiti:

$$\Delta U = U_k - U_p = -W$$

Rad je pozitivan kad sustav obavlja rad, a negativan kad se rad obavlja nad sustavom.

PRVI ZAKON TERMODINAMIKE

Unutrašnja energija sustava mijenja se zbog topline i rada:

$$\Delta U = Q - W$$

Toplina je pozitivna kad sustav prima toplinu, a negativna kad sustav predaje toplinu.

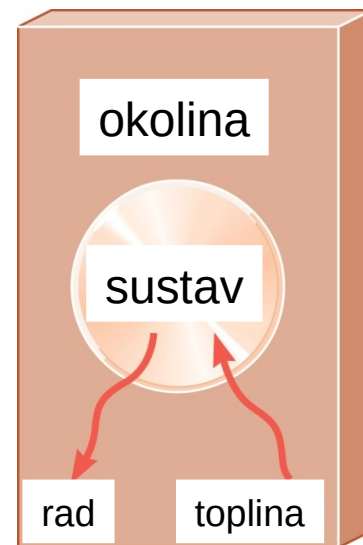
Rad je pozitivan kad sustav obavlja rad, a negativan kad se rad obavlja nad sustavom.

Primjer 1 Pozitivan i negativan rad

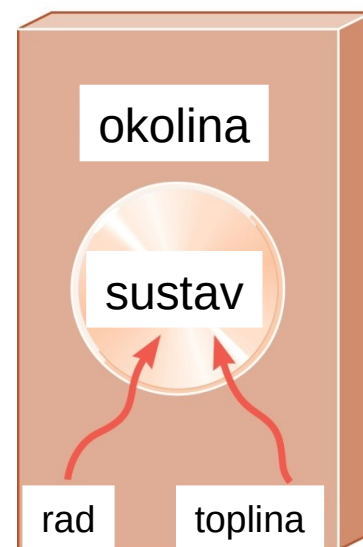
Na slici (a) sustav prima 1500 J topline i obavlja rad od 2200 J.

Na slici (b) sustav također prima 1500 J topline, ali se rad od 2200 J obavlja nad sustavom.

Odredite, u oba slučaja, promjenu unutrašnje energije sustava.



(a)



(b)

15.3 Prvi zakon termodinamike

(a)
$$\Delta U = Q - W$$

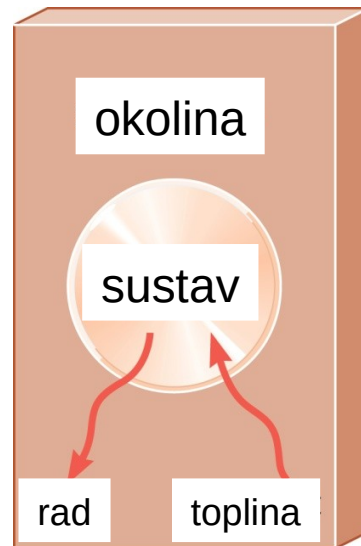
$$\Delta U = (+1500 \text{ J}) - (+2200 \text{ J})$$

$$\Delta U = -700 \text{ J}$$

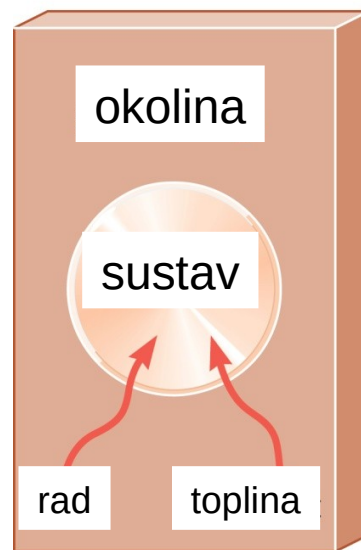
(b)
$$\Delta U = Q - W$$

$$\Delta U = (+1500 \text{ J}) - (-2200 \text{ J})$$

$$\Delta U = +3700 \text{ J}$$



(a)



(b)

WILEY

Primjer 2 Idealni plin

Temperatura tri mola jednoatomnog idealnog plina smanji se s 540 K na 350 K kad se tom plinu dovede 5500 J topline.

Odredite:

- (a) promjenu unutrašnje energije
- (b) rad koji obavi plin.

$$\Delta U = Q - W$$

$$U = \frac{3}{2} n R T$$

15.3 Prvi zakon termodinamike

$$(a) \quad \Delta U = \frac{3}{2} n R T_k - \frac{3}{2} n R T_p = \frac{3}{2} n R (T_k - T_p)$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot 3 \text{ mol} \cdot 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1} (350 \text{ K} - 540 \text{ K})$$

$$\Delta U = -7100 \text{ J}$$

$$(b) \quad W = Q - \Delta U$$

$$W = 5500 \text{ J} - (-7100 \text{ J})$$

$$W = 12600 \text{ J}$$

15.4 Termički procesi

Kvazistatički proces je proces koji se odvija dovoljno sporo da su tlak i temperatura ujednačeni cijelo vrijeme u svim područjima.

izobarni: stalni tlak

izohorni: stalni obujam

izotermni: stalna temperatura

adijabatski: nema prijenosa topline

15.4 Termički procesi

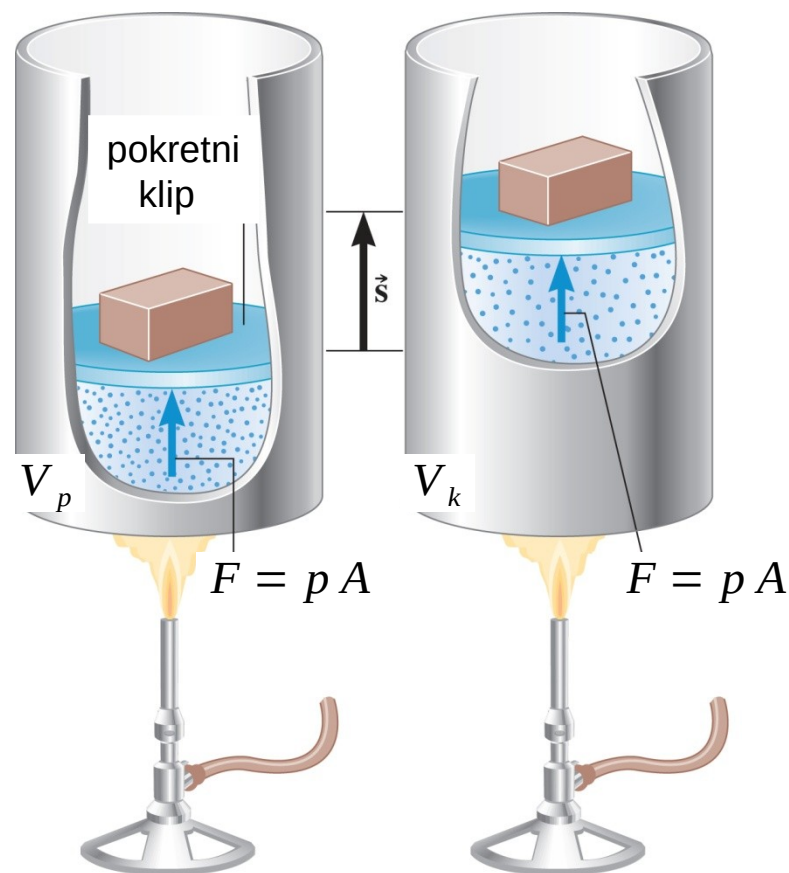
Izobarni proces odvija se pri stalnom tlaku.

$$W = F s \quad p = \frac{F}{A}$$

$$W = p A s = p \Delta V$$

Rad u izobarnom procesu:

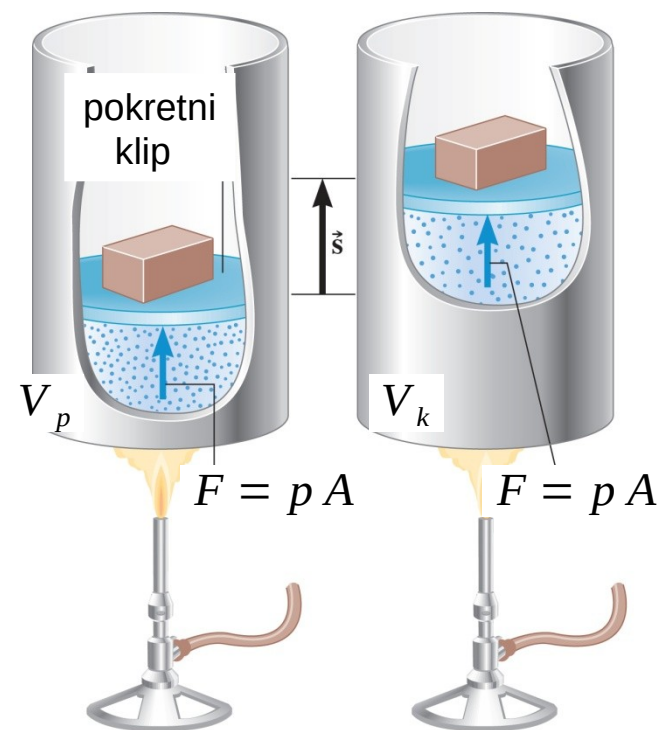
$$W = p \Delta V$$



Primjer 3 Izobarna ekspanzija vode

Jedan gram vode nalazi se u cilindru pod tlakom od $2,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Temperatura vode poraste za $31 \text{ }^\circ\text{C}$. Obujam vode poveća se za mali iznos od $1,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$.

Odredite obavljeni rad i promjenu unutrašnje energije.

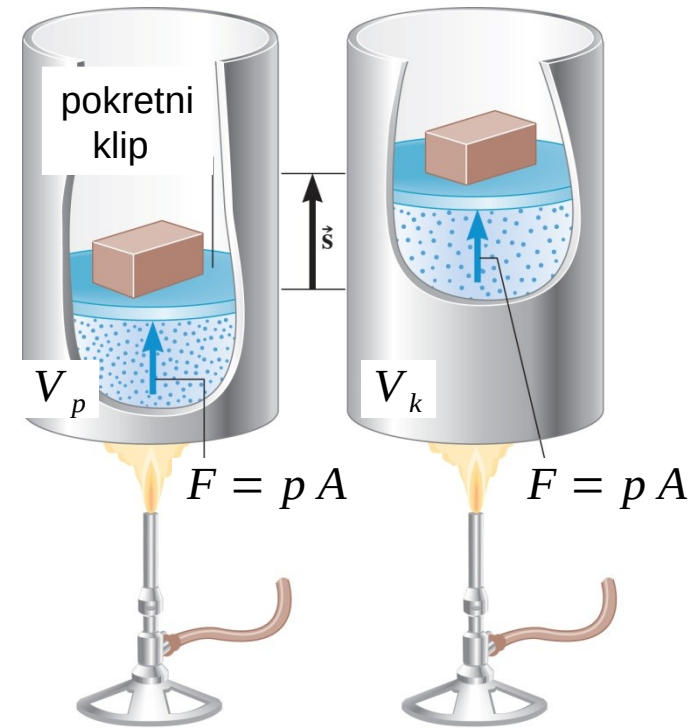


15.4 Termički procesi

$$W = p \Delta V$$

$$W = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$W = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ J}$$

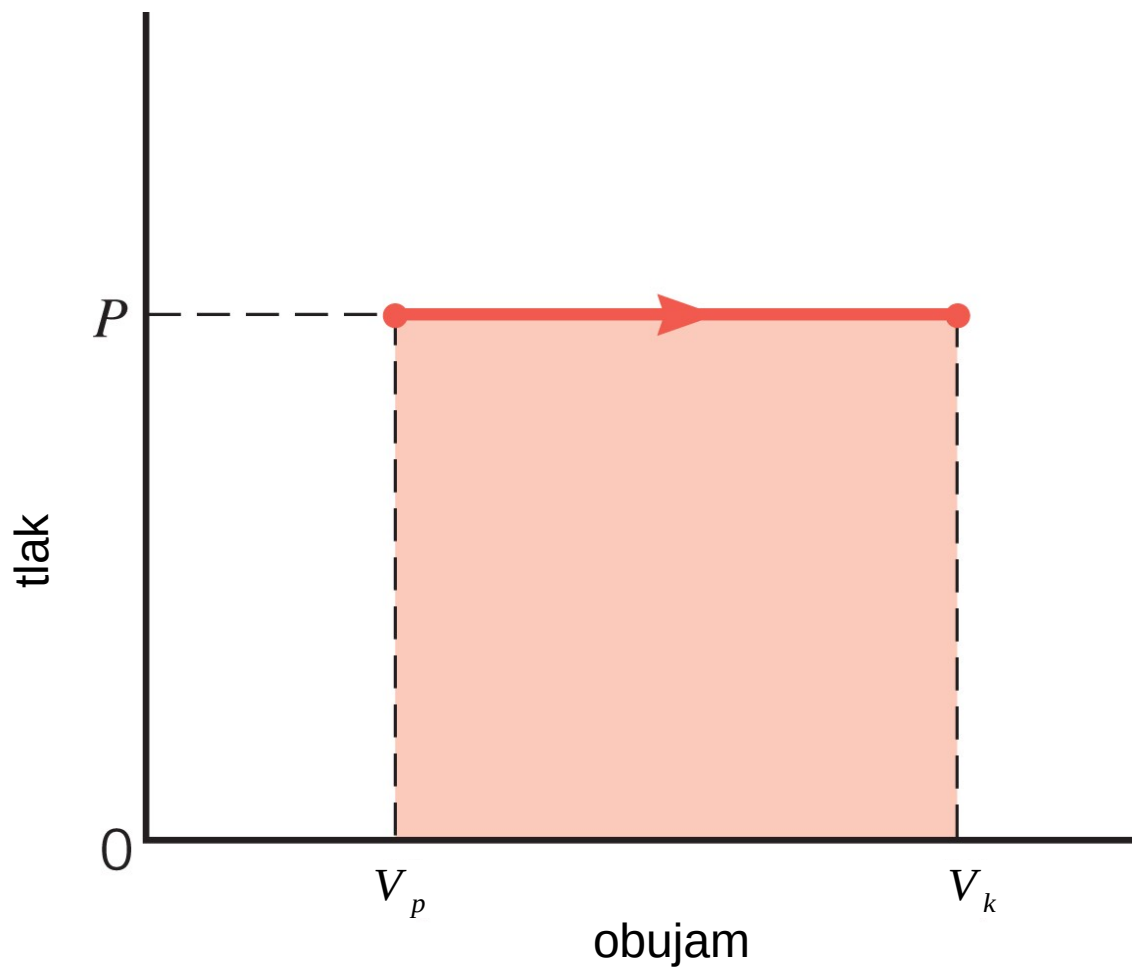


$$\Delta U = Q - W = 130 \text{ J} - 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ J} = 130 \text{ J}$$

$$Q = m c \Delta T = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 4186 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \cdot 31 \text{ K} = 130 \text{ J}$$

WILEY

$$W = p \Delta V = p(V_k - V_p)$$



15.4 Termički procesi

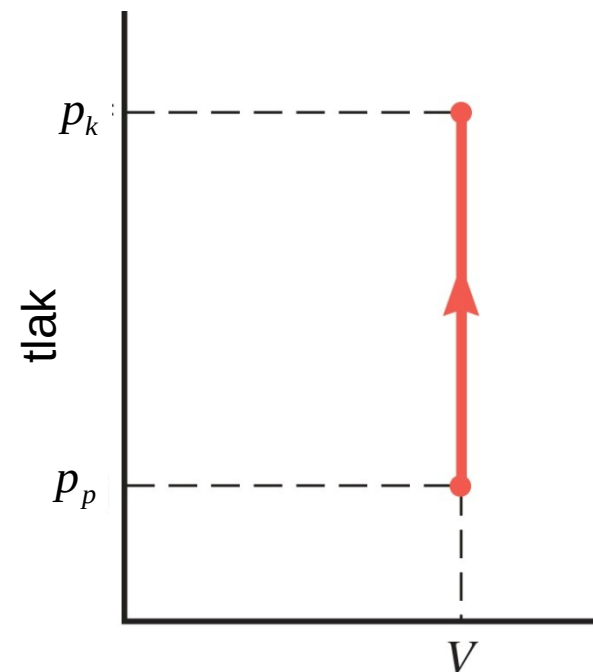
Izohorni proces odvija se pri stalnom obujmu.

$$\Delta U = Q - W = Q$$

$$W = 0$$



(a)



obujam

(b)

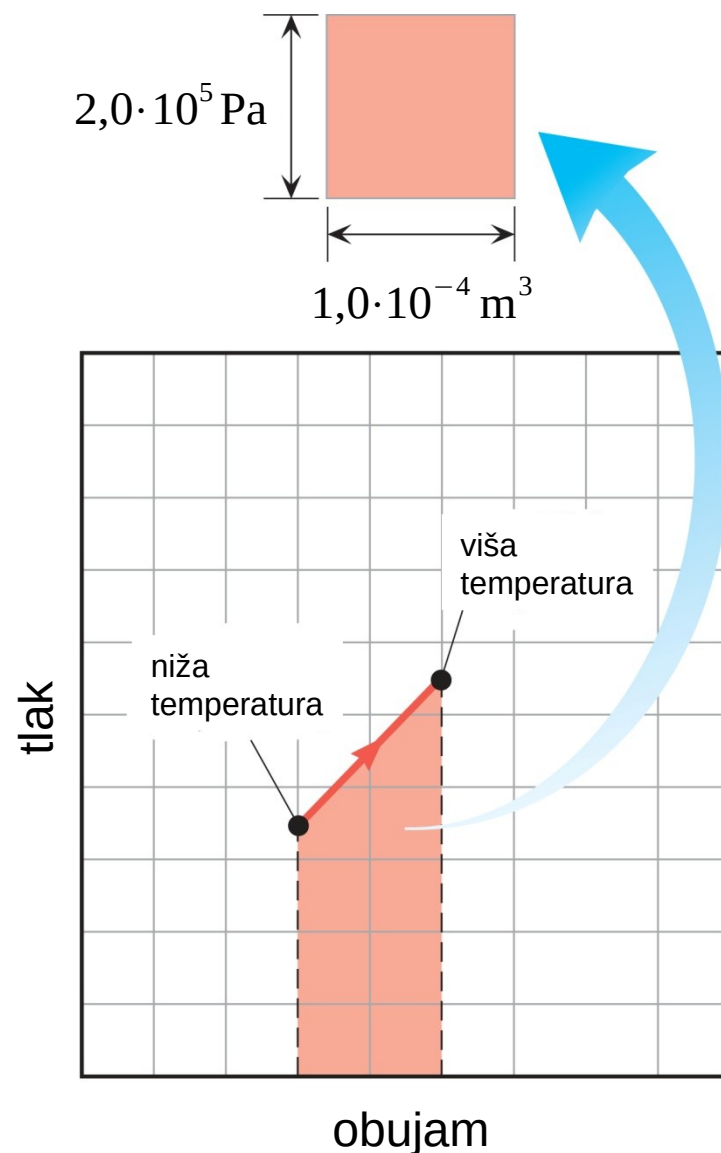
WILEY

15.4 Termički procesi

Primjer 4 Rad i površina ispod grafa p - V

Odredite rad u procesu u kojem se tlak, obujam i temperatura mijenjaju tako da su početno i konačno stanje u grafu p - V povezani pravocrtno, kao na slici.

Za bilo koji proces, površina ispod grafa p - V odgovara radu.



WILEY

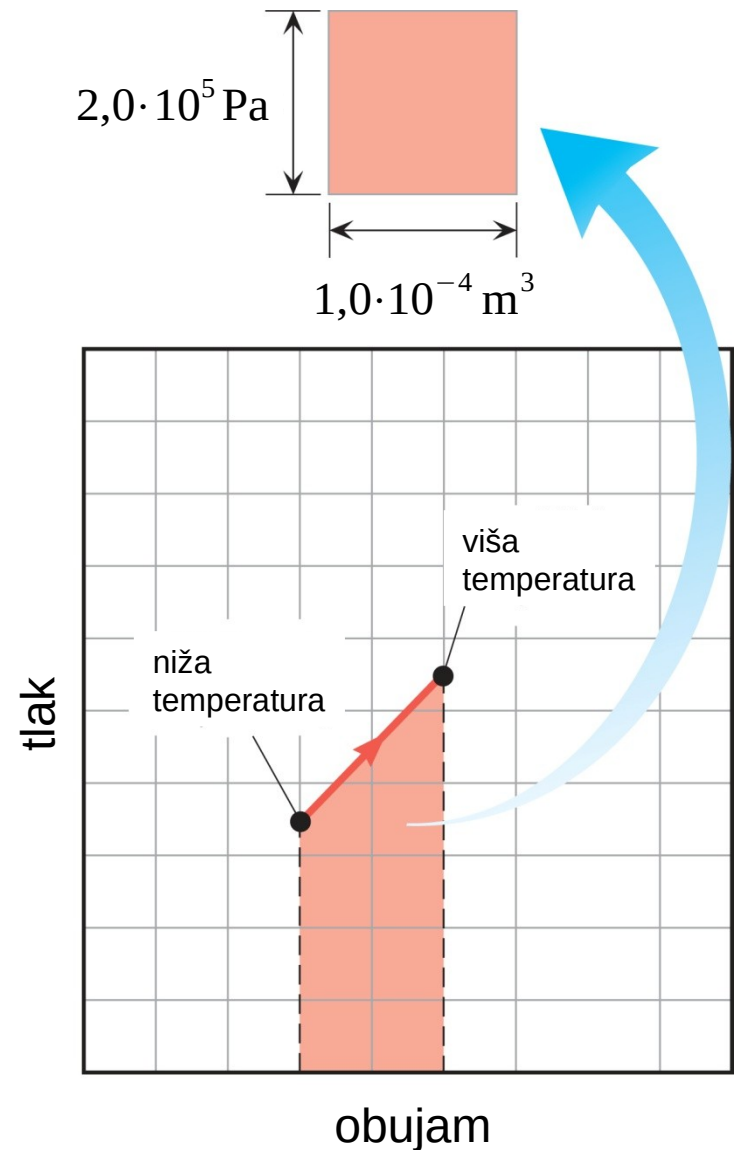
15.4 Termički procesi

S obzirom da obujam raste, rad je pozitivan.

Prema procjeni, obojenih kvadratića na slici ima 8,9.

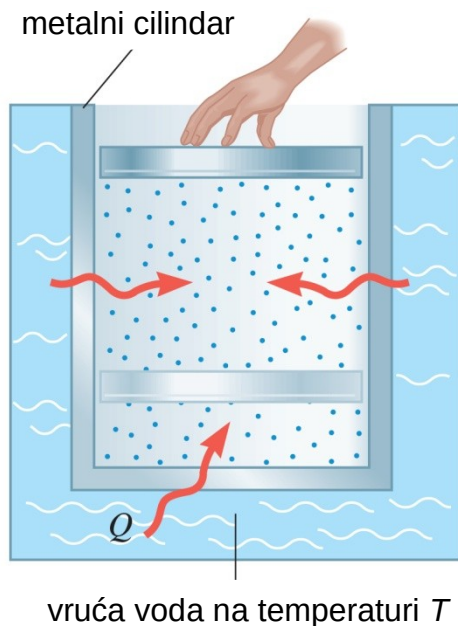
$$W = 8,9 \cdot 2,0 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$W = +180 \text{ J}$$



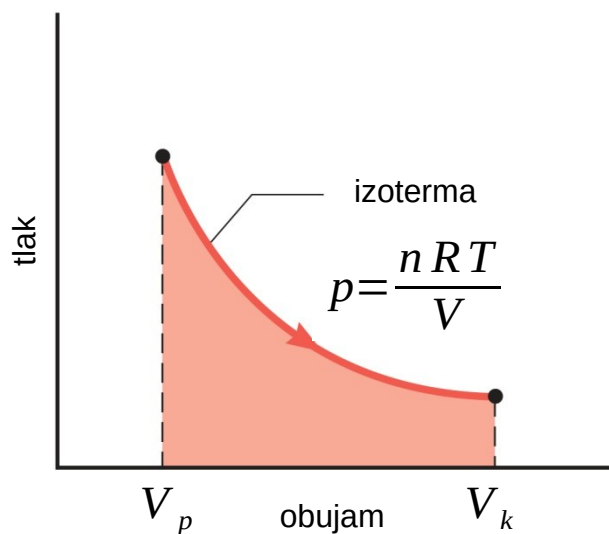
WILEY

15.5 Termički procesi s idealnim plinom



IZOTERMNA EKSPANZIJA ILI KOMPRESIJA

izotermna ekspanzija ili kompresija idealnog plina



$$W = nRT \ln \left(\frac{V_k}{V_p} \right)$$

WILEY

Primjer 5 Izotermna ekspanzija idealnog plina

Dva mola jednoatomnog plina argona širi se izotermno, pri temperaturi od 298 K, od početnog obujma $0,025 \text{ m}^3$ do konačnog obujma $0,050 \text{ m}^3$.

Pretpostavite da je argon idealni plin te odredite:

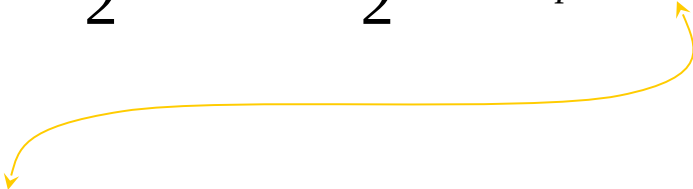
- (a) rad koji plin obavi;
- (b) promjenu unutrašnje energije plina;
- (c) toplinu koja je dovedena plinu.

15.5 Termički procesi s idealnim plinom

$$(a) \quad W = n R T \ln \left(\frac{V_k}{V_p} \right)$$

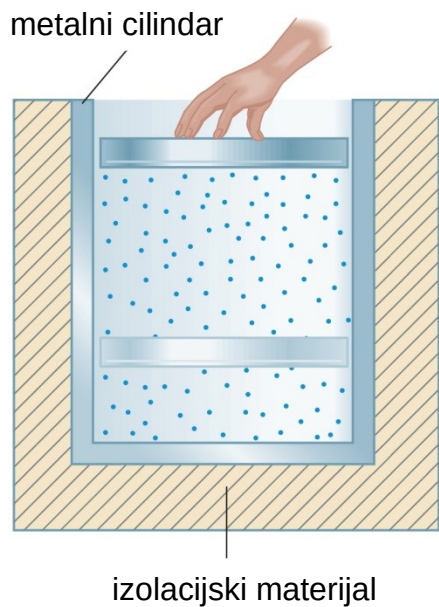
$$W = 2,0 \text{ mol} \cdot 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1} \cdot 298 \text{ K} \cdot \ln \left(\frac{0,050 \text{ m}^3}{0,025 \text{ m}^3} \right) = 3400 \text{ J}$$

$$(b) \quad \Delta U = \frac{3}{2} n R T_k - \frac{3}{2} n R T_p = 0$$


$$(c) \quad \Delta U = Q - W$$

$$Q = W = +3400 \text{ J}$$

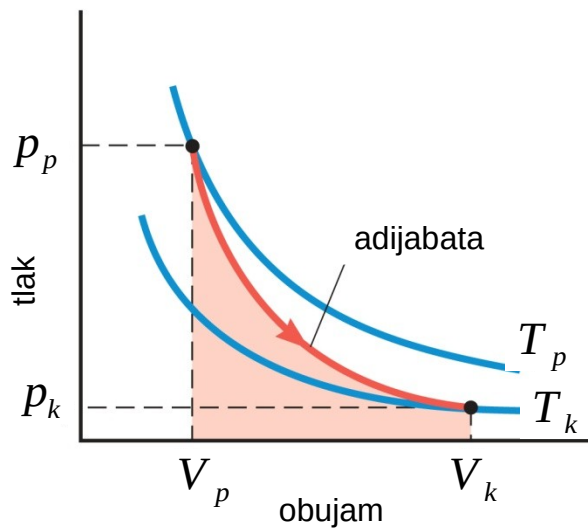
15.5 Termički procesi s idealnim plinom



ADIJABATSKA EKSPANZIJA ILI KOMPRESIJA

adijabatska ekspanzija ili kompresija idealnog plina

$$W = \frac{3}{2} n R (T_p - T_k)$$



$$p_p V_p^\gamma = p_k V_k^\gamma$$

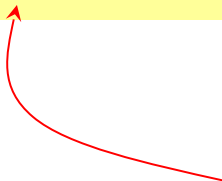
$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

WILEY

15.6 Specifični toplinski kapaciteti

Veza topline i promjene temperature kod čvrstih tijela i tekućina:

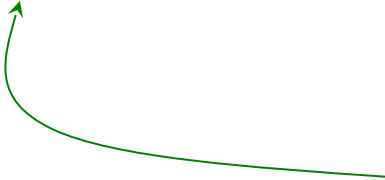
$$Q = m c \Delta T$$



specifični
toplinski
kapacitet

Analogni izraz s količinom tvari:

$$Q = n C \Delta T$$



molni specifični
toplinski kapacitet

WILEY

15.7 *Drugi zakon termodinamike*

Drugi zakon termodinamike je tvrdnja o tendenciji **topline** da prelazi s toplijeg tijela na hladnije (dok se u prvom zakonu termodinamike radilo o očuvanju energije, pri čemu su važni i toplota i rad).

DRUGI ZAKON TERMODINAMIKE: TVRDNJA O TOKU TOPLINE

Toplina spontano prelazi s tvari više temperature na tvar niže temperature (nikad spontano ne prelazi u obrnutom smjeru).

15.8 Toplinski strojevi

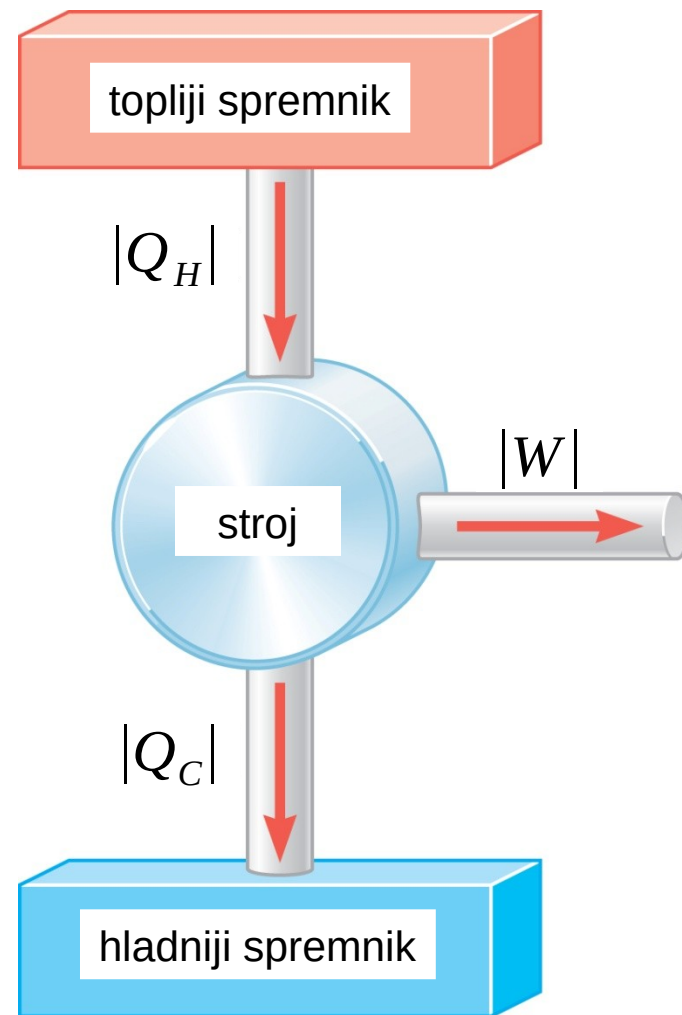
Toplinski stroj je uređaj koji koristi toplinu da bi obavljao rad. Osnovna su mu svojstva:

1. Toplina se stroju dovodi iz *toplijeg spremnika*.
2. Dio te topline koristi se za obavljanje rada.
3. Ostatak topline odvodi se *hladnijem spremniku*.

$|Q_H|$ iznos dovedene topline

$|Q_C|$ iznos odvedene topline

$|W|$ iznos obavljenog rada



15.8 Toplinski strojevi

Djelotvornost toplinskog stroja jednaka je omjeru dobivenoga rada i uložene topline:

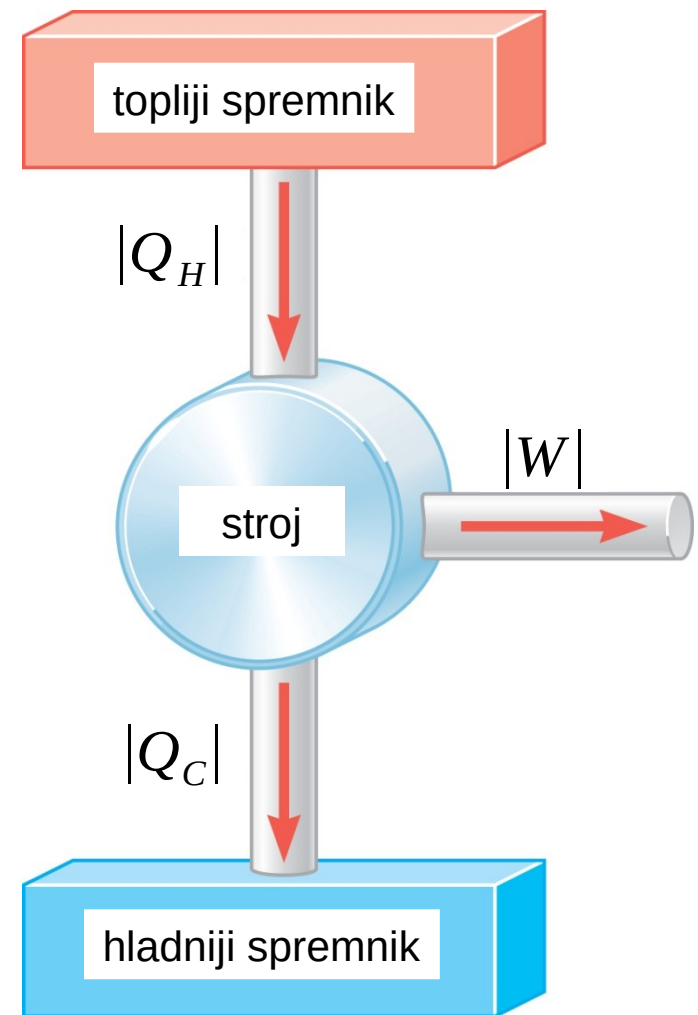
$$\eta = \frac{|W|}{|Q_H|}$$

Ako nema gubitaka tada vrijedi:

$$|Q_H| = |W| + |Q_C|$$



$$\eta = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}$$



15.9 Carnotovo načelo i Carnotov stroj

Reverzibilni proces je onaj u kojem se i sustav i okolina mogu vratiti u točno isto stanje kakvo je bilo prije početka procesa.

CARNOTOVO NAČELO: ALTERNATIVNI ISKAZ DRUGOG ZAKONA TERMODINAMIKE

Nijedan ireverzibilni stroj, koji radi između dva spremnika stalnih temperatura, ne može imati veću djelotvornost od reverzibilnog stroja koji radi između dva spremnika istih temperatura. Nadalje, svi reverzibilni strojevi koji rade između dva spremnika istih temperatura imaju istu djelotvornost.

15.9 Carnotovo načelo i Carnotov stroj

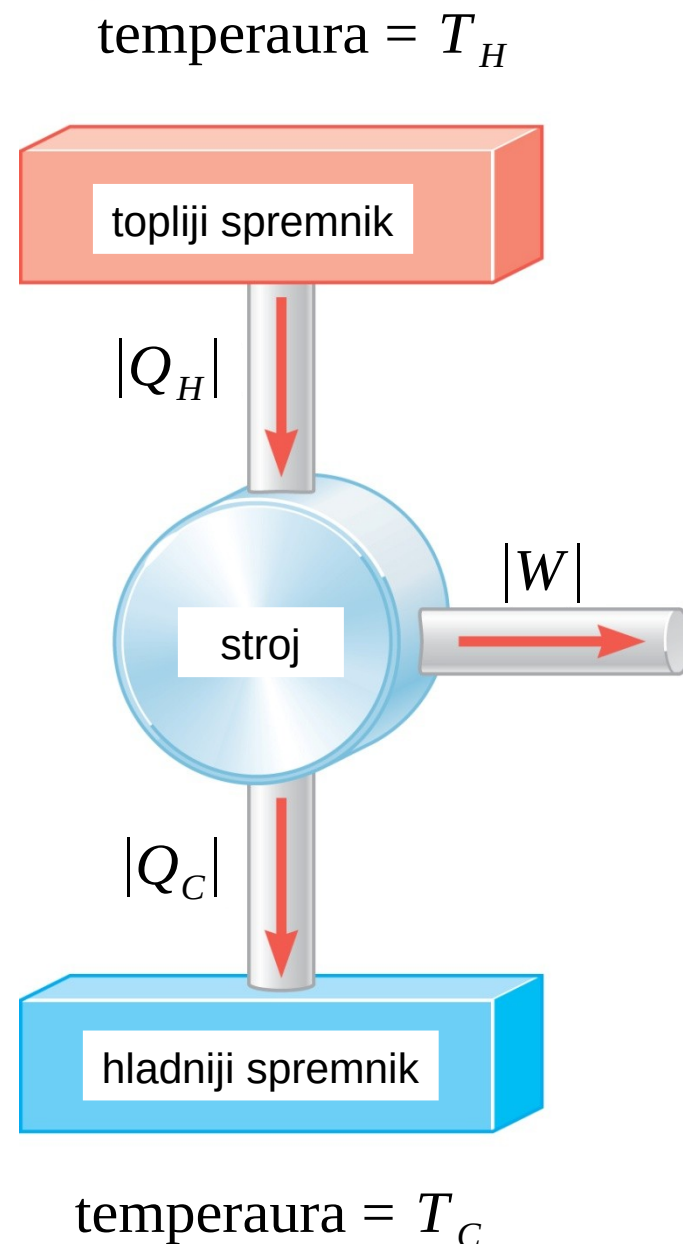
Carnotov stroj je korisna idealizacija.

Sva primljena toplina dolazi iz toplijeg spremnika koji je stalno na istoj temperaturi, a sva predana toplina odlazi u hladniji spremnik koji je također stalno na istoj temperaturi.

S obzirom da djelotvornost tada ovisi samo o temperaturama, omjer toplina odgovara omjeru temperatura.

$$\eta = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

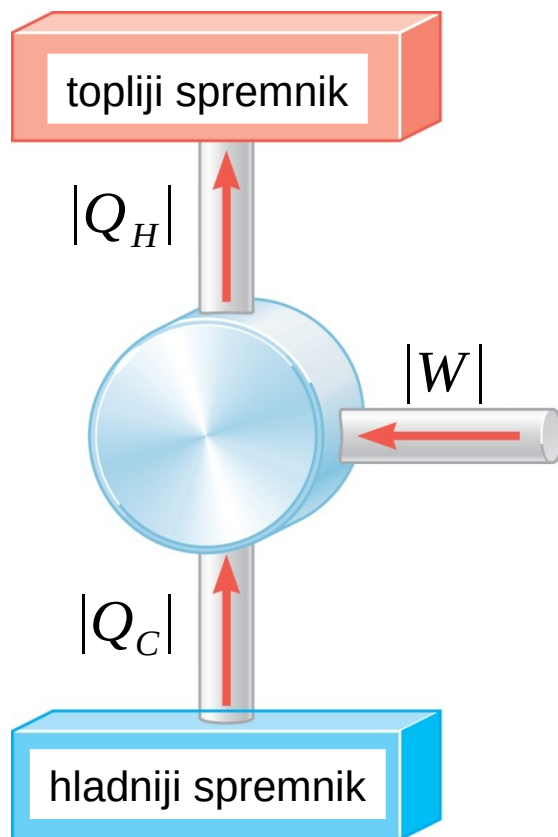
$\frac{|Q_C|}{|Q_H|} = \frac{T_C}{T_H}$



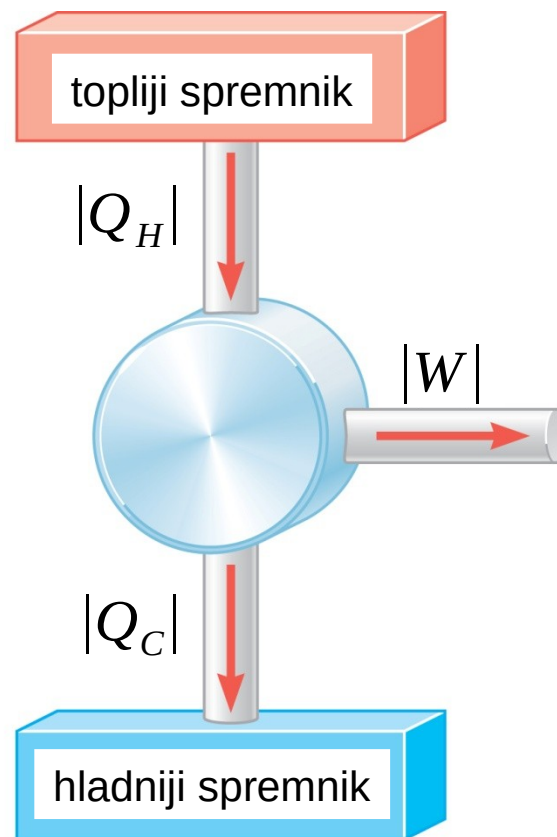
WILEY

15.10 Hladnjaci, klime i toplinske pumpe

Hladnjaci, klime i toplinske pumpe su uređaji koji omogućuju prijenos topline s hladnijeg na toplije tijelo. Takav prijenos topline nazivamo **hlađenjem**.



hladnjak



toplinski stroj

15.11 Entropija

U ireverzibilnim se procesima gubi, mada ne nužno u potpunosti, sposobnost obavljanja rada. Taj djelomični gubitak može se izraziti fizičkom veličinom koju nazivamo **entropijom**.

Carnotov stroj

$$\frac{|Q_C|}{|Q_H|} = \frac{T_C}{T_H} \quad \Rightarrow \quad \frac{|Q_C|}{T_C} = \frac{|Q_H|}{T_H}$$

*promjena
entropije*

$$\Delta S = \left(\frac{Q}{T} \right)_R$$

reverzibilno

WILEY

15.11 Entropija

Entropija je, poput unutrašnje energije, funkcija stanja sustava.

$$\Delta S = \left(\frac{Q}{T} \right)_R$$

Razmotrimo promjenu entropije Carnotovog stroja. Entropija toplijeg spremnika pada, a entropija hladnijeg spremnika raste. Ali, za isti iznos:

$$\Delta S = +\frac{Q_C}{T_C} - \frac{Q_H}{T_H} = 0$$

Reverzibilni procesi ne mijenjaju entropiju svemira.

15.11 Entropija

Svaki ireverzibilni proces povećava entropiju svemira.

$$\Delta S_{\text{svemir}} > 0$$

DRUGI ZAKON TERMODINAMIKE IZRAŽEN POMOĆU ENTROPIJE

Ukupna entropija svemira u ireverzibilnom procesu može samo rasti.

$$\Delta S > 0$$

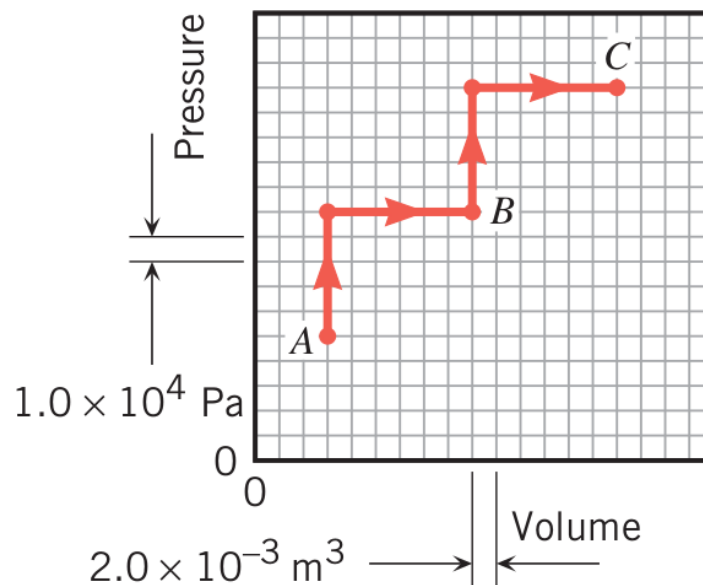
TREĆI ZAKON TERMODINAMIKE

Temperaturu nekog sustava nije moguće spustiti na apsolutnu nulu u konačnom broju koraka.

ZADACI ZA VJEŽBU

1. Kad u motoru automobila sagori 1 L benzina oslobodi se $1,19 \cdot 10^8$ J unutrašnje energije. Pretpostavite da $1,00 \cdot 10^8$ J te energije, kao toplina, ode u okolinu (blok motora i ispušni sustav). Koliko kilometara automobil prođe s 1 L benzina ako je za 1 km potreban rad od $6,0 \cdot 10^5$ J?

RJEŠENJE: 32 km



2. a) Iz grafa p-V odredite rad sustava za prijelaz iz stanja A, preko stanja B, u stanje C. b) Je li sustav obavio rad ili je rad obavljen nad sustavom? Je li rad pozitivan ili negativan?

RJEŠENJE: 3,0 kJ; sustav je obavio rad; rad je pozitivan

WILEY

ZADACI ZA VJEŽBU

3. Sustav primi 1500 J topline, unutrašnja energija mu se poveća za 4500 J, a volumen smanji za $0,010 \text{ m}^3$. Koliki je tlak ako je on stalan?

RJEŠENJE: $3,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

4. Tlak jednoatomnog idealnog plina ($\gamma = 5/3$) udvostruči se tijekom adijabatske kompresije. Odredite omjer konačnog i početnog volumena.

RJEŠENJE: 0,66

5. Temperatura 2,5 mola idealnog jednoatomnog plina je 350 K. Dodatkom topline unutrašnja se energija udvostruči. Koliko je topline dodano ako je:
a) volumen bio stalan; b) tlak bio stalan?

RJEŠENJE: $1,1 \cdot 10^4 \text{ J}$; $1,8 \cdot 10^4 \text{ J}$

6. Koliko topline treba da bi se, pri stalnom tlaku, temperatura 1,5 mola jednoatomnog idealnog plina promijenila za 77 K?

RJEŠENJE: 2,4 kJ

ZADACI ZA VJEŽBU

7. Grijačem snage 15,0 W zagrijava se jednoatomni idealni plin pri stalnom tlaku od $7,60 \cdot 10^5$ Pa. Tijekom tog procesa volumen plina poveća se 25,0 % s obzirom na početnu vrijednost $1,40 \cdot 10^{-3}$ m³. Kako je dugo grijač bio uključen?

RJEŠENJE: 44,3 s

8. Hladnjak radi na temperaturama između 296 K i 275 K. Koji mu je najveći faktor učinkovitosti?

RJEŠENJE: 13,1

9. Odredite promjenu entropije molekula vode kad se:

- a) tri kilograma leda, na temperaturi 273 K, pretvori u vodu;
- b) tri kilograma vode, na temperaturi 373 K, pretvori u paru.

RJEŠENJE: $3,68 \cdot 10^3$ J/K; $1,82 \cdot 10^4$ J/K

10. Carnotova toplinska pumpa radi između vanjske temperature 265 K i unutrašnje temperature 298 K. Odredite njezin faktor učinkovitosti.

RJEŠENJE: 9,03

PITANJA ZA PONAVLJANJE

1. Termodinamika
2. Nulti zakon termodinamike
3. Prvi zakon termodinamike
4. Izobarni proces
5. Izohorni proces
6. Izotermni proces
7. Adijabatski proces
8. Entropija
9. Drugi zakon termodinamike
10. Treći zakon termodinamike