

## 15. Termodinamika

(pripremljeno prema poglavlju 15, Cutnell & Johnson: Physics, 9th edition, John Wiley and Sons, (2012), poveznica: [www.pdf-archive.com/2018/04/25/cutnell](http://www.pdf-archive.com/2018/04/25/cutnell) )

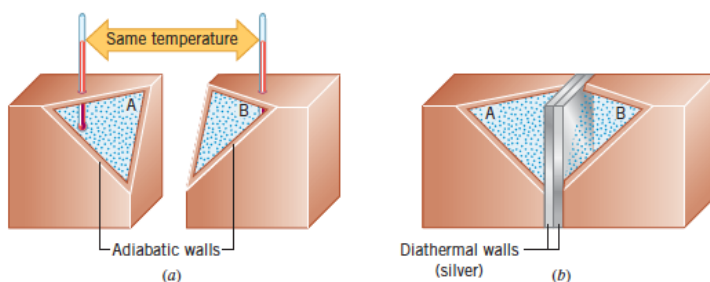
**Termodinamički sustavi i njihova okolina.** Prethodno smo proučavali toplinu i rad kao zasebne teme. Međutim, često se pojavljuju istovremeno. Na primjer, u automobilskom motoru gorivo se sagorijeva i povećava temperaturu, potom se dio dobivene unutarnje energije koristi se za obavljanje mehaničkog rada, dok se višak topline uklanja kroz rashladni sustav.

Da bismo razumjeli što zakoni termodinamike govore o odnosu topline i rada, potrebno je opisati fizičko stanje odnosno stanje sustava. Na primjer, mogao bi nas zanimati vrući zrak unutar balona na slici desno. Ovdje bi vrući zrak bio bi sustav, dok stjenka balona služi kao izolacija sustava od okolnog hladnijeg zraka. Stanje sustava možemo opisati fizikalnim veličinama kao što su vrijednosti tlaka, volumena, temperature i mase zraka. Postoje četiri zakona termodinamike. Započnimo s onim poznatim kao nulti zakon, a zatim razmotrimo preostala tri.



**Nulti zakon termodinamike.** Nulti zakon termodinamike bavi se konceptom toplinske ravnoteže. Kaže se da su dva sustava koja su u kontaktu u toplinskoj ravnoteži ukoliko između njih nema protoka topline. Da bismo objasnili središnju ideju nultog zakona termodinamike, na slici dolje (a) prikazana su dva sustava označena A i B koji su ograđeni spremnicima koji djeluju kao izolatori te tako sprečavaju protok topline. Oba sustava, A i B, imaju istu temperaturu, kako je naznačeno termometrom. Na slici (b) spremnici se dodiruju dok je zajednička stjenka sad od srebrnog lima. Srebro ima veliku toplinsku vodljivost, tako da toplina kroz ovu stjenku lako teče. Međutim, u ovom slučaju ne dolazi do protoka topline što ukazuje na činjenicu da su sustavi A i B u toplinskoj ravnoteži.

Vidimo, dakle, da je temperatura pokazatelj toplinske ravnoteže u smislu da nema protoka topline između dva sustava iste temperature koji su toplinskom kontaktu.



Pogledajmo ulogu termometra u razumijevanju toplinske ravnoteže sustava A i B. Sustavi A i B su u ravnoteži s termometrom. Ukoliko su oba termometra registrirala istu temperaturu, kao na slici gore, možemo zaključiti da su sustavi A i B jedanako vrući. Stoga, sustavi A i B nalaze se u toplinskoj ravnoteži jedan s drugim. Uočimo da je u ovom primjeru termometar bio treći sustav. S obzirom na to da su sustavi A i B u toplinskoj ravnoteži s tim trećim sustavom, i da su na istoj temperaturi, znači da su i sustavi A i B međusobno u toplinskoj ravnoteži. Ovo je primjer *nultog zakona termodinamike*.

**Nulti zakon termodinamike.** Ukoliko su dva sustava zasebno u toplinskoj ravnoteži s trećim sustavom ta su dva sustava također u toplinskoj ravnoteži.

**Prvi zakon termodinamike.** Atomi i molekule neke tvari imaju kinetičku i potencijalnu energiju, gdje ova energija predstavlja unutarnju energiju te tvari. Kada tvar sudjeluje u procesu u kojem dolazi do promjene energiju u obliku rada i topline, može doći do promjene unutarnje energije. Odnos rada, topline i promjene unutarnje energije poznat je kao prvi zakon termodinamike.

Sada ćemo vidjeti da prvi zakon termodinamike iskazuje očuvanje energije. Pretpostavimo da sustav dobiva toplinu  $Q$  i da je pritom to jedini proces koji se događa. U skladu sa zakonom očuvanja energije, unutarnja energija sustava povećava se od početne vrijednosti  $U_i$  do konačne vrijednosti  $U_f$ , a promjena u tom slučaju iznosi  $\Delta U = U_f - U_i = Q$ . Ovdje koristimo konvenciju da je toplina  $Q$  pozitivna kad sustav dobiva toplinu i negativna kad sustav gubi toplinu. Osim zbog prijenosa topline, unutarnja energija sustava može se mijenjati i zbog rada. Ukoliko sustav izvršava rad  $W$  na svojoj okolini bez izmjene topline, unutarnja energije sustava se smanjuje od  $U_i$  do  $U_f$ , pa promjena je sada iznosi  $\Delta U = U_f - U_i = -W$ . Znak minus je uključen jer slijedimo konvenciju da je rad pozitivan kada sustav vrši rad na okolini, a negativan kad okolina obavlja rad na sustavu. Također, sustav može istodobno dobivati ili gubiti energiju zbog izmjene topline  $Q$  i obavljanja rada  $W$ . Stoga, prvi je zakon termodinamike upravo princip očuvanja energije koji se primjenjuje na toplinu, rad i promjenu unutarnje energije.

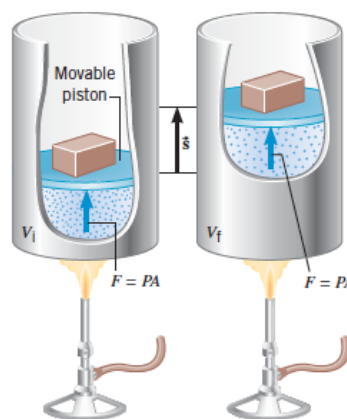
**Prvi zakon termodinamike.** Unutarnja energija sustava mijenja se od početne vrijednosti  $U_i$  do konačne vrijednosti  $U_f$  zbog izmjene topline  $Q$  i izvršenog rada  $W$ :

$$\Delta U = U_f - U_i = Q - W \quad (15.1)$$

$Q$  je pozitivan kada sustav dobiva toplinu i negativan kad izgubi toplinu.  $W$  je pozitivan kada sustav vrši rad na okolini, a negativan kad okolina obavlja rad na sustavu.

**Toplinski procesi.** Sustav može interagirati s okolinom na različite načine te pritom može izmjenjivati toplinu ili obavljati rad, naravno, u skladu s prvim zakonom termodinamike. U ovom su odjeljku predstavljena četiri istaknuta toplinska procesa.

*Izobarni proces je onaj proces koji se događa pod stalnim pritiskom.* Na primjer, slika desno prikazuje tvar koja se nalazi u komori ogradoj klipom, koji može kliziti bez trenja. Tvar se nalazi pod tlakom  $P$ , koji u ovom sustavu ostaje uvijek isti, jer ga određuje vanjska atmosfera te težina klipa i bloka koji leži na njemu. Grijanjem se tvar širi i vrši rad  $W$  na podizanju klipa. Rad možemo izračunati iz jednadžbe  $W = Fs$ , gdje je  $F$  iznos sile, a  $s$  pomak klipa. Sila nastaje zbog tlaka  $P$  koji djeluje na donju stjenku klipa površine  $A$ , pa silu možemo odrediti iz jednadžbe  $F = PA$ . Ukoliko ovo uvrstimo u izraz za rad, dobivamo  $W = (PA)s$ . Umnožak  $A \cdot s$  je upravo promjena volumena

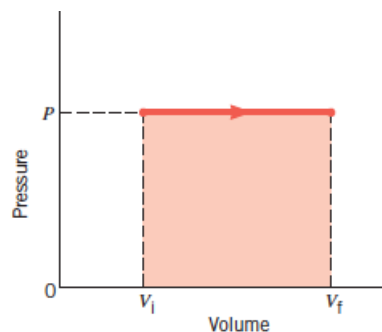


materijala,  $\Delta V = V_f - V_i$ , gdje  $V_f$  i  $V_i$  označavaju konačni i početni volumen. Dakle, obavljeni rad iznosi

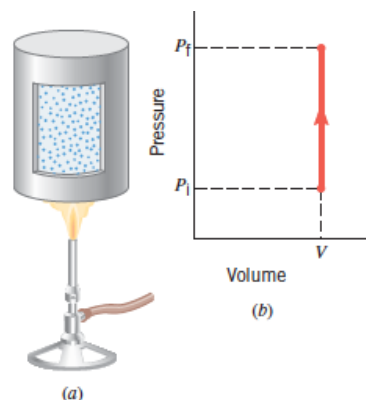
$$W = P \Delta V = P(V_f - V_i) \quad (15.2)$$

U skladu s našom konvencijom, rad ima pozitivan predznak ukoliko sustav obavlja rad, odnosno kada se izobarički širi ( $V_f$  je veće od  $V_i$ ). Jednadžba 15.2 odnosi se također na izobarnu kompresiju ( $V_f$  je manje od  $V_i$ ). U tom je slučaju rad negativan, jer okolina mora vršiti rad na sustavu da bi se kompimirao.

Prikladno je toplinske procese prikazati grafički. Na primjer, na slici desno prikazana je ovisnost tlaka o volumenu za izobarno širenje. Budući da je tlak konstantan, graf je vodoravna ravna linija, koja započinje s početnim volumenom  $V_i$  i završava krajnjim volumenom  $V_f$ . U takvom prikazu iznos rada  $W = P(V_f - V_i)$  se može odrediti kao površina ispod linije, koja je u ovom slučaju pravokutnik visine  $P$  i širine  $V_f - V_i$ .



Drugi uobičajeni toplinski proces je *izohorni proces* koji se odnosi na promjene u sustavu uz konstantni volumen. Slika desno ilustrira izohorni proces, sustav koji se zagrijava uz konstantni volumen. Premda bi se tvar proširila ako bi mogla, kruti spremnik održava njen volumen konstantnim, što je grafički prikazano na slici desno (b). Budući da je volumen konstantan, tlak raste s porastom temperature, te tvar djeluje sve većim tlakom na stijenke. Iako se u zatvorenom spremniku mogu stvoriti ogromne sile, rad je jednak nuli jer se stijenke ne pomiču. Da je rad jednak nuli možemo zaključiti i iz grafa, slika (b), jer je površina ispod okomite ravne linije jednaka nuli. Prema prvom zakonu termodinamike, zaključujemo da je zbog izmjene topline došlo do promjene unutarnje energije:  $\Delta U = Q - W = Q$ .

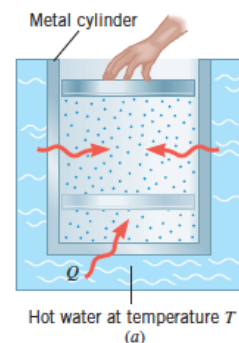


Treći važan toplinski proces je *izotermalni proces*, koji se odvija pri konstantnoj temperaturi. Značajke izotermalnog procesa ilustrirane su na primjeru idealnog plina, u sljedećem odjeljku.

Četvrti važan toplinski proces je *adijabatski proces*, koji se odvija bez izmjene topline. Kako nema izmjene topline,  $Q$  je jednak nuli, a prvi zakon termodinamike se reducira na  $\Delta U = Q - W = -W$ . Dakle, kada sustav izvodi rad adijabatski,  $W$  je pozitivan, a unutarnja se energija smanjuje točno za iznos obavljenog rada. U sljedećem se odjeljku razmatra adijabatski proces za idealni plin.

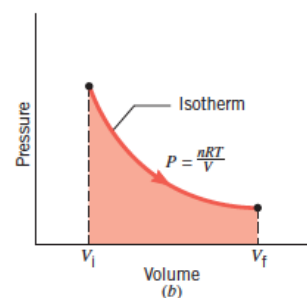
**Toplinski procesi u idealnom plinu. Izotermalno širenje ili kompresija.** Kada sustav izvodi rad izotermalno, temperatura ostaje konstantna. Na primjer, na slici dolje (a), prikazan je metalni cilindar koji sadrži  $n$  molova idealnog plina, a velika masa tople vode u koju je cilindar uronjen održava plin i cilindar na konstantnoj

temperaturi,  $T$ . Klip se u početku drži tako da volumen plina iznosi  $V_i$ . Kako se vanjska sila na klip polako smanjuje, tlak se smanjuje i plin se širi do konačnog volumena  $V_f$ . Slika desno (b) grafički prikazuje odnos tlaka i volumena za ovaj proces (jednadžba stanja idealnog plina  $P = nRT/V$ ). Crvena linija na grafu naziva se izoterma i predstavlja odnos tlaka i volumena dok je rad jednak površini ispod te linije. Korištenjem integralnog računa dobivamo da rad iznosi:



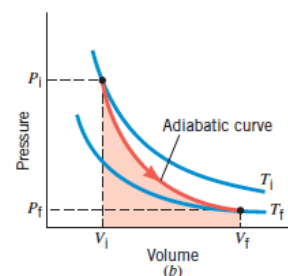
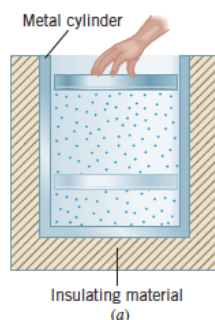
$$W = nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) \quad (15.2)$$

Odakle potječe energija koja je izvršila ovaj rad? Budući da je unutarnja energija bilo kojeg idealnog plina proporcionalna temperaturi, tijekom izotermalnog procesa unutarnja energija ostaje konstantna pa je promjena unutarnje energije jednaka nuli. Primijenimo li to na prvi zakon termodinamike dobivamo  $\Delta U = 0 = Q - W$ . Drugim riječima,  $Q = W$ , što znači da je energija za obavljeni rad upravo toplina koja je došla iz vruće vode u plin. Na slici je ilustriran prijelaz topline iz okoline u cilindar.



### Adijabatsko širenje ili kompresija.

Kad sustav vrši rad adijabatski, to se događa bez izmjene topline s okolinom. Na slici desno prikazan je slučaj u kojem se  $n$  molova idealnog širi od početnog volumena  $V_i$  do konačnog volumena  $V_f$ , pod adijabatskim uvjetima. Uočimo da ovdje rad vrši cilindar koji je toplinski izoliran tako da nema izmjene topline između cilindra i okoline,  $Q = 0$ . Prema prvom zakonu termodinamike promjena unutarnje energije iznosi  $\Delta U = Q - W = -W$ . Budući da je unutarnja energija idealnog jednoatomnog plina  $U = \frac{3}{2}nRT$ , izravno slijedi da je  $\Delta U = U_f - U_i = \frac{3}{2}nR(T_f - T_i)$ , gdje su  $T_i$  i  $T_f$  početna i konačna temperatura. Korištenjem  $\Delta U = -W$  slijedi



$$W = \frac{3}{2}nR(T_i - T_f) \quad (15.4)$$

Na slici gore prikazana promjena tlaka ovisna o promjeni volumena za adijabatski proces. Adijabatska krivulja (crvena) presijeca izoterme (plava) na početnoj višoj temperaturi [ $T_i = P_i V_i / (nR)$ ], a također i na konačnoj nižoj temperaturi [ $T_f = P_f V_f / (nR)$ ]. Površina područja ispod adijabatne krivulje predstavlja izvršeni rad.

Jednadžba koja opisuje adijabatsku krivulju (crvena linija na slici gore), a predstavlja odnos između početnog tlaka i volumena ( $P_i, V_i$ ) i konačnog tlaka i volumena ( $P_f, V_f$ ) može se izvesti pomoću integralnog izračuna. Rezultat je

$$P_i V_i^\gamma = P_f V_f^\gamma \quad (15.5)$$

gdje je eksponent  $\gamma$  omjer specifičnih toplinskih kapaciteta pri konstantnom tlaku i konstantnom volumenu,  $\gamma = c_p/c_V$ . U tablici dolje sažeto je prikazan rad koji vrši sustav za četiri vrste toplinskih procesa koje smo razmatrali. Za svaki je proces također prikazano kako prvi zakon termodinamike ovisi o radu i drugim varijablama.

Type of Thermal Process	Work Done	First Law of Thermodynamics ( $\Delta U = Q - W$ )
Isobaric (constant pressure)	$W = P(V_f - V_i)$	$\Delta U = Q - \underbrace{P(V_f - V_i)}_W$
Isochoric (constant volume)	$W = 0 \text{ J}$	$\Delta U = Q - \underbrace{0 \text{ J}}_W$
Isothermal (constant temperature)	$W = nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$ (for an ideal gas)	$\underbrace{0 \text{ J}}_{\Delta U \text{ for an ideal gas}} = Q - \underbrace{nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)}_W$
Adiabatic (no heat flow)	$W = \frac{3}{2}nR(T_i - T_f)$ (for a monatomic ideal gas)	$\Delta U = \underbrace{0 \text{ J}}_Q - \underbrace{\frac{3}{2}nR(T_i - T_f)}_W$

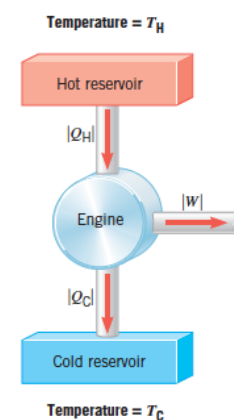
**Drugi zakon termodinamike.** Tijekom vrućih ljetnih dana možemo opaziti da se sladoled topi. Također, možemo opaziti da sladoled ostavljen u vrućem okruženju nikada ne postaju hladniji, već toplina spontano prelazi s toplijeg tijela na hladnije, a nikad u suprotnom smjeru. Spontani protok topline predstavlja jedan od osnovnih zakona u znanosti, a poznat je kao drugi zakon termodinamike.

**Drugi zakon termodinamike - protok topline.** Toplina spontano prelazi s tijela na višoj temperaturi na tijelo na nižoj temperaturi i nikad ne prelazi spontano u suprotnom smjeru.

Važno je shvatiti da se drugi zakon termodinamike bavi drugačijim aspektom prirode nego prvi zakon termodinamike. Drugi je zakon izjava o prirodnom svojstvu topline da teče s vrućeg tijela na hladno, dok se prvi zakon bavi pretvorbom toplinske energije u mehaničku i obratno. Brojni važni uređaji povezuju toplinu i rad, a za razumijevanje takvih uređaja potrebna su oba zakona.

**Toplinski strojevi.** Toplinski stroj je svaki uređaj koji koristi toplinu za obavljanje mehaničkog rada. Karakteriziraju ga tri osnovna svojstva:

1. Toplina se dovodi u stroj na relativno visokoj ulaznoj temperaturi iz mjesta koje se naziva topliji spremnik.
2. Dio ulazne topline koristi se za obavljanje mehaničkog rada u stroju.
3. Ostatak ulazne topline odbacuje se na mjesto koje se naziva hladniji spremnik, a njegova je temperatura niža od ulazne.



Ovo je ilustrirano na slici desno. Simbol  $Q_H$  odnosi se na toplinu koja dolazi iz toplijeg spremnika, dok simbol  $Q_C$  označava odbačenu toplinu

koja je predana hladnijem spremniku. Simbol  $W$  se odnosi na izvršeni rad.

Da bi bio učinkovit, toplinski stroj mora proizvesti relativno veliku količinu rada, sa što manje ulazne topline. Učinkovitost toplinskog stroja,  $e$ , se definira kao omjer obavljenog rada  $W$  i iznosa ulazne topline  $Q_H$ :

$$e = \frac{|W|}{|Q_H|} \quad (15.11)$$

Za toplinski stroj, kao i svaki uređaj, mora vrijedi zakon očuvanja energije. Dio od ulazne topline motora  $Q_H$  pretvara se u rad  $W$ , a ostatak  $Q_C$  odlazi u hladni spremnik:

$$|Q_H| = W + |Q_C| \quad (15.12)$$

Kombinirajući ovu jednadžbu s jednadžbom (15.11), za učinkovitost dobivamo

$$e = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|} \quad (15.13)$$

**Carnotov stroj.** Kada toplinski stroj radi s maksimalnom učinkovitošću? Francuski je inženjer Sadi Carnot (1796.-1832.) predložio da toplinski stroj ima maksimalnu učinkovitost kada su procesi unutar stroja reverzibilni.

**Carnotov princip: Alternativni iskaz drugog zakona termodinamike.** Nijedan ireverzibilni stroj koji radi s dva spremnika topline na konstantnim temperaturama ne može imati veću učinkovitost od reverzibilnog stroja. Nadalje, svi reverzibilni strojevi koji koriste spremnike iste temperature imaju istu učinkovitost.

Carnotov princip podrazumijeva da učinkovitost reverzibilnog motora ne ovisi o radnoj tvari motora, te stoga može ovisiti samo o temperaturama toplijeg i hladnijeg spremnika. Budući da je učinkovitost  $e = 1 - |Q_C|/|Q_H|$ , to znači da omjer topline,  $|Q_C|/|Q_H|$ , može ovisiti samo o temperaturama spremnika. Ovo opažanje navelo je lorda Kelvina da predloži *termodinamičku temperaturnu skalu*. Predložio je da termodinamičke temperature toplijeg i hladnijeg spremnika moraju biti definirane tako da je njihov omjer jednak  $|Q_C|/|Q_H|$ :

$$\frac{|Q_C|}{|Q_H|} = \frac{T_C}{T_H} \quad (15.14)$$

gdje temperature moraju biti iskazane u Kelvinima. Efikasnost Carnotovog stroja iznosi tada iznosi

$$e = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (15.15)$$

**Entropija.** Carnot stroj ima najveću moguću efikasnost jer su procesi koji se događaju u njemu reverzibilni. Ireverzibilni procesi, poput trenja, uzrokuju da pravi strojevi rade s učinkovitošću koja je manja od maksimalne, jer smanjuju našu sposobnost korištenja topline za obavljanje posla. Dakle, nepovratni procesi uzrokuju

gubitak neke, ali ne nužno i sve, sposobnosti obavljanja mehaničkog rada. Za opisati ovaj djelomični gubitak korisno je uvesti pojam entropija.

Da bismo uveli ideju entropije prisjetimo se odnosa  $|Q_C|/|Q_H| = T_C/T_H$  koji vrijedi za Carnotov stroj. Ovu je jednadžbu još moguće zapisati kao  $|Q_C|/T_C = |Q_H|/T_H$ , gdje je temperatura iskazana u Kelvinima. Omjer  $Q/T$  predstavlja promjenu entropije,  $\Delta S$ :

$$\Delta S = \left(\frac{Q}{T}\right)_R \quad (15.18)$$

U ovom izrazu temperatura  $T$  mora iskazana u Kelvinima, dok indeks  $R$  označava pojam reverzibilno. Iz jednadžbe (15.18) vidimo da je SI jedinica za entropiju J/K. Entropija je, poput unutarnje energije, funkcija stanja sustava. Stoga je promjena entropije  $\Delta S$  jednaka entropiji konačnog stanja sustava umanjenoj za entropiju početnog stanja.

Sada možemo opisati što se događa s entropijom za vrijeme rada Carnotovog stroja. Dok motor radi, entropija vrućeg spremnika se smanjuje, jer toplina veličine  $|Q_H|$  odlazi reverzibilno pri temperaturi  $T_H$ . Odgovarajuća promjena entropije je  $\Delta S_H = -|Q_H|/T_H$ , gdje negativni predznak označava smanjenje entropije. Entropija hladnog rezervoara raste za iznos  $\Delta S_C = +|Q_C|/T_C$ . Dakle, ukupna promjena entropije je u Carnotovom stroju je

$$\Delta S_C + \Delta S_H = +\frac{|Q_C|}{T_C} - \frac{|Q_H|}{T_H} = 0$$

jer vrijedi jednakost  $|Q_C|/T_C = |Q_H|/T_H$ . Činjenica da je ukupna promjena entropije jednaka nuli za Carnotov stroj specifičan je prikaz općeg rezultata. Može se dokazati da je ukupna promjena entropije nula,  $\Delta S_{\text{svemir}} = 0$ , kad se dogodi bilo koji reverzibilni proces. Ovdje indeks označava da se radi o cijelom svemiru. Dakle, reverzibilni procesi ne mijenjaju ukupnu entropiju svemira.

Nešto je složenije opisati što se događa s entropijom svemira kada se dogodi ireverzibilni (nepovratni) proces jer se izraz  $\Delta S = (Q/T)$  ne primjenjuje izravno. Međutim, ako se sustav nepovratno promijeni iz početnog stanja u konačno stanje, ovaj se izraz može neizravno upotrijebiti za izračun  $\Delta S$ . Zamislimo reverzibilni proces koji uzrokuje da se sustav promijeni između istog početnog i konačnog stanja i tada izračunamo  $\Delta S$  za ovaj reverzibilni proces. Vrijednost dobivena za  $\Delta S$  također se može iskoristiti i za nepovratni proces, jer samo svojstva početnog i konačnog stanja, a ne put između njih, određuje vrijednost  $\Delta S$ . Tako se može pokazati da pokazuje da spontani (nepovratni) procesi povećavaju entropiju svemira.

**Drugi zakon termodinamike.** Reverzibilni procesi ne mijenjaju ukupna entropiju svemira ( $\Delta S_{\text{svemir}} = 0$ ) dok ju reverzibilni povećavaju ( $\Delta S_{\text{svemir}} > 0$ ).

**Treći zakon termodinamike.** Nije moguće sniziti temperaturu bilo kojeg sustava na apsolutnu nulu ( $T = 0$  K) u konačnom broju koraka.



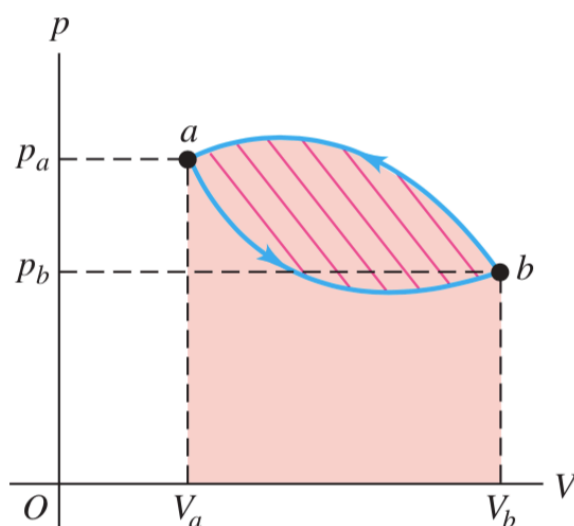
## Fizika za biologe – vježbe

Zadaci sa (\*) preuzeti su iz udžbenika Young & Freedman (2011) University physics with modern physics (rješenja u prilogu).

Zadatke pokušajte riješiti samostalno. Detaljna rješenja će biti poslana naknadno. Sva pitanja šalžite na email: abosilj@phy.hr

### Zakoni termodinamike

1. (\*Primjer 19.2) Kako bi sagorjeli višak deserta kojeg ste pojeli, odlučili ste se penjati stepenicama. Ako je vaša masa  $60\text{ kg}$  i ako je desert imao  $900\text{ kalorija}$ , koliko visoko se morate popesti?
2. (\*Primjer 19.3) Slika 1 prikazuje  $pV$ -dijagram za kružni proces u kojem su početno i konačno stanje nekog termodinamičkog sustava jednaka. Kako je prikazano, sustav se početno nalazi u točki  $a$  te se kreće u smjeru obrnutom od kazaljke na satu do točke  $b$  pa zatim opet ponovno do  $a$ . Ukupan obavljen rad iznosi  $W = -500\text{ J}$ . Zašto je rad negativan? Pronađite promjenu u unutarnjoj energiji sustava i toplinu unešenu u sustav tijekom ovog procesa.
3. (\*Primjer 20.2) Carnotov stroj koristi  $2000\text{ J}$  topline iz spremnika na temperaturi od  $500\text{ K}$ , obavi neki rad i otpusti toplinu spremniku na  $350\text{ K}$ . Koliko rada obavi stroj, koliko topline otpusti te koja je efikasnost stroja?
4. (\*Primjer 20.5) Kolika je promjena u entropiji leda mase  $1\text{ kg}$  koji je otopljen u reverzibilnom procesu na  $0^\circ\text{C}$  i konvertiran u vodu na  $0^\circ\text{C}$ ? Toplina taljenja vode je  $L_f = 3.34 \times 10^5\text{ J/kg}$ .
5. (\*Primjer 20.9) Za primjer Carnotovog stroja iz zadatka 3, (\*Primjer 20.2) kolika je ukupna promjena entropije tijekom jednog ciklusa?



Slika 1