

Predavanje 3

Vrste termodinamičkih procesa

4 specifična termodinamička procesa u praktičnim situacijama:

- bez prenosa toplote ili adijabatski
- konstantna zapremina, ili izohorni
- konstantan pritisak ili izobarni
- konstantna temperatura ili izotermn

Adijabatski proces

Pri adijabatskom procesu nema izmjene toplote s okolinom. Protok toplote možemo spriječiti izoliranjem sistema termičkim izolacionim materijalom ili da proces izvedemo veoma brzo tako da nema dovoljno vremena da se desi protok toplote.

Na osnovu 1.zakona termodinamike:

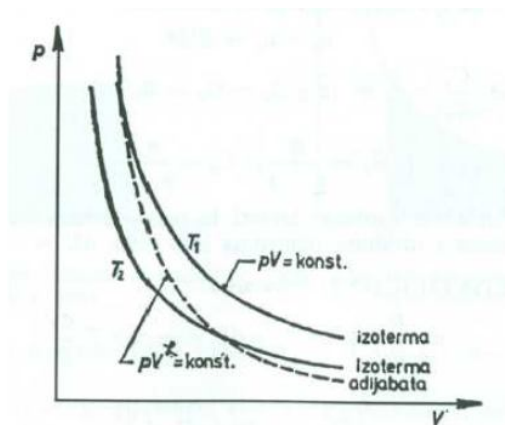
$$U_2 - U_1 = \Delta U = -W$$

Kada sistem ekspandira adijabatski, rad W je pozitivan (sistem vrši rad na svojoj okolini), tako da je ΔU je negativno, a unutrašnja energija se smanjuje.

Kada je sistem komprimiran adijabatski, W je negativno, (okolina je izvršila rad na sistemu) tako da unutrašnja energija U raste.

„Adijabatsko zagrijavanje“ ili „adijabatsko hlađenje“- porast temperature ili smanjenje temperature.

U adijabatskim procesima. Promjena temperature se dešava usljed rada sistema ili na sistemu; nema toplote (ni dodavanja ni oduzimanja)



$$TV^{\gamma-1} = \text{const.} \quad pV^\gamma = \text{const.} \quad T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const.} \quad (\text{jednačina je izvedena na predavanjima})$$

Izohorni proces, $V=\text{const}$,

Sva energija dodana u vidu toplote ostaje u sistemu kao porast unutrašnje energije.

Zagrijavanje gasa u zatvorenoj posudi konstantnog volumena je primjer izohornog procesa.

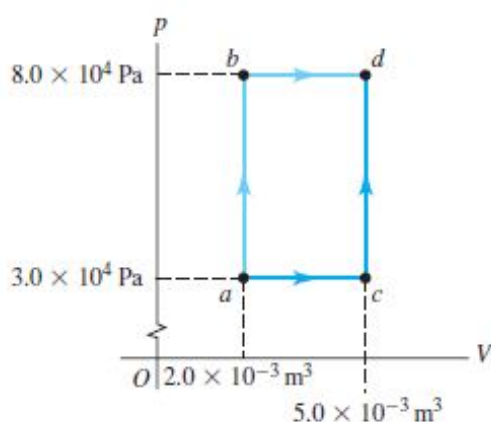
Ako je $V = \text{const}$, sistem ne vrši rad na svojoj okolini.

$$W = 0 \quad U_2 - U_1 = \Delta U = Q$$

Primjer PV- dijagram-niz termodinamičkih procesa

U procesu a-b dodaje se npr 150 J toplote u sistem

U procesu bd, dodaje se npr 600 J toplote u sistem. Koliko je ΔU u procesu ab i abd? Kolika je ukupna toplota dodanu u procesu acd?



U svakom procesu se koristi $\Delta U = Q - W$

$$Q_{ab} = +150 \text{ J}$$

$$Q_{bd} = +600 \text{ J}$$

Traži se ΔU_{ab} , ΔU_{abd} , Q_{acd}

a)

$$W_{ab} = 0$$

$$\Delta U_{ab} = Q_{ab} = 150 \text{ J}$$

b)

$$W_{bd} = p(V_2 - V_1) = 8 \times 10^4 \text{ Pa} (5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3) = 240 \text{ J}$$

$$W_{abd} = W_{ab} + W_{bd} = 0 + 240 \text{ J} = 240 \text{ J}$$

$$Q_{abd} = Q_{ab} + Q_{bd} = 150 \text{ J} + 600 \text{ J} = 750 \text{ J}$$

$$\Delta U_{abd} = Q_{abd} - W_{abd} = 750 \text{ J} - 240 \text{ J} = 510 \text{ J}$$

c) Kako ΔU ne zavisi od puta, unutarinja energija je ista za acd i abd:

$$\Delta U_{acd} = \Delta U_{abd} = 510 \text{ J}$$

Ukupan rad za put acd je:

$$W_{acd} = W_{ac} + W_{cd} = p(V_2 - V_1) + 0 =$$

$$= (3 \times 10^4 \text{ Pa})(5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3) = 90 \text{ J}$$

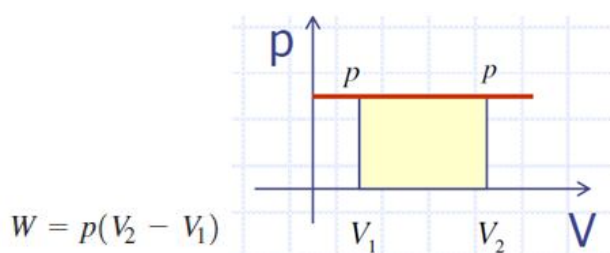
$$Q_{acd} = \Delta U_{acd} + W_{acd} = 510 \text{ J} + 90 \text{ J} = 600 \text{ J}$$

$$W_{abd} \neq W_{acd}$$

$$Q_{abd} \neq Q_{acd}$$

Izobarni proces

p=const. Pri izobarnom procesu pritisak plina je konstantan a volumen i temperatura se mijenjaju



Izotermni proces $T=\text{const.}$ ($pV=f(T)=\text{const}$)

Kod izotermnih procesa, protok toplote u ili iz sistema mora biti dovoljno spor, tako da se zadrži termička ravnoteža. Q, W su $\neq 0$

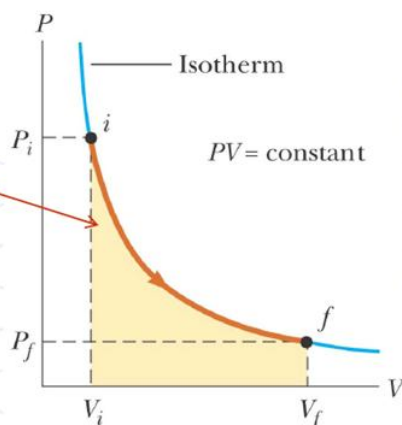
Ako je $T=\text{const.}$ Unutarnja energija $U=\text{const.}$ Sva energija koja ulazi u sistem kao toplota Q , mora izaći kao rad.

$$\Delta U = 0 \quad \text{i} \quad Q = W$$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = nRT = \text{konst}$$

$$W_{12} = \int_1^2 p dV = \int_1^2 \frac{nRT}{V} dV$$

$$\Delta W = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV = nRT \ln V \Big|_{V_1}^{V_2} = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$



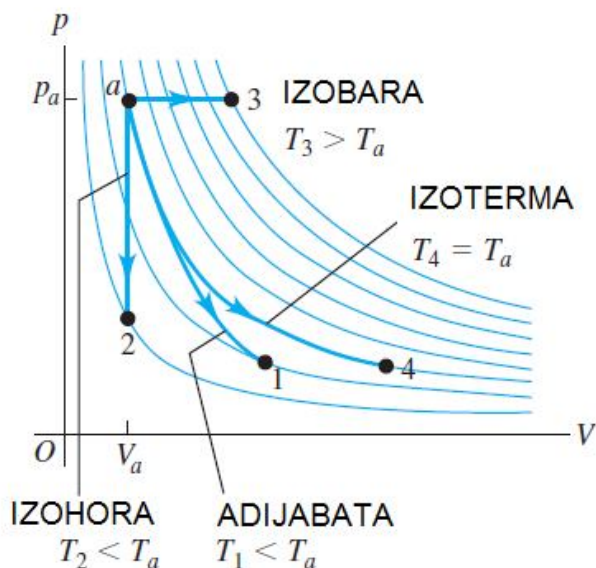
sva četiri procesa počinju u tački a.

adijabatski proces: $Q=0$,

izohorni proces, $W=0$,

izotermni proces, $\Delta U=0$.

izobarni proces-ekspanzija: raste temperatura T



Primjer izobarnog procesa - Termodinamičko zagrijavanje vode

1g vode (1cm^3) postaje 1671 cm^3 pare pri zagrijavanju na konstantnom pritisku od 1 atm ($1,013 \times 10^5\text{Pa}$). Toplota isparavanja je $L_v = 2,256 \times 10^6\text{ J/kg}$. Izračunati rad koji je izvršila voda pri isparavanju i porast unutarnje energije. Toplota koja se dodaje u sistem (voda) **mijenja stanje** od tečnog u paru. Pošto se voda zagrijava pri $p=\text{const}$, možemo izračunati rad:

$$W = p(V_2 - V_1) = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa} (1671 \times 10^{-6} \text{ m}^3 - 1 \times 10^{-6} \text{ m}^3) = 169 \text{ J}$$

toplota koja je dodana vodi je:

$$Q = m_v \cdot L_v = (10^{-3} \text{ kg}) \times (2,256 \times 10^6 \text{ J/kg}) = 2256 \text{ J}$$

Promjena unutarnje energije je: $\Delta U = Q - W = 2256 \text{ J} - 169 \text{ J} = 2087 \text{ J}$

Za isparavanje 1g vode potrebno je dodati 2256J toplote od čega 2087 ostaje u sistemu kao porast unutarnje energije. Prestalih 169 J odlazi iz sistema kako sistem ekspandira iz tečnog stanja u paru (protiv okoline). Porast unutarnje energije je povezan uglavnom sa privlačnim međumolekularnim silama koje drže molekule zajedno u tečnom stanju. Potencijalne energije su veće nakon izvršenog rada kada se molekule razdvajaju – dolazi do promjene stanja u paru.

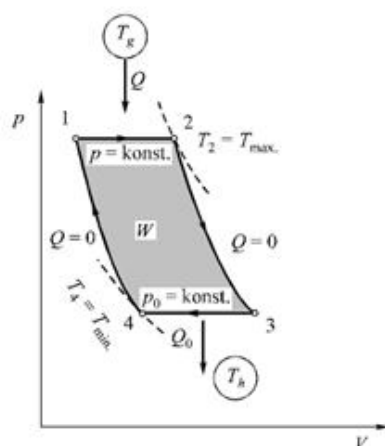
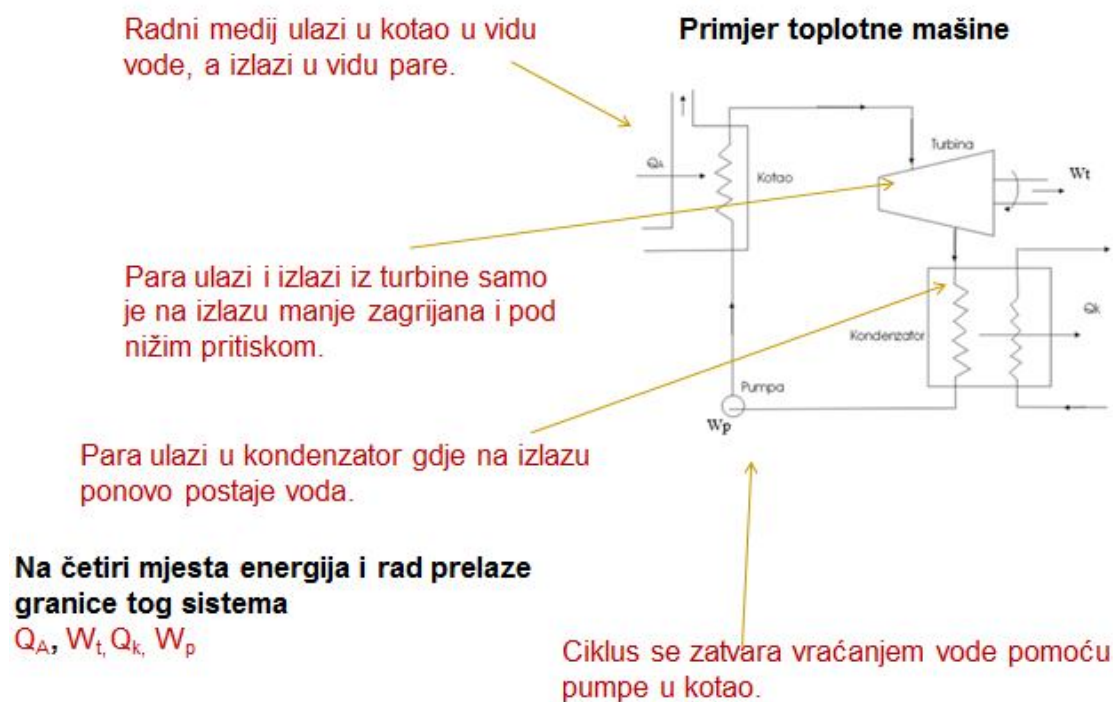
Smjer termodinamičkih procesa

Termodinamički proces je svaka promjena stanja tijela ili sistema tijela. Termodinamički procesi u prirodi su nepovratni ili ireverzibilni procesi. Proces koji se dešavaju spontano u jednom smjeru, ali ne u drugom. Protok toplote sa toplijeg tijela na hladnije je **nepovratan proces- ireverzibilan**. **Reverzibilan proces- povratni** – ako se dozvoljava povratak sistema u njegovo početno stanje ne ostavljajući nikakve promjene na okolini.

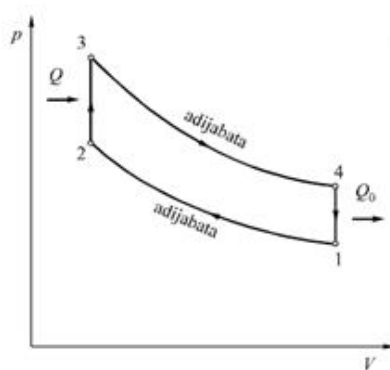
Toplotne mašine

Bit našeg tehnološkog društva je sposobnost korištenja izvora energije. Ponekad je mehanička energija izravno dostupna; Primjer: snaga vode i snaga vjetera. Ali većina naše energije dolazi iz izgaranja fosilnih goriva (ugljen, nafta i plin) i nuklearnih reakcija. Oni opskrbljuju energiju koja se prenosi kao toplota. Direktno korisno za grijanje zgrada, za kuhanje i za hemijsku obradu, ali za upravljanje strojem ili

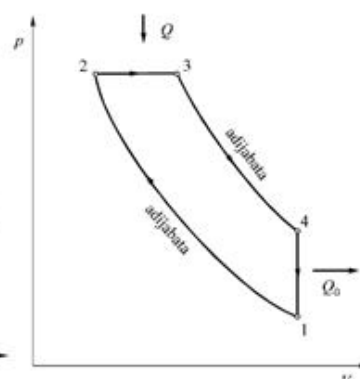
pogonom vozila- potrebna mehanička energija. Stoga je važno znati uzeti toplinu iz izvora i pretvoriti što više u mehaničku energiju ili rad. To se dešava u motorima automobila, aviona, parnih turbina u elektranama i td. Uređaj koji transformiše toplotu djelimično u rad ili mehaničku energiju naziva se **TOPLITNA MAŠINA**. Određena količina materije (**radna materija**) se podvrgava širenju, kompresiji i ponekad promjeni faze. U SUS motorima radna materija je mješavina zraka i goriva, u parnoj turbini je voda. Najjednostavnija mašina je ona gdje radna materija prolazi kroz ciklični proces. U parnoj turbini voda se reciklira i iznova koristi. U motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem ne koristi se stalno isti zrak iznova, ali ga možemo analizirati kao ciklični.



Jouleov kružni proces



Ottov kružni proces



Dieselov kružni proces

1-2 Izobarno zagrijavanje
 2-3 Adijabatska ekspanzija
 3-4 Izobarno hlađenje
 4-1 Adijabatska kompresija

1-2 Adijabatska kompresija
 2-3 Izohorno zagrijavanje
 3-4 Adijabatska ekspanzija
 4-1 Izohorno hlađenje

1-2 Adijabatska kompresija
 2-3 Izobarno zagrijavanje
 3-4 Adijabatska ekspanzija
 4-1 Izohorno hlađenje

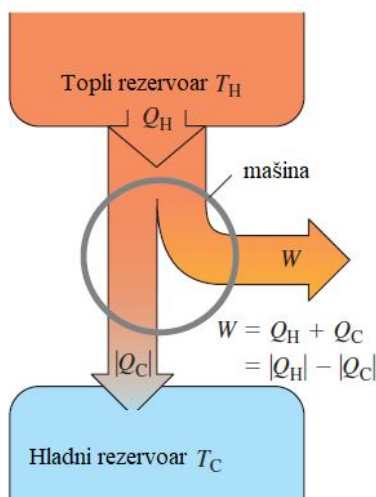
TOPLI I HLADNI REZERVOARI

Sve toplotne mašine absorbiraju toplinu iz izvora koji je relativno visoke temperature, obavljaju neki oblik mehaničkog rada i predaju određenu toplinu nekom spremniku koji je na relativno niskoj temperaturi. Kod SUS motora- odbačena toplota je u stvari potrošena toplota. Kod SUS motora odbačena toplota se izgubi u izduvnim gasovima, pa hladi sistem. U parnim turbinama odbacuje se toplota u vidu kondenzata, tako da se voda reciklira, tj ponovo koristi. U svim cikličnim procesima, za 1. zakon termodinamike vrijedi:

$$U_2 - U_1 = 0 = Q - W, \text{ tj. } Q = W$$

Toplota koja ulazi u mašinu jednaka je izvršenom radu

Dakle možemo posmatrati dva tijela sa radnom materijom koja vrši interakciju. Jedno tijelo je topli rezervoar- izvor topline; predaje radnoj materiji. Drugo tijelo se naziva hladni rezervoar, apsorbuje veliki iznos odbačene toplote iz mašine na konstantnoj nižoj temperaturi T_C .



Q je pozitivno kada toplota ulazi u radnu materiju

Negativna kada izlazi iz radne materije

Q_C - negativno- toplota koja izlazi iz radne materije

Ukupna apsorbirana toplota

$$Q = Q_H + Q_C = |Q_H| - |Q_C|$$

1. Zakon termodinamike:

Idealno bi bilo konvertovati svu toplotu Q_H u rad.

U tom slučaju bi bilo $Q_H = W$, i $Q_C = 0$; Međutim, to nije moguće,

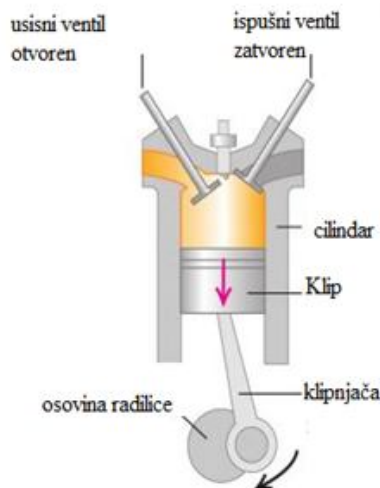
$Q_C \neq 0$; termička efikasnost mašine (stroja) je:

$$e = \frac{W}{Q_H}$$

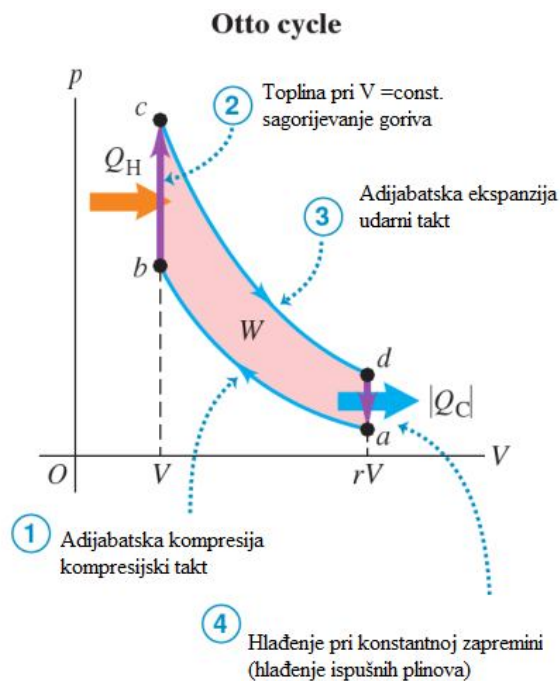
$$e = \frac{W}{Q_H} = 1 + \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \left| \frac{Q_C}{Q_H} \right|$$

Mašina sa unutrašnjim sagorijevanjem

-Benzinski motor- Ottov ciklus



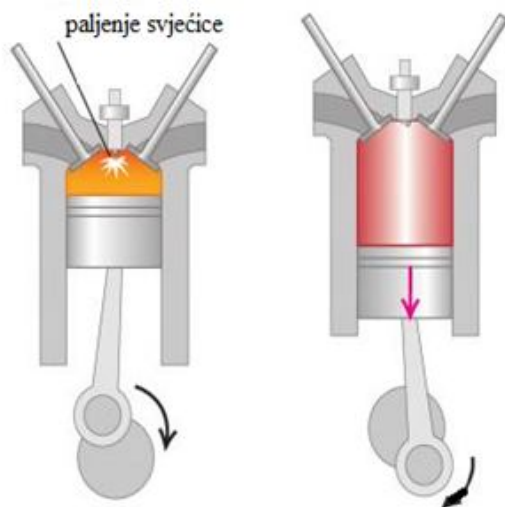
Usisni hod:
Klip se pomjera od gornje pozicije prema dole, mješavina zraka i benzina ulazi kroz usisni ventil, zapremina se povećava od minimalne V (gornja pozicija klipa) do maksimalne rV (donji položaj klipa)- tačka a



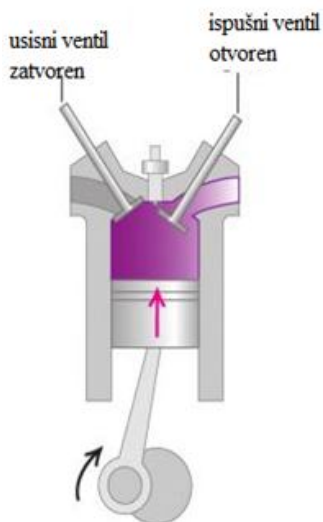
Kraj usisnog takta, zatvara se ventil, mješavina se sabija do zapremine V - kompresija približno adijabatski (a-b)

Ako je temperatura dovoljno visoka, mješavina eksplodira spontano tokom kompresije umjesto ravnomjernog paljenja svjećicom –detonacija –lupanje motora

Mješavina se pali svjećicom (b-c), zagrijani gas ekspandira- širi se- približno adijabatski (c-d) nazad do volumena rV , gura klip i vrši rad- udarni takt



Otvora se ispušni ventil, izbacuju se produkti sagorijavanja- ispušni takt (hod) (d-a)



Ispušni hod: Ispušni se ventil otvara; klip se kreće prema gore i cilindar je spreman za sljedeću usisnu fazu

Termička efikasnost Ottovog ciklusa

Procesi c-b i d-a su pri konstantnoj zapremini, tako da je :

$$Q_H = nC_V(T_c - T_b) > 0$$

$$Q_C = nC_V(T_a - T_d) < 0$$

Za adijabatske procese a-b i c-d vrijedi:

$$T_a(rV)^{\gamma-1} = T_bV^{\gamma-1} \quad T_d(rV)^{\gamma-1} = T_cV^{\gamma-1}$$

Termička efikasnost je:

$$e = \frac{Q_H + Q_C}{Q_H} = \frac{T_c - T_b + T_a - T_d}{T_c - T_b}$$

$$e = \frac{T_d r^{\gamma-1} - T_a r^{\gamma-1} + T_a - T_d}{T_d r^{\gamma-1} - T_a r^{\gamma-1}} = \frac{(T_d - T_a)(r^{\gamma-1} - 1)}{(T_d - T_a)r^{\gamma-1}}$$

$$e = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

Karakteristike Ottovog ciklusa

Efikasnost uvijek manja od 1 čak i za ideliziran proces

Za $r=8$ i $\gamma=1,4$, teorijska efikasnost procesa je 56%.

Efikasnost raste kako se povećava r .

Ovim se takođe povećava i temperatura na kraju adijabatske kompresije mješavine zraka i goriva

Ako je temperatura dovoljno velika onda može doći do spontane eksplozije umjesto ravnomjernog paljenja svjećicom.

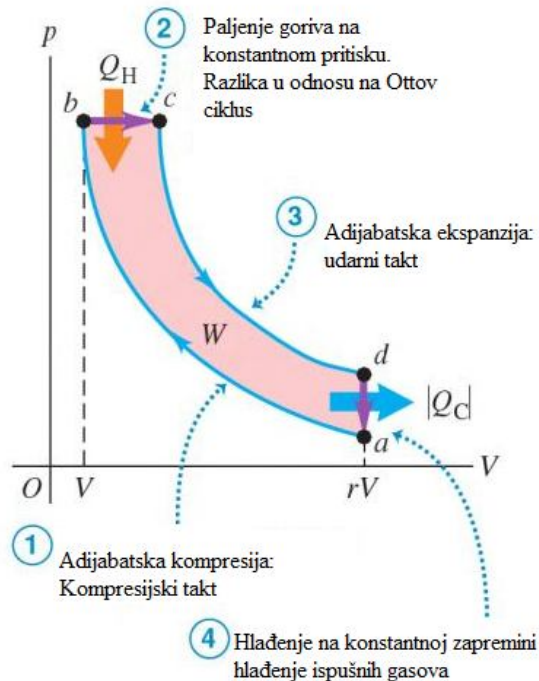
To je predpaljenje ili detonacija, čuje se lupanje. može oštetiti motor

Efikasnot realnog benzinskog motora je oko 35 %

Dizelov ciklus

Dizelov ciklus razlikuje se od Ottovog ciklusa po tome što u početnoj fazi uzima samo zrak-nema goriva u cilindru na početku kompresije. Prije samog početka udarne faze, injektor ubrizgava gorivo direktno u cilindar, dovoljno brzo da održi pritisak konstatnim tokom prvog dijela udarne faze. Zbog velike temperature tokom adijabatske kompresije, gorivo sagorijeva spontano kako se ubrizgava; nema svjećice

Dizelov ciklus



$r = 15-20$ - mnogo veći od benzinskog motora. Efikasnost veća 0,65-0,7– Pouzdanost paljenja kod injektiranja jer je veća temperatura tokom adijabatske kompresije

| Poređenje | |
|---|--------------|
| <ul style="list-style-type: none"> - Rad koji se obavlja u ovom ciklusu je veći nego u Otto ciklusu - okretni moment je veći, - Brzina sagorijevanja goriva- sporo, nema ubrizgavanja. - Nema pred-zapaljenja. | Dizel |
| <ul style="list-style-type: none"> -Brzo sagorijevanje goriva - promjenu snage i brze promjena brzine. -Gorivo je zapaljivo na sobnoj temperaturi, a motor radi pri znatno nižim omjerama kompresije u odnosu na Dizel ciklus, omogućujući lakše i manje složene motore. | Otto |

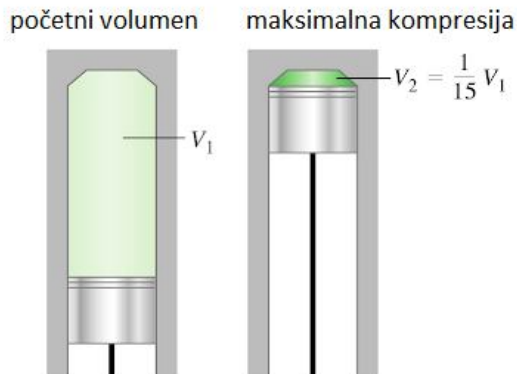
Primjer. Adijabatski proces dizel mašine

Kompresijski odnos dizel mašine je 15:1; što znači da se cilindri komprimiraju 1/15 u odnosu na početni volumen. Ako je početni pritisak 1.01×10^5 Pa i početna temperatura 27°C (300K), naći pritisak i

temperaturu nakon kompresije. Zrak je mješavina dvoatomskog kisika i nitroгена; tretirati kao idealni gas sa $\gamma=1.4$.

Rješenje:

Kako je problem adijabatska kompresija idealnog gasa, ideja je sljedeća:



$$p_1 = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa} \quad T_1 = 300 \text{ K, zadano}$$

$$V_1/V_2 = 15.$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = (300 \text{ K}) (15)^{0.40} = 886 \text{ K} = 613^\circ\text{C}$$

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma} = (1.01 \times 10^5 \text{ Pa}) (15)^{1.40} = 44.8 \times 10^5 \text{ Pa} = 44 \text{ atm}$$

**Iz jednačine
adijabate
idealnog gasa**

Hladnjak

Hladnjak – toplotna mašina koja radi u suprotnom smjeru

Hladnjak uzima toplinu od hladnog spremnika (unutrašnjosti hladnjaka) i predaje ju toplom spremniku (okolini)

Toplotna mašina vrši rad –predaje rad

Hladnjaku je potrebno predati rad

Za hladnjak Q_C je pozitivno ali W i Q_H je negativno,

$$Q_H + Q_C - W = 0 \quad \text{ili} \quad -Q_H = Q_C - W$$

$$|Q_H| = Q_C + |W| \quad \text{Vrijedi i za toplotnu mašinu i za hladnjak}$$

Sa ekonomske tačke gledišta, nabolji hladnjak bi bio onaj koji prebaci najveći iznos toplote iz unutrašnjosti hladnjaka uz najmanju potrošnju mehaničkog rada.

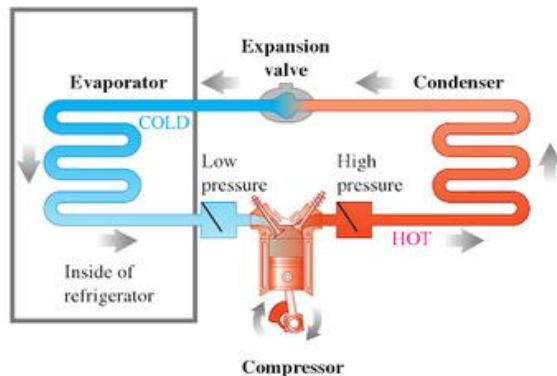
$$K = \frac{|Q_C|}{|W|} = \frac{|Q_C|}{|Q_H| - |Q_C|}$$

Koeficijent hlađenja. Što je veći ovaj odnos, utoliko je bolji frižider (hladnjak)

Realni hladnjak

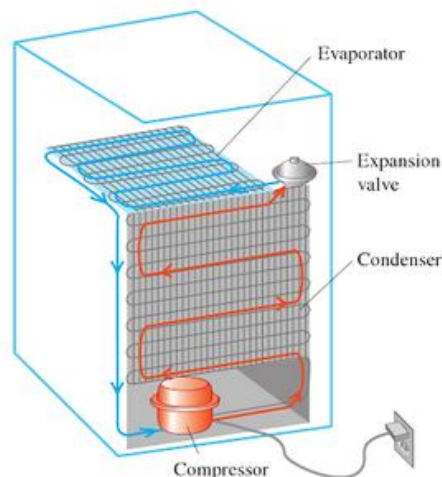
a. princip mehaničkog ciklusa hladnjaka

(a)



b. ključni elementi hladnjaka

(b)



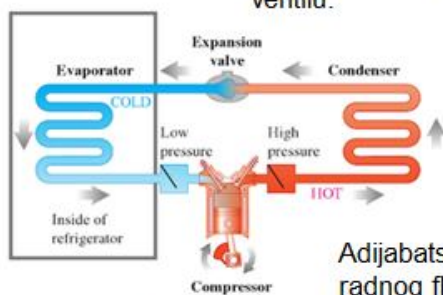
$$K = \frac{|Q_c|}{|W|} = \frac{H_t}{P_t} = \frac{H}{P}$$

Ako se toplina premješta u vremenu, onda je $H=Q_c/t$. Za klime je značajna veličina koja se naziva stepen izmjene topline, pri čemu je tok topline H ili toplina regiona koji se hladi, a ulazna snaga je P .

Desna strana na slici, (uključujući i kondenzatorske cijevi izvan hladnjaka) je na višoj temperaturi i višem pritisku. Obično obje strane sadrže tečnost i isparivač u fazi ekvilibrijuma.

Fluid ekspankira i hladi pa je u isparivaču hladniji od okruženja

Adijabatska ekspanzija fluida u isparivaču. Regulacija jačine u ventilu.



Temperatura fluida > od okruženja kondenzatora, hladnjak daje $|Q_H|$ i djelimično prelazi u tečnost

Adijabatska kompresija radnog fluida

Fluid apsorbira toplinu $|Q_c|$ iz okruženja hladi je i isparava

Fluid ulazi u kompresor i počinje novi ciklus

Kompresor pokreće motor koji zahtijeva ulaznu energiju i vrši rad na fluidu, dakle $|W|$.

2.Zakon termodinamike

Osnovni problem koji se nameće u svim procesima konverzije toplote u rad i rada u toplotu je u činjenici da u nekom cikličnom procesu **uvijek možemo sav rad prevesti u toplotu ali svu toplotu ne možemo prevesti u rad- dakle sa 100% stepenom efikasnosti**

Nemoguć perpetuum mobile druge vrste. tj. nije moguće dobiti korisni mehanički rad uz samo jedan toplinski spremnik. (Kelvin-Plankova formulacija 2. zakona termodinamike)

Reformulacija : Nemoguć je proces koji bi rezultirao prenosom topline od hladnijeg ka toplijem tijelu (Clasijusova formulacija)

- 1.zakon termodinamike poriče mogućnost stvaranja ili uništavanja energije;
2. zakon termodinamike ograničava dostupnost energije i način kako se može koristiti i konvertovati.

Ako 2. zakon termodinamike ne bi bio tačan mogli bismo pokretati automobil ili elektranu hlađenjem okoline.

Carnotov ciklus i 2. zakon termodinamike

Prema drugom zakonu termodinamike, ne postoji toplotna mašina sa efikasnošću od 100 %. Koliku efikasnost može imati mašina data sa dva toplotna rezervoara na temperaturama T_H i T_C ?

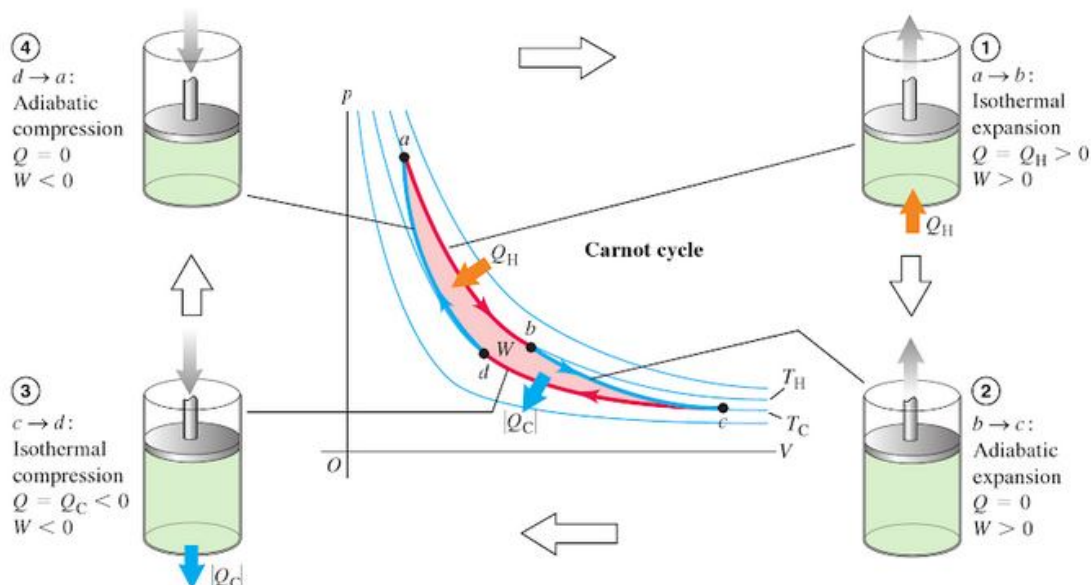
Odgovor je dao 1824 godine Francuski inženjer Sadi Carnot, koji je razvio hipotezu idealnu toplotnu mašinu koja ima maksimalnu efikasnost u odnosu na drugi zakon termodinamike. Ciklus na kojoj je zasnovan rad ove mašine se naziva Carnotov ciklus.

U ovu svrhu potrebno je razumjeti reverzibilnost i ireverzibilnost procesa. Konverzija rada u toplotu je ireverzibilan proces. Svrha toplotne mašine je djelimična konverzija sa maksimalnom mogućnom efikasnošću. Da bi imali maksimalnu efikasnost, morali bi izbjeći sve ireverzibilne procese.

Carnotov kružni proces je teorijski toplinski stroj od ogromnog praktičnog i teorijskog značaja. Carnotov toplinski stroj je najefikasniji termodinamički sistem u smislu pretvaranja topline u mehanički rad. U Carnotov kružnom procesu idealni plin se preko dva izotermna i adijabatska procesa vraća u početno stanje. Danas se koriste i drugi kružni procesi Dieselov, Ottov, Strlingov, itd. ...

Koraci Carnotovog ciklusa:

1. Izotermna ekspanzija gasa na tempertauri T_H –apsorpcija topline Q_H –(ab)
2. Adijabatska ekspanzija –temperatura opada do T_C –(bc)
3. Izotermna kompresija na T_C – otpuštanje topline $|Q_C|$ (cd)
4. Adijabatska kompresija do konačnog početnog stanja na temperaturi T_H (da).



proces od a do b : izotermno širenje

$$p_a V_a = p_b V_b$$

$$\Delta U = 0;$$

$$Q_H = W_{ab} = nRT_H \ln \frac{V_b}{V_a}$$

Proces od b do c: adijabatsko širenje

$$p_b V_b^\gamma = p_c V_c^\gamma$$

$$W_{bc} = \frac{nR}{\gamma - 1} (T_H - T_C)$$

$$\Delta U = U_c - U_b = -W_{bc}$$

Proces od c-d izotermno sabijanje

$$p_c V_c = p_d V_d$$

$$\Delta U = 0;$$

$$Q_C = W_{cd} = nRT_C \ln \frac{V_d}{V_c}$$

Proces od d-a adijabatsko sabijanje

$$p_d V_d^\gamma = p_a V_a^\gamma$$

$$W_{da} = \frac{nR}{\gamma - 1} (T_C - T_H)$$

$$\Delta U = U_d - U_a = -W_{da}$$

Ukupan rad je

$$W = W_{ab} + W_{bc} + W_{cd} + W_{da}$$

$$W = nRT_H \ln \frac{V_b}{V_a} + \frac{nR}{\gamma - 1} (T_H - T_C) + nRT_C \ln \frac{V_d}{V_c} + \frac{nR}{\gamma - 1} (T_C - T_H)$$

$$W = nRT_H \ln \frac{V_b}{V_a} + nRT_C \ln \frac{V_d}{V_c} = Q_H + Q_C = Q_H - |Q_C|$$

Efikasnost Carnotove mašine je

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

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

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

Nijedna realna toplotna mašina koja radi između dva spremnika različite temperature ne može biti efikasnija od Carnotove koja radi između ista ta dva spremnika. Svi realni strojevi imaju manju efikasnost jer ne rade po reverzibilnom kružnom procesu i rade sa gubicima.

Entropija i 2. zakon termodinamike

0. zakon termodinamike → uveo koncept temperature

I. zakon termodinamike → uveo koncept unutarnje energije

II. zakon termodinamike → uveo koncept entropije

Dakle entropija je vezana za usmjerenost prirodnih procesa

Entropija = kvantitativna mjera nereda

Npr: Za izotermnu ekspanziju idealnog gasa vrijedi:

Dodajemo toplotu dQ i pustimo da gas ekspanzira tako da se temperatura održi konstantnom. Pošto je unutarnja energija idealnog gasa zavisi samo od njegove temperature unutarnja energija je takođe konstantna. Prema prvom zakonu termodinamike dW je jednako dQ :

$$dQ = dW = p dV = \frac{nRT}{V} dV \quad \frac{dV}{V} = \frac{dQ}{nRT}$$

Gas je u većem neredu nakon ekspanzije jer se molekule kreću većom zapreminom i imaju slučajniju poziciju. Odnos dV/V je mjera povećanja nereda, i pokazuje da je proporcionalna odnosu dQ/T . Uvodimo simbol S kao oznaku entropije sistema i definišemo promjenu dS tokom infinitezimalnog reverzibilnog procesa na apsolutnoj temperaturi T :

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

Ako je Q toplota tokom reverzibilnog procesa pri apsolutnoj temperaturi T onda je promjena entropije .

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q}{T}$$

Primjer: Ako je materija u početku hladna sa malim molekularnim kretanjem, dodavanjem topline Q uzrokuje značajan porast u kretanju molekula i slučajnosti. Ali ako je materija već topla, dodatak istog iznosa topline je relativno mali u odnosu na veće kretanje molekula koje već postoji. Dakle Q/T je odgovarajuća karakteristika povećanja u slučajnosti ili nereda kada toplota ulazi u sistem.

Entropija reverzibilnih procesa

Definicija entropije-povećanje na svaki reverzibilni proces. Reverzibilni proces- predstaviti kao zbir infinitezimalnih procesa. Promjena entropije od početnog stanja 1 do konačnog stanja 2 je

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

Promjena entropije od početnog stanja 1 do konačnog stanja 2 je

$$\Delta S = S_2 - S_1 \quad \text{Ne zavisi od puta. To je funkcija stanja}$$

Da bi matematički opisali vezu između entropije i zakona terodinamike, najprije razmatramo idealni Caronotov proces

termički koeficijent efikasnosti

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

T2- temperatura hladnjaka,
T1- temperatura grijača

U idealnom procesu koeficijent efikasnosti bi bio jednak jedan ako bi temperatura T_2 bila jednaka nuli.

Pošto to ne postoji u realnom slučaju, to znači da se ne može konstruisati toplotna mašina koja bi imala takvu efikasnost.

Q_1 dovedena količina toplote

Q_2 odvedena količina toplote i ako se uzmu u obzir predznaci + i – kako je ranije rečeno, onda se može pisati sljedeće:

$$\frac{Q_1}{T_1} = -\frac{Q_2}{T_2}, \text{ tj. } \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Korisnost u Carnotovu procesu: $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{|Q_1|}{T_1} = \frac{|Q_2|}{T_2} \\ \frac{|Q_1|}{T_1} + \frac{|Q_2|}{T_2} = 0 \end{array} \right.$$

$Q_1 > 0, Q_2 < 0$

Promjena entropije u jednom ciklusu Carnotova procesa:

$$\Delta S = \underbrace{\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_R}_{\text{konst.}} + \underbrace{\int_2^3 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_R}_0 + \underbrace{\int_3^4 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_R}_{\text{konst.}} + \underbrace{\int_4^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_R}_0 = \frac{|Q_1|}{T_1} + \frac{|Q_2|}{T_2} = 0$$

Ako se razmatra bilo koji povratni ciklus između tačaka X i Y kao na slici, i ako se isti razloži na neograničen veliki broj Carnotovih ciklusa onda bi imali sljedeće

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i} = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \dots = 0.$$

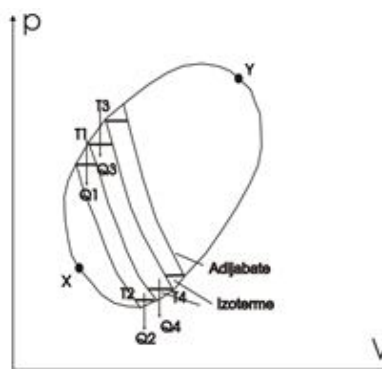
Za beskonačno veliki broj elementarnih Carnotovih ciklusa

$$\oint \frac{\delta Q_p}{T} = 0$$

diferencijal entropije $dS = \frac{\delta Q_p}{T}$

Ukupna promjena entropije u svakom **reverzibilnom** kružnom procesu je nula:

$$S_R = \oint \frac{dQ}{T} = 0$$



ENTROPIJA IREVERZIBILNIH PROCESA

Prema 1. zakonu termodinamike vrijedi: $Q = \Delta U + W$

Efikasnost ireverzibilnih procesa je manja od efikasnosti reverzibilnih procesa, tako da je $\eta_{ir} < \eta_{rev}$

$W_{ir} < W_{rev}$ Kako su promjene ΔU iste, onda je $Q_{ir} < Q_{rev}$

$$\frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} < 0 \quad (\text{za } Q_2 \text{ uzeti da je negativno})$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$

Promjena entropije u slučaju ireverzibilnih procesa

Neka su dva krajnja stanja označena sa 1 i 2 kao na slici.

Neka su ta dva stanja povezana sa procesima A i B – povratni i sa nepovratnim ciklusom C

1A2- povratni ciklus

2B1- povratni ciklus

1A2C1- nepovratni ciklus

za povratni ciklus važi $\int_{1A}^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_{2B}^1 \frac{\delta Q}{T} = 0$

za nepovratni ciklus važi $\int_{1A}^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_{2C}^1 \frac{\delta Q}{T} < 0$

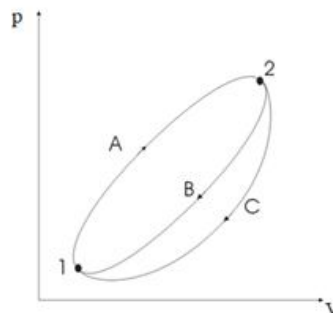
Oduzmemo jednačine:

$$\int_{1A}^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_{2C}^1 \frac{\delta Q}{T} - \int_{1A}^2 \frac{\delta Q}{T} - \int_{2B}^1 \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

$$\int_{2C}^1 \frac{\delta Q}{T} - \int_{2B}^1 \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \text{ ili } \int_{2B}^1 \frac{\delta Q}{T} \geq \int_{2C}^1 \frac{\delta Q}{T}$$

Pošto je proces 2B1 povratni umjesto $\delta Q/T$ se može pisati dS pa je: $\int_2^1 dS \geq \int_2^1 \frac{\delta Q}{T}$

$$\longrightarrow dS \geq \frac{\delta Q}{T}$$



postojanje nepovratnih ciklusa uvijek dovodi do povećanja entropije.