

Drugi zakon termodinamike

Šefko Šikalo

Ciklični procesi toplotnih mašina

- Ako je stanje tijela karakterisano **pritiskom** i specifičnom **zapreminom**, onda se može predstaviti tačkom u ***p-v* dijagramu**.
- Promjena stanja tijela u dijagramu je opisana ***krivom termodinamičkog procesa***.
- Niz ovakvih procesa, u kojima je tijelo podvrgnuto određenim promjenama i vraća se u isto početno stanje, zove se ***ciklični proces*** ili ***ciklus***.
- Konstrukcija modernih mašina je **bazirana na procesima idealnih ciklusa transformacije toplote u mehanički rad**, to jest, na ***idealnim ciklusima***.
- Analiza idealnih ciklusa je važna za proračun **realnih toplotnih procesa** koji se dešavaju u realnim mašinama.
- U idealnim ciklusima svi procesi su **reverzibilni**, jer nema gubitka toplote uslijed trenja ili prenosa toplote kroz **ne savršenu toplotnu izolaciju**.

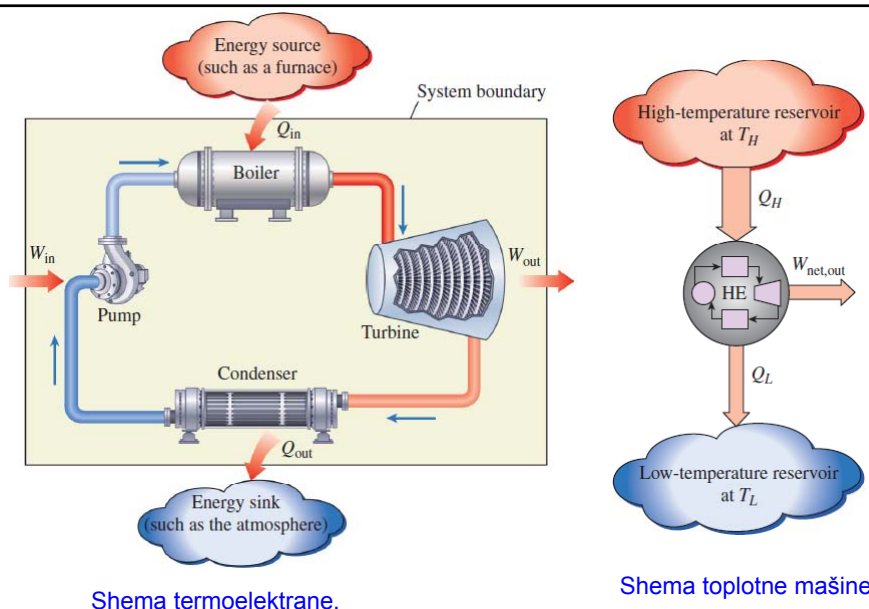
Ciklični procesi toplotnih mašina

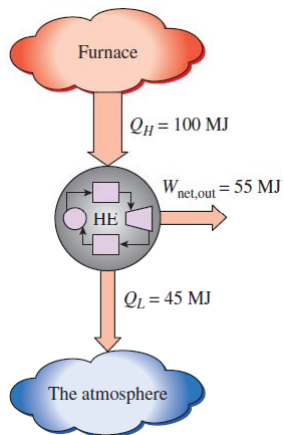
U idealnim ciklusima **proces dovodenja toplote** se analizira pod pretpostavkom da se hemijski sastav radnog medija ne mijenja. Nasuprot tome, **u realnim ciklusima** toplota se dobija pomoću efekata **sagorijevanja goriva**, a radni medij je **produkt sagorijevanja goriva** kao u motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem ili **vodena para visokog pritiska**, u parnim turbinama.

Proces odvođenja toplote u idealnim ciklusima se razmatra kao **prenos toplote hladnjaku**.

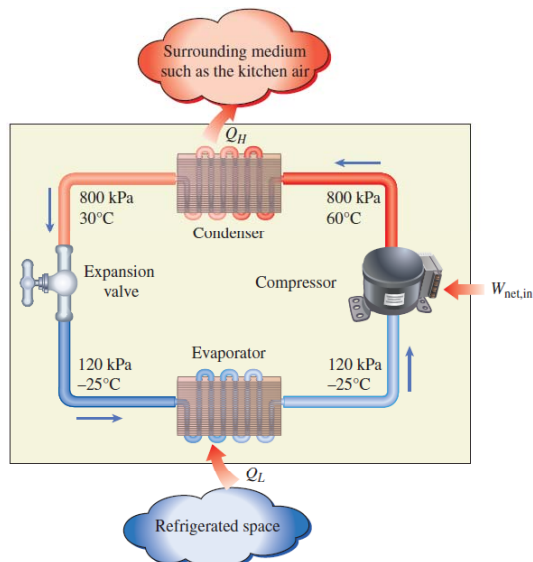
Međutim, u realnim ciklusima odvođenje toplote se ostvaruje **izduvavanjem odrađenog gasa ili pare**. U idealnim ciklusima proces adijabatske kompresije i ekspanzije se dešava bez razmjene toplote između radnog i vanjskog medija.

U realnim ciklusima, procesi ekspanzije i kompresije su povezani sa razmjenom toplote i ne mogu biti savršeno adijabatski.

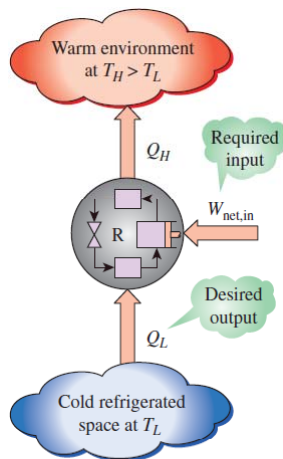




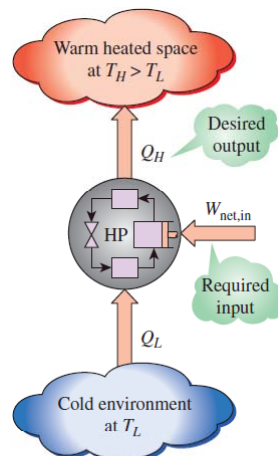
Čak najefikasnije toplotne mašine odbace skoro $\frac{1}{2}$ energije koju prime, kao otpadnu toplotu.



Osnovne komponente rashladnog sistema
i tipični radni uslovi.



Svrha rashladne mašine je da odvede Q_L od hladnog prostora.



Svrha toplotne pumpe je da dovede toplotu Q_H u topli prostor.

Poljoprivredo-prehrambeni fakultet
Sarajevo

7

Ciklični procesi toplotnih mašina

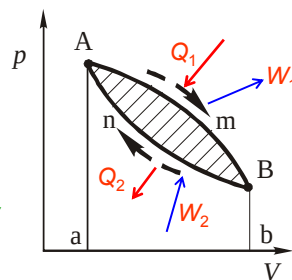
Reverzibilni ciklični proces je ilustriran na slici. Određena količina dovedene toplote Q_1 , dovodi do promjene stanja tijela duž linije AmB . U ovome procesu izvršen je **pozitivni rad** W_1 , koji je numerički jednak površini $AmBbaA$. Pod djelovanjem vanjske sile tijelo se vraća iz tačke B u svoje početno stanje, tačka A , duž linije BnA . Prema tome, ciklus se završava u tački A . Kompresija tijela zahtijeva **negativan rad** W_2 od vanjskih sila, koji je numerički jednak površini $AnBaA$.

Kriva ciklusa u pV dijagramu je zatvorena kontura $AmBnA$ čija površina je jednaka razlici između $AmBbaA$ i $AnBbaA$.

Da bi dobili korisni rad, **rad ekspanzije mora biti veći od rada kompresije**, to jest, korisni rad je razlika između njih,

$$W = W_1 - W_2$$

Ciklični proces u pV dijagramu



Poljoprivredo-prehrambeni fakultet
Sarajevo

8

Ciklični procesi toplotnih mašina

Jasno je da je korisni rad veći kada je površina ciklične konture veća, to jest, kada je kompresiona linija **BnA** mnogo niža od ekspanzione linije **AmB**.

Razmatrani ciklus, u kojem proces teče u smjeru kazaljke na satu, zove se **direktni (desnokretni) ciklus**. On je zajednički za sve toplotne mašine.

U **inverznom (ljevokretnom) ciklusu** (ne treba ga miješati sa reverzibilnim ciklusom), proces se odvija u suprotnom smjeru kazaljke na satu. **Inverzni ciklus je tipičan za rashladne mašine.**

Toplotna efikasnost ciklusa

Za kontinuiran rad mašine (aparata) za **transformaciju toplote u mehanički rad**, bitno je imati **toplotni izvor** koji će davati toplotu Q_1 mašini i **hladnjak** za apsorbovanje toplote Q_2 . Onda je moguće transformisati količinu toplote $Q = Q_1 - Q_2$ u mehanički rad. Problem je transformisati što je moguće više toplote u rad.

Prema prvom zakonu termodinamike,

$$Q_1 - Q_2 = \Delta U + W$$

Međutim u cikličnim procesima, prirast unutrašnje energije $\Delta U=0$, jer radno tijelo se vraća u početno stanje na kraju ciklusa ($\Delta T=0$). Iz tog razloga

$$Q_1 - Q_2 = W$$

Toplotna efikasnost ciklusa

Odnos toplote pretvorene u rad W i toplote Q_1 dovedene u ciklusu zove se **toplotna efikasnost**

$$\eta_t = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad \text{ili} \quad \eta_t = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Toplotna efikasnost ciklusa je mjera iskorištenja toplote u procesu.

Pri većoj efikasnosti veći dio dovedene toplote radnom mediju je pretvoren u koristan rad – **ciklus je savršeniji**. Ako bi bilo moguće izvršiti zatvoreni ciklus duž krive **AmBbaA** (slika) količina izgubljene toplote Q_2 u ovakvom ciklusu bi bila **nula** i njegova efikasnost bi bila jedinica ($Q_2=0$, $\eta_t=1$).

Ovakav ciklus je praktično neizvodljiv, jer bi se proces izvodio duž linije na temperaturi apsolutne nule (-273.15 K), što je praktično nemoguće u mašinama. Onda je jasno da je uvijek $\eta_t < 1$.

Carnotov ciklus

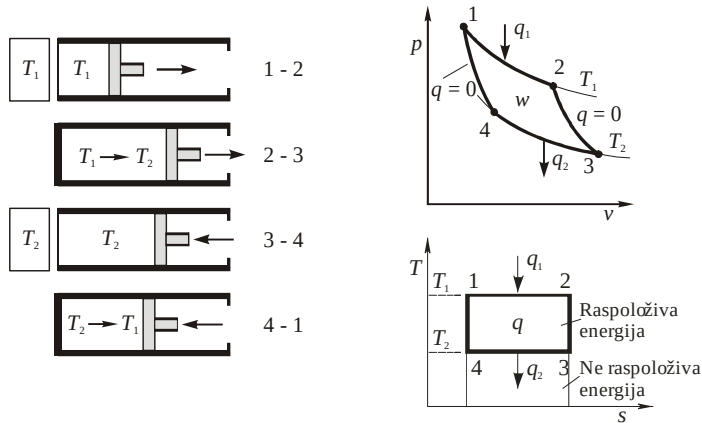
Među idealnim ciklusima **najsavršeniji je Carnotov ciklus** koji je predložio 1824 Sadi Carnot i nazvan je po njemu.

Carnotov ciklus je reverzibilan i uključuje **dva izotermička** i **dva adijabatska procesa**.

Neka je sistem (idealni gas) zatvoren u cilindar čiji su zidovi i klip **savršeno izolovani**. **Dno cilindra je naizmjenično** (zavisno od pojedinog procesa) **izolovano** od vanjskog medija ili je u vezi ili sa izvorom toplote na temperaturi T_1 ili sa ponorom toplote (**hladnjakom**) na temperaturi T_2 koja je manja od T_1 ($T_2 < T_1$). Carnotov ciklus je prikazan grafički na slici. Početno stanje sistema je određeno tačkom, sa parametrima p_1 , v_1 i T_1 . Analizirajmo četiri procesa koji čine Carnotov ciklus.

1. **izotermalna ekspanzija.**
2. **adijabatska ekspanzija.**
3. **izotermička kompresija.**
4. **adijabatska kompresija.**

Carnotov ciklus



Carnotov ciklus u p - v i T - s dijagramu. Za ovaj ciklus sva razmijenjena toplota i rad su reverzibilni.

Prvi proces: izotermalna ekspanzija. Dno cilindra je u toplotnom kontaktu sa toplotnim izvorom, **sl. a**. Sistemu se dovodi toplota q_1 (po 1 kg gasa) i ekspandira izotermički **duž linije 1-2**; u ovom procesu on vrši rad ($w>0$) uslijed dovedene toplote iz vana. (Poznato je da vrući izvor (vruća ploča) mora biti u stvarnosti na temperaturi većoj za dT od temperature T_1 da bi se odvijao prenos toplote. Smatramo da je ova razlika tako blizu nuli da se može ignorisati.) U tački **2 uklanja se izvor toplote i sistem se termički izoluje** (dno cilindra se pokriva idealnim toplotnim izolatorom).

Drugi proces: adijabatska ekspanzija. Gas ekspandira **duž linije 2-3** bez razmjene toplote sa okolinom, klip se kreće naprijed, a gas vrši rad ($w>0$) uslijed svoje unutrašnje energije. U ovom procesu temperatura i pritisak opadaju. Klip se prestaje kretati u tački 3 kad temperatura sistema opadne do temperature hladnjaka T_2 . Poslije toga cilindar se dovodi u toplotni kontakt sa hladnjakom i počinje treći proces.

Treći proces: izotermička kompresija. Klip se vraća u svoj početni položaj tako sporo da gas ostaje na temperaturi hladnjaka. Na gas djeluju vanjske sile koje vrše određenu količinu rada ($w < 0$), njegova zapremina opada, temperatura ostaje konstantna i pritisak raste. Kad dostigne tačku 4 sistem se termički izoluje.

Četvrti proces: adijabatska kompresija. Komprimiranje gasa vanjskim silama se dalje nastavlja, ali sada bez razmjene toplote. Zapremina gasa opada, a njegova temperatura i pritisak rastu. Kad temperatura gasa postigne temperaturu toplog izvora T_1 završava se komprimiranje gasa i Carnotov ciklus je završen.

Prema tome, Carnotov ciklus je predstavljen zatvorenim krivom 12341. Izvršeni rad w (po 1kg gasa) je numerički jednak površini zatvorenoj između tih krivih, sl. b. U T - s dijagramu, sl. c, površina 12341 je numerički jednaka količini toplote q (po 1 kg) pretvorene u korisni rad Carnotova ciklusa. Površine u ova dva dijagrama moraju biti jednake jedna drugoj.

Toplotna efikasnost Carnotova ciklusa se određuje jednačinom

$$dq = Tds, \text{ ili } dQ = TdS; T = T_1 = \text{const.}; Q_1 = \int TdS = T_1 \int dS = T_1(S_2 - S_1)$$

$$Q_1 = T_1(S_2 - S_1) = T_1 \Delta S \quad Q_2 = T_2(S_2 - S_1) = T_2 \Delta S$$

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2 \Delta S_2}{T_1 \Delta S_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad \eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Slijedi iz ove relacije:

1. toplotna efikasnost Carnotova ciklusa je nezavisna od svojstava radnog medija i određuje se samo pomoću apsolutnih temperatura T_1 i T_2 (Carnotova teorema);
2. toplotna efikasnost Carnotova ciklusa raste sa rastom T_1 i opada sa opadanjem T_2 ;
3. toplotna efikasnost Carnotova ciklusa je uvijek manja od jedan, ona bi bila jedan samo pri $T_2=0$ ili $T_1=\infty$, što je nemoguće u idealnim ciklusima.

Carnotov ciklus je standardni (etalonski) ciklus kojem realni ciklusi toplotnih mašina moraju da se približe što je moguće bliže.

U namjeri povećanja toplotne efikasnosti η_c Carnotova ciklusa bitno je povećati koliko je moguće temperaturnu razliku između izvora toplote i hladnjaka.

Pod realnim uslovima, ovo se postiže povećanjem temperature radnog medija na početku ciklusa i njenim smanjenjem na kraju ciklusa.

Realna toplotna mašina je savršenija što je njena efikasnost bliže toplotnoj efikasnosti Carnotovog ciklusa koji se vrši u istom temperaturnom opsegu.

Toplotna efikasnost Carnotova ciklusa

Jednačina za toplotnu efikasnosti η_c se može izvesti na osnovu slijedećeg razmatranja.

U potpuno reverzibilnom ciklusu mora se toplota prenositi na (skoro) $T=\text{const}$. Ovo ima za posljedicu da se toplota mora dovoditi na temperaturi T_1 a odvoditi na temperaturi T_2 . (Poznato je da vrući izvor, vruća ploča, mora biti u stvarnosti na temperaturi većoj za dT od temperature T_1 da bi se odvijao prenos toplote.)

Proces 1–2

Neka je u cilindru idealni gas. Za izotermičku ekspanziju, proces 1–2, opterećenje klipa je pažljivo odabrano tako da postoji balans toplote i rada (tako da je $\Delta u = c_v \Delta T = 0$, jer je $\Delta T = 0$). Prvi zakon termodinamike za ovaj dio ciklusa je

$$dq = dw$$

$$dq = p dv$$

koristeći zakon idealnog gasa $p = R_m T_1 / v$

$$q_1 = \int_1^2 p dv = R_m T_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$$

U procesu 2-3 ostvaruje se sporo kretanje klipa bez razmjene toplote, adijabatska ekspanzija. Ponovo je razmjena rada reverzibilna. Prvi zakon za ovaj proces je $dq = 0$

$$dw = p dv = -du = -c_v dT$$

Ovdje, T nije konstantno i ukupni izvršeni rad je

$$w = c_v (T_1 - T_2)$$

Da bi našli oblik puta na p - v dijagramu, iskoristimo i zakon idealnog gasa.

$$p dv = \frac{R_m T}{v} dv = -c_v dT$$

Poljoprivredo-prehrambeni fakultet
Sarajevo

19

$$\text{Integriranjem, } \int_2^3 \frac{dv}{v} = -\frac{c_v}{R_m} \int_2^3 \frac{dT}{T} \Rightarrow \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{c_v/R_m} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{c_v/R_m} = \frac{v_2}{v_3}$$

Primjenom zakona idealnog gasa, ovo se može napisati kao

$$\frac{p_3}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_3} \right)^{(R_m/c_v)+1}$$

Gas je sada ekspandirao do svoje najveće vrijednosti v i izvršio rad za oba procesa 1-2 i 2-3. Da bi kompletirali jedan ciklus obrnućemo sve procese, izvršiti kompresiju izotermički, sa prenosom toplote od sistema hladnoj ploči na temperaturi T_2 i onda dalje komprimirati gas adijabatski, dok ne dostigne svoje konačno stanje.

Poljoprivredo-prehrambeni fakultet
Sarajevo

20

Izotermičko odvođenje toplote je,

$$q_2 = R_m T_2 \ln \frac{v_4}{v_3} \quad \text{ili} \quad q_2 = -R_m T_2 \ln \frac{v_3}{v_4}$$

za adijabatsku kompresiju

$$\left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{c_v/R_m} = \frac{v_4}{v_1} \quad \text{ili} \quad \frac{p_1}{p_4} = \left(\frac{v_4}{v_1} \right)^{(R_m/c_v)+1}$$

Kako smo dobili ranije $(T_2/T_1)^{c_v/R_m} = v_2/v_3$

$$v_1/v_4 = v_2/v_3 \quad \text{ili} \quad v_2/v_1 = v_3/v_4$$

Dijeljenjem q_2 sa q_1

$$\frac{|q_2|}{|q_1|} = \frac{T_2}{T_1}$$

Efikasnost ciklusa je, $\eta_t = \frac{w_{\text{net}}}{q_1}$

Prvi zakon za ciklus je $\sum q = \sum w$ ili $\sum w \equiv w_{\text{net}} = \sum q = (|q_1| - |q_2|)$

Kako je $|q_1| > |q_2|$, neto rad će biti **pozitivan**. Prema našoj konvenciji o znaku, ovo znači da je neto rad izvršen na okolinu (**odveden rad**), kao što mora i biti

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1}$$

Pošto je za Carnot ciklus $|q_2|/|q_1| = T_2/T_1$

$$\eta_{t, \text{Carnot}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Sušтина drugog zakona termodinamike

Jednačina stanja idealnog gasa i prvi zakon termodinamike, nisu dovoljni za procjenu toka nekog procesa i relacije toplote pretvorene u rad naspram ukupne toplote koja je dovedena procesu.

Drugi zakon termodinamike utvrđuje uslove pod kojima se dešava transformacija jedne vrste energije u drugu.

On daje određene kvantitativne odnose za procese spontane propagacije toplote u tijelima.

Drugi zakon termodinamike ima veliki broj iskaza, ali slijedeća tri su izgleda najpogodija:

1. Za transformaciju toplote u mehanički rad bitno je imati izvor toplote na određenoj temperaturi i ponor toplote (hladnjak) na nižoj temperaturi, to jest, bitno je imati temperaturni gradijent (razliku temperatura);
2. Ukupna dovedena toplota mašini ne može se transformisati potpuno u rad, nego dio te toplote prelazi na vanjsko tijelo;
3. Toplota ne može prelaziti sama od sebe od hladnijeg tijela na toplije bez utroška vanjskog rada.

Poljoprivredo-prehrambeni fakultet
Sarajevo

23

Primjer

U proizvoljnom ciklusu radni medij potroši 2500 J toplote i izvrši koristan rad od 780 J. Odrediti toplotnu efikasnost ciklusa.

Rješenje

Toplotna efikasnost može se naći iz relacije

$$\eta_t = \frac{W}{Q_1} = \frac{780}{2500} = 0.312$$

Prema tome, koristan rad sadrži 31.2% ukupne dovedene toplote radnom mediju, a ostala toplota, 68.8% se preda hladnjaku.

Poljoprivredo-prehrambeni fakultet
Sarajevo

24

Fizikalna interpretacija entropije

Nije dovoljno u diskutovanju entropije razmatrati je samo kao matematički parametar. Potrebno je razjasniti **važnost entropije** i njeno kontinuirano stvaranje u ireverzibilnim procesima.

Kad se određen iznos toplote Q dovede ciklusu, samo dio toplote je **raspoloživ za rad**. Ovaj dio se zove **raspoloživa energija**. Razmotrimo reverzibilni **energetski** (dobija se rad) **ciklus** koji radi između dva svoja izvora toplote, neka je jedan na niskoj temperaturi T_0 a drugi na visokoj temperaturi T . Prema tome, na osnovu zakona održanja energije, raspoloživa energija je data sa

$$W \leq Q - Q_0$$

gdje je Q_0 odvedena toplota hladnom izvoru. U **reverzibilnom procesu se primjenjuje znak jednakosti**, a u **ireverzibilnom vrijedi znak nejednakosti**.

Odnos rada W i toplote Q naziva se **toplotni koeficijent korisnog djelovanja** ili jednostavno **efikasnost**,

$$\eta_t = \frac{W}{Q}$$

Carnot je dokazao da maksimalna efikasnost idealnog toplotnog motora u uslovima konstantnih temperatura T i T_0 je

$$\eta_t = 1 - \frac{T_0}{T}$$

Dobijeni **rad** je jednak **proizvodu efikasnosti i dovedene toplote**. Tako, raspoloživa energija je

$$W \leq \eta_t Q \quad W \leq Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad W \leq Q - T_0 \left(\frac{Q}{T} \right) \quad W \leq Q - T_0 \Delta S$$

ΔS – porast entropije

Kad se toplota Q preda reverzibilno mašini, jedan dio energije je **ne raspoloživ za rad**.

Ovo iznosi $Q(T_0/T)$. Dok Q/T predstavlja porast entropije u reverzibilnom procesu. Prema tome,

$$W \leq Q - T_0 \Delta S$$

$$\text{ne raspoloživi rad} = T_0 \Delta S$$

Kad se **ireverzibilnost** dešava u procesu, entropija sistema raste i onda je manje energije na raspolaganju za rad.

Ovo znači da se **promjena entropije može koristiti** da opiše kvantitativno svaku promjenu iznosa raspoložive energije.

Entropija je tako vezana sa **disperzijom ili degradacijom energije** u oblike koji se teško mogu koristiti za proizvodnju rada.

Razmotrimo prelaz određene količine toplote Q od toplog izvora na T prema drugom na T_0 .

Maksimalno raspoloživa energija prije procesa prelaza toplote je $Q(1-T_0/T)$, gdje je T_0 temperatura okoline na koju se toplota može predati.

Poslije procesa prelaza toplote na hladni izvor, maksimalno raspoloživa energija je samo $Q(1-T_0/T)$. Razlika sadrži disperziju energije u manje koristan oblik za proizvodnju rada.

Postoji tendencija za sve fizikalne sisteme da **teže stanjima u kojima postaju manje uređeni**. Ovo sugerše da se entropija **može smatrati mjerom nereda sistema**, ili slučajnosti kretanja mikroskopskih čestica.

Razmotrimo prenos toplote na homogeni sistem.

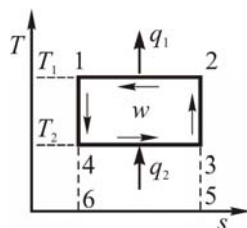
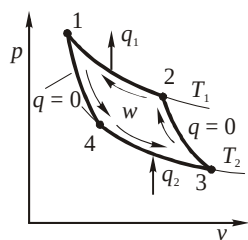
Kako temperatura raste, molekule sistema se kreću na mnogo raznovrsnih načina pri različitim **vibracionim, rotacionim, translacionim, elektronskim** i drugim načinima.

Obrnuto, **prenos toplote od sistema smanjuje nered molekula**, iako ekvivalentan iznos nereda, ili veći nered, rezultira u okolini.

Molekularni nered svijeta stoga kontinuirano raste zbog ireverzibilnih procesa prirode tako da **drugi zakon termodinamike** se nekad zove **zakon porasta nereda**.

Reverzni rashladni ciklus

Carnotov ciklus se može vršiti i obrnuto (**reverzno**), slika. Iz početne tačke 1 radni medij ekspandira po **adijabati 1-4** bez prenosa toplote između medija i okoline, a temperatura pada od T_1 do T_2 . Onda po izotermi 4-3 gas nastavlja da ekspandira sa dovođenjem toplote q_2 mediju od izvora toplote koji je na temperaturi T_2 . Dalje se radni medij **komprimira adijabatski duž linije 3-2** uzrokujući porast temperature radnog medija od T_1 do T_2 . Konačan proces ciklusa sadrži **izotermičku kompresiju radnog medija duž linije 2-1** u toku kojeg toplota q_1 se prenosi na izvor više temperature.



Reverzni (desnokretni)
Carnotov ciklus

Poljoprivredo-prehrambeni fakultet
Sarajevo

29

Reverzni rashladni ciklus

Iz reverznog ciklusa se vidi da je utrošeni vanjski **rad komresije veći od rada ekspanzije** za veličinu koja odgovara površini 14321 unutar zatvorene linije ciklusa. Ovaj rad se pretvara u toplotu i prenosi se zajedno sa toplotom q_2 **izvoru toplote na T_1** . Tako je rad w potrošen da se realizuje reverzni ciklus, i moguće je **prenositi toplotu q_2 od hladnijeg na topliji izvor**, to jest, moguće je prenositi toplotu izvoru koji je **na višoj temperaturi**

$$q_1 = q_2 + w$$

Mašina koja radi po **reverznom ciklusu zove se rashladna mašina**.

Razmatrajući reverzni Carnotov ciklus možemo zaključiti, da po drugom zakonu termodinamike toplota se ne može spontano prenositi bez utroška energije od ponora do izvora toplote (sa niže na višu temperaturu (potrebna je kompenzacija da bi se ostvario prenos toplote)).

Poljoprivredo-prehrambeni fakultet
Sarajevo

30

Reverzni rashladni ciklus

Efikasnost rashladne mašine se karakteriše *faktorom hlađenja* ili *koeficijentom učinka*

$$\varepsilon = \frac{q_2}{w} = \frac{q_2}{q_1 - q_2}$$

za reverzibilni Carnot ciklus

$$\varepsilon = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Faktor hlađenja reverznog Carnotova ciklusa zavisi od *apsolutnih temperatura T_2 i T_1 toplotnih izvora*, *on je veći od faktora hlađenja drugih ciklusa koji se dešavaju u istom temperaturnom intervalu.*

Reverzni rashladni ciklus

Clausius je pokazao da su svi prirodni procesi spontani procesi (oni se nekad zovu *pozitivni*, ili *bez kompenzacijski procesi*) i oni ne mogu sami po sebi, bez kompenzacije se odvijati u reverznom smjeru.

Spontani procesi uključuju: prenos toplote od tijela više temperature na tijelo niže temperature; konverziju rada u toplotu; uzajamnu difuziju fluida; ekspanziju gasa u vakuum, i tako dalje.

Nespontani procesi uključuju procese reverzne prirode, kao što su procesi prenos toplote od tijela niže temperature na tijelo više temperature; konverzija toplote u rad; separacija uzajamno difundirajućih supstanci u komponente, i slično.

Nespontani procesi su mogući, ali nikad se ne dešavaju sami po sebi bez kompenzacije. Kad nespontani proces sadrži konverziju toplote u rad, onda istovremeno sa hlađenjem izvora više temperature dešava se promjena termodinamičkog stanja jednog ili više tijela. U termodinamici ova promjena se zove *kompenzacija za konverziju toplote u rad.*

Primjer

Primjer 1

Carnotov energetski ciklus koji koristi **vazduh** kao radni fluid ima **toplotnu efikasnost od 40%**. Na početku izotermičke ekspanzije pritisak je **620 kPa**, a specifična zapremina vazduha je **0.1 m³/kg**. Ako se ciklusu dovodi **50 kJ/kg**, odrediti:

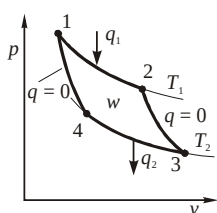
a) najvišu i najnižu temperaturu ciklusa

b) rad i toplotu po jedinici mase za svaki proces ciklusa.

Smatrati da se vazduh ponaša kao idealan gas sa konstantnim specifičnim toplotama. Gasna konstanta vazduha $R_m = 0.287 \text{ kJ/kg K}$.

Rješenje

a) prema slici, najviša temperatura ciklusa T_1 se može odrediti iz zakona idealnog gasa



$$T_1 = \frac{p_1 v_1}{R_m} = \frac{(620 \text{ kPa}) \cdot (0.1 \text{ m}^3/\text{kg})}{0.287 \text{ kJ/kg K}} = 216.028 \text{ K}$$

Poljoprivredo-prehrambeni fakultet
Sarajevo

33

Toplotna efikasnost Carnotova ciklusa je

$$\eta_{\text{th}} = \frac{w}{q_{1-2}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Zadato je $\eta_{\text{th}} = 0.4 = (w/q_{1-2})$

$$w = \eta_{\text{th}} q_{1-2} = 0.4 \cdot 50 = 20 \text{ kJ/kg}, \quad q_{3-4} = q_1 - w = 50 - 20 = 30 \text{ kJ/kg}$$

Takođe,

$$0.4 = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{216.028}$$

$$T_2 = 129.617 \text{ K}$$

Poljoprivredo-prehrambeni fakultet
Sarajevo

34

b) Prvi zakon primijenjen na različite procese daje

Proces 1-2, **izotermički proces**, $\Delta u=0$:

$$q_{1-2} = w_{1-2} = 50 \text{ kJ/kg}$$

Proces 2-3, **adijabatski proces**, $q_{2-3}=0$:

$$c_v = \frac{1}{\kappa - 1} R_m \quad c_v = \frac{1}{1.4 - 1} 0.287 \text{ kJ/kgK} = 0.7165 \text{ kJ/kgK}$$

$$q_{2-3} = 0 \quad \text{i} \quad 0 = w_{2-3} - (u_3 - u_2);$$

$$w_{2-3} = c_v(T_3 - T_2) = 0.7165 \text{ kJ/kg K} (129.617 - 216.028) \text{ K}$$

$$w_{2-3} = -61.914 \text{ kJ/kg}$$

Poljoprivredo-prehrambeni fakultet
Sarajevo

35

Proces 3-4, **izotermički proces**, $\Delta u=0$:

$$q_{3-4} = w_{3-4} = 30 \text{ kJ/kg}$$

Proces 4-1, **adijabatski proces**, $q_{2-3}=0$

$$q_{4-1} = 0 \quad 0 = w_{4-1} + (u_1 - u_4)$$

$$w_{4-1} = -(u_1 - u_4) = c_v(T_1 - T_4)$$

$$= -(0.7165 \text{ kJ/kg K})(86.411 \text{ K}) = -61.914 \text{ kJ/kg}$$

Primjer 2

Odrediti koeficijent **učinka rashladnog ciklusa** kad bi ciklus iz predhodnog primjera bio reverzan.

Rješenje

$$\varepsilon = \frac{q_2}{w} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{129.617}{216.028 - 129.617} = 1.5$$

Poljoprivredo-prehrambeni fakultet
Sarajevo

36