

UDK 620.92

Izkoristimo anergijo

ANTON URANKAR

1. SPLOŠNO O ENERGIJSKIH PROCESIH

Za energijske tokove in procese s toploto velja-
jo prvi in drugi glavni zakon termodinamike ter
zakon o ohranitvi mase.

Prvi glavni zakon termodinamike povezuje pri
odprtih procesih toploto Q , entalpijo H in tehnično
delo W

$$dQ = dH + dW \quad (1)$$

To je zakon o ohranitvi energije.

Drugi glavni zakon termodinamike podaja po-
goje za preoblikovanje notranje energije snovi
v tehnično delo. Iz notranje energije snovi z ental-
pijo H in entropijo S dobimo največje tehnično
delo — eksergijo E , če stanje snovi povračljivo
izenačimo s stanjem okolice s temperaturo T_0 in
tlakom p_0 in dobimo stanje snovi H_0 in S_0 . Ekser-
gija je enaka vrednosti izraza

$$E = H - H_0 - T_0 (S - S_0) \quad (2)$$

Posledica tega naravnega zakona je, da moramo
v krožnem procesu za pridobivanje tehničnega dela
del notranje energije kot toploto odvesti v okolico.
Tehnično delo z vrednostjo eksergije pridobimo, če
je krožni proces v vseh delih povračljiv. Odvedena
toplota je takrat enaka vrednosti izraza $T_0 (S - S_0)$,
ki jo imenujemo anergijo. Njena eksergija je ena-
ka 0. Anergije za pridobitev tehničnega dela ne
moremo izrabiti.

Vsi tehnični procesi so nepovračljivi, zato se
del eksergije vedno uniči. Za eksergijo ne velja
zakon o ohranitvi. Zaradi nepovračljivosti odvede-
mo uničeni del eksergije kot toploto v okolico. Iz-
gubljena eksergija povečuje anergijski del energije.

Eksergija toplote Q s temperaturo T pri tem-
peraturi okolice T_0 je

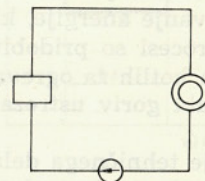
$$E = Q \frac{T - T_0}{T} \quad (3)$$

Delež eksergije v toploti raste s temperaturo.

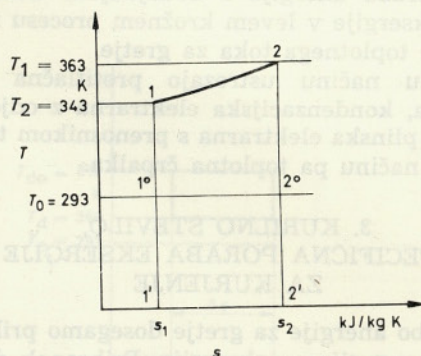
V tehničnih napravah pretvarjamo primarno
energijo goriv v notranjo energijo snovi, ki jo upo-
rabljamo za gretje ali za pridobitev tehničnega
dela, običajno v obliki električne energije. Popol-
nost teh naprav izražamo z energijskim in ekser-
gijskim izkoristkom. Za oceno popolnosti naprav,
ki pretvarjajo energijo goriv v tehnično delo, ustre-
za le eksergijski izkoristek [1].

2. PROCES GRETJA

Proces gretja teče v grelnih sistemih po izoba-
rah. Oglejmo si funkcijo $T = T(s)$ za ogrevanje
z vročevodnim kotlom in radiatorjem (sl. 1 in 2).



Slika 1



Slika 2

Gretje vode v kotlu poteka po izobari od 1 do
2, hlajenje vode v radiatorju pa od 2 do 1. Proces
gretja obravnavamo lahko kot krožni proces, pri
katerem dovajamo in odvajamo toploto po isti kri-
vulji, ki sta zato enaki, tehničnega dela pa ne pri-
dobimo. Voda prevzame v kotlu toplotni tok:

$$\dot{Q} = q_m (h_2 - h_1) \quad (4)$$

in ga v radiatorju v celoti odda. Ta izmenjava je
sorazmerna površini $122'1'1$. Energijske izgube pro-
cesa zanemarimo brez škode za pravilnost rezul-
tatov.

Očitno je, da za gretje lahko izkoriščamo ane-
rgijski tok

$$\dot{A} = q_m T_0 (s_2 - s_1) \quad (5)$$

vendar ne samega, ampak skupaj z eksergijskim
tokom

$$\dot{E} = q_m (e_2 - e_1) = q_m \int_1^2 T ds - \dot{A} \quad (6)$$

v toplotnem toku $\dot{Q}$

$$\dot{Q} = \dot{E} + \dot{A} \quad (7)$$

Eksergijski tok $\dot{E}$ je na sliki 2 sorazmeren po-
vršini $122'1'1$, anergijski pa površini $1'02'2'1'1$.

Uporabnost anergije za gretje je tista bistvena
razlika med procesom gretja in procesom za pridobitev
tehničnega dela, ki omogoča prihranek pri-
marne energije goriv.

Vsaka energija konča nazadnje kot anergija. Pomembno pa je, da njeno eksergijo najbolj racionalno izkoriščamo: za gretje izrabljamo anergijo z ustreznim deležem eksergije, z dragoceno eksergijo pa pridobivamo tehnično delo.

Skrajno neracionalno je uničevati dragoceno eksergijo za pridobivanje anergije, ki jo potrebujemo za gretje. Taki procesi so pridobivanje toplotnega toka iz goriv vseh kotlih za ogrevanje.

Racionalni izrabi goriv ustrezata naslednja postopka:

— pridobivanje tehničnega dela z desnim krožnim procesom in odvajanje toplote z eksergijo, ki jo potrebuje toplotni tok za gretje,

— uporaba anergije z dodajanjem tehničnega dela — eksergije v levem krožnem procesu za pridobivanje toplotnega toka za gretje.

Prvemu načinu ustrezajo protitlačna parna elektrarna, kondenzacijska elektrarna z odjemi za gretje ali plinska elektrarna s prenosnikom toplote, drugemu načinu pa toplotna črpalka.

3. KURILNO ŠTEVILO, SPECIFIČNA PORABA EKSERGIJE ZA KURJENJE

Z izrabo anergije za gretje dosegamo prihranek primarne energije — eksergije. Prihranek dosegamo le pri pridobivanju toplotnega toka za gretje, ne pa pri pridobivanju tehničnega dela — električne energije. Ta prihranek ne moremo ustrezno izraziti niti z energijskim niti z eksergijskim izkoristkom. Pravo vrednost prihranka pa pokaže *kurilno število* ξ [1] in [3]. To število je razmerje med proizvedeno toploto, toplotnim tokom na pragu in ustreznim eksergijskim tokom goriva

$$\xi = \frac{\Phi}{B e_G} \quad (8)$$

Kurilno število ξ pove torej, kolikšen toplotni tok dobimo na enoto eksergije goriv.

Čim večje je kurilno število ξ , tem večji je prihranek goriva.

Kurilno število ξ je odvisno od deleža eksergije v toplotnem toku, predvsem pa od vrste procesa za pridobivanje toplotnega toka za ogrevanje.

Zelo nazorno predstavo o racionalni izrabi goriv za ogrevanje daje tudi recipročna vrednost kurilnega števila $1/\xi$, ki jo imenujmo *specifična poraba eksergije za kurjenje*, pove pa, koliko eksergije goriv porabimo za enoto toplotnega toka.

4. DELEŽ EKSERGIJE GORIVA ZA TOPLOTNI TOK

PRI KOMBINIRANEM PRIDOBIVANJU ELEKTRIČNE IN TOPLOTNE ENERGIJE

Pri kombiniranem pridobivanju energije je potreben dogovor za delitev eksergije goriva na delež za električno energijo in delež za toplotno energijo.

Edina razumna in naravna delitev je v razmerju odvzetih eksergij iz krožnega procesa, saj anergija za pridobitev tehničnega dela ni uporabna. Takšna delitev pomeni, da toplotni tok za gretje obremenimo s tolikšnim deležem primarne energije goriv, ki nadomesti eksergijo za toplotni tok v drugem delovnem procesu.

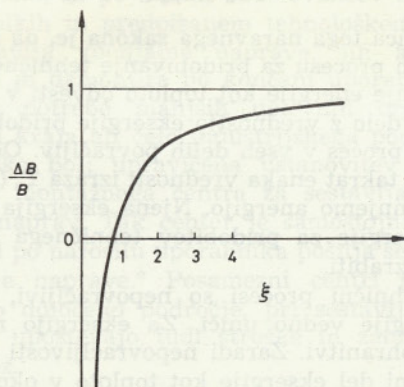
5. PRIHRANEK GORIVA

Preverimo naše ugotovitve z nekaterimi primeri. Ugotovimo pa najprej, kaj je prihranek goriva in v kakšni odvisnosti je od kurilnega števila.

Relativni prihranek goriva ugotovimo s primerjanjem sistema ogrevanja na slikah 1 in 2, za katerega velja, da je $\Phi = \eta_k B H_i$, pri čemer je η_k energijski izkoristek kotla. Relativni prihranek $\Delta B/B$ je podan s funkcijo

$$\frac{\Delta B}{B} = 1 - \frac{\eta_k}{\xi} \quad (9)$$

ki je narisana na sliki 3 in je del enakoosne hiperbole z asimptoto $\Delta B/B = 1$. V izračunih za ξ in ζ vzamemo $e_G = H_i$.



Slika 3

5.1. Vročevodni kotel

Oglejmo si najprej primerjalni model na slikah 1 in 2.

Energijski izkoristek je odvisen od vrste goriva in velikosti kotla, njegova vrednost je v mejah 0,72 do 0,91. Za naš račun vzamemo $\eta_k = 0,80$.

Eksergijski izkoristek določimo z izrazom

$$\xi = \frac{q_m (e_2 - e_1)}{B e_G} = \eta_k \frac{e_2 - e_1}{h_2 - h_1} = 0,136$$

Kurilno število je enako izkoristku kotla

$$\xi = \eta_k = 0,80$$

specifična poraba eksergije pa je

$$\frac{1}{\xi} = 1,25 \text{ J/J}$$

Prihranek goriva je

$$\frac{\Delta B}{B} = 0$$

5.2. Ogrevanje z električnim tokom

Vzamemo, da je toplotni tok enak električni moči $\Phi = P_{el}$, da je energijski izkoristek 1. Sistem ogrevanja je enak kakor v 5.1, le kotel nadomestimo z električnim grelnikom.

Eksergijski izkoristek je

$$\zeta = \frac{q_m (e_2 - e_1)}{P} = \frac{q_m (e_2 - e_1)}{q_m (h_2 - h_1)} = \frac{e_2 - e_1}{h_2 - h_1} = 0,17$$

Eksergijo $\Delta e = e_2 - e_1$ izkoristimo za prenos toplote.

Kurilno število določimo z izrazom (8)

$$\xi = \frac{\Phi}{B e_G} = \eta \frac{q_m (h_2 - h_1)}{q_m (h_2 - h_1)} = \eta = 0,40$$

η je energijski oziroma eksergijski izkoristek proizvodnje električne energije iz primarne energije goriv in ga vzamemo $\eta = 0,40$.

Specifična poraba eksergije je

$$\frac{1}{\xi} = 2,5 \text{ J/J}$$

Prihranek goriva je

$$\frac{\Delta B}{B} = -1$$

Prihranek goriva je negativen, poraba goriva se z električnim ogrevanjem poveča nasproti ogrevanju z vročevodnim kotlom z zgornjimi podatki za 100 odstotkov.

5.3. Carnotov krožni proces

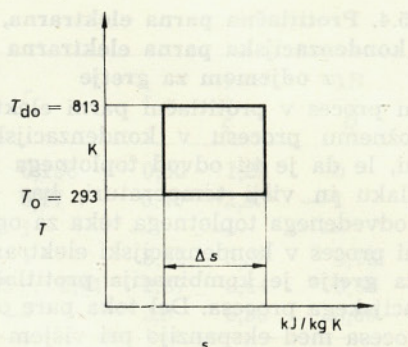
Izvedimo dva Carnotova krožna procesa, prvega med temperaturo $T_{d0} = 813 \text{ K}$ (540°C) in temperaturo okolice $T_0 = 293 \text{ K}$ (20°C) in drugega med temperaturama $T_{d0} = 813 \text{ K}$ in $T_{od} = 363 \text{ K}$ (90°C) (sl. 4 in 5). Odvedeni toplotni tok pri drugem procesu $\Phi_{od} = q_m T_{od} \Delta s$ z eksergijskim tokom $\dot{E} = q_m (T_{od} - T_0) \Delta s$ uporabimo za gretje. Predpostavimo, da dovedemo v proces toplotni tok z energijskim izkoristkom 1, kar pomeni:

$$\Phi_{d0} = q_m T_{d0} \Delta s = B H_i \quad (10)$$

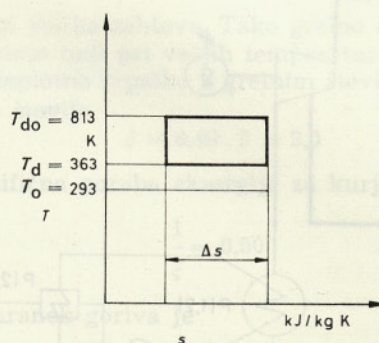
Določimo za ta dva procesa energijski in eksergijski izkoristek ter kurilno število!

$$\eta = \frac{q_m (T_{d0} - T_0) \Delta s}{B H_i} = \frac{T_{d0} - T_0}{T_{d0}} = 0,64$$

$$\zeta = 1$$



Slika 4



Slika 5

Energijske izgube nastanejo v krožnem procesu zaradi odvoda anergijskega toka $\dot{A} = q_m T_0 \Delta s$, eksergijskih izgub pa v krožnem procesu ni, nastanejo zunaj krožnega procesa zaradi nepovračljivosti zgorevanja in prenosa toplote.

V drugem procesu je energijski izkoristek 1, saj energijo izkoristimo za gretje, eksergijski izkoristek ostane enak kakor pri prvem procesu, kurilno število pa je — v skladu z delitvijo navedeno v točki 4 — enako:

$$\xi = \frac{T_{od} (T_{d0} - T_0)}{T_{d0} (T_{od} - T_0)} = 3,32$$

Specifična poraba eksergije je

$$\frac{1}{\xi} = 0,30 \text{ J/J}$$

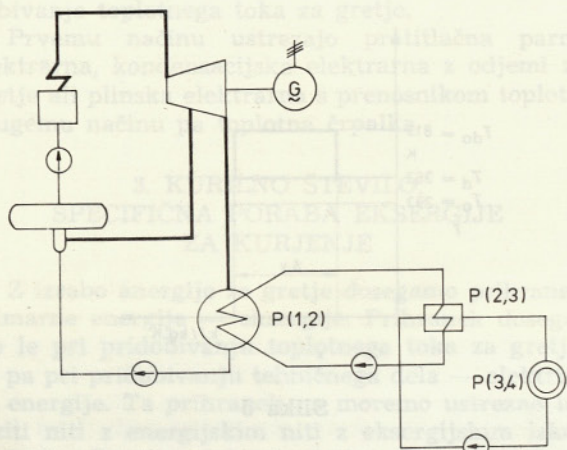
Prihranek goriva je

$$\frac{\Delta B}{B} = 0,76$$

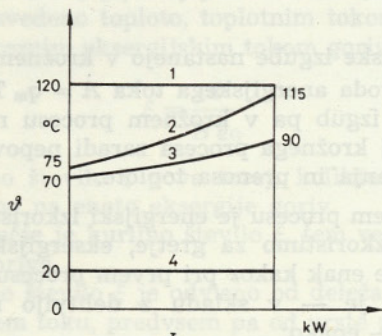
5.4. Protitlačna parna elektrarna, kondenzacijska parna elektrarna z odjemom za gretje

Krožni proces v protitlačni parni elektrarni je enak krožnemu procesu v kondenzacijski parni elektrarni, le da je tu odvod toplotnega toka pri višjem tlaku in višji temperaturi, kar omogoča uporabo odvedenega toplotnega toka za ogrevanje.

Krožni proces v kondenzacijski elektrarni z odjemom za gretje je kombinacija protitlačnega in kondenzacijskega procesa. Del toka pare odvzamemo iz procesa med ekspanzijo pri višjem tlaku in ga uporabljamo za gretje — protitlačni proces, drugi del pa ekspandira do kondenzatorskega tlaka in v kondenzatorju kondenzira — kondenzacijski proces.



Slika 6



Slika 7

Na sliki 6 je načelna shema ogrevanja iz protitlačne elektrarne. Sistem ogrevanja je enak tudi za ogrevanje z odjemom iz kondenzacijske elektrarne. Slika 7 prikazuje temperaturne karakteristike toplotnih tokov. Prenosniki toplote so na sliki 6 označeni z označbami ustreznih temperaturnih karakteristik. Prenosnik P (3,4) je radiator.

Da bo mogoča primerjava med posameznimi vrstami elektrarn, navajam izkoristke najprej za kondenzacijsko parno elektrarno. Energijski in hkrati tudi eksergijski izkoristek sta podana z enačbo

$$\eta = \zeta = \frac{P_{e1}}{B H_i} \quad (11)$$

pri čemer je P_{e1} električna moč na pragu, $B H_i$ pa energija oziroma eksergija goriva. Izkoristka sta v mejah od 0,25 do 0,41. Močno se razlikujeta za posamezne dele procesa. V razpredelnici navajam njune vrednosti ločeno za kotel (zgorevanje, dovod toplote v krožni proces) in ločeno za turboagregat (krožni proces in odvod toplote).

Razpredelnica 1

	Kotel	Turboagregat	Skupaj
η	0,83 do 0,91	0,30 do 0,45	0,25 do 0,41
ζ	0,45 do 0,55	0,56 do 0,75	0,25 do 0,41

Energijo goriva izgublamo predvsem s toplotnim tokom dimnih plinov in s toplotnim tokom hladilne vode, eksergijo pa uničimo z nepovračljivostmi procesa (zgorevanje, dovod toplote v krožni proces), ali pa jo z energijo odvajamo v okolico.

Energijski izkoristek protitlačne elektrarne je podan z izrazom

$$\eta = \frac{P_{e1} + \Phi}{B H_i} \quad (12)$$

kjer je Φ toplotni tok za ogrevanje. Energijski izkoristek se bistveno poveča, ker izrabljamo anergijo. Doseže vrednosti 0,70 do 0,85.

Eksergijski izkoristek je enak

$$\zeta = \frac{P_{e1} + \Delta \dot{E}}{B e_g} \quad (13)$$

pri čemer je $\Delta \dot{E}$ povečanje eksergije toplotnega toka v prenosniku P (1, 2). Eksergijski izkoristek se bistveno ne spreminja in ostaja v mejah eksergijskega oziroma energijskega izkoristka kondenzacijske elektrarne.

Energijski izkoristek kondenzacijske elektrarne z odjemom je nekje vmes med energijskim izkoristkom kondenzacijske in protitlačne elektrarne, odvisno od moči odjema.

Kurilno število je neodvisno od vrste procesa. Tako pri protitlačnem procesu kakor tudi pri kondenzacijskem z odjemom za ogrevanje je kurilno število odvisno le od parametrov pare za ogrevanje.

Kurilno število določimo za protitlačni proces na slikah 6 in 7. Para je suha s tlakom 2 bara.

Z upoštevanjem enačbe (8) in dogovora v točki 4 je kurilno število

$$\xi = \frac{h'' - h'}{\Delta h_d'' - \Delta h_d'} \cdot \frac{\eta}{\eta_i \eta_m \eta_g} \cdot \frac{P_g}{P_{e1}} = \frac{1}{0,93} \cdot \frac{2706 - 504,7}{552,3 - 46,9} \cdot \frac{0,40}{0,85 \cdot 0,985 \cdot 0,985} = 2,27$$

Razpredelnica 2

	η	ζ	ξ	$\frac{1}{\xi}$	$\frac{\Delta B}{B}$
1. Vročevodni kotel	0,80	0,136	0,80	1,25	0
2. Električni grelnik	1	0,17	0,40	2,5	— 1
3. Carnotov krožni proces (T_0)	0,64	1	—	—	—
4. Carnotov krožni proces (T_{od})	1	1	3,32	0,30	0,76
5. Protitlačna parna elektrarna	0,70 ... 0,85	0,25 ... 0,41	2,27	0,44	0,65
6. Toplotna črpalka, $\varepsilon = 5$	—	—	2,0	0,50	0,60

Označbe pomenijo:

h'', h' — entalpijo suhe pare, vrele vode (kJ/kg)

$\Delta h_d'', \Delta h_d'$ — razpoložljiv padec entalpije suhe pare, vrele vode (kJ/kg)

$\eta, \eta_i, \eta_m, \eta_g$ — izkoristke: celotni, notranji, mehanski, generatorjev

$\frac{P_{el}}{P_g}$ — razmerje moči na pragu elektrarne in na generatorju

Specifična poraba eksergije je

$$\frac{1}{\xi} = 0,44 \text{ J/J}$$

Tako ogrevanje omogoča relativni prihranek goriva

$$\frac{\Delta B}{B} = 0,65$$

5.5. Toplotna črpalka

S toplotno črpalko pridobivamo toplotni tok za ogrevanje, tako da v levi krožni proces dovajamo iz okolice toploto — energijo, dodamo tehnično delo — eksergijo in odvedemo toplotni tok pri višji temperaturi.

Pomemben podatek za toplotno črpalko je grelno število ε , ki pove kolikšen toplotni tok dobimo za enoto eksergijskega toka

$$\varepsilon = \frac{\Phi}{P} \quad (14)$$

Grelno število je tem večje, čim manjše so temperaturne razlike in je v mejah od 2 do 8 [5].

Kurilno število določimo z grelnim številom

$$\xi = \frac{\Phi}{B_{eg}} = \eta \frac{\Phi}{P} = \eta \varepsilon$$

Če hočemo s toplotno črpalko doseči prihranek goriva, mora biti njeno kurilno število večje od kurilnega števila našega primerjalnega modela, vročevodnega kotla, torej večje od 0,80

$$\xi = \eta \varepsilon > 0,80$$

Grelno število take toplotne črpalke mora biti

$$\varepsilon > 2$$

To ni velika zahteva. Tako grelno število lahko zagotovimo tudi pri večjih temperaturnih razlikah.

Za toplotno črpalko z grelnim številom $\varepsilon = 5$ je kurilno število

$$\xi = 0,40 \cdot 5 = 2,0$$

in specifična poraba eksergije za kurjenje

$$\frac{1}{\xi} = 0,50$$

Prihranek goriva je

$$\frac{\Delta B}{B} = 0,60$$

6. SKLEP

V razpredelnici 2 so zbrani rezultati primerjave obravnavanih sistemov ogrevanja. Iz tabele lahko povzamemo, da izkoriščanje energije za ogrevanje omogoča velik prihranek pri gorivu, predvsem v kombinirani proizvodnji. Nujna so prizadevanja, da izkoriščamo toliko energije, kolikor to dopušča pogoji za kombinirano proizvodnjo in pogoji daljinskega prenosa toplotne energije. Izraba energije ne pomeni samo prihranka goriva, ampak zmanjšuje tudi onesnaženje okolja, tako z dimnimi plini kakor tudi z odvedeno toploto.

Primerjava pa tudi upravičuje definicijo kurilnega števila oziroma specifične porabe eksergije za kurjenje, saj v termodinamičnem pomenu v celoti podaja gospodarnost uporabe primarnih goriv za ogrevanje.

LITERATURA

- [1] Z. Rant: Termodinamika, 1963.
- [2] B. Kraut: Strojniški priročnik, 1976
- [3] H. D. Baehr: Zur Thermodynamik des Heizens. Brennstoff — Wärme — Kraft 32 (1980) Nr. 1, 2.
- [4] Wolfgang Burkhardt: Wirtschaftliche Energienutzung durch Fernwärme HLH 28 (1977) Nr. 10.
- [5] Recknagel-Sprenger: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 1974.