

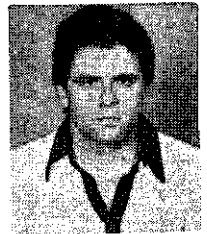
Eksergija, a ne energija

Prilog eksergetskoj analizi energetskih procesa

MILIVOJE KOSTIĆ, dipl. inž., istraživač, Instituta
»Boris Kidrič«, Vinča — Beograd

Rođen u Biosci (kod T. Užica) 1952. godine. Završio Mašinski fakultet u Beogradu 1975. godine. Dobitnik je diplome »Mihailo Petrović Alas« iz matematike; Oktobarske nagrade grada Beograda za najbolje stručne i naučne radove studenata; Nagrade Univerziteta kao najbolji diplomirani student i mnogih drugih.

Radi u Institutu »Boris Kidrič« u Vinči i kao honorarni asistent iz termodinamike na Mašinskom fakultetu u Beogradu.
Do sada objavio nekoliko radova.



1. UVOD

U današnjoj eri knize energije moraju se preispitati sve raspoložive mogućnosti za njenu racionalniju proizvodnju i potrošnju.

Energetske procese treba izvoditi što savršenije da bi se »gubici energije« što više smanjili. Pri tome se moraju uzimati u obzir i ostali troškovi kao investicije, održavanje i sl., tj. proces mora biti što prostiji, što je u kontradiktornosti sa prethodnim zahtevom.

U ovom radu izneće se čisto energetski pristup tehničkim procesima, odavno poznat a malo popularan i prihvaćen, tzv. eksergetska analiza energetskih procesa.

Sadašnji način ocene energetskih procesa uslovno vezan za načine dobijanja energije i izvođenja procesa je nenaučan, empirijski i u nekim slučajevima stvara zabune.

2. PROCES KAO INTERAKCIJA MATERIJE I ENERGIJE I NJEGOVA DOBROTA

Promenu stanja materijalnog sistema moguće je vršiti samo uz učešće energije. Pri tome se vrši transformacija energije iz jednog oblika u drugi. Interakcija materije jednog stanja i određene količine energije je aktivnost, tj. proces koji u toku vremena rezultuje u drugo stanje materije. Najidealniji slučaj izvođenja procesa je takav da je moguće vraćanje materije iz drugog u prvobitno stanje uz istovremen povratak celokupne utrošene energije. To je tzv. »povratni proces« pri čemu nemamo nikakvih gubitaka energije, već samo njenu povratnu trans-

formaciju. Kod nepovratnih procesa nemoguća je promena materije iz drugog u prethodno stanje uz istovremen povratak utrošene energije. Kod takvih procesa, prethodno utrošena energija ili njen deo *nepovratno* se transformisao u toplotu tako da pri povratku materije iz drugog u prvobitno stanje dobićemo ili manje od prethodno utrošene energije, ili nećemo ništa dobiti, ili ćemo čak morati utrošiti dodatne energije, zavisno od dobrote prvobitnog i obrnutog procesa, tj. od nepovratno izgubljene energije u tim procesima. Po zakonu o održanju energije, energija se ne može ni stvoriti ni izgubiti već samo preći iz jednog oblika u drugi. Ali, deo energije koji se u procesu nepovratno transformiše u oblik koji više ni na koji način ne možemo iskoristiti nazvaćemo *gubitak energije* (E_g).

Stepen dobrote ili savršenosti izvođenja procesa (η) definiše se kao odnos povratno transformisane energije u procesu ($E - E_g$) i ukupno utrošene energije u procesu (E), tj.:

$$\eta = \frac{E - E_g}{E} = 1 - \frac{E_g}{E} \quad (1)$$

Treba istaći da se u ovom slučaju, tj. obrascu (1) pod energijom podrazumeva plemeniti oblik energije koji se može transformisati u idealnom procesu u mehanički rad, tj. radna sposobnost energije, tzv. eksergija. Povratna transformacija energije vrši se uz očuvanje eksergije, dok nepovratna transformacija dovodi do smanjenja (gubitaka) eksergije. Eksergija (E) jednaka je energiji kod mehaničke i električne energije, a kod toplotne energije (Q) ona zavisi od temperaturnog nivoa toplotne energije (T) i okoli-

Adresa autora: Milivoje Kostić, dipl. inž., Institut »Boris Kidrič«, Vinča — Beograd, p. fah 522

ne (T_0), tj. $E = Q \frac{T - T_0}{T} < Q$. Znači: pravi »gubitak

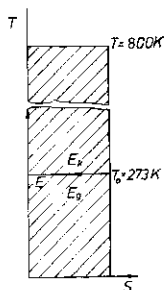
energije« je gubitak eksergije, a stvarni stepen dobrote procesa je eksergetski stepen dobrote [1]. I još nešto: univerzalna mera energije je njena eksergija, pa se u obrascu (1) veličine odnose na univerzalnu meru energije, tj. na njenu eksergiju [3].

Sada je uobičajeno da se kao gubitak energije definiše onaj deo energije ili toplote koji se iz posmatranog procesa preda okolini ($\bar{E}_{g\cdot o}$), a energetski stepen iskorišćenja (korisnosti) procesa ima oblik kao prethodni, s tim što se odnosi na ovako definisane gubitke energije i na utrošenu energiju ili toplotu u procesu (\bar{E}), tj.

$$\eta = \frac{\bar{E} - \bar{E}_{g\cdot o}}{\bar{E}} \quad (2)$$

Ovakav stepen iskorišćenja energije ne vodi računa o razlici između plemenitih oblika energije (npr. električne, mehaničke) i »balastne« toplotne energije, kao ni o tome da li je tzv. gubitak energije $\bar{E}_{g\cdot o}$ još uvek upotrebljiv, tj. da li je nepovratno izgubljen u celosti ili delimično. Najblaže rečeno, ovaj stepen iskorišćenja energije je primitivan, neuniverzalan, nije naučan već empirijski, ne predstavlja karakteristiku savršenosti procesa, već može poslužiti samo kao uporedni pokazatelj za procese iste vrste u kojima se koriste isti oblici energije. Pokažimo to na primerima.

1. *Primer:* Zagrevanje idealnog gasa i Karnotov kružni proces: Neka se kao radno telo koristi idealan gas zagrejan na temperaturu $T = 800$ K sa $E = 1$ kJ električne energije (nepovratnim procesom razmene toplote), i neka se on u procesu rashlađuje na temperaturi okoline $T_0 = 273$ K, sl. 1. Onda je ve-



Sl. 1 — Karnotov kružni povratni proces

ličina rada dobijena u povratnom Karnotovom procesu jednaka

$$E_k = E - E_g = E \frac{T - T_0}{T} = 1 \cdot \frac{800 - 273}{800} = 0,66 \text{ kJ} \quad (3)$$

a deo energije

$$E_g = E \frac{T_0}{T} = 1 \cdot \frac{273}{800} = 0,34 \text{ kJ} \quad (4)$$

je nepovratno izgubljen i ne može se ni na koji način iskoristiti.

Za nepovratni proces zagrevanja idealnog gasa biće:

$$\bar{\eta} = \frac{\bar{E} - \bar{E}_{g\cdot o}}{\bar{E}} = \frac{E - O}{E} = 1 \quad (5)$$

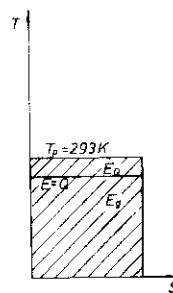
$$\eta = \frac{E - E_g}{E} = \frac{1 - 0,34}{1} = 0,66 \quad (6)$$

Za povratni Karnotov kružni prosek je:

$$\bar{\eta} = \frac{\bar{E} - \bar{E}_{g\cdot o}}{\bar{E}} = \frac{1 - 0,34}{1} = 0,66 \quad (7)$$

$$\eta = \frac{E - E_g}{E} = \frac{0,66 - 0}{0,66} = 1 \quad (8)$$

2. *Primer:* Grejanje prostorija nepovratnim rashlađivanjem: Sa $E = 1$ kJ električne energije možemo »prostim« grejanjem dobiti $Q = 1$ kJ toplote na temperaturi prostorije $T_p = 293$ K, sl. 2. Radna sposobnost ove toplote (eksergija) iznosi:



Sl. 2 — Grejanje prostorije nepovratnim rashlađivanjem

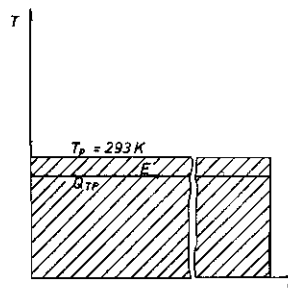
$$E_o = Q \frac{T_p - T_0}{T_p} = 1 \cdot \frac{293 - 273}{293} = 0,068 \text{ kJ} \quad (9)$$

Prema tome biće:

$$\bar{\eta} = \frac{\bar{E} - \bar{E}_{g\cdot o}}{\bar{E}} = \frac{Q - T_0}{E} = \frac{1}{1} = 1 \quad (10)$$

$$\eta = \frac{E - E_g}{E} = \frac{E_o}{E} = \frac{0,068}{1} = 0,068 \quad (11)$$

3. *Primer:* Grejanje prostorija idealnom termo-pumpom: Sa $E = 1$ kJ električne energije možemo idealnom levokretnim kružnim procesom (idealna termo-pumpa) dobiti Q_{tp} toplote na temperaturi T_p , sl. 3, tj.:



Sl. 3 — Grejanje prostorije povratnim procesom sa termo-pumpom

$$Q_{Tp} = E \frac{T_p}{T_p - T_o} = 1 \cdot \frac{293}{293 - 273} = 14,65 \text{ kJ} \quad (12)$$

pa je:

$$\bar{\eta} = \frac{\dot{E} - \dot{E}_g \cdot o}{\dot{E}} = \frac{Q_{Tp}}{E} = \frac{14,65}{1} = 14,65 \quad (13)$$

$$\eta = \frac{E - E_g}{E} = \frac{E}{E} = \frac{1}{1} = 1 \quad (14)$$

Analizom navedenih primera dolazimo do sledećih nelogičnih zaključaka:

1. Stepen iskorišćenja energije ($\bar{\eta}$) manji je od jedinice za idealan povratni Karnotov proces (7) iako se zna da bolji proces ne postoji.

2. Stepen iskorišćenja energije nepovratnog procesa grejanja jednak je jedinici (10) isti je slučaj i kod obrasca (5) iako postoji savremeniji proces grejanja termo-pumpom (primer 3).

3. Stepen iskorišćenja energije kod grejanja termo-pumpom veći je od jedinice (13), pa se prividno čini da je to perpetuum mobile.

Pravu sliku procesa daje stepen dobrote procesa (η), tj. eksergetski stepen dobrote, pri čemu je on:

1) Za Karnotov proces jednak jedinici (8), što znači da je to idealan povratni proces, da u njemu nema »gubitaka energije«, već da su se oni desili ranije u procesu zagrevanja idealnog gasa (6), pa prema tome on se ne može dalje usavršavati, tj. poboljšati.

2) Za nepovratno grejanje prostorija znatno manji od jedinice (11), što nam ukazuje da je to izuzetno loš (nepovratan) proces, pa prema tome treba tražiti bolje procese (videti primer 3).

3) Za idealnu termo-pumpu jednak jedinici (14), tj. to nije nikakav »perpetuum mobile«, već samo najbolji način grejanja prostorija (povratni proces).

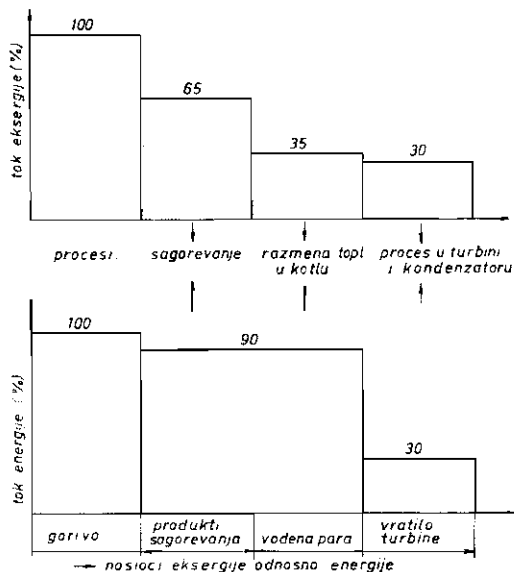
3. FENOMEN TOPLOTNE ENERGIJE

Problemi i zabune u vezi sa određivanjem energetske stepena korisnosti nekog procesa i njegove savršenosti (dobrote) nastaju gotovo uvek kada je u tom procesu prisutna toplotna energija. A ona je gotovo uvek prisutna, jer je vezana za oslobodjenje drugih vidova energije u prostoru neke materije. Zapazimo dve karakteristične osobine toplotne energije:

(1) Ona je *univerzalna* zato što se svi drugi oblici energije u procesima usled nepovratnosti transformišu u nju, tj. toplotna energija je nepovratna transformacija (delimična ili potpuna) svih drugih oblika energije pa i same sebe (rashlađivanje toplote), i

(2) *Parazitska*, pošto u sebi sadrži uvek i deo »balasta« koji se ne može iskoristiti, već je ako se toplota nalazi na nižem nivou (temperaturi), tj. toplota nema nikakvu vrednost (potpun balast) ako je na nivou (temperaturi) okoline. Parazitnost toplotne energije je posledica njene univerzalnosti. Toplotna energija je nepovratna transformacija drugih oblika energije, pa i samo njeno egzistiranje obavezno obuhvata i jedan deo nepovratne transformacije prethodnih oblika energije (balast, »gubitak energije«). Sačuvani deo plemenite energije u toplotnoj energiji zavisi od nivoa toplotne energije (T) i okoline (T_o). To je, u stvari, onaj deo toplote koji se povratnim procesom može pretvoriti u mehanički rad ili eksergija toplotne energije. Prema tome, toplota je vrednija ako se nalazi na višem nivou — višoj temperaturi [3].

Fenomen toplotne energije biće najbolje prikazan u primeru energetske i eksergetske (»sprave energetske«) analize procesa termoelektrane, sl. 4.



Sl. 4 — Eksergetska i energetska analiza procesa u termoelektrani

Hemijska energija goniva prvu nepovratnu transformaciju doživljava u procesu sagorevanja pretvorivši se u toplotnu energiju produkata sagorevanja ($\eta_s = 0,65$), zatim prilikom razmene toplote u kotlu ($\eta_{RT} = 0,65$) (stepen dobrote parnog kotla je $\eta_K = 0,35$), i na kraju u turbini i kondenzatoru ($\eta_T = 0,8$), tako da ukupan stepen dobrote (povratnosti), računajući i ostale gubitke ($\eta_s = 0,9$) iznosi $\eta = 0,3/1/$.

Energetski bilans, tj. energetska stepen korisnosti znatno se razlikuje od prethodnog: Za proces sagorevanja i razmenu toplote u kotlu iznosi $\eta_K = 0,9$, a za turbinu i kondenzator je $\eta_T = 0,37$, tako da uz ostale gubitke ukupan energetska stepen korisnosti iznosi $\eta = 0,3$.

Vrlo interesantni zaključci: Ukupan stepen dobrote i ukupan energetska stepen korisnosti su jednaki ($\eta = \bar{\eta} = 0,3$) zbog toga što se tretira proces pretvaranja hemijske energije goriva u mehaničku, tj. električnu energiju. Na ulazu i izlazu procesa termoelektrane pojavljuje se toplotna energija, koja se javlja samo u međuprocima, već samo hemijska i električna. Međutim, situacija je sasvim drugačija za međuprocise gde se kao ulazna i/ili izlazna energija javlja toplotna energija. Izuzetno nepovratan proces u kotlu ($\eta_K = 0,35$) ima visok energetska stepen korisnosti ($\eta_K = 0,9$), a vrlo dobar proces u turbini sa kondenzatorom ($\eta_T = 0,8$) ima mali energetska stepen iskorišćenja ($\eta_T = 0,37$). Prividno se čini da treba usavršavati turbinu sa kondenzatorom ($\eta_T = 0,37$), a ne kotao ($\eta_K = 0,9$). Međutim, situacija je upravo obrnuta: najveće verovatnosti se javljaju u kotlu ($\eta_K = 0,35$) (sagorevanje i prelaz toplote), dok je turbina sa kondenzatorom skoro savršena ($\eta_T = 0,8$). Mogućnosti poboljšanja termoelektrane leže u poboljšanju procesa sagorevanja i razmene toplote u kotlu, a ne u turbini i kondenzatoru.

Zabuna i kontradiktornosti nastaju zato što se nepovratni gubici hemijske energije goriva u procesima u kotlu u energetska analizi ne računavaju na mestu gde su se i desili (u kotlu), već se prenose dalje i računavaju pogrešno u procesu transformacije energije u turbini i kondenzatoru, sl. 4.

4. ZAKLJUČAK

Toplotna energija je nepovratna transformacija (delimična ili potpuna) plemenitih oblika energije (električne, mehaničke i dr.). »Prava« energetska vrednost toplotne energije je njena eksergija koja treba i može da se poredi i izjednačuje sa drugim plemenitim oblicima energije. Takođe, jedino eksergetska analiza energetskih procesa je »prava energetska analiza« a ne uobičajena energetska analiza.

Eksergetski stepen dobrote daje nam kvantitativnu vrednost povratnosti, tj. savršenosti procesa i ukazuje nam na delove procesa koje je moguće i koje treba usavršavati. Uobičajeni energetska stepen kon.snosti, vrlo često, nam daje suprotne vrednosti zbog čega nastaju zabune u oceni savršenosti procesa, uglavnom zbog toga što se »gubici energije« ne zaračunavaju u procesu u kome su nastali (npr. razmena toplote), već kasnije u procesima gde se vr-

ši pretvaranje toplotne u mehaničku energiju (npr. turbine i kondenzator).

Zabuna nastaje zato što se »gubici energije« pogrešno definišu kao energija predata iz procesa okolini, a ne kao nepovratna transformacija energije koja se može desiti u sistemu i bez razmene energije sa okolinom, na primer u tipičnim nepovratnim procesima: razmeni toplote i prigušivanju.

U zaključku da ponovimo: Eksergetska, a ne energetska analiza je »prava energetska analiza«, o savršenosti izvođenja energetskih procesa.

LITERATURA

- [1] Bošnjaković F., Nauka o toplini, Tehnička knjiga, Zagreb 1970.
- [2] Kostić M., Čovečanstvo ne treba da strahuje za energijom i sirovinama, »Tehnika« — Opšti deo, br. 9, 1975.
- [3] Kostić M., Racionalizacija energije u grejanju i klimatizaciji, Zbornik radova sa VI seminara o KGH, izdanje SMEITS, Beograd, 1975.

Materijalističko shvatanje prekidnosti i neprekidnosti u mehanici

Prof. RISTO ILIĆ, Kragujevac

Gimnaziju završio u Bijeljini 1932. godine. Diplomirao na Filozofskom fakultetu u Beogradu. Naučni rad počeo kod M. Petrovića-Alasa, koji je prekinut ratom, Alasovim zarobljeništvom i smrću. Po sugestiji N. Sa'likova nastavlja naučni rad kod njega, a zatim produžava samostalno. Naučni doprinos autora manifestuje se u sistematskom objavljivanju radova: u Belgijskoj akademiji nauka u Briselu, Rumunjskoj akademiji nauka u Bukureštu, saopštenjima na međunarodnim kongresima, međunarodnim simpozijima i na kongresima u zemlji iz mehanike i matematike.



UVOD

Pojmovi prekidnost i neprekidnost su uzajamno povezani, uzajamno se prožimaju obrazujući identitet suprotnosti »možda bi bilo tačnije reći njihovo »jedinstvo«? [1], jer se u ovim naučnim pojmovima odnosno čovečijim pojmovima »na osobit način (ovo NB: na osobit način i dijalektički!!) odražava priroda« [1]. Razlika u terminima identitet ili jedinstvo suprotnosti nije bitna pošto ovi termini priznaju (otkrivaju) protivurečne, suprotne i uzajamno isključujuće tendencije u svim pojavama i procesima prirode (uključujući i duh i društvo). Uslov saznanja

svih procesa sveta u njihovom »samokretanju«, u njihovom spontanom razvoju, u njihovom živom životu, jeste saznanje tih procesa kao jedinstva suprotnosti [1]. Imajući u vidu problem materijalističkog shvatanja prekidnosti i neprekidnosti u Mehanici ograničićemo se na jedan deo historijskog postojećeg činjeničnog fonda o ovom problemu da ga osvetlimo u okviru kraćeg referata.

Mehanika u svome proučavanju prirode, odnosno objektivne stvarnosti najpre je proučila razne vrste makroskopskih kretanja. Prilikom ovakve vrste kretanja Mehanika se suočila sa protivurečnošću njegovog proučavanja. Svako kretanje je nezamislivo bez nosioca kretanja-materije. Baš F. Engels to ističe sledećim rečima: »Kretanje je način postojanja materije. Nikada i nigde miti je bilo biti može biti materije bez kretanja. (Kretanje u vasion-

* Referat sa XIV jugoslovenskog kongresa racionalne i primenjene mehanike, održanog u Portorožu juna 1978. godine

Adresa autora: Risto Ilić, Kragujevac, Borisa Kidriča 37/8