

**MOGUĆNOST PRIMENE EKSERGETSKE ANALIZE U ENERGETICI****APPLICATION POSSIBILITIES OF EXERGY ANALYSIS IN ENERGETICS**Luka Hovanec, Borivoj Stepanov, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ČISTE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE**

**Kratak sadržaj** – Cilj rada jeste da se analizira koncept eksergije, daju osnove pojma eksergije i eksergetske analize, i prikažu primeri eksergetske analize. U prvom delu rada dati su osnovni pojmovi koji su potrebni za razumevanje eksergije. Kao što su: nepovratnosti, fizička i hemijska eksergija, okolina itd. Primer eksergetske analize dat je za parno-turbinsko i gasno-turbinsko postrojenje. Kotao je najveći izvor eksergetskih gubitaka, njegova eksergijska efikasnost je samo  $\eta_{ka}^{ex} = 0,4306$ . Najveći izvor nepovratnosti odnosno gubitaka eksergije u gasno-turbinskom postrojenju jeste komora za sagorevanje. Cilj ovoga jeste dati dobar uvid u to kako se eksergetska analiza izvodi kao i izdvojiti najbitnije zaključke i time unaprediti shvatanje značaja eksergetske analize.

**Gljučne reči:** Eksergija, energija, eksergetska analiza, parno-turbinsko postrojenje, gasno-turbinsko postrojenje

**Abstract** – The aim of the paper is to analyse the concept of exergy, provide the basics of the concept of exergy and exergy analysis, and show examples of exergy analysis. In the first part of the paper, the basic terms needed to understand exergy are given. Such as: irreversibility, physical and chemical exergy, environment, etc. An example of exergy analysis is given for a steam-turbine and gas-turbine plant. The boiler is the biggest source of exergetic losses, its exergy efficiency is only  $\eta_{ka}^{ex} = 0.4306$ . The biggest source of irreversibility or exergy losses in a gas turbine plant is the combustion chamber. The goal of this was to give a good insight into how exergy analysis is performed, as well as to single out the most important conclusions and thereby advance the understanding of the importance of exergy analysis.

**Keywords:** Exergy, energy, exergy analysis, steam-turbine plant, gas-turbine plant

**1. UVOD**

Korišćenje energije je sveprožimajući element u životu, i postoji snažna povezanost između energije i prosperiteta. Kroz najveći deo istorije, nastanak i razvoj civilizacija je praćen otkrivanjem i efektivnim korišćenjem energije kako bi se pokrile potrebe društva. Klimatske promene, prouzrokovane pojačanim efektom staklene bašte, kao i smanjenje rezervi fosilnih goriva, pokrenule su brojne mere na globalnom nivou u sferama zaštite životne sredine i povećanja energetske efikasnosti.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Borivoj Stepanov, vanr.prof.

Prema tome sve ljudske aktivnosti se baziraju na potrošnji prirodnih resursa kako neobnovljivih tako i obnovljivih. Crpljenje neobnovljivih prirodnih resursa je opasno za budućnost čovečanstva i stoga mora se uvesti mera kako bi se procenili ovi resursi, kao i metodi koji bi procenili stepen njihovog korišćenja.

Energetska analiza je tradicionalni metod određivanja načina na koji se energija koristi u raznim operacijama (npr. fizičko i hemijsko obrađivanje materijala, prenos toplote i pretvaranje energije). Energetska analiza je bazirana na prvom zakonu termodinamike i uobičajeno podrazumeva formiranje energetske bilansa i ocenjivanje energetske efikasnosti.

Jedno vreme je bilo zadovoljavajuće napraviti samo energetske balans za proces na osnovu prvog zakona termodinamike i zatim odrediti kritične tačke kako bi se obezbedilo da u proračun nisu uključena potencijalna kršenja drugog zakona termodinamike. Stoga već nekoliko decenija u nazad, termodinamičari razvijaju metod analize koji kombinuje zahteve odnosno ograničenja prvog i drugog zakona termodinamike simultano [1].

Sposobnost da se proizvede maksimalna količina rada u uslovima prirodne okoline može se prihvatiti kao mera ocene prirodnih resursa [2]. Veličini definisanosti na takav način dat je termin eksergija. Ovaj termin je skovan od strane slovenačkog termodinamičara Zorana Ranta, čiji je rad intenzivno unapredio polje tehničke termodinamike [3].

Eksergetski metod je relativno nova tehnika analize u kojoj se ocena termodinamičkih gubitaka vrši na osnovu drugog zakona termodinamike a ne na osnovu prvog zakona termodinamike i time spada u kategoriju analiza drugog zakona. Drugo ime koje se koristilo, najčešće u prošlosti je analiza dostupnosti [1].

**2. METOD EKSERGETSKE ANALIZE**

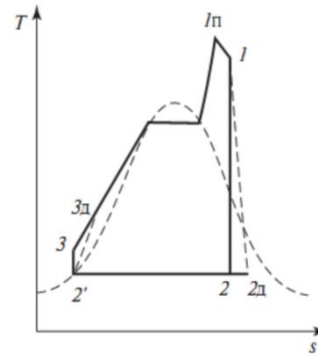
Kada se vrši eksergetska analiza, termodinamičke nesavršenosti mogu biti kvantifikovane kao destrukcija eksergije, koja predstavlja gubitke u kvalitetu energije ili korisnosti, na primer, izgubljen rad osovine ili izgubljen potencijal za proizvodnju osovinskog rada [4].

Kao energija, i eksergija može biti prenošena ili transportovana preko granice sistema. Za svaki tip prenosa energije ili transporta, postoji odgovarajući prenos ili transport eksergije.

Neke od karakteristika eksergije su navedene dole [2]:

1. Sistem u kompletnoj ravnoteži sa svojom okolinom nema nikakvu eksergiju.
2. Eksergija sistema se uvećava što sistem više odstupa od okoline.

3. Kada energija gubi svoj kvalitet ili se degradira, eksergija se uništava.
4. Eksergija po definiciji zavisi ne samo od stanja sistema ili toka već i od stanja referentne okoline.
5. Eksergetske efikasnosti su mere približavanja idealnosti (ili povratnosti). Ovo nije nužno tačno za energetske efikasnosti, što često dovodi do pogrešnih zaključaka.
6. Vrste energije sa visokim eksergetskim sadržajem su obično više cenjene i korisnije od vrsta energije sa niskom eksergijom.
7. Naslage minerala visoke koncentracije su u suprotnosti sa referentnom okolinom i stoga poseduju eksergiju, koja se uvećava sa koncentracijom minerala.

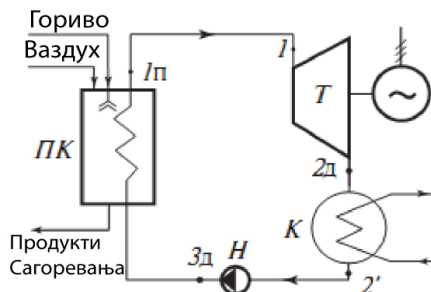


Slika 2.  $T$ - $s$  dijagram parnog ciklusa iz primera[5]

## 2.1. Eksergetska analiza parno – turbinskog postrojenja (PTP)

Primer eksergetske analize parne elektrane odrađen je uz pomoć Mathcad softvera na sajtu Moskovskog instituta za energetiku. Softver je u svojoj originalnoj nameni korišćen za ilustraciju primera eksergetske analize profesora A.A. Aleksandrova [5]. Podaci koji su korišćeni u primeru u ovom radu su preuzeti od strane M.A. Rozena i njegove eksergetske analize parne elektrane na uglj Nantikoke koja se nalazi u Ontariju u Kanadi [6].

Kako bi se softver mogao primeniti na ovu elektranu, šema elektrane se morala uprostiti odnosno elektrana je svedena na jednostavno postrojenje sa samo jednom turbinom, bez ponovnog zagrevanja i jednim kondenzatorom.



Slika 1. Grafički prikaz PTP iz primera[5]

Izračunati su eksergetski indikatori parno-turbinskog postrojenja za koje su poznati sledeći podaci:

pritisak pare na izlazu iz kotla za pregrevanje pare  $p_n=16,89\text{MPa}$ ;

temperatura pare na izlazu iz kotla za paropregrevanje  $t_n=538^\circ\text{C}$ ;

pritisak pare na ulazu u turbinu  $p_1=16,89\text{MPa}$ ;

temperatura pare na ulazu u turbinu  $t_1=538^\circ\text{C}$ ;

pritisak pare u kondenzatoru  $p_2=5\text{kPa}$ ;

maksimalna temperatura produkata sagorevanja goriva  $t_3=2000^\circ\text{C}$ ;

koeficijent korisnog dejstva parnog kotla  $\eta_{ka}=0,91$ ;

unutrašnja relativna efikasnost turbine  $\eta_{oi}^T=0,91$ ;

unutrašnja relativna efikasnost pumpe  $\eta_{oi}^H=0,85$ ;

mehanički koeficijent korisnog dejstva  $\eta_m=0,99$ ;

koeficijent korisnog dejstva električnog generatora  $\eta_g=0,98$ .

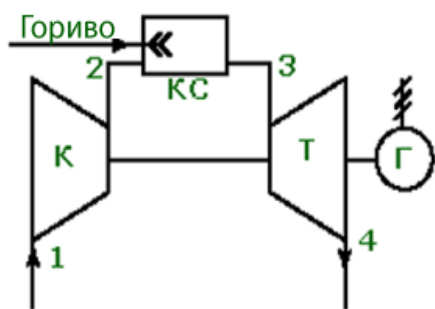
Parametri životne sredine: temperatura  $t_0=15^\circ\text{C}$ , pritisak  $p_0=0,1\text{MPa}$ . Proizvodi sagorevanja imaju svojstva vazduha.

Tabela 1. Najbitniji rezultati eksergetske analize PTP

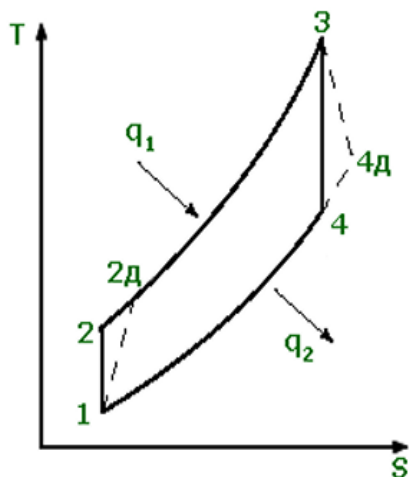
Veličina	Oznaka	Vrednost
Eksergija u tački П	$e_{\Pi}$	1551,64 kJ/kg
Eksergija u tački 1	$e_1$	1551,64 kJ/kg
Eksergija u tački 2	$e_2$	108,157kJ/kg
Eksergija u tački 2д	$e_{2д}$	115,745 kJ/kg
Eksergija u tački 2'	$e_{2'}$	2,131 kJ/kg
Eksergija u tački 3	$e_3$	19,0452 kJ/kg
Eksergija u tački 3д	$e_{3д}$	19,226 kJ/kg
Eksergija goriva	$e_{\text{горпл}}$	3559,11 kJ/kg
Gubitak tokom sagorevanja	$\Delta e_{\text{cr}}$	1021,9 kJ
Gubitak eksergije u kotlu	$\Delta e_{\text{ka}}$	2026,7 kJ
Eksergija dimnih gasova	$e_{\text{v,r}}$	78,609 kJ/kg
Gubitak eksergije turbine	$\Delta e_T$	122,33 kJ
Gubitak kondenzatora	$\Delta e_K$	113,61 kJ/kg
Gubitak eksergije pumpe	$\Delta e_H$	2,803 kJ/kg
Eksergetska efikasnost kotla	$\eta_{\text{ex}}^{\text{ka}}$	0,430
Eksergetska efikasnost turbine	$\eta_{\text{ex}}^T$	0,915
Eksergetska efikasnost pumpe	$\eta_{\text{ex}}^H$	0,859
Eksergetska efikasnost PTP	$\eta_{\text{ex}}^{\text{ПТП}}$	0,356

## 2.2. Eksergetska analiza gasno–turbinskog postrojenja (GTP)

Primer eksergetske analize gasne elektrane odrađen je kao i u primeru parne elektrane uz pomoć Mathcad softvera koji je pronađen na sajtu Moskovskog instituta za energetiku. Softver je u svojoj originalnoj nameni korišćen za ilustraciju primera eksergetske analize profesora A.A. Aleksandrova [5]. Podaci koji su korišćeni u primeru u ovom radu su preuzeti od strane profesora V.I. Škljara i dr., sa Kijevskog politehničkog instituta odnosno Nacionalnog mašinskog fakulteta Ukrajine i njihove eksergetske analize gasne elektrane [7]. Na ulazu u kompresor pritisak vazduha je  $p_1=0,1013\text{MPa}$  i temperatura  $t_1=15^\circ\text{C}$ . U kompresoru vazduh se adijabatski komprimuje do pritiska  $p_2=2,128\text{MPa}$ , pri čemu se usled dovoda toplote usled sagorevanja goriva u komori za sagoravanje vazduh Sa ovim parametrima gasovi ulaze u gasnu turbinu, gde se adijabatski šire do početnog pritiska  $p_1$ , nakon čega se ispuštaju u okolnu atmosferu. Poznati koeficijenti korisnog dejstva  $\eta_{oi}^T=0,86$  unutrašnja efikasnost kompresora  $\eta_{oi}^K=0,86$ , koeficijent korisnog dejstva komore za sagorevanje  $\eta_{kc}=0,97$ , mehanički koeficijent korisnog dejstva  $\eta_m=0,95$ , koeficijent korisnog dejstva električnog generatora  $\eta_g=0,90$ . Toplotna moć goriva  $Q_{\text{pu}}=50\text{kJ/kg}$ . Parametri okoline  $t_{0,c}=15^\circ\text{C}$ ,  $p_{0,c}=0,1013\text{MPa}$ . Zagreva se na temperaturu od  $t_3=1220^\circ\text{C}$ .



Slika 3. Grafički prikaz GTP iz primera [5]



Slika 4. T-s dijagram gasnog ciklusa iz primera [5]

Tabela 2. Najbitniji rezultati eksergetske analize GTP

Veličina	Oznaka	Vrednost
Eksergija u tački 2	$e_2$	399,21 kJ/kg
Eksergija u tački 2d	$e_{2d}$	441,06 kJ/kg
Eksergija u tački 3	$e_3$	1078,91 kJ/kg
Eksergija u tački 4	$e_4$	159,48 kJ/kg
Eksergija u tački 4d	$e_{4d}$	238,75 kJ/kg
Eksergija goriva	$e_{\text{топл}}$	896,68 kJ/kg
Gubitak kom. za sagorevanje	$\Delta e_{\text{КС}}$	258,84 kJ/kg
Gubitak eksergije kompresora	$\Delta e_{\text{К}}$	28,67 kJ/kg
Gubitak eksergije turbine	$\Delta e_{\text{Т}}$	49,75 kJ/kg
Gubitak dimnih gasova	$\Delta e_{\text{у.г.}}$	238,95 kJ/kg
Mehanički gubici eksergije	$\Delta e_{\text{М}}$	67,68 kJ/kg
Eksergetska efikasnostk.z.s*	$\eta_{\text{ex}}^{\text{КС}}$	0,7113
Eksergetska efikasnostkompr.	$\eta_{\text{ex}}^{\text{К}}$	0,939
Eksergetska efikasnost GTP	$\eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}}$	0,2825

\*- k.z.s (Komora za sagorevanje)

### 3. ZAKLJUČAK

U ovom radu cilj je bio dati što je moguće sveobuhvatniji prikaz koncepta eksergije. Prema tome su date osnove koncepta eksergije i eksergetske analize, kao i primeri eksergetske analize parnih i gasnih postrojenja.

Iz opisa koncepta eksergije najbitnije je ukazati na razlike između energije i eksergije a samim tim i na razlike u uvidima koje nam donosi energetska analiza a koje nam donosi eksergetska analiza. Najbitniji uvid jeste to da je energetska analiza bazirana na prvom zakonu termodina-

mike nedovoljna za kompletnu analizu jednog energetskog sistema. Eksergetska analiza daje najbitniju informaciju koja se može dobiti jednom analizom, ne samo gde se energija gubi u sistemu, nego gde se korisna energija, energija visokog kvaliteta, gubi u sistemu.

Dalje u radu su dati primeri eksergetske analize parno-turbinskog i gasno-turbinskog postrojenja. Iz ovih primera mogu se izvući glavni zaključci:

1. Prilikom upoređivanja rezultata energetske i eksergijske analize, pažnju privlači i značajna razlika u proceni gubitaka u parnom kotlu. Kotao je najveći izvor eksergetskih gubitaka uz energetska efikasnost kotla jednaku  $\eta_{\text{ка}} = 0,91$ , njegova eksergijska efikasnost je samo  $\eta_{\text{ка}}^{\text{ex}} = 0,4306$ .
2. Najveći izvor nepovratnosti odnosno gubitaka eksergije u gasno-turbinskom postrojenju jeste komora za sagorevanje.
3. Eksergijska efikasnost GTP ciklusa niža od one PTP ciklusa pošto se u njemu procesi snabdevanja i odvođenja toplote odlikuju visokim stepenom spoljašnje nepovratnosti, nižem izvoru toplote se daje veliki udeo toplote, koja ipak ima značajnu eksergiju.

### 4. LITERATURA

- [1] Kotas, T. J. (Tadeusz Jozef). 1985. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Tiptree, Essex, Great Britain.
- [2] Jan Szargut. 2005. Exergy Method - Technical and Ecological Applications. WIT Press, Southampton, UK.
- [3] Zoran Rant. 1956. Vrednostenje energije v tehniški praksi. Strojniški Vestnik, Ljubljana, FNRJ.
- [4] Ibrahim Dincer and Marc A. Rosen. 2015. Exergy Analysis of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning - Methods and Applications. Elsevier, Oxford, UK.
- [5] А.А. Александров. 2004. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок. Издаваштво Московского института за енергетику. Москва, Русија.
- [6] Marc A. Rosen. 2001. Energy- and exergy-based comparison of coal-fired and nuclear steam power plants. Exergy Int. J. 1(3) (2001) 180–192.
- [7] Шкляр В.И., Дубровская В.В., Задвернюк В.В., Колпаков. 2010. А.Г. Эксергетический Анализ Работы Газотурбинной Установки. Пром. теплотехника, 2010, т. 32.с.?

### Kratka biografija:



**Luka Hovanec**; rođen je u Sremskoj Mitrovici 1997. godine. Pohađao je društveno-jezički smer Mitrovačke Gimnazije, koju je završio 2016-te. Iste 2016. upisuje prvu godinu na Fakultetu tehničkih nauka, smer Čiste energetske tehnologije (osnovne akademske studije), kao četvrti u klasi. Školovanje nastavlja na master akademskim studijama koje upisuje 2020-te godine.