

ENERGIJSKA I EKSERGIJSKA ANALIZA PARNOG KOTLA U PROCESNOJ INDUSTRIJI

Draško Kovač¹

SAŽETAK:

U ovom radu je dat prikaz energijske i eksergijske analize rada parnog kotla. Analiza je primijenjena na parni kotao ložen mazutom, koji je instalisan u industrijskoj toplani „Riviera” Kotor. Cilj samog rada je da dodatno osvijetli efikasnost, odnosno nedostatke ovih metoda u njihovoj primjeni u analizi efikasnosti rada parnoga kotla. Eksergijska analiza predstavlja savremeni pristup u tretiranju energetske procesa. Primjenom relativno pojednostavljenih modela industrijskih energetske procesa, omogućena je analiza njihove efikasnosti na jedan suptilniji način koji energetske procese ne tretira samo u kvantitativnom već i u kvalitativnom smislu. To se u prvom redu odražava kroz primjenu eksergijske analize procesa.

U radu je data uporedna primjena energijske i eksergijske analize procesa u parnom kotlu loženog lož uljem (mazutom). Dobijeni rezultati jasno ukazuju na prednosti koje su posledica eksergetske analize, prije svega ukazujući na potencijal koji nam stoji na raspolaganju u smislu povećanja efikasnosti rada kotla.

Cljučne riječi: parni kotao, energija, eksergija, efikasnost, proces

1. UVOD

Zadatak parnog kotla je da toplotu dobijenu sagorijevanjem goriva preda vodi i vodenoj pari, koja na izlazu iz parnog kotla treba da ima određeni pritisak i temperaturu.

Toplota proizvedena tokom sagorijevanja ne može u potpunosti biti predata vodi. Dio toplote se gubi ka okolini kroz izduvne gasove i konvekcijom, odnosno zračenjem preko plašta kotla. Sa druge strane, jasno je da potrošnja goriva zavisi od efikasnosti kotla. Dakle, jasno je da je ključ ekonomičnosti rada kotla sadržana u njegovoj efikasnosti, pa se samim tim nameće kao imperativ analiza

¹ Draško Kovač, „Riviera” A. D., Fakultet za pomorstvo, Kotor. Tel: 032-302-412, 069-053-221, e-mail: draskokovac@t-com.me

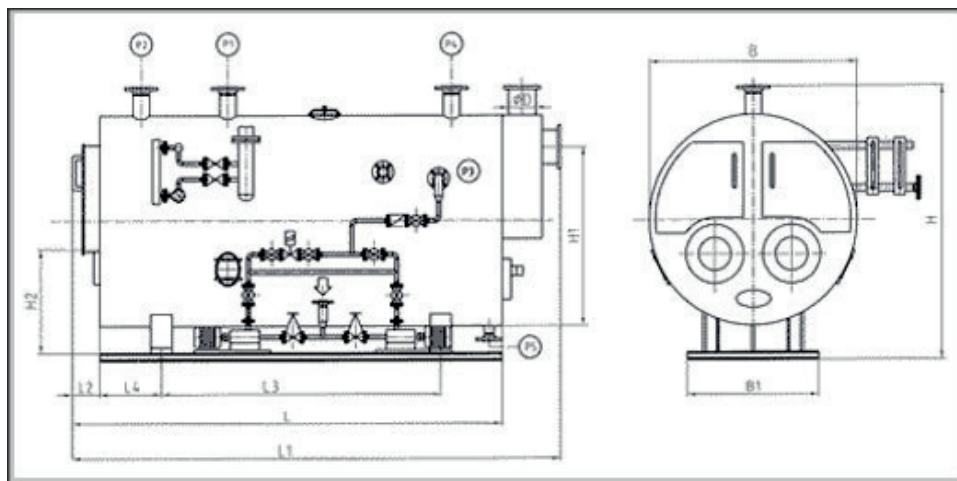
njegove efikasnosti primjenom „najboljeg” metoda. Taj „najbolji” pristup je omogućen kroz primjenu energetske i eksergetske metode.

Tradicionalni metodi analize energetskog-termalnog sistema bazirani su na Prvom zakonu termodinamike. Ti metodi koriste energetske bilans sistema kako bi se utvrdio transfer toplote između sistema i njegovog okruženja. Međutim, energijska analiza ne obezbeđuje informacije o kvalitetu ili stupnjevima energije koja prelazi granicu termalnog sistema, kao ni informacije o internim gubicima. Drugi zakon termodinamike uvodi koncept eksergije u analizu energetskih-termalnih sistema. Njome se definiše maksimalna sposobnost vršenja rada. Eksergija ne predstavlja bilansno svojstvo za koje bi se mogao napisati zakon održanja, ona se troši ili uništava usred ireverzibilnosti procesa i na taj način predstavlja potencijal za ostvarivanje neke promjene. Eksergijska analiza otkriva da li je i u kojoj mjeri moguće konstruisati efikasniji sistem u smislu smanjenja izvora postojećih neefikasnosti.

Ovaj rad se bavi energijskom i eksergijskom analizom parnog kotla loženog na mazut.

Proizvođač	Tip	Kapacitet		Pritisak bar	Gorivo
		Pare t/h	vode		
MINEL	TE-104	2,5		30	Mazut

Kotao (slika 1) se koristi u procesnoj industriji „Riviera” – Kotor za cijepanje masnoća u pogonu bazne hemije na postrojenju proizvodnje masnih kiselina.



Sl. 1. Blok kotao *Minel TE-104*

2. ENERGIJSKA I EKSERGIJSKA ANALIZA

Termodinamička analiza obuhvata Prvi i Drugi zakon termodinamike.

Prvi zakon termodinamike je, u suštini, zakon o održanju energije. Zakon o održanju definiše energetske bilans kojim je obuhvaćena razmjena energije u termodinamičkom sistemu. Količina energije koja prelazi kroz bilo koji stabilni sistem podvrgnut nekom procesu, prema ovom Zakonu, može biti izražena kroz jednakost ulaznog i izlaznog energetskog fluksa:

$$\dot{E}_{ul} = \dot{E}_{iz} \quad (W) \quad (1)$$

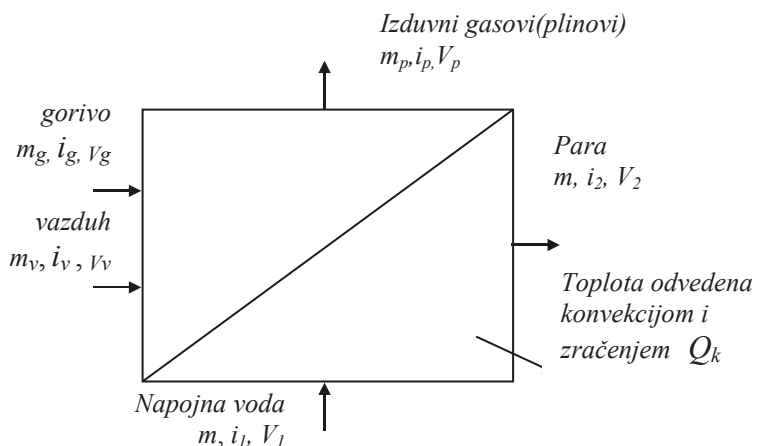
Prvi zakon termodinamike ne tretira kvalitet energije, već to omogućava primjena Drugog zakona termodinamike.

Drugi zakon termodinamike govori o sposobnosti transformacije jednog oblika energije u drugi oblik. Dio energije koji se potpuno pretvara u druge oblike energije naziva se *eksergija*, a dio energije koji ne može da se transformiše naziva se *anergija*.

$$\text{Energija} = \text{Eksergija} + \text{Anergija}$$

2. 1. ENERGIJSKA ANALIZA PARNOG KOTLA

U parni kotao se dovodi napojna voda, gorivo i vazduh za sagorijevanje, a iz njega odvodi proizvedena svježa para, izduvni gasovi i pepeo kao nesagorivi dio goriva. Šematski prikaz strujanja-toka materija kroz parni kotao prikazan je na slici 2.



Sl. 2. Shema strujanja-razmjene materija kroz parni kotao

Prema Prvom zakonu termodinamike za parni kotao, u kome nema transformacije toplotne energije u mehaničku (ne postoji rad, $W=0$), dovedena toplota je jednaka odvedenoj toploti pa je (sl.2):

$$m_g i_g + m_v i_v + m i_1 = m_p i_{pp} + m i_2 + Q_k \quad (2)$$

gdje je:

- $m_g i_g$ – energija-toplota dovedena gorivom, koja se sastoji od hemijske i unutrašnje energije goriva na temperaturi okoline t_o
- $m_v i_v$ – energija-toplota dovedena vazduhom
- $m i_1$ – energija-toplota dovedena napojnom vodom
- $m_p i_{pp}$ – energija-toplota izduvnih gasova (gasova sagorijevanja-plinova) na izlazu iz kotla $i_{pp} = i_p(t_p)$
- $m i_2$ – energija-toplota vodene pare na izlazu iz kotla
- Q_k – energija-toplota odvedena konvekcijom i zračenjem iz kotla u okolinu
- t_o – temperatura okoline
- t_p – temperatura izduvnih gasova (plinova)

Energija dovedena gorivom može se izraziti preko toplotne moći goriva:

$$m_g H_d = m_g i_g(t_o) + m_v i_v(t_o) - m_p i_{po} \quad (3)$$

gdje je:

- H_d – donja toplotna moć goriva
- $i_{po} = i_p(t_o)$

Uvrštavanjem (3) u (2) dobija se:

$$m_g H_d = m (i_2 - i_1) + m_p (i_{pp} - i_{po}) + Q_k \quad (4)$$

Ovaj izraz (4) predstavlja toplotni bilans parnog kotla.

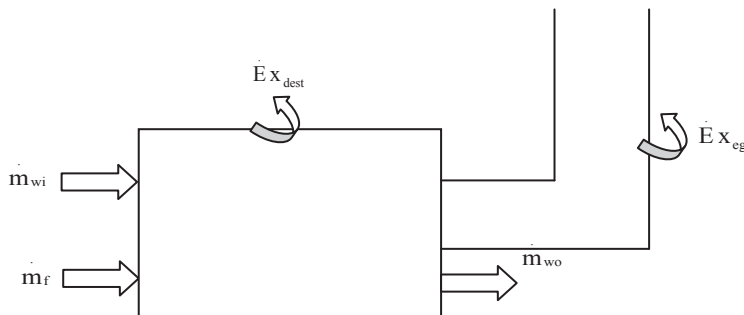
Ako se bilans razmatra sa stanovišta proizvodnje pare, onda je samo prvi član na desnoj strani jednačine (4) korisna toplota pa se energetska stepen djelovanja parnog kotla može odrediti iz izraza:

$$\eta_{PK} = \frac{m(i_2 - i_1)}{m_g H_d} = 1 - \frac{m_p (i_{pp} - i_{po}) + Q_k}{m_g H_d} \quad (5)$$

Iz gornjeg izraza može se zaključiti da će energetska stepen djelovanja parnog kotla biti veći ako temperatura izlaznih gasova t_p bude niža, odnosno što bliža temperaturi okoline t_o . Takođe, stepen iskorištenja se može povećati ako smanjimo odvođenje i zračenje toplote Q_k , što se može postići boljom toplotnom izolacijom kotla. Inače, gubici nastali odvođenjem toplote preko izduvnih gasova su znatno veći od gubitaka Q_k .

2. 2. EKSERGIJSKA ANALIZA PARNOG KOTLA

Može smatrati da je parni kotao otvoreni sistem koji prolazi kroz proces stabilnog toka koji obuhvata hemijske reakcije. Šematski dijagram kotla prikazan je na slici 3.



Sl. 3. Model parnog kotla

Metoda *eksergijske analize* (koja se može smatrati i *analizom raspoloživosti*) je prikladan alat za postizanje efikasnijeg korištenja energetskih resursa, s obzirom na to da omogućuje određivanje lokacije, uzroka, i realne veličine nastalih gubitaka, kao i nastalih ostataka u nekom procesu.

Energetski (termički) stepen djelovanja parnog kotla η_{BK} (5) daje predstavu samo o bilansu toplote, ne uzimajući u obzir kvalitet od koga zavisi radna sposobnost (eksergija). On ne ukazuje na kompletnu transformaciju energije goriva u smislu drugog zakona termodinamike. Zato je uveden pojam eksergijskog koeficijenta iskorištenja (eksergijskog stepena djelovanja) η_{Ex} .

– Eksergija goriva

U ovom eksperimentu je upotrebljen mazut čija su svojstva data u tabeli 1.

Tabela 1. Hemijska svojstva goriva (mazuta)

Maseni udjeli					Donja toplotna moć
<i>c</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>o</i>	<i>w</i>	H_d
0,847	0,117	0,003	0,003	0,030	$42827 \frac{kJ}{kg}$

Eksergija goriva je izražena kao:

$$Ex_g = m_g e_g \quad (6)$$

Pokazuje se da se za tečna goriva može odnos specifične energije e_g i donje toplotne moći H_d , za $\frac{O}{C} \leq 0,5$ dobro aproksimirati relacijom:

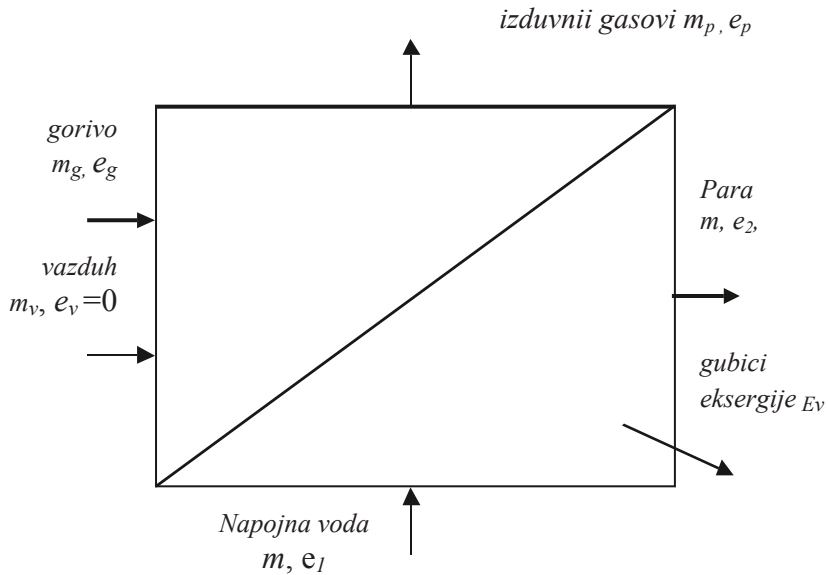
$$\frac{e_g}{H_d} = 1,0374 + 0,0159 \frac{H}{C} + 0,0567 \frac{O}{C} + 0,5985 \frac{S}{C} \left(1 - 0,1737 \frac{H}{C} \right) \quad (7)$$

gdje su C , H , O i S predstavljaju broj atoma pojedinih elemenata u molekulu goriva.

Ako sastojke preračunamo u masene udjele c , h , o , s u kg po kg goriva, dobija se:

$$\frac{e_g}{H_d} = 1,0374 + 0,1882 \frac{h}{c} + 0,0425 \frac{o}{c} + 0,2244 \frac{s}{c} \left(1 - 2,0844 \frac{h}{c} \right) \quad (8)$$

Bilans eksergije je prikazan na slici 4.



Sl. 4. Shema bilansa eksergije

Bilansna jednačina eksergije za posmatrani model parnog kotla je:

$$m_g e_g + m_v e_v + m e_1 = m e_2 + m_p e_p + E_{x_b} \quad (9)$$

gdje je:

$m_g e_g$ – eksergija goriva

$m_v e_v$ – eksergija dovedenog vazduha za sagorijevanje

$m e_1$ – eksergija napojne vode

$m e_2$ – eksergija vodene pare na izlazu iz parnog kotla

$m_p e_{p1}$ – eksergija izduvnih gasova (gasova sagorijevanja) na izlazu iz kotla

E_{x_b} – gubici eksergije zbog odvođenja i zračenja toplote iz kotla u okolinu

Energija = Eksergija + Anergija

Eksergija = Korisna eksergija + Eksergijski gubici

Eksergijski koeficijent iskorištenja (eksergijski stepen djelovanja) η_{Ex} predstavlja odnos ekupnog eksergijskog autputa prema ukupnom eksergijskom inputu:

$$\eta_{Ex} = \frac{Ex_{out}}{Ex_{in}} = \frac{Ex_{in} - Ex_{bl}}{Ex_{in}} = 1 - \frac{Ex_{bl}}{Ex_{in}} \quad (10)$$

Ex_{bl} – gubitak eksergije

Eksergijski koeficijent iskorištenja (eksergijski stepen djelovanja) η_{Ex} parnog kotla može se definisati izrazom:

$$\eta_{Ex} = \frac{Ex_s - Ex_v}{Ex_g} = \frac{m(e_2 - e_1)}{m_g e_g} \quad (11)$$

Iz jednačine (5) možemo izraziti:

$$\frac{m}{m_g} = \eta_{PK} \frac{H_d}{i_2 - i_1} \quad (12)$$

$$\eta_{Ex} = \frac{H_d \cdot \eta_{PK}}{e_g} \cdot \frac{(e_2 - e_1)}{(i_2 - i_1)} \quad (13)$$

Razliku eksergija $\Delta e = e_2 - e_1$ možemo izračunati na sledeći način:

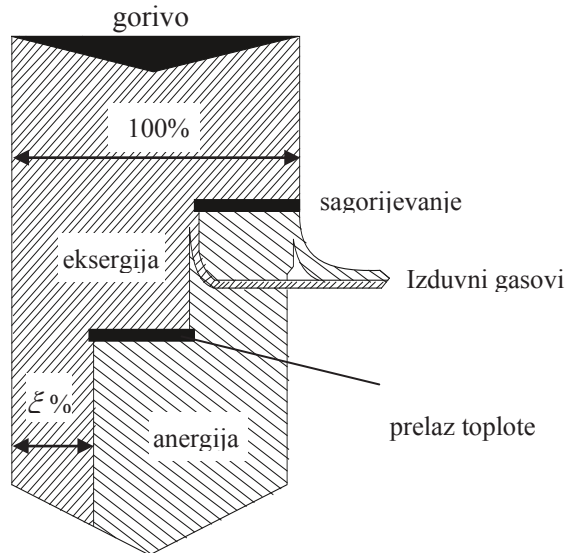
$$\Delta e = e_2 - e_1 = i_2 - i_1 - T_{ok} \cdot (s_2 - s_1) \quad (14)$$

Uvrštavanjem u jednačinu (10) slijedi da je:

$$\eta_{Ex} = \frac{H_d \cdot \eta_{PK}}{e_g} \cdot \left(1 - T_o \cdot \frac{s_2 - s_1}{i_2 - i_1} \right) \quad (15)$$

gdje je T_o – temperatura okoline, s_2 – entropija pare, s_1 – entropija vode

Na osnovu goreizvedenog, eksergijski koeficijent iskorištenja (eksergijski stepen djelovanja) η_{Ex} zavisi od svojstva goriva (H_d i e_g) i od termičkog stepena iskorištenja (η_{PK}). Na slici 5 je prikazan tok eksergije i anergije u parnom kotlu.



Sl. 5. Tok eksergije i anergije u parnom kotlu

3. REZULTATI I ANALIZE

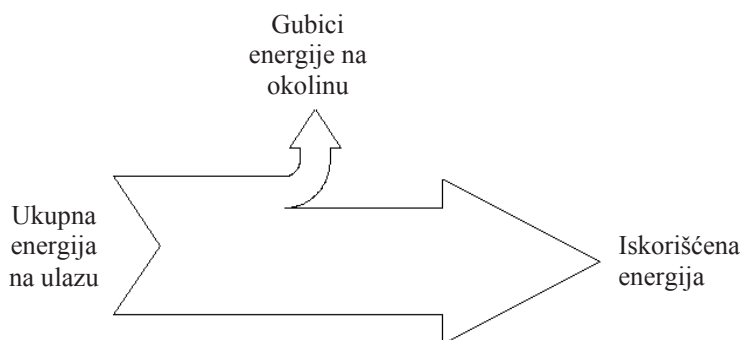
Na osnovu pogonskih parametara parnog kotla, moguće je prema jednačinama (5) i (15) izračunati energijski i eksergijski stepen korisnosti (djelovanja) parnog kotla.

U tabeli br. 2 su prikazani polazne i izračunate vrijednosti, odnosno rezultati.

Tabela 2. Polazne i izračunate vrijednosti i rezultati

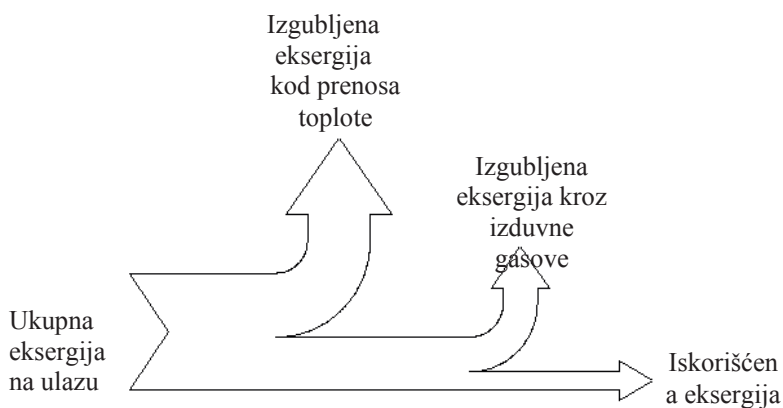
Proizvodnja (produkcija) svježe pare	$m = 2,5 \text{ t/h} = 0,70 \text{ kg/s}$
Produkcija toplote	$Q' = 1,74 \text{ MW}$
Zagrijevna površina	$A = 71 \text{ m}^2$
Temperatura izlaznih gasova	$t_n = 280 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura okoline	$t_o = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
Pritisak pare	$p = 30 \text{ bar}$
Temperatura pare	$t = 234 \text{ }^\circ\text{C}$
Entalpija pare	$i_2 = 2804 \text{ kJ/kg}$
Entropija pare	$s_2 = 6,186 \text{ kJ/kg}$
Maseni protok – potrošnja goriva	$m_g = 173 \text{ kg/h} = 0,048 \text{ kg/s}$
Odnos spec. eksergije i donje topl. moći	$e_w/H_d = 1,064$
Donja toplotna moć goriva (mazuta)	$H_d = 42.827 \text{ kJ/kg}$
Energijski (termički) stepen korisnosti	$\eta_{pk} = 0,80 = 80\%$
Eksergijski stepen korisnosti	$\eta_{Ex} = 0,31 = 31\%$

Koristeći podatke iz gornje tabele i jednačine (5) i (15), energijska i eksergijska efikasnost (stepen korisnosti) parnog kotla na mazut izračunate su kao 80 % i 31 %.



Sl. 6. Energijski dijagram

Eksergijska efikasnost kotla ima niske vrijednosti usled nepovratnosti koja nastaje tokom procesa sagorijevanja i to je rezultat procesa transfera toplote sa plamena na vodu. Dijagram energijske ravnoteže prikazan je na slici 6.



Sl. 7. Eksergijski dijagram

Proučavanje eksergijskog dijagrama datog na slici 7 pokazuje da 69% od ukupne eksergije koja ulazi sistem biva izgubljeno, dok preostalih 31% biva iskorišćeno. Od toga, dva faktora utiču na eksergijsku efikasnost kotla: eksergijski

gubitak kroz prenos toplote od površine kotla i eksergijski gubitak kroz izduvne gasove. Najveći eksergijski gubitak nastaje od prenosa toplote koji čini 64%, dok ostatak nastaje kroz izduvne gasove.

Kako bi se povećala eksergijska efikasnost kotla, temperature izduvnih gasova moraju biti smanjene ili se izduvni gasovi moraju upotrebiti u sistemima za povratak toplote. Gubici toplote se mogu minimizirati optimizovanjem izolacije kotla.

LITERATURA

- [1] T. J. Kotas, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Kreiger P.C.M., Florida, 1995.
- [2] K. Wark, D. Richards, *Thermodynamics*, McGraw-Hill, 1999.
- [3] H. Požar, *Osnove energetike I*, Školska knjiga, Zagreb, 1992.
- [4] B. Udovičić, *Energetika*, Školska knjiga, Zagreb, 1992.
- [5] Z. Prelec, *Energetika u procesnoj industriji*, Školska knjiga, Zagreb, 1994.
- [6] B. Đorđević, V. Valent, *Termodinamika i termotehnika*, Građevinska knjiga, Beograd, 1991.
- [7] Đ. Kozčić, B. Vasiljević, *Priručnik za termodinamiku*, Mašinski fakultet, Beograd, 1991.
- [8] Lj. Brkić, T. Živanović, *Parni kotlovi*, Mašinski fakultet, Beograd, 2002.
- [9] Lj. Brkić, T. Živanović, *Termički proračun parnih kotlova*, Mašinski fakultet, Beograd, 2002.
- [10] M. Bogner, *Termotehničar*, Poslovna politika, Beograd, 1992.

ENERGY AND EXERGY ANALYSIS STEAM BOILER IN THE PROCESS INDUSTRY

ABSTRACT:

This paper presents the analysis of energy and exergy of steam boilers. The analysis is applied to the fuel oil burned steam boiler which was installed in an industrial plant „Riviera” Kotor. The aim of the study is to further illuminate the effectiveness or shortcomings of these methods in their application in the analysis of the efficiency of steam boilers.

Exergy analysis is the modern approach in the treatment of the energy process. By using a relatively simplified model of industrial energy processes, enabled the analysis of their performance on a more subtle way that does not address the processes of energy only in quantitative but also qualitative terms. This is primarily reflected in the application exergy analysis process.

The paper gives a comparative application of energy and exergy analysis process steam boiler fuel oil burned. The obtained results clearly indicate the benefits that result from exergy analysis, primarily pointing to the potential that is available for us in terms of improved efficiency of the boiler.

Key words: *steam boiler, energy, exergy, efficiency, process*

