

**ANALIZA PROCESA SAGORIJEVANJA ČISTOG UGLJA
U PARNOM KOTLU BLOKA 6 TERMOELEKTRANE „KAKANJ“**

**THE ANALYSIS OF COAL COMBUSTION PROCESS IN BLOCK 6
BOILER OF THE THERMAL POWER PLANT „KAKANJ“**

**Nedim Hodžić, Elma Ekinović, Almir Kahrman
Univerzitet u Zenici
Bosna and Hercegovina**

REZIME

Jedan od najjednostavnijih načina za proizvodnju električne energije jeste putem pretvaranja hemijske, odnosno toplotne energije goriva u električnu energiju. Za proizvodnju električne energije u Termoelektrani „Kakanj“ u Kaknju koriste se parni kotlovi (generatori pare) u kojima se kao gorivo koristi uglj. U ovom radu prezentirana je analiza procesa sagorijevanja uglja u parnom kotlu bloka 6 Termoelektrane „Kakanj“, čija su trenutna sigurnost, pouzdanost, raspoloživost i ekonomičnost nezadovoljavajuće. Na osnovu ulaznih podataka, koji obuhvataju parametre kotla i hemijski sastav goriva, analitički i grafički su dobijeni rezultati izlaznih karakteristika koji su predstavljeni u vidu h-t, h-s i T-s dijagrama. Krajnji cilj je bio dobijanje h-t dijagrama za različite vrijednosti koeficijenta viška zraka λ i izračunavanje teoretske snage kotla.

Ključne riječi: parni kotao, termoelektrana, sagorijevanje, električna energija

ABSTRACT

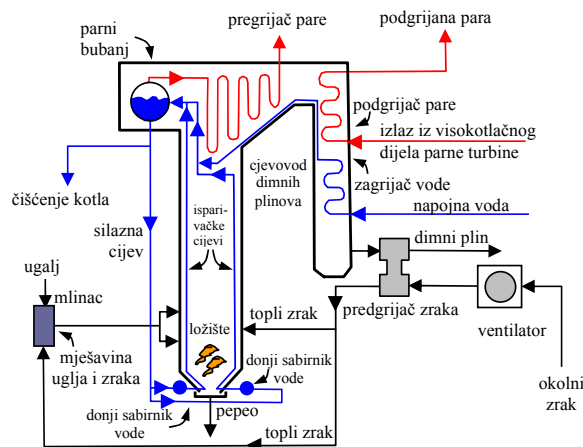
One of the easiest ways to produce electrical energy is by transformation of chemical i.e. fuel thermal energy to electrical energy. For electrical energy production in the Thermal Power Plant “Kakanj” boilers (steam generators) heated by coal combustion are used. In this paper, the analysis of coal combustion process in boiler of block 6 in the Thermal Power Plant “Kakanj” is presented, whose security, reliability, availability and efficacy are not satisfactory. Using the input data which refer to the boiler parameters and fuel chemical composition, the values of output characteristics are calculated and graphically presented in h-t, h-s i T-s diagrams. The final goal was to get h-t diagram for different values of air excess coefficient λ and calculation of theoretical boiler power.

Key words: boiler, thermal power plant, combustion, electrical energy

1. UVOD

Blok 6 Termoelektrane „Kakanj“ je kondenzacioni blok snage 110 MW koji je isporučen iz bivše ČSSR i pušten u rad 1977. godine. Blok je bio u pogonu ukupno 160 417 sati do 31.12.2007. godine. Tokom rata od 1992. do 1996. godine, blok je bio izvan pogona, ali je vršeno konzerviranje cijevnog sistema kotla suhim zrakom. Sadašnja sigurnost, pouzdanost, raspoloživost i ekonomičnost bloka 6 nisu zadovoljavajuće. Komponente koje rade na visokim temperaturama su u takvom stanju da se svaki čas može očekivati njihov otkaz, odnosno prestanak rada cijelog postrojenja. Bilansna (raspoloživa) snaga bloka iznosi 80 MW

i znatno je manja od projektirane vrijednosti. Prosječna snaga bloka na stezaljkama generatora u 2007. godini iznosila je 80,69 MW. Parni kotao bloka 6 u Termoelektrani „Kakanj“ projektiran je za nominalnu produkciju pare u iznosu od 375 t/h i snagu 110 MW, slika 1. Konstruktivno je kotao izveden s prirodnom cirkulacijom vode, tečnim odvođenjem šljake i trostrukim provjetravanjem. Zidovi ložišta su membranzirani. U okviru postrojenja kotla nalazi se šest mlinova čekićara u kojima se sušenje uglja vrši vrućim zrakom temperature 300-330°C na četiri etaže pomoću cijevnih zagrijača zraka.



Slika 1. Šematski prikaz parnog kotla bloka 6 u TE „Kakanj“

Kotao (generator pare) je projektiran za sagorijevanje mješavine mrkih ugljeva toplotne moći 9 800 do 16 700 kJ/kg, ukupne vlažnosti 8-26 %. U posljednje vrijeme koristi se mješavina različitih ugljeva sa približnim udjelima kako slijedi: kakanjski uglj 55%, uglj iz Breze 20%, zenički uglj 9%, gračanički uglj 7%, uglj iz Bile 3%, livanjski uglj 1% i banovički uglj 5%. Očekuje se da će se i u narednom periodu koristiti slična mješavina, [1].

Osnovni zadatak kotla jeste proizvodnja pare određenih termodinamičkih parametara (pritiska i temperature) i potrebnog masenog protoka. Energija potrebna za proizvodnju pare q_{kotla} jednaka je razlici entalpije pare na izlazu iz kotla h_{pare} i entalpije kondenzata na ulazu u kotao h_{kond} , odnosno: $q_{kotla} = h_{pare} - h_{kond}$.

Energija potrebna za pretvaranje kondenzata u paru dobija se pretvaranjem hemijske energije goriva u toplotnu energiju tokom procesa sagorijevanja. Ako je h_d donja toplotna moć goriva, a η_{kotla} stepen iskorištenja energije goriva pri njegovom sagorijevanju u ložištu, tada je potrebna količina goriva za navedeni proces

$$m_{goriva} = \frac{m_{pare} \cdot q_{kotla}}{h_d \cdot \eta_{kotla}} \quad \dots(1)$$

Kondenzat je niske temperature, tj. niskog energetskog potencijala i da bi se njegova temperatura što više približila temperaturi ključanja, radni medij se dogrijava u ekonomajzeru. Zagrijavanje kondenzata u ekonomajzeru najčešće obavljaju vrela dimni plinovi. Razmijenjena količina toplote u ekonomajzeru je određena promjenom entalpije radnog medija na ulazu i izlazu, tj. $q_{ek} = h_{izlaz-ek} - h_{ulaz-ek}$.

Na izlazu iz kotla, para je suhozasićena i, ukoliko je to dovoljno, ona se vodi na dalje korištenje. Ukoliko je potrebno imati paru pregrijanog stanja, tada se suhozasićena para uvodi u pregrijač pare i u jednom izobarnom procesu se pregrijava do tražene temperature. Energija potrebna za pregrijavanje jednaka je promjeni entalpije pare na izlazu i ulazu u pregrijač, pa slijedi da je: $q_{pr} = h_{izlaz-pr} - h_{ulaz-pr}$. Tehničko rješenje pregrijača pare je takvo da se toplotna energija vrelih dimnih plinova iskorištava za pregrijavanje suhozasićene pare [2].

2. PRORAČUN SAGORIJEVANJA

Tehnološki parametri parnog kotla prema [3] su: proizvodnja pare $D_1=350$ t/h, pritisak pare na izlazu iz kotla $p_1=135,5$ bar, a temperatura pare na izlazu iz kotla $t_1=540^\circ\text{C}$. Proračun je vršen za sagorijevanje čistog uglja toplotne moći $h_d=12\,774$ kJ/kg i hemijskog sastava, prema [1]: 33,05% C, 3,11% H, 7,5% O, 0,3% N, 2,14% S, 43,09% A i 9,88% W.

Cilj proračuna sagorijevanja je bio dobijanje $h-t$ dijagrama za različite koeficijente viška zraka, konkretno za: $\lambda=1, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8$ i 2. Pored navedenog, urađen je i proračun specifičnih toplota i entalpija pojedinih komponenti produkata sagorijevanja u zavisnosti od temperature, a na osnovu izraza za specifičnu toplotu u vidu polinoma drugog reda u funkciji od temperature i na osnovu koeficijenata u Tabeli 1. U radu su, također, definirana termodinamička stanja toplotnog rada kotla i dati prikazi $T-s$ i $h-s$ dijagrama za temperaturu napojne vode kotla u iznosu 150°C .

Tabela 1. Empirijski koeficijenti polinoma specifične toplote $c_p = a + bT + cT^2$ [kJ / molK], prema [2]

Komponenta	a , kJ/kmolK	$b \cdot 10^3$, kJ/kmol K^2	$c \cdot 10^6$, kJ/kmol K^3	M , kg/kmol
Zrak	26,719	7,372	-1,1113	28,964
N_2	27,016	5,811	-2,87	28,01
O_2	25,593	13,251	-4,205	32,00
H_2O	29,857	11,046	0,192	18,02
SO_2	31,163	33,394	-10,726	64,02
CO_2	27,286	38,469	-11,262	44,05

2.1. Proračun sagorijevanja čistog uglja

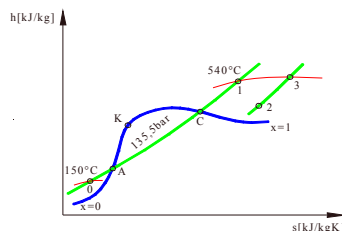
a) Količina toplote koja se predaje radnom mediju data je sljedećim izrazom

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_1 - h_0), \quad \dots(2)$$

gdje su: \dot{m} - maseni protok pare, h_1 - entalpija za stanje 1, a h_0 - entalpija za stanje 0.

Maseni protok pare (proizvodnja pare) jednak je zadatoj vrijednosti $D_1=350$ t/h, odnosno

$$\dot{m}_{pare} = 350 \text{ t/h} = 97,22 \text{ kg/s} = G_{pare}. \quad \dots(3)$$



Slika 2. $h-s$ dijagram

Vrijednosti entalpije h_0 i h_1 za stanja 0 i 1, a u zavisnosti od temperature i pritiska, dobijaju se na osnovu $h-s$ dijagrama, koji je prikazan na slici 2. Iz tabela za termodinamičke veličine stanja vode i pregrijane vodene pare [2], linearnom interpolacijom se dobivaju vrijednosti:

- entalpija h_1 za temperaturu $t_1=540^\circ\text{C}$ i za pritisak $p_1=135,5$ bar se dobije interpolacijom vrijednosti $h_V=3475,1$ kJ/kg (za $p_V=100$ bar) i $h_M=3420,9$ kJ/kg (za $p_M=150$ bar), odnosno:

$$h_1 = h_V + \frac{h_M - h_V}{p_M - p_V} (p_1 - p_V) = 3475,1 + \frac{3420,9 - 3475,1}{150 - 100} (135,5 - 100) = 3436,6 \text{ kJ/kg.} \quad \dots(4)$$

- entalpija h_0 za temperaturu napojne vode na ulazu u kotao $t_0=150^\circ\text{C}$ i za pritisak $p_0=135,5$ bar se dobije interpolacijom vrijednosti entalpija $h_V=638,2$ kJ/kg (za $p_V=100$ bar) i $h_M=641,35$ kJ/kg (za $p_M=150$ bar), odnosno:

$$h_0 = h_V + \frac{h_M - h_V}{p_M - p_V} (p_1 - p_V) = 638,2 + \frac{641,35 - 633,2}{150 - 100} (135,5 - 100) = 640,4 \text{ kJ/kg.} \quad \dots(5)$$

Prema tome, količina toplote koja se predaje radnom mediju iznosi

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_1 - h_0) = 97,22 (3436,6 - 640,4) = 271\,846,6 \text{ kW.} \quad \dots(6)$$

b) Toplota dobijena sagorijevanjem goriva treba biti veća od toplote koja se predaje radnom mediju zbog gubitaka, tako da za stepen iskorištenja kotla $\eta_k=0,903$, prema [3], iznosi

$$\dot{Q}_{1U} = \dot{Q} / \eta_k = 271\,846,6 / 0,903 = 301\,048,28 \text{ kW.} \quad \dots(7)$$

c) Potrošnja uglja se može izračunati kao odnos toplote dobijene sagorijevanjem uglja i njegove donje toplotne moći, to jest

$$G_U = \dot{Q}_{1U} / h_{d,U} = 301\,048,28 / 12\,774 = 23,567 \text{ kg/s.} \quad \dots(8)$$

d) Specifična potrošnja uglja po kilogramu pare dobija se kao odnos potrošnje uglja i masenog protoka pare, odnosno

$$x_U = G_U / G_{pare} = 23,567 / 97,22 = 0,242 \text{ kg(uglja)/kg(pare).} \quad \dots(9)$$

e) Udio toplote dobijen sagorijevanjem uglja se može dobiti na osnovu količine toplote dobijene sagorijevanjem uglja koja iznosi

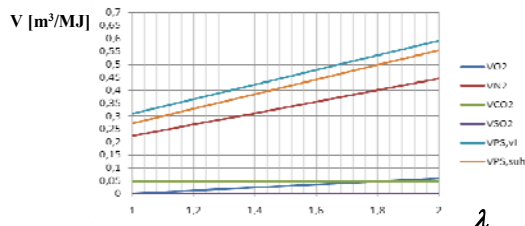
$$q_U = x_U \cdot h_{d,U} = 0,242 \cdot 12\,774 = 3091,3 \text{ kJ/ kg(pare),} \quad \dots(10)$$

i jednak je

$$y_U = q_U / q_{UK} = q_U / q_U = 1. \quad \dots(11)$$

2.1.1. Proračun količine pojedinih komponenti u gasovitim produktima sagorijevanja

Količine pojedinih komponenti u gasovitim produktima sagorijevanja mogu se proračunati pomoću posebnih obrazaca iz literature [4] i date su u Tabeli 2. Korištenjem izračunatih pojedinih količina komponenti u gasovitim produktima sagorijevanja konstruirani su dijagrami zavisnosti pojedinih količina komponenti od promjene koeficijenta viška zraka λ , slika 3.



Slika 3. Udjeli komponenti u produktima sagorijevanja u zavisnosti od koeficijenta viška zraka λ

Tabela 2. Količine pojedinih komponenti u gasovitim produktima sagorijevanja uglja

Komponenta	Količina (m ³ /kg)	
KISIK (O ₂)	Minimalna količina, m ³ /kg	$O_{2,min,U} = \frac{1}{100} \left[1,87C + 5,6 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 0,7S \right] =$ $= \frac{1}{100} \left[1,87 \cdot 33,05 + 5,6 \left(3,11 - \frac{7,5}{8} \right) + 0,7 \cdot 2,14 \right] = 0,7547$
	Količina u produktima sagorijevanja uglja, m ³ /kg	$V_{O_2,U} = (\lambda - 1)O_{2,min,U} = (1,3 - 1) \cdot 0,7547 = 0,2264$
	Količina u gasovitim produktima sagorijevanja, m ³ /kJ	$V_{O_2} = \frac{V_{O_2,U}}{h_{d,U}} y_{UP} = \left \frac{za}{\lambda = 1,3} \right = \frac{0,2264}{12\,774} \cdot 1 = 0,01772 \cdot 10^{-3}$
DUŠIK (N ₂).	Količina u produktima sagorijevanja uglja, m ³ /kg	$V_{N_2,U} = \frac{0,8}{100} N + \lambda \frac{1-a}{a} O_{2,min,U} = \left \frac{za}{\lambda = 1,3} \right =$ $= \frac{0,8}{100} \cdot 0,3 + 1,3 \cdot \frac{1-0,21}{0,21} \cdot 0,7547 = 3,6932$
	Količina u gasovitim produktima sagorijevanja, m ³ /kJ	$V_{N_2} = \frac{V_{N_2,U}}{h_{d,U}} y_{UP} = \left \frac{za}{\lambda = 1,3} \right = \frac{3,6932}{12\,774} \cdot 1 = 0,289 \cdot 10^{-3}$
UGLJEN- DIOKSID (CO ₂)	Količina u produktima sagorijevanja uglja, m ³ /kg	$V_{CO_2,U} = \frac{1,87}{100} \cdot C = \frac{1,87}{100} \cdot 33,05 = 0,618$
	Količina u gasovitim produktima sagorijevanja, m ³ /kJ	$V_{CO_2} = \frac{V_{CO_2,U}}{h_{d,U}} y_{UP} = \frac{0,618}{12\,774} \cdot 1 = 0,0484 \cdot 10^{-3}$
SUMPOR- DIOKSID (SO ₂)	Količina u produktima sagorijevanja uglja, m ³ /kg	$V_{SO_2,U} = \frac{0,7}{100} \cdot S = \frac{0,7}{100} \cdot 2,14 = 0,01498$
	Količina u gasovitim produktima sagorijevanja, m ³ /kJ	$V_{SO_2} = \frac{V_{SO_2,U}}{h_{d,U}} y_{UP} = \frac{0,01498}{12\,774} \cdot 1 = 0,001173 \cdot 10^{-3}$
VODENA PARA (H ₂ O)	Količina u produktima sagorijevanja uglja, m ³ /kg	$V_{H_2O,U} = \frac{1,244}{100} (9H + W) = \frac{1,244}{100} (9 \cdot 3,11 + 9,88) = 0,4711$
	Količina u gasovitim produktima sagorijevanja, m ³ /kJ	$V_{H_2O} = \frac{V_{H_2O,U}}{h_{d,U}} y_{UP} = \frac{0,4711}{12\,774} \cdot 1 = 0,03688 \cdot 10^{-3}$

2.1.2. Proračun ukupne količine vlažnih i suhih produkata sagorijevanja čistog uglja

Ukupne količine vlažnih i suhih produkata sagorijevanja čistog uglja date se u tabeli 3.

Tabela 3. Ukupne količine vlažnih i suhih produkata sagorijevanja čistog uglja

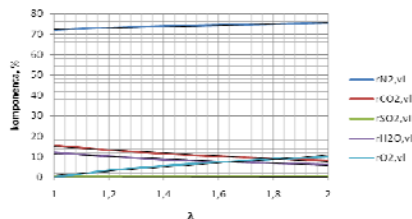
1. Količina vlažnih produkata sagorijevanja uglja	$V_{PS,U,vl} = \sum V_i = V_{O_2,U} + V_{N_2,U} + V_{CO_2,U} + V_{SO_2,U} + V_{H_2O,U} =$ $= za \lambda = 1,3 = 0,2254 + 3,6932 + 0,618 + 0,01498 + 0,4711 =$ $= 5,02368 \text{ m}^3(\text{ps})/\text{kg}(\text{uglja})$
2. Količina suhih produkata sagorijevanja uglja	$V_{PS,U,suh} = V_{PS,U,vl} - V_{H_2O,U} = za \lambda = 1,3 =$ $= 5,02368 - 0,4711 = 4,55258 \text{ m}^3(\text{ps})/\text{kg}(\text{uglja})$
3. Količina vlažnih produkata u gasovitim produktima sagorijevanja	$V_{PS,vl} = \frac{V_{PS,U,vl}}{h_{d,U}} y_{UP} = za \lambda = 1,3 = \frac{5,02368}{12\,774} \cdot 1 = 0,3942 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kJ}$
4. Količina suhih produkata u gasovitim produktima sagorijevanja	$V_{PS,suh} = \frac{V_{PS,U,suh}}{h_{d,U}} y_{UP} = za \lambda = 1,3 = \frac{4,55258}{12\,774} \cdot 1 =$ $= 0,35723 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kJ}$

2.1.3. Zapreminski udjeli u suhim i vlažnim produktima sagorijevanja goriva

Zapreminski udjeli komponente k u suhim i vlažnim produktima sagorijevanja nalaze se iz:

$$r_{k,suh} = \frac{V_k}{V_{PS,suh}} \cdot 100\% = \frac{V_k}{0,35723} \cdot 100\% \quad \text{i} \quad r_{k,vl} = \frac{V_k}{V_{PS,vl}} \cdot 100\% = \frac{V_k}{0,3942} \cdot 100\% \quad \dots(12)$$

Koristeći količine komponenti u gasovitim produktima sagorijevanja iz Tab. 3, izračunate su za $\lambda=1,3$ vrijednosti zapreminskih udjela komponente k u suhim i vlažnim produktima sagorijevanja goriva, Tabela 4. Udio dušika u vlažnim produktima sagorijevanja goriva je najveći (preko 73%) i on srazmjerno raste sa povećanjem vrijednosti koeficijenta viška zraka, što se i vidi na slici 4.



Slika 4. Zapreminski udjeli komponenti u vlažnim produktima sagorijevanja u zavisnosti od koeficijenta viška zraka λ

Tabela 4. Zapreminski udjeli u suhim i vlažnim produktima sagorijevanja (PS) goriva za $\lambda=1,3$

	r_{O_2}	r_{N_2}	r_{CO_2}	r_{SO_2}	r_{H_2O}
U suhim PS	4,96 %	80,9 %	13,549 %	0,328 %	-
U vlažnim PS	4,495 %	73,313 %	12,278 %	0,298 %	9,356 %

2.1.4. Potrebna količina zraka za sagorijevanje

Potrebna količina zraka (potrošnja) po različitim aspektima data je u Tabeli 5, a potrošnja zraka po kilogramu pare u zavisnosti od koeficijenta viška zraka λ data je u Tabeli 6.

Tabela 5. Potrebna količina zraka, odnosno potrošnja zraka po različitim aspektima

1. Ukupna potrošnja zraka po kg(pare)	$V_{ZR} = \lambda \cdot \frac{O_{2,min,U}}{a} \cdot x_U = za \lambda = 1,3 = 1,3 \cdot \frac{0,7547}{0,21} \cdot 0,242 = 1,1306 \text{ m}^3/\text{kg}(\text{pare}).$
2. Ukupna potrošnja zraka po kg(goriva)	$V_{ZR} = \lambda \cdot \frac{O_{2,min,U}}{a} \cdot y_U = za \lambda = 1,3 = 1,3 \cdot \frac{0,7547}{0,21} \cdot 1 = 4,672 \text{ m}^3/\text{kg}(\text{goriva})$
3. Satna potrošnja zraka	$\dot{V}_{ZR} = V_{ZR} \cdot G_{pare} \cdot 3600 = 1,1306 \cdot 97,22 \cdot 3600 = 395\,700,9552 \text{ m}^3/\text{h}.$
4. Potrošnja sekundarnog zraka	$\dot{V}_{ZR,sek} = \dot{V}_{ZR}(1 - r_{ZR,prim}) = \left \begin{matrix} za \ r_{ZR,prim} = 40\% \\ \lambda = 1,3 \end{matrix} \right = \dot{V}_{ZR}(1 - 0,4) = \dot{V}_{ZR} \cdot 0,6 = 237\,420,5731 \text{ m}^3/\text{h}.$
5. Ukupna potrošnja primarnog zraka	$\dot{V}_{ZR,prim} = \dot{V}_{ZR} \cdot r_{ZR,prim} = \left \begin{matrix} za \ r_{ZR,prim} = 40\% \\ \lambda = 1,3 \end{matrix} \right = \dot{V}_{ZR} \cdot 0,4 = 158\,280,3821 \text{ m}^3/\text{h}.$
6. Potrošnja primarnog zraka koji se dovodi sa ugljem	$(\dot{V}_{ZR,prim})_{UG} = \dot{V}_{ZR} \cdot 1,0 = za \lambda = 1,3 = \dot{V}_{ZR} = 395\,700,9552 \text{ m}^3/\text{h}.$

Tabela 6. Potrošnja zraka po kilogramu pare u zavisnosti od koeficijenta viška zraka λ

	λ					
	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$V_{ZR}, \text{m}^3/\text{kg}(\text{pare})$	0,869702	1,043642	1,217583	1,391523	1,565463	1,739404

2.1.5. Entalpije produkata sagorijevanja

Entalpija produkata sagorijevanja uglja je data izrazom

$$h_u = \sum h_{i,u} = \left[\sum V_i \cdot c_{p,i} \right] \cdot t, \text{ kJ/kg.} \quad \dots(13)$$

Specifični toplotni kapacitet pojedinih komponenti računa se pomoću izraza iz [2]:

$$c_{p,i} = (a + bT + cT^2) / V_m, \text{ kJ/m}^3\text{K}, \quad \dots(14)$$

a srednji specifični toplotni kapacitet pojedinih komponenti (Tabela 7) računa se po formuli

$$c_{p,i,sr} = \frac{1}{V_m} \frac{1}{T - T_0} \int (a + bT + cT^2) dT = \frac{1}{V_m} \left[a + \frac{b}{2}(T + T_0) + \frac{c}{3}(T^2 + T \cdot T_0 + T_0^2) \right], \quad \dots(15)$$

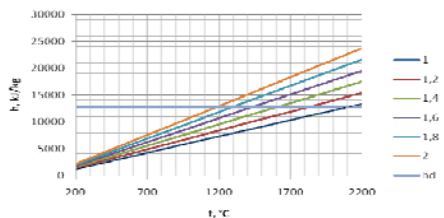
gdje su: $V_m=22,4 \text{ m}^3/\text{kmol}$ -molarni volumen idealnog plina; $T=2473^\circ\text{K}$ -temperatura produkata sagorijevanja, $T_0=273^\circ\text{K}$ -temperatura okoline; a, b, c -koeficijenti polinoma iz Tabele 1.

Tabela 7. Srednji specifični toplotni kapacitet pojedinih komponenti računat prema jednačini (15)

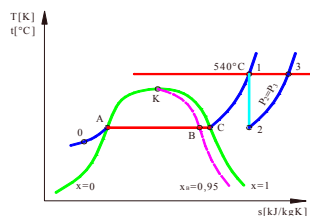
C_{p,O_2} , kJ/m ³ K	C_{p,N_2} , kJ/m ³ K	C_{p,CO_2} , kJ/m ³ K	C_{p,SO_2} , kJ/m ³ K	C_{p,H_2O} , kJ/m ³ K
1,52	1,26	2,42	2,34	2,03

Tabela 8. Entalpije produkata sagorijevanja za čisti uglj u zavisnosti od koeficijenta viška zraka λ

T (°C)	Entalpije produkata sagorijevanja, h (kJ/kg)					
	$\lambda=1$	$\lambda=1,2$	$\lambda=1,4$	$\lambda=1,6$	$\lambda=1,8$	$\lambda=2,0$
200	1213,468	1402,445	1591,421	1780,398	1969,375	2158,352
600	3640,404	4207,334	4774,264	5341,195	5908,126	6475,057
1000	6067,34	7012,223	7957,107	8901,992	9846,876	10 791,76
1400	8494,275	9817,112	11139,95	12 462,79	13 785,63	15 108,47
1800	10 921,21	12 622	14 322,79	16 023,59	17 724,38	19 425,17
2200	13 348,15	15 426,89	17 505,64	19 584,38	21 663,13	23 741,87



Slika 5. Dijagram h-t produkata sagorijevanja čistog uglja u zavisnosti od koeficijenta viška zraka λ



Slika 6. T-s dijagram

Entalpija produkata sagorijevanja uglja iznosi

$$h_u = \sum h_{i,u} = (\sum V_i \cdot c_{p,i}) \cdot t = (V_{O_2,u} \cdot c_{p,O_2} + V_{N_2,u} \cdot c_{p,N_2} + V_{CO_2,u} \cdot c_{p,CO_2} + V_{SO_2,u} \cdot c_{p,SO_2} + V_{H_2O,u} \cdot c_{p,H_2O}) \cdot t$$

$$h_u = (0,2264 \cdot 1,52 + 3,6932 \cdot 1,26 + 0,618 \cdot 2,42 + 0,01498 \cdot 2,34 + 0,4711 \cdot 2,03) \cdot 200 = 1496,9 \text{ kJ/kg}. \quad \dots(16)$$

Ukupna entalpija produkata sagorijevanja je

$$h_{ps} = h_u \cdot Y_u = 1496,9 \cdot 1,0 = 1496,9 \text{ kJ/kg}. \quad \dots(17)$$

Donja toplotna moć iznosi

$$h_d = h_{d,u} \cdot Y_u = 12 774 \cdot 1,0 = 12 774 \text{ kJ/kg}. \quad \dots(18)$$

U tabeli 8 date su entalpije produkata sagorijevanja za čisti uglj u zavisnosti od koeficijenta viška zraka λ . Dijagram $h-t$ produkata sagorijevanja čistog uglja u zavisnosti od koeficijenta viška zraka λ prikazan je na slici 5, a dijagrami $h-s$ i $T-s$ prikazani su na slikama 2. i 6.

2.1.6. Termodinamička stanja toplotnog rada kotla

Na osnovu izračunatih vrijednosti i vrijednosti pojedinih parametara koji se očitavaju sa $h-s$ i $T-s$ dijagrama, pomoću linearne interpolacije za zasićena stanja i stanje pregrijane pare, prema [2], određena su pojedinačno termodinamička stanja (0,A,B,C,1,2,3) toplotnog rada parnog kotla na bloku 6, tabela 9. Snaga kotla je jednaka ukupnoj toploti koja se predaje radnom mediju, pa prema tome iznosi

$$P = \dot{Q} = \dot{m} (h_1 - h_0) = 97,22 (3436,6 - 640,4) = 271\,846,6 \text{ kW} = 271,8 \text{ MW}. \quad \dots(19)$$

Tabela 9. Parametri karakterističnih termoenergetskih stanja

	Poznati parametri stanja	Parametri stanja određeni interpolacijom
TAČKA 0	$t_0=150 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_0=135 \text{ bar}$, $h_0=640,4 \text{ kJ/kg}$	$s_0=1,8265015 \text{ kJ/kg}$ $v_0=0,001082342 \text{ m}^3/\text{kg}$
TAČKA A	$p_0=135,5 \text{ bar}$	$t_A=333,99 \text{ }^\circ\text{C}$, $v_A=0,0015912 \text{ m}^3/\text{kg}$ $h_A=1553,115 \text{ kJ/kg}$, $s_A=3,59465 \text{ kJ/kgK}$
TAČKA C	$t_0=333,99 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_0=135,5 \text{ bar}$	$v_C=0,012066 \text{ m}^3/\text{kg}$, $h_C=2648,8 \text{ kJ/kg}$, $s_C=5,399 \text{ kJ/kgK}$
TAČKA B	$t_B=333,99 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_B=135,5 \text{ bar}$, $x_B=0,95$	$v_B=0,01154226 \text{ m}^3/\text{kg}$ $h_B=2594,01575 \text{ kJ/kg}$, $s_B=5,3087825 \text{ kJ/kgK}$
TAČKA 1	$t_1=540 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_1=135,5 \text{ bar}$, $h_1=3436,6 \text{ kJ/kg}$	$v_1=0,026127 \text{ m}^3/\text{kg}$, $s_1=6,6444498 \text{ kJ/kgK}$
TAČKA 2	$t_2= t_A= t_B= t_C= 333,99 \text{ }^\circ\text{C}$, $s_2=s_1=6,6444498 \text{ kJ/kg}$	$p_2=32,4859 \text{ bar}$, $v_2=0,082912524 \text{ m}^3/\text{kg}$, $h_2=3071,148559 \text{ kJ/kgK}$
TAČKA 3	$t_3= t_1= 540 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_3=p_2=32,4859 \text{ bar}$	$v_3=0,116439035 \text{ m}^3/\text{kg}$ $h_3=3543,708903 \text{ kJ/kg}$, $s_3=7,315486584 \text{ kJ/kgK}$

3. ZAKLJUČAK

Na osnovu izvršene analize procesa sagorijevanja čistog uglja, visi se da dobijena teoretska snaga (271,8 MW) približno odgovara stvarnoj snazi (272,2 MW) parnog kotla bloka 6 u Termoelektrani „Kakanj“. Također, na osnovu $h-t$ dijagrama, može se zaključiti da za različite vrijednosti koeficijenta viška zraka λ , vrijednost entalpije h raste sa porastom temperature t . Na osnovu $T-s$ dijagrama, može se uočiti da proces sagorijevanja goriva u parnom kotlu bloka 6 odgovara najjednostavnijem termoenergetskom ciklusu sa međupregrijavanjem pare, čime je ujedno poboljšan stepen iskorištenja kotla, kao i ukupni stepen iskorištenja čitavog termoenergetskog postrojenja.

4. LITERATURA

- [1] JP Elektroprivreda BiH d.d. Sarajevo, Tender za revitalizaciju bloka 6: - Kotao, parovod, sistem upravljanja i građevinski objekti, Kakanj, decembar 2008.,
- [2] Neimarlija N., Termodinamika, Dom štampe, Zenica, 2001.,
- [3] Mankova, Hudeček: Specifikacija proračuna za kotao bloka 6 u Termoelektrani „Kakanj“, Kakanj, avgust 2010.,
- [4] Neimarlija N.: Fosilna goriva, procesi sagorijevanja i okolinski aspekti, Mašinski fakultet, Zenica, juli 2007.