

POVEĆANJE STEPENA KORISNOSTI KOTLA KONTRLOLOM PROCESA SAGOREVANJA I KORIŠĆENJEM GORNJE TOPLOTNE MOĆI GORIVA

Prof. dr. Vladan Karamarković, dipl. ing. Mašinski fakultet Kraljevo
Marašević Miljan, dipl. ing, asistent prip. Mašinski fakultet Kraljevo
Karamarković Rade, dipl. ing. asistent prip. Mašinski fakultet Kraljevo

Rezime

U radu je izvršena analiza korišćenja fizičke toplove gasovitih produkata za povećanje stepena korisnosti kotla i smanjenje emisije štetnih polutanata. Rezultati analize su pokazali da se korišćenjem gornje topločne moći goriva stepen korisnosti kotla može povećati do 16%.

Ključne reči

Kotao, gorivo, gornja topločna moć, emisija.

1. UVOD

Fizička toploča gasovitih produkata termičkih postrojenja je danas jedan od najneiskorišćenijih izvora otpadne toplove. Uslovljena je postojanjem razlike entalpija gasovitih produkata i okoline, a određena vrstom goriva (količina i sastav gasovitih produkata sagorevanja) izborom ložišta i načinom vođenja procesa sagorevanja (višak vazduha) i temperaturom produkata. Održavanje definisane temperature produkata i koeficijenta viška vazduha pri sagorevanju za odgovarajuću vrstu goriva omogućava postizanje željenog stepena korisnosti. Eksperimentalni podaci dobijeni pri određivanju materijalnog i topločnog bilansa kotla pokazuju da i pored postojanja relativno jeftine opreme za kontrolu procesa sagorevanja, emisioni parametri odstupaju od projektovanih, veličina uslovljavajući povećanu potrošnju goriva i prekoračenje maksimalno dozvoljenih emisionih vrednosti štetnih polutanata.

Pri određivanju topločnog bilansa konvencionalnih kotlova, stepen korisnosti se svodi na donju topločnu moć goriva, pri čemu se ne uzima u obzir i deo toplove kondenzacije vodene pare sadržane u gasovitim produktima. A poznato je da gornja topločna moć predstavlja energetski potencijal goriva. Razvoj novih materijala otpornih na hemijsku i mehaničku abraziju i njihovo korišćenje za izradu savremenih kotlova, odnosno rekuperativnih i regenerativnih razmenjivača za korišćenje otpadne toplove, omogućavaju sniženje temperature gasovitih produkata ispod temperature tačke rose. Primena gornje topločne moći pored smanjenja potrošnje toplove i povišenja stepena korisnosti omogućava i smanjenje emisije štetnih polutanata, odnosno zadovoljenje sve strožijih kriterijuma zaštite životne sredine.

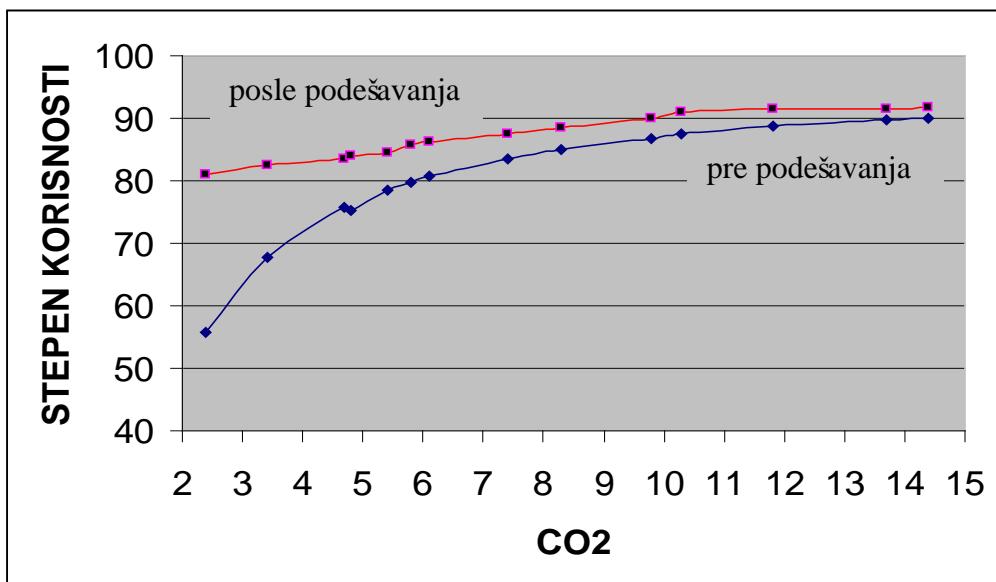
2. KONTROLA PROCESA SAGOREVANJA

Za analitičko određivanje topločnog gubitka sadržanog u fizičkoj toploči produkata koristi se izraz:

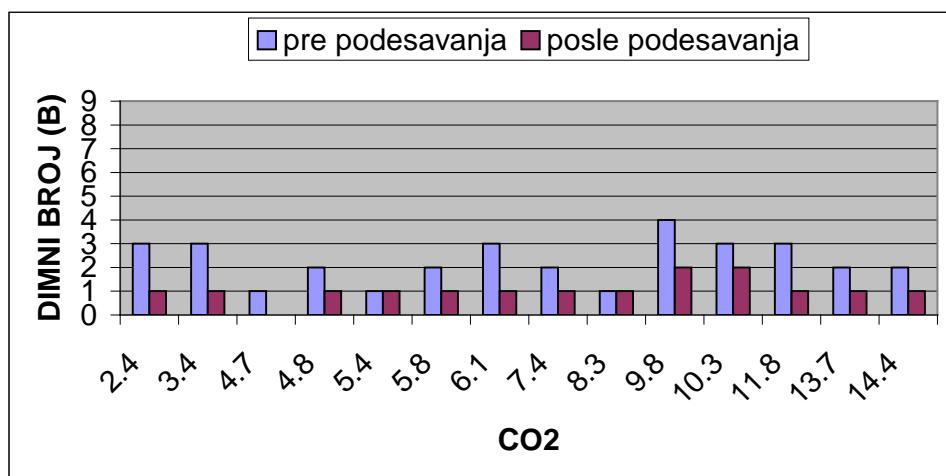
$$U_p = \eta_g \cdot \frac{V_{vp} \cdot C_{pvp} \cdot (T_p - T_L)}{Hd}(1)$$

U eksploatacionim uslovima neophodno je održavati projektnu temperaturu gasovitih produkata (T_p) i koeficijent viška vazduha (λ).

Povišena temperatura gasovitih produkata uslovljava povećanje toplotnog gubitka sadržanog u fizičkoj topoti i smanjuje stepen korisnosti kotla. Kod kovencionalnih kotlova, temperatura produkata se nalazi u granicama između 130 °C i 150 °C. Niže temperature produkata uslovljavaju pojavu kondenzacije dela gasovitih produkata, što se negativno odražava na vek postrojenja (izražena korozija i hemijska abrazija konvektivnih grejnih površina). Povećani koeficijent viška vazduha uslovljava više negativnih posledica. Povećana zapremina gasovitih produkata (1) neposredno smanjuje stepen korisnosti i stvarnu temperaturu sagorevanja. Niža stvarna temperatura sagorevanja smanjuje razmenjenu količinu toplote zračenjem, a povećana brzina produkata, uslovljena povećanjem zapremskog protoka, intenzivira toplotno opterećenje konvektivnih grejnih površina i porast temperature produkata, smanjujući stepen korisnosti kotla. Na slici 1. i slici 2. predstavljeni su pokazatelji rada vodogrejnih kotlova na tečno gorivo toplotnih kapaciteta od 10 MW do 15 MW. Korišćeni su eksperimentalni podaci kontrole procesa sagorevanja vršenih od strane Mašinskog fakulteta u Kraljevu.



Slika 1. Stepen korisnosti vodogrejnog kotla pre i posle regulisanja procesa sagorevanja.



Slika 2. Smanjenje dimnog broja regulisanjem procesa sagorevanja

Savremena tehnička rešenja energetskih postrojenja omogućavaju održavanje projektnih veličina (T_p , λ , CO, NO_x) kontinualnim merenjem emisionih parametara i regulisanjem procesa sagorevanja.

3. KORIŠĆENJE GORNJE TOPLOTNE MOĆI GORIVA

Voda u produktima sagorevanja može biti u tečnom ili gasovitom stanju, zbog čega su definisane gornja i donja topotna moć, veličine koje se razlikuju za topotu isparavanja vode koja se nalazi u gorivu kao njegov sastavni deo ili je dobijena pri njegovom sagorevanju. Pri definisanju gornje topotne moći, vodena para u produktima sagorevanja se nalazi u tečnom stanju na temperaturi koju je gorivo imalo na početku procesa sagorevanja.

Tabela 1. Povećanje stepena korisnosti kotla korišćenjem topote kondenzacije vodene pare

	Hd $\left[\frac{kJ}{kg}, \frac{kJ}{m_N^3} \right]$	Hg $\left[\frac{kJ}{kg}, \frac{kJ}{m_N^3} \right]$	$\frac{Hg - Hd}{Hd} \cdot 100$ [%]	$\frac{Hg - Hd}{Hd} \cdot 100 \cdot \epsilon$ [%]
Zemni gas 1	36247	40281	11.13	8.9
Zemni gas 2	31788	35208	10.76	8.61
Ekstra lako ulje	36288	38088	4.96	3.97
Dizel gorivo	41843	44715	6.86	5.49
Mazut	40472	42808	5.77	4.62

Vrednosti za gornju odnosno donju topotnu moć goriva neposredno su definisane elementarnim sastavom goriva. Povećana koncentracija vodonika u gorivu uslovljava veću razliku između H_g i H_d , odnosno omogućava znatnije povećanje stepena korisnosti korišćenjem topote isparavanja sadržane u gasovitim produktima (Tabela 1.). Analiza primene gornje topotne moći goriva za smanjenje topotnog gubitka sadržanog u fizičkoj topoti produkata izvršena je za gasovito gorivo, zbog njegovih prednosti u odnosu na tečno i čvrsto gorivo. U gasovitom gorivu se u zavisnosti od vrste nalazi do 17 % vodonika, što značajno povećava razliku između gornje i donje topotne moći.

Povećana koncentracija vodonika u gorivu uslovljava povećanje temperature tačke rose, što se pozitivno odražava na pojavu kondenzacije vodene pare pri višim temperaturama. Za grafičko predstavljanje zavisnosti temperature tačke rose vodene pare od koeficijenta viška vazduha, odnosno zapreminske koncentracije ugljen dioksida (slika 3.), korišćena je aproksimativna zavisnost:

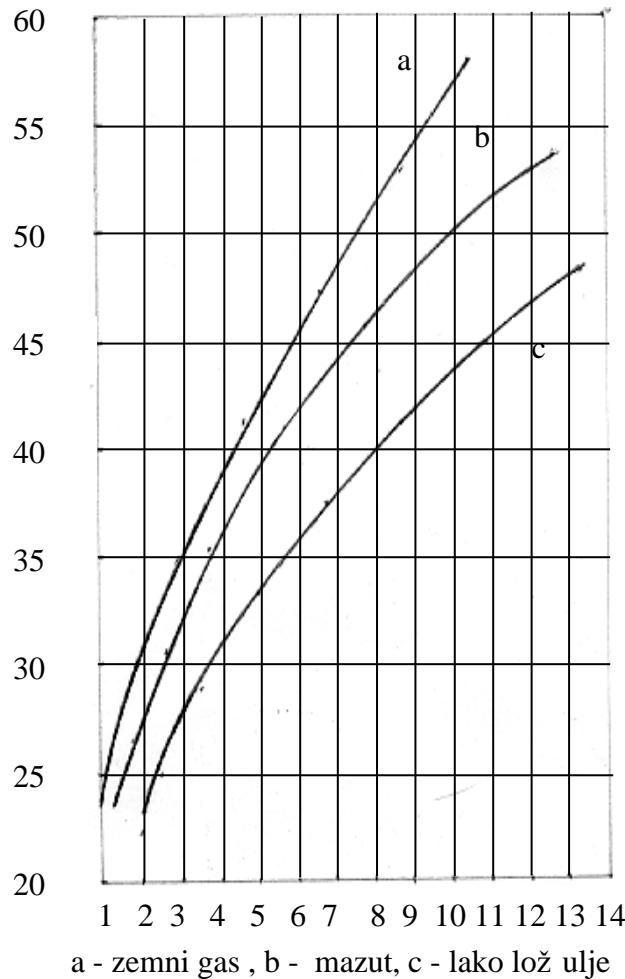
$$t_r = 37,6 \log (250 X_{H2O}).$$

Tačnost dobijenih rezultata je $\pm 0,1 ^\circ C$.

Najveća prednost gasovitog goriva u poređenju sa tečnim i čvrstim je što ne sadrži sumpor. Oksid sumpora nastao sagorevanjem tečnog ili čvrstog goriva u kontaktu sa vodom stvara sumpornu odnosno sumporastu kiselinu različitih koncentracija uslovljavajući intenzivnu koroziju i hemijsku abraziju grejnih površina kotla, odnosno primenjenih razmenjivača topote. Za potpunu zaštitu grejnih površina od mehaničke i hemijske abrazije razvijaju se novi kompozitni materijali, čija se primena na sadašnjem tehničkom nivou pokazuje neekonomičnom.

4. POVEĆANJE STEPENA KORISNOSTI KOTLA

Pri korišćenju gornje toplotne moći goriva ne ograničava se temperatura produkata, odnosno



Slika 3. Odredivanje temperature tačke rose

Veća vrednost kondenznog broja utiče na smanjenje toplotnog gubitka sadržanog u fizičkoj toploti produkata, odnosno uslovljava povećanje stepena korisnosti kotla. Maksimalna vrednost kondenznog broja je $\varepsilon = 1$.

Kondenzni broj definišu više parametara od kojih su najznačajniji:

- Konstrukcione karakteristike konvektivnih suvih površina kotla, odnosno primjenjenog ramenjivača toplote.
- Koeficijent viška vazduha pri sagorevanju.
Niža vrednost koeficijenta viška vazduha uslovljava povićenje tačke rose vodene pare.
- Režim rada kotla.
- Temperatura povratne vode.

Niža temperatura povratne vode uslovljava povećanje kondenznog broja.

U zavisnosti od specifičnog toplotnog opterećenja, povišenje stepena korisnosti kotla primenom gornje toplotne moći goriva se menja u granicama od 5,6 % do 14,8 % (slika 4). Naknadnim korišćenjem otpadne toplote za predgrevanje vazduha za sagorevanje kriva stepena korisnosti postaje približno konstantna bez obzira na specifično toplotno opterećenje kotla, a povišenje stepena korisnosti se menja u granicama od 15% do 16% (slika 5.).

teži se da ona bude što niža. Sniženje temperature produkata ispod temperature tačke rose vodene pare stvara dva pozitivna efekta koji povećavaju stepen korisnosti kotla:

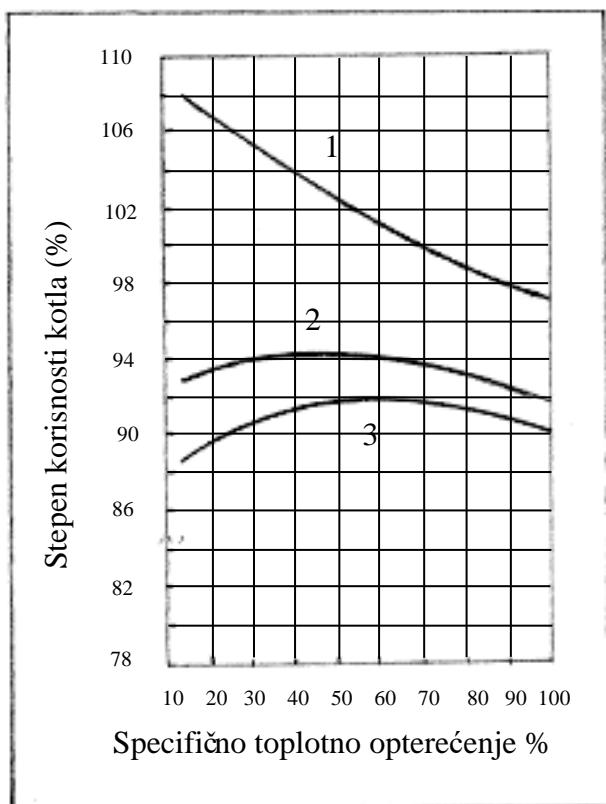
- korišćenje topline isparavanja,
- smanjenje toplotnog gubitka sadržanog u gasovitim produktima.

Kvantitativni pokazatelji povećanja stepena korisnosti predstavljeni su na slici 4. odnosno slici 5.

Toplotni gubitak sadržan u fizičkoj toploti produkata kod kotlova koji koriste gornju toplotnu moć goriva je umanjen za vrednost topline isparavanja:

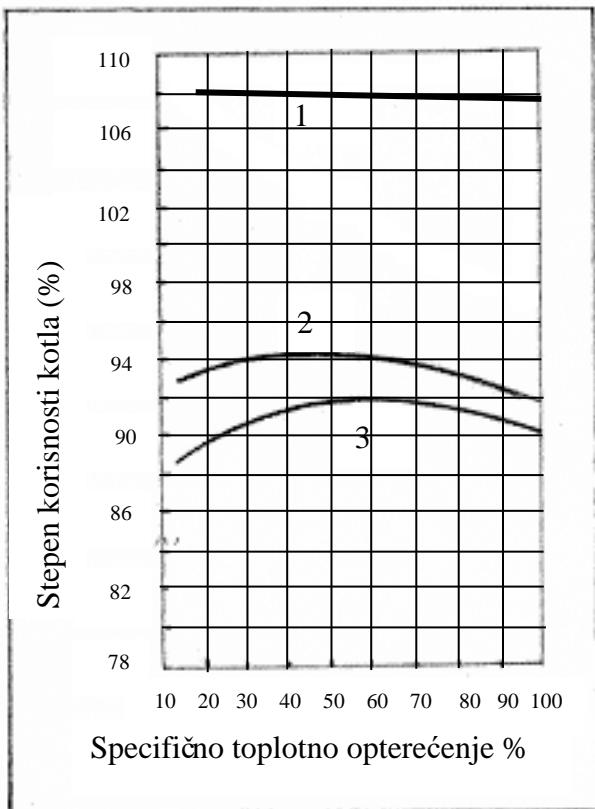
$$U_{p1} = \frac{H_g - H_d}{H_d} \cdot \varepsilon(2)$$

Kondenzni broj (ε) je veličina koja predstavlja odnos količina nastalog kondenzata pri hlađenju gasne struje, i količine vodene pare koja nastaje sagorevanjem goriva.



Slika 4. Uporedna analiza stepena korisnosti kotlova pri različitim topotnim opterećenjima.

1. Kotao sa korišćenjem gornje topotne moći goriva (režim rada 80/60 °C).
2. Niskotemperaturski kotao ($t_p = 160 \text{ } ^\circ\text{C}$).
3. Kotlovsko postrojenje proizvedeno pre 1987 godine.



Slika 5. Uporedna analiza stepena korisnosti kotlova pri različitim topotnim opterećenjima.

1. Kotao sa predgrevanjem vazduha za sagorevanje i korišćenjem gornje topotne moći goriva (režim rada 80/60 °C).
2. Niskotemperaturski kotao ($t_p = 160 \text{ } ^\circ\text{C}$).
3. Kotlovsko postrojenje proizvedeno pre 1987 godine.

5. SMANJENJE EMISIJE ŠTETNIH POLUTANATA

Korišćenje gornje topotne moći goriva pored povećanja stepena korisnosti kotla uslovjava smanjenje emisije štetnih polutanata. Uporedna analiza emisionih veličina pri sagorevanju tečnog i gasovitog goriva predstavljena je u tabeli 2.

Tabela 2. Smanjenje emisije štetnih polutanata korišćenjem gornje topotne moći gasovitog goriva

		NO _x	CO	CO ₂
1.	Staro postrojenje, godište 1970. gorivo lož-ulje Stepen korisnosti 70% Specifične emisije	0.0722mg/kJ	0.0489mg/kJ	72.22mg/kJ

2.	Modernizovano postrojenje sa nisko temperaturskim kotлом. Gorivo-gas. Specifična emisija.	0.0278mg/kJ	0.0167 mg/kJ	55.55 mg/kJ
3.	Modernizovano postrojenje sa kotлом sa korišćenjem gornje toplotne moći. Stepen korisnosti 103% (pri 75/60°C). Specifična emisija. Smanjenje emisije.	0.0222 mg/kJ 79%	0.0139 mg/kJ 81%	55.55 mg/kJ 48%
4.	Primena gorionika sa smanjenom emisijom NO _x i CO. Specifična emisija. Smanjenje emisije.	0.0042 mg/kJ 96%	0.0014 mg/kJ 98%	55.55 mg/kJ 48%

Smanjenje emisije CO₂ za 23 %, rezultat je povećanja stepena korisnosti kotla i većeg učešća vodonika u sastavu gasovitog goriva.

Spisak korišćenih oznaka:

V_{vp} – zapremina vlažnih produkata sagorevanja,

c_{pvp} – specifični toplotni kapacitet produkata,

H_d – donja toplotna moć goriva,

H_g – gornja toplotna moć goriva,

T_p – temperatura produkata,

T₁ – temperatura vazduha,

t_r – temperatura tačke rose,

ε – kondenzni broj.

Literatura:

1. V. Karamarković: Rekuperacija fizičke toplote gasovitih produkata procesa za pečenje dolomita, Procesna tehnika br. 4, Beograd 1991 god.
2. V. Karamarković, M. Gašić: Primena rekuperativnih i regenerativnih razmenjivača za korišćenje fizičke toplote gasovitih produkata, Racionalno korišćenje toplotne energije, Kopaonik 1996 god.
3. Wilfred Krof: Najsavremeniji kotlovi koji koriste gornju toplotnu moć goriva, KGH br. 1, Beograd 1997 god.
4. Buharkin E.N: K metodike teplovogog pasčeta kondenzacionih utilizatorov tepla uhdjajših gazov, Teploenergetika br. 2. 1997 god.