

EFEKTI POVRATNOG KORIŠĆENJA TERMODINAMIČKIH POTENCIJALA PRODUKATA SAGOREVANJA POTISNIH PEĆI

EFFECTS OF USING THE THERMODYNAMIC POTENTIAL
OF PUSHER FURNACE COMBUSTION PRODUCTS

**Dr Miroljub Tomić, dipl. inž.,
„Termoenergoinženjering”, Beograd, i
prof. dr Milorad Bojić, dipl. inž., Mašinski fakultet, Kragujevac**

Poznato je da crna metalurgija spada u visokotemperaturnu procesnu industriju, gde se tehnološki procesi odvijaju i baziraju na sagorevanju i termohemijskoj transformaciji goriva i energije, pa ona u celini predstavlja i tehnološku oblast sa velikom mogućnošću štednje i racionalnog korišćenja energije.

Potisna peć, koja je predmet razmatranja ovog rada, najveći je energetska potrošač u postupku toplog valjanja limova i kao takva vrlo značajna za energetska istraživanja.

Shodno tome, sprovedena istraživanja imaju za cilj bolji rad potisnih peći u pogledu povećanja obima proizvodnje i smanjenja potrošnje energije uz sagledavanje mogućnosti i efekata povratnog korišćenja termodinamičkog potencijala – entalpije – produkata sagorevanja u ovom termičkom sistemu, promenom i praćenjem međusobnog uticaja različitih parametara.

Ferrous metallurgy is a high temperature processing industry wherein technological processes are based on combustion and transformation of fuels and energy, and therefore it is a wide technological field with significant potential for energy efficiency and conservation.

The pusher furnace analyzed in this paper is the largest energy consumer in the sheet hot rolling process and, as such, it is relevant for energy efficiency and conservation research. The aim of conducted research was to improve the pusher furnace operation in regard to production increase and energy consumption decrease, and to assess the possibility and effects of using the thermodynamic potential – enthalpy – of combustion products in this thermal system, by variation and monitoring of various parameters' correlative effects.

Ključne reči: potisna peć; čelični slab; toplotna energija; sagorevanje; vazduh; kiseonik; produkti sagorevanja

Key words: pusher furnace; steel slab; heating energy; combustion; air; oxygen; combustion product

Uvod

Industrijske peći su složena postrojenja u kojima se odvijaju visokotemperaturni procesi sa ciljem zagrevanja, termičke obrade metala ili pak proizvodnje keramičkih, vatrostalnih i drugih građevinskih materijala i niza drugih procesa. Osnova svakog tehnološkog procesa koji se odvija u pećima je razmena toplote koja se dovodi u proces preko različitih izvora toplotne energije, kao što su prirodna i veštačka goriva u čvrstom, tečnom i gasovitom stanju i električna energija.

Potisne peći su zagrevne peći sa kontinualnim načinom rada, u kojima se vrši istovremeno potiskivanje svih komada po dužini radnog prostora posebnim potisnim uređajima. U ovim pećima materijal se kreće potiskivanjem kroz peć suprotno od toka produkta sagorevanja, tako da produkti sagorevanja najniže temperature dolaze u kontakt sa tek prispelim materijalom, a sa najvišom temperaturom sa materijalom koji je već delimično zagrejan (slika 1). Na taj način se povećava iskorišćenje toplote produkata sagorevanja.

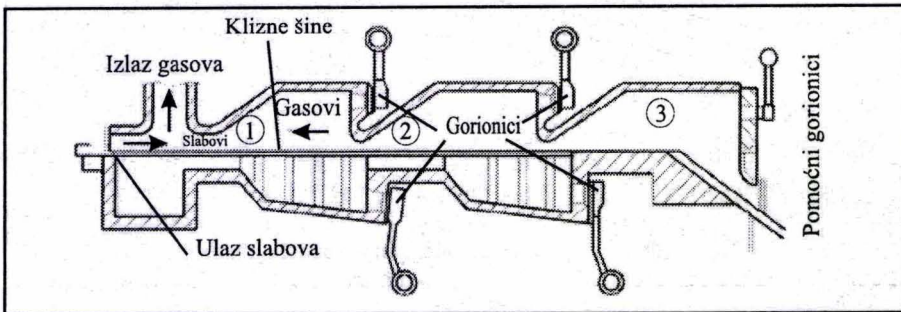
Toplota se predaje zagrevanom materijalu u peći preko produkata sagorevanja i zračenjem zidova peći. Jedan deo toplote produkata sagorevanja prenosi se na zidove peći i dalje provodi kroz zidove u okolinu.

Primena različitih goriva, različitih rekuperacionih zahvata i uvođenje dodatnog kiseonika u vazduh za sagorevanje, dovodi do različitih efekata i uticaja na energetske efikasnost, energetske tokove i temperaturske režime unutar peći kao i na kvalitet zagrevanja slabova. Pri tome je potrebno obezbediti da bilo koji dodatni zahvat ne ugrozi tehnološki proces i da ne bude negativnih efekata koji bi umanjili energetske efikasnost peći.

Primena različitih goriva

Za zagrevanje materijala (slabova) u potisnim pećima od gasovitih goriva, pored prirodnog gasa, koriste se i veštačka gasovita goriva:

- generatorski gas, nastao gasifikacijom čvrstih goriva u specijalnim aparatima – generatorima gde je osnovni gorivi sastojak ugljen-monoksid;
- koksni gas, dobijen u procesu koksovanja uglja sa osnovnim gorivim sastojcima – metanom i vodonikom;
- visokopećni gas nastao kao uzgredni produkt u procesu proizvodnje gvožđa u visokim pećima čiji je osnovni gorivi sastojak, takode ugljen-monoksid.



Slika 1. Šema trozonalne potisne peći; 1 – zona predgrevanja, 2 – zona zagrevanja, 3 – zona progrevanja

S obzirom na toplotno-tehničke karakteristike ovih gasovitih goriva, osim čistog prirodnog i delimično koksnog gasa, najčešću primenu imaju njihove smeše.

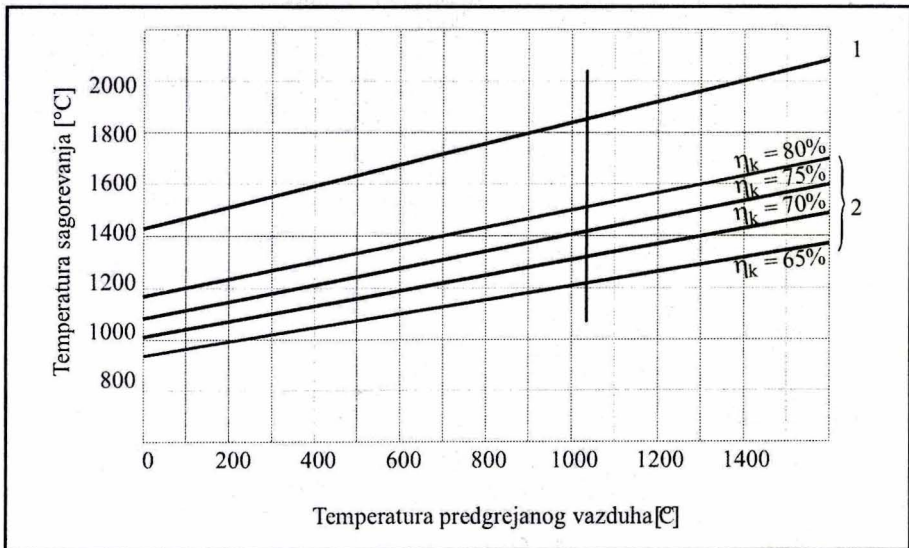
Obogaćivanje vazduha kiseonikom

Kiseonik, kao neophodan element za sagorevanje, najčešće se dovodi u proces zajedno sa atmosferskim vazduhom koji se koristi za sagorevanje goriva. Karakteristike procesa sagorevanja se mogu poboljšati povećanjem sadržaja kiseonika u atmosferskom vazduhu. Povećanje sadržaja kiseonika u atmosferskom vazduhu za sagorevanje dovodi do porasta temperature sagorevanja i smanjenja količine produkata sagorevanja smanjenjem „balasnog“ azota. To se odražava na smanjenje potrošnje goriva, a time i povećanje energetske efikasnosti peći.

Primena kiseonika u industrijskim pećima je ograničena ekonomičnošću proizvodnje kiseonika za ove svrhe. Teorijski, moguće je sagorevanje sa stoprocentnim kiseonikom, ali uslovi ekonomski opravdane i bezbedonosne primene nameću da se sadržaj kiseonika u vazduhu za sagorevanje kreće u granicama od 23 do 30%.

Korišćenje toplote izlaznih produkata sagorevanja

Rezultati istraživanja i praktični pokazatelji u oblasti primene gasa kao goriva u industrijskim pećima pokazuju da one još rade sa značajno povišenom potrošnjom gasa, zbog nedovoljno efikasne razmene toplote, nesavršenih gorioničkih postrojenja, nepotpunih hemijskih reakcija, velikih gubitaka toplote sa izlaznim produktima sagorevanja i velikih spoljašnjih toplotnih gubitaka. Stoga je koeficijent iskorišćenja toplote mnogih pećnih agregata dosta nizak i kreće se za komorne peći od 10 do 20%, a za potisne peći 20–40% [1].



Slika 2. Kalorimetrijska i stvarna temperatura sagorevanja visokopećnog gasa u zavisnosti od temperature predgrejanog vazduha; 1 – kalorimetrijska temperatura, 2 – stvarna temperatura

Analiza toplotnog bilansa peći za zagrevanje pokazuje da je osnovni uzrok niske efikasnosti veliki nepovratni gubitak toplote sa izlaznim produktima sagorevanja. Ovaj gubitak se za pojedine peći nalazi u intervalu od 25 do 65% od ukupno unete energije goriva, a za potisne peći 30 do 45% [2].

Energetski potencijal u produktima sagorevanja nalazi se uglavnom u obliku osetne i latentne toplote, a manjim delom kao hemijska energija, ukoliko je sagorevanje goriva nepotpuno, pa produkti sagorevanja sadrže još gorivih sastojaka koji im daju određenu toplotnu moć.

Visoka temperatura i visoka entalpija izlaznih produkata sagorevanja nameću potrebu njihovog korišćenja, kako bi se smanjila potrošnja goriva i pojeftinio tehnološki proces.

Najbolje iskorišćenje energije produkata sagorevanja postiže se ako se ta energija unese u radni prostor peći u obliku entalpije vazduha za sagorevanje i/ili entalpije goriva koji se predgrevaju u razmenjivačima toplote.

Iskorišćenje energije produkata sagorevanja zavisi od njihove temperature i ulazne temperature vazduha koji se predgreva. Opadanjem razlike u temperaturi između produkata sagorevanja i vazduha koji se predgreva, smanjuje se prelaz toplote tako da je potrebna sve veća površina razmene toplote u razmenjivaču toplote. Time je iskorišćenje toplote iz izlaznih produkata sagorevanja ograničeno i ekonomskim razlozima, tj. cenom razmenjivača.

Od temperature predgrejanog vazduha i goriva direktno zavisi stvarna temperatura u peći koja se definiše kalorimetrijskim koeficijentom. Kalorimetrijski koeficijent predstavlja odnos stvarne i kalorimetrijske temperature sagorevanja u peći, gde se pod kalorimetrijskom temperaturom sagorevanja podrazumeva temperatura sagorevanja koju imaju produkti sagorevanja u adijabatskim uslovima (bez razmene toplote sa okolinom), kojom prilikom ne dolazi do toplotnih gubitaka nastalih disocijacijom produkata sagorevanja na povišenim temperaturama.

U praksi se stvarna temperatura sagorevanja određuje po formuli:

$$t_{sagst} = \eta_k \cdot t_{sagsk}$$

gde je η_k [-] kalorimetrijski koeficijent, a t_{sagsk} [°C] kalorimetrijska temperatura sagorevanja.

Vrednost kalorimetrijskog koeficijenta je eksperimentalno određena u zavisnosti od vrste peći i nalazi se u intervalu $\eta_k = 0,65-0,90$ [1].

Uticao temperature predgrejanog vazduha na kalorimetrijsku i stvarnu temperaturu sagorevanja visokopećnog gasa grafički je prikazan na slici 2.

U eksperimentalnim istraživanjima [3], proračun kalorimetrijske temperature sagorevanja izvršen je za različite udele viskopećnog gasa u smeši goriva sa prirodnim gasom, različite protoke smeše goriva, različite sadržaje kiseonika u vazduhu za sagorevanje, različite koeficijente viška vazduha i različite debljine slabova.

Rezultati istraživanja

Eksperimentalna istraživanja imala su za cilj bolji rad potisnih peći u smislu povećanja obima proizvodnje i smanjenja potrošnje energije kao i sagledavanje efekata primene rekuperacije u ovom termičkom sistemu, promenom i praćenjem međusobnog uticaja različitih parametara.

Istraživanja su vršena na potisnim pećima za zagrevanje slabova u toploj valjaronici SARTID-a. Nominalna proizvodnja peći iznosi 250 t slabova/h i ona se postiže

pri zagrevanju slabova debljine 0,25 m i dužine 12 m pri upotrebi samo prirodnog gasa uz postizanje temperature slabova, zavisno od vrste materijala, najčešće 1250°C.

Sagledavan je uticaj protoka smeše goriva, sadržaja kiseonika u vazduhu za sagorevanje, udela visokopećnog gasa u smeši goriva i koeficijenta viška vazduha na parametre procesa zagrevanja:

- temperatura slabova, sagorevanja, produkata sagorevanja na izlazu iz peći i posle rekuperacije i zagrejanog vazduha,
- protok smeše goriva i prirodnog gasa,
- hemijsku energiju smeše goriva,
- entalpiju produkata sagorevanja,
- količinu rekuperirane toplote.

Uticaj protoka smeše goriva na parametre procesa zagrevanja analiziran je pri promenljivoj temperaturi slabova i protoku smeše goriva (prirodni i visokopećni gas) od 15000 do 40000 Nm³/h, za različite sadržaje kiseonika u vazduhu za sagorevanje [$a_k = 21-25\%$]. Zagrevani su slabovi debljine $\delta = 0,2$ m, udeo visokopećnog gasa u smeši goriva iznosio je $A = 0,6$, a koeficijent viška vazduha $\lambda = 1,0$.

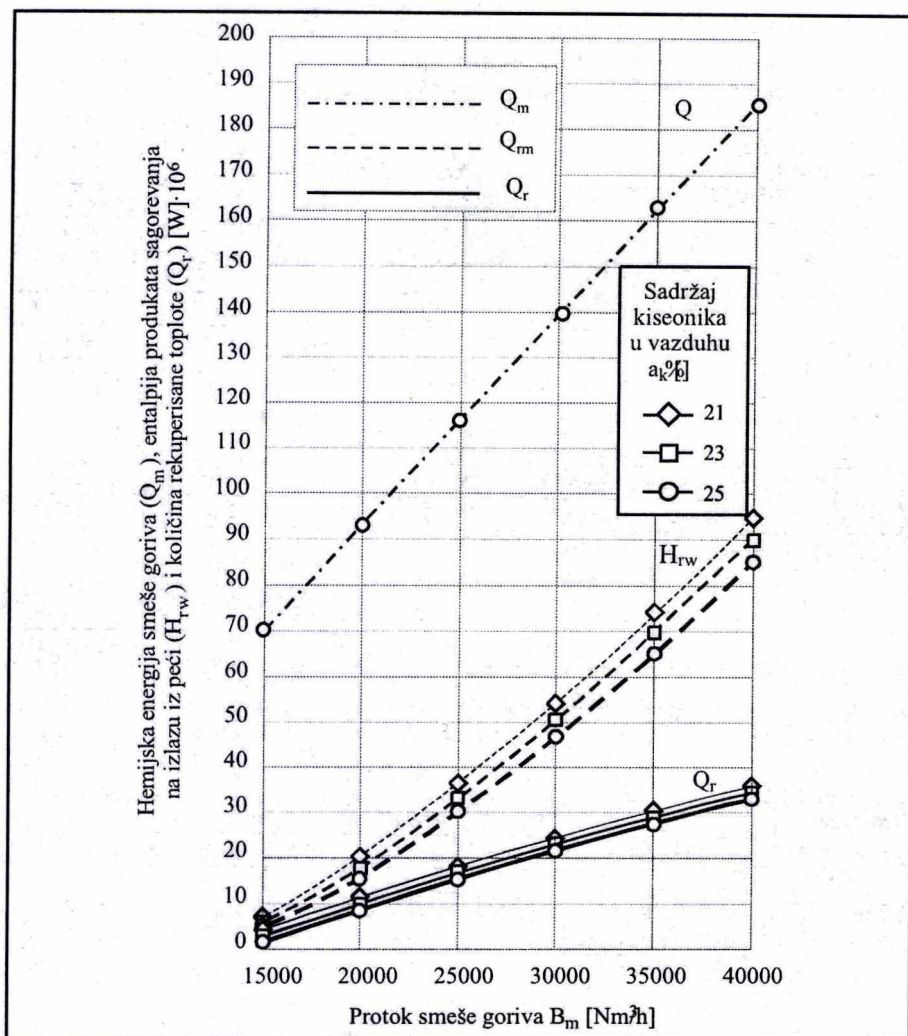
Ostvareni parametri procesa zagrevanja slabova za protoke smeše goriva pri kojima se za navedene parametre pri različitim sadržajima kiseonika u vazduhu za sagorevanje ostvaruje zadata temperatura slabova od 1250°C, izneseni su u tabeli 1.

Tabela 1. Parametri procesa zagrevanja slabova za protoke smeše goriva pri kojima se za različite sadržaje kiseonika u vazduhu za sagorevanje ostvaruje zadata temperatura slabova od 1250°C [$\delta = 0,2$ m; $A = 0,6$; $\lambda = 1,0$]

Parametar procesa zagrevanja	Dimenzije	Protok smeše goriva, B_m [Nm ³ /h]				
		23193			20449	19109
		21% O ₂	23% O ₂	25% O ₂	23% O ₂	25% O ₂
t_{sli}	[°C]	1 250	1 291,58	1 328,83	1250	1250
t_{sag}	[°C]	1 988,68	2 083,74	2 172,89	2 047,01	2 101,30
t_{rvi}	[°C]	867,38	839,02	804,58	699,63	554,58
t_{rwisr}	[°C]	580,51	558,45	533,56	454,49	356,98
t_{Lisr}	[°C]	461,23	460,09	453,30	395,44	323,90
Q_m	[W]	107 442 063	107 442 063	107 442 063	94 962 051	88 522 847
H_{rw}	[W]	30 096 800	26 989 696	24 187 483	18 697 910	12 787 127
Q_r	[W]	16 052 856	14 667 423	13 316 461	10 979 987	7 788 536

gde su:

- t_{sli} [°C] – temperatura slaba na izlazu iz peći,
- t_{sag} [°C] – temperatura sagorevanja,
- t_{rvi} [°C] – temperatura produkata sagorevanja na izlazu iz peći,
- t_{rwisr} [°C] – temperatura produkata sagorevanja posle rekuperisanja,
- t_{Lisr} [°C] – temperatura zagrejanog vazduha u rekuperatoru,
- Q_m [W] – hemijska energija smeše goriva,
- H_{rw} [W] – entalpija produkata sagorevanja na izlazu iz peći,
- Q_r [W] – količina rekuperirane toplote.



Slika 3. Hemijska energija smeše goriva (Q_m), entalpija produkata sagorevanja na izlazu iz peći (H_{rw}) i količina rekuperisane toplote (Q_r), kao funkcije protoka smeše goriva za različite sadržaje kiseonika u vazduhu za sagorevanje [$\delta = 0,2$ m; $A = 0,6$; $\lambda = 1,0$]

Na osnovu podataka iz table 2, na slici 3 je grafički prikazan uticaj protoka smeše goriva na promenu hemijske energije smeše goriva na ulazu u peć, entalpije produkata sagorevanja na izlazu iz peći i količine rekuperisane toplote.

Vidi se da količine energije rastu sa povećanjem protoka smeše goriva, bez obzira na sadržaj kiseonika u vazduhu za sagorevanje, a najviše raste entalpija produkata sagorevanja. Povećanjem sadržaja kiseonika u vazduhu za sagorevanje, za određeni protok smeše goriva, smanjuje se entalpija produkata sagorevanja na izlazu iz peći.

Tabela 2. Hemijska energija smeše goriva na ulazu u peć, entalpija produkata sagorevanja na izlazu iz peći i količina rekuperisane toplote kao funkcije protoka smeše goriva za različite sadržaje kiseonika u vazduhu za sagorevanje [$\delta = 0,2 \text{ m}$; $A = 0,6$; $\lambda = 1,0$]

Sadržaj kiseonika u vazduhu a_k [%]	Protok smeše goriva B_m [Nm^3/h]					
	15 000	20 000	25 000	30 000	35 000	40 000
	Hemijska energija smeše goriva na ulazu u peć Q_m [W]					
21	69 487 817	92 650 423	115 813 029	138 975 635	162 138 241	185 300 846
23	69 487 817	92 650 423	115 813 029	138 975 635	162 138 241	185 300 846
25	69 487 817	92 650 423	115 813 029	138 975 635	162 138 241	185 300 846
	Entalpija produkata sagorevanja na izlazu iz peći H_{rw} [W]					
21	6 279 360	19 739 296	35 958 376	54 293 408	74 092 384	94 871 072
23	4 803 397	17 162 052	32 551 410	50 190 656	69 427 776	89 779 856
25	3 262 622	14 852 431	29 470 426	46 426 092	65 101 732	85 812 776
	Količina rekuperisane toplote Q_r [W]					
21	4 293 362	11 680 438	18 527 318	24 564 450	29 741 184	34 132 636
23	3 298 009	10 296 977	17 140 770	23 342 286	28 767 664	33 446 656
25	2 249 675	8 989 588	15 765 148	22 055 032	27 666 254	32 581 500

Tabela 3. Uticaj rekuperisanja toplote na promenu temperature slabova u funkciji protoka smeše goriva za različite sadržaje kiseonika u vazduhu za sagorevanje [$\delta = 0,2 \text{ m}$; $A = 0,6$; $\lambda = 1,0$]

Sadržaj kiseonika u vazduhu a_k [%]	Protok smeše goriva, B_m [Nm^3/h]					
	15 000	20 000	25 000	30 000	35 000	40 000
	Temperature slabova, t_{sl} [$^{\circ}\text{C}$]					
21	1. Sa zagrevanjem vazduha u rekuperatoru: $Q_r = 16\,052\,856$ [W]					
	1 088,82	1 206,23	1 274,76	1 315,30	1 339,25	1 352,86
	1a. Bez zagrevanja vazduha u rekuperatoru: $Q_r = 0$					
25	1 036,96	1 092,76	1 125,47	1 146,91	1 162,03	1 173,26
	2. Sa zagrevanjem vazduha u rekuperatoru: $Q_r = 7\,788\,536$ [W]					
	1 138,70	1 274,12	1 359,79	1 414,92	1 450,11	1 472,22
	2a. Bez zagrevanja vazduha u rekuperatoru: $Q_r = 0$					
	1 109,40	1 178,56	1 219,17	1 245,76	1 264,52	1 278,46

Za protok smeše goriva od $23\,193 \text{ Nm}^3/\text{h}$, kojim se ostvaruje zadata temperatura slabova od $1\,250^{\circ}\text{C}$, sa vazduhom za sagorevanje bez povećanog sadržaja kiseonika postižu se sledeći parametri (tabela 1):

$$- Q_m = 107\,442\,063 \text{ W},$$

$$- H_{rw} = 30\,096\,800 \text{ W} = 0,2801 Q_m,$$

$$- Q_r = 16\,052\,856 \text{ W} = 0,1494 Q_m = 0,5334 H_{rw},$$

a sa vazduhom za sagorevanje koji sadrži 25% kiseonika:

$$- Q_m = 107\,442\,063 \text{ W},$$

$$- H_{rw} = 24\,187\,483 \text{ W} = 0,2251 Q_m,$$

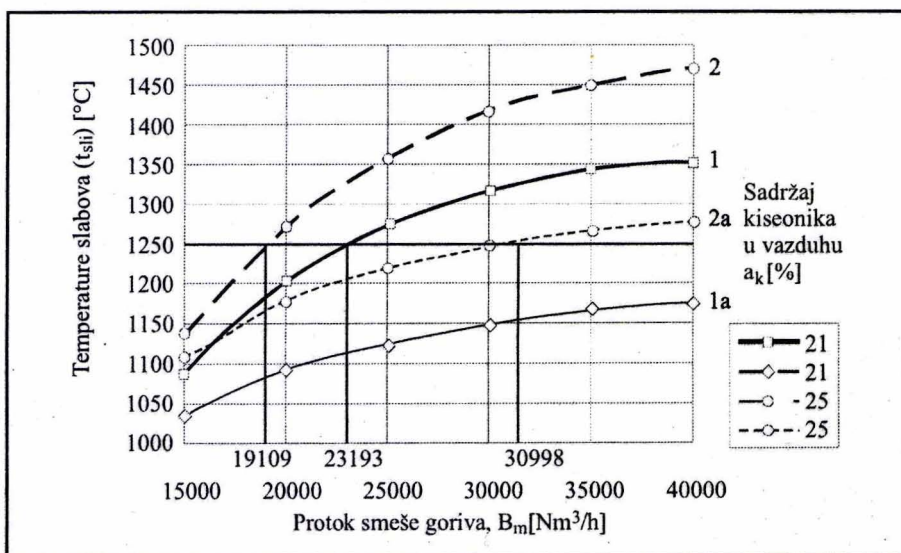
$$- Q_r = 13\,316\,461 \text{ W} = 0,1239 Q_m = 0,5506 H_{rw}.$$

Iz ovih relacija uočava se da se sa povećanjem sadržaja kiseonika u vazduhu sa 21% na 25% entalpija produkata sagorevanja na izlazu iz peći smanjila za 5 909 417 W, tj. 19,6%, pa se gubitak toplote sa izlaznim produktima sagorevanja smanjio sa 28,01% na 22,51% od ukupne hemijske energije goriva.

Pri protoku smeše goriva od 23 193 Nm³/h i sadržaju kiseonika u vazduhu za sagorevanje od 25%, postigla bi se temperatura slabova od 1 328,8°C. Da bi se temperatura slabova zadržala na 1 250°C, mora se smanjiti protok smeše goriva na 19 109 Nm³/h. Pri ovom protoku smeše goriva entalpija produkata sagorevanja iznosi $H_{rw} = 12\,787\,127 \text{ W}$, što je njeno smanjenje za 52,62% u odnosu na entalpiju produkata sagorevanja na izlazu iz peći pri protoku smeše goriva od 23 193 Nm³/h, što znači da povećanje sadržaja kiseonika u vazduhu značajno utiče na smanjenje gubitka toplote sa izlaznim produktima sagorevanja.

Uvećanje količine rekuperisane toplote direktno utiče na smanjenje potrebnog protoka smeše goriva, s obzirom da se preko zagrejanog vazduha za sagorevanje ova toplota vraća ponovo u proces.

Uticao efekata „korišćenja entalpije” produkata sagorevanja u procesu rekuperisanja vazduha za sagorevanje vidi se iz sledećeg primera (tabela 3, slika 4). Pri uslovima zagrevanja, kada je sadržaj kiseonika u vazduhu za sagorevanje 21%, debljina slabova 0,2 m, udeo visokopećnog gasa u smeši goriva 0,6 i koeficijent viška vazduha 1,0, temperatura zagrevanja slabova od 1 250°C postiže se pri protoku smeše goriva od 23 193 Nm³/h, kada se vazduh zagreva u rekuperatoru na temperaturu od 461°C, pri čemu količina rekuperisane toplote iznosi 16 052 856 W.



Slika 4. Uticaj rekuperisanja toplote na promenu temperature slabova u funkciji protoka smeše goriva za različite sadržaje kiseonika u vazduhu za sagorevanje

Ako se vazduh u rekuperatoru ne bi zagrejao u rekuperatoru, tada se ne „koristi” entalpija produkata sagorevanja, pa je količina rekuperisane toplote jednaka nuli. U ovom slučaju, pri istim parametrima zagrevanja, pri maksimalno mogućem protoku smeše goriva od 40 000 Nm³/h, postigla bi se temperatura slabova od 1173,26°C, pa bi slabovi ostali nedogrejeni.

Pri uvećanju sadržaja kiseonika na 25%, kada se vazduh za sagorevanje zagreva u rekuperatoru na temperaturu od 324°C, pri čemu količina rekuperisane toplote iznosi 7 788 536 W [3] temperatura zagrevanja slabova od 1 250°C bi se ostvarila pri protoku smeše goriva od 19 109 Nm³/h. U slučaju da se pri ovim uslovima vazduh ne zagreva u rekuperatoru, potrebna temperatura zagrevanja slabova bi se ipak ostvarila, ali pri protoku smeše goriva od 30 998 Nm³/h, kada je utrošak prirodnog gasa 12 399,2 Nm³/h, što predstavlja potrošnju prirodnog gasa pri zagrevanju slabova debljine 0,25 m bez udela visokopećnog gasa. Sve ovo govori o neophodnosti i efektima korišćenja latentne i osetne toplote (entalpije) produkata sagorevanja, odnosno rekuperacije vazduha za sagorevanje.

Zaključak

Istraživanja su pokazala da postoji značajan uticaj primene različitih gasovitih goriva i povećanog sadržaja kiseonika u vazduhu za sagorevanje na transfer energije u potisnoj peći, transfer rekuperisane energije kao i proces sagorevanja u potisnoj peći. Dobijeni rezultati ukazuju na neophodnost korišćenja kako osetne tako i latentne entalpije produkata sagorevanja za zagrevanje vazduha u rekuperatoru, s obzirom na uticaj povećanja energetske efikasnosti rada potisne peći, posebno kada se radi sa manjim sadržajima kiseonika u vazduhu za sagorevanje, ili kada vazduh nije obogaćen kiseonikom.

Literatura

- [1] **Jovanović, M., Z. Popović:** *Peći u metalurgiji gvožđa i čelika*, Građevinska knjiga, Beograd, 1986.
- [2] **Efros, M. M.:** *Nagrevateljnje i termičeskie peći na gazovom toplive*, Metalurgija, Moskva, 1965.
- [3] **Tomić, M.:** *Uticaj različitih goriva i rekuperacionih zahvata na energetske efikasnost rada potisne peći*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1998.
- [4] **Tomić, M.:** *Mogućnost i efekti primene kiseonika na potisnim pećima toplih valjaonica*, zbornik radova za V jugoslovenski simpozijum o metalurgiji, Beograd, 1992.
- [5] **Bojić, M., M. Tomić, D. Jevtović:** *Influence of oxygen injection and refuse-heat use on energy consumption of pusher furnace*, Development of metallurgy in the Balkans at the beginning of the XXI st century, Vol. III, Varna, Bulgaria, 1996, pp. 89–93.
- [6] **Bojić, M., M. Tomić, N. Lukić, D. Nikolić:** *Industrial pusher furnaces: Part 1 – Influence of slab preheating to energy consumption*, Proceedings of the 4th Greek national Congress on mechanics, Vol. II, Xanthi, 1995, pp. 967–974.