

Simulacija rada visoke peći prilikom supstitucije koksa i spraešenog uglja granulisanom otpadnom plastikom

TIHOMIR M. KOVAČEVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

ŽELJKO J. KAMBEROVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

MARIJA S. KORAC, Univerzitet u Beogradu,

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

ZORAN M. ANDIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Inovacioni centar Hemijskog fakulteta, Beograd

ALEKSANDAR V. VASIĆ, Univerzitet u Beogradu

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

Stručni rad

UDC: 669.162.262.3:628.49

Mogućnost upotrebe otpadne plastike kao reducenta u visokoj peći je u fokusu interesovanja poslednjih godina. U cilju analize uštede koksa i uglja, smanjenja emisije CO₂ i utvrđivanja ekonomskih benefita urađena je simulacija visokopećnog procesa u BFC programskom paketu. Radi uporedne analize simulirana su tri slučaja u zavisnosti od sastava šarže i načina unošenja komponenti šarže u visoku peć: slučaj 1 (S1), slučaj 2 (S2) i slučaj 3 (S3). Šarža u baznom slučaju, S1, se sastoji od sintera, tj. zasipa koji je potreban da se dobije 1 t gvožđa, topitelja koji obezbeđuje bazicitet troske i koksa kao reducenta i energenta. Šarža u slučaju S2, pored komponenata koje sadrži šarža u slučaju S1, sadrži spraešeni ugalj umesto jednog dela koksa, a šarža u slučaju S3 umesto koksa sadrži granulisanu otpadnu plastiku u približno istoj količini kao spraešeni ugalj. Supstitucija koksa spraešenim ugljem i otpadnom plastikom je 18,6 % i 25,2 %, respektivno. Analizirani su ekonomski, proizvodni i ekološki aspekti rada peći. Potrošnja svake tone otpadne plastike u visokoj peći štedi cca 360 \$, što je 18 puta više od njene cene imajući u vidu da je tržišna cena koksa 380 \$/t, a otpadne plastike 20 \$/t. Što se tiče specifične proizvodnosti, ista opada od 2,13 za S1 do 1,87 za S3. Sa ekološkog aspekta postoje dva glavna benefita: smanjenje emisije CO₂ i nemogućnost formiranja dioksina. Emisija CO₂ je bila 20,18; 19,46 i 17,21 % za S1, S2 i S3, respektivno.

Ključne reči: supstitucija koksa, otpadna plastika, simulacija procesa, emisija CO₂, varijabilni troškovi

1 UVOD

Ekonomski rast i promena obrazaca proizvodnje i potrošnje rezultovali su naglim porastom generisanja otpadne plastike širom sveta, usled čega je plastični otpad postao značajni deo čvrstog otpada [1]. U cilju očuvanja kvaliteta životne sredine i valorizacije otpadne plastike, razvijeni su i razvijaju se mnogi postupci reciklaže iste. Reciklirana plastika može da se upotrebi za ponovno dobijanje istog proizvoda, kao energent u

industriji ili sirovina u hemijskoj industriji. Jedna od trenutno najinteresantnijih primena otpadne plastike je supstitucija za koks kao reducent u visokoj peći za dobijanje sirovog gvožđa. Komercijalni supstituent za koks je spraešeni ugalj čija upotreba smanjuje troškove proizvodnje gvožđa.

Upotreba otpadne plastike predstavlja novu tehnologiju koja se počela razvijati u Japanu i Nemačkoj. Prvi integrisani sistem za injektiranje otpadne plastike je primenjen u NKK kompaniji u Japanu, a prvi dizajn tehnologije primene otpadne plastike u visokoj peći je još ranije razvijen u Nemačkoj, u kompaniji Bremen Steel Works [2].

Za primenu otpadne plastike kao reducenta za proces u visokoj peći, neophodno je istu dobiti u ade-

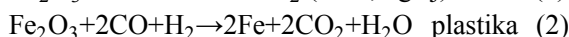
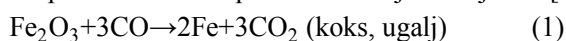
Adresa autora: Tihomir Kovačević, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Kar-nigijeva 4

Rad primljen: 03.09.2014.

Rad prihvaćen: 23.09.2014.

kvatnom obliku. U tu svrhu se koriste operacije mlevenja, kompaktiranja, briketiranja, peletiziranja i ekstruzije [3-5]. Nakon dobijanja plastike u adekvatnom obliku i injektiranja u visoku peć kroz duvnice, ista se gasifikuje do CO i H₂ koji služe kao reducenti oksida železa iz rude.

Primenom otpadne plastike umesto koksa smanjuje se emisija CO₂ [6]. Redukcija emisije CO₂ iznosi 30 % prema hemizmu prikazanom u jed. 1 i jed. 2 [7].



Prema Kjoto protokolu, smanjenje efekta staklene bašte, tj. emisije CO₂ predstavlja jedan od glavnih zadataka industrije gvožđa i čelika [6].

Ukoliko se u otpadnoj plastici nalazi PVC, prilikom njegove razgradnje u visokoj peći može doći do oslobađanja HCl-a koji je korozivan za opremu. Zbog toga je odlučeno u železari Stahlwerke u Bremenu da se ne sme injektirati više od 35 kg/t gvožđa plastičnog otpada koji sadrži hlor i da sadržaj hlora ne sme biti veći od 1,1 % [8]. Prema Pravilniku o kategorijama, ispitivanju i klasifikaciji otpada Republike Srbije, maksimalna gornja granica hlora u otpadu koji se spaljuje kao alternativno gorivo je 2 % [9]. Što se tiče formiranja, dioksina i furana, nema opasnosti od formiranja istih čak i kada se PVC nalazi u otpadnoj plastici pošto je uobičajna temperatura u zoni duvnica visoke peći, gde ona sagoreva, viša od cca 2000 °C [10]. Prema [7, 10, 11] koncentracija hlora se smanjuje dejstvom kreča koji se dodaje u visoku peć radi kontrole sastava šljake. Radi prevencije emisije dioksina i furana u toku samog procesa sinterovanja rude železa primenjuje se apsorcija istih na aktivnom uglju ili smanjenje koncentracije dodatkom uree. Pored toga, potrebno je izvršiti efikasno uklanjanje prašine i vlažno prečišćavanje otpadnih gasova u kombinaciji sa efikasnim tretmanom otpadnih voda [12].

Ogaki i saradnici [7] iz NKK kompanije (Nippon Kokan KK, sada JFE Steel Corporation) su prikazali postupak za predtretman otpadne plastike koja u sebi sadrži PVC. Prvo se PVC centrifugiranjem odvaja od ostatka otpadne plastike, a zatim sipa u rotacionu peć gde se na 3000°C izdvaja HCl. Tako dehlorisan materijal se granulira, pri čemu je pogodan za injektiranje u visoku peć.

Za utvrđivanje rada visoke peći ključni su sledeći parametri: temperatura u zoni duvnica, veličina čestica plastike, odnos količina plastika/koks, način pripreme plastike, količina kiseonika i dr. Ispitivanja su pokazala da je efikasnost sagorevanja plastike veća ukoliko su čestice plastike manje, ako postoji veća količina kiseonika u peći, ako je temperatura u zoni duvnica viša, a rastojanje žiže zone sagorevanja od duvnica

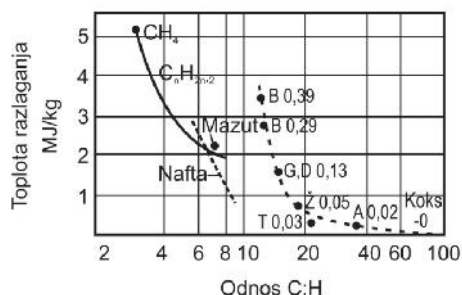
manje [13, 14]. Pored toga, Asanuma i saradnici [13] su pokazali da gorivost plastike iste granulacije zavisi i od načina pripreme.

Sekine i saradnici [6] su analizirali uticaj upotrebe otpadne plastike kao supstituenta za koks za visokopećni proces na emisiju CO₂. Plastika koju su koristili u svojoj studiji je PE, PP, PS i PET. Praćen je uticaj na emisiju CO₂ svake vrste plastike posebno. PVC je uklonjen u predtretmanu. PE pokazuje najveći potencijal redukcije emisije CO₂, a PET najmanji. Štaviše, upotreba PET-a je pokazala povećanu emisiju CO₂ u odnosu na koks.

Za razliku od Sekinea i saradnika, Burchart-Korol [15] je prikazala energetske-ekološke benefite koji se dobijaju prilikom supstitucije koksa otpadnom plastikom upotrebom LCA (*Life Cycle Assessment*) metoda. Fokus studije je bio ekološka procena korišćenja različitih tipova otpadne plastike i smanjenje potrošnje fosilnih goriva upotrebom iste. Napravljeno je 5 različitih testova koji su ispitivani sledećim LCA metodama: Eco-Indicator 99 (EI 99), Cumulative Energy Demand (CED), Cumulative Exergy Demand (CexD) i ReCiPe Endpoint (ReCiPe). U prvom testu je testiran koks, a u testovima od 2 do 5 jedan deo koksa je supstituisan sa PE, PP, PS i PET, respektivno. Prve tri metode prate utrošak energije za eksploataciju rudnih nalazišta, operacije proizvodnje i skladištenja fosilnih goriva, kao i upotrebu eksergije iz obnovljivih izvora energije, dok 4. metoda daje prikaz troškova potrošnje fosilnih goriva. Prema EI 99 metodi utrošak energije za testove sa otpadnom plastikom je oko 85 % niži nego za test sa koksom. Kod ostalih LCA metoda utrošak energije i troškovi su niži oko 30 % za testove sa otpadnom plastikom.

Prilikom sagorevanja zasićenih ugljovodonika u visokoj peći, razvija se znatno manja količina toplote od one koja se dobija sagorevanjem koksa. Razlog tome je što se jedan deo toplote prilikom sagorevanja ugljovodonika troši na razlaganje istih do CO i H₂. Toplota razlaganja ugljovodonika, kao i čvrstih i tečnih goriva se povećava sa smanjenjem odnosa C/H što ima za posledicu smanjenje toplote sagorevanja istih (slika 1). Toplota sagorevanja goriva dostiže najnižu vrednost kod metana i ima vrednost 30 % od toplote sagorevanja koksa [16]. Otpadna plastika ima isti odnos C/H kao nafta i mazut.

U ovom radu je prikazana simulacija visokopećnog procesa prilikom upotrebe otpadne plastike kao reducenta umesto koksa i sprasenog uglja. Analizirana je ekonomska, ekološka i metalurška opravdanost pomenute supstitucije. Cilj je da se dosta zaprljana otpadna plastika čiji su troškovi reciklaže skupi i komplikovani, a koja nema primese koje negativno utiču na rad visoke peći, uporebi kao reducent.



Slika 1 - Toplota razlaganja goriva u zavisnosti od odnosa C/H u istim, B – mrki ugalj, G – prirodni gas, D – dugogorivi ugalj, Ž – masni ugalj, T – posni ugalj, A – antracit [16]

2. EKSPERIMENTALNI DEO

Otpadna plastika koja je upotrebljavana za simulaciju procesa u visokoj peći pripada komunalnom čvrstom otpadu. Kvantitativno-kvalitativni sastav otpadne plastike je prikazan u Tabeli 1.

Tabela 1. Kvantitativno-kvalitativni sastav otpadne plastike

Komponenta	%
PE+PP+PS	88,1
PVC	6,85
PET	2,2
ABS + ostala plastika	2,85

Proračun je izvođen primenom BFC programskog paketa koji se bazira na opštim važećim fizičko-he-

mijskim principima koji vladaju pod uslovima u visokoj peći. Pored materijalnog i toplotnog bilansa u BFC programskom paketu može da se izračuna i veliki broj drugih parametara, ali će se ovde prikazati i razmatrati samo oni koji su relevantni za predmet ispitivanja: ekonomski, proizvodni i ekološki. Simulirana su tri slučaja sastava šarže: slučaj 1 (S1), slučaj 2 (S2) i slučaj 3 (S3).

Bazni slučaj, S1, za zasip ima sledeće:

- sinter potreban za dobijanje 1 tone gvožđa,
- topitelj (u ovom slučaju kvarcit) u količini koja obezbeđuje bazicitet troske i
- koks potreban za zagrevanje i redukciju oksida.

Kroz duvnice se injektira samo vazduh sledećih karakteristika:

- temperature 1100 °C ,
- apsolutne vlažnosti 1,0 % i
- prirodnog sadržaja kiseonika (21 %).

Intenzitet rada visoke peći je zadat preko količine izlaznog gasa: 2,5 Nm³ u minuti po 1 m³ korisne zapremine peći. Slučaj S2 se razlikuje u polaznim parametrima od S1 samo po tome što se kroz duvnice injektira i spraseni ugalj koji supstituiše deo koksa. Količina sprasnog uglja je 0,1 kg po Nm³ suvog vazduha. U slučaju S3, za razliku od S2, injektira se otpadna plastika umesto sprasnog koksa u istoj količini: 0,1 kg po 1 Nm³ suvog vazduha.

U Tabeli 2 je prikazan hemijski sastav komponenta za sva tri razmatrana slučaja.

Tabela 2. Hemijski sastav komponenta šarža koje su obrađene u BFC programskom paketu

	Sinter, %	Kvarc, %	Koks, %	Spraseni ugalj, %	Otpadna Plastika, %
Komponente	F	F	F	I	I
Fe ₂ O ₃	65,05			3,0	0,3
FeO	12,82				
SO ₃	0,3		1,0		0,57
S organski				0,5	
MnO	0,72				
SiO ₂	7,13	98,0	6,0	5,4	1,67
Al ₂ O ₃	1,52	2,0	3,0	2,8	0,36
CaO	10,78		1,0	0,5	1,5
MgO	1,22			0,35	0,3
P ₂ O ₅	0,1				0,6
Isparljive			1,0		
C			88,0	70,4	74,2
H				3,0	12,0
N				1,05	1,1
O				11,0	1,7
Neodređeno	0,45				
Vlaga			5,0	2,0	5,7

F – Komponente koje se sipaju u visoku peć kroz grotlo, I – Komponente koje se injektiraju kroz duvnice

3. REZULTATI I DISKUSIJA

U cilju utvrđivanja opravdanosti upotrebe otpadne plastike u procesu dobijanja gvožđa u visokoj peći, dobijeni rezultati simulacije u BFC programskom paketu (videti tabele 3, 4. i 5.) analizirani su sa ekonomskog i ekološkog aspekta, kao i sa proizvodnog aspekta, odnosno proverena procesnih parametara sa aspekta normalnog hoda visoke peći, tj. obezbeđenja normalnog spuštanja zasipa po visini peći (temperatura i količina gasa zone sagorevanja, zatim količina i temperatura izlaznog gasa iz visoke peći, itd).

3.1. Ekonomski aspekt

Dobijeni rezultati relevantni za ekonomičnost proizvodnje prikazani su u tabeli 3.

Iz vrednosti koeficijenta supstitucije se vidi da je opšte iskorišćenje otpadne plastike približno jednako onome kod koksa (1,03) i da ekonomska korist pro-

izilazi ako je CIF (Cost, Insurance, Freight) cene otpadne plastike niža od cca 380 \$/t. Aktualna FOB (Freight on Board) cena otpadne plastike je cca 14 \$/t, te se može očekivati da će CIF cena biti cca 20 \$/t. Pri takvom odnosu cena, potrošnja svake tone otpadne plastike u visokoj peći dovodi do uštede od cca 360 \$, što je 18 puta više o njene cene. Opšte iskorišćenje spranog uglja u odnosu na koks i na otpadnu plastiku je cca 0,8 tj. niže je cca 20 %.

BFC programski paket pri izračunavanju promene ukupnih varijabilnih troškova (videti stav 'i.' u Tab.3) obuhvata i uticaj promene količine izlaznog gasa iz visoke peći, jer se taj gas troši kao gorivo u železarama, što smanjuje ukupne varijabilne troškove. Međutim, proračun ne obuhvata promenu toplotne moći izlaznog (grotlenog) gasa. U tabeli 4 se vidi značajno povećanje toplotne moći u S3 u odnosu na S1 i na S2, što je dodatni ekonomski benefit.

Tabela 3. Vrednosti parametara relevantnih za ekonomičnost proizvodnje gvožđa

Oznaka	Parametri relevantni za ekonomiju	Jedinica	Vrednost po slučajevima		
			S1	S2	S3
a.	Utošak koksa		517,8	421,4	387,1
b.	Utošak uglja kod S2 i plastike kod S3	kg/t_gvožđa	0,0	121,7	126,7
c.	Supstituisano koksa u odnosu na S1			96,4	130,7
d.		%		18,6	25,2
e.	Koficijent supstitucije	kg_koksa/kg_injektanta		0,79	1,03
f.	Varijabilni troškovi proizvodnje gvožđa	\$/t_gvožđa	400,0	400,0	400,0
g.	Cena uglja (S2) i plastike (S3) sa kojim se postižu varijabilni troškovi kao u S1 (400)	\$/t	380,0	305,3	379,9
h.	Tržišna cena koksa(S1), uglja (S2) i plastike (S3)		380,0	180,0	20,0
i.	Smanjenje troškova proizvodnje gvožđa potrošnjom uglja (S2) ili plastike (S3) u količini od 0,1 kg/Nm ³ _suvog vazduha	\$/t_gvožđa	0,0	15,25	45,6
j.			0,0	3,81	11,4
k.	Smanjenje troškova proizvodnje gvožđa potrošnjom 1 tone uglja (S2) ili plastike (S3)	\$	0,0	125,3	359,9
l.	Dodatni benefit od povećanja energetske moći izlaznog gasa iz visoke peći usled promene sastava (Tab.4)	kJ/Nm ³ gasa	2936	3073	3309

Tabela 4. Količina i karakteristike grotlenog gasa

Slučaj	CO ₂ , %	CO, %	H ₂ , %	CO ₂ /CO	t.m, kJ/Nm ³
S1	20,18	22,70	0,61	0,89	2936
S2	19,46	22,85	1,70	0,85	3073
S3	17,21	21,47	5,50	0,80	3309

t. m. – toplotna moć

Injektiranje smeše otpadne plastike u visoku peć umesto pojedinačnog injektiranja pomenutih vrste otpadne plastike daje dobre energetske-ekološke rezultate.

Što se tiče ekonomskih benefita, isti su još veći u odnosu na one prikazane u [6] i [15], zato što nije potrebno trošiti sredstva na predtretman u cilju sortiranja plastike u odnosu na pojedinačno injektiranje iste.

3.2. Proizvodni aspekt

Ovako simuliran i izmeren uticaj otpadne plastike na smanjenje ukupnih varijabilnih troškova podrazumeva da vrednosti određenih procesnih parametara neće prekoračiti limite posle čega može doći do poremećaja u ravnomerenosti i brzini spuštanja zasipa po visini peći, tj. do smanjenja proizvodnosti peći. Vrednosti tih parametara prikazane su u tabeli 5.

Važno je da teorijska temperatura (TT) i količina gasova zone sagorevanja, kao i izlaznog gasa iz peći (grotlenog) ne budu uvećeni toliko da gas ne može ravnomerno i dovoljno brzo da prolazi kroz materijal po visini peći, pri čemu bi došlo do smanjenja brzine ili zastoja u spuštanju materijala po visini peći, tj. do smanjenja proizvodnosti. U praksi se pri definisanju tehnologije teži da TT bude između 1900 i 2200 °C, ali je u praksi donja granična vrednost 1800 °C, a gornja 2300 °C. Iz tabele 5 se vidi da TT kod S1 dostiže gornju graničnu vrednost, a da se kod S3 približava donjoj. Zapremina gasa zone sagorevanja neće se tako drastično promeniti, jer je kod S1 manja količina gasa (u Nm³) nego kod S3, na šta indicira toplotni sadržaj gasa. Takođe, u S3 je gustina gasa nešto niža, pa i ta činjenica ide u prilog da neće doći do poremećaja u gasodinamici zone sagorevanja.

Kod grotlenog gasa u S3 dolazi do povećanja i količine i temperature, što umanjuje specifičnu proizvodnost sa 2,13 na 1,87 (tabela 5), s obzirom da je BFC programski paket zadržao isti zadati intenzitet prolaza gasova kroz peć (2,5 Nm³/min po 1 m³ korisne zapremine peći). U praksi se to i može dogoditi ukoliko nema rezerve u gasopropustljivosti materijala u trupu peći, tj. ukoliko se intenzitet procesa ne može podići količinom vazduha, a da ne dođe do usporavanja spuštanja materijala.

Tada se mora smanjiti količina injektirane plastike, tj. ekonomičnost, kako se ne bi smanjila proizvodnost peći. Bolja mera bi bila poboljšanje fizičkih osobina zasipa, kako bi se poboljšala gasopropustljivost, ali za to treba više vremena, znanja, a možda i novca za nabavku kvalitetnijih sirovina.

Tabela 5. Vrednost parametara relevantnih za proizvodnost (ravnomerenost i brzina spuštanja zasipa po visini peći)

Parametar	S1	S2	S3
Količina gasa zone sagorevanja, nastalog od C koksa i injektiranog goriva, Nm ³ /t_gvožđa	1471	1562	1768
Teorijska temperatura zone sagorevanja, °C	2303	2105	1888
Toplotni sadržaj gasa zone sagorevanja, kJ/Nm ³	3504	3179	2824
Specifična težina gasa zone sagorevanja, kg/Nm ³	1,241	1,208	1,123
Količina vlažnog grotlenog gasa, Nm ³ /t_gvožđa	1720	1783	1943
Temperatura vlažnog grotlenog gasa(korigovana uticajem injektanata), °C	200	239	298
Specifična proizvodnost visoke peći, t/m ³ /dan	2,13	2,04	1,87
Proizvodnja visoke peći korisne zapremine (od duvnica do grotla) 2000 m ³	4265	4099	3756

3.3. Ekološki aspekt

Smanjenje odnosa CO₂/CO (videti tabelu 4) ima ekološki benefit u slučaju slabijeg zaptivanja cevovoda ili ukoliko se gas ispušta u atmosferu zbog nekih operativnih razloga. Najveći ekološki benefit se ipak ogleda u sagorevanju opasnih materija koje se oslobađaju iz otpadne plastike, pre svega dioksina koji potiču iz PVC-a koji je prisutan u šarži.

Naime, temperatura u zoni duvnica prelazi 2100 C, tako da tu dolazi do razgradnje svih prisutnih hemijskih jedinjenja, dok su u višim zonama visoke peći termo-hemijski uslovi takvi da onemogućavaju rekombinaciju, što je u drugim agregatima za spaljivanje otpada moguće.

4. ZAKLJUČAK

Koks i usitnjeni ugalj su neobnovljivi izvori energije i potrebno je naći alternativna rešenja. Otpadna plastika, koja se generiše u velikim količinama obzirom na masovnu proizvodnju predmeta od plastike, predstavlja obećavajuće rešenje energetskog problema za proces u visokoj peći u budućnosti. Ispitivanjem

ekonomskog, proizvodnog i ekološkog aspekta primene otpadne plastike u visokopećnom procesu dobijeni su sledeći rezultati:

- Ekonomski aspekt: cena otpadne plastike je 18 puta niža od cene koksa; kod S3 se dobija veća količina izlaznih gasova koji se koriste kao gorivo u železarama pri čemu se dodatno smanjuju varijabilni troškovi; toplotna moć grotelnog gasa za S3 je viša u odnosu na S1 i S2, što je dodatni ekonomski benefit,
- Proizvodni aspekt: povećanje količine grotelnog gasa i gasova u zoni duvnice kod S3 neće narušiti gasodinamiku zone sagorevanja usled nešto niže gustine gasa, ali povećanje količine i temperature grotelnog gasa dovodi do smanjenja specifične proizvodnosti kod S3 u odnosu na S1 i S2,
- Ekološki aspekt: emisija CO₂ je najniža za S3 što doprinosi smanjenju efekta staklene bašte u skladu sa Kjoto protokolom.

Na osnovu ovih rezultata data je potvrda dosadašnjih istraživanja o višestrukim benefitima upotrebe otpadne plastike umesto koksa i usitnjenog uglja. Otpadna plastika ima veću toplotnu moć od koksa i

sprašenog uglja i jeftinija je. Pored toga, upotrebom otpadne plastike smanjuje se količina otpada na deponijama i smanjuje emisija CO₂ iz samog visokotemperaturnog procesa. Na taj način se ogleda sinergija primene otpada i čistije proizvodnje.

5. ZAHVALNOST

Ovaj rad je podržan od Vlade Republike Srbije kroz projekat Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja pod nazivom „Inovativna sinergija nusprodukata, minimizacije otpada i čistije proizvodnje u metalurgiji“, TR 34033

LITERATURA

- [1] UNEP (United Nations Environment Programme), *Converting Waste Plastic into A Resource*, p. 1-61, 2009
- [2] Ziebig A., Stanek W., *Forecasting of the energy effects of injecting plastic wastes into the blast furnace in comparison with other auxiliary fuels*, *Energy* 26, p. 1159-1173, 2001
- [3] Abe S., Asanuma M., Ishiguro H., Kanatani G., Konishi T., Nakamura H., Nakatani H., Nemoto K., Ogaki Y., Oyanagi Y., Sugayoshi T., Terada K., Tohma I., Tomioka K., Wakamatsu S., *Pelets and method for producing the same*, Patent US 20030021991 A1, p. 1-41, 2002.
- [4] Shrestha A., Singh R. M., *Energy Recovery from Municipal Solid Waste by Briquetting Process: Evaluation of Physical and Combustion Properties of the Fuel*, *Nepal Journal of Science and Technology*, 12, p. 238-241, 2011.
- [5] Kuznia M., Magdziarz A., *Research on thermal decomposition of waste PE/PP*, *Chemical and Process Engineering*, 34, 1, p. 165-174, 2013.
- [6] Sekine Y., Fukuda K., Kato K., Adachi Y., Adachi Y., *CO₂ reduction potentials by utilizing waste plastics in steel works*, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, p. 122-136, 2009.
- [7] Ogaki Y., Tomioka K., Watanabe A., Arita K., Kuriyama I., Sugayoshi T., *Recycling of Waste Plastic Packaging in a Blast Furnace System*, *NKK Technical Review*, 84, p. 1-7, 2001.
- [8] Ziebig A., Stanek W., *Forecasting of the energy effects of injecting plastic wastes into the blast furnace in comparison with other auxiliary fuels*, *Energy* 26, p. 1159-1173, 2001.
- [9] *Pravilnik o kategorijama, ispitivanju i klasifikaciji otpada, Prilog 9. Lista parametara za ispitivanje otpada za potrebe termičkog tretmana*, Ministarstvo energetike, razvoja i životne sredine, Službeni glasnik RS, br. 56/2010
- [10] ENVIS, *A Programme on „Environmental Management Capacity Building Technical Assistance Project“*, Sponsored by Ministry of Environment and Forests, Government of India, *Management of Plastics, Polymer Wastes and Bio-polymers and Impact of Plastics on the Eco-system*, 4, 2, p. 1-8, 2006.
- [11] Zadgaonkar A., *Eco-friendly Plastic Fuel, Conversion of Waste Plastic into Liquid Hydrocarbons/-Energy, A major breakthrough in the arena of Non-conventional sources of energy*, p. 1-19
- [12] Kamberović Ž., Vučinić A., Janković E., Gavrilovski M., Anđić Z., Korać M., *Stokholmska Konvencija o dugotrajnim organskim zagađujućim supstancama, Uputstvo o najbolje dostupnim tehnikama i najboljim praksama po životnu sredinu koje se odnose na Član 5 i Aneks C, Kategorija: Metalurgija*, p. 222, 2011.
- [13] Asunama M., Ariyama T., Sato M., Murai R., Nonaka T., Okochi I., Tsukiji H., Nemoto K., *Development of Waste Plastics Injection Process in Blast Furnace*, *ISIJ International*, 4, 3, p. 244-251, 2000.
- [14] Kim D., Shin S., Sohn S., Choi J., Ban B., *Waste plastics as supplemental fuel in the blast furnace process: Improving combustion efficiencies*, *Journal of Hazardous Materials B94*, p. 213-222, 2002.
- [15] Burchart-Korol D., *Fossil fuels consumption evaluation in blast furnace technology based on different life cycle impact assessment methods*, *Metal* 2012, Brno, Czech Republic, EU, p.1-6, 2012.
- [16] Ram A. N. M., *Modern blast furnace process, Metallurgy*, 1980 (na ruskom)

SUMMARY

SIMULATION OF BLAST FURNACE OPERATION DURING THE SUBSTITUTION OF COKE AND PULVERIZED COAL WITH GRANULATED WASTE PLASTIC

The possibility of using the waste plastic as reducing agent in blast furnace for obtaining pig iron is in focus for the past couple year. The simulation of blast furnace process in BFC software has been performed in order to analyze the coke and coals saving, CO₂ emission and determining the economic benefits. Three different batches were made for comparative analysis, depending on the batch composition and input of batch components into the blast furnace: case 1 (C1), case 2 (C2) and case 3 (C3). The base case, C1 contains sinter (bulk material) which is needed for obtaining 1 tone of pig iron, quartz which provides slag alkalinity and coke as reducing and energy agent. C2 has the same components as C1, but contains pulverized coal instead one part of coke and C3 contains granulated waste plastic instead coke in an approximately the same amount as pulverized coal. The substitution of coke with pulverized coal and waste plastic is 18.6 % and 25.2 %, respectively. The economic, productivity and ecologic aspects have been analyzed. The consumption of each tone of waste plastic in blast furnace saves 360 \$, which is 18 times more than its price, bearing in mind that the market price of coke is 380 \$/t % and waste plastic 20 \$/t. Regarding the specific productivity, it decreases from 2.13 for C1 to 1.87 for C3. From an environmental aspect there are two main benefits: reduction of CO₂ emission and impossibility of dioxin formation. The CO₂ emission was 20.18, 19.46 and 17.21 for C1, C2 and C3, respectively.

Key words: coke substitution, waste plastic, process simulation, CO₂ emission, variable costs