

UPOTREBA OTPADNIH GORIVIH MATERIJALA U CEMENTNOJ INDUSTRIJI

THE USE OF WASTE COMBUSTIBLE MATERIALS IN THE CEMENT INDUSTRY

Aleksandar TOMOVIĆ

Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, aleksandar.tomovic@hotmail.com

Miroslav STANOJEVIĆ

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, mstanojevic@mas.bg.ac.rs

Aleksandar JOVOVIĆ

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, ajovovic@mas.bg.ac.rs

Nikola KARLIČIĆ

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, nkarlicic@mas.bg.ac.rs

Proces proizvodnje cementa je energetska izuzetno zahtevan. Naime, preko 30 % od ukupnih proizvodnih troškova odlazi upravo na energetske troškove. U cilju smanjenja ovih troškova počelo se sa korišćenjem alternativnih goriva poreklom iz otpadnih materijala pre skoro pola veka. Prednosti korišćenja otpadnih materijala u rotacionim pećima su višestruke, a ogledaju se kroz smanjenje proizvodnih troškova cementa, redukovanje količine otpadnih materija koje bi bile deponovane, smanjenje emisije CO₂ u atmosferu, kao i očuvanje neobnovljivih sirovina i fosilnih goriva. Sam proizvodni proces u rotacionim pećima pogodan je za sagorevanje otpadnih materijala zbog visoke radne temperature koja omogućava uništavanje oslobođenih polutanata, dugog perioda zadržavanja gorivih materijala u peći i alkalne radne sredine. Predmet ovog rada jeste korišćenje čvrstog goriva dobijenog iz otpada (SRF-a) kao dodatnog goriva u procesu proizvodnje cementa. Dat je prikaz potencijala Srbije u proizvodnji SRF-a i kontinuitetu obezbeđivanja goriva. Za određeni sastav ovog alternativnog goriva izračunat je sastav produkata sagorevanja.

Ključne reči: otpadni gorivi materijal; industrija cementa

The process of cement production has great energy demands. Namely, over 30 % of total production costs are energy consumption costs. In order to decrease these costs the exploitation of alternative fuels that originate from waste materials started almost half a century ago. Advantages of waste material utilization in the rotary kilns are numerous and they can be observed through the decrease of cement production costs, landfill reduction, CO₂ emission reduction and preservation of natural sources and fossil fuels as well. The production process in rotary kilns, itself enables destruction of produced pollutants, long period of passing material through a kiln and alkaline environment as well. The subject of this paper is the utilization of Solid Recovered Fuel (SRF) as the alternative fuel in cement industry. Serbia's potentials in production and continuity are presented. For a particular structure of this alternative fuel the composition of combustion products has been calculated.

Key words: waste combustible materials; cement industry

I. 1 UVOD

Jedan od najvećih izazova savremenog društva jeste održivo upravljanje otpadom, kako komunalnim tako i industrijskim. Oba tipa ovih otpada sadrže visoko energetske frakcije, čija se energija može koristiti transformisati u toplotu i time omogućiti smanjenje utroška fosilnih goriva u procesima koji zahtevaju velike količine toplote [1]. U procesu proizvodnje cementa energetska troškovi čine preko 30% od ukupnih proizvodnih troškova, pa se zbog toga intenzivno razmatraju mogućnosti korišćenja jeftinijih alternativnih energenata. Primena ovih energenata pored ekonomske ima i značajnu ulogu u smanjenju količina otpada koji će biti deponovani. U ovom radu razmotreno je korišćenje nereciklabilnog neopasnog otpada u cementnoj industriji kao alternativnog goriva. U svetu je prisutan trend korišćenja čvrstog goriva dobijenog iz otpada (SRFa) kao dodatnog goriva u rotacionim pećima i shodno tome radi se na intenzivnoj analizi njegovog uticaja na kvalitet životne sredine i proizvoda [2].

Gorivi materijali u otpadu su prvenstveno usintnjen papir, plastika, folije i ambalaža, tekstil, guma i mineralne nečistoće. Za preradu u SRF otpadne materije moraju zadovoljiti sledeće kriterijume [3], [2]:

- Emisija zagađujućih materija se ne sme povećati;
- Po karakteru otpadne materije moraju biti neopasne;
- Ne mogu se reciklirati;
- Da imaju potrebnu toplotnu moć;
- Da ne utiču na smanjenje kvaliteta cementa;
- Njihovim korišćenjem se ne smeju povećati troškovi proizvodnje.

Dodatni zahtevi koji se odnose na tehničke aspekte korišćenja alternativnih goriva u fabrikama cementa odnose se na [2]:

- Pripremu i skladištenje alternativnih goriva;
- Pravne okvire države kojima se reguliše sagorevanje;
- Modifikovanje sistema za dopremanje goriva;
- Prilagođavanje gorionika novoj vrsti goriva.

Krovni dokument kojim se reguliše upravljanje otpadom na teritoriji Republike Srbije jeste Zakon o upravljanju otpadom [4]. Od posebne važnosti u kreiranju alternativnih goriva jeste razvrstavanje sekundarnih sirovina i izdvajanje grupa otpada koji se mogu koristiti za formiranje ovog tipa goriva, što je u Srbiji definisano Pravilnikom o uslovima i načinu razvrstavanja, pakovanja i čuvanja sekundarnih sirovina. Prikaz grupa materijala koji su pogodni za formiranje SRF-a dat je u tabeli 1 pri čemu su samo određeni tipovi otpada iz ovih grupa pogodni za preradu u SRF [5]. Za Srbiju je od kraja 2012. godine standard SRPS CEN/TR 15508:2012, ISS, koji pruža dodatne informacije koje se odnose na osnovna svojstva čvrstih goriva dobijenih iz otpada (SRF) [6].

Tabela 1. Grupe otpada pogodnih za formiranje SRF-a [5]

| Indeks | Naziv |
|--------|--|
| 02 01 | Otpadi iz poljoprivrede, hortikulture, akvakulture, šumarstva, lova i ribolova |
| 02 03 | Otpadi od pripreme i prerade voća, povrća, žitarica, jestivih ulja, kakaoa, kafe, čaja i duvana; proizvodnje konzervisane hrane; prerada duvana; proizvodnja kvasca i ekstrakta kvasca; priprema i fermentacija melase |
| 02 04 | Otpadi od prerade šećera |
| 02 07 | otpadi od proizvodnje alkoholnih i bezalkoholnih napitaka (izuzev kafe, čaja i kakaoa) |
| 03 01 | Otpadi od prerade drveta i proizvodnje panela i nameštaja |
| 03 03 | Otpadi od proizvodnje i prerade pulpe, papira i kartona |
| 04 02 | Otpadi iz tekstilne industrije |
| 07 02 | Otpadi od proizvodnje, formulacije, snabdevanja i upotrebe plastike, sintetičke gume i sintetičkih vlakana |
| 09 01 | Otpadi iz fotografske industrije |
| 12 01 | Otpadi od oblikovanja i fizičke i mehaničke površinske obrade metala i plastike |
| 15 01 | Ambalaža (uključujući posebno sakupljenu ambalažu u komunalnom otpadu) |
| 15 02 | Apsorbenti, materijali za filtere, krpe za brisanje i zaštitna odeća |
| 17 02 | Drvo, staklo i plastika |
| 19 05 | Otpadi od aerobnog tretmana čvrstih otpada |
| 19 09 | Otpadi od pripreme vode za ljudsku upotrebu ili vode za industrijsku upotrebu |
| 19 12 | Otpadi od mehaničkog tretmana otpada (npr. sortiranja, drobljenja, kompaktiranja i peletizovanja) koji nisu drugačije specificirani |
| 20 01 | Odvojeno sakupljene frakcije (izuzev 15 01) |
| 20 02 | Otpadi iz vrtova i parkova (uključujući i grobljanski otpad) |
| 20 03 | Ostali opštinski otpadi |

II. 2 POTENCIJALI SRBIJE U OBEZBEĐIVANJU SIROVINA ZA SRF

Prema studiji o morfološkom sastavu i količini realizovanoj na Fakultetu tehnoloških nauka Univerziteta u Novom Sadu [7] u Srbiji se generiše preko dva miliona tona komunalnog otpada godišnje. Podaci vezani za količinu i sastav otpada u 2009. godini dati su u tabelama 2 i 3.

Tabela 2. Podaci o količini generisanog otpada u Srbiji 2009. godine [7]

| Letnja analiza, t/god | Zimska analiza, t/god | Prolećna analiza, t/god | Uprosečeno, t/god | Masa otpada po stanovniku, kg/st/dan |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| 2 226 427 | 1 857 598 | 2 086 212 | 2 056 746 | 0,76 |

Tabela 3. Podaci o morfološkom sastavu otpada [7]

| R. br. | Vrsta otpada | Udeo, %mas |
|--------|----------------------------|------------|
| 1 | Baštenski otpad | 11,88 |
| 2 | Papir | 7,33 |
| 3 | Staklo | 5,26 |
| 4 | Karton | 7,52 |
| 5 | Plastični ambalažni otpad | 3,99 |
| 6 | Plastične kese | 6,65 |
| 7 | Tvrda plastika | 4,37 |
| 8 | Tekstil | 5,04 |
| 9 | Koža | 0,60 |
| 10 | Pelene | 5,00 |
| 11 | Fini elementi | 8,70 |
| 12 | Ostali biorazgradivi otpad | 30,96 |

Deo ovog otpada je pogodan za reciklažu, dok se ostatak može koristiti u energetske svrhe. Neophodna je detaljna analiza o količini otpada koji se može reciklirati, kako bi se uvideo stvarni potencijal za proizvodnju SRF-a. Međutim opravdano je pretpostaviti da se može generisati 20000 tona SRF-a i 7000 tona otpadnih pneumatika godišnje, što su količine koje se razmatraju u nastavku rada.

III. 3 KORIŠĆENJE SRF-A KAO ALTERNATIVNOG GORIVA U ROTACIONIM PEĆIMA

Usled prethodno pomenutih visokih energetske troškova cementna industrija se sve više okreće eksploataciji alternativnih goriva od sekundarnih sirovina. Međutim, korišćenje neobazrivo odabranih alternativnih goriva može dovesti do kontaminacije proizvoda i povećanja emisije zagađujućih materija u atmosferu. Nasuprot tome pravilno korišćenje SRF-a u cementnoj industriji predstavlja značajan potencijal za smanjenje potrošnje neobnovljivih energenata, smanjenje negativnog ekološkog uticaja procesa na okolinu i sveukupno ekonomsko i ekološko unapređenje procesa proizvodnje cementa [8].

Prepoznajući potencijal za smanjenje utroška sredstava na energente u fabrikama cementa se sve češće uvodi primena alternativnih goriva i koineracije. Fabrike cementa u Srbiji razvrstane su po vrsti alternativnog goriva koje koprosuiraju u tabeli 4.

Tabela 4. Pregled korišćenja alternativnih goriva u fabrikama cementa u Srbiji [9]

| R. br. | Fabrika cementa | Gorivo |
|--------|-------------------------------|------------------------------------|
| 1 | LAFARGE BFC | Gume |
| 2 | HOLCIM (Srbija) d.o.o. | Otpadni penumatici, SRF |
| 3 | TITAN Cementara Kosjerić a.d. | Nista, U planu je korišćenje SRF-a |

U ovom radu dat je primer korišćenja SRF-a i otpadnih guma kao alternativnog goriva u rotacionoj peći. Primer bilansa protoka goriva u peći dat je na slici 1.

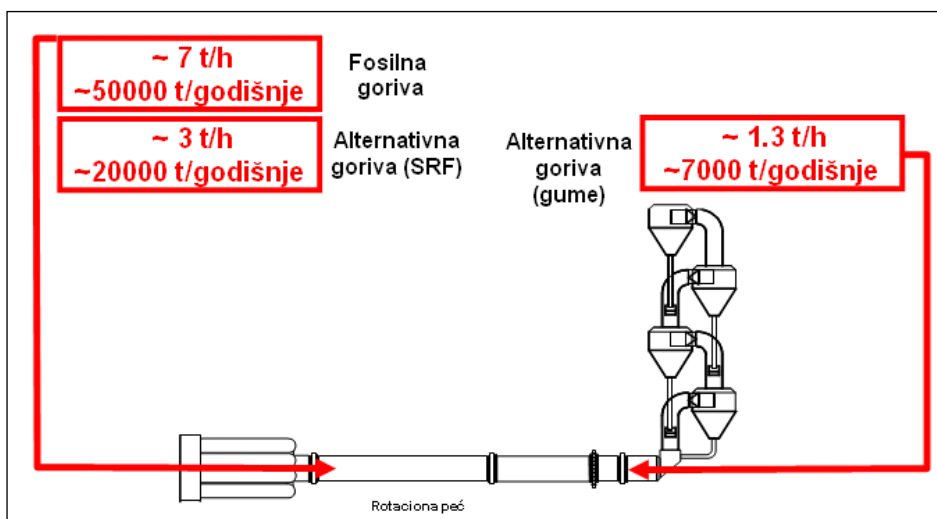
Analizira se sagorevanje goriva čija je suva analiza data u tabeli 5. Potrebno je istaći da se ne analiziraju emisije jedinjenja koja sadrže hlor i teške metale, a koji su prisutni u produktima sagorevanja. U tabeli 5 nalaze se isključivo podaci potrebni za elementarnu analizu produkata sagorevanja [8].

Tabela 5. Suva analiza goriva [8]

| Element | SRF | Gume | Ugalj | Petrol koks |
|---------|------|------|-------|-------------|
| C, % | 48,8 | 85,2 | 70,6 | 89,5 |
| H, % | 7,8 | 7,3 | 4,3 | 3,08 |
| O, % | 29,2 | 0,5 | 11,8 | 1,11 |
| N, % | 0,7 | 0,4 | 1,2 | 1,71 |
| S, % | 0 | 2,3 | 1,3 | 4 |
| A, % | 13,5 | 4,4 | 11,1 | 0,5 |

Korišćenje SRF-a, a naročito otpadnih pneumatika posebno je izazovno sa stanovišta optimizacije emisije teških metala u parnoj fazi u atmosferu i zadržavanju istih u pepelu koji ulazi u sastav cementa. Izlučivanje ovih metala iz cementa predstavlja oblast za sebe i o tome neće biti reči u ovom radu.

Sagorevanje SRF-a zajedno sa fosilnim gorivom vrši se u specijalnim višekanalnim gorionicima sa podešavajućim plamenom koji omogućava optimalno sagorevanje. Podešavanje sagorevanja je izuzetno značajno u cilju optimizacije iskorišćenja goriva i kvaliteta klinkera. Primer jednog gorionika dat je na slici 2. Doziranje SRF-a vrši se kroz kanal koji se nalazi u središnjem delu gorionika dok se doziranje osnovnog goriva vrši u prstenastom kanalu na obodu gorionika. Time se omogućava da SRF uđe u središte plamena gde se postižu temperature reda veličine ~1900 °C. Upravljanje procesom sagorevanja mora biti automatizovano u cilju optimizacije procesa.



Slika 1. Maseni bilans potrošnje goriva u rotacionoj peći, primer



Slika 2. Primer gorionika za kombinovano sagorevanje

IV. 4 ANALIZA OSNOVNIH ELEMENATA GASOVITIH PRODUKATA SAGOREVANJA U ROTACIONOJ PEĆI

Za goriva čiji je sastav dat u tabeli 5 izvršena je analiza produkata sagorevanja sa koeficijentom viška vazduha 1 i 1,4. Prvi slučaj predstavlja sagorevanje sa teorijski potrebnom količinom kiseonika dok drugi slučaj predstavlja preporučenu vrednost za sagorevanje čvrstog goriva [10]. Rezultati analize prikazani su u tabelama 5 i 6.

Tabela 5. Zapremine produkata sagorevanja, $\lambda=1$

| Komponente | | SRF | Gume | Ugalj | Petrol-koks |
|------------------|--------------------|----------|----------|----------|-------------|
| CO ₂ | m ³ /kg | 0,91256 | 1,59324 | 1,32022 | 1,67365 |
| SO ₂ | m ³ /kg | 0 | 0,0161 | 0,0091 | 0,028 |
| H ₂ O | m ³ /kg | 0,873288 | 0,817308 | 0,481428 | 0,344837 |
| O ₂ | m ³ /kg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| N ₂ | m ³ /kg | 4,31283 | 7,582084 | 5,605509 | 7,034749 |
| V _{rw} | m ³ /kg | 6,098678 | 10,00873 | 7,416257 | 9,081235 |
| V _{rs} | m ³ /kg | 5,22539 | 9,191424 | 6,934829 | 8,736399 |

Tabela 6. Zapremina produkata sagorevanja, $\lambda=1,4$

| Komponente | | SRF | Gume | Ugalj | Petrol-koks |
|------------------|--------------------|-----------|----------|----------|-------------|
| CO ₂ | m ³ /kg | 0,91256 | 1,59324 | 1,32022 | 1,67365 |
| SO ₂ | m ³ /kg | 0 | 0,0161 | 0,0091 | 0,028 |
| H ₂ O | m ³ /kg | 0,873288 | 0,817308 | 0,481428 | 0,344837 |
| O ₂ | m ³ /kg | 0,457984 | 0,805856 | 0,595008 | 0,746544 |
| N ₂ | m ³ /kg | 6,0357227 | 10,61364 | 7,843872 | 9,843176 |
| V _{rw} | m ³ /kg | 8,2795547 | 13,84614 | 10,24963 | 12,63621 |
| V _{rs} | m ³ /kg | 7,4062667 | 13,02883 | 9,7682 | 12,29137 |

Za valorizaciju kvaliteta goriva korišćen je odnos proizvedene količine ugljen-dioksida i gornje toplotne moći goriva, pri čemu je gornja toplotna moć goriva računata prema [10]:

$$H_g = 350 \cdot C + 1425 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 105 \cdot S \quad (1)$$

Izračunate vrednosti gornje toplotne moći goriva date su u tabeli 7.

Tabela 7. Gornja toplotna moć goriva

| Gorivo | | SRF | Gume | Ugalj | Petrol-koks |
|--------|-------|----------|----------|----------|-------------|
| H_g | kJ/kg | 22505,75 | 39522,94 | 28166,13 | 35041,28 |

Faktor ocene kvaliteta goriva u odnosu na generisanu zapreminu ugljen-dioksida po 1kJ oslobođene toplote računa se prema formuli:

$$f = \frac{V_{CO_2}}{H_g}, \left[\frac{m^3}{kJ} \right] \quad (1)$$

U tabeli 8 dat je prikaz faktora valorizacije za različite vrste goriva.

Tabela 8. Faktor ocene kvaliteta goriva

| Gorivo | | SRF | Gume | Ugalj | Petrol-koks |
|--------|----------|-----------|------------|-----------|-------------|
| f | m^3/kJ | 0,0000469 | 0,00004055 | 0,0000403 | 0,0000478 |

Na osnovu prikazanih podataka zaključuje se da po 1 kJ goriva najmanje produkata sagorevanja nastaje sagorevanjem uglja, a najviše sagorevanjem petrol-koksa. Poredeći alternativna goriva gume su u prednosti u odnosu na SRF. Ovaj faktor obuhvata samo proizvedeni ugljen-dioksid, s toga ne može biti relevantan pokazatelj sa aspekta zaštite životne sredine, jer mnoga goriva mogu sadržati hlor i teške metale. Dublja analiza produkata sagorevanja prevazilazi okvire ovog rada.

V. 5 ZAKLJUČAK

U radu je dat pregled sekundarnih materijala koji se mogu koristiti za formiranje SRF-a, kao i potencijali Srbije u generisanju otpadnih materijala. Dat je primer koinsineracije fosilnih goriva, otpadnih pneumatika i SRF-a. Izvršena je ocena kvaliteta goriva prema oslobođenoj zapremini ugljen-dioksida po hiljadu džula oslobođene toplote. Prema ovoj analizi najviše ugljen-dioksida se generiše sagorevanjem petrol-koksa, a najmanje sagorevanjem uglja. Izvršena je samo analiza osnovnih produkata sagorevanja, koji su najvažniji za energetski proračun sagorevanja goriva, dok nije razmatran udeo hlora i teških metala u oslobođenim gasovima i pepelu, kao ni problem izluživanja teških metala iz cementa za čiju se proizvodnju koriste alternativna goriva. Ovakav pristup predloženoj problematici je znatno većeg obima nego što je predmet ovog rada.

VI. Skraćenice

SRF – Solid Recovered Fuel, čvrsto gorivo dobijeno iz otpada

V_{rw} – Zapremina vlažnih produkata sagorevanja

V_{rs} – Zapremina suvih produkata sagorevanja

H_g – Gornja toplotna moć goriva

f – Faktor ocene kvaliteta goriva

VII. REFERENCE

- [1] *** *Refuse Derived Fuel, Current Practice And Perspectives (B4-3040/2000/306517/MAR/E3, Final Report*, European Commission – Directorate, General Environment, 2003
- [2] Tsiliyannis, A. C., Alternative fuels in cement manufacturing: Modeling for process optimization under direct and compound operation, *Fuel*, (2012), 99, 20-39, 2012.
- [3] Trezza, M. A., Scian, N. A., Waste fuels: their effect on Portland cement clinker, *Cement and Concrete Research*, (2005), 35, 438-444, 2005.
- [4] *** *Zakon o upravljanju otpadom*, "Sl. glasnik RS", br. 36/2009 i 88/2010, Vlada Republike Srbije
- [5] *** *Pravilniku o uslovima i načinu razvrstavanja pakovanja i čuvanja sekundarnih sirovina*, "Sl. glasnik RS", br. 55/2001, Vlada Republike Srbije
- [6] *** SRPS CEN/TR 15508:2012, ISS, 2012

- [7] *** *Utvrdivanje sastava otpada i procene količine u cilju definisanja strategije upravljanja sekundarnim sirovinama u sklopu održivog razvoja Republike Srbije*, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, 2009
- [8] Uson, A. A., Lopez-Sabiron, M. A., Ferreira, G., Sastresa, L. E., *Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options*, Renewable and Sustainable Energy Reviews (2013), 23, 242-260, 2013.
- [9] *** *Upotreba alternativnih goriva u cementnoj industriji – Pitanja i odgovori*, CIS
- [10] Bogner, M., *Termotehničar*, Interklima-grafika, Vrnjačka Banja, Srbija, 2004.