

POSTOPKI PRIPRAVE ZA PROIZVODNJO TRDNIH GORIV IZ NENEVARNIH ODPADKOV

THE PROCESSES OF PREPARATION FOR THE PRODUCTION OF SOLID FUELS FROM NON-HAZARDOUS WASTE

Janez Ekart¹, Niko Samec¹, Filip Kokalj¹, Brigita Polanec²

¹Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

²MD Inženiring, d. o. o., Loška ulica 8, 2000 Maribor, Slovenija
janez.ekart@gmail.com

Prejem rokopisa – received: 2012-05-07; sprejem za objavo – accepted for publication: 2012-09-18

Namen raziskovalnega dela v predstavljenem članku je bil z matematičnim modelom poiskati rešitev za pripravo trdnih goriv iz nenevarnih odpadkov, ki se lahko predelajo v trdno gorivo v skladu z veljavno nacionalno zakonodajo. Nenevarni odpadki so definirani z DIREKTIVO 2008/98/ES Evropskega parlamenta in Evropskega sveta (19. 11. 2008) – Priloga III¹. Z uporabo matematičnega modela in njegovim orodjem občutljivosti, vezanim na posamezne lastnosti vhodnih odpadnih materialov, smo iz razpoložljivih odpadnih materialov z znanimi parametri njihovega organskega in anorganskega dela poiskali rešitev za njihovo najbolj optimalno izrabo. Iz razpoložljivih odpadnih materialov smo v maksimalnem masnem deležu pripravili zahtevano trdno gorivo z vsemi potrebnimi kakovostnimi lastnostmi z najvišjim mogočim kakovostnim razredom in iz preostanka razpoložljivih masnih tokov ostanek trdnega goriva slabše kakovosti, ki ga pa še vedno lahko plasiramo na trgu z možnostjo sosežiga v cementarnah ali sežigalnicah odpadkov. Pri ugotavljanju kakovosti nenevarnih odpadkov in trdnega goriva je bilo pomembno njihovo pravilno vzorčenje, ki se je izražalo v stopnji homogenizacije vzorcev, ki imajo vsak zase svoje kemijske, fizikalne in energijske lastnosti. Analiza kovinskega dela nenevarnih odpadkov je bila pomembna zaradi podatkov o pričakovanih emisijskih vrednostih v dimnih plinih, letečem pepelu, pepelu in žlindri, ki nastane pri sosežigu trdnega goriva v kurilni napravi. Analiza nekovinskega dela nenevarnih odpadkov je bila pomembna z vidika energijske vrednosti trdnega goriva in tehnoloških ter okoljskih posledic. Rezultati raziskovalnega dela so pokazali, da je mogoče iz razpoložljivih nenevarnih odpadkov doseči sorazmerno majhen masni delež visokokakovostnega trdnega goriva iz odpadkov glede na celotno razpoložljivo maso odpadkov, ki je sedaj v Sloveniji.

Ključne besede: nenevarni odpadki, trdno gorivo, kurilna vrednost, matematični model, razred trdnega goriva

The purpose of the research work in the presented article was to find a solution, by means of a mathematic model, to the problem of how to prepare solid fuels from non-hazardous waste that can be processed into solid fuels according to the national law in force. Non-hazardous waste is defined by the DIRECTIVE 2008/98/ES of the European Parliament and the Council (19.11.2008) – Annex III.¹ With the application of a mathematical model and its sensitivity tool, depending on the individual characteristics of the input waste material, the optimal utilization of different waste streams at disposal based on organic and inorganic parameters for the most optimal solution for exploitation was calculated. From the waste material at disposal the desired solid fuel was made in the maximum mass amount with all the necessary qualitative characteristics with the highest quality class and from the rest of the available mass stream solid fuel of lower quality that can still be placed on the market for incineration at cement kilns or incinerators was made. When defining the quality of non-hazardous waste and solid fuel one of the most important tasks of the research was to sample the waste and the fuel correctly, which was reflected in the degree of sample homogenization to find out the chemical, physical and energy characteristics. The analysis of the metal part of the non-hazardous waste was important because of the data about the expected air-emission values of the flue gas, the fly ash, the ash and the slag that occurs when incinerating solid fuel in the heating system. The analysis of the non-metal part of the non-hazardous waste was important from the view of the calorific value of the solid fuel and of the technological and environmental impact. The results of the research showed that it is possible to achieve from the non-hazardous waste at disposal a relatively small mass fraction of high-quality solid fuel from waste according to the whole amount of mass available in Slovenia at present.

Keywords: non-hazardous waste, solid fuels, calorific value, mathematical model, classification of solid fuels

1 UVOD

Za zmanjšanje obremenitev odlagališč in povečevanje izkoriščanja potenciala odpadkov so na področju ravnanja z odpadnimi materiali nujne druge rešitve v primerjavi z uveljavljenimi v naši državi. Ker imajo vsi organski odpadni materiali neko kurilno vrednost, je smiselna tudi rešitev z energijsko izrabo tistih odpadnih materialov, ki niso primerni za snovno izrabo. Trdna goriva iz odpadnih materialov imajo višjo stopnjo energijske izrabe odpadkov v primerjavi s klasičnimi sežigalnicami odpadkov, saj temeljijo na izrabi alternativnih energijskih virov in ne na odstranjevanju odpadkov, kot to velja za klasične sežigalnice.

Težišče raziskovalnega dela sta uporabljena metoda laboratorijskih analiz razpoložljivih odpadnih materialov in matematični model mešanja teh odpadnih materialov s ciljem proizvodnje trdnih goriv z zelenimi lastnostmi. Dodatna laboratorijska analiza trdnega goriva in analiza emisijskih vrednosti pri sežigu trdnega goriva je zadostna osnova, da v nadaljnjem raziskovalnem delu poiščemo odmike od pričakovanih rezultatov in temu primerno z analizo občutljivosti matematičnega modela izvršimo korekcijo deležev odpadnih materialov v trdnem gorivu.

2 EKSPERIMENTALNI DEL

Za določitev fizikalnih in kemijskih lastnosti trdnega goriva imamo na razpolago laboratorijske analize razpoložljivih frakcij nenevarnih odpadkov, in sicer:

- vsebnost vlage,
- vsebnost pepela,
- GCV – zgorevalna toplota (MJ/kg),
- masni delež Cl (%),
- vsebnost Hg (mg/MJ),
- vsebnost Cd (mg/kg),
- masni delež S (%).

Pogoj za pridobivanje laboratorijskih rezultatov za frakcije razpoložljivih odpadkov in trdnega goriva sta bila njihovo predhodno vzorčenje in homogenizacija. Vzorčenje in homogenizacija vzorcev sta potekala v skladu s tehničnimi specifikacijami in standardi: EN 14899:2005,² SIST EN 15442:2011,³ SIST EN 15443:2011⁴ in SIST-TS CEN/TS 15413:2007.⁵ Za homogenizacijo vzorcev frakcij odpadkov in trdnega goriva sta bila uporabljena:

- rezalni mlin Retsch SM 2000 za večstopenjsko mletje 0,8 cm, 0,4 cm ter 0,2 cm in
- centrifugalni mlin Retsch ZM 200 za homogenizacijo vzorcev.

Določevanje vlage je potekalo v skladu s standardom SIST EN 15414-3:2011,⁶ uporabljena je bila žarilna komora Nabertherm GmbH.

Določevanje zgorevalne toplote (zgornje kurilne vrednosti) je potekalo s kalorimetrom IKA Werke C5000 in z uporabo adiabatskega delovnega procesa z validirano metodo po DIN 51900, kar je v skladu s standardom SIST EN 15400:2011.⁷

Preostale uporabljene metode:

- Hg (mg/kg) v suhi snovi – ISO 5666:1999, pogl. 5, modif.⁸
- Cd (mg/kg) v suhi snovi – SIST EN ISO 17294-2:2005⁹
- S (%) – izlužek – ASTM D 4239 (metoda C):1997¹⁰
- Cl (%) – metoda titracije s titratorjem Metrohm TITRANDO 809 po SIST EN 15408:2011¹¹

2.1 Uporaba matematičnega modela

Pri izdelavi in uporabi matematičnega modela smo izhajali iz variante, s katero bi iz razpoložljivih frakcij odpadkov pridobili trdno gorivo z maksimalno mogočo kakovostjo in ostanek trdnega goriva s slabšo kakovostjo.

Na osnovi predpisanih meril za določitev kakovostnega razreda goriva so bili upoštevani naslednji osnovni parametri: GCV, Cl, Hg, Cd in S.

Celotna masa odpadkov za predelavo v trdno gorivo je izražena z enačbo:

$$m_l = \sum_{i=1}^n m_i \quad n \in N \quad (1)$$

m_l – skupna masa vseh frakcij odpadkov, ki so na razpolago (kg)

m_i – masa i -te frakcije odpadkov (kg)

Podatki za maso posamezne frakcije so bili pridobljeni z evidenčnimi listi, ki so pri prevzemu odpadkov obvezni.

Ker je bilo na razpolago več frakcij odpadkov, je bilo pri sestavi trdnega goriva treba upoštevati njihove lastnosti in deleže. Deleži frakcij odpadkov so bili izraženi z enačbo:

$$d_i = m_i/m_l \quad n \in N \quad (2)$$

d_i – masni delež posamezne frakcije odpadkov

m_i – masa i -te frakcije odpadkov

m_l – skupna masa odpadkov

V imenovalcu je bila celotna masa vseh razpoložljivih frakcij odpadkov.

Posamezen parameter v trdnem gorivu je bil izračunan po enačbi:

$$G_{I(j)} = \frac{\sum_{i=1}^n G_{I(i)} \cdot m_i}{m_l} \quad n \in N \quad (3)$$

j – parameter (GCV, Cl, Cd, Hg, S)

$G_{I(j)}$ – vrednost j -tega parametra skupnega goriva iz odpadkov

$G_{I(i)}$ – vrednost računane parametra i -te frakcije odpadkov po j -tem parametru

m_i – masa i -te frakcije odpadkov

m_l – skupna masa odpadkov

V Sloveniji imamo kakovost trdnega goriva opredeljeno z Uredbo,¹² ki definira kakovostne razrede trdnega goriva v Prilogi 3 (**tabela 1**).

Z matematičnim modelom so bili izračunani relativni deleži posameznih frakcij odpadkov, ki so nam bili na razpolago, z upoštevanjem njihovih posameznih parametrov v odvisnosti od referenčnega parametra, katerega razred za trdno gorivo je določil prevzemnik.

Relativne vrednosti parametrov posamezne frakcije odpadkov so bile izračunane po enačbi:

Tabela 1: Podatki osnovnih frakcij odpadkov

Table 1: Data of the basic waste fractions

Frakcije odpadkov	Masa, m/t	GCV/(MJ/kg)	w(Cl)/%	ρ (Cd)/(mg/kg)	σ (Hg)/(mg/MJ)	w(S)/%
Lahka frakcija MKO	120	15,9	0,48	1,8	0,22	0,02
Odpadki iz industrije (Gorenje)	50	21,7	0,55	2	0,32	0,12
Ostanek po razvrščanju embalaže	30	14,2	0,84	1,6	0,10	0,02

$$p_{i(j)} = \frac{G_{i(j)}}{G_{(j)\text{ref.}}} \quad (4)$$

$p_{i(j)}$ – relativna vrednost i -te frakcije po j -tem parametru
 $G_{i(j)}$ – vrednost računanega parametra j i -te frakcije
 $G_{(j)\text{ref.}}$ – želena vrednost parametra j

Tako so bile izračunane relativne vrednosti posameznih parametrov v odnosu na zelene (referenčne) parametre za vse frakcije odpadkov.

Da bi lahko določili vrednosti optimalnih lastnosti trdnega goriva, smo uporabili izločitvena merila za vsak parameter in za vsako frakcijo odpadkov posebej (if relativna vrednost j -tega parametra ≥ 1 , zapiši 1, drugače pa 0). Z upoštevanjem izločitvenih meril po posameznih parametrih j je bila za optimalne lastnosti trdnega goriva določena nova skupna masa osnovnih frakcij odpadkov, ki je bila izračunana po enačbi:

$$m_{v(j)} = m_i \sum_{i=1}^n (d \cdot p_{i(j)}) \quad n \in N \quad (5)$$

$m_{v(j)}$ – nova masa po izločitvi

Za primešanje posameznih frakcij odpadkov smo določili variacijski razmik (VR) med lastnostmi optimalnega trdnega goriva in trdnega goriva po zahtevah prevzemnika:

$$VR = \left| G_{\text{opt.}} - G_{(j)\text{ref.}} \right| \quad (6)$$

$G_{\text{opt.}}$ – vrednost j -tega parametra optimalnega trdnega goriva

$G_{(j)\text{ref.}}$ – vrednost j -tega parametra trdnega goriva, ki ustreza zahtevam prevzemnika

Parameter primešanja G_j določimo z variacijskim razmikom in maso po izločitvi. Če je parameter G_j enak 0, je primešanje dodatne frakcije dovoljeno, sicer ne. Za izračun teoretično mogoče mase frakcije odpadkov za primešanje smo uporabili enačbo:

$$m_{\text{dom}(j)} = \frac{VR \cdot m_{v(j)}}{G_{(j)\text{ref.}} - G_{i(j)}} \quad (7)$$

$m_{\text{dom}(j)}$ – teoretična mogoča masa primešanja za parameter j

Za primešanje smo pri izračunu po matematičnem modelu upoštevali, da lastnosti enega izmed osnovnih frakcij odpadkov ustrezajo lastnostim referenčnega trdnega goriva, kot ga zahteva prevzemnik. Zato smo določili, da tej frakciji odpadkov primešamo razpoložljivi preostali osnovni frakciji odpadkov s ciljem, da iz obstoječe osnovne mase odpadkov zagotovimo maksimalno mogočo maso trdnega goriva, ki bo ustrezalo referenčnim vrednostim. Glede na lastnosti frakcij odpadkov smo določili prioritetni red primešanja. Kot prvi prioritetni red primešanja smo uporabili frakcijo odpadkov, ki je v največjem deležu posameznih parametrov $j_{1,5}$ bila najbližje parametrom referenčnega trdnega goriva (kot ga zahteva prevzemnik). Ker smo imeli tri dodatne frakcije odpadkov in pet parametrov, ki

smo jih analizirali v posamezni frakciji odpadkov za primešanje, smo uvedli matriko za primešanje s tremi stolpci in petimi vrsticami. Pri tem je prvi stolpec pomenil frakcijo odpadkov V1, drugi stolpec frakcijo odpadkov V2 in tretji stolpec frakcijo odpadkov V3. Vrstice so pomenile posamezne parametre $j_{1,5}$. Merilo za formiranje matrike:

– prva vrstica, prvi stolpec matrike (1,1) : if V1 = razred_{ref.} – vpiši 1, drugače vpiši 0

Za prvi prioritetni red primešanja smo dobili matriko:

$$\begin{matrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{matrix}$$

Rezultat matrike pove, da smo v prvem prioritetenem redu primešanja uporabili frakcijo odpadkov V2. Po enakem postopku smo dobili matriko drugega in tretjega prioritetenega reda primešanja. Po določitvi prioritetenih redov primešanja frakcij odpadkov smo določili količino (maso) primešanja frakcije odpadkov na podlagi meril posameznih parametrov $j_{1,5}$ in enačbe:

$$m_{(j)P_1} = m_{\text{dej.}} \cdot P_{n(jxi)} \quad (8)$$

$m_{(j)P_1}$ – masa domešavanja frakcije odpadkov prve prioritete po j -tem parametru

$m_{\text{dej.}}$ – dejanska masa primešanja vseh frakcij odpadkov

$P_{n(jxi)}$ – pripadajoči prioritetni red mešanja

Za izračun vrednosti skupne mase smo uporabili enačbo (primer parameter GCV):

$$m_{jS_n} = m_{(j)P_1} + m_{v(j)} \quad (9)$$

m_{jS_n} – skupna masa n -tega materiala po j -tem parametru

$m_{(j)P_1}$ – masa primešanja prvega prioritetenega reda po j -tem parametru

Po enakem sistemu smo izračunali količine primešanja za druge parametre frakcije odpadkov V1 in nato količine primešanja v drugem in tretjem prioritetenem razredu.

Končno maso primešanja za optimalno trdno gorivo smo izračunali po enačbi:

$$m_{\text{TAG}} = m_{\text{ref.}} + \sum_{i=1}^n m_{P_i} \quad (10)$$

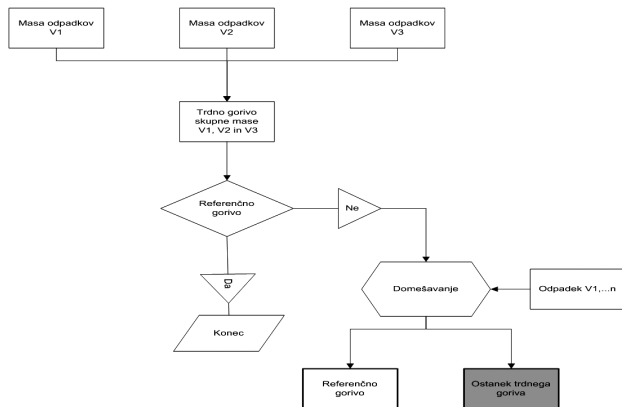
m_{TAG} – masa končnega goriva zelenega razreda

$m_{\text{ref.}}$ – masa vzorca trdnega goriva, ki izpolnjuje pogoje zelenega razreda

m_{P_i} – vsota mas primešanih frakcij odpadkov k vzorcu trdnega goriva, ki izpolnjuje pogoje zelenega razreda

Po primešanju frakcij odpadkov v prvem, drugem in tretjem prioritetenem redu primešanja smo dobili trdno gorivo, ki je izpolnjevalo pogoje zelenega razreda v celotni masi TAG in ostanek trdnega goriva slabšega kakovostnega razreda, ki bi ga lahko hkrati sežigali v cementarnah ali sežigalnicah odpadkov.

Slika 1 prikazuje diagram poteka priprave referenčnega trdnega goriva in ostanke trdnega goriva. Na



Slika 1: Procesni diagram priprave referenčnega trdnega goriva in ostanka trdnega goriva

Figure 1: Flow chart of the preparation of the reference solid fuel and its residues

sliki 2 je prikazan model osnovnega masnega toka frakcij odpadkov in primešanja ločenih frakcij z uporabo matematičnega modela, s čimer dosežemo produkt trdnega goriva po zahtevah prevzemnika in ostanek trdnega goriva slabše kakovosti.

Ker smo imeli na razpolago tri dodatne frakcije odpadkov, smo k ostanku trdnega goriva primešali ločene frakcije odpadkov po naslednji enačbi:

$$m_{\text{ost.}} = m_0 + \sum_{i=1}^n m_{p_i} \quad n \in N \quad (11)$$

$m_{\text{ost.}}$ – masa ostanka goriva po primešanju ločenih frakcij odpadkov

m_0 – masa ostanka goriva pred primešanjem

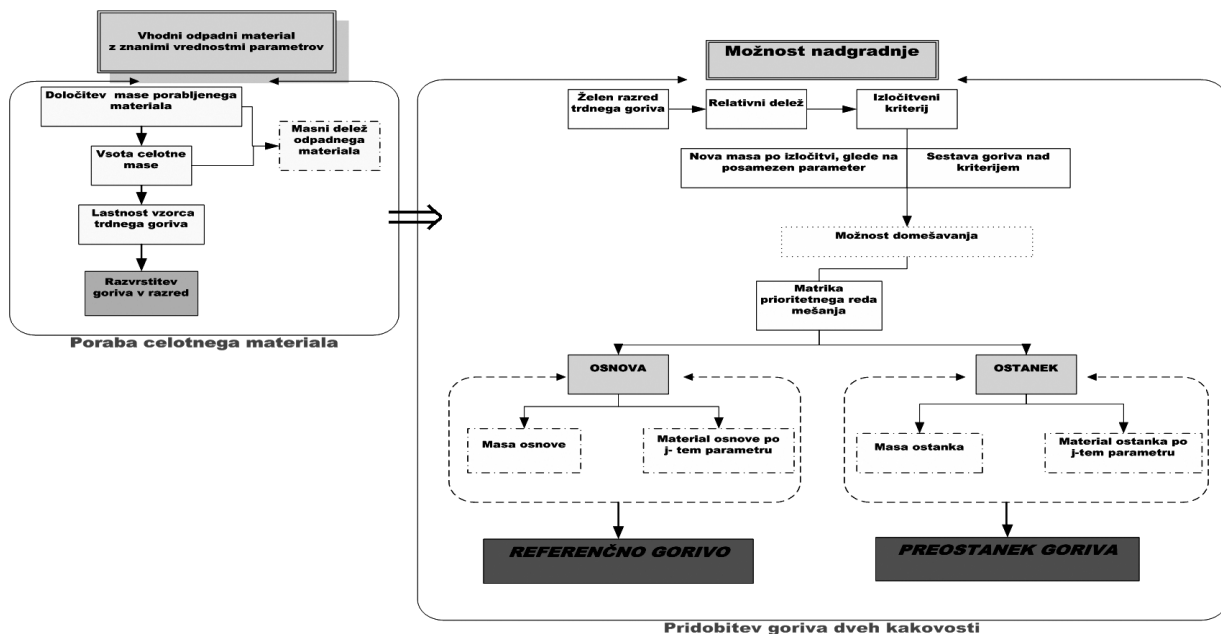
m_{p_i} – vsota mas primešanih frakcij odpadkov k ostanku trdnega goriva

3 REZULTATI

Na razpolago smo imeli 200 t osnovnih frakcij odpadkov in 50 t ločenih frakcij za primešanje. V količini 200 t odpadkov so bili taki s parametri, določenimi na podlagi njihovega vzorčenja in laboratorijskih analiz (tabela 1). Podatke o ločenih frakcijah za primešanje prikazuje tabela 2.

Z uporabo celotne osnovne mase frakcij odpadkov in njihovih lastnosti, ki jih prikazuje tabela 1, smo z uporabo enačbe (3) izračunali parametre trdnega goriva (tabela 3).

V skladu s Prilogo 3 Uredbe¹² smo pridobljeno gorivo zaradi kurilne vrednosti uvrstili v razred 3. Drugi parametri so ustrezali trdnemu gorivu razreda 2, nekateri celo razredu 1.



Slika 2: Model osnovnega masnega toka in domešavanja ločenih frakcij odpadkov z uporabo matematičnega modela

Figure 2: Model of the basic mass stream and co-mixing of the separated waste fractions with the use of the mathematical model

Tabela 2: Ločene frakcije odpadkov za domešavanje

Table 2: Separated waste fractions for co-mixing

Frakcije odpadkov	Masa, m/t	GCV/(MJ/kg)	w(Cl)/%	$\rho(\text{Cd})/(\text{mg}/\text{kg})$	$\sigma(\text{Hg})/(\text{mg}/\text{MJ})$	$w(\text{S})/\% ^4$
Tekstil	20	30,5	0,23	2	0,10	0,01
Odpadni les	20	7,4	0,19	2	0,32	0,12
Rumene vreče	10	20,9	0,7	2	0,10	0,01

Potencialni prevzemnik je zahteval trdno gorivo razreda 2, kar je za doseganje višje kurilne vrednosti goriva pomenilo potrebo po primešanju k osnovnemu trdnemu gorivu razreda 3. Za pripravo trdnega goriva razreda 2 smo z izločitvenimi merili z uporabo enačbe (5) izračunali maso trdnih goriv iz osnovnih frakcij odpadkov, pri čemer smo dobili trdno gorivo kakovosti, ki jo prikazuje **tabela 4**.

Sicer smo že z uporabo izločitvenih meril pri osnovni masi frakcij odpadkov teoretično dosegli dve kakovosti trdnega goriva, od katerih je eno ustrezalo razredu 2 kot našemu referenčnemu gorivu. S primešanjem frakcije odpadkov iz osnovnega masnega toka k referenčnemu gorivu smo želeli povečati maso referenčnega goriva. Z uporabo enačb od (6) do (10) smo s primešanjem z uporabo osnovnih frakcij odpadkov dosegli povečanje mase referenčnega goriva razreda 2 in zmanjšali maso ostanka trdnega goriva, pri kateri se je zmanjšala vrednost *GCV* in je zato bil uvrščen v razred 4.

Rezultati primešanja v obsegu osnovnega masnega toka frakcij odpadkov so prikazani v **tabeli 5**.

S primešanjem dodatne ločene frakcije odpadkov V4 – tekstil k ostanku trdnega goriva iz osnovne mase frakcij odpadkov po enačbi (11) smo v prvem koraku izboljšali kakovost ostanka trdnega goriva iz osnovne mase frakcij odpadkov, tako da je ostanek trdnega goriva iz razreda 4 prešel v razred 3. S primešanjem vseh dodatnih ločenih frakcij odpadkov k ostanku trdnega goriva iz osnovnega masnega toka frakcij odpadkov smo dobili trdno gorivo razreda 4, vendar z bistveno višjim *GCV*, kot ga je imel ostanek iz osnovnega masnega toka frakcij odpadkov. Vsi drugi parametri so ustrezali razredu 1 oziroma razredu 2.

Rezultate primešanja ločenih frakcij odpadkov k ostanku trdnega goriva iz osnovnega masnega toka prikazuje **tabela 6**.

4 DISKUSIJA

Fizikalno-matematična izhodišča niso upoštevala vseh procesov, ki potekajo pri predelavi med proizvodnjo, kot so na primer mletje in izločevanje anorganskih materialov, temveč smo obravnavali samo vhod in izhod procesa. Matematični model omogoča izračun parametrov trdnega goriva s poljubnim številom frakcij odpadkov, vendar je z vidika tehnološke rešitve doziranja frakcij odpadkov primerno računati z istočasnim doziranjem do maksimalno treh frakcij odpadkov. Za določevanje lastnosti goriva je bil upoštevan zakon o ohranitvi mase, zato so bili za vsak masni tok frakcije odpadkov pomembni vsi parametri.

Ker je proizvodnja goriva zasnovana na mehanski obdelavi, so se lastnosti trdnega goriva izražale samo v velikosti delcev in homogenizaciji. Izločene kovine niso pomenile pomembnega deleža in v matematičnem modelu v masnem toku niso bile upoštewane. Na podlagi analitičnih podatkov laboratorijskih analiz se je njihovo

izločanje v procesu kazalo v povečanju vrednosti *GCV* trdnega goriva.

Strokovna literatura za posamezne parametre trdnih goriv obravnava problematiko trdnih goriv parcialno, ne obravnava pa meril, kako doseči konfekcionirano trdno gorivo na podlagi izbire odpadnih materialov, ki imajo vsak zase določene kemijske, fizikalne in energijske lastnosti. V strokovnih člankih, ki obravnavajo področje trdnih goriv, področja uporabe matematičnega modela za izračun kemijskih in fizikalnih lastnosti trdnih goriv ni bilo mogoče najti. Sicer so v strokovni literaturi¹³ navedene ugotovitve o tem, da je osnova postopka ocenjevanja lastnosti celotno stanje materialov. Uporaba čiste mehanske separacijske tehnike zagotavlja, da se zmes z vidika materialov vhodnih odpadkov ne preoblikuje in da razpoložljive separacijske tehnike ne puščajo materialov v sistemu. Z uporabo zakona o ohranitvi mas in energije je stanje na vhodu enako stanju vsote izhodnih masnih tokov. Velja enačba:

$$X_{input}(S) = M_{input} \times C_{input}(S) = \sum_{i=1}^k MP_i \cdot CP_i(S) \quad (12)$$

pri čemer je:

X – obremenitev

k – število izhodov

C – koncentracija

M – referenčna masa funkcionalne enote (kilogram ostanka na tono vstopnega materiala)

*P*₁ – indikator izhod 1

*P*_{*i*} – indikator izhod *i*

S – substanca elementa

S preizkusi je bilo ugotovljeno, da so kemijski elementi, kot so klor, kadmij in svinec, v odpadkih pogosto koncentrirani. Tudi z optimirano tehniko ločevanja je možnost za njihovo zmanjšanje omejena zaradi razdelitve koncentracije teh elementov v različnih komponentah masnega toka odpadkov. V nasprotju s Cd in Pb je prispevek cinka v odpadkih bolj enakomerno porazdeljen. Podatki o koncentracijah nevarnih snovi v odpadkih in njihova porazdelitev v gospodinjstvih odpadkih (mešani komunalni odpadki) ter rezultati ločevanja z uporabo različnih tehnik ločevanja kažejo, da so mehanske operacije ločevanja zadostne za izločanje odpadkov, ki vsebujejo nevarne snovi.

Ugotovljeno je, da delež plastike iz mešanih komunalnih odpadkov narašča z ločevanjem le-teh v bobnastem situ od 26,3 % na 57,8 %. Prav tako vsebnost vlage v mešanih komunalnih odpadkih pade s tem načinom ločevanja od 50 % na 40 %, kar je z vidika priprave trdnega goriva pomemben podatek. Vendar pa je vpliv predhodno sortiranih trdnih odpadkov na objekte za pridobivanje energije v različnih državah še vedno negotov zaradi inherentne kompleksnosti sestave trdnih odpadkov.¹⁴

Študija uporabe RDF je ugotovila, da njegova uporaba v cementnih pečeh namesto premoga ali kokska ponuja okoljske prednosti pri zmanjšanju toplogrednih

Tabela 3: Parametri trdnega goriva z uporabo celotne mase osnovnih frakcij odpadkov**Table 3:** Parameters for the solid fuel produced with the total mass of the basic waste fractions

Parameter	Vrednost	Razred
Masa, <i>m</i> /kg	200000	
<i>GVC</i> /(MJ/kg)	17,095	3
<i>w</i> (Cl)/%	0,5515	2
σ (Hg)/(mg/MJ)	0,013044861	1
ρ (Cd)/(mg/kg)	1,82	2
<i>w</i> (S)/%	0,045	1

Tabela 4: Trdno gorivo iz osnovnih frakcij odpadkov z uporabo izločitvenih meril**Table 4:** Solid fuel produced from basic fraction using the eliminating criteria

Trdno gorivo		Razred 2		Razred 3	
Parameter	Enota	Vrednost	Razred	Vrednost	Razred
masa, <i>m</i>	kg	50000		150000	
<i>GVC</i>	MJ/kg	21,7	2	15,56	3
<i>w</i> (Cl)	%	0,550	2	0,552	2
σ (Hg)	mg/MJ	0,0147	1	0,01248	1
ρ (Cd)	mg/kg	2,0	2	1,76	2
<i>w</i> (S)	%	0,12	1	0,02	1

Tabela 5: Trdno gorivo z domešavanjem v obsegu osnovnega masnega toka**Table 5:** Solid fuel produced with co-mixing from the basic mass stream

Trdno gorivo		Razred 2		Razred 4	
Parameter	Enota	Vrednost	Razred	Vrednost	Razred
masa, <i>m</i>	kg	70731,7		129268,3	
<i>GVC</i>	MJ/kg	24,279	2	13,164	4
<i>w</i> (Cl)	%	0,456	2	0,6036	3
σ (Hg)	mg/MJ	0,0114	1	0,0139	1
ρ (Cd)	mg/kg	2,0	2	1,7215	2
<i>w</i> (S)	%	0,0878	1	0,0216	1

Tabela 6: Trdno gorivo z domešavanjem dodatnih ločenih frakcij odpadkov**Table 6:** Solid fuel produced with co-mixing from the additional separated waste fractions

Trdno gorivo		Domešavanje V4		Domešavanje V4, V5 in V6	
Parameter	Enota	Vrednost	Razred	Vrednost	Razred
masa, <i>m</i>	kg	149268		179268	
<i>GVC</i>	MJ/kg	15,487	3	14,887	4
<i>w</i> (Cl)	%	0,5535	2	0,521	2
σ (Hg)	mg/MJ	0,0126	1	0,016	1
ρ (Cd)	mg/kg	1,7588	2	1,799	2
<i>w</i> (S)	%	0,02	1	0,049	1

plinov, medtem ko nastanek polutantov v plinastem agregatnem stanju ni pomemben dejavnik.¹⁵ Zanimiva je tudi primerjava med mešanimi komunalnimi odpadki in RDF za primer energijske izrabe na območju Castilla y Leona (Španija). Tako je bila ugotovljena vsebnost vlage v organskem delu mešanih komunalnih odpadkov 58,33 % in v RDF 42,26 %, pri analizi vsebnosti vlage v papirju in kartonu mešanih komunalnih odpadkov pa je

ugotovljeno 55,59 % vlage, v RDF pa samo 16,72 %. Posledično temu je bila tudi *GCV* v dostavljenem stanju mešanih komunalnih odpadkov 10,16 kJ/kg, v RDF pa 18,28 kJ/kg.¹⁶

Proizvajalci trdnih goriv lahko matematični model uporabljajo samo ob izpolnjevanju pogojev za zagotavljanje kakovosti trdnega goriva iz odpadkov v skladu s standardom SIST EN15358:2011 Trdna alternativna goriva – Sistemi vodenja kakovosti,¹⁷ ki vključujejo stalno kontrolo odpadkov na vhodu in produkta trdnega goriva na izhodu z njihovim vzorčenjem ter izvedbo laboratorijskih analiz.

Raziskovalno delo, ki je predstavljeno v tem članku, daje možnost nadaljnje raziskave trdnih goriv predvsem na osnovi ugotovljenih emisij snovi v zrak pri zgorevanju trdnega goriva. Z uporabo teoretičnih preračunov emisij je mogoče izvesti primerjave z eksperimentalno določenimi vrednostmi emisij snovi v dimnih plinih pri zgorevanju trdnega goriva iz odpadkov. Za celovito bilanco transformacije škodljivih snovi pa so bile opravljene tudi analize pepela in žindre, ki sta ostala po zgorevanju. To omogoča postavljanje matematičnega modela, ki bo napovedoval vpliv zgorevanja posameznega goriva na okolje že na osnovi temeljite analize vzorca trdnega goriva.

Zahvala

Avtorji smo hvaležni Javni agenciji za tehnološki razvoj Republike Slovenije in Evropski uniji oziroma Evropskemu skladu za regionalni razvoj za sofinanciranje tega razvojno investicijskega projekta (RIP 09) z naslovom "Obnovljivi viri energije iz odpadkov – postopki predelave odpadkov v trdno gorivo in njegova energijska izraba s sežigom in uplinjanjem".

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the Public Agency for Technology of the Republic of Slovenia and the European Union; the European Fund for Regional Development for co-funding this research investment project in the framework RIP 09 with the title "Renewable energy from waste – the processes of waste processing into solid fuel and its energy recovery with combustion and gasification".

5 LITERATURA

- DIREKTIVA 2008/98/ES Evropskega parlamenta in Evropskega sveta (19. 11. 2008) – Priloga III
- EN 14899:2005; Karakterizacija odpadkov-vzorčenje odpadkov – Okvirno navodilo za pripravo in uporabo načrta vzorčenja
- SIST EN 15442:2011; Trdno alternativno gorivo – Metode vzorčenja
- SIST EN 15443:2011; Trdno alternativno gorivo – Metode za pripravo laboratorijskega vzorca
- SIST TS CEN/TS 15413:2007; Trdno alternativno gorivo – Metode za pripravo testnega vzorca iz laboratorijskega vzorca

- ⁶ SIST EN 15414-3:2011; Trdno alternativno gorivo – Določevanje vsebnosti vlage z metodo sušenja v sušilni komori – 3. del: Vlaga v preizkusnem vzorcu
- ⁷ SIST EN 15400:2011; Trdno alternativno gorivo – Določevanje kurilne vrednosti
- ⁸ ISO 5666:1999, pogl. 5, modif.; metoda za določevanje živega srebra (standard, korigiran z ISO 12846:2012)
- ⁹ SIST EN ISO 17294-2:2005; Določevanje težkih kovin z uporabo induktivno sklopljene plazme z masnim selektivnim detektorjem (ICP-MS)
- ¹⁰ ASTM D 4239 (metoda C):1997; standardna testna metoda za določevanje vsebnosti žvepla v zgorevalni komori z visokotemperaturnim režimom
- ¹¹ SIST EN 15408:2011; Trdna alternativna goriva – Metode za določevanje žvepla (S), klora (Cl), fluora (F) in broma (Br)
- ¹² Uredba o predelavi nenevarnih odpadkov v trdno gorivo, Ur. l. RS št. 57/2008
- ¹³ V. S. Rotter, T. Kost, J. Winkler, B. Bilitewski, Material flow analysis of RDF Production processes, Waste management, (2004), 1005–1021
- ¹⁴ N. B. Chang, Y. H. Chang, W. C. Chen, Evaluation of heat value and its prediction for refuse-derived fuel, The Science of the Total Environment, (1997), 139–148
- ¹⁵ G. Genon, E. Brizio, Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF, Waste management, (2008), 2375–2385
- ¹⁶ C. Montejo, C. Costa, P. Ramos, M. C. Marquez, Analysis and comparison of municipal solid waste and reject fraction as fuels for incineration plants, Applied Thermal Engineering, (2011), 2135–2140
- ¹⁷ SIST EN15358:2011 Trdna alternativna goriva – Sistemi vodenja kakovosti