

N. Mustapić, B. Markovinović*

SIMULACIJA CJELOVITOG SUSTAVA GOSPODARENJA KOMUNALNIM OTPADOM REPUBLIKE HRVATSKE

UDK 628.4(497.5)
PRIMLJENO: 4.1.2019.
PRIHVAĆENO: 8.3.2019.

Ovo djelo je dano na korištenje pod Creative Commons Attribution 4.0 International License 

SAŽETAK: Republika Hrvatska kao članica EU-a dužna je provesti planiranje i realizaciju cjelovitog sustava gospodarenja komunalnim otpadom što predstavlja direktnu implementaciju načela kružnog gospodarstva. U ovome radu opisan je postupak definiranja matematičkog modela cjelovitog sustava gospodarenja komunalnim otpadom u Republici Hrvatskoj primjenom metode analize materijalnih tokova i metode analize tokova tvari. U simulacijskom modelu pretpostavljena su tri različita trenda predviđanja generiranja komunalnog otpada. Provedena je simulacija sustava za razdoblje od 15 godina, od 2015. do 2030. godine. Na primjeru rezultata simulacije sustava za 2020. godinu može se zaključiti da postoji veliki potencijal dugoročne samoodrživosti sustava. Dobiveni rezultati ukazuju da se u sustavu od ulaznog masenog toka otpada 25,6 % preradi u razne vrste reciklata, 7,5 % se preradi u kompost, dok se samo 19,5 % otpada odloži na odlagališta. Rezultati indiciraju da je moguća značajna proizvodnja električne energije upotrebom dobivenog bioplina i krutog oporabljene goriva u odgovarajućim energetske postrojenjima.

Glavne riječi: sustav gospodarenja otpadom, metoda analize materijalnih tokova, metoda analize tokova tvari, simulacija

UVOD

Nakon Prve konferencije Ujedinjenih naroda o okolišu održane u Stockholmu 1972. godine, Europska unija prihvatila je svoj prvi, od ukupno sedam, akcijskih programa za zaštitu okoliša (1973.-1976.), kojim se utvrđuju načela i prioriteta koji će voditi njezinu buduću politiku o zaštiti okoliša. Tada je gospodarenje otpadom prepoznato kao važan instrument u zaštiti okoliša te je uvršteno u taj akcijski program. Pristup Europske unije u gospodarenju otpadom temelji se na "hijerarhiji otpada" (*Direktiva 2008/898/EZ*) koji određuje sljedeći redoslijed prioriteta prilikom oblikovanja politike o postupanju s otpadom i oblikovanja sustava gospodarenja otpadom na

operativnoj razini: (1) prevencija, (2) priprema za ponovno korištenje, (3) recikliranje, (4) oporaba (uključujući i energetske oporabu), i na kraju kao najmanje poželjne opcije, odlaganje otpada i spaljivanje bez iskorištavanja energije dimnih plinova.

Europska komisija 2015. godine pokrenula je donošenje paketa zakonskih akata o kružnom gospodarstvu koji uključuje razne revidirane zakonske prijedloge o gospodarenju otpadom koji su namijenjeni stimulaciji zemalja članica za prijelaz prema kružnom gospodarstvu. Republika Hrvatska kao članica EU-a dužna je poštovati zahtjeve obveze zajedničkih europskih okolišnih politika. Primarni cilj je izgradnja cjelovitog sustava gospodarenja komunalnim otpadom prema uzoru na iskustva iz drugih članica EU-a.

Glavni cilj ovog rada je modeliranje matematičkog modela cjelovitog sustava gospodarenja

*Dr. sc. Nenad Mustapić, prof. v.š., (nenad.mustapic@vuka.hr), Veleučilište u Karlovcu, Trg J.J. Strossmayera 9, 47000 Karlovac, Branimir Markovinović, bacc. ing. mech., (brn.markovinovic@gmail.com), Alplas, A.G. Matoša 4, 43240 Čazma.

komunalnim otpadom u Republici Hrvatskoj, te analiza dobivenih rezultata. Rezultati simulacije kvantificiraju materijalne tokove koji su posljedica implementacije načela kružnog gospodarstva.

SASTAV I KOLIČINA KOMUNALNOG OTPADA

Prema podacima iz Plana gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje od 2017.-2022. godine, ukupno odloženi komunalni otpad u Republici Hrvatskoj 2015. godine iznosio je 1.356.000 tona. Iz istog izvora može se utvrditi podatak da je ukupno proizvedena količina komunalnog otpada u toj godini bila 1.653.918 tona. Pretpostavljeno je da se komunalni otpad sastoji od osam frakcija. U Tablici 1. dani su maseni udjeli pojedinih frakcija otpada (*Metodologija za određivanje sastava...*, 2015.), njihove godišnje količine (t/god), te maseni udjeli vlage (*Arena, DiGregorio, 2013.*) u pojedinim frakcijama. U istoj tablici dani su podaci o masenim udjelima (*Arena, Di Gregorio, 2013.*) tvari olova i dušika u pojedinim frakcijama koji će kasnije po-

služiti za analizu toka tih tvari kroz sustav gospodarenja otpadom.

U zakonskom paketu koji promiču implementaciju kružnog gospodarstva u EU predložene su revidirane verzije EU direktiva kojima se propisuju ambiciozne ciljne vrijednosti postotnih udjela odvojeno sakupljenih frakcija otpada za tri razdoblja, do 2020., do 2025. i do 2030. godine. Ciljna vrijednost (eng. *target*) određuje postotak frakcije otpada koji će biti recikliran u odnosu na ukupnu količinu frakcije. Ciljne vrijednosti za pojedine frakcije otpada propisane u EU direktivama (*Direktiva 2008/898/EZ, Direktiva 94/62/EZ*) i njihovim pratećim zakonskim aktima, kao i u Zakonu o održivom gospodarenju otpadom. Pregled važećih ciljnih vrijednosti za pojedine frakcije otpada dan je u Tablici 2. U Planu gospodarenja otpadom Republike Hrvatske 2017.-2022. predloženi su ciljevi u sklopu gospodarenja otpadom od kojih su neki stroži od onih navedenih u Tablici 2. Ispunjavanje takvih ciljnih vrijednosti u ovako kratkom razdoblju (do 2022. godine) predstavlja izazov koji se s pravom može okarakterizirati kao teško ostvariv.

Tablica 1. Maseni udjeli frakcija i godišnjih količina frakcija u komunalnom otpadu, maseni udjeli vlage u frakcijama i maseni udjeli supstanci olova i dušika

Table 1. Municipal solid waste composition, annual quantities of waste fractions, moisture mass content in waste fractions and the mass content of lead and nitrogen substances

Komunalni otpad	Frakcije							
	Papir i karton	Plastika	Staklo	Drvo i tkanina	Guma i koža	Organska frakcija	Metali	Inertna frakcija
Maseni udio frakcije (%)	23,2	22,9	3,7	4,7	0,7	36,6	2,1	6,1
Količina frakcije (t/god)	315 948	310 524	50 172	63 732	9 492	496 296	28 476	81 360
Vlaga (%)	22,00	14,00	1,00	18,00	10,00	62,49	20,00	1,00
Olovo (mg/kg suhe tvari)	11	170	430	144	370	11	1900	317
Dušik (% suhe tvari)	0,37	0,72	0,87	1,53	1,34	0,76	0,00	1,04

Tablica 2. Pregled ciljnih vrijednosti za odvojeno sakupljanje pojedinih frakcija otpada propisanih odgovarajućim EU direktivama i pratećim zakonskim aktima**Table 2. Separate waste collection targets as prescribed by relevant EU directives and accompanying legal acts**

		EU ciljevi		
		2020.	2025.	2030.
EU Direktiva o otpadu	Recikliranje komunalnog otpada	50 %		70 % (zakonski)
	Smanjenje otpadne hrane		Neobvezujuće, smanjenja od 30 % (početna godina 2017.)	
EU Direktiva o odlagalištima otpada	Zabrana odlaganja otpada na odlagališta		Maksimalno 25 % komunalnog otpada, zabrana odlaganja materijala koji se mogu reciklirati: papir i karton, plastika, staklo, organska frakcija, metali	Neobvezujuća zabrana odlaganja više od 5 % ostatnog otpada
EU Direktiva o ambalaži i ambalažnom otpadu	Ukupno reciklirana otpadna ambalaža	60 % (RH min. 55 %)	70 %	80 %
	Plastika	45 % (RH 22,5 % recikliranje u plastiku)	60 %	nije definirano
	Aluminij	70 % (RH 50 %)	80 %	90 %
	Željezo	70 % (RH 50 %)	80 %	90 %
	Staklo	70 % (RH 60 %)	80 %	90 %
	Papir i karton	85 % (RH 60 %)	90 %	nije definirano
	Drvo	50 % (RH 15 %)	65 %	80 %

DEFINIRANJE MATEMATIČKOG MODELA SUSTAVA

Matematički model cjelovitog sustava gospodarenja komunalnim otpadom definiran je tako da predstavlja navedeni sustav onakav kakav bi on trebao biti u skladu s iskustvima zemalja članica EU-a, te ne uvažava postojeći stadij razvijenosti sustava u praksi. Matematički model sustava definiran je upotrebom metoda analize materijalnih tokova (MFA - material flow analysis) i metode analize tokova tvari (SFA – substantial flow analysis). Navedene metode implementirane su u programski paket STAN 2.6. Materijalni tokovi su frakcije otpada definirane u Tablici 1., dok su ciljne vrijednosti postotnih udjela odvojeno saku-

pljenih frakcija otpada za tri zadana razdoblja prikazana u Tablici 2.

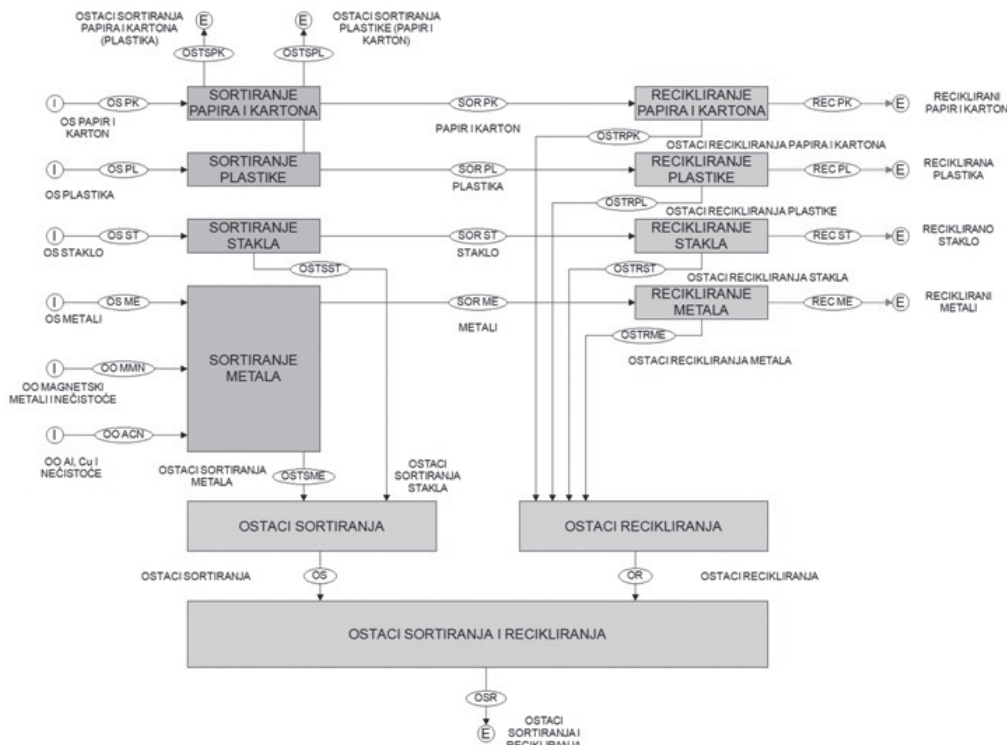
U simulacijskom modelu pretpostavljena su tri različita trenda predviđanja generiranja komunalnog otpada. Prvi trend predviđa konstantnu količinu otpada u analiziranom razdoblju od 2015. do 2030. godine. Ovaj trend predviđanja zasniva se na pretpostavci da će doći do poništavanja utjecaja dvaju različita mehanizma generiranja otpada, a to je porast životnog standarda stanovništva koji ima za posljedicu povećanje generiranja otpada i smanjenje broja stanovnika zbog negativnog demografskog trenda i iseljavanja stanovništva. Drugi trend generiranja otpada predviđa pad od 0,5 % na godišnjoj razini, čime se uzima u obzir veći utjecaj smanjenja broja sta-

novnika zbog negativnog demografskog trenda i iseljavanja stanovništva. U trećem trendu predviđen je porast količine otpada od 0,8 % godišnje, čime se predviđa dominacija utjecaja porasta životnog standarda na generiranje otpada.

STAN 2.6 je programski paket koji služi za analizu materijalnog toka i toka tvari na načelu blok-shema, a zasniva se na zakonu kontinuiteta mase. Blok-shema sastoji se od blokova odnosno modula međusobno povezanih tokovima materijala ili supstanci. Veza između izlaznog i ulaznog toka u bloku odnosno modulu definirana je koeficijentom udjela (eng. *transfer coefficient*) koji predstavlja maseni omjer izlaznog i ulaznog toka. Moduli se mogu definirati kao podsustavi koji su također sastavljeni od niza povezanih blokova odnosno modula. Cjeloviti sustav gospodarenja komunalnim otpadom u Republici Hrvatskoj definiran je narednim osnovnim blokovima odnosno modulima: komunalni otpad, odvojeno sakupljanje i transport otpada, sortiranje i recikliranje odvojenih frakcija otpada, biološka obrada odvojeno sakupljenog otpada, mehanička obrada ostatnog otpada, biološka obrada

ostatnog otpada, odlagalište otpada, energetska uporaba krutog oporabljenog goriva (SRF – solid recovered fuel) u postrojenjima s izgaranjem u fluidiziranom sloju i odlagalište pepela i šljake. U svakom od nabrojanih osnovnih modula definiran je podsustav koji je matematički opisan nizom međusobno povezanih modula koji opisuju pojedine faze obrade materijalnih tokova. Na takav način definiran je složeni višestupanjski sustav uporabe pojedinih frakcija komunalnog otpada.

Struktura modula sortiranja i recikliranja odvojeno sakupljenog komunalnog otpada (*Christiaens, Puttemans, 2014.*) prikazana je na slici 1, gdje ulazne tokove predstavljaju odvojeno sakupljeni papir i karton, plastika, staklo i metali. Uz odvojeno sakupljene metale, na sortiranje dolaze i metali izdvojeni u mehaničkoj obradi ostatnog komunalnog otpada. Nakon sortiranja, sve frakcije odlaze na recikliranje, a ostaci sortiranja i recikliranja odlaze na odlagalište otpada (*Brunner et al., 2001.*). Ostaci sortiranja papira i kartona te plastike odlaze u modul mehaničke obrade ostatnog komunalnog otpada.

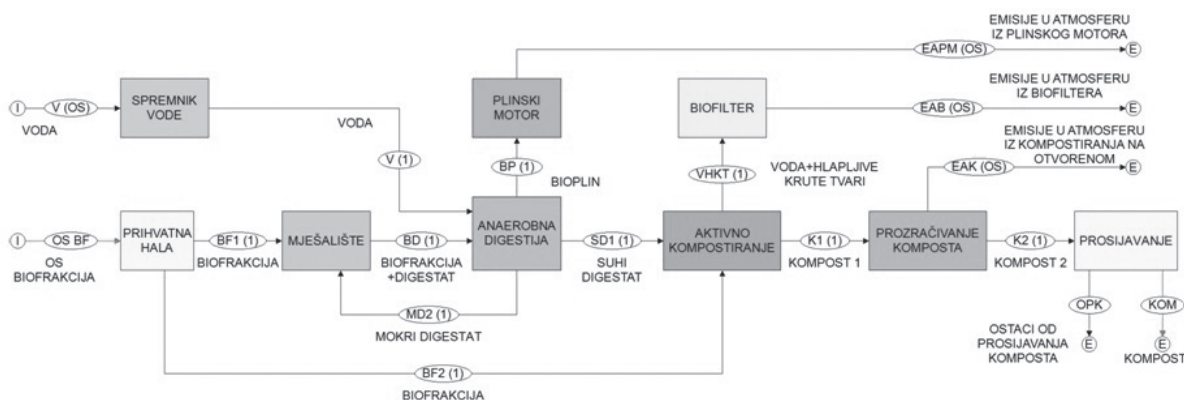


Slika 1. Blok-shema modula sortiranja i recikliranja odvojeno sakupljenog komunalnog otpada
Figure 1. Block-scheme of sorting and recycling separately collected waste fraction

Postrojenje biološke obrade odvojeno sakupljene organske frakcije otpada opisano je skupinom modula koji definiraju faze obrade otpada. Izabrano je referentno postrojenje koje koristi suhi diskontinuirani postupak anaerobne digestije i dvostupanjski postupak kompostiranja nastalog digestata (Jensen et al., 2017.). U prihvatnoj hali razdvaja se organska frakcija koja se upućuje na obradu u anaerobne digestore i primarnu (aktivnu) fazu kompostiranja. U mješaonici miješa se organska frakcija s mokrim digestatom uz naknadno dodavanje vode iz spremnika. Anaerobnom digestijom dobiva se bioplina koji se energetski iskorištava u kogeneracijskom postrojenju s plinskim motorom, a digestat se kompostira zajedno s prethodno odvojenom organskom frakcijom. Biofiltriranjem se pročišćava zrak iz postrojenja za kompostiranje. Nakon prozračivanja komposta (faza dozrijevanja komposta), dobiva se zreli kompost koji se naknadno mehanički obrađuje postupkom prosijavanja pomoću sita promjerom otvora od 20 mm. Ostaci od prosijavanja odlaze na odlagalište otpada (Christiaens, Puttemans, 2014.). Na slici 2. prikazana je blok-shema biološke obrade odvojeno sakupljene organske frakcije otpada.

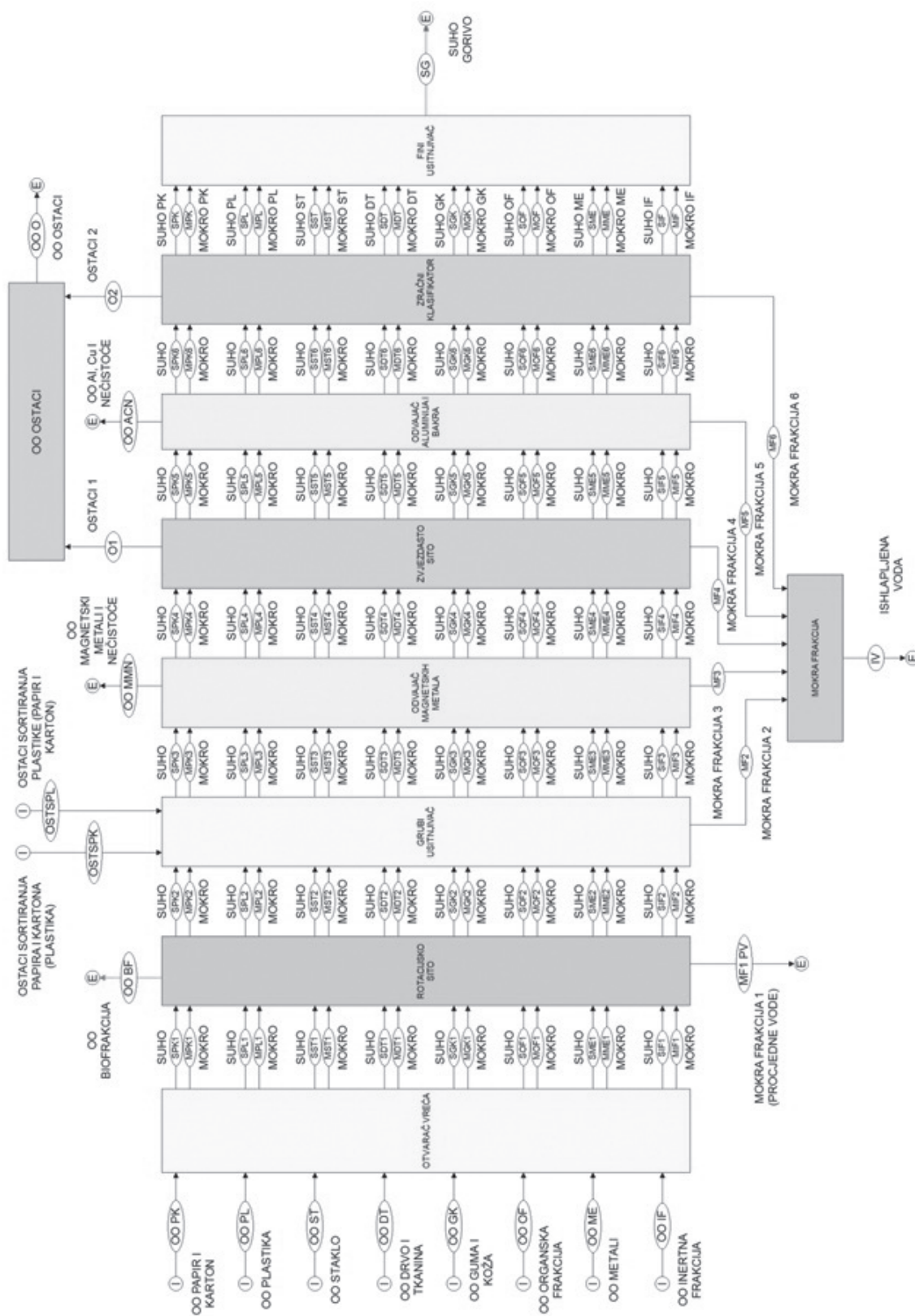
Matematički model postrojenja za mehaničku obradu ostatnog komunalnog otpada opisuje referentno postrojenje (Caputo, Pelagagge, 2002.) čija blok-shema je prikazana na slici 3.

Proces mehaničke oporabe ostatnog otpada započinje uređajem za otvaranje vreća gdje se priprema tok otpada za daljnju obradu. Trakasti transporter dovodi tok otpada do rotacijskog sita gdje se tok otpada odvaja u dva dijela, u mokru biološku frakciju i u suhu frakciju koja se dalje mehanički obrađuje. Mokra biološka frakcija obrađuje se u postrojenju za biološku obradu ostatnog dijela otpada. Mehanička obrada suhe frakcije ostatnog otpada sastoji se od magnetskog odvajanja metala, prosijavanja u zvjezdastom situ, odvajanja aluminija i bakra, zračne klasifikacije i finog usitnjavanja. Odvajач magnetskih metala odvaja željezo, čelik i željezne legure iz otpada. Zvjezdasto sito služi za prosijavanje sitne i krupnije inertne frakcije otpada koja nema iskoristivu energetsku vrijednost. Odvajач aluminija i bakra otklanja nemagnetske metale. Zračni klasifikator radi na načelu zračnog potiska, gdje zrak svojim tokom otpuhuje nepoželjne frakcije otpada u određene kontejnere, ovisno o specifičnoj težini pojedine frakcije. Fino usitnjivač služi za fino mljevenje proizvedenog krutog oporabljenog goriva na zadanu granulaciju. Kruto oporabljeno gorivo je glavni izlazni proizvod postrojenja za mehaničku obradu ostatnog otpada. Ostaci mehaničke obrade odlaze na odlagalište otpada (Christiaens, Puttemans, 2014.), a procjedne vode u biološku obradu mokre biofrakcije iz rotacijskog sita.



Slika 2. Blok-shema biološke obrade odvojeno sakupljene organske frakcije otpada

Figure 2. Biological processing block-scheme of the separately collected organic fraction of waste

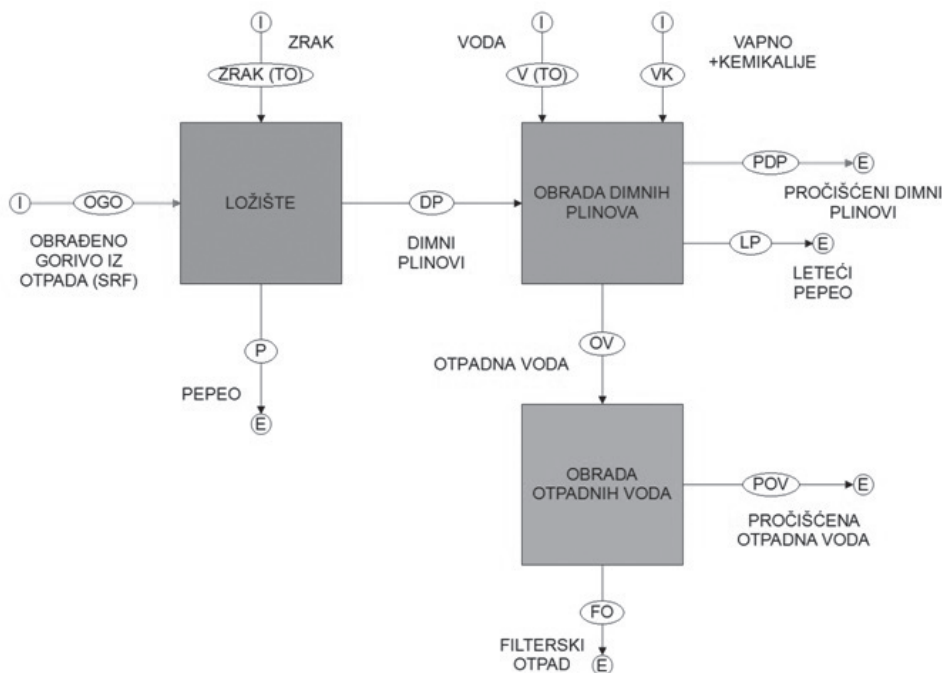


Slika 3. Blok-shema mehaničke obrade ostatnog komunalnog otpada
 Figure 3. Block-scheme of residual municipal solid waste mechanical treatment process

Mokra biološka frakcija iz rotacijskog sita obrađuje se u postrojenju za biološku obradu ostatnog dijela otpada. Izabrano je referentno postrojenje koje se koristi suhim diskontinuiranim postupkom anaerobne digestije koji je istovjetan onom u postrojenju biološke obrade odvojeno sakupljene organske frakcije otpada. Razlika je u obradi digestata, gdje se umjesto dvostupanjskog kompostiranja primjenjuje postupak biosušenja nastalog digestata. Nakon postupka biosušenja digestata i prosijavanja dobiva se frakcija koja se može miješati s krutim oporabljenim gorivom zbog povećanja udjela biogenih sastojaka u gorivu ili se može koristiti kao samostalno biogorivo. Ako ulazni tok otpada nije bio kontaminiran teškim metalima i drugim opasnim supstancama, dobiveni proizvod može se upotrebljavati kao organsko gnojivo ili kao sloj za pokrivanje odlagališta. Anaerobnom digestijom dobiva se bioplina koji se energetske iskoristava u kogeneracijskom postrojenju s plinskim motorom, dok se biofiltriranjem pročišćava zrak korišten u postupku biosušenja. Ostaci od prosijavanja odlaze na odlagalište otpada (Christiaens, Puttemans, 2014.).

Kruto oporabljeno gorivo proizvedeno u postrojenju za mehaničku obradu ostatnog komu-

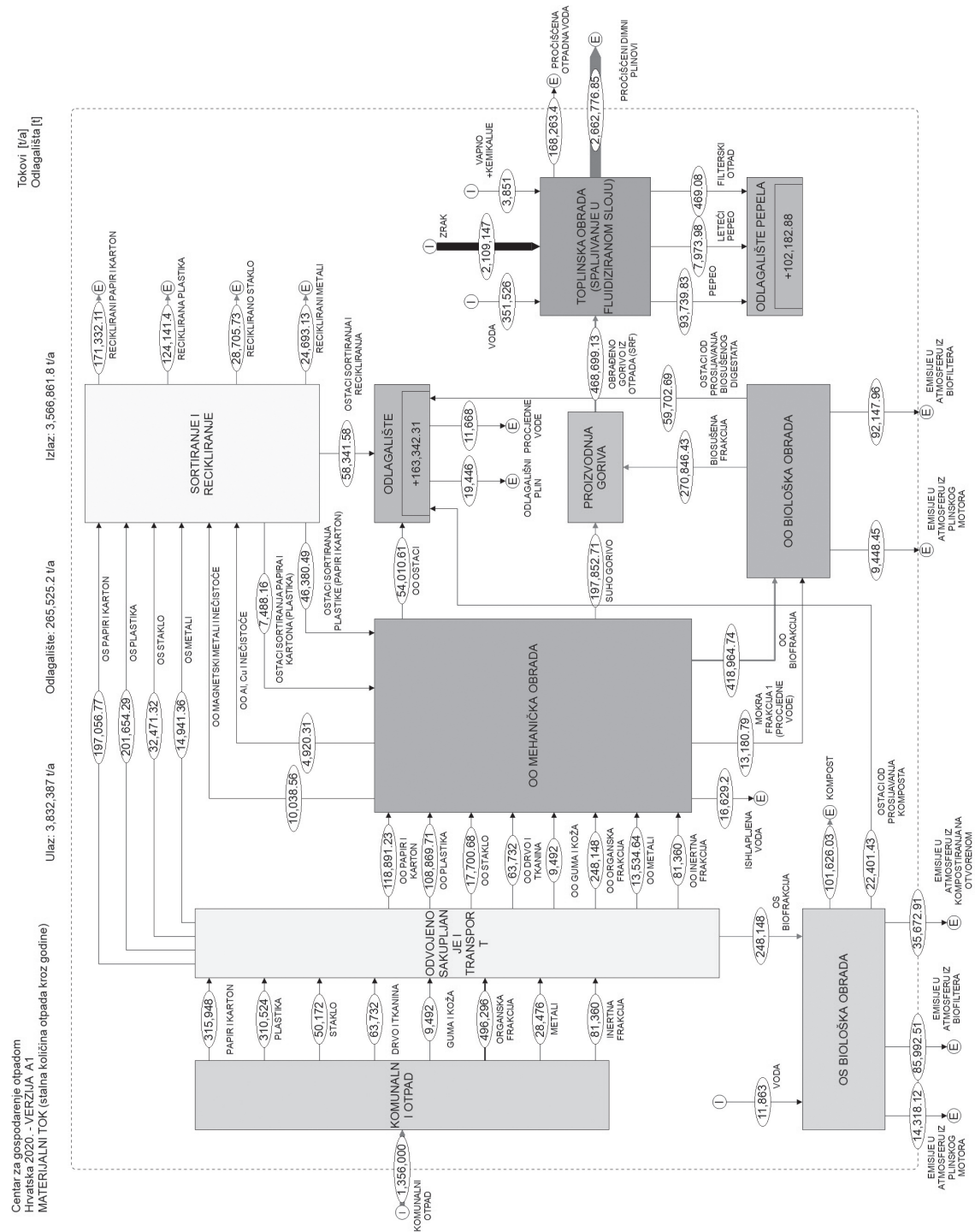
nalnog otpada odlazi u postrojenje za energetske uporabu obrađenog otpada. Ostale alternative uporabe SRF-a su suspaljivanje u termoelektrocentralama na ugljen ili odlaganje na odlagališta, što nije u skladu s načelima kružnog gospodarstva. Kao referentno postrojenje za simulaciju sustava odabrano je postrojenje s izgaranjem goriva u fluidiziranom sloju (Lederer et al., 2015., Matrikelnummer, 2017.). Slika 4. prikazuje blok-shemu energetske uporabe krutog oporabljenog goriva (SRF) s ložištem za izgaranje u fluidiziranom sloju. Kruto oporabljeno gorivo (SRF) i zrak za izgaranje ulaze u ložište gdje gorivo izgara te nastaju dimni plinovi i pepeo. Nakon iskorištavanja energije dimnih plinova za proizvodnju toplinske i električne energije, oni prolaze kroz postrojenje za pročišćavanje dimnih plinova, gdje se uklanjaju leteći pepeo i štetne tvari (NO_x , SO_2 , SO_3 itd.). Otpadne vode iz postrojenja za obradu dimnih plinova obrađuju se u postrojenju za obradu otpadnih voda, gdje nakon obrade nastaje tok obrađene otpadne vode i filtarski otpad. Pepeo, leteći pepeo i filtarski otpad odlaze se na posebno odlagalište pepela i šljake. Predviđeno je da se odlagališta pepela i šljake izgrade u sklopu energetske objekata gdje se kruto oporabljeno gorivo energetske koristi.



Slika 4. Blok-shema energetske uporabe krutog oporabljenog goriva (SRF) s ložištem za izgaranje u fluidiziranom sloju
Figure 4 Block-scheme of Solid Recovered Fuel (SRF) energy recovery plant with fluidized bed combustion chamber

Na slici 5 prikazana je blok-shema cjelovitog sustava gospodarenja komunalnim otpadom u Republici Hrvatskoj za 2020. godinu, i to za kon-

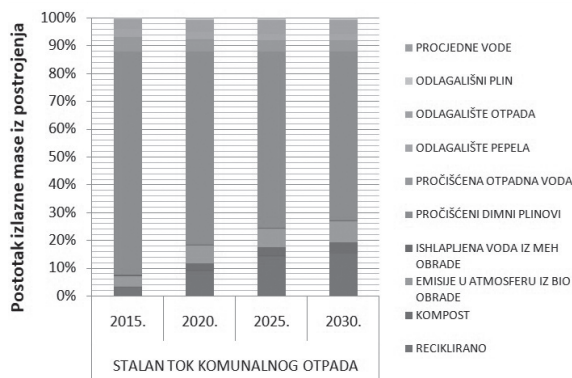
stantnu količinu otpada u analiziranom razdoblju. Blok-scheme prikazuju materijalne tokove (t/god) raznih frakcija otpada i njihovih proizvoda.



Slika 5. Blok-shema sustava gospodarenja komunalnim otpadom u Republici Hrvatskoj za 2020. godinu
 Figure 5. Block-scheme of Municipal Waste Management System of the Republic of Croatia for 2020

ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

Provedena je simulacija cjelovitog sustava gospodarenja komunalnim otpadom, i to za godine 2015., 2020., 2025. i 2030. Na slici 6. prikazan je dijagram postotnih udjela izlaznih tokova i bilance odlagališta u cjelovitom sustavu gospodarenja komunalnim otpadom u razdoblju od 2015. do 2030. godine. Analizom dobivenih rezultata može se zaključiti da će u razmatranom razdoblju doći do značajnog smanjenja proizvedene količine krutog oporabljenog goriva, a time i pročišćenih dimnih plinova. Uzrok jest u činjenici da će se istovremeno povećavati udjeli odvojeno sakupljenih frakcija otpada, što će imati za posljedicu smanjenje godišnje proizvodnje krutog oporabljenog goriva.

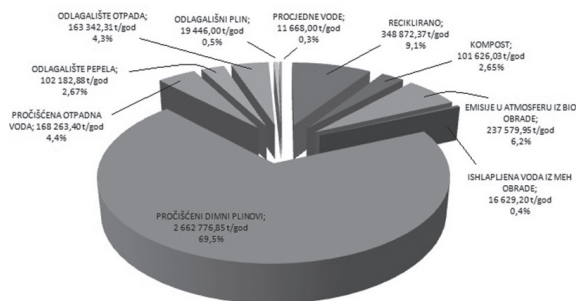


Slika 6. Dijagram udjela izlaznih tokova i bilance odlagališta u cjelovitom sustavu gospodarenja komunalnim otpadom od 2015. do 2030. godine

Figure 6. Diagram of the output flows share and landfill balance in the integrated municipal solid waste management system in the period from 2015 to 2030

Druga posljedica povećanja udjela odvojenog prikupljanja pojedinih frakcija otpada bit će promjena kemijskog sastava krutog oporabljenog goriva. Ovi podaci su od velike važnosti u procesu planiranja postrojenja za energetske oporabu krutog oporabljenog goriva. Nužno je napomenuti da opisani matematički model simulira rad cjelovitog sustava gospodarenja komunalnim otpadom, opisujući njegov rad kakav bi trebao biti uvažavajući sve standarde propisane od EU-a. Stvarni sustav gospodarenja komunalnim otpadom u Republici Hrvatskoj još je u fazi nastajanja, što znači da je samo mali dio sustava realiziran te je u funkciji. Momentalno je veći dio sustava gos-

podarenja komunalnim otpadom u fazi planiranja i projektiranja, dok neki dijelovi sustava još nisu definirani. Usporedbom sadašnjeg stanja sustava gospodarenja komunalnim otpadom s onima dobivenim simulacijom matematičkog modela sustava jasno se može kvantificirati nerealizirana proizvodnja sustava.



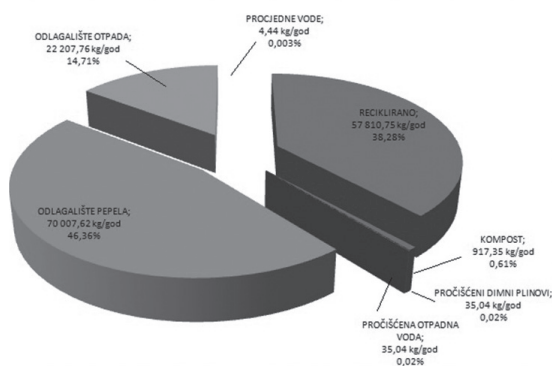
Slika 7. Prikaz masenih udjela i godišnjih količina izlaznih materijalnih tokova te bilanca odlagališta cjelovitog sustava gospodarenja komunalnim otpadom za 2020. godinu

Figure 7. Diagram of the mass shares and annual quantities of output material flows and landfill balance for the municipal waste management system at 2020

Na slici 7 dan je prikaz masenih udjela i godišnjih količina izlaznih materijalnih tokova te bilanca odlagališta cjelovitog sustava gospodarenja komunalnim otpadom za 2020. godinu. Najveći maseni tok jesu pročišćeni dimni plinovi iz postrojenja za energetske oporabu krutog oporabljenog goriva. Dobiveni maseni udjeli izlaznih materijalnih tokova izračunati su na osnovi sume ulaznih masenih tokova koja se sastoji od ulaznog toka svih frakcija otpada, potrebnog zraka za izgaranje goriva u postrojenju za energetske oporabu krutog oporabljenog goriva i tehnološke vode u procesima oporabe bioloških frakcija otpada. Ako bi se dobiveni izlazni materijalni tokovi izrazili kao maseni udjeli ulaznog masenog toka svih frakcija otpada tada bi 2020. godine, da je izgrađen cjeloviti sustav gospodarenja komunalnim otpadom, bilo odloženo na odlagališta (obrađenog inertnog otpada te pepela i šljake) 19,5 % od ulazne količine otpada. Valja napomenuti da se veliki dio odloženog pepela (7,5 % od ulazne mase otpada) može iskoristiti u industriji građevinskog materijala. Od ulazne količine otpada u sustavu gospodarenja komunalnim otpadom 34,5 % bilo bi proizvedeno u kruto oporabljenom gorivo, 7,5 %

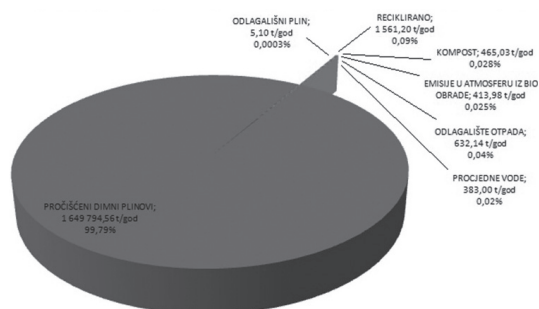
u kompost, a 25,6 % u razne reciklate (12,6 % reciklirani papir i karton, 9,1 % reciklirana plastika, 2,1% reciklirano staklo i 1,8 % reciklirani metali).

Definiranjem matematičkog modela materijalnog toka tvari moguće je simulirati tokove odabranih tvari kroz cjeloviti sustav gospodarenja komunalnim otpadom. Kao primjeri toka tvari kroz sustav odabrane su tvari olova i dušika, čiji su maseni udjeli za pojedine frakcije otpada prikazani u Tablici 1. Slike 8 i 9 prikazuju dijagrame toka tvari olova i dušika u svim izlaznim tokovima i bilancama odlagališta sustava gospodarenja komunalnim otpadom 2020. godine.



Slika 8. Dijagram toka tvari olova u svim izlaznim tokovima i bilancama odlagališta sustava gospodarenja komunalnim otpadom 2020. godine

Figure 8. Lead substance flow diagram and landfill balances of municipal waste management system for 2020



Slika 9. Dijagram toka tvari dušika u svim izlaznim tokovima i bilancama odlagališta sustava gospodarenja komunalnim otpadom 2020. godine

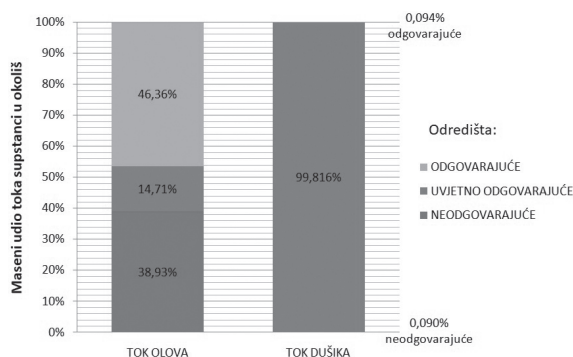
Figure 9. Nitrogen substance flow diagram and landfill balances of municipal waste management system for 2020

Tablica 3. Kategorizacija odredišta za tokove tvari dušika i olova

Table 3. Substance flow destination categorization for the streams of nitrogen and lead

	Olovo (Pb)	Dušik (N)
Atmosfera	neodgovarajuće	uvjetno odgovarajuće
Hidrosfera	neodgovarajuće	neodgovarajuće
Ponovna upotreba	neodgovarajuće	odgovarajuće
Odlagalište otpada	uvjetno odgovarajuće	neodgovarajuće
Odlagalište pepela i šljake	odgovarajuće	neodgovarajuće

U sustavu gospodarenja komunalnim otpadom važno je provesti kategorizaciju odredišta za pojedine tokove tvari u sustavu. Tokovi tvari mogu nakon uporabe materijalnih tokova u sustavu gospodarenja komunalnim otpadom završiti u atmosferi, hidrosferi, ponovnoj upotrebi, na odlagalištu ili na odlagalištu pepela i šljake. U stručnoj literaturi (Fehringner, Brunner, 1997., Brunner et al., 1997.) predložena je kategorizacija odredišta za pojedine tokove tvari kao što to prikazuje Tablica 3. Emisija u atmosferu molekularnog dušika, u sklopu pročišćenih dimnih plinova, predstavlja uvjetno odgovarajuće odredište ove tvari, ali ne i u obliku dušikovih oksida (NO_x) koji mogu nastati u procesima izgaranja goriva. Hidrosfera je neodgovarajuće odredište za obe tvari, posebice za emisiju nitratnih spojeva. Za tok dušika najbolje (odgovarajuće) odredište je u sklopu ponovne upotrebe. Deponija obrađenog komunalnog otpada i deponije pepela i šljake predstavljaju uvjetno odgovarajuće odredište i odgovarajuće odredište za teške metale u koje se ubraja i olovo, jer uređena odlagališta predstavljaju relativno nizak dugoročni rizik negativnog utjecaja na okoliš. Na slici 10. prikazan je usporedni prikaz udjela odredišta i njihova kategorizacija za tokove tvari olovo i dušik.



Slika 10. Usporedni prikaz udjela odredišta i njihova kategorizacija za tokove tvari olovo i dušik

Figure 10. Comparison of the destination shares and their categorization for substance flows of lead and nitrogen

ZAKLJUČAK

Složeni matematički model materijalnih tokova i tokova tvari kojim je definiran cjeloviti sustav gospodarenja komunalnim otpadom u Republici Hrvatskoj može se koristiti u raznim aspektima analize sustava. Simulacijski model može se primjenjivati za usporedbu različitih varijanti izvedbe sustava, za usporedbu s postojećim stanjem sustava u različitim fazama razvoja sustava ili za pravilno dimenzioniranje pojedinih dijelova sustava.

Analizom dugoročnih rezultata simulacije u razdoblju od 2015. do 2030. godine može se zaključiti da će doći do značajnog smanjenja proizvedene količine krutog oporabljenog goriva, kao posljedica sustavnog povećanja i udjela odvojeno sakupljenih frakcija otpada. Uz smanjenje godišnje proizvodnje krutog oporabljenog goriva doći će i do promjene kemijskog sastava takve vrste goriva. Dodatna posljedica postupnog povećanja udjela odvojeno sakupljenih frakcija otpada i njihovog recikliranja bit će i smanjivanje odloženih količina otpada na odlagališta.

Analizom tokova tvari kroz cjeloviti sustav gospodarenja otpadom mogu se odrediti veličine pojedinih tokova, te ocijeniti kategorija njihovog odredišta. Na takav način moguće je optimirati i kontrolirati tokove tvari, te njihov utjecaj na okoliš.

LITERATURA

Andersen, J.K., Boldrin, A., Christensen, T.H., Scheutz, C.: Mass balances and lifecycle inventory of home composting of organic waste, *Waste Management*, 31, 2011., 9, 1934-1942.

Arena, U., DiGregorio, F.: *A waste management planning based on substance flow analysis*, Resour Conserv Recy. 2013.

Brunner, P.H., Doeberl, G., Eder, M., Fruehwith, W., Huber, R., Hutterer, H., Pierrard, R., Schoenbaeck, W., Woeginger, H.: *Bewertung abfallwirtschaftlicher Massnahmen mit dem Ziel der nachsorgefreien Deponie (BEWEND)*, Monographisches UBA Band 149, UmweltbundesamtGmbHWien, 2001.

Caputo, A.C. & Pelagagge, P.M.: RDF production plants: I Design and costs, *Applied Thermal Engineering*, 22, 2002., 4, pp. 428.

Christiaens, P., Puttemans, N.: *The effects of the proposed EU packaging waste policy on waste management practice: a feasibility study*, Brussels, Belgium, October 3rd, 2014.

Direktiva 2008/98/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 19. studenog 2008. godine o otpadu i stavljanju izvan snage određenih direktiva (Waste Framework Directive)

Direktiva 94/62/EZ Europskog parlamenta od 20. prosinca 1994. o ambalaži i ambalažnom otpadu

Fehring, R., Brunner, P.H.: *Kunststoffflüsse und Möglichkeit der Kunststoffverwertung in Österreich*. Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Wien. 1997.

Fehring, R., Rechberger, H., Pesonen, H.L., Brunner, P.H.: *Auswirkungen unter schiedlicher Szenarien der thermischen Verwertung von Abfällen in Österreich (ASTRA)*, Techn. Univ., Inst f. Wassergüte u. Abfallwirtschaft, Abt. Abfallwirtschaft. 1997.

Jensen, M. B., Møller, J., Scheutz, C.: Assessment of a combined dry anaerobic digestion and post-composting treatment facility for source-se-

parated organic household waste, using material and substance flow analysis and life cycle inventory, *Waste Management*, 66, 2017., 1,23-35.

Lederer, J., Munawar, E., Massmann, C., Fellner, J., Obermoser, M., Pessina, G., Brunner, P. H.: *Description of the environmental pressures for each relevant combination of material and recycling/treatment technology*, Institute for Water Quality, Resource and Waste Management, TU Vienna, 2015.

Matrikelnummer, A. A.: *Novel Approach for optimizing Waste Management Systems based on Material Flow Analysis*, Doctor of Science Dis-

sertation, Vienna University of Technology, Faculty of Civil Engineering, May, 2017.

Metodologija za određivanje sastava i količina komunalnog odnosno miješanog komunalnog otpada, str. 13. - Hrvatska agencija za okoliš i prirodu - Zagreb, listopad 2015.

Plan gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje od 2017.-2022. godine

Programski paket Stan 2.6, dostupno na: <http://www.stan2web.net>, pristupljeno 2.1.2019.

Zakon o održivom gospodarenju otpadom, N.N., br. 94/13.

INTEGRATED MUNICIPAL SOLID WASTE MANAGEMENT SYSTEM SIMULATION OF THE REPUBLIC OF CROATIA

SUMMARY: The Republic of Croatia, as EU member, is obligated to carry out the planning and realization of an integrated municipal solid waste management system, which represents the direct implementation of the circular economy principles. This paper describes the procedure for defining the mathematical model of an integrated municipal solid waste management system in the Republic of Croatia using the material flow analysis (MFA) method and substance flow analysis (SFA) method. In the simulation model three different predictions of solid municipal waste generation trends are assumed. System simulation covers the period of 15 years, from 2015 to 2030. On the example of the system simulation results for 2020, it can be concluded that there is a great potential for long-term sustainability of the system. The obtained results from system simulation indicate that from the input mass flow rate 25.6% is processed into various recyclables, 7.5% is processed into compost, and only 19.5% of waste is disposed at landfills. The results indicate that significant electricity production potential is possible using biogas and solid recovered fuel (SRF) in appropriate energy plants.

Key words: waste management system, material flow analysis, substance flow analysis, simulation

Subject review
Received: 2019-01-04
Accepted: 2019-03-08