

# Modeliranje postupka biosušenja programskim paketom SuperPro Designer

---

**Kaniški, Nikola**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:464491>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



# Modeliranje postupka biosušenja programskim paketom SuperPro Designer

---

**Kaniški, Nikola**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:464491>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2020-11-02**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

Nikola Kaniški

MODELIRANJE POSTUPKA BIOSUŠENJA  
PROGRAMSKIM PAKETOM SUPERPRO DESIGNER

DIPLOMSKI RAD

Varaždin, 2017.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 13. 07. 2017. u 9 sa  
Obranu ovog rada kandidat će izvršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 29. 06. 2017.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva:

Doc. dr. sc. Igor Petronić

**Članovi povjerenstva**

- 1) Doc. dr. sc. Igor Petronić
- 2) Doc. dr. sc. Anika Pilić Sivočić
- 3) Izv. prof. dr. sc. Aleksandra Anić Učinić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

MODELIRANJE POSTUPKA BIOSUŠENJA  
PROGRAMSKIM PAKETOM SUPERPRO DESIGNER

KANDIDAT:

Nikola Kaniški, univ.bacc.ing.amb.

*Kaniški*

MENTOR:

Doc.dr.sc. Igor Petrović

Varaždin, 2017.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: NIKOLA KANIŠKI  
Matični broj: 124 - 2015./2016.  
Smjer: UPRAVLJANJE OKOLIŠEM

### NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

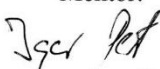
MODELIRANJE POSTUPKA BIOSUŠENJA PROGRAMSKIM PAKETOM  
SUPERPRO DESIGNER

Rad treba sadržati: 1. Uvod  
2. Postupci obrade biorazgradivog otpada  
3. Potrebni podaci za numerički model  
4. Numerički model  
5. Rezultati  
6. Zaključak  
7. Literatura  
Popis slika  
Popis tablica

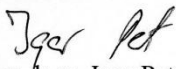
Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 15.03.2017.

Rok predaje: 29.06.2017.

Mentor:  
  
Doc.dr.sc. Igor Petrović



Predsjednik Odbora za nastavu:  
  
Doc.dr.sc. Igor Petrović

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom

*Modeliranje postupka biosušenja programskim paketom SuperPro Designer*

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **doc. dr. sc. Igora Petrovića**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 29.06.2017.

Nikola Kariški

(Ime i prezime)

Kariški

(Vlastoručni potpis)

## **Zahvala**

Najljepše zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Igoru Petroviću na pruženoj pomoći u svakom aspektu izrade ovoga rada, od sugestija do pomoći prilikom izvođenja analiza i pisanja samoga rada te ugodnoj i inspirativnoj suradnji. Veliko hvala na brojnim korisnim savjetima, dostupnosti i susretljivosti te ogromnoj podršci. Također zahvaljujem roditeljima na velikoj potpori tijekom obrazovanja, a najviše supruzi koja je čitavo vrijeme bila najveća podrška.



## Sažetak:

**Ime i prezime:** Nikola Kaniški

**Naslov rada:** *MODELIRANJE POSTUPKA BIOSUŠENJA PROGRAMSKIM PAKETOM SUPERPRO DESIGNER*

Uslijed sve bržeg razvoja stanovništva i tehnologije, povećava se i proizvodnja otpada. Jedan od mogućih načina zbrinjavanja komunalnog krutog otpada je mehaničko-biološka obrada. Biosušenje je integralni dio procesa mehaničko-biološke obrade otpada kod kojeg se uz pomoć kisika (zraka) biološki razgradiva komponenta otpada djelomično stabilizira i suši. Nakon što se na izlazu iz procesa dobije suh i stabilizirani materijal, potrebno ga je provesti kroz niz separacijskih procesa s ciljem dobivanja kvalitetnog goriva iz otpada (GIO) koje se može koristiti kao gorivo za suspaljivanje u cementnim pećima.

U okviru ovog rada provedena je analiza procesa biosušenja programskim paketom SuperPro Designer s ciljem da se utvrdi razlika u učinkovitosti procesa biosušenja u laboratorijskim i terenskim uvjetima.

Modeliranje je provedeno kroz tri probe. Za probu broj 1 doseg reakcije je 9 % pri čemu je postignuta gravimetrijska vlažnost otpada od 37,92 % i smanjenje mase otpada za 24,36 %, dok je za probu broj 2 doseg reakcije 21 %, postignuta vlažnost otpada 42,3 % i smanjenje mase otpada za 25,64 % uz istu količinu zraka koji se upuhuje u proces biosušenja u obje probe. Vidljivo je da je za probu broj 1, koja predstavlja laboratorijske uvjete potreban manji doseg reakcije, čime je potrošnja energije manja, što proces biosušenja čini ekonomski isplativijim.

**Ključne riječi:** mehaničko-biološka obrada otpada, biosušenje, SuperPro Designer, gorivo iz otpada

## Sadržaj:

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. POSTUPCI OBRADJE BIORAZGRADIVOG OTPADA .....</b>	<b>3</b>
2.1. Aerobni procesi.....	3
2.1.1. Biosušenje .....	3
<b>3. POTREBNI PODACI ZA NUMERIČKI MODEL.....</b>	<b>9</b>
3.1. Prikaz organskog dijela otpada u obliku kemijske formule.....	10
3.2. Utvrđivanje postotnih udjela pojedinih kemijskih elemenata u otpadu .	15
3.3. Stehiometrijski koeficijenti formule biosušnja za kemijsku formulu komunalnog otpada .....	17
3.4. Utvrđivanje količine zraka u procesu biosušnja .....	18
3.5. Programski paket SuperPro Designer .....	19
<b>4. NUMERIČKI MODEL .....</b>	<b>20</b>
<b>5. REZULTATI .....</b>	<b>25</b>
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>31</b>
<b>7. Literatura.....</b>	<b>33</b>
<b>Popis slika .....</b>	<b>35</b>
<b>Popis tablica.....</b>	<b>36</b>

# 1. UVOD

U mnogim zemljama, uslijed sve bržeg razvoja stanovništva i tehnologije, povećava se i proizvodnja otpada. Jedan od mogućih načina zbrinjavanja komunalnog krutog otpada je mehaničko biološka obrada (MBO). MBO je razvijena u Njemačkoj s ciljem smanjenja količine biorazgradivog otpada koji se prije toga odlagao na odlagališta. Biorazgradivi dio otpada vrlo je reaktivan i predstavlja problem koji se mora riješiti u kontroliranim uvjetima, čime se i smanjuje masa otpada koji se zbrinjava. U Europi je instalirano više od 70 MBO postrojenja od kojih je više od 40 u Njemačkoj (Nelles i sur. 2012.).

Biosušenje je integralni dio procesa mehaničko biološke obrade otpada kod kojeg se pri aerobnim uvjetima biološki razgradiva komponenta otpada, nakon što se mehanički izdvoje oporabivi dijelovi, djelomično stabilizira i suši. Sam proces se provodi uz dodavanje čistog kisika ili zraka, čime se pospješuje sušenje te mikrobiološki procesi djelomične razgradnje organske tvari. Mikrobiološkom aktivnošću nastaje toplina koja dio slobodne vode u otpadu prevodi u plinoviti oblik, dok se jedan dio vode oslobađa u obliku procjedne vode. (Archer i sur. 2005.)

Važno je napomenuti, da kisik, tj. zrak koji se upuhuje za sušenje ne smije biti potpuno zasićen jer se u tom slučaju para koja se oslobađa na temelju isparavanja vode iz otpada ne može vezati za zrak i biti izvedena iz procesa.

Nakon što se na izlazu iz procesa dobije suh i stabilizirani materijal, potrebno ga je provesti kroz niz separacijskih procesa s ciljem dobivanja kvalitetnog goriva iz otpada (GIO) koje se može koristiti kao gorivo za suspaljivanje u cementnim pećima. (Anić Vučinić 2015.)

U okviru ovog rada provedena je analiza procesa biosušenja programskim paketom SuperPro Designer (SPD). Parametri procesa (količina zraka za upuhivanje, postotak evaporacije slobodne vode iz otpada te doseg odvijanja reakcije) prilagođeni su kako bi se dobilo smanjenje mase otpada na izlazu od 25 %. Pri tome su u obzir uzimani mogući gubici čvrste tvari i vode u omjerima od 1:7 za laboratorijske uvjete (Velis i sur. 2009.) do 1:2,6 za terenske uvjete

(Elnaas i sur. 2015.) s ciljem da se utvrdi razlika u učinkovitosti procesa biosušenja u laboratorijskim i terenskim uvjetima.

## 2. POSTUPCI OBRADE BIORAZGRADIVOG OTPADA

### 2.1. Aerobni procesi

#### 2.1.1. Biosušenje

Proteklih 15 godina MBO tehnologija proširila se u Europi, a pokazuje se kao privlačna opcija i za zemlje u razvoju.

Biosušenje je vrsta aerobne razgradnje koja se koristi unutar postrojenja za mehaničko-biološku obradu (MBO) kako bi osušila i djelomično stabilizirala komunalni otpad. MBO postrojenja s biosušenjem mogu proizvesti visoko kvalitetno kruto gorivo iz otpada (GIO) s visokim udjelom biomase.

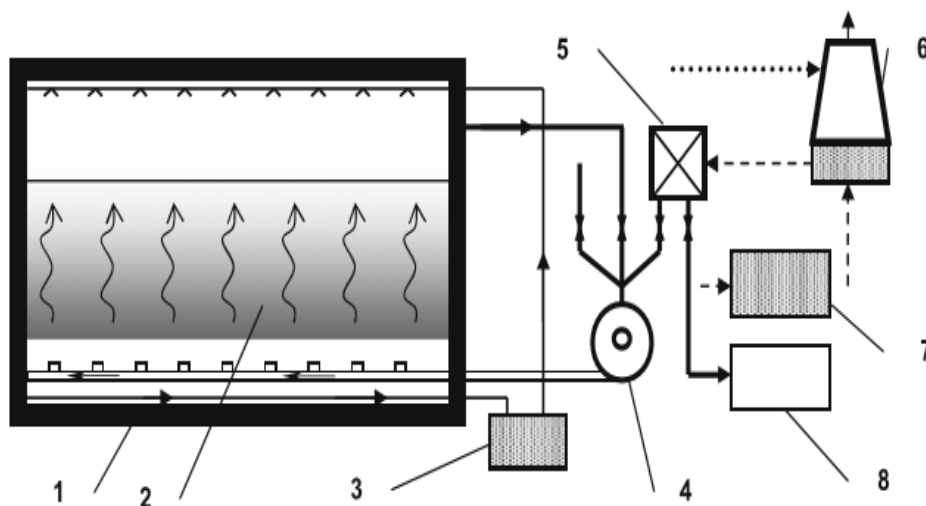
Reaktor za biosušenje unutar MBO postrojenja prima usitnjeni nesortirani komunalni kruti otpad (*eng. MSW-municipal solid waste*) i proizvodi biosušeni izlazni produkt koji se podvrgava opsežnoj naknadnoj mehaničkoj obradi (post-obrada). Unutar bioreaktora za biosušenje, oslobođena termalna energija tijekom aerobne razgradnje lako razgradive organske tvari kombinira se sa suviškom aeracije kako bi se otpad mogao osušiti.

Navedeni proces je široko primijenjen u MBO postrojenjima koja su postavljena za proizvodnju krutog goriva iz otpada (GIO) kao glavnog produkta, jer uklanjanje suviška vlage iz ulazne količine otpada olakšava mehaničku obradu i poboljšava njegov potencijal za termičku obradu.

Glavna korist proizvodnje krutog goriva iz otpada (GIO) u MBO postrojenju s biosušenjem je prilika za ugradnju biogenog udjela ulazne količine otpada (ugljikovog(IV) oksida) kao alternativni izvor energije, u gorivo. Dobiva se GIO s niskim specifičnim CO<sub>2</sub> emisijama, ublažavajući pritom utjecaj gospodarenja otpadom na klimatske promjene.

Reaktori za biosušenje koriste kombinaciju inženjerskih, fizikalnih i biokemijskih procesa. Dizajn reaktora uključuje spremnik spojen sa sustavom za aeraciju. Spremnik zatvorenog karaktera prikazan je Slikom 1. Glavni dijelovi su: (1) zatvoreni spremnik, (2) „prisilna“ aeracija kroz otpad odgovarajućeg poroziteta, (3) sustav za cirkulaciju i prikupljanje otpadnih voda, (4) ventilacijski sustav s djelomičnom recirkulacijom zraka-miješanje okolnog zraka s klimatiziranim zrakom, (5) izmjenjivač topline, (6) toranj za hlađenje, (7) voda (kondenzirana para), (8) obrada plinova nastalih biosušenjem kroz biofilter ili regenerativnom termalnom oksidacijom (eng. *RTO-regenerative thermal oxidation*).

S gledišta biokemije, odvija se aerobna razgradnja lako razgradivih organskih tvari. S fizikalne strane, konvektivno uklanjanje vlage postiže se kontroliranom, prekomjernom aeracijom.



Slika 1. Shema spremnika za biosušenje s cirkulacijom procesnog zraka i odvlaživanje temeljeno na Herhof sustavu (Velis i sur. 2009.)

Neke od prednosti koje pruža biosušenje:

- Znatno smanjenje vlage u otpadu,
- Smanjenje volumena i mase otpada,
- Djelomična biostabilizacija otpada,
- Dobar predtretman otpada prije daljnje obrade,
- Mogućnost proizvodnje kvalitetnog goriva iz otpada. (Bilgin M. i Tulun S. 2015.)

### **Parametri biosušenja**

Tehnologija sušenja generalno smanjuje udio vlage otpada primjenom topline, uzrokujući da voda prijeđe u plinovitu fazu i proizvodi osušeni izlazni produkt željenih karakteristika. Tehnologija sušenja inicijalno je razvijena unutar područja prehrambene industrije, poljoprivredne i farmaceutske industrije, industrije papira i drugih. Prilikom biosušenja, glavni mehanizam sušenja je konvektivna evaporacija, gdje se koristi toplina iz aerobne biodegradacije komponenata otpada koja se prenosi strujom zraka. Udio vlage otpada smanjuje se u dva glavna koraka:

- 1) Molekule vode evaporiraju (mijenjaju stanje iz tekućeg u plinovito) s površine otpada u okolni zrak,
- 2) Evaporirana voda se transportira kroz otpad strujom zraka te se uklanja zajedno s ispušnim plinovima.

Ograničena količina slobodne vode koja ne prati struju zraka ispušnih plinova se prikuplja na dnu reaktora za biosušenje u obliku procjedne vode. Najčešće se primjenjuje temperatura zraka od 40-70 °C za većinu vremena trajanja procesa biosušenja, dok je temperatura otpada najčešće oko 45 °C. (Velis i sur. 2009.)

Optimalno biosušenje postiže se kvalitetnim dizajniranjem reaktora i ulaznog materijala, zajedno s odgovarajućom kontrolom i monitoringom procesa.

Kontrola procesa kod biosušenja vrlo je zahtjevna. Glavni je problem što otpad ima dvije uloge:

- 1) Kao masa za sušenje,
- 2) Podloga za mikrobiološku aktivnost koja pruža izvor topline neophodan za sušenje.

Kontrola tehnologije za sušenje primjenjuje se u različitim industrijama kao što je industrija hrane, no sve više se upotrebljava i kod bojila, farmaceutskih proizvoda i u proizvodnji papira i drva, čime je značajno napredovala. (Velis i sur. 2009.)

### **Udio vlage i gubici**

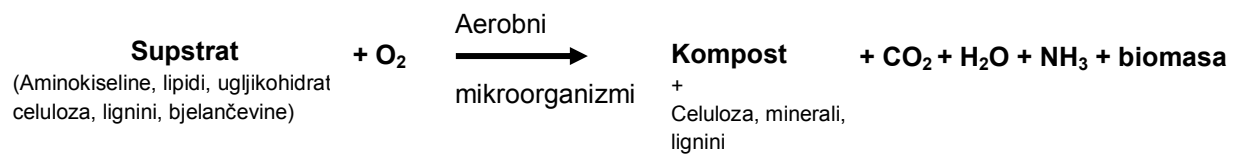
Udio vlage u otpadu jedan je od najvažnijih parametara za proces biosušenja. Udio vlage u otpadu uobičajeno se iskazuje gravimetrijski, odnosno kao omjer mase vode u otpadu i mase vlažnog otpada. U procesu biosušenja, udio vlage može biti smanjen s 35-55 % na 10-20 %, odnosno smanjuje se masa početnog otpada za otprilike 25 %. (Velis i sur. 2009.)

Prema Velis i sur. (2009.), postupak biosušenja u teoriji se može preinačiti u postupak kompostiranja, ali o tome ne postoje istraživanja. Preinaka postupka biosušenja u postupak kompostiranja zahtijeva kontrolu nekoliko parametara.

Kompostiranje je proces biorazgradnje organskog materijala pomoću različitih vrsta mikroorganizama pri aerobnim uvjetima, pri čemu se najčešće ulazna masa otpada uspije smanjiti za 40-60 %. To je metoda kojom se reciklira biološki razgradiv dio otpada kao što je otpad iz vrta i kuhinjski otpad iz domaćinstava te mulj otpadnih voda kako bi dobili produkt stabilnih svojstava



(biostabilat). Kompost osigurava organsku zamjenu za poboljšavanje strukture tla i količine nutrijenata u tlu, povećava sadržaj organske tvari te generalno potiče mikrobiološke aktivnosti, što direktno utječe na fizička, kemijska i biokemijska svojstva tla. Proces kompostiranja ispunjava načelo cirkularne ekonomije koji govori da otpad mora postati vrijedna sirovina u drugim procesima proizvodnje, prvenstveno za rekultiviranje ili dnevno prekrivanje odlagališta. (Grimes i sur. 1999.) Aerobnom biološkom razgradnjom nastaje CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O i toplina. U procesu kompostiranja dolazi do reakcije biorazgradnje, što se može prikazati sljedećom jednadžbom:



Proces kompostiranja podrazumijeva kontrolirane uvjete koji se postižu kontrolom vlažnosti materijala i temperature, aeracijom, mehaničkim miješanjem i sl. Ukoliko se proces ne provodi pod kontroliranim uvjetima te koncentracija kisika u kompostnoj masi padne ispod 10 %, dolazi do stvaranja anaerobnih uvjeta i pojave neugodnih mirisa (H<sub>2</sub>S). Kompostiranje se općenito može podijeliti u četiri faze (mezofilna, termofilna, faza hlađenja i faza zrenja).

U početnoj, mezofilnoj fazi pri temperaturi od 25-45 °C, lako razgradive molekule (šećeri i bjelančevine) razgrađuju bakterije, aktinomiceti i gljive.

U termofilnoj fazi (45-65 °C) većina patogenih mikroorganizama te sjemenja korova i jajašca kukaca bivaju uništena zbog visokih temperatura i prevladavanja aktinomiceta koje proizvode antibiotike.

Faza hlađenja se naziva i druga mezofilna faza. U ovoj fazi, temperatura unutar kompostne mase počinje padati te se ponovo, iz spora koje su preživjele, aktiviraju mezofilni mikroorganizmi koji razgrađuju škrob i celulozu.

Faza zrenja omogućuje potpunu izmjenu mikrobne zajednice. U ovoj fazi nastaju u većoj količini tvari koje nisu razgradive kao što su kompleksni spojevi lignin-humus.

Tijekom kompostiranja, kompostna masa mijenja fizikalna i kemijska svojstva (boja, struktura i miris, smanjenje udjela organske tvari, povećanje stabilnosti). (Kopčić 2011.)

Kompostiranje je u pogledu zaštite okoliša prihvatljiva metoda zbrinjavanja biorazgradivog otpada. Prednosti kompostiranja su:

- Smanjenje volumena i rasterećenje odlagališta,
- Smanjuju se troškovi odlaganja,
- Smanjuje se utjecaj na okolinu stabilizacijom otpada,
- Ako se proces provodi pod kontroliranim (zatvorenim) uvjetima smanjuju se emisije stakleničkih plinova,
- Toplinska inaktivacija patogenih mikroorganizama,
- Smanjenje onečišćenja tla, vode i zraka.

Osim prednosti potrebno je naglasiti i nedostatke. Nedostaci se manifestiraju kao moguće emisije amonijaka ( $\text{NH}_3$ ) i ugljikovog(IV) oksida ( $\text{CO}_2$ ), u manjim količinama metana ( $\text{CH}_4$ ) i dušikovog(IV) oksida ( $\text{NO}_2$ ), pojavom neugodnih mirisa, proces zahtijeva veliki prostor, loše tržište za kompost te niska kvaliteta produkta (gorivo iz otpada). (Kopčić 2011.)

### 3. POTREBNI PODACI ZA NUMERIČKI MODEL

Analiziran je prosječni organski udio komunalnog otpada preuzet iz Plana gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje od 2007.-2015. godine (Tablica 1.). Kao što je vidljivo iz Tablice 1., organski udio sačinjava 83,4 % ukupno proizvedenog komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj.

Tablica 1. Prikaz prosječnog godišnjeg sastava komunalnog otpada u RH (Plan gospodarenja otpadom u RH 2007.-2015.)

<b>Komponenta otpada</b>	<b>Masa %, srednja vrijednost</b>	
Kuhinjski i biootpad	42,1	<b>Organske komponente</b>
Papir i karton	20	
Koža/kosti	3,1	
Drvo	1,3	
Tekstil	8	
Staklo	6,8	<b>Anorganske komponente</b>
Metali	4,1	
Inertni	1,9	
Plastika	12	
Guma	0,7	
Posebni	0,3	

Za potrebe provedbe analize biosušenja u programskom paketu SuperPro Designer, potrebno je:

- organski dio otpada iz Tablice 1. prikazati kao kemijski element sastavljen od ugljika, vodika, kisika, dušika i sumpora (C, H, O, N, S) te prikaz kemijske formule otpada,
- utvrditi postotne udjele pojedinih kemijskih elemenata u otpadu,
- utvrditi stehiometrijske koeficijente za kemijsku formulu procesa biosušenja, a koji odgovaraju sastavu otpada koji se modelira,
- utvrditi količinu zraka koji treba dodati procesu.

### **3.1. Prikaz organskog dijela otpada u obliku kemijske formule**

Za organske komponente otpada iz Tablice 1. prosječni postotni udio kemijskih elemenata (C, H, O, N, S), od kojih se pojedina komponenta otpada sastoji, kao i prosječne vlažnosti i gustoće organskih komponentata otpada iz Tablice 1., dane su u Tablici 2. (Adeyinka i sur. 2014.).

Udio kože i kosti izostavljen je iz analize zbog nedovoljno podataka o tipičnoj vlažnosti, no s obzirom da se radi o relativno niskom postotku, nema značajan utjecaj na krajnji rezultat.

Tablica 2. Tipične vrijednosti sastava organskih komponenata komunalnog otpada (Adeyinka i sur. 2014.)

Komponenta otpada	Tipična vlažnost [%]	Tipična gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	C [%]	H [%]	O [%]	N [%]	S [%]
Biootpad	25	240	48,5	6,5	37,5	2,2	0,3
Papir	6	85	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2
Drvo	20	240	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1
Tekstil	10	65	55,0	6,6	31,2	4,6	0,15
Plastika	2	65	60,0	7,2	22,8	-	-

Na temelju podataka iz Tablice 1. može se zaključiti da na 100 kg komunalnog otpada u RH dolazi 83,4 kg organski razgradljivog otpada, što je prikazano u Tablici 3. Proces utvrđivanja udjela pojedinih kemijskih elemenata u organskom djelu komunalnog otpada proveden je u četiri koraka. Potpuni postupak prikazan je na primjeru kuhinjskog otpada i biootpada u nastavku, a vrijedi jednako za sve ostale organske komponente otpada. Rezultati izračuna prikazani su u Tablici 3.

1. U prvom redu potrebno je izračunati suhu masu otpada. Opća jednadžba za izračunavanje suhe mase otpada prikazana je formulom (1). Dobivenu masu suhog otpada potrebno je za svaki kemijski element (C, H, O, N, S), zasebno pomnožiti s vrijednostima iz Tablice 2. (Adeyinka i sur. 2014.), što je prikazano formulom (2) za kuhinjski i biootpad.

Opća formula za izračunavanje suhe mase otpada:

$$m_s = m_w - (m_w \cdot w) \quad (1)$$

Gdje je:

$m_s$ - masa suhog otpada

$m_w$ - masa vlažnog otpada

$w$  – tipična vlažnost otpada

**Kuhinjski i biootpad:**

$$m_s = 42,1 - (42,1 \cdot 0,25) = 31,575 \text{ kg}$$

Opća formula za izračunavanje mase otpada u obliku ugljika:

$$m(C) = m_s \cdot 0,485 \quad (2)$$

$$C: 31,575 \cdot 0,485 = 15,3139 \text{ kg}$$

$$O: 31,575 \cdot 0,375 = 11,8406 \text{ kg}$$

$$H: 31,575 \cdot 0,065 = 2,05238 \text{ kg}$$

$$N: 31,575 \cdot 0,022 = 0,69465 \text{ kg}$$

$$S: 31,575 \cdot 0,003 = 0,09473 \text{ kg}$$

Tablica 3. Kemijski sastav suhe organske komponente komunalnog otpada

Komponenta	Vlažna masa na 100 kg otpada	Suha masa otpada	Kemijski sastav otpada bez vode				
			C	H	O	N	S
	kg	kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Kuhinjski i biootpad	42,1	31,575	15,314	2,05	11,84	0,69	0,09
Papir i karton	20	18,8	8,18	1,13	8,27	0,06	0,04
Drvo	1,3	1,04	0,51	0,06	0,44	0,002	0,001
Tekstil	8	7,2	3,96	0,48	2,25	0,33	0,01
Plastika	12	11,76	7,06	0,85	2,68	-	-
Ukupno	83,4	70,375	35,02	4,56	25,48	1,08	0,14

2. Iz Tablice 3. na temelju prosječnih vrijednosti za vlažnost utvrđena je prosječna masa organskog dijela suhog otpada prosječnog sastava u RH od 70,375 kg, dok je ukupna masa vlažnog otpada 83,4 kg. Oduzimajući vlažnu od suhe mase dobiva se masa vode (H<sub>2</sub>O) u analiziranom otpadu (13,03 kg). U nastavku je preračunata masa vode u masu vodika i kisika što je prikazano formulama (3) i (4):

Opća formula za preračunavanje mase vodika:

$$m_{\text{vodika}} = \left[ \frac{\text{molarna masa vodika [g/mol]}}{\text{molarna masa vode [g/mol]}} \right] * m_{\text{vode}}$$

Masa vodika:

$$m_{\text{vodika}} = \left[ \frac{2}{18} \right] * 13,03 = 1,45 \text{ kg} \quad (3)$$

Opća formula za preračunavanje mase kisika:

$$m_{kisika} = \left[ \frac{\text{molarna masa kisika [g/mol]}}{\text{molarna masa vode [g/mol]}} \right] * m_{vode}$$

Masa kisika:

$$m_{kisika} = \left[ \frac{16}{18} \right] * 13,03 = 11,58 \text{ kg} \quad (4)$$

Izračunatu masu vodika i kisika moguće je pridodati ukupnoj količini vodika odnosno kisika iz Tablice 3., čime se dobiva masa vlažnog otpada. Za potrebe modeliranja u ovom radu, korištena je masa suhog otpada što je prikazano Tablicom 4.

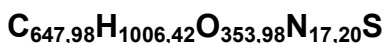
3. Tablicom 4. prikazana je množina u molovima elemenata otpada (koja se dobiva dijeleći masu pojedinog kemijskog elementa s njegovom molarnom masom), pri čemu se zanemaruje pepeo te su prikazani normalizirani molovi na sumpor odnosno na dušik. Normalizirani mol na sumpor izračunava se na način da se množina pojedinog elementa dijeli s množinom sumpora. Analogno, za dušik pojedina se množina elementa dijeli s množinom dušika.

Tablica 4. Određivanje približne kemijske formule otpada sa i bez sumpora

Element	Suha masa otpada [kg]	Molarna masa [g/mol]	Množina [mol]	Normalizirani mol na S	Normalizirani mol na N
C	35,0227	12,011	2,9159	647,98	37,67
H	4,5647	1,0079	4,5289	1006,42	58,51
O	25,4844	15,999	1,5929	353,98	20,58
N	1,0843	14,007	0,0774	17,20	1,00
S	0,1442	32,065	0,0045	1,00	-



4. Nakon postupka rastavljanja otpada na kemijske elemente slijedi formula suhog otpada sa sumporom:



odnosno formula suhog komunalnog otpada bez sumpora koji odgovara prosječnom sastavu komunalnog otpada u RH:



### 3.2. Utvrđivanje postotnih udjela pojedinih kemijskih elemenata u otpadu

Masa ugljika u otpadu (Tablica 5.) izračunata je na način da se iz stehiometrijske jednadžbe ravnoteže biosušenja, broj atoma ugljika (37,67) pomnoži s relativnom atomskom masom ugljika (0,012011) te s unificiranom atomskom jedinicom mase  $((1,660565 \pm 0,0000086) \cdot 10^{-27} \text{ kg})$ , što je prikazano u nastavku:

$$\text{C: } 37,67 \cdot 0,012011 \cdot (1,660565 \pm 0,0000086) \cdot 10^{-27} = (0,75133 \pm 0,0000086) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Masa preostalih elemenata u otpadu dobivena je na analogan način.

Tablica 5. Masa pojedinog kemijskog elementa otpada te pripadajući udjeli

Kemijski element	Masa [kg] $\times 10^{-27}$	Udio [%]
C	0,75133	52,94
H	0,09791	6,9
O	0,54676	38,52
N	0,02326	1,64
Ukupno	1,41926	100

Udio pojedinog kemijskog elementa iz Tablice 5. dobiven je na način da se masa pojedinog elementa podijelila s ukupnom masom te zatim pomnožila sa 100 da se dobije postotak (%). Dobivenim udjelima iz Tablice 5., moguće je izračunati masu krute tvari otpada bilo koje vlažnosti.

Iz činjenice da je masa ulaznog otpada 100 kg, a vlažnost 50 %, proizlazi da je masa krute tvari 50 kg i masa vode u otpadu 50 kg.

Za modeliranje postupka biosušenja u ovom radu, s otpadom vlažnosti 50 %, 50 kg krute tvari pomnoženo je s udjelima pojedinih kemijskih elemenata iz Tablice 5. Dobivene mase kemijskih elemenata ulaznog otpada (Tablica 6.) unesene su u programski paket SuperPro Designer. Postupak za izračunavanje mase ugljika iz Tablice 6. prikazan je u nastavku, a analogno vrijedi za ostale kemijske elemente otpada:

$$\text{C:} \quad 50 \text{ kg otpada} * \left[ \frac{52,94}{100} \right] = 26,47 \text{ kg}$$

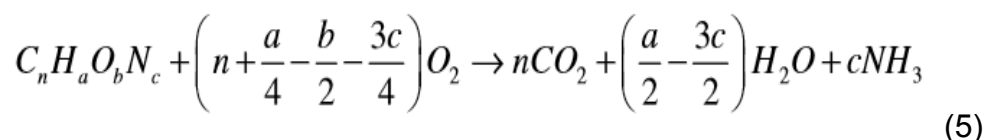
Tablica 6. Mase kemijskih elemenata ulaznog otpada

Element	Masa [kg]
C	26,47
H	3,45
O	19,26
N	0,82

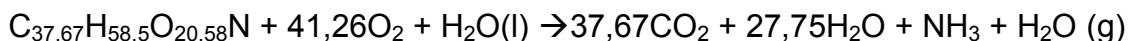
### 3.3. Stehiometrijski koeficijenti formule biosušenja za kemijsku formulu komunalnog otpada

Proces biosušenja potrebno je analizirati s pretpostavkom da je proces potpun kako bi se mogla izračunati količina kisika koju je potrebno upuhati u proces. Proces biosušenja je potpun ukoliko se sav ugljik razgradi do CO<sub>2</sub>, sav vodik do H<sub>2</sub>O te sav dušik do NH<sub>3</sub>. Odnosno, svi biorazgradivi dijelovi otpada razgrade se do elementarnih tvari u procesu biosušenja. (Yunus i sur. 2006.)

Model biosušenja započet je analitički, uzimajući u obzir masu i stehiometriju biokemijske reakcije, što je rezultiralo matematičkim sustavom (5) koji kao ulaz ima količinu ugljika, vodika, kisika i dušika sadržane u otpadu, a kao izlaz preostalu količinu ugljika, vodika, kisika i dušika. Stehiometrijska ravnoteža temelji se na kemijskoj formuli biooksidacijskog metabolizma koji ovisi o sastavu komunalnog otpada (n, a, b i c, su koeficijenti koji ovise o sastavu otpada a predstavljaju broj atoma pojedinog kemijskog elementa). (Bayard i sur. 2011.)



Temeljem formule (5) i poznate kemijske formule ulaznog otpada, izračunata je stehiometrijska formula ravnoteže biosušenja:



U formulu je dodana i slobodna voda sadržana u otpadu {H<sub>2</sub>O (l)} koja se prilikom egzotermne reakcije i stvaranja topline isparava i odvodi iz sustava. Bitno je naglasiti kako formula (5) predstavlja potpun proces tj. nema preostale krute tvari u obliku elemenata (C, H, O, N), odnosno pretpostavlja se da je sva kruta tvar u plinovitom obliku. Preostala kruta tvar s desne strane formule izračunata je pomoću softvera SuperPro Designer.

Za unos podataka u programski paket SuperPro Designer potrebne su mase kemijskih elemenata ulaznog otpada i kisika za upuhivanje u obliku zraka.

### 3.4. Utvrđivanje količine zraka u procesu biosušenja

Postupak biosušenja podrazumijeva i upuhivanje zraka u sustav kako bi se proces sušenja i djelomičnog stabiliziranja otpada odvijao brže i u kontroliranim uvjetima, a sve u cilju dobivanja krajnjeg proizvoda (GIO) odgovarajuće kvalitete. Minimalna količina zraka, potrebna za potpuni proces biosušenja otpada naziva se stehiometrijski ili teoretski zrak. Ukoliko se upuhuje takav zrak, u izlaznoj struji otpada ne postoje slobodni atomi kisika u plinovitom obliku (Yunus i sur. 2006.) Prema SuperPro Designeru zrak je smjesa plinova sastavljena od 76,7118 % dušika i 23,2882 % kisika.

Količina kisika koji se upuhuje dobivena je na sličan način kao i masa ulaznog otpada iz Tablice 6. Iz stehiometrijske formule ravnoteže biosušenja (poglavlje 3.3.), 41,26 molekula kisika pomnožena je s dva atoma kisika, s relativnom atomskom masom kisika (0,015999) te s unificiranom atomskom jedinicom mase  $((1,660565 \pm 0,0000086) \cdot 10^{-27} \text{ kg})$ , što je prikazano u nastavku:

$$\text{O}_2: 41,26 \cdot 2 \cdot 0,015999 \cdot (1,660565 \pm 0,0000086) \cdot 10^{-27} = 2,19234 \pm 0,0000086 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

S obzirom da je zrak smjesa kisika i dušika, da bi dobili masu zraka koju je potrebno upuhivati u 100 kg otpada, potrebno je masu kisika  $((2,19234 \pm 0,0000086) \cdot 10^{-27} \text{ kg})$  podijeliti s ukupnom masom otpada iz Tablice 5. koja se mora podijeliti sa 100 s obzirom da količinu zraka računamo na 100 kg otpada  $(\frac{1,41926}{100})$ . Iz rezultata je vidljivo da je u 100 kg otpada potrebno upuhivati 154,47 kg kisika, odnosno  $\frac{154,47}{0,232882} = 663,3 \text{ kg}$  zraka, tj. u 50 kg otpada, potrebno je  $\frac{663,3}{2} = 331,65 \text{ kg}$  zraka za upuhivanje.

Podaci izračunati na prethodno opisan način, mogu se unositi u programski paket SuperPro Designer, što je detaljnije opisano u poglavlju 4.

### 3.5. Programski paket SuperPro Designer

SuperPro Designer (SPD) programski je paket koji služi za modeliranje raznih tehnoloških procesa (uglavnom iz područja farmacije i obrade otpadnih voda). Temeljem SPD modela moguće je provesti analizu ekonomičnosti tehnološkog procesa, izraditi procjenu isplativosti, procijeniti utjecaj procesa na okoliš, izraditi izvještaj o emisijama u okoliš itd.

Programskim paketom moguće je izvršiti slijedeće:

- Određivanje količine materijala i utroška energije u integriranim procesima,
- Određivanje veličine opreme (dimenzioniranje),
- Određivanje rasporeda i analiza vremena ciklusa šaržnih procesa,
- Analiza troškova i ekonomska procjena,
- Utvrđivanje „uskih grla“ u tehnološkom procesu koji značajno utječu na cjelokupni kapacitet tehnološkog procesa (tzv. debottlenecking),
- Procjena utjecaja na okoliš,
- Karakterizacija uzorka otpada. (Intelligen. inc 1989.-1990.)

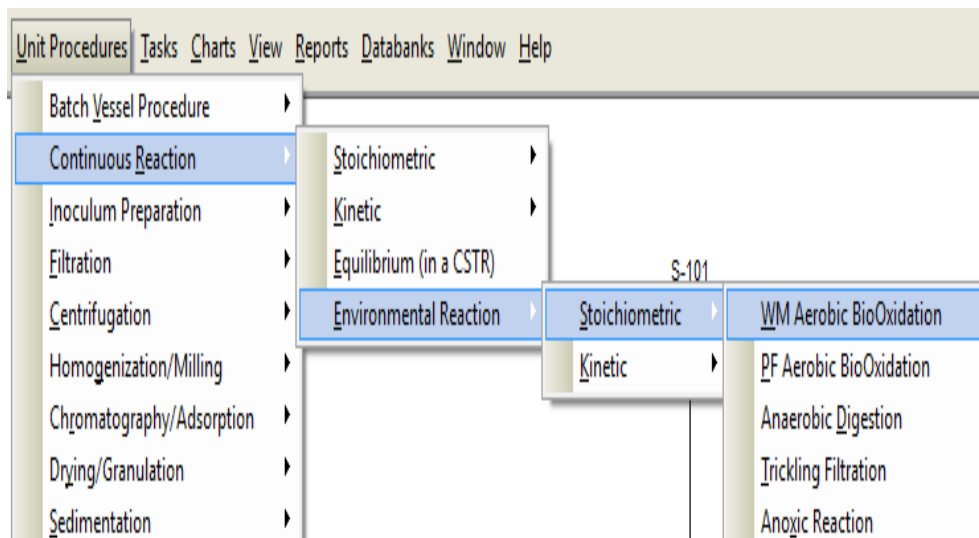
U okviru ovog rada studiran je proces biosušenja kao dio mehaničko biološke obrade otpada pomoću programskog paketa SuperPro Designer.

## 4. NUMERIČKI MODEL

Programski paket SuperPro Designer izvorno nije namijenjen za modeliranje mehaničko bioloških procesa u obradi otpada, no zabilježeni su pokusi u tom smjeru (Mel i sur. 2015.; Malakahmad i sur. 2012.; Bakhiet O., Mustafa R. 2015.).

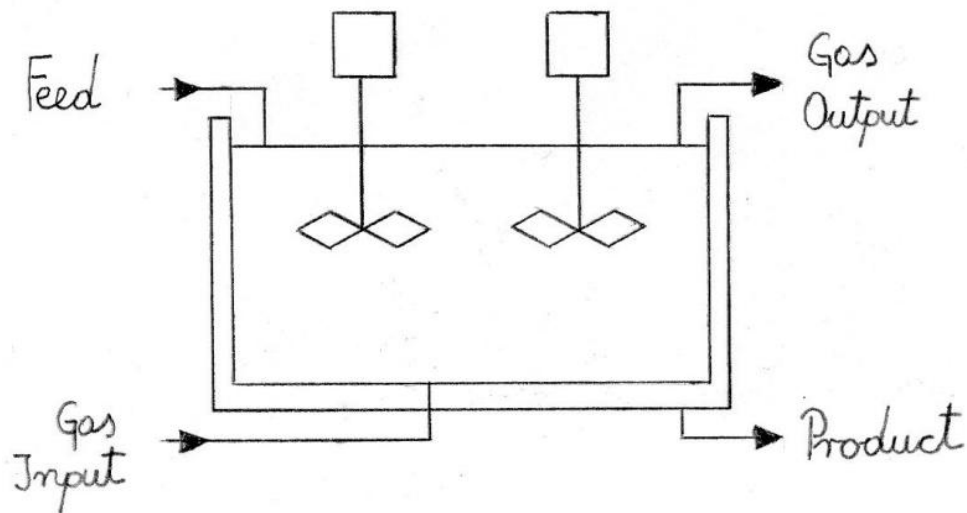
SuperPro Designer-om se aerobna razgradnja može modelirati kroz dva procesa, od kojih je jedan jednostavniji koji u obzir uzima samo stehiometriju kemijske reakcije, dok drugi složeniji, u obzir uzima kinetiku reakcije.

S obzirom da u ovom radu proces kinetike biosušenja nije poznat, za izradu modela odabran je jednostavniji proces (Slika 2.)



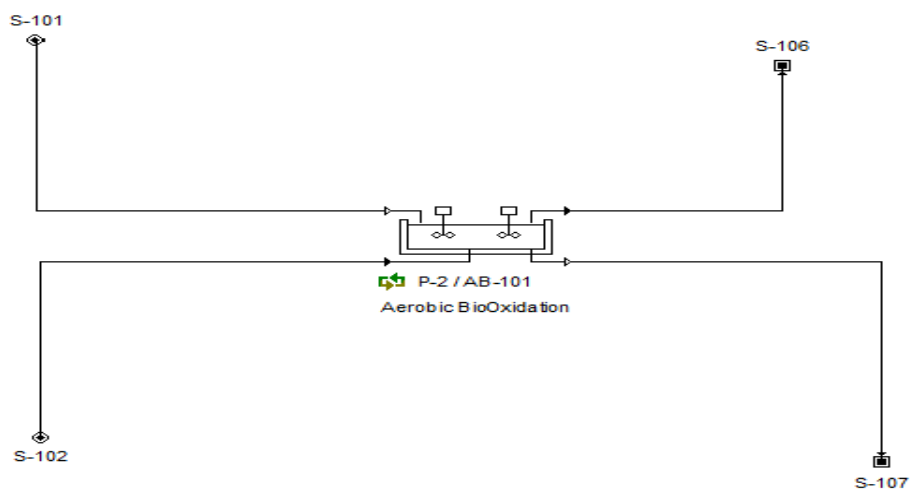
Slika 2. Padajući izbornik za odabir procesa aerobne biooksidacije u SPD-u

Općeniti izgled procesa aerobne biooksidacije u programskom paketu SuperPro Designer prikazan je na Slici 3., gdje je *Feed* ulazna struja tvari procesa, *Gas input* je ulazna struja plinova koji sudjeluju u procesu biosušenja, dok su s desne strane tvari koje izlaze iz procesa u obliku krutih ili tekućih tvari (*Product*) odnosno plinovitih tvari (*Gas output*).

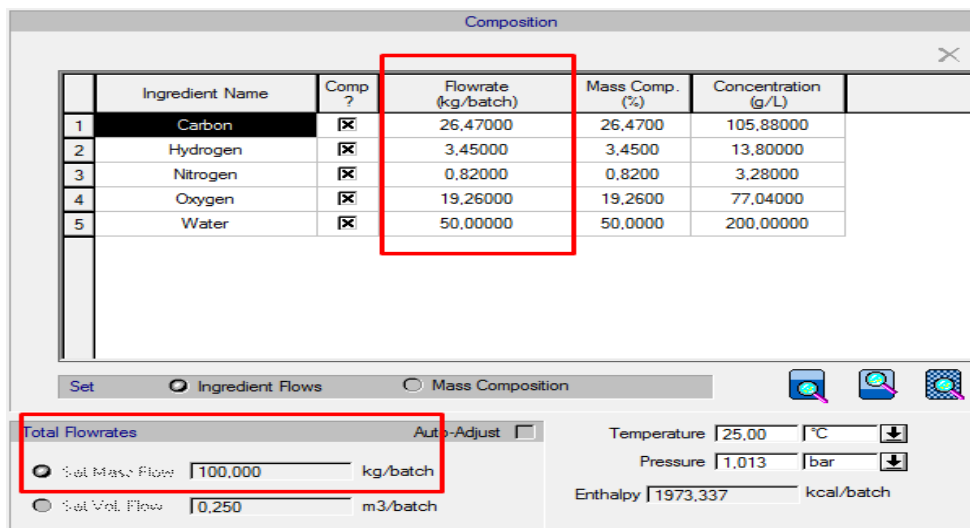


Slika 3. Shema kontinuiranog procesa aerobne biooksidacije u SPD-u

Na Slici 4. može se uočiti kako proces aerobne biooksidacije ima ulaznu struju tvari (S-101) kojom se definiraju ulazne količine te unos tvari u plinovitom obliku (S-102) potrebnog za odvijanje procesa i izlaznu struju kojom se definiraju izlazne količine tvari (S-107) te izlazna struja tvari u plinovitom obliku (S-106). Pritiskom na ulaznu struju S-101 otvara se prozor nakon čega se podaci iz Tablice 6. unose upisujući mase pojedinih kemijskih elemenata u stupac tok tvari (*Flowrate*) označen crvenom bojom na Slici 5. U ulaznu struju procesa unosi se i 50 kg vode s obzirom da u ovom radu analiziramo otpad vlažnosti 50 %. Ukupni protok otpada (*Total Flowrates*) na ulazu procesa je 100 kg/šarži (Slika 5.).

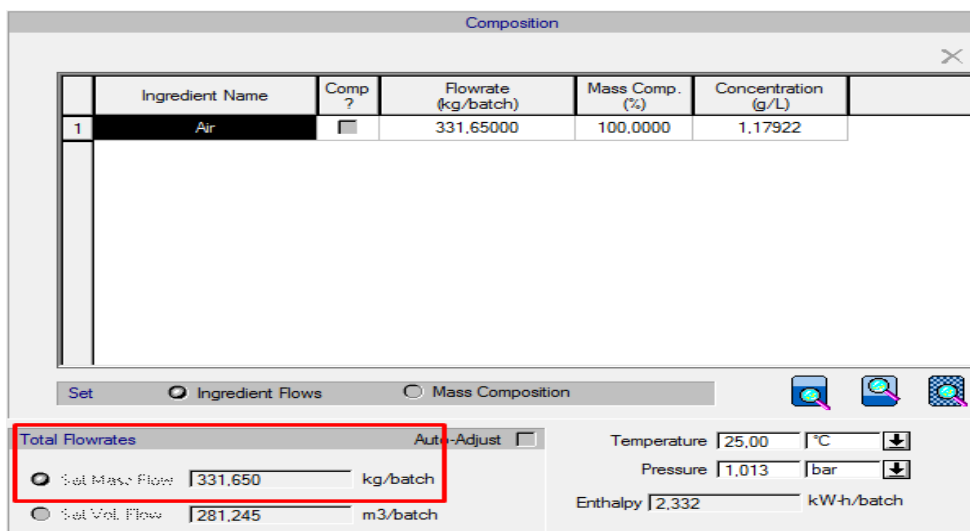


Slika 4. Shema procesa aerobne biooksidacije u SPD-u



Slika 5. Sastav ulazne količine otpada izražen u kg/šarži

Masa ulazne struje zraka (331,65 kg/šarži) pritiskom na ulaznu struju tvari u plinovitom obliku S-102 unosi se u polje *Total Flowrates* označeno crvenom bojom na Slici 6. Izračun mase zraka potrebne za proces biosušenja otpada vlažnosti 50 % izveden je u poglavlju 3.4.



Slika 6. Ulazna količina zraka u procesu biosušenja

Pritiskom na izlaznu struju tvari (S-107) otvara se prozor u kojem se mogu uočiti količine krute tvari i vode preostale nakon procesa biosušenja te ukupan



protok tvari (*Total Flowrates-MassFlow*) što je označeno crvenom bojom na Slici 7.

Composition Data				
	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Carbon	24,08770	31,8452	127,380962
2	Hydrogen	3,13989	4,1511	16,604424
3	Nitrogen	0,81651	1,0795	4,317906
4	Oxygen	18,91424	25,0056	100,022596
5	Water	28,68153	37,9185	151,674112

Total Flowrates	
Mass Flow	75,640 kg/batch
Volumetric Flow	0,189 m <sup>3</sup> /batch

Temperature	12,14 °C
Pressure	1,013 bar
Enthalpy	680,789 kcal/batch

Slika 7. Sastav izlazne količine otpada u struji S-107 te ukupan protok

Oduzimajući početni protok tvari iz ulazne struje S-101 od protoka tvari nakon procesa biosušenja iz struje S-107 dobiva se smanjenje mase otpada koja se odvija zbog evaporacije vode te gubitka dijela hlapivih krutih tvari u plinovitom obliku u izlaznoj struji S-106.

U izlaznoj struji otpada S-106 na Slici 8. nalazi se količina otpada i vode koja je pretvorena u plinoviti oblik što je označeno crvenom bojom.

Composition Data				
	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Ammonia	0,03511	0,0099	0,000117
2	Carb. Dioxide	3,43100	0,9637	0,011476
3	Nitrogen	254,34431	71,4430	0,850760
4	Oxygen	75,84649	21,3046	0,253700
5	Water	22,35322	6,2788	0,074770

Total Flowrates	
Mass Flow	356,010 kg/batch
Volumetric Flow	298,961 m <sup>3</sup> /batch

Temperature	12,14 °C
Pressure	1,013 bar
Enthalpy	17,380 kW-h/batch

Slika 8. Sastav izlazne količine otpada u struji S-106

Na Slici 8. mogu se uočiti osim amonijaka, dušika, kisika i vode, određene količine ugljikovog(IV) oksida koji je jedan od glavnih stakleničkih plinova koji doprinosi efektu globalnog zatopljenja.

Iz spomenutog se može uočiti kako se programskim paketom SuperPro Designer između ostalog može kvantificirati i utjecaj na okoliš procesa biosušenja otpada.

## 5. REZULTATI

Parametri procesa (količina zraka za upuhivanje, postotak evaporacije slobodne vode iz otpada te doseg odvijanja reakcije) prilagođeni su kako bi se dobilo smanjenje mase otpada na izlazu od 25 %. Pri tome su u obzir uzimani mogući gubici čvrste tvari i vode u omjerima od 1:7 za laboratorijske uvjete (Velis i sur. 2009.) do 1:2,6 za terenske uvjete (Elnaas i sur. 2015.) s ciljem da se pokaže razlika u učinkovitosti procesa biosušenja u laboratorijskim i terenskim uvjetima.

Doseg reakcije je ekstenzivna veličina koja opisuje napredovanje kemijske reakcije. Općenita formula dosega kemijske reakcije prikazana je u nastavku:

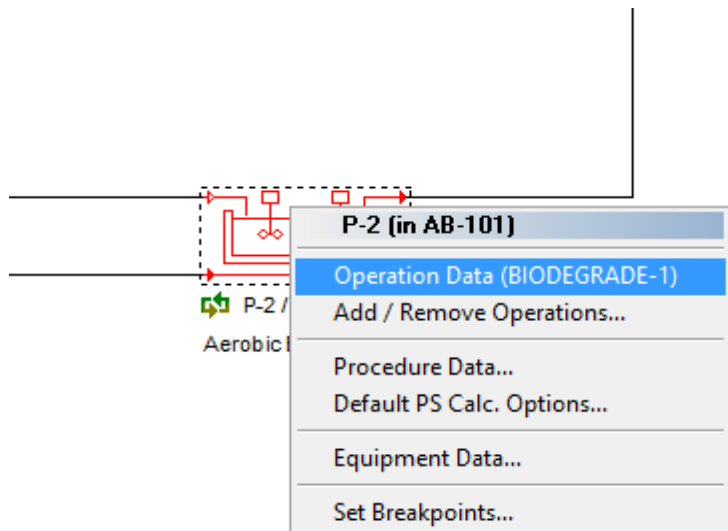
$$\xi = \frac{N_r}{L}$$

gdje je  $N_r$  broj jediničnih kemijskih pretvorbi u reakciji, a  $L$  Avogadrova konstanta. (Obične diferencijalne jednadžbe u kemijskoj kinetici)

Vrijednosti postotka odvijanja reakcije i postotka evaporacije vode su podešeni na način da se procesom biosušenja masa otpada smanji za 25 % uz istovremeno zadovoljavanje definiranih omjera gubitka krute tvari i vode za laboratorijske i terenske uvjete.

Pri tome je vrlo važno pratiti kolike su emisije iz procesa te koliko je smanjenje vlažnosti otpada.

Za početak optimiranja postotka dosega reakcije i evaporacije slobodne vode, desnim klikom na područje šarže kontinuiranog procesa aerobne biooksidacije (Slika 9.) odabire se *Operation Data*.



Slika 9. Odabir *Operation Data* za optimiranje parametara procesa

Unutar prozora *Operation Data*, modeliranje postupka biosušenja započeto je optimiranjem postotka evaporacije slobodne vode iz otpada (Slika 10.) te optimiranjem dosega odvijanja reakcije (Slika 11.) s ciljem da se postigne smanjenje mase ulaznog otpada od 25 %. Pri tome je cilj postići gubitak krute tvari i vode u omjerima 1:7 za laboratorijske uvjete (Velis i sur. 2009.) te 1:2,6 za terenske uvjete (Elnaas i sur. 2015.) kako bi se pokazala razlika u učinkovitosti procesa biosušenja u laboratorijskim i terenskim uvjetima. Za bolji prikaz izračunata je i srednja vrijednost omjera izgubljene krute tvari i slobodne vode (1:4,8).

BIODEGRADE-1 (Stoich. Aerobic BioOxidation) in P-2

Oper.Cond's Volumes Reactions **Vent/Emissions** Sorption Labor, etc. Description

Venting

Vent Stream Out #1 : S-106  Auto-Tag Stream

Pressure Policy

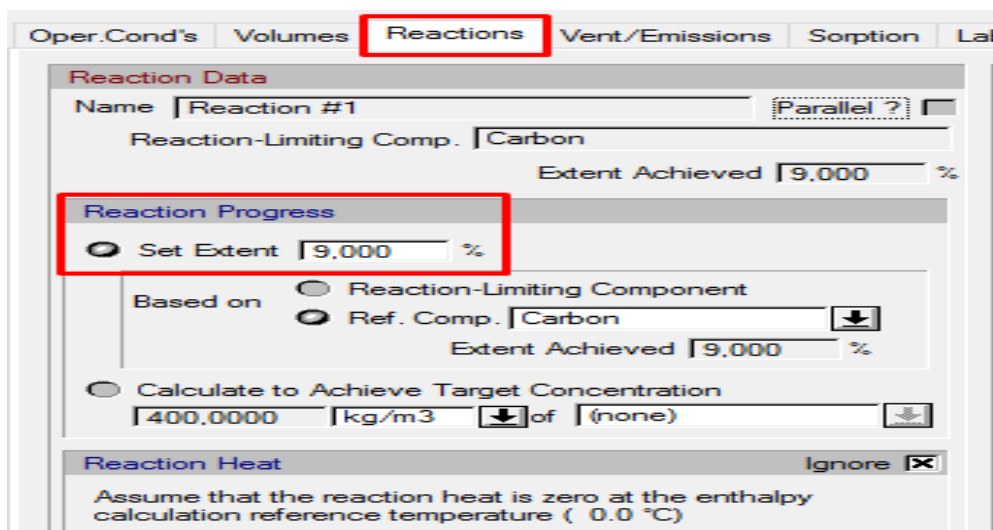
Open Vessel (Atmospheric)

Pressurized Vessel with Relief Valve Set At 1,013 bar

Component Emission Data

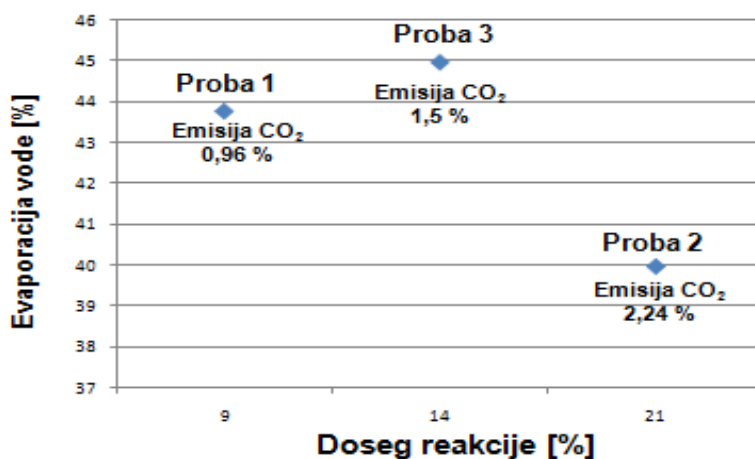
	Component	Emitted ?	Set By User	Vent/Emission %
1	Ammonia	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	100,000
2	Carb. Dioxide	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	100,000
3	Carbon	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,000
4	Hydrogen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,000
5	Nitrogen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	99,680
6	Oxygen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	80,040
7	Water	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	43,800

Slika 10. Optimiranje postotka evaporacije slobodne vode procesa biosušenja



Slika 11. Optimiranje postotka reakcije procesa biosušenja

Modeliranje je provedeno kroz tri probe. Rezultati su prikazani grafički Slikom 12.



Slika 12. Rezultati modeliranja procesa biosušenja u SPD-u

Proba broj 1 ima postotak dosega reakcije  $\xi$  od 9 %, postotak evaporacije slobodne vode iznosi 43,8 % pri čemu je postignut gubitak mase ulaznog otpada od 24,36 %. Omjer izgubljene krute tvari i slobodne vode odgovara laboratorijskim uvjetima 1:7 (Velis i sur. 2009.), što znači da se na 1 g izgubljene krute tvari u procesu, gubi 7 g slobodne vode (Tablica 7.).

Proba broj 2 ima postotak dosegaja reakcije  $\xi$  od 21 %, postotak evaporacije slobodne vode je 40 %, pri čemu je postignut gubitak mase ulaznog otpada od 25,64 %. Omjer izgubljene krute tvari i slobodne vode odgovara terenskim uvjetima 1:2,6 (Elnaas i sur. 2015.) (Tablica 7.).

Proba broj 3 je srednja vrijednost između laboratorijskih i terenskih uvjeta (1:4,8). Postotak dosegaja reakcije  $\xi$  iznosi 14 %, dok je postotak evaporacije slobodne vode 45 %, pri čemu je postignut gubitak mase ulaznog otpada od 26,34 % (Tablica 7.).

Nakon završenog procesa biosušenja programskim paketom SuperPro Designer, postignuto je smanjenje vlažnosti otpada (gubitak slobodne vode) za 21,32 kg, odnosno za 12,08 % (Proba 1), 18,55 kg, odnosno za 7,7 % (Proba 2) te 21,61 kg, odnosno za 11,46 % (Proba 3). Rezultati su prikazani u Tablici 7. Oznaka  $\Delta$  u Tablici 7. predstavlja razliku u masi na početku i završetku procesa biosušenja.

Tablica 7. Gubitak krute tvari, slobodne vode, ukupne mase otpada te ugljika

<b>Gubitak krute tvari (CHON)</b>			
Proba	Početak	Kraj	$\Delta$
	[kg]	[kg]	[kg]
P1	50	46,96	3,04
P2	50	42,91	7,09
P3	50	45,27	4,73
<b>Gubitak slobodne vode (H<sub>2</sub>O)</b>			
Proba	Početak	Kraj	$\Delta$
	[kg]	[kg]	[kg]
P1	50	28,68	21,32 (12,08%)
P2	50	31,45	18,55 (7,7%)
P3	50	28,39	21,61 (11,46%)
<b>Gubitak ukupne mase otpada</b>			
Proba	Početak	Kraj	$\Delta$
	[kg]	[kg]	[kg]
P1	100	75,64	24,36
P2	100	74,36	25,64
P3	100	73,66	26,34
<b>Gubitak ugljika (C)</b>			
Proba	Početak	Kraj	$\Delta$
	[kg]	[kg]	[kg]
P1	26,47	24,09	2,38
P2	26,47	20,91	5,56
P3	26,47	22,76	3,71

Učinkovitost procesa biosušenja može se analizirati putem nekoliko pokazatelja. Jedan od pokazatelja je indeks učinkovitosti biosušenja  $\eta$  što je prikazano jednadžbom (6) (Zawadzka i sur. 2010.):

$$\eta = 1 - \frac{\text{ukupni gubitak ugljika}}{\text{ukupni gubitak vode}} \quad (6)$$

Izračunajući gubitak ugljika i vode (Tablica 7.) te uvrštavajući u jednadžbu (6), učinkovitost procesa biosušenja za probu 1 iznosi 0,888, za probu 2 0,7 te za probu 3 0,828.

Iz rezultata je vidljivo da je najveća učinkovitost postignuta kod probe broj 1 koja predstavlja laboratorijske uvjete, gdje je uz najmanji doseg reakcije (9 %) postignuta učinkovitost od 0,888.

Učinkovitost terenskog modela od 0,7 potvrđuje činjenicu da je na terenu puno teže postići idealan stupanj učinkovitosti procesa biosušenja iz više razloga pri čemu je potreban najveći postotak doseg reakcije kako bi masu ulaznog otpada smanjili za 25 %.

Postignute vrijednosti učinkovitosti kod sve tri probe u rasponu od 0,7-0,888 potvrđuju istraživanja o tome da biosušenje može biti alternativan način dobivanja goriva iz otpada (Zawadzka i sur. 2010.).



## 6. ZAKLJUČAK

Biosušenje za mehaničko-biološka postrojenja je prilagodljiv proces koji može poboljšati svojstva otpada kao goriva ili ga djelomično stabilizirati, ovisno o njegovoj krajnjoj namjeni. Stabilizirani izlaz s optimalnim svojstvima može se dobiti visokom stopom prozračivanja te ograničenom biodegradacijom, koji daljnjom obradom može postati kvalitetno gorivo iz otpada. Uobičajeno vrijeme trajanja procesa je 7-15 dana, čime se gubi 25-30 % mase početnog otpada, većinom u obliku CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O. U procesu biosušenja, može se optimirati količina zraka koji se upuhuje, što je ključno ukoliko se želi postići ekonomska isplativost procesa i dobiti kvalitetan krajnji proizvod.

Za probu broj 1 doseg reakcije  $\xi$  je 9 % pri čemu je postignuta vlažnost otpada od 37,92 % i smanjenje mase otpada za 24,36 %, dok je za probu broj 2 doseg reakcije  $\xi$  21 %, postignuta vlažnost otpada 42,3 % i smanjenje mase otpada za 25,64 % uz istu količinu zraka koji se upuhuje u proces biosušenja u obje probe. Vidljivo je da je za probu broj 1, koja predstavlja laboratorijske uvjete potreban manji doseg reakcije, čime je potrošnja energije manja, što proces biosušenja čini ekonomski isplativijim.

Rezultati terenskih uvjeta (omjer izgubljene krute tvari i vode je 1:2,6) imaju veću emisiju ugljikovog(IV) oksida (2,24 %), dok laboratorijski uvjeti (omjer izgubljene krute tvari i vode je 1:7) imaju nešto niže vrijednosti (0,96 %) što ovisi o postotku dosega reakcije  $\xi$ .

Rezultati analize s laboratorijskim uvjetima imaju manju vlažnost od rezultata terenskih uvjeta iz razloga što su laboratorijski uvjeti gotovo idealni, dok je na terenu vrlo teško dobiti savršene rezultate biosušenja (stabiliziranja) otpada.

Gorivo iz otpada sklono je samozapaljenju ukoliko ima previše vlage. Iz tog razloga je potrebno otpad visoke inicijalne vlažnosti pomiješati sa suhim otpadom kako bi mu prije ulaska na obradu smanjili vlažnost.

Daljnja istraživanja trebalo bi usmjeriti na proširenje modela, dodavanjem biofiltra, optimiranjem temperature sušenja, kondicioniranjem zraka, procjenom DOC-a (*eng. Dissolved organic carbon, hrv. otopljeni organski ugljik*) i sl.

## 7. Literatura

Adeyinka S. Y., Wasiu J., Oluwashola O. and Adedayo A. (2014.). Physico-chemical composition and energy content analysis of solid waste: A case study of Castlereagh district, Northern Ireland. American journal of engineering science and technology research, Vol. 2, pp. 1-9.

Anić Vučinić A. (2015.). Gospodarenje otpadom. Geotehnički fakultet, Varaždin. Interna skripta, str. 139-144.

Archer E., Baddeley A., Klein A., Schwager J., Whiting K., (2005.). Mechanical-biological treatment: A guide for decision makers processes, policies and markets. The summary report, pp. 7-8.

Bakhiet O., Mustafa R. (2015.). Biogas production in Abu Dhabi-An evaluation based on energy and economy (comparison of two technologies). Bachelor of Science Thesis. Department of industrial ecology, real estate and construction management, Abu Dhabi.

Bayard R., Benbelkacem H., Gourdon R. (2011.). Mass balance on water and dry solids from pilot-scale landfill bioreactor studies. Fourth international workshop „Hydro-Physico-Mechanics of landfills“, Spain.

Bilgin M., Tulun S. (2015.). Biodrying for municipal solid waste: volume and weight reduction. Environmental technology, 36:13, pp. 1691-1697.

Elnaas A., Belherazem A., Müller W., Nassour A., Nelles M. (2015.). Biodrying for mechanical biological treatment of mixed municipal solid waste and potential for RDF production. 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE on Sustainable Solid Waste Management, Tinos, Greece.

Grimes S. M., Taylor G. H., Cooper J. (1999). The availability and binding of heavy metals in compost derived from household waste. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 74, pp. 1125-1130.

Intelligen. inc (1989.-1990.). SuperPro Designer. Massachusetts institute of technology.

Kopčić N. (2011). Studij procesa aerobnog kompostiranja čvrstog otpada. Doktorska disertacija. Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb.

Malakahmad A., Basri N. E. A., Zain S. M. (2012.). Design and process simulation of a small scale waste-to-energy bioreactor. Journal of applied sciences, 12 (24), pp. 2586-2591.

Mel M., Yong A. S. H., Avicenna, Ihsan S. I., Setyobudi R. H. (2015.). Simulation study for economic analysis of biogas production from agricultural biomass. Energy procedia, 65, pp. 204-214.

Nelles M., Morscheck G., Grünes J. (2012.). MBT in Germany and Europe-development, status and outlook. University Rostock, International 9th ASA Recycling days.

Dostupno:

[https://cuvillier.de/uploads/preview/public\\_file/292/9783954040308.pdf](https://cuvillier.de/uploads/preview/public_file/292/9783954040308.pdf).

Korišteno: 03.02.2017.

Obične diferencijalne jednačbe u kemijskoj kinetici. Dostupno: <https://web.math.pmf.unizg.hr/~bruckler/pdf/mmk01.pdf>. Korišteno: 29.05.2017.

Pinjing H., Ling Z., Wei Z., Duo W., Liming S. (2013.). Energy balance of a biodrying process for organic wastes of high moisture content: A review. Drying technology, 31:2, pp. 132-145.

Plan gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj za razdoblje 2007. – 2015. godine. Narodne novine 85/2007. Dostupno: [http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2007\\_08\\_85\\_2652.html](http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2007_08_85_2652.html). Korišteno: 20.12.2016.

Velis S. A., Longhurst P. J., Drew G. H., Smith R., Pollard S. J. T. (2009.). Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of process science and engineering. Bioresource technology, 100, pp. 2747-2761.

Yunus A. C., Boles M. A. (2006.). Thermodynamics, an engineering approach, McGraw Hill Companies, Inc. pp. 751-760.

Zawadzka A., Krzystek L., Stolarek P., Ledakowicz S. (2010.). Biodrying of organic fraction of municipal solid wastes. Drying Technology, 28:10, pp. 1220-1226.

## Popis slika

Slika 1. Shema spremnika za biosušenje s cirkulacijom procesnog zraka i odvlaživanje temeljeno na Herhof sustavu	4
Slika 2. Padajući izbornik za odabir procesa aerobne biooksidacije u SPD-u	20
Slika 3. Shema kontinuiranog procesa aerobne biooksidacije u SPD-u	21
Slika 4. Shema procesa aerobne biooksidacije u SPD-u	21
Slika 5. Sastav ulazne količine otpada izražen u kg/šarži	22
Slika 6. Ulazna količina zraka u procesu biosušenja	22
Slika 7. Sastav izlazne količine otpada u struji S-107 te ukupan protok	23
Slika 8. Sastav izlazne količine otpada u struji S-106	23
Slika 9. Odabir <i>Operation Data</i> za optimiranje parametara procesa	26
Slika 10. Optimiranje postotka evaporacije slobodne vode procesa biosušenja	26
Slika 11. Optimiranje postotka reakcije procesa biosušenja	27
Slika 12. Rezultati modeliranja procesa biosušenja u SPD-u	27

## Popis tablica

Tablica 1. Prikaz prosječnog godišnjeg sastava komunalnog otpada u RH	9
Tablica 2. Tipične vrijednosti sastava organskih komponenata komunalnog otpada	11
Tablica 3. Kemijski sastav suhe organske komponente komunalnog otpada	13
Tablica 4. Određivanje približne kemijske formule otpada sa i bez sumpora	14
Tablica 5. Masa pojedinog kemijskog elementa otpada te pripadajući udjeli	15
Tablica 6. Mase kemijskih elemenata ulaznog otpada	16
Tablica 7. Gubitak krute tvari, slobodne vode, ukupne mase otpada te ugljika	29