

# Dimenzioniranje postrojenja malog kapaciteta za aerobnu obradu biootpada iz kućanstava

T. Domanovac,<sup>a\*</sup> M. Vuković Domanovac,<sup>b</sup> D. Kučić Grgić<sup>b</sup> i M. Šabić Runjavac<sup>b</sup>

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



<sup>a</sup> IPZ UNIPROJEKT TERRA, Voćarska cesta 68, 10 000 Zagreb, Republika Hrvatska

<sup>b</sup> Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Trg Marka Marulića 19, 10 000 Zagreb, Republika Hrvatska

## Sažetak

Pripremom i konzumiranjem hrane u kućanstvima te održavanjem zelenih javnih površina, okućnica i vrtova nastaje biootpad koji je potrebno odvojeno sakupiti i obraditi u skladu s propisima iz područja zaštite okoliša, odnosno ciljevima gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj. Na temelju sastava i količine komunalnog otpada procijenjene su godišnje količine biootpada razmatranog područja. Iz ulaznih podataka o količini biootpada te ulaznih procesnih podataka koji su relevantni za provedbu biološke obrade biootpada u aerobnim uvjetima, dimenzionirana je potrebna oprema i prostor uvažavajući dinamiku procesa i potrebne tehnološke operacije. U ovom radu je analizirano pretpostavljeno područje od oko 77 000 stanovnika te je pretpostavljeno da to stanovništvo proizvede oko 3 641 t god<sup>-1</sup> biootpada. Biološkom obradom odvojeno sakupljenog biootpada u aerobnim uvjetima koja se provodi na kompostani malog kapaciteta procjenjuje se proizvodnja oko 2 575 t god<sup>-1</sup> zrelog komposta, što predstavlja smanjenje ulazne mase biootpada od oko 34,1 %, odnosno volumena za oko 50,5 %. Troškovi izgradnje objekata i nabave opreme procjenjuju se na oko 16 305 000 kn (2 174 000 EUR), a ukupni troškovi rada postrojenja s uračunatom amortizacijom na oko 625 kn/t (83 EUR/t) ulaznog biootpada.

## Ključne riječi

Biootpad, biološka obrada, kompostana, dimenzioniranje postrojenja, procjena troškova

## 1. Uvod

Pripremom i konzumiranjem hrane u kućanstvima i restoranima, kao i održavanjem zelenih javnih površina, okućnica i vrtova, nastaje biootpad koji je potrebno odvojeno sakupiti i obraditi na postrojenjima za biološku obradu. Osnovni ulazni podaci za dimenzioniranje takvih postrojenja su količina i sastav komunalnog otpada. Da bi rezultati analize i modeliranja bili reprezentativni, podaci o količinama moraju biti iz službenih, verificiranih izvora, tj. Registra onečišćavanja okoliša Ministarstva zaštite okoliša i energetike,<sup>1</sup> a sastav otpada mora biti utvrđen prema jedinstvenoj metodologiji koju je predložila Hrvatska agencija za okoliš i prirodu 2015. godine.<sup>2</sup>

Nakon pregleda postojećih podataka potrebno je procijeniti buduće količine i tokove otpada. Buduće specifične količine komunalnog otpada po stanovniku procjenjuju se na temelju indeksa porasta bruto domaćeg proizvoda po stanovniku<sup>3</sup> kao uobičajenog pokazatelja porasta životnog standarda. Porast životnog standarda obično se povezuje s posljedičnim porastom ukupne količine nastalog otpada.<sup>4</sup> Ukupne količine komunalnog otpada moguće je procijeniti na temelju podataka iz popisa stanovništva 2011. godine<sup>5</sup> i pretpostavljenih demografskih kretanja prema odabranom scenariju Europske komisije za RH.<sup>6</sup> Zakonom o gospodarenju otpadom<sup>7</sup> i aktualnim Planom gospodarenja otpadom RH<sup>4</sup> postavljeni su kvantitativni ciljevi gospodarenja otpadom koje je potrebno postići do određenih go-

dina i koji uvelike definiraju buduće tokove otpada koje je potrebno odvojeno sakupiti i potom obraditi. Na temelju bilanciranja količina komunalnog otpada prema osnovnim tokovima slijedi odabir prikladne tehnike obrade otpada i dimenzioniranja potrebne opreme i objekata, a sve u skladu s propisima iz zaštite okoliša i gospodarenja otpadom.

Postrojenje za obradu, u ovom slučaju biorazgradive frakcije komunalnog otpada, potrebno je dimenzionirati uz optimalno iskorištenje radnih kapaciteta, uz minimalne ukupne troškove obrade za traženu kvalitetu konačnog proizvoda te obradu izlaznih tokova koji nastaju uslijed biološke obrade otpada, radi smanjenja emisija u okoliš.

Ukupni troškovi biološke obrade biorazgradive frakcije komunalnog otpada obuhvaćaju kapitalne troškove (investicije u procesnu opremu i njezinu ugradnju, troškove izrade potrebne dokumentacije i ostale vanjske troškove) te varijabilne i fiksne troškove rada. Specifični troškovi prikazuju se po toni obrađenog biorazgradivog otpada, odnosno po volumenu dobivenog komposta.

U ovom radu prikazat će se procedura koju je potrebno provesti radi dimenzioniranja opreme i objekata postrojenja za biološku obradu dijela komunalnog otpada.

## 2. Materijali i metode

Proračun postrojenja za biološku obradu biorazgradive frakcije komunalnog otpada napravljen je na temelju

\* Autor za dopisivanje: Tomislav Domanovac, dipl. ing. kem. tehn. univ. spec. oecoling., e-pošta: [tomislav@ipz-uniprojekt.hr](mailto:tomislav@ipz-uniprojekt.hr)

inženjerskog znanja i prakse, na primjeru područja koje odgovara području manje županije (oko 77 000 stanovnika), a učinkovitost odvojenog prikupljanja otpada radi recikliranja približno je jednaka prosječnoj vrijednosti u RH (oko 30 %). Specifična količina komunalnog otpada koju dnevno proizvede prosječni stanovnik predmetnog područja iznosi oko 0,89 kg, što je za oko 22 % manje od prosjeka RH, te se tako ubraja u manje razvijena područja s pretežno ruralnim načinom života, što se reflektira većim udjelom vrtnog, tzv. "zelenog" biootpada s okućnica. U ovom radu se primjenjuje sastav komunalnog otpada koji je preporučen u dokumentu Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja RH, tj. Metodologiji<sup>2</sup> u slučajevima kad na predmetnom području sastav nije utvrđen u skladu s procedurom opisanom u navedenom dokumentu. U tablici 1 daje se prikaz postojećih podataka o sastavu i količini komunalnog otpada.

Tablica 1 – Sastav i količina komunalnog otpada (ulazni podatci)  
Table 1 – Composition and amount of municipal waste (input data)

| Komponenta komunalnog otpada<br>Municipal solid waste component   | Udio<br>Share/<br>mas. % | Količina<br>Quantity/<br>t god <sup>-1</sup> |
|---|--------------------------|--|
| <b>Biootpad / Biowaste:</b><br>Kuhinjski otpad / Kitchen waste<br>Vrtni otpad / Yard waste  | 31,9                     | 7 979  |
| <b>Suhi reciklati / Dry recyclates:</b><br>papir i karton / paper and cardboard<br>plastika / plastics<br>staklo / glass<br>metal / metal | 52,6                     | 13 165                                       |
| <b>Ostalo / Other:</b>  | 15,5                     | 3 887  |
| Ukupno / Total:   | 100,0                    | 25 031                                       |

Uzimajući u obzir pretpostavljene demografske promjene predmetnog područja, gdje se bilježi prosječni godišnji indeks promjene broja stanovništva do 2035. godine

od 0,992 te ekonomska kretanja, gdje je za isto razdoblje procijenjen prosječni godišnji rast BDP-a od oko 0,67 %, u tablici 2 daje se prikaz procijenjenih minimalnih količina biorazgradivog komunalnog otpada, odnosno biootpada namijenjenog za recikliranje prema godinama. Te minimalne količine biootpada u skladu su s propisanim ciljevima gospodarenja otpadom vezanim uz recikliranje. Moguće je pretpostaviti da će određeni napredak u gospodarenju otpadom ići prema smanjenju količina otpada i kvalitetnijem razdvajanju otpadnih materijala radi recikliranja. Međutim, tijekom razmatranog razdoblja pretpostavlja se da to neće bitno utjecati na ukupnu promjenu sastava komunalnog otpada, budući da nisu izgledne značajnije promjene u načinu izrade proizvoda, pakiranja i uporabe materijala ili proizvoda.

Budući procijenjeni godišnji iznos otpada koji je potrebno na predmetnom području odvojeno sakupiti i reciklirati biološkom obradom svoju maksimalnu vrijednost u razmatranom razdoblju do 2035. godine, zbog pretpostavljenog cilja recikliranja biootpada od 50 %, postići će u 2028. godini, iznos od 3 641 t god<sup>-1</sup> ujedno je i maksimalna godišnja količina biootpada. Kad se u obzir uzmu parametri potrebni za pripremu početne smjese za provedbu procesa, navedenoj količini biootpada potrebno je dodati još oko 1 350 t god<sup>-1</sup> strukturnog materijala. Dakle, za obradu procijenjene količine biootpada zajedno sa strukturnim materijalom potreban je kapacitet kompostane od minimalno 5 000 t god<sup>-1</sup>. S obzirom na to da se biološki procesi odvijaju kontinuirano u tri smjene, postrojenje će se dimenzionirati na 350 radnih dana godišnje za biološku obradu i 15 dana za godišnje održavanje, dok se mehanička priprema biootpada i rafinacija obrađenog biootpada planira u prvoj smjeni. Održavanje opreme postrojenja planira se u dijelu godine sa smanjenim količinama vrtnog biootpada (zimsko razdoblje) kad se očekuju manje dnevne količine otpada i do 21 % koliko iznosi prosječni udio vrtnog otpada u biootpadu (tablica 3). Navedeno ukazuje na to da je sastav ulaznog toka biootpada kvalitativno i kvantitativno heterogen tijekom godine, tj. sezonskog je karaktera i ovisi o lokalnim vegetacijskim ciklusima, a sve manje ovisi o varijacijama ostataka hrane tijekom cijele godine.<sup>8</sup> Procijenjeni sastav biootpada s osnovnim podacima za proračun prikazan je u tablici 3.

Tablica 2 – Procijenjene količine biootpada za recikliranje  
Table 2 – Estimated amounts of biowaste for recycling

| Godina<br>Year | Ukupna<br>količina KO<br>Total MSW<br>quantity/t | Ukupna količina<br>biootpada<br>Total quantity of<br>biowaste/t | Ciljani udio<br>recikliranja<br>biootpada<br>Biowaste recycling<br>target/mas. % | Količina biootpada za<br>recikliranje<br>Quantity of biowaste<br>for recycling/t | Količina strukturnog<br>materijala<br>Quantity of structural<br>material/t | Ukupna količina<br>za obradu<br>Total quantity for<br>treatment/t |
|----------------|--|---|--|--|--|---|
| 2022.          | 24 569   | 7 832   | 42,1   | 3 298  | 1 223  | 4 521   |
| 2025.          | 23 696   | 7 554   | 44,7   | 3 378  | 1 252  | 4 630   |
| 2028.          | 22 847   | 7 283   | 50,0   | 3 641  | 1 350  | 4 991   |
| 2030.          | 22 347   | 7 124   | 50,0   | 3 562  | 1 320  | 4 882   |
| 2035.          | 21 517   | 6 859   | 50,0   | 3 429  | 1 271  | 4 700   |

Tablica 3 – Procijenjeni sastav, količine i podaci o biootpadu

Table 3 – Estimated composition, quantities and data on biowaste

| Biootpad<br>Biowaste  | Udio u komunalnom<br>otpadu<br>Share in municipal<br>solid waste/mas. % | Udio komponente<br>u biootpadu<br>Share of component<br>in biowaste/mas. % | Količina<br>Quantity/<br>t god <sup>-1</sup> | Specifična težina<br>u rasutom stanju <sup>9</sup><br>Bulk density/t m <sup>-3</sup> | Volumen<br>Volume/<br>m <sup>3</sup> god <sup>-1</sup> | Vlažnost<br>Moisture/% | C/N<br>omjer<br>C/N ratio |
|---|---|--|--|--|--|------------------------|---------------------------|
| Kuhinjski otpad /<br>Kitchen waste  | 25,10   | 0,79   | 2 868  | 0,399  | 7 196  | 70                     | 16                        |
| Vrtni otpad / Yard<br>waste   | 6,80  | 0,21   | 773  | 0,220  | 3 515  | 60                     | 19                        |
| <b>Suma 1: / Sum 1:</b>   | <b>31,90</b>  | <b>1,00</b>  | <b>3 641</b>                                 | <b>0,361</b>   | <b>10 711</b>  | <b>68</b>              | <b>17</b>                 |
| Strukturni<br>materijal: drvo<br>i piljevina<br>/ Structural<br>material: wood<br>and sawdust |   |  | 1 350  | 0,361  | 3 743  | 39                     | 415                       |
| <b>Suma 2: / Sum 2:</b>   |   |  | <b>4 991</b>                                 | <b>0,361</b>   | <b>14 454</b>  | <b>60</b>              | <b>30</b>                 |

Dakle, oko 79 % biootpada čini kuhinjski otpad čija odstupanja u dostupnosti i količini tijekom godine nisu značajna. Poznavajući podatke o sastavu biootpada i njegovim karakteristikama (vlažnost i C/N omjer), moguće je zaključiti da je za takvu ulaznu smjesu pogodan aerobni postupak biološke obrade otpada. Budući da su parametri ulazne smjese biootpada blizu teoretskim, optimalnim parametrima ulazne, odnosno početne smjese za aerobnu biološku obradu (optimalna vlažnost između 50 i 60 %; optimalni početni C/N omjer između 20 i 30), preporučljivo je u ulazni tok biootpada umiješati materijal s niskom vlažnošću i visokim C/N omjerom, npr. drvo (strukturni materijal radi boljeg aeriranja) i piljevinu (dostupnost ugljika kao supstrata) i sl.

Samo mehaničko usitnjavanje i miješanje, pri čemu se postiže homogenizacija ulazne smjese za kompostiranje, provodi se pomoću usitnjivača sa sporohodnim rotirajućim sjekalima. Usipni lijevak usitnjivača puni se materijalom pomoću utovarivača ili kрана s polipnim hvataljkama.

Tako pripremljena smjesa uvodi se u zatvoreni bioreaktor, u kojem se provodi intenzivna biorazgradnja brzo razgradivih komponenti biootpada uz razvijanje visokih temperatura (oko 65 °C) koje su, uz određeno vrijeme zadržavanja do 7 dana,<sup>10,11</sup> potrebne radi higijenizacije kompostne smjese, tj. radi uklanjanja patogenih mikroorganizama. Kapacitet pojedinog bioreaktora iznosi oko 1420 t god<sup>-1</sup>. Plinoviti produkti biorazgradnje (amonijak, hlapljivi organski spojevi i dr.) obrađuju se prije ispuštanja u okoliš uglavnom pomoću biofiltra (biooksidacijom u oko 1,5 m nasutom sloju od drvene sječke, zrelog komposta i drugog strukturnog materijala). Radi povećanja učinkovitosti biofiltra ulazna struja otpadnih plinova iz bioreaktora dodatno se vlaži vodom u skruberu, gdje se ujedno provodi i uklanjanje amonijaka koji negativno utječe na kolonije mikroorganizama u biofiltru. Ponekad se u skruberu umjesto

vode upotrebljava i sulfatna kiselina radi povećanja učinkovitosti uklanjanja amonijaka kao produkta biorazgradnje bjelančevina.

Nakon intenzivne biorazgradnje brzo razgradivih tvari biootpada proces se nastavlja tzv. "dozrijevanjem", tj. biorazgradnjom slabijeg intenziteta u trajanju do 14 tjedana. Proces se vodi na, po mogućnosti, natkrivenoj radnoj površini, a ovisno o lokaciji i radi zaštite okoliša, i u zatvorenom, ventiliranom prostoru gdje se tlačna struja zraka nakon pročišćavanja otprašivanjem upotrebljava kao ulazna struja u intenzivnoj biorazgradnji u bioreaktorima. Radi učinkovitog vođenja procesa u kompostnoj hrpi prate se procesni parametri temperature i vlažnosti. Da bi se održali uvjeti optimalne biorazgradnje, kompostnu hrpu potrebno je aerirati (strojnim prevrtanjem ili ventiliranjem), odnosno održavati optimalnu vlažnost (oko 50 %), pri čemu se temperatura kompostnih hrpa od dostignutih vrijednosti pri intenzivnoj razgradnji s vremenom postupno smanjuje uslijed uznapredovale biorazgradnje, odnosno utroška supstrata (biootpada).

Završna obrada zrelog komposta, odnosno prosijavanje kojim se iz komposta uklanjaju nečistoće i nerazgrađeni strukturni materijal, provodi se strojno pomoću bubnjastog sита koje se puni utovarivačem. Prosijani zreli kompost se potom privremeno skladišti u za to predviđenom natkrivenom prostoru ili se pakira u vreće, ovisno o krajnjem korisniku. Ostatak sa sита (krupna frakcija, odsjev) ponovno se uvodi u novi ciklus kompostiranja svježeg biootpada.

Sve faze biorazgradnje, od ulaznih parametara, procesnih parametara do krajnjih vrijednosti parametara zrelog komposta kojima se određuje njegova klasa,<sup>11</sup> tj. kvaliteta, prate se pomoću prijenosne mjerne opreme (npr. mjerenje temperature, kisika, vlažnosti), odnosno ovlaštenih, akreditiranih laboratorija koji određuju parametre biorazgradivosti: respiracijsku aktivnost (AT<sub>4</sub>), realni dinamički

respiracijski indeks (RDRI), omjer biokemijske i kemijske potrošnje kisika (BPK<sub>5</sub>/KPK), kao pokazatelje stabilnosti zrelog komposta.<sup>12-16</sup>

### 3. Rezultati i rasprava

Na temelju procijenjenih količina otpada i Pravilnika o nusproizvodima i ukidanju statusa otpada, obradu zaprimljenog biootpada potrebno je započeti u roku od 24 h radi sprječavanja širenja neugodnih mirisa izvan lokacije obrade.

Stoga je za prvu fazu obrade usitnjavanje i miješanje (homogenizacija kompostne smjese) odabran usitnjivač kapaciteta 50 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, a veličina pretpostavljene radne površine za predviđenu mehanizaciju iznosi oko 150 m<sup>2</sup> (tablica 4).

Tablica 4 – Osnovni tehnološki podatci o usitnjivaču  
Table 4 – Basic technological data on the shredder

| Kapacitet<br>Capacity/<br>m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> | Broj radnih sati<br>Working hours/<br>h god <sup>-1</sup> | Snaga<br>Power/<br>kW | Potrošnja<br>goriva<br>Fuel<br>consumption/<br>l god <sup>-1</sup> | Površina<br>Area/<br>m <sup>2</sup> |
|--|---|-----------------------|--|-------------------------------------|
| 50   | 289,1   | 97                    | 6 483  | 150                                 |

Tablica 5 – Podatci o obradi biootpada na usitnjivaču  
Table 5 – Data on biowaste treatment at the shredder

| Biootpad<br>Biowaste  | Specifična težina<br>usitnjenog biootpada<br>Bulk density of<br>shredded biowaste/<br>t m <sup>-3</sup> | Protok<br>Flow/<br>m <sup>3</sup> god <sup>-1</sup> | Protok<br>Flow/<br>m <sup>3</sup> dan <sup>-1</sup> |
|---|---|---|---|
| Kuhinjski otpad /<br>Kitchen waste  | 0,399   | 7 196   | 19,7  |
| Vrtni otpad / Yard<br>waste   | 0,220   | 3 515   | 9,6   |
| <b>Suma 1: / Sum 1:</b>   | <b>0,361*</b>   | <b>10 711</b>                                       | <b>29,3</b>   |
| Strukturni materijal:<br>drvo i piljevina /<br>Structural material:<br>wood and sawdust | 0,361   | 3 743   | 10,3  |
| <b>Suma 2: / Sum 2:</b>   | <b>0,361*</b>   | <b>14 454</b>                                       | <b>39,6</b>   |

\* ponderirana prosječna vrijednost

Nakon usitnjavanja i homogenizacije kompostne hrpe određenih početnih procesnih karakteristika (tablica 5) ona se uvodi u proces intenzivne aerobne biorazgradnje (higijenizacije) u bioreaktoru (tablica 6).

Predviđen je rad u tri smjene, trajanje ciklusa od sedam dana te 350 radnih dana godišnje.

Tablica 6 – Osnovni tehnološki podatci za fazu intenzivne biorazgradnje u bioreaktoru

Table 6 – Basic technological data for the phase of intensive biodegradation in a bioreactor

| Kapacitet ulaza<br>Input capacity |                                  |                     |                     | Potreban broj bioreaktora<br>Number of bioreactors | Površina<br>Area | Električna energija<br>Electrical energy |
|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|--|------------------|--|
| m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>    | m <sup>3</sup> dan <sup>-1</sup> | t dan <sup>-1</sup> | t god <sup>-1</sup> | Kom/Pcs  | m <sup>2</sup>   | kWh god <sup>-1</sup>                    |
| 0,5                               | 11,25*                           | 4,06                | 1 421               | 4  | 632              | 12 950                                   |

\* pretpostavljen rad stroja 7,5 sati u smjeni

Nakon što je proces intenzivne biorazgradnje prošao fazu higijenizacije (ovisnost temperature kompostne smjese i vremena), odnosno nakon što se na temelju procesnih podataka ustanovi dovršetak intenzivne faze biorazgradnje, kompostna smjesa premješta se na sljedeći procesni prostor, gdje će se provesti proces dozrijevanja (tablica 7). Ta druga faza procesa biorazgradnje biootpada provodi se do procesnih parametara koji ukazuju na stabilnost produkta, tj. komposta određene kvalitete, odnosno klase.

Prilikom formiranja kompostnih hrpa za dozrijevanje potrebno je pratiti procesne parametre (temperatura, vlažnost), odnosno aerirati i preslagivati hrpe radi zadržavanja određene unutrašnje i vanjske strukture kompostne hrpe. Tom prilikom se, po potrebi i u količini za održavanje procesnih parametara, dodaje voda, s dodatcima ili bez dodataka koji su usmjereni ka postizanju određenih, specifičnih ciljeva biorazgradnje (biostimulacija ili bioaugmentacija).

Tijekom prve polovice trajanja procesa dozrijevanja potrebno je u prosjeku provesti četiri okretanja u prvim tjednima, do dva okretanja u tjednima oko polovice procesa radi aeriranja hrpe. Tom prilikom dolazi i do gubitka vlažnosti hrpe koja se mora nadoknaditi uvođenjem vode u kompostnu hrpu. Prema gore navedenim ulaznim podacima, procjenjuje se da je u prosjeku potrebno osigurati do oko 43,8 m<sup>3</sup>/tjedno vode za potrebe procesa, koja se osigurava izgradnjom sabirnog bazena za kišnicu odgovarajućeg volumena što ovisi o lokalnoj količini i raspodjeli oborina tijekom godine.

Na temelju volumena otpada tijekom procesa biorazgradnje u fazi dozrijevanja, koji ovisi o dinamici bioloških procesa unutar kompostnih hrpa, dimenzionira se potrebna radno-manipulativna ploha. Prilikom formiranja hrpa pretpostavljen je polukrug kao presjek hrpe, polumjera od 1,5 m. Hrpe su međusobno razmaknute 1 m radi prohodnosti stroja za preokretanje hrpa. U fazi pune popunjenosti kapaciteta kompostane procjenjuje se ukupna duljina kompostnih hrpa raznih stupnjeva dovršenosti dozrijevanja u iznosu od oko 681 m. Uzimajući u obzir navedenu



Tablica 7 – Osnovni procesni podaci za fazu dozrijevanja  
Table 7 – Basic process data for the maturation phase

| Gubitak mase u intenzivnoj razgradnji<br>Mass loss during intensive biodegradation | Specifična gustoća higijeniziranog komposta<br>Bulk density of compost after hygienisation | Količina higijeniziranog komposta<br>Quantity of compost after hygienisation |          |             |                        | Trajanje dozrijevanja<br>Curing duration | Površina<br>Area |
|--|--|--|----------|-------------|------------------------|--|------------------|
|  |  | t/godina   | t/tjedan | t/radni dan | m <sup>3</sup> /tjedan |  |                  |
| %  | t m <sup>-3</sup>  | t/godina   | t/tjedan | t/radni dan | m <sup>3</sup> /tjedan | tjedan                                   | m <sup>2</sup>   |
| 13,6   | 0,380  | 4 314  | 83,0     | 12,3        | 218,3                  | 14                                       | 3 170            |

geometriju hrpa i organizaciju prostora radno-manipulativne plohe, procjenjuje se potrebna površina za dozrijevanje komposta od oko 3 170 m<sup>2</sup>.

Na temelju procijenjenog volumena kompostnih hrpa predviđen je prevrtač (tablica 8) koji uz aeriranje ima i dodatnu funkciju navodnjavanja hrpa.

Tablica 8 – Tehnološki podatci za prevrtač kompostnih hrpa  
Table 8 – Technological data for the compost pile turner

| Kapacitet<br>Capacity/<br>m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> | Broj radnih sati<br>Working hours/<br>h god <sup>-1</sup> | Snaga<br>Power/kW | Potrošnja goriva,<br>Fuel consumption/<br>l god <sup>-1</sup> |
|--|---|-------------------|---|
| 1 000  | 229,7   | 82,5              | 1 031   |

Nakon dovršenja postupka dozrijevanja dobiveni zreli kompost potrebno je pročistiti (rafinacija) od nečistoća i nerazgrađenog drvenog strukturnog materijala, koji se ponovno vraća na početak procesa (podešavanje početne kompostne smjese). Uslijed mehaničkog sijanja procjenjuje se gubitak strukturnog materijala od oko 15 % godišnje. Za tu operaciju predviđeno je bubnjasto sito s perforacijama od 20 mm i površine sita od 15,5 m<sup>2</sup> (tablica 9).

Prilikom punjenja sita, kao i za ostale potrebne manipulacije biootpadom i strukturnim materijalom, kao i kompostom, upotrebljava se i kombinirani stroj specijaliziran

za manipulacije materijalima koji se obrađuju ili upotrebljavaju na kompostani. Rad i potrošnja pogonskog goriva određena je paušalno s oko 3 500 l god<sup>-1</sup>.

Potrebna radna snaga za mehaničke operacije na kompostani, uključuje minimalno tri zaposlenika s radom u prvoj smjeni: strojar-odgovorna osoba (srednja stručna sprema) i dva pomoćna radnika (polukvalificirani), dok se proces biorazgradnje odvija neprekidno kroz sve tri smjene uz automatsko mjerenje i bilježenje procesnih parametara te eventualno automatsko slanje na mobilni uređaj upozorenja o značajnim poremećajima procesa odgovornoj osobi za vrijeme druge i treće smjene.

Osim radno-manipulativnih prostora i opreme potrebne za obradu biootpada, potrebno je dimenzionirati i ključne objekte i opremu za zaštitu okoliša i zaštitu na radu. Stoga je u nastavku dan proračun biofiltra (jedn. (1)) za obradu otpadne zračne struje, tj. plinovitih produkata biorazgradnje (tablica 10). Također, dan je i proračun ventilacije za zatvoreni objekt visine 7,5 m, površine zgrade 3 952 m<sup>2</sup> i 2,5 izmjene zraka na sat (tablica 11) u kojem se provodi dozrijevanje komposta, kao i proračun aeracije bioreaktora (tablica 12) za fazu intenzivne biorazgradnje biootpada.

$$EBRT = (A \cdot D) / Q, \quad (1)$$

gdje je *EBTR* (engl. *empty bed residence time*) vrijeme zadržavanja zračne struje u praznom biofiltru, *A* je tlocrtna površina sloja biofiltra, *D* je dubina sloja biofiltra, a *Q* je protok zračne struje.

Tablica 9 – Osnovni procesni podatci za fazu rafinacije zrelog komposta  
Table 9 – Basic process data for the refining phase of mature compost

| Kapacitet<br>Capacity          | Broj radnih sati<br>Working hours | Snaga<br>Power | Potrošnja goriva<br>Fuel consumption | Količina strukturnog materijala na izlazu<br>Output quantity of structural material | Količina komposta na izlazu<br>Output quantity of compost |
|--------------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------------------------------|---|---|
| m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> | h god <sup>-1</sup>               | kW             | l god <sup>-1</sup>                  | t god <sup>-1</sup>   | m <sup>3</sup> god <sup>-1</sup>                          |
| 23,2                           | 353,0                             | 6,6            | 126,7                                | 1 148   | 3 182   |
|                                |                                   |                |                                      |   | 5 002   |

Tablica 10 – Proračun biofiltra  
Table 10 – Biofilter calculation

| Ukupna površina obrade (bez skladišta)<br>Total area for treatment (without warehouses)/m <sup>2</sup> | Količina otpada u aeraciji<br>Total waste quantity in aeration/t | Aeracija<br>Aeration/m <sup>3</sup> /t/h | EBRT/s | A/m <sup>2</sup> | D/m | Q/<br>m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> |
|--|--|--|--------|------------------|-----|--------------------------------------|
| 3 952  | 113,6  | 10,0                                     | 60     | 12,6             | 1,5 | 0,316                                |

Tablica 11 – Proračun ventilacije zgrade

Table 11 – Building ventilation calculation

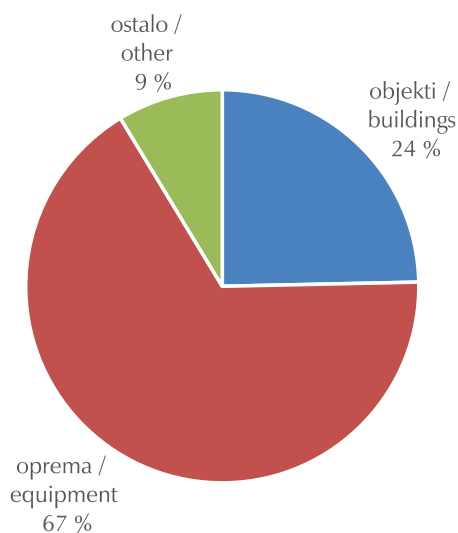
| Protok zraka<br>Air flow / m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> | Pad tlaka<br>Pressure drop /<br>Pa m <sup>-1</sup> | Duljina<br>Length / m | Dodatak<br>Addition / % | Statički tlak<br>otprašivača<br>Static pressure drop<br>for deduster / Pa | Ukupni pad<br>tlaka<br>Total pressure<br>drop / kPa | Broj ventilatora<br>Number of<br>ventilators | Snaga<br>ventilatora<br>Power of<br>ventilator / kW |
|---|--|-----------------------|-------------------------|---|---|--|---|
| 74 108  | 14   | 681                   | 10                      | 5 000   | 15,49   | 4  | 29  |

Tablica 12 – Proračun aeracije bioreaktora

Table 12 – Calculation of bioreactor aeration

| Protok zraka<br>Air flow / m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> | Pad tlaka<br>Pressure drop / Pa m <sup>-1</sup> | Duljina<br>Length / m | Dodatak<br>Addition, % | Ukupni pad tlaka<br>Total pressure drop / kPa | Broj ventilatora<br>Number of<br>ventilators | Snaga ventilatora<br>Power of ventilator / kW |
|---|---|-----------------------|------------------------|---|--|---|
| 1 136   | 14  | 681                   | 10                     | 10,49   | 4  | 1   |

Ukupni troškovi ulaganja i izgradnje projektiranog postrojenja za biološku obradu biootpada u aerobnim uvjetima (kompostana bioreaktorskog tipa s površinom za dozrijevanje komposta i obradom toka otpadnog zraka pomoću biofiltra) procjenjuju se na oko 16,3 milijuna kuna. Struktura troškova ulaganja prikazana je na slici 1.



Slika 1 – Troškovi ulaganja, %

Fig. 1 – Investment costs, %

Utrošak energenata i vode u postrojenju prikazan je u tablici 13.

Ukupni fiksni troškovi rada postrojenja (bez PDV-a) za kompostanu navedenog kapaciteta i opisanih karakteristika procjenjuju se na oko 1,19 milijuna kuna godišnje, a ukupni operativni (varijabilni) troškovi rada procjenjuju se na oko 297 kn/t ulaznog biootpada. Ukupni troškovi rada procjenjuju se na oko 625 kn/t biootpada, odnosno 0,41 kn/l komposta.

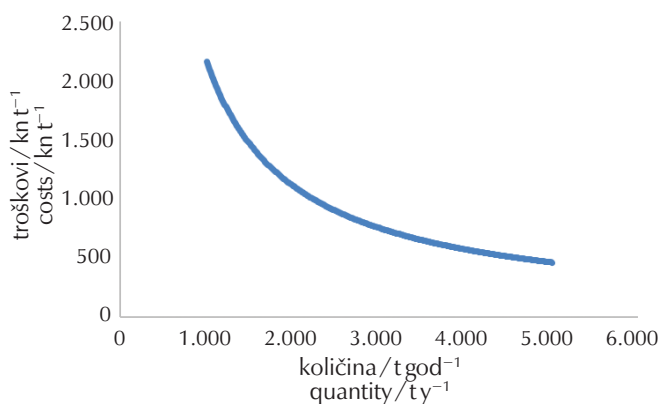
Tablica 13 – Utrošak energenata i vode

Table 13 – Energy and water consumption

| Gorivo i mazivo<br>Fuel and lubricants /<br>m <sup>3</sup> god <sup>-1</sup> | Električna energija<br>Electrical energy /<br>kWh god <sup>-1</sup> | Voda<br>Water /<br>m <sup>3</sup> god <sup>-1</sup> |
|--|---|---|
| 11,2   | 1 039 011   | 105,0*  |

\* sanitary water

Procjena osjetljivosti ukupnih troškova rada razmatranog procesa biološke obrade biootpada na promjenu ulazne količine biootpada, uz istu razinu opremljenosti i zaštite okoliša, prikazana je na slici 2.



Slika 2 – Zavisnost troškova rada o ulaznoj količini biootpada

Fig. 2 – Dependence of total costs on the input amount of bio-waste

## 4. Zaključak

Radi ispunjavanja nacionalnih ciljeva za gospodarenje otpadom potrebno je, među ostalim, predvidjeti odvojeno sakupljanje biootpada, kao i izgradnju postrojenja za njegovu biološku obradu.

Prilikom dimenzioniranja postrojenja za biološku obradu odvojeno sakupljenog biootpada na nekom području, kao podloge za odlučivanje o investiciji izgradnje postrojenja, potrebno je sakupiti što točnije ulazne podatke o količini, sastavu i dinamici nastanka otpada da bi se mogla odabrati prikladna tehnologija, odnosno odabrati potrebna optimalna oprema. Radi bolje kontrole procesa i emisija u okoliš preporučuje se provedba procesa biološke obrade biootpada u zatvorenom prostoru i usmjeravanje onečišćenog zraka na pročišćavanje pomoću biofiltra.

Za pretpostavljeno područje od oko 77 000 stanovnika i pretpostavljenu minimalnu količinu izdvojenog biootpada, radi ostvarivanja ciljeva gospodarenja otpadom, od oko 3 641 t god<sup>-1</sup>, opisanim procesom obrade biootpada i proizvodnje zrelog komposta, smanjuje se ulazna masa biootpada za oko 34,1 %, odnosno volumen za oko 50,5 %. Troškovi opisane obrade biootpada procjenjuju se na oko 625 kn/t (83 EUR/t), što je zbog relativno malog kapaciteta na gornjoj granici uobičajenih troškova rada za postrojenja ovakvog tipa i standarda zaštite okoliša.

### Popis kratica

#### List of abbreviations

|     |  |
|-----|--|
| BDP | – bruto domaći proizvod<br>– gross domestic product    |
| C/N | – omjer ugljika i dušika<br>– carbon to nitrogen ratio |
| KO  | – komunalni otpad<br>– municipal solid waste           |

### Literatura

#### References

- Preglednik registra onečišćavanja okoliša, URL: <http://roo.azo.hr/> (20. 2. 2022.).
- Metodologija za određivanje sastava i količina komunalnog odnosno miješanog komunalnog otpada s Naputkom za naručivanje i provedbu određivanja prosječnog sastava komunalnog odnosno miješanog komunalnog otpada, Hrvatska agencija za okoliš i prirodu, Zagreb, 2015., str. 13–17.
- Priopćenje broj 12.1.3. 14. veljače 2020., Bruto domaći proizvod po stanovniku za Republiku Hrvatsku i prema NK-PJS-u 2012. – 2. razina i županije u 2017., Državni zavod za statistiku RH, URL: <https://web.dzs.hr/arhiva.htm> (20. 2. 2022.).
- Plan gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2017.–2022. godine, Narodne novine broj 3/17, 1/22.
- Popis stanovništva 2011., Državni zavod za statistiku RH.
- The 2018 Ageing Report: Economic and Budgetary Projections for the EU Member States (2016–2070), European Commission, 2018., URL: [https://ec.europa.eu/info/publications/economy-finance/2018-ageing-report-economic-and-budgetary-projections-eu-member-states-2016-2070\\_en](https://ec.europa.eu/info/publications/economy-finance/2018-ageing-report-economic-and-budgetary-projections-eu-member-states-2016-2070_en).
- Zakon o gospodarenju otpadom, Narodne novine broj 84/21.
- V. Panaretou, S. Vakalis, A. Ntolka, A. Sotriropoulos, K. Moustakas, D. Malamis, M. Loizidou, Assessing the alteration of physicochemical characteristics in composted organic waste in a prototype decentralized composting facility, Environ. Sci. Pollut. Res. **26** (2019) 20232–20247, doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05307-7>.
- R. H. Perry, D. Green, Perry's Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill, New York, 1984.
- Pravilnik o nusproizvodima i ukidanju statusa otpada, Narodne novine broj 117/14.
- H. Saveyn, P. Eder, End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost and digestate): Technical proposals. EUR 26425, Publications Office of the European Union (2013) JRC87124, doi: <https://doi.org/10.2791/6295>.
- F. Adani, C. Ubbiali, P. Generini, The determination of biological stability of composts using the Dynamic Respiration Index: The results of experience after two years, Waste Manage. **26** (2006) 41–48, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.01.025>.
- R. B. Gomez, F. V. Lima, A. S. Ferrer, The use of respiration indices in the composting process: a review, Waste Manag Res. **24** (2006) 37–47, doi: <https://doi.org/10.1177/0734242X06062385>.
- S. Mangkoedihardjo, Revaluation of Maturity and Stability Indices for Compost, J. Appl. Sci. Environ. Mgt. **10** (3) (2006) 83–85, doi: <https://doi.org/10.4314/jasem.v10i3.17324>.
- R. Cossu, G. Fantinato, A. Sandon, Further steps in the standardization of BOD<sub>5</sub>/COD ratio as biological stability index for MSW, Waste Manage. **68** (2017) 16–23, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.035>.
- A. Jedrczak, M. Suchowska-Kisielewicz, A Comparison of Waste Stability Indices for Mechanical-Biological Waste Treatment and Composting Plants, Int. J. Environ. Res. Public Health **15** (2018) 2585, doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph15112585>.

## EXTENDED ABSTRACT

## Sizing of Small Capacity Plants for Aerobic Treatment of Household Biowaste

Tomislav Domanovac,<sup>a\*</sup> Marija Vuković Domanovac,<sup>b</sup> Dajana Kučić Grgić,<sup>b</sup> and  
Monika Šabić Runjavec<sup>b</sup>

Maintenance of green urban areas, backyards and gardens, as well as food preparation and consumption generate municipal biodegradable waste, *i.e.*, biowaste that must be collected and processed in accordance with environmental protection regulations and waste management objectives of the Republic of Croatia. By determining the composition and amount of municipal waste, the quantities generated in the assumed area were estimated. From the mentioned input data on the amount of biowaste and input process data that are relevant for the implementation of biological treatment of biowaste in aerobic conditions, the necessary equipment and space were dimensioned, taking into account the dynamics of the process and the necessary technological operations. Thus, the operation of machines for shredding and mixing with a capacity of about  $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , aeration and irrigation with a capacity of about  $1,000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , screening with a capacity of about  $23.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , as well as manipulation of biowaste and compost was planned. Four bioreactors with a capacity of about  $1\,421 \text{ t y}^{-1}$  each, fans and other process-measuring equipment were planned. Waste air flow with biodegradation products were purified before released into the atmosphere using a biofilter of about  $9 \text{ m}^2$  and  $1.5 \text{ m}$  of filled layer of wood chips, bark, mature compost, and other additives.

By composting about  $3\,641 \text{ t y}^{-1}$  of biowaste, which is approximately the minimum amount of biowaste that a presumed area of about  $77\,000$  inhabitants needs to be processed to meet the waste management objectives of the Republic of Croatia, the estimated production of about  $2\,575 \text{ t y}^{-1}$  of mature compost would be reduced by about  $34.1 \%$ , or volume by about  $50.5 \%$ . About  $2\,174\,000 \text{ EUR}$  needs to be invested in facilities and equipment, with total operating costs of about  $83 \text{ EUR/t}$  of input biowaste.

**Keywords**

*Biowaste, biological treatment, composting plant, plant sizing, cost estimation*

<sup>a</sup> IPZ UNIPROJEKT TERRA, Voćarska cesta 68,  
10 000 Zagreb, Republic of Croatia

<sup>b</sup> University of Zagreb, Faculty of  
Chemical Engineering and Technology,  
Trg Marka Marulića 19, 10 000 Republic of  
Croatia

Professional paper  
Received April 4, 2022  
Accepted May 25, 2022