

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Buzak, Z., 2016. Recikliranje biorazgradljivih odpadkov. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Panjan, J.): 68 str.

Datum arhiviranja: 14-09-2016

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Buzak, Z., 2016. Recikliranje biorazgradljivih odpadkov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Panjan, J.): 68 pp.

Archiving Date: 14-09-2016

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM GRADBENIŠTVO  
DIFERENCIALNI 3.L PO VŠ-  
VSS**

Kandidat:

**ZORAN BUZAK**

**RECIKLIRANJE BIORAZGRADLJIVIH ODPADKOV**

Diplomska naloga št.: 555/SOG

**BIODEGRADABLE WASTE RECYCLING**

Graduation thesis No.: 555/SOG

**Mentor:**

izr. prof. dr. Jože Panjan

Ljubljana, 08. 09. 2016

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

## IZJAVE

Spodaj podpisani Zoran Buzak, vpisna številka 26104909, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Recikliranje biorazgradljivih odpadkov.

### IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V Ljubljani

Datum: avgust 2016

Podpis študenta:

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	628.47(043.2)
<b>Avtor:</b>	Zoran Buzak
<b>Mentor:</b>	izr. prof. dr. Jože Panjan
<b>Somentor:</b>	/
<b>Naslov:</b>	Recikliranje biorazgradljivih odpadkov
<b>Tip dokumenta:</b>	Diplomska naloga – visokošolski strokovni študij
<b>Obseg in oprema:</b>	68 str., 20 pregl., 38 sl.
<b>Ključne besede:</b>	biorazgradljivi odpadki, aerobna razgradnja, anaerobna razgradnja, kompostiranje, odpadno blato iz ČN, bioplin, kompostna piramida, recikliranje, kompost, stabilizirano blato

### **Izvleček:**

Naloga obravnava biorazgradljive odpadke, ker so ti največji glede na maso vseh komunalnih odpadkov. Obravnava tovrstnih odpadkov je zelo pomembna z vidika snovnega krogotoka, ker na dokaj enostaven način, preko recikliranja, ki je okolju sprejemljivo, vračamo te odpadke kot produkt nazaj v uporabo.

Prvi del naloge poda zakonodajne okvirje glede opisa biorazgradljivih odpadkov ter njihove predelave in deponiranja. Drugo poglavje izpostavi dodatno zakonodajo glede aerobne (kompostiranje) in anaerobne (vrenje) obdelave odpadkov in omejitve odlaganja tovrstnih odpadkov na deponije.

V drugem delu naloge natančno opišem vse vrste in količine biorazgradljivih odpadkov, osnovne zakonitosti procesov biorazgradnje ter glavni tehnologiji predelave le-teh. Tu se naloga še dodatno osredotoči na najenostavnejšo obliko aerobne razgradnje oziroma kompostiranje, ki ga detajlno obravnavam skozi opis postopka, tehnologijo predelave in končni produkt. Ta poglavja so bistvo te naloge, saj natančno pokažejo pot biorazgradljivega odpadka do končnega produkta (komposta).

Zadnji del naloge primerja med seboj produkte aerobne in anaerobne biorazgradnje. Tu so prikazane vsebnosti tako škodljivih, kot koristnih substanc v kompostu in odpadnemu blatu iz ČN. S pomočjo analiz prikazanih v tem delu potrdimo, da kompost in odpadno blato vsebujeta največ rastlinam lahko dostopnih hranil, hkrati pa tudi največ težkih kovin, ki jih z ozaveščanjem ljudi in boljšim ločevanjem odpadkov lahko zmanjšamo tako, da zadovoljimo zakonsko predpisane kriterije, ki veljajo za produkte prvega kakovostnega razreda.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

<b>UDC:</b>	628.47(043.2)
<b>Author:</b>	Zoran Buzak
<b>Supervisor:</b>	assoc. prof. Jože Panjan, Ph. D.
<b>Co-supervisor:</b>	/
<b>Title:</b>	Biodegradable waste recycling
<b>Document type:</b>	Graduation Thesis – Higher professional studies
<b>Scope and tools:</b>	68 p., 20 tab., 38 fig.
<b>Keywords:</b>	biodegradable waste, aerobic degradation, anaerobic degradation, composting, residual sludge from purification plant, biogas, composting pyramid, recycling, compost, stabilised sludge

**Abstract:**

The diploma work discusses biodegradable waste, as they are the largest in terms of quantity of all municipal waste. The approach to such waste in terms of the material circuit is of utmost importance, as we return them back into use as a product in a relatively easy manner, through recycling, which is environmentally acceptable.

The first part of the diploma work encompasses legislative frameworks regarding the description of biodegradable waste, their processing and deposit. The second chapter places emphasis on additional legislation in connection with aerobic (composting) and anaerobic (fermentation) waste treatment and restrictions of such waste disposal on depot.

The second part of the diploma work thoroughly describes all types and quantities of biodegradable waste, the basic principles of biodegradation processes and two main processing technologies in this respect. At this point, the diploma work further focuses on the simplest form of aerobic degradation or composting, which is considered in detail within the description of process, processing technology and the final product. These chapters are the focus of the study, as they accurately show the process of biodegradable waste to the final product (compost).

In the last part of the diploma work, a comparison of aerobic and anaerobic biodegradation products is made. This part reveals the content of harmful and beneficial substances in compost and residual sludge from purification plant. By means of analyses presented in this part of the survey, we confirmed that compost and residual sludge not only contain the largest amount of nutrients easily accessible to plants, but also the largest amount of heavy metals, which can be reduced by awareness-raising and better separation of waste so as to satisfy the statutory criteria that apply for the first class quality products.

## **ZAHVALA**

Najlepša hvala mentorju izr. prof. dr. Jožetu Panjanu, ki mi je omogočil nastanek te naloge. Zahvaljujem se vam za vso pomoč, razumevanje in podporo.

Zahvale si ne predstavljam brez omembe žene Andreje, ki je opravila levji delež tehničnega oblikovanja naloge.

Vidva, ki me gledata od tam zgoraj, saj vesta, tole je za vaju.

**KAZALO VSEBINE**

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
1.1	Cilji naloge	1
1.2	Zakonodajna izhodišča	2
1.3	Osnovni predpisi o ravnanju z odpadki	2
<b>2</b>	<b>PREDPISANA ZAKONODAJA O RAVNANJU Z BIORAZGRADLJIVIMI ODPADKI IN ODPADNIM BLATOM IZ ČISTILNIH NAPRAV</b>	<b>3</b>
2.1	Osnovni zakonodajni opis odpadkov	3
2.2	Omejitve odlaganja biorazgradljivih odpadkov na deponije	3
<b>3</b>	<b>OPIS, VRSTE IN KOLIČINE BIORAZGRADLJIVIH ODPADKOV V RS</b>	<b>5</b>
3.1	Vrste in količine biorazgradljivih odpadkov v RS	6
3.1.1	Vrste in količine biorazgradljivih odpadkov v komunalno oskrbljenih naseljih	8
3.2	Zmanjševanje volumnov deponij zaradi ločene obravnave biorazgradljivih odpadkov	10
<b>4</b>	<b>OPIS PROCESOV BIORAZGRADNJE IN TEHNOLOGIJE PREDELAVE BIORAZGRADLJIVIH ODPADKOV</b>	<b>13</b>
4.1	Osnovne zakonitosti in procesi biorazgradnje	13
4.2	Anaerobni procesi biorazgradnje	16
4.2.1	Prikaz poteka anaerobnega procesa biorazgradnje	18
4.2.2	Končni produkt anaerobnega procesa biorazgradnje	23
4.3	Aerobni proces biorazgradnje	28
<b>5</b>	<b>KOMPOSTIRANJE</b>	<b>30</b>
5.1	Splošno o kompostiranju	30
5.2	Izvajanje procesa kompostiranja	31
5.3	Načini kompostiranja	32



5.3.1	Kompostiranje v obliki blazine	33
5.3.2	Zaprti postopek v posodi - zabojniku	33
5.3.3	Kompostiranje v bobnih	33
5.3.4	Kompostiranje v stolpih	33
5.3.5	Orgaver postopek	34
5.3.6	Brikollare postopek	34
5.3.7	Kompostiranje v piramidah	34
<b>6</b>	<b>ZNAČILNOSTI, TEHNOLOGIJA IN ZAHTEVE KOMPOSTNE PIRAMIDE</b>	<b>35</b>
6.1	Predpriprava kompostnega materiala	35
6.2	Konstrukcija kompostne piramide	39
6.3	Dovajanje zraka v kompostno piramido, temperaturna območja in vlažnost	41
6.3.1	Dovajanje zraka z obračanjem piramidnega kupa	41
6.3.2	Sistem z izsesavanjem zraka	42
6.3.3	Sistem z vpihovanjem zraka	44
<b>7</b>	<b>KONČNA OBDELAVA IN UPORABA KOMPOSTA</b>	<b>46</b>
7.1	Higienizacija in končna obdelava komposta	46
7.2	Kakovost komposta in razvrščanje po razredih	49
7.2.1	Predpisani kakovostni razredi komposta in digestata	50
7.2.2	Prvi kakovostni razred komposta ali digestata	53
7.2.3	Drugi kakovostni razred komposta ali digestata	53
<b>8</b>	<b>PRIMERJAVA KOMPOSTA IN STABILIZIRANEGA BLATA IZ ČN</b>	<b>54</b>
8.1	Mejne vrednosti vnosa snovi v zemljo	54
8.2	Analiza in primerjava vzorcev komposta in odpadnega blata iz ČN	57
<b>9</b>	<b>UGOTOVITVE</b>	<b>64</b>
	<b>VIRI</b>	<b>66</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1:	Količina biološko razgradljivih sestavin v komunalnih odpadkih, ki se lahko letno odložijo na vseh odlagališčih na ozemlju Republike Slovenije [4]	4
Preglednica 2:	Količine biorazgradljivih odpadkov po skupinah odpadkov za leto 2003 v Republiki Sloveniji [6]	6
Preglednica 3:	Vpliv ločenega zbiranja in sortiranja odpadkov na zmanjšanje celotne količine odpadkov na deponiji Vrhnika – Tojnice [10]	12
Preglednica 4:	Presnova organskih snovi in izkoristek bioplina [6]	24
Preglednica 5:	Sestava bioplina [6]	25
Preglednica 6:	Razmerja med C in N v različnih snoveh, uporabljenih pri kompostiranju [14]	38
Preglednica 7:	Mejne vrednosti parametrov za uvrstitev komposta v kakovostni razred [15]	50
Preglednica 8:	Mejne vrednosti parametrov za uvrstitev digestata v kakovostni razred [15]	51
Preglednica 9:	Mejne vrednosti vnosa nevarnih snovi v tla [15]	55
Preglednica 10:	Mejne vrednosti za letni vnos rastlinskih hranil pri gnojenju z živinskimi gnojili [16]	55
Preglednica 11:	Mejne vrednosti za letni vnos dušika na vodovarstvenih območjih [16]	56
Preglednica 12:	Koncentracija škodljivih snovi v tleh in njihov prehod v rastlinsko tkivo [17]	56
Preglednica 13:	Primerjava gnojilne vrednosti pregnitega blata in hlevskega gnoja [17]	57
Preglednica 14:	Rezultati analize vzorca komposta, vzetega na kompostarni CRO Vrhnika v decembru 2015 [18]	58
Preglednica 15:	Rezultati analize vzorcev odpadnega blata, vzeti iz ČN, ki jih upravlja JP Vodovod – kanalizacija d. o. o. (Ljubljana), v letu 2015 in 2016 [19], [20] in [21]	60
Preglednica 16:	Prikaz količine odpadnega blata in števila uporabnikov posamezne ČN, ki jih upravlja JP Vodovod – kanalizacija d. o. o. (Ljubljana), v letu 2015 in 2016 [19], [20] in [21]	61
Preglednica 17:	Vsebnost suhe in organske snovi, ogljika in dušika iz analize vzorca komposta iz kompostarne Vrhnika [22]	61
Preglednica 18:	Vsebnost rastlinam dostopnega P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> in K <sub>2</sub> O iz analize vzorca komposta iz kompostarne Vrhnika [22]	62

Preglednica 19:	Analiza odpadnega blata čistilne naprave Domžale – Kamnik; št. vz. 886/00, št. 6 [23]	62
Preglednica 20:	Primerjava analiziranih vzorcev	63

**KAZALO SLIK**

Slika 1:	Zmanjševanje deleža biorazgradljivih odpadkov v letnih količinah odloženih komunalnih odpadkov v Sloveniji za obdobje 2000 do 2019 [4]	5
Slika 2:	Količina biorazgradljivih odpadkov po skupinah odpadkov v Republiki Sloveniji v letu 2003 v tonah [6]	7
Slika 3:	Sestava komunalnih odpadkov v Republiki Sloveniji v letu 2003 v % [6]	8
Slika 4:	Sestava komunalnih odpadkov v prostorninskih % v naselju Ljubljana – Fužine [7]	9
Slika 5:	Sestava komunalnih odpadkov v masnih % v naselju Ljubljana – Fužine [7]	10
Slika 6:	Predvideno ravnanje s komunalnimi odpadki v letu 2020 [9]	11
Slika 7:	Potrebna zmogljivost naprav za recikliranje kuhinjskih odpadkov in zelenega vrtnega odpada v letu 2020 [9]	12
Slika 8:	Kroženje energije v naravi [7]	14
Slika 9:	Ravnotežje med rastjo in razgradnjo organske snovi [11]	14
Slika 10:	Pretvorba ogljikovih spojin v zaključenem sistemu [11]	15
Slika 11:	Pretvorba dušikovih spojin v zaključenem sistemu [11]	15
Slika 12:	Prikaz faz anaerobne razgradnje organske snovi [11]	19
Slika 13:	Postopek za doseganje anaerobnega vrenja in obdelava končnega produkta [7]	20
Slika 14:	Prikaz kontinuiranega enostopenjskega anaerobnega reaktorja [11]	22
Slika 15:	Prikaz šaržnega dvostopenjskega anaerobnega reaktorja [11]	23
Slika 16:	Masna bilanca anaerobne fermentacije, kjer je 35% suhe snovi v kateri se nahaja 85% organske substance, stopnja anaerobne biološke razgradnje je 55% [11]	26
Slika 17:	Čistilna naprava Vrhnika	27
Slika 18:	Bazen za čiščenje odpadne vode na ČN Vrhnika	27
Slika 19:	Dehidrirano blato iz ČN Vrhnika	28
Slika 20:	Zunanost hale za sprejem kompostnega materiala (kompostarna CRO Vrhnika)	35
Slika 21:	Notranost hale za sprejem kompostnega materiala (kompostarna CRO Vrhnika)	36
Slika 22:	Zeleni odrez za strukturni material (kompostarna CRO Vrhnika)	36
Slika 23:	Mobilni drobilnik VILLIBALD MZA 4600 (kompostarna CRO Vrhnika)	37
Slika 24:	Drobljenje kompostnega materiala (kompostarna CRO Vrhnika)	37
Slika 25:	Različne oblike kompostnih piramid [9]	39
Slika 26:	Kompostna piramida (kompostarna CRO Vrhnika)	40
Slika 27:	Kompostna piramida v tunelu – intenzivno zorenje (kompostarna CRO Vrhnika)	41

Slika 28:	Temperaturna območja v kompostni piramidi brez dovoda zraka [13]	42
Slika 29:	Perforirane talne cevi za izsesavanje oziroma vpihovanje zraka (kompostarna CRO Vrhnika)	43
Slika 30:	Kompostna piramida s sesanjem zraka [13]	44
Slika 31:	Kompostne piramide z dovajanjem zraka [13]	45
Slika 32:	Mešanje kompostnega materiala z mobilnim mešalnikom komposta »JENZ MU 2000 D« (kompostarna CRO Vrhnika)	45
Slika 33:	Shematski prikaz predelave in predelane količine biorazgradljivih odpadkov v kompost (kompostarna CRO Vrhnika)	47
Slika 34:	Sejanje komposta z bobnastim sitom RARWICK PRIMUS (kompostarna CRO Vrhnika)	48
Slika 35:	Prečiščen kompost po sejanju z bobnastim sitom FARWICK PRIMUS (kompostarna CRO Vrhnika)	48
Slika 36:	Skladiščenje presejanega komposta v ločeni hali (kompostarna CRO Vrhnika)	49
Slika 37:	Zastirka iz komposta na odlagališču Tojnice, Vrhnika (kompostarna CRO Vrhnika)	54
Slika 38:	Zastirka iz komposta na odlagališču Tojnice, Vrhnika (kompostarna CRO Vrhnika)	54

**KRATICE**

ČN	čistilna naprava
t	tona
C/N	razmerje ogljik - dušik
pH	faktor kislosti
Pb	svinec
Cu	baker
Ni	nikelj
Cr	krom
Cd	kadmij
Hg	živo srebro
Zn	cink
K	Kalij
C	ogljik
N	dušik
P	fosfor
S	žveplo
Mg	Magnezij
Ca	kalcij
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	fosforjev pentoksid
K <sub>2</sub> O	kalijev oksid
CH <sub>4</sub>	metan
NH <sub>3</sub>	amonijak
H <sub>2</sub> S	vodikov sulfid (žveplovodik)
RS	Republika Slovenija
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	grozdni sladkor
6H <sub>2</sub> O	heksahidrat
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	žveplena kislina
6CO <sub>2</sub>	šest molekularni ogljikov dioksid
6HO <sub>2</sub>	šest molekularni vodikov dioksid

## 1 UVOD

Ustvarjanje količine odpadkov je pereč problem naše družbe. Količina in ustvarjanje odpadkov se hitro povečujeta z naraščanjem števila prebivalstva in s povečano porabo dobrin, zato deponiranje postaja nezadosten način razpolaganja z odpadki. Današnja družba usmerja ukrepe v zmanjševanje količine smeti, odložene na deponije odpadkov, ker se le-te soočajo s prostorsko stisko. Širitev deponij oziroma njihova selitev na nove lokacije ni zaželena zaradi več razlogov, kot so sproščanje nevarnih plinov in posledično nastajanje smradu, onesnaževanje tal in podtalnice, poleg tega pa lokalne skupnosti pogosto niso pripravljene pomagati pri reševanju teh težav. Zaradi povečevanja količine smeti je nemogoče obdržati deponije v sedanjem obsegu, vendar lahko z uvajanjem novih načinov predelave odpadnih snovi poskušamo zmanjšati količino deponiranih odpadkov, moramo pa se zavedati, da kljub vsem ukrepom in novim tehnologijam ni možno preprečiti odlaganja odpadkov na deponije, ker jih je nemogoče popolnoma predelati in ponovno uporabiti.

Obravnavanje odpadkov postaja vse večji izziv za sodobno družbo, predvsem z vidika uvajanja novih pristopov in metod za predelavo odpadkov, zlasti pa vračanja le-teh kot surovin oziroma končnih produktov nazaj k potrošniku.

Pri predelavi odpadkov je pomemben celovit pristop, saj nas zanima čim bolj čista surovina oziroma končni produkt, zato je izjemno pomembno sodelovanje med proizvajalci in predelovalci odpadkov ter ozaveščanje vseh sodelujočih v procesu nastajanja odpadka, njegovega odlaganja, predelave in končnega deponiranja.

### 1.1 Cilji naloge

Zavedanje, da želimo živeti v čistem okolju, čim manj izčrpavati naravne vire, da ne želimo prekomerno obremenjevati narave itn., našo družbo silijo v razbremenjevanje odlagališč odpadkov.

Skladno s tem zavedanjem je tudi država zakonsko predpisala postopno zmanjševanje biorazgradljivih odpadkov na naših deponijah, ki predstavljajo največji delež v sestavi komunalnih odpadkov, pripeljanih na deponije, zato v nalogi obravnavam naslednje cilje:

1. Podroben pregled in opis zakonodaje o ravnanju z biorazgradljivimi odpadki in odpadnim blatom iz čistilnih naprav ter prikaz zakonskih možnosti za zmanjševanje odlaganja biorazgradljivih odpadkov na deponijah in odpadnega blata iz čistilnih naprav, saj jih lahko na

- ekološko sprejemljiv način s tehnološko sodobnimi postopki in z ekonomsko upravičenostjo reciklirane vrnemo nazaj v uporabo.
2. Opis biorazgradljivih odpadkov in odpadnega blata iz čistilnih naprav, njihovo biološko in kemijsko sestavo, ker le s poznavanjem osnovnih lastnosti tega odpadka lahko razumemo njegovo razgradnjo in recikliranje.
  3. Obravnavanje procesa biorazgradnje in podroben opis kompostiranja s tehnologijo kompostne piramide.
  4. Pregled recikliranih biorazgradljivih odpadkov, kakovost in uporabnost. Primerjava komposta, ki ga pridelamo s kompostiranjem in stabiliziranega blata iz čistilnih naprav.

## 1.2 Zakonodajna izhodišča

Pomembno je zavedanje, da odpadki nastajajo kot posledica človekovega delovanja, zato je dolžan poskrbeti zanje.

Republika Slovenija je na tem področju sprejela krovni Zakon o varstvu okolja [1], ki ga je dopolnila z zadnjim Zakonom o spremembah Zakona o varstvu okolja [2]. Pri sprejemanju nacionalne zakonodaje so bile upoštevane direktive Evropske unije.

Vsem direktivam Evropske unije, ki so implementirane v nacionalno zakonodajo, je skupno naslednje:

- odpadek je predmet ali snov, ki jo zavržemo in
- povzročitelj je vsak, ki pridela zavrženi predmet ali snov.

Države članice EU se v omenjenih direktivah zavežejo k sprejemu posebnih ukrepov, ki spodbujajo preprečevanje in zmanjševanje nastajanja odpadkov tako, da se jih ustvarja čim manj na izvoru ter njihovim ponovnim vračanjem v snovni krogotok s pomočjo recikliranja oziroma njihovo energetsko izrabo.

## 1.3 Osnovni predpisi o ravnanju z odpadki

Osnovni pravni okvir za ravnanje z odpadki je torej vzpostavljen z Zakonom o varstvu okolja [1] in njegovo zadnjo spremembo iz leta 2015 [2].

Pravila ravnanja in druge pogoje za preprečevanje ali zmanjševanje škodljivih vplivov nastajanja odpadkov in ravnanja z njimi pa določa Uredba o odpadkih [3].

Pravila ravnanja s posameznimi vrstami odpadkov ali obdelavo odpadkov ali razširjeno odgovornostjo proizvajalcev podrobneje urejajo posebni predpisi, izdani na podlagi Zakona o varstvu okolja.



Ker so biorazgradljivi odpadki največji po količini in volumnu, hkrati pa spadajo med lažje razgradljive odpadke, ki jih je možno z dokaj enostavno tehnologijo kompostiranja kakovostno predelati in jih reciklirane vrniti v krogotok snovi, se ta naloga bolj natančno usmeri na kompostiranje, ki je pravzaprav že dolgo poznana tradicionalna metoda ravnanja z biorazgradljivimi odpadki, z novimi trendi in tehnološkimi pristopi pa postane ena od najboljših metod predelave biorazgradljivih odpadkov, katere rezultat je ob pravilni uporabi ekološko neoporečen humus.

## **2 PREDPISANA ZAKONODAJA O RAVNANJU Z BIORAZGRADLJIVIMI ODPADKI IN ODPADNIM BLATOM IZ ČISTILNIH NAPRAV**

### **2.1 Osnovni zakonodajni opis odpadkov**

Zakonodaja in uredbi opredelita osnovne pojme, ki so pomembni za razumevanje nadaljevanja naloge. Uredba podrobno opiše in definirata vse vrste odpadkov, odlagališča odpadkov ter njihovo obdelavo. Dotakneta se tudi recikliranja, aerobne in anaerobne obdelave mešanih komunalnih odpadkov še posebej pa natančno opišeta biološko razgradljive odpadke tako, da dobimo naslednjo definicijo [1] in [4]:

- biorazgradljiv odpadek je tisti odpadek, ki ga lahko aerobno ali anaerobno razgradimo.

Nadaljnja pravila ravnanja in druge pogoje v zvezi s predelavo biološko razgradljivih odpadkov in uporabo komposta ali digestata ureja Uredba o predelavi biološko razgradljivih odpadkov in uporabi komposta ali digestata [5]. V tej uredbi je tudi zapisano katere biorazgradljive odpadke je dovoljeno kompostirati in katerim pogojem mora zadostiti predelovalec tovrstnih odpadkov.

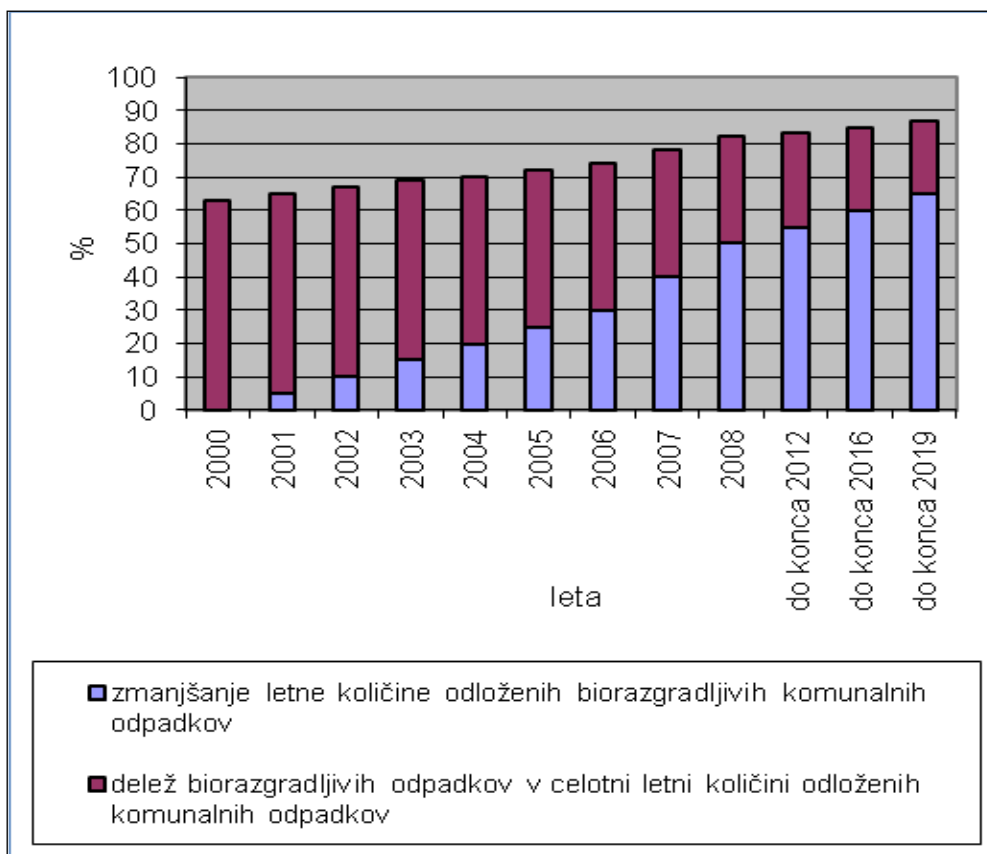
### **2.2 Omejitve odlaganja biorazgradljivih odpadkov na deponije**

Kot je bilo uvodoma povedano, zakonodajalec želi omejiti deponiranje biorazgradljivih odpadkov na deponijah, zato v uredbi predpiše največjo količino odloženih biološko razgradljivih odpadkov na deponije, kar je prikazano v naslednji preglednici [4]:

Preglednica 1: Količina biološko razgradljivih sestavin v komunalnih odpadkih, ki se lahko letno odložijo na vseh odlagališčih na ozemlju Republike Slovenije [4]

Obdobje	Zmanjšanje letne količine odloženih biološko razgradljivih komunalnih odpadkov, izraženo z zmanjšanjem odstotka biološko razgradljivih odpadkov v komunalnih odpadkih, nastalih v letu 1995	Letna količina odloženih biološko razgradljivih snovi v komunalnih odpadkih, izražena v odstotku mase komunalnih odpadkov, nastalih v letu 1995	Letna količina biološko razgradljivih sestavin v odloženih komunalnih odpadkih
	%	%	1000 t
Izhodiščno leto 1995		63	445
2000	0	63	445
2001	5	60	423
2002	5	57	401
2003	5	54	378
2004	5	50	356
2005	5	47	334
2006	5	44	312
2007	10	38	267
2008	10	32	223
Do konca 2012	5	28	200
Do konca 2016	5	25	178
Do konca 2019	5	22	156

Za izhodišče so prevzeti podatki o količini odpadkov ter deležu biorazgradljivih odpadkov v komunalnih odpadkih v letu 1995!



Slika 1: Zmanjševanje deleža biorazgradljivih odpadkov v letnih količinah odloženih komunalnih odpadkov v Sloveniji za obdobje 2000 do 2019 [4]

### 3 OPIS, VRSTE IN KOLIČINE BIORAZGRADLJIVIH ODPADKOV V RS

Natančen opis biorazgradljivih odpadkov nam poda zakonodajalec z uredbo v svoji prilogi številka 1. [5]. V tej prilogi je še posebej poudarjen način predelave vsakega posameznega biorazgradljivega odpadka, ki so razvrščeni v ločene kategorije.

Če povzamemo zgoraj navedeno prilogo ugotovimo, da so biorazgradljivi odpadki tisti odpadki, ki nastanejo v kmetijstvu, pri proizvodnji hrane, lesni, papirni in tekstilni industriji.

Zato lahko biorazgradljive odpadke opredelimo kot odpadke organskega izvora, za katere je značilna rast, razvoj, propad in vračanje biomase v snovni krogotok.

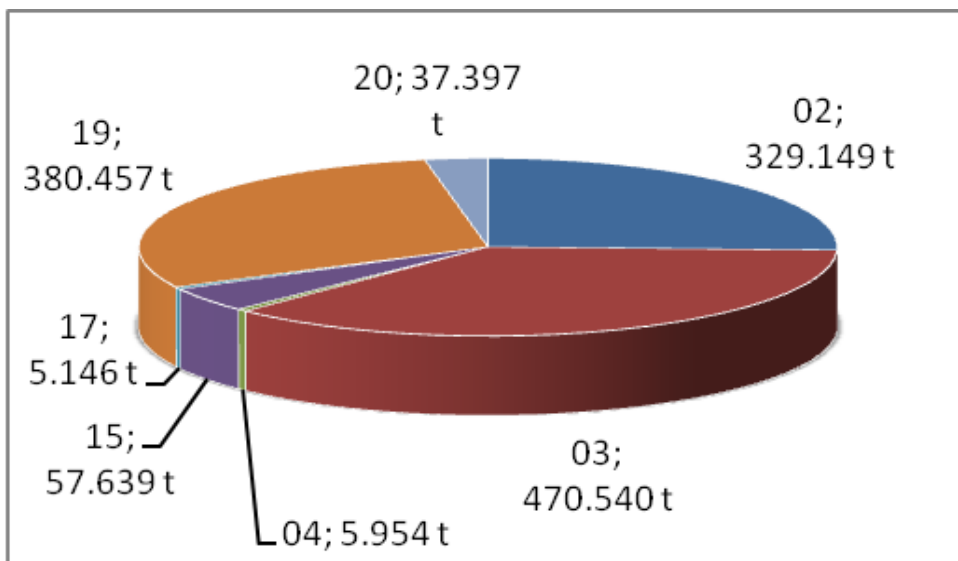
### 3.1 Vrste in količine biorazgradljivih odpadkov v RS

V Republiki Sloveniji je za spremljanje vseh podatkov glede odpadkov zadolžen ARSO, ki zbira podatke od vseh pridelovalcev odpadkov, ki letno pridelajo več kot 10 t nenevarnih odpadkov.

Za prikaz količin, ločeno zbranih biorazgradljivih odpadkov v Republiki Sloveniji, podajam ARSO - ovo preglednico za leto 2003:

Preglednica 2: Količine biorazgradljivih odpadkov po skupinah odpadkov za leto 2003 v Republiki Sloveniji [6]

Skupina	Izvor odpadka	Nastala količina (t)
2	Odpadki iz kmetijstva, vrtnarstva, ribogojstva, lova, proizvodnje hrane in ribištva	329.149
3	Odpadki iz obdelave in predelave lesa, proizvodnje papirja, ivernih plošč in pohištva	470.540
4	Odpadki iz industrije tekstilij, krzna in usnja	5.954
15	Odpadna embalaža, absorbenti, čistilne krpe, filtrirna sredstva in zaščitne obleke	57.639
17	Gradbeni odpadki in ruševine (vključno z odpadnimi materiali pri gradnji cest)	5.146
19	Odpadki iz naprav za obdelavo odpadkov, naprav za čiščenje odpadne vode in objektov vodooskrbe	380.457
20	Komunalni odpadki in njim podobni odpadki iz industrije, obrti in storitvenih dejavnosti, vključno z ločeno zbranimi frakcijami	37.397
Skupaj		1.286.282

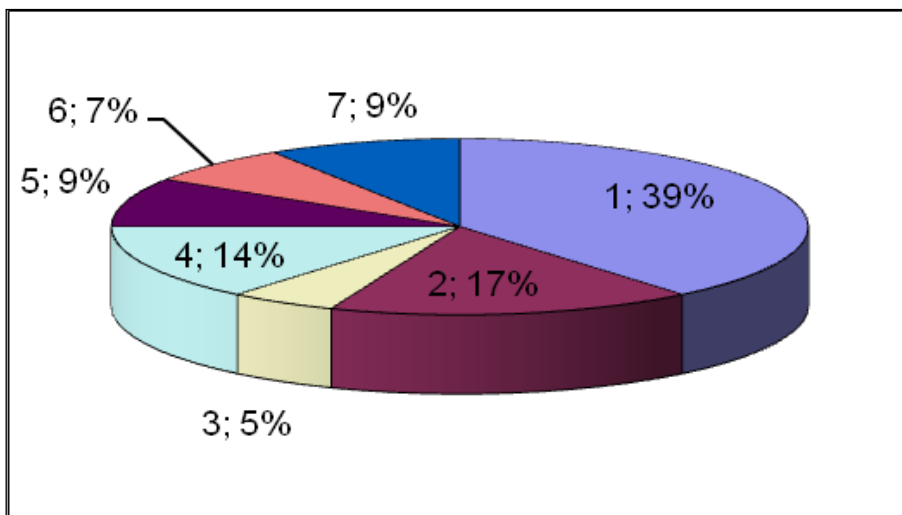


Slika 2: Količina biorazgradljivih odpadkov po skupinah odpadkov v Republiki Sloveniji v letu 2003 v tonah [6]

Po zgoraj navedenih podatkih je razvidno, da je leta 2003 v RS nastalo 1,286 milijona ton biorazgradljivih odpadkov, pri čemer je bilo ločeno zbranih biorazgradljivih odpadkov samo 200 ton, kar pomeni, da je večina tovrstnih odpadkov končala na domačih, divjih ali registriranih deponijah oziroma je bila predelana mimo registriranih predelovalcev.

V RS v letu 2003 je bila sestava komunalnih odpadkov naslednja [6]:

1. 39 % biogen in zeleni material,
2. 17 % papir in karton,
3. 5 % les,
4. 14 % umetne mase,
5. 9 % kovine,
6. 7 % steklo,
7. 9 % ostalo.



Slika 3: Sestava komunalnih odpadkov v Republiki Sloveniji v letu 2003 v % [6]

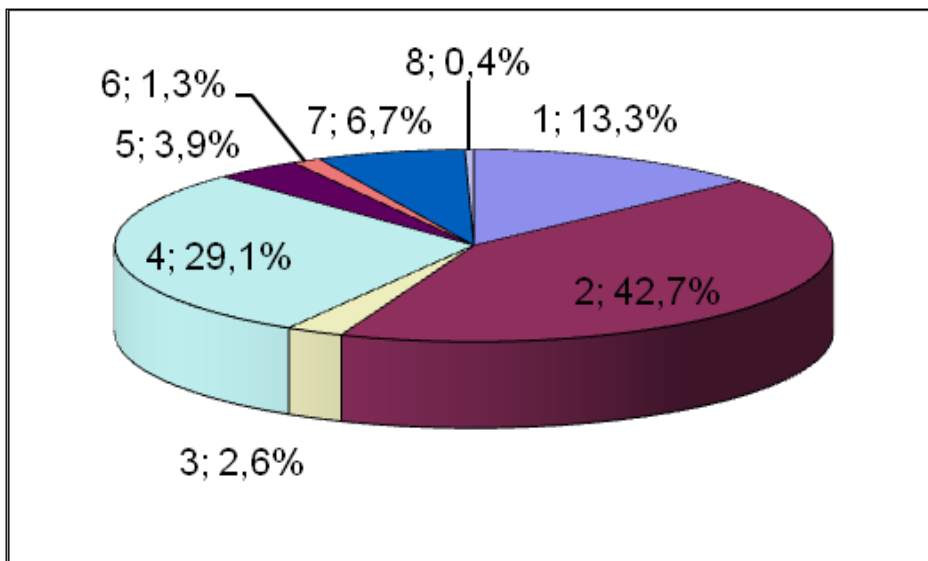
Iz zgornjih podatkov lahko izračunamo celo 61 % delež biorazgradljivih odpadkov v sestavi komunalnih odpadkov. Te lahko izločimo in predelamo.

### 3.1.1 Vrste in količine biorazgradljivih odpadkov v komunalno oskrbljenih naseljih

Zelo zanimiva je tudi primerjava sestave komunalnih odpadkov ter delež biorazgradljivih odpadkov, ki nastanejo v komunalno urejenih naseljih, s prej obravnavano na državnem nivoju.

Sestava komunalnih odpadkov glede na prostorninski % v komunalno urejenem naselju Fužine – Ljubljana [15]:

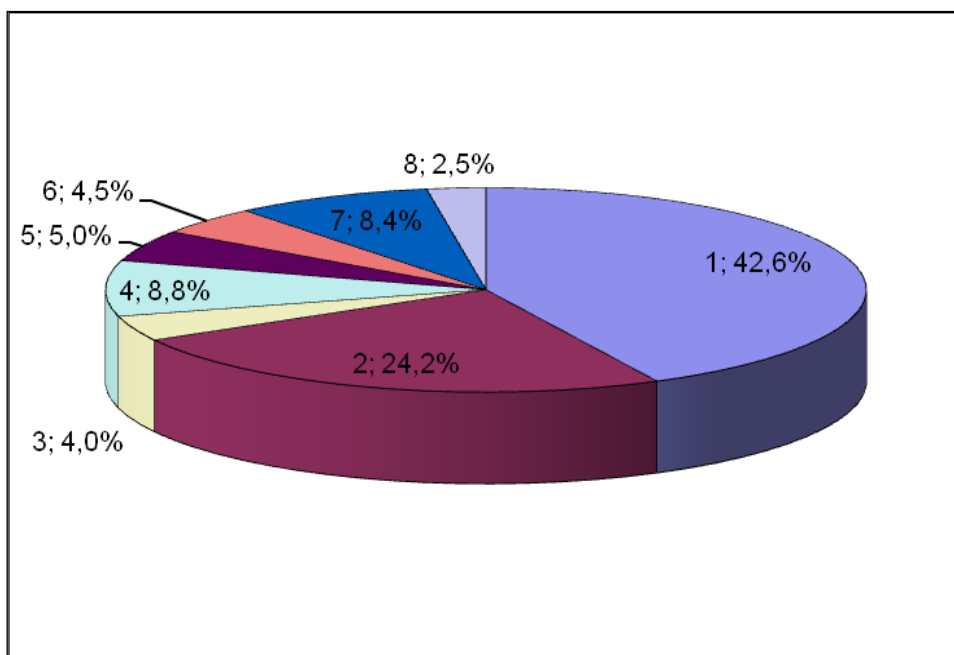
1. 13,3 % biorazgradljivi odpadki,
2. 42,7 % papir in karton,
3. 2,6 % tekstil,
4. 29,1 % umetne mase (plastika),
5. 3,9 % kovine,
6. 1,3 % steklo,
7. 6,7 % ostalo,
8. 0,4 % mineralni odpadki.



Slika 4: Sestava komunalnih odpadkov v prostorninskih % v naselju Ljubljana – Fužine [7]

Sestava komunalnih odpadkov v istem naselju glede na masni % je popolnoma drugačna [7]:

1. 42,6 % biorazgradljivi odpadki,
2. 24,2 % papir in karton,
3. 4 % tekstil,
4. 8,8 % umetne mase (plastika),
5. 5 % kovine,
6. 4,5 % steklo,
7. 8,4 % ostalo,
8. 2,5 % mineralni odpadki.



Slika 5: Sestava komunalnih odpadkov v masnih % v naselju Ljubljana – Fužine [7]

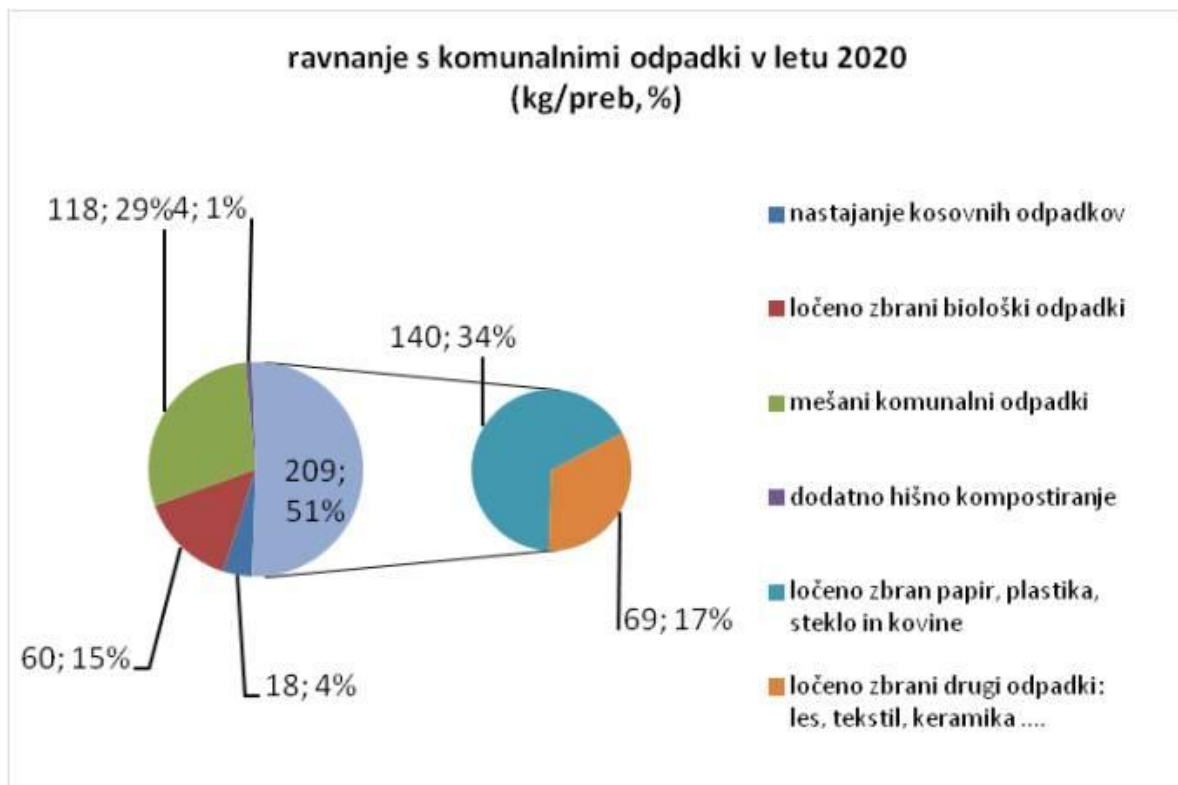
Iz teh primerjav lahko ugotovimo, da so količine in sestava komunalnih odpadkov iz komunalno urejenih naselij ter delež biorazgradljivih odpadkov zelo podobni celotnim količinam komunalnih odpadkov in deležu biorazgradljivih odpadkov v Republiki Sloveniji ne glede na bolj ali manj urejeno zbiranje in ločevanje komunalnih odpadkov, njihov odvoz oziroma predelavo.

### 3.2 Zmanjševanje volumnov deponij zaradi ločene obravnave biorazgradljivih odpadkov

Ker so biorazgradljivi odpadki vsebovani celo z 61 % deležem vseh komunalnih odpadkov, je izjemno pomembna njihova posebna obravnava. Izločanje tovrstnih odpadkov lahko dosežemo na dva načina in sicer s fizičnim ločevanjem biorazgradljivih odpadkov na izvoru oziroma na deponijah. Način ločenega zbiranja odpadkov na izvoru je še posebej pomemben, saj s tem načinom dosežemo psihološki namen pri proizvajalcih odpadkov, kajti raziskave in izkušnje so pokazale, da postane človek bolj pozoren na stvari, če je direktno vpleten v določen proces [8]. S takim pristopom dosežemo odločilne poteze, ki vplivajo na zmanjševanje celotne količine odpadkov na deponijah, ker se proizvajalci in predelovalci odpadkov zavedajo, da je izločanje le posameznih frakcij odpadkov popolnoma nesmotno, zato se na izvoru poskuša izločiti čim več različnih frakcij odpadkov.



Zaradi doseganja okoljskih ciljev je predelava biorazgradljivih odpadkov ključna. V Republiki Sloveniji smo si zaradi tega zastavili naslednje cilje pri količinah ločeno zbranih odpadkov do leta 2020 [9].



Slika 6: Predvideno ravnanje s komunalnimi odpadki v letu 2020 [9]

Na zemljevidu Slovenije lahko prikažemo potrebne zmogljivosti naprav za predelavo in recikliranje kuhinjskih odpadkov in zelenega vrtnega odpada v letu 2020 [9].



Slika 7: Potrebna zmogljivost naprav za recikliranje kuhinjskih odpadkov in zelenega vrtnega odpada v letu 2020 [9]

Razmišljanje o varstvu okolja in sodoben način življenja nam narekujejo spreminjanje odnosa do zmanjšanja količin deponiranih odpadkov, zato je zanimiv prikaz primera, kako lahko ločeno zbiranje odpadkov vpliva na zmanjšanje celotne količine odpadkov v Občini Vrhnika [10]:

Preglednica 3: Vpliv ločenega zbiranja in sortiranja odpadkov na zmanjšanje celotne količine odpadkov na deponiji Vrhnika – Tojnice [10]

	Nedeponirano (m <sup>3</sup> )	Stisljivost (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Prihranek (m <sup>3</sup> )
Papir	1110	0,6	666
Steklo	88	1	88
Pločevina v balah	242	1	242
Železo	41	0,6	24,6

Akumulatorji	10	1	10
Avtomobilske školjke v balah	8	1	8
Aluminij	13	0,5	6,5
Plastika v balah	121	1	121
Stiropor	91	0,6	54,6
Guma	263	0,2	52
Les	7200	0,225	1620
Bioodpadki	1656	0,6	993

#### **4 OPIS PROCESOV BIORAZGRADNJE IN TEHNOLOGIJE PREDELAVE BIORAZGRADLJIVIH ODPADKOV**

##### **4.1 Osnovne zakonitosti in procesi biorazgradnje**

V procesu biorazgradnje obravnavamo organsko snov, ki je pretežno sestavljena iz treh glavnih elementov:

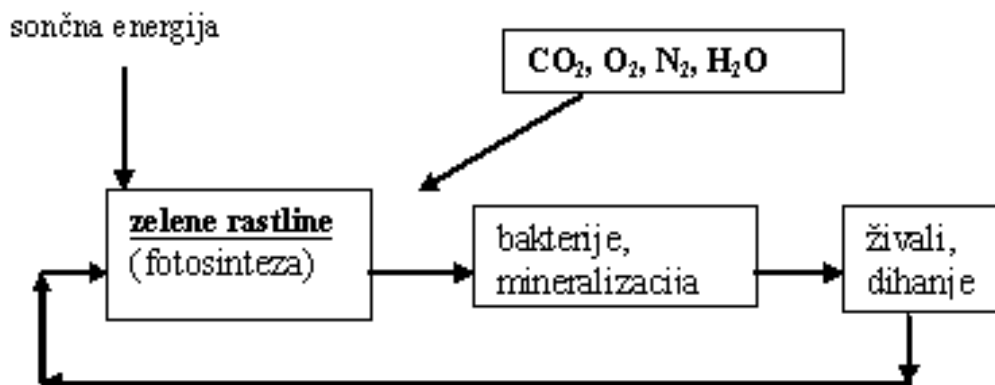
- Ogljik (C),
- vodik (H),
- kisik (O)

in

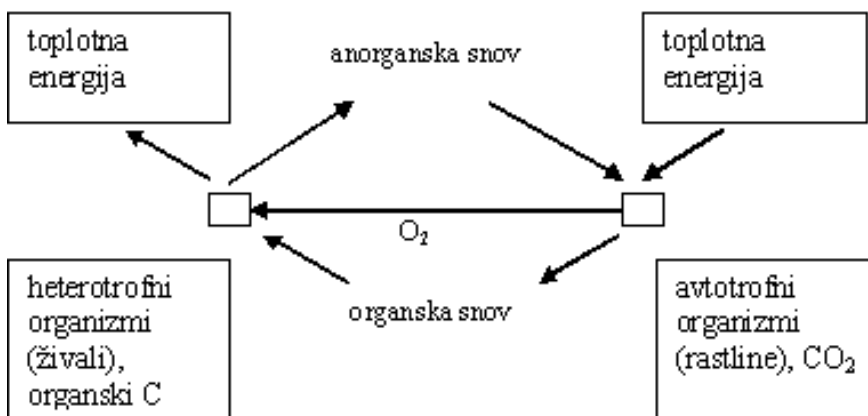
ostalih elementov, kot so dušik (N), fosfor (P) in žveplo (S), ki so prisotni v manjših količinah. Sicer organska snov vsebuje še kopico drugih elementov, ki pa so na meji zaznavnosti.

Pri biorazgradnji moramo razumeti osnovni princip prehranjevalne verige, ki se začne pri zelenih rastlinah kot proizvajalcih organskih snovi in konča pri presnavljalcih, ki organsko materijo pretvorijo do mineralnih (anorganskih snovi).

Ta proces lahko prikažemo kot spreminjanje organske snovi v anorgansko ter s pomočjo energije in metabolizma živih organizmov nazaj v organsko kot del celične snovi. V tem procesu sta pomembni pretvorbi ogljikovih in dušikovih spojin v zaključenem naravnem sistemu kroženja.



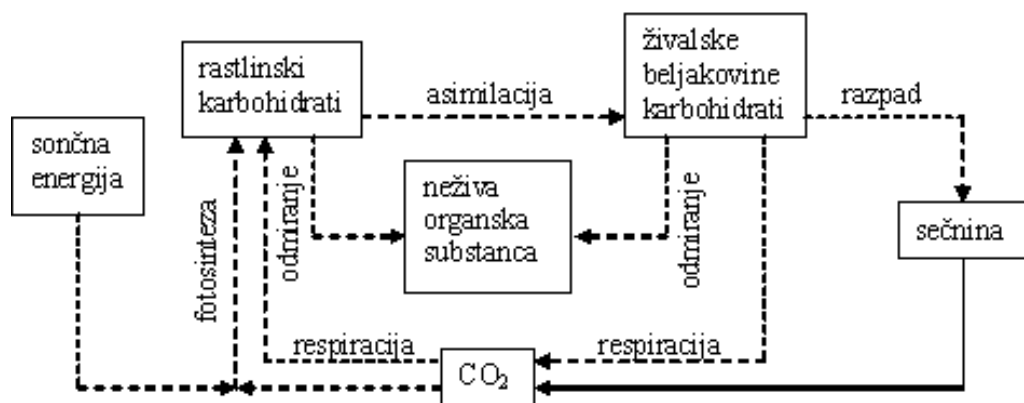
Slika 8: Kroženje energije v naravi [7]



Slika 9: Ravnotežje med rastjo in razgradnjo organske snovi [11]

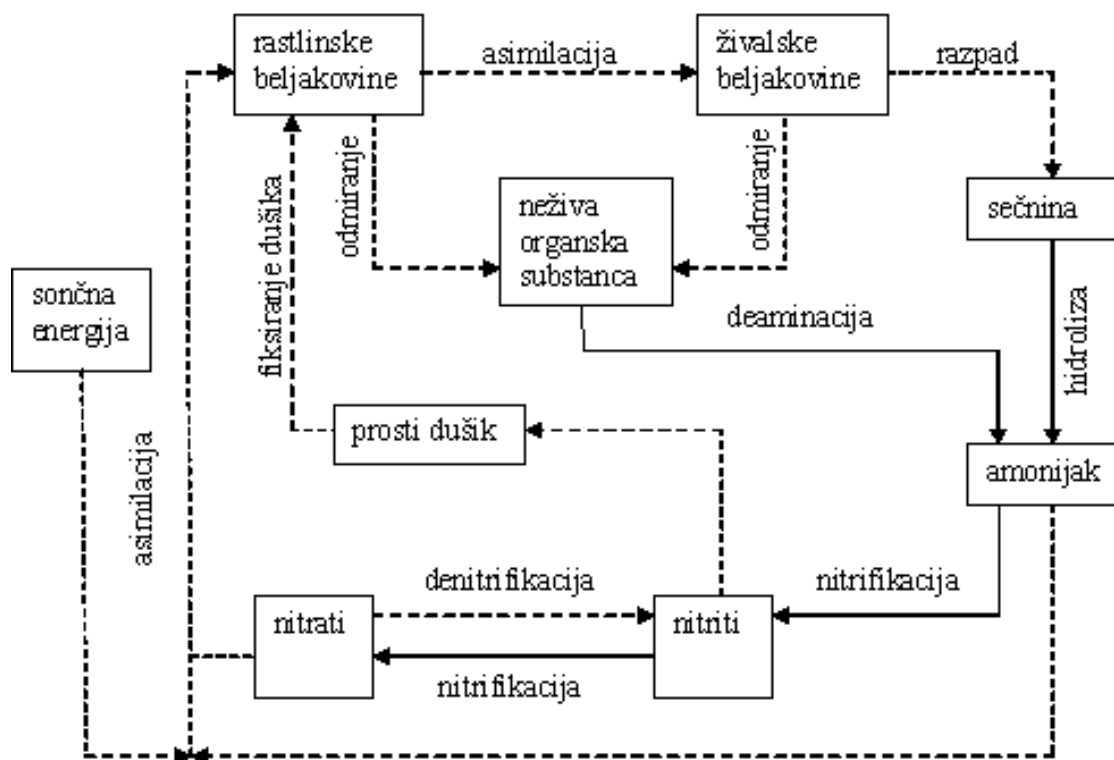
Z dihanjem mikroorganizmov se ogljik v organskih spojinah pretvori v ogljikov dioksid, ki pa se nadalje s procesom fotosinteze vgrajuje v rastline. Del ogljika, ki ga porabijo rastline za lastno dihanje, se vrne v anorgansko obliko oziroma ga skozi različne oblike živalski organizmi sprejmejo nazaj.

Živalski organizmi za časa življenja pri procesu dihanja sproščajo ogljik v obliki ogljikovega dioksida, delno pa se ogljik izloča tudi skozi sečnino in druge organske spojine. Ko živalski organizmi odmro, se ob pomoči mikroorganizmov njihova celična masa zopet pretvori v ogljikov dioksid.



Slika 10: Pretvorba ogljikovih spojin v zaključenem sistemu [11]

Pri dušiku se dogajajo podobni procesi. Mikroorganizmi pretvarjajo dušik iz nežive organske snovi v amonijak, nato v nitrite in nazadnje v nitrato. Dušik iz amonijaka in nitratov uporabijo rastline za vgrajevanje v beljakovine, ki jih uporabijo živali za vgrajevanje v svoje beljakovine. Živali izločajo dušik večinoma skozi sečnino, ki se zopet s pomočjo mikroorganizmov pretvori v amonijak, nitrite in nitrato.



Slika 11: Pretvorba dušikovih spojin v zaključenem sistemu [11]

Ogljik in dušik imata vsak svoj krožni snovni tok med organsko in anorgansko obliko.

Najpomembnejše je, da se prehajanje iz ene oblike v drugo dogaja s pomočjo bioloških oziroma biokemičnih reakcij. V naravi je kroženje snovi med rastjo in razgradnjo organske snovi zaključeno. Rastline pridobivajo organsko snov iz anorganske s pomočjo energije v obliki toplote. Pri tem procesu se sprošča kisik, medtem ko živali razgrajujejo organsko snov in nazaj sproščajo energijo v obliki toplote.

V vseh procesih kroženja organske snovi sodeluje več vrst organizmov na tak način, da oblikuje »prehransko verigo«. Pomembno je, da so na začetku procesa razgradnje preprosti organizmi, kasneje pa v proces razgradnje na različnih stopnjah vstopajo bolj razviti živalski organizmi, kar povzroča upad koncentracije organske snovi.

Razgrajevalci biorazgradljivih snovi so mikroorganizmi v obliki bakterij in gliv, katerih velikost je med 0,1 in 1 mikrometra.

Za spontan biorazgradljiv proces je potrebna naslednja koncentracija mikroorganizmov [11]:

- $10^8$  do  $10^{12}$  bakterij/kilogram odpadka in
- $10^4$  do  $10^5$  gliv/kilogram odpadka.

Ko se pojavijo zmanjšane koncentracije bakterij in gliv pri predelavi biorazgradljivih odpadkov, je potreben dodaten vnos mikroorganizmov s cepljenjem substrata, kar pomeni dodajanje že predelane organske snovi, bogate z mikroorganizmi. V tem procesu se dogajajo zapletene biokemične reakcije, na katere vplivajo temperatura in količina kisika.

Prav tako v teh procesih sodelujejo različni mikroorganizmi in sicer tisti, ki v procesu biorazgradnje potrebujejo kisik, in tisti, za katere je prosti kisik strupen, zato proces razgradnje lahko razdelimo na dve vrsti:

- ANAEROBNI, kjer sodeluje manjše število mikroorganizmov v pogojih brez prostega kisika in
- AEROBNI, kjer sodeluje veliko število različnih mikroorganizmov.

#### **4.2 Anaerobni proces biorazgradnje**

Ta proces biorazgradnje pogosto spremlja slab vonj, poteka pa preko naslednjih vmesnih produktov:

- Vodikov sulfid,
- amonijak,
- metan in
- nizkomolekularne maščobne kisline.

Anaerobne mikroorganizme, ki so sposobni adaptacije in lahko sodelujejo v obeh pogojih (anaerobni in aerobni pogoji), imenujemo fakultativni. Tovrstni mikroorganizmi so značilni za proces nitrifikacije (aerobni proces) in denitrifikacije (anaerobni proces). V obeh procesih se potreben kisik za oksidacijo organske substance porabi iz same organske snovi.

Spontani procesi razgradnje se ne pričenejo takoj, ampak po času udelave, ki je potreben, da se anaerobni procesi intenzivirajo. Ta čas je odvisen od:

- Števila mikroorganizmov, ki sodelujejo v procesu in
- temperature.

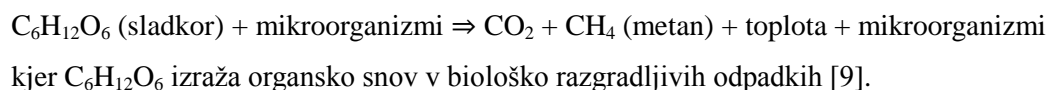
V naravi so anaerobni procesi dolgotrajni, ker potekajo samo v mezofilni fazi, v kateri se sprošča temperatura med 25 in 40 °C (razkrajajo se samo najenostavnejše organske spojine, kot so sladkorji in beljakovine, ki imajo veliko lastne energije), in zaradi prisotnosti manjšega števila mikroorganizmov v začetni fazi razkroja.

Pri vodenih procesih lahko čas razkroja zelo zmanjšamo z dodatnim vnosom mikroorganizmov preko:

- Cepljenja (vnos dodatnih anaerobnih bakterij) ali
- dodajanja substrata (vnos organske snovi, ki je v končni fazi anaerobnega razkroja) in
- zviševanja temperature, kjer je indikator poteka razkroja tvorba različnih plinov.

Anaerobna razgradnja temelji na metanogeni fermentaciji (vrenju) v vodnem mediju brez prisotnosti kisika. Pri tem postopku nastaja bioplina, ki je energetsko uporaben in je v povprečju sestavljen iz 2/3 metana in 1/3 ogljikovega dioksida ter drugih plinov (H<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>S). Poleg plina je produkt anaerobne razgradnje še poltekoča ali tekoča snov, ki se imenuje pregnito blato ali digestat.

Poenostavljena kemijska enačba za aerobno dihanje mikroorganizmov v postopku anaerobne obdelave je:



Postopek anaerobne razgradnje je najbolj uporabljen pri stabilizaciji mulja iz čistilnih naprav, kjer je substanca redka in znaša le 4 do 5 % suhe snovi. Proces izvajamo v velikih zaprtih kontejnerjih, v katerih je deponiran zdrobljen material, gosto suspendiran v vodi:

- Svež mulj iz čistilnih naprav,
- gnojevka,
- suspendirana premlena biomasa,
- tekoči ostanki hrane,
- odpadki iz lovilcev maščob itn.

Pomembna je relacija med količino pridelanega bioplina in vsebnostjo ogljika v organski snovi, ki jo razgrajujemo. Večji kot je delež ogljika v organski snovi, večji je izkoristek pretvorbe organske snovi v bioplin, zato je potrebna določitev optimalne mešanice substrata, doziranja in vodenja procesa anaerobne razgradnje.

Za homogenizacijo mešanice skrbi avtogeni plin, ki se tvori celoten čas trajanja procesa, in je sestavljen iz mešanice ogljikovega dioksida in metana v razmerju 2 : 3.

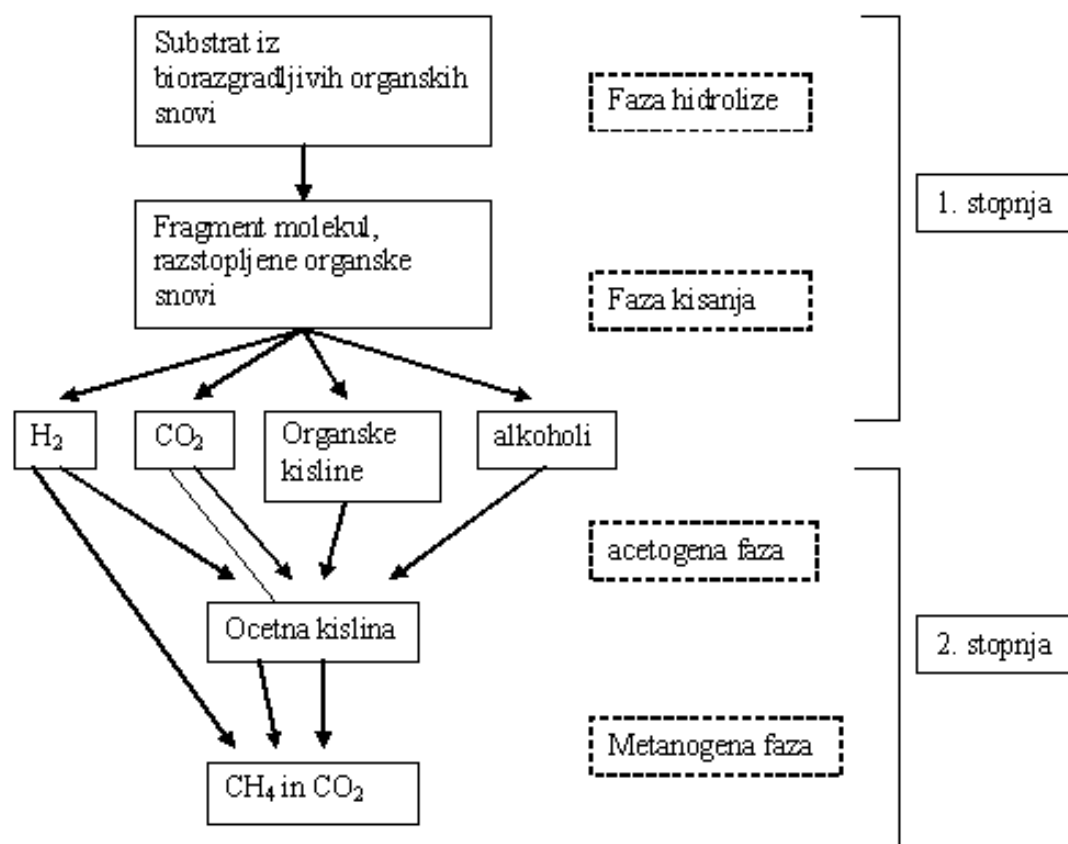
Če je v mešanici optimalna koncentracija in sestava biorazgradljivih odpadkov, se lahko iz ene tone substrata pridobi 500 do 600 kg metana, ki se uporabi za pridelavo električne energije ali za sušenje stabiliziranega blata pred njegovim sežigom.

#### 4.2.1 Prikaz poteka anaerobnega procesa biorazgradnje

Anaerobna razgradnja poteka v štirih reakcijskih fazah:

- Faza hidrolize,
- faza kisanja,
- acetogena faza in
- metanogena faza.





Slika 12: Prikaz faz anaerobne razgradnje organske snovi [11]

Na zgornji sliki je prikazano, kako na prvi stopnji procesa hidrolizirajoče in kislinotvorne bakterije razgrajujejo organske molekule na še manjše, in kako na drugi stopnji procesa drugi mikroorganizmi razgrajujejo manjše molekule, pri čemer nastaja metan.

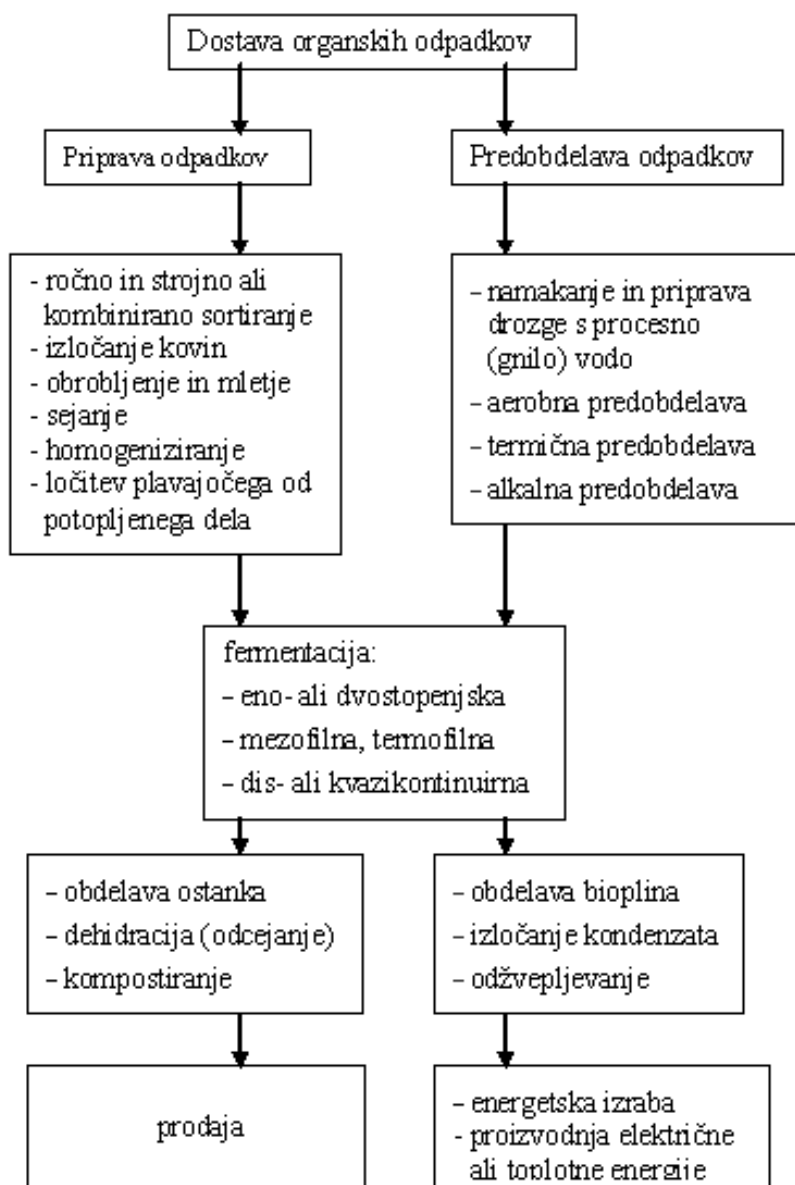
Nastali bioplin, ki je sestavljen pretežno iz metana (CH<sub>4</sub>), je potrebno očistiti vlage in žveplovodika (H<sub>2</sub>S), preden ga uporabimo kot energent.

Postopki biološke anaerobne fermentacije se razlikujejo glede na [11]:

- Temperaturo,
- število procesnih stopenj in
- delež suhe snovi v osnovnem substratu.

Pred postopkom anaerobnega vrenja moramo dobro pripraviti vstopne komponente, saj sta od tega odvisna izkoristek in količina ter onesnaženost emisij, zato velja:

- Temeljita priprava vstopnih materialov,
- dobra tehnična opremljenost,
- dobro vodenje postopka in
- stalnost kvalitete vstopnih snovi.



Slika 13: Postopek za doseganje anaerobnega vrenja in obdelava končnega produkta [7]

Ostanek blata je potrebno dehidrirati in aerobno stabilizirati, kar dosežemo s kompostiranjem.

Kot je bilo že uvodoma omenjeno, poteka proces anaerobne razgradnje po že prej opisanih fazah:

- Hidroliza (cepljenje organskih substanc v vodotopno obliko),
- kislo vrenje (tvorba organskih kislin z nizko molsko maso) in
- metanizacija (tvorjenje metana).

Tehnološki pristop določa število faz, v praksi pa je njihovo število odvisno od števila medsebojno vzajemno oziroma vzročno povezanih zaprtih kontejnerjev (reaktorjev).

Prva fazo imenujemo enostopenjska anaerobna fermentacija. V tej fazi pride do kislega vrenja, hidrolize in metanizacije v enem kontejnerju. Pri dvostopenjskem postopku je hidroliza in kislo vrenje ločeno od metanizacije, ki poteka v drugi posodi. Tristopenjski postopek ima dodan še tretji kontejner, v katerem poteka razgradnja celuloze na osnovne glukozne enote.

Večstopenjski postopki so uvedeni zaradi optimizacije pogojev v prvem delu procesa, ki omogoča hitrejša reakcije v drugem delu procesa anaerobne razgradnje.

Če v sistem ne dodajamo zunanje energije preko toplotnih izmenjevalnikov, se ti procesi vršijo s pomočjo lastne energije pri temperaturah med 35 in 40°C. Takšno anaerobno razgradnjo imenujemo mezofilna. Če pa v sistem dodajamo toplotno energijo, so reakcijske temperature med 55 in 60°C, kar ima za posledico krajše trajanje postopka, zato pa je količina pridelanega bioplina manjša, kot če ne dodajamo toplotne energije v sistem. Tovrstno anaerobno reakcijo imenujemo termofilna.

Glede na delež suhe snovi v substratu se postopki ločijo na:

- Mokri in
- suhi postopek fermentacije.

Pri mokrem postopku fermentacije se pripravi substrat s 15 % suhe snovi. S tem je doseženo dobro mešanje substrata v reaktorju, kar omogoča snovno in toplotno izmenjavo.

Prostornina takšnih reaktorjev je velika, preostanek blata po zaključenem procesu je potrebno dehidrirati, izcedno vodo pa se uporabi za vnovično pripravo substrata.

Za suhi postopek pa velja, da je v substratu več kot 30 % suhe snovi. Takšen substrat je poltrden oziroma pastozen. Prostornina reaktorjev v tem primeru je manjša. Kljub uporabi zahtevnejše tehnologije pri tem postopku se izvrši slabša izmenjava snovi in toplote.

Prednost mokrega postopka pred suhim je lažji in cenejši transport substrata. Ta je redek in se lažje črpa. Prednost suhega substrata je v manjših količinah za isto količino mokre snovi.

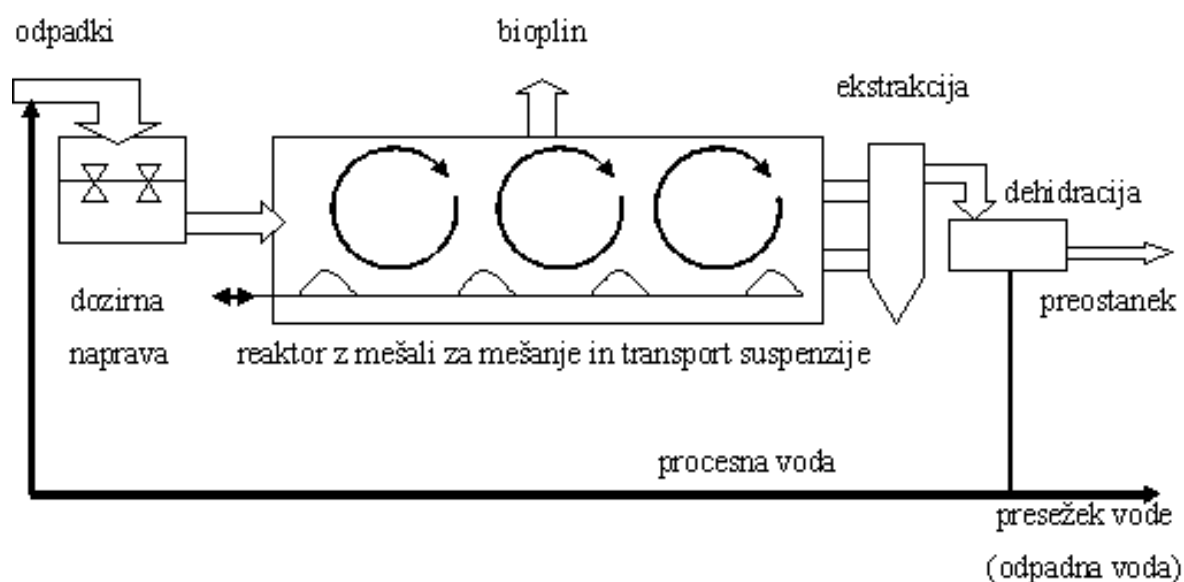
Kontejnerske posode oziroma reaktorji so lahko povezani v proces:

- Kontinuirno ali
- šaržno.

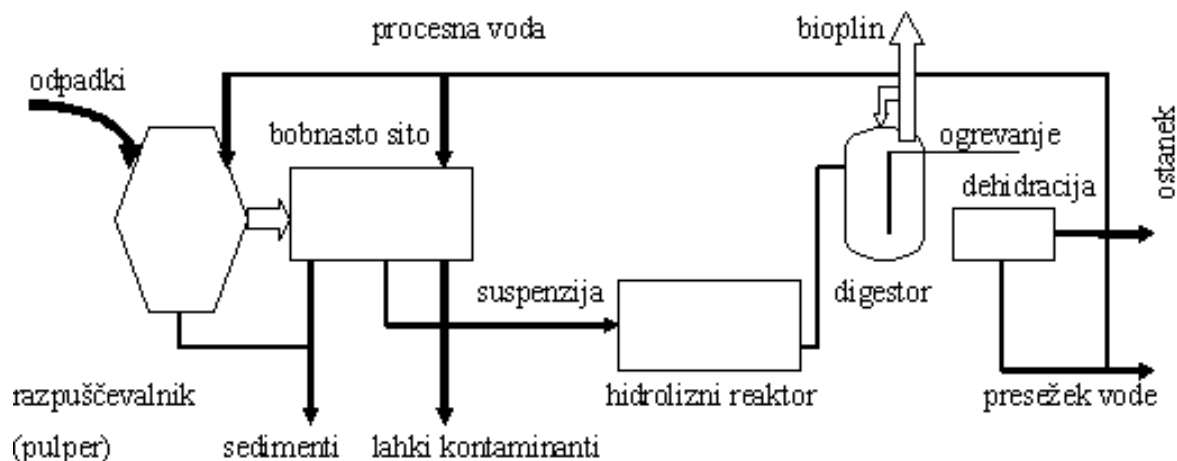
Kontinuirni postopek je zasnovan tako, da se v reaktor namesti ista količina substrata, kot je bila iz reaktorja vzeta že predelana. V teh reaktorjih je potrebno zelo natančno spremljanje razgradnje. Količina mikroorganizmov se ne spreminja, ker je zagotovljena stalnost in enakomernost procesnih pogojev. Kakovost produkta pri tem postopku je bolj ali manj konstantna. Trajanje procesa je med 10 in 30 dni.

Šaržni reaktorji so primerni za optimalno razgradnjo tudi, ko se spreminjajo lastnosti substrata, ker se pred vsakim polnjenjem kontejnerske posode lahko preverijo pogoji razgradnje za vsako šaržo posebej. V substrat vsake šarže se primeša nekaj že predelanega substrata, s čimer se v nov substrat vnesejo mikroorganizmi, kar pospeši postopek razgradnje na 5 do največ 15 dni. Količina mikroorganizmov med postopkom konstantno narašča. Šaržni način je primeren za predelavo manjših količin odpadkov.

Proces v reaktorju je odvisen od gibanja reaktorja in substrata. Obstajajo statični reaktorji, v katerih ni gibanja, reaktorji z mehanskim mešanjem vsebine in reaktorji s pnevmatskim mešanjem vsebine (s pomočjo bioplina) [7].



Slika 14: Prikaz kontinuiranega enostopenjskega anaerobnega reaktorja [11]



Slika 15: Prikaz šaržnega dvostopenjskega anaerobnega reaktorja [11]

#### 4.2.2 Končni produkti anaerobnega procesa biorazgradnje

Poleg zmanjšanja odpadkov na deponiji ter želje po vračanju biorazgradljivih odpadkov v snovni krogotok s pomočjo recikliranja, moramo upoštevati tudi »ekonomsko« vodilo anaerobne biorazgradnje, h kateremu težimo.

Ekonomsko gledano nas zanima predvsem produkt anaerobne biorazgradnje oziroma bioplin, ki je sestavljen predvsem iz metana in je zato zelo dragocen, vsestransko uporaben energent. Poleg metana se v bioplinu v večji količini pojavlja tudi žveplovodik, ki je zaradi korozivnosti nezaželen. Žveplovodik nastaja pri pogojih znižane pH vrednosti, kar je pogost primer pri enostopenjskih kontinuirnih reaktorjih. Pri dvostopenjskih reaktorjih, ki omogočajo ločene faze vrenja, pa je prisotnost žveplovodika manjša, zato je končni produkt (bioplin) kakovostnejši. V bioplinu se lahko pojavijo tudi silicijeve spojine, ki jih je prav tako treba odstraniti. Energetska vrednost pridelanega bioplina je odvisna od deleža metana in velja [11]:

$$\text{kurilna vrednost (Hv)} = 23 \text{ MJ/Nm}^3 \text{ ali vsebnost } 6,38 \text{ kWh}$$

pod pogojem, da je:

- zagotovljen vsaj 65 % delež metana v bioplinu in
- $\text{Nm}^3$  je normalni kubični meter plina pri  $15^\circ\text{C}$  in tlaku  $1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ .

Kurilna vrednost (Hv) pri zgoraj navedenih pogojih je enakovredna:

- 2,4 kWh električne energije in
- 2,9 kWh toplotne energije (ogrevanje),
- ostalo so izgube.

Preglednica 4: Presnova organskih snovi in izkoristek bioplina [6]

Organske snovi	C/N razmerje	Suha snov (% ss)	Organska suha snov (% ss <sub>org</sub> )	Stopnja razgradnje (% ss <sub>org</sub> )	Stehiometrični izkoristki bioplina (CO <sub>2</sub> + CH <sub>4</sub> ) iz razgrajene organske snovi (m <sup>3</sup> n/kgss <sub>org</sub> )
----------------	--------------	------------------	---	---	--

## 1. Osnovne substance

Beljakovine	3,4 - 4,7	100 %	100 %	70 - 90 %	0,6 - 1,2
Masti/olja	-	100 %	100 %	> 90 %	1,4
Ogljikovi hidrati	-	100 %	100 %	> 90 %	0,75

## 2. Kategorije odpadkov

Organska snov, koncentrirana iz mešanih komunalnih odpadkov	8 - 10	6 - 8 %	65 - 80 %	40 - 55 %	1,1
Mešani komunalni odpadki	40 - 55	45 - 55 %	40 - 60 %	40 - 60 %	0,9 - 0,98
Odpadki tržnic	1 - 4	9 - 11 %	75 - 89 %	50 - 60 %	0,98 - 1,02
Gnojevka	5 - 11	3 - 12 %	65 - 85 %	20 - 50 %	0,9 - 1,11
Bakterijska biomasa (sveže blato)	4	10 - 20 %	približno 80 %	55 - 65 %	0,91 - 0,96
Zeleni odrez (svež)	20	16 - 24 %	78 - 88 %	40 - 55 %	0,86
Biorazgradljivi odpadki gospodinjstev kot ločeno zbrana frakcija	10 - 25	25 - 35 %	65 - 78 %	55 - 60 %	1 - 1,2
Odpadki iz restavracij in gostiln	15 - 25	9 - 25 %	79 - 93 %	50 - 70 %	1,1 - 1,3

Metan je zelo eksploziven že pri majhnih koncentracijah (5 - 15 %), zato se bioplin praviloma ne uporablja lokalno za individualno energetska izrabo, temveč se ga skladišči v posebnih plinohramih. Zaradi velikega hrupa so bioplinski agregati nameščeni v protihrupnih prostorih.

Preglednica 5: Sestava bioplina [6]:

Sestavina	Spojina	Delež (% vol)	Povprečje (% vol)
Metan	CH <sub>4</sub>	60 - 75 %	65 %
Ogljikov dioksid	CO <sub>2</sub>	25 - 40 %	35 %
Žveplovodik	H <sub>2</sub> S	0,1 - 3 %	< 1 %
V sledovih: vodik, amonijak, dušik	H <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub>	Skupaj < 1 %	Skupaj < 1 %

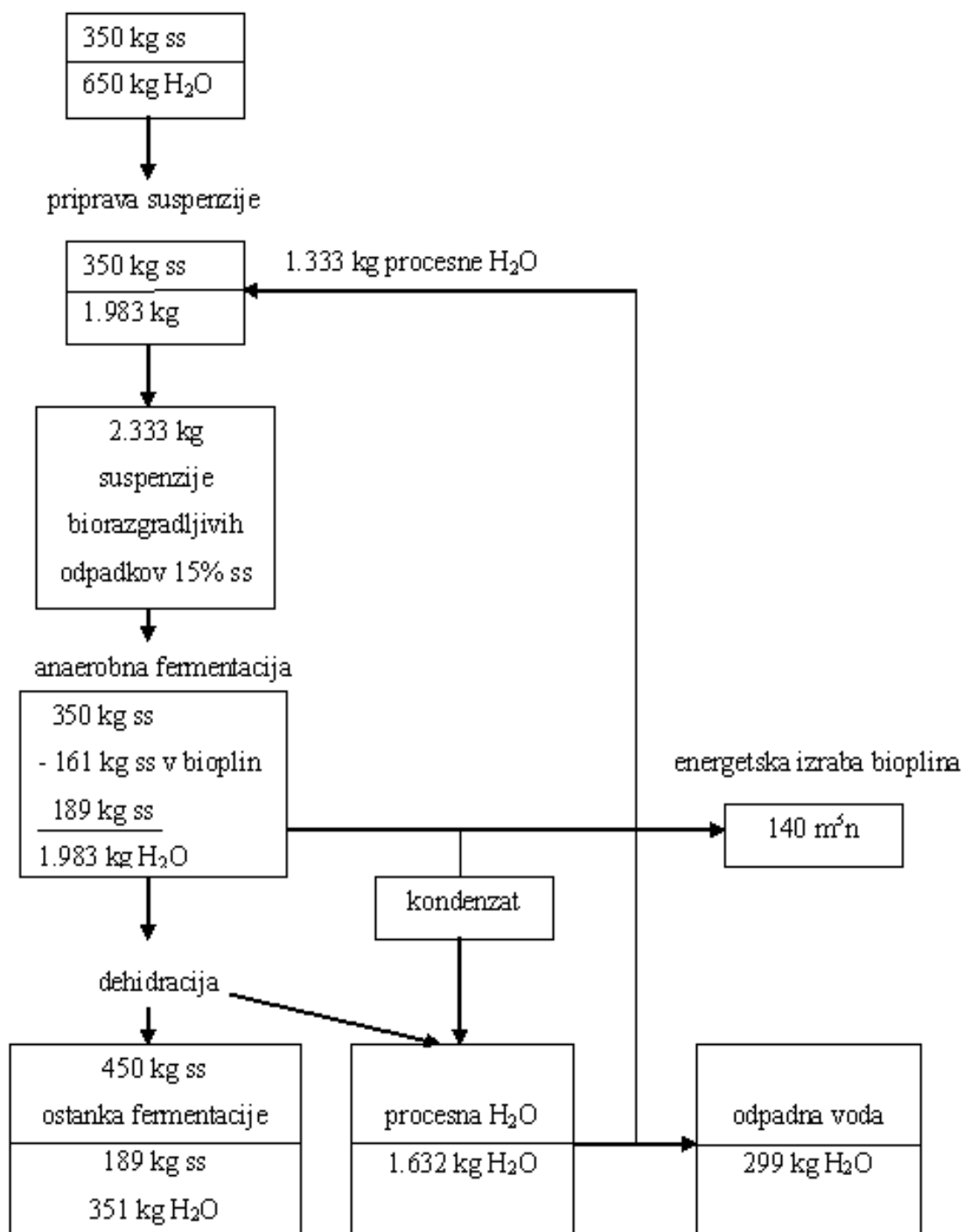
Ne glede na mokri ali suhi postopek vrenja je po končanem anaerobnem procesu potrebna dehidracija preostanka s centrifugo ali stiskalnico, razen če preostanek odpeljemo na sežig oziroma na kmetijske površine pod pogojem, da ustreza predpisom glede vsebnosti nezaželenih primesi (težke kovine). Sežig nedehidriranega odpadnega blata je mogoč samo z dovajanjem dodatne energije, medtem ko pri dehidriranem preostanku to ni potrebno, saj ima v tem primeru suh ostanek kurilno vrednost minimalno 12 MJ/kg ostanka.

V kmetijstvu se lahko nedehidrirani ostanek odpadnega blata, ker je zelo bogat s hranili in predvsem z rastlinam dostopnim dušikom, izkoristi za gnojenje površin ob upoštevanju natančnih kontrol ostanka, podtalnice in kmetijskih produktov. Če je razgradnja potekala v mezofilnem območju (temperature do 40 °C), je potrebno ostanek pred uporabo na kmetijskih površinah še higienizirati.

Postopki anaerobne razgradnje biorazgradljivih odpadkov so zahtevnejši od aerobnih, ker se uporablja bolj dovršena in kompleksna tehnologija, zato so ekonomsko upravičeni pri količinah od 5000 t bioloških odpadkov naprej. Izjemno pomembna je tudi predpriprava odpadkov, od katere je odvisna kakovost ostanka blata, v katerem se pogosto nahajajo težke kovine. Po koncu procesa je potrebno produkt še higienizirati z aerobnim procesom ter izboljšati pH vrednost, kar povzroča dodatne stroške. Čeprav anaerobni postopki zahtevajo manj prostora in krajša časovna obdobja, so praviloma vezani še za aerobne – kompostiranje.

## Vstopne količine

1.000 kg biorazgradljivih odpadkov



Slika 16: Masna bilanca anaerobne fermentacije, kjer je 35% suhe snovi v kateri se nahaja 85% organske substance, stopnja anaerobne biološke razgradnje je 55% [11]





Slika 17: Čistilna naprava Vrhnika



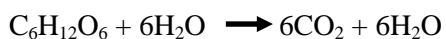
Slika 18: Bazen za čiščenje odpadne vode na ČN Vrhnika



Slika 19: Dehidrirano blato iz ČN Vrhnika

#### 4.3 Aerobni proces biorazgradnje

Aerobni proces je podoben dihanju, kar lahko prikažemo s kemijsko formulo, iz katere je razvidno prehajanje glukoze v ogljikov dioksid in vodo [20]:



oziroma z naslednjo formulo, ki prikaže, da aerobni procesi potekajo ob dotekanju zraka:



Aerobni način biorazgradnje je najenostavnejši, ker je spontan, poteka ob prisotnosti zraka in naravnih mikroorganizmov.

S tem načinom predelave biorazgradljivih odpadkov najlažje dosežemo stabilizacijo bioloških odpadkov, količinsko jih zmanjšamo in predelamo v naraven in uporaben produkt – humus.

Humus je naravna (amorfn) in stabilna materija, njegova prisotnost v naravi pa je odločilnega pomena, saj vsebuje naslednje elemente:

- P (fosfor),
- N (dušik),
- S (žveplo),
- Cu (baker),
- Fe (železo),
- Ni (nikelj),

ki so potrebni za rast živih organizmov, oziroma poenostavljeno, humus je najboljše in najkvalitetnejše naravno gnojilo.

V naravi humus nastane kot produkt razgradnje rastlinske in živalske biomase s pomočjo naravnega kroženja snovi. Ima izredno sposobnost za stabilizacijo pH vrednosti v tleh, ker je dober ionski izmenjevalec. Porožna struktura omogoča lahko prehajanje zraka, kar pospešuje aerobne procese, hkrati pa veže vodo, kar preprečuje erozijo tal.

Humus najlažje opišemo kot ostanek lignina, ki je prisoten v rastlinskih odpadkih. Huminske kisline imajo zelo podobno kemično strukturo kot molekule lignina, zato del humusa ostane tak tudi v naravi.

Lahko pa humus opišemo tudi kot produkt metabolizma mikroorganizmov (streptomicet), ker nekateri organizmi tvorijo posebna barvila in posebna zaščitna sredstva (antibiotike), ki imajo aromatično strukturo, torej osnovno strukturo, ki jo ima humus. Njihova molekularna teža pa je mnogo nižja, a le težko razpadejo pod vplivom drugih mikroorganizmov. Prav zato se predpostavlja, da velik del humusa nastane po tej poti, to je zaradi delovanja mikroorganizmov, in da je polimerizacija barvil in antibiotikov del metabolizma, ki poteka v zemlji in na različnih deponijah, kjer so prisotni biorazgradljivi odpadki [12].

Aerobni proces biorazgradnje se izvaja šaržno:

- V kupu,
- gredi in
- zaprti komori,

ali kontinuirano:

- V stolpu in
- rotacijski cevi.

Sam proces je sestavljen iz naslednjih faz:

- Indukcijska faza (mešanje novega organskega materiala z grobo presejanim, že kompostiranim materialom),
- mezofilna faza (30 - 40 °C),
- termofilna faza (50 - 70 °C) in
- nazaj mezofilna faza (po razpadu večjega dela biorazgradljivih odpadkov).

Čeprav anaerobni proces biorazgradnje poteka pri visokih temperaturah, je energetsko samozadosten. Energijo, ki se sprošča pri tem procesu, uporabimo za izhlapevanje dodane vode.

Na hitrost procesa in doseganje najvišje temperature vplivajo naslednji dejavniki:

- Koncentracija in sestava biorazgradljivih odpadkov,
- začetna koncentracija hidrolitičnih mikroorganizmov,
- razmerje C/N,
- vlažnost in prezračevanje organskega materiala med procesom,
- zunanja temperatura in
- vpliv drugih zunanjih dejavnikov (dež, sneg itn.)

Po naravni poti se aerobni proces biorazgradnje konča v nekaj mesecih, s sodobnim tehnološko optimiranim pristopom pa je možno dokončati proces tudi v dveh tednih.

Najbolj enostaven in poznan aerobni postopek razgradnje bioloških odpadkov je kompostiranje.

## **5 KOMPOSTIRANJE**

### **5.1 Splošno o kompostiranju**

Kompostiranje je glavni aerobni tehnološki postopek, katerega produkt je humus. Ta postopek primerjamo z nastankom humusa v naravi. Lahko ga izvajamo v zaprtih prostorih, kjer moramo poskrbeti za filtriranje zraka s pomočjo biofiltrov, ki odstranjujejo nezaželene mikroorganizme (plesni, spore) in neprijetne vonjave, ali na prostem. V obeh primerih moramo poskrbeti tudi za izcedne vode, ki so močno organsko obremenjene, ter vsebujejo večje količine amonijaka.

Humus ali kompost nastane kot produkt aerobne razgradnje bioloških odpadkov s pomočjo delovanja mikroorganizmov, ki pretvorijo organske snovi v:

- Huminske snovi,
- ogljikov dioksid,
- amonij,

- fosfat in
- mineralne snovi.

Kakovost komposta je odvisna predvsem od kakovosti in sestave biorazgradljivih odpadkov. Najbolj kakovosten kompost je pridobljen iz zelenega odreza, slabši komposti pa so pridobljeni iz gospodinjskih odpadkov in iz mulja iz čistilnih naprav.

Odpadki, ki jih kompostiramo [10], [7]:

- Papir (samo v primeru, da ga ni možno reciklirati): časopisni papir, kartonske škatle, pisarniški papir, računalniški papir, stranice knjig, papirnate vrečke, ovojni papir, revije, letaki,
- kuhinjski odpadki: sadje, zelenjava, jajčne lupine, lupine orehov, olupki pomaranč, limon, mandarin, banan, ananasa in drugega sadja, čajne vrečke, itn.,
- zeleni odpadki: ostanki vejevja, listja, rož, plevela, poljščin, žitaric,
- les: lubje, veje, žagovina.

Pri procesu kompostiranja sodelujejo različni mikroorganizmi:

- Plesni,
- bakterije,
- alge,
- aktinomiceti in
- enoceličarji.

Vsi ti mikroorganizmi potrebujejo zadostno količino kisika v procesu aerobne razgradnje, hkrati pa med svojim delovanjem sproščajo veliko količino energije v obliki toplote.

## **5.2 Izvajanje procesa kompostiranja**

Proces lahko razdelimo na več faz:

### **1. PREDPRIPRAVA**

Ločeno zbrane, biorazgradljive odpadke sortiramo, izločimo neželene primesi, jih drobimo, presejemo, mešamo (pripravimo homogeno zmes), vlažimo in, odvisno od načina kompostiranja, različno vgrajujemo oziroma oblikujemo.

### **2. AEROBNA RAZGRADNJA – mezofilna in termofilna faza**

Ta faza traja od 2 do 5 tednov, ko se razkrajajo lahko razkrojljive organske snovi, kot so ogljikovi hidrati in aminokisliline. Mikroorganizmi v tej fazi razgradijo organsko snov v hraniva in mineralne snovi. Začetni volumen organske snovi se v tej fazi zmanjša za več kot

polovico. Zaradi aerobnega razkroja se sproščajo zelo visoke temperature (tudi do 65°C), s čimer dosežemo higienizacijo biomase oziroma uničenje semen plevla in bolezenskih mikroorganizmov. Po končanju te faze že dobimo surovi (nepredelani) kompost.

### 3. AEROBNA RAZGRADNJA – mezofilna faza

V tej fazi, ki traja od 4 do 17 tednov, se začne preostala, težko presnovljiva, organska snov (celuloza, lignin in beljakovine) počasi razgrajevati. Pričenjajo se združevanja organskih in mineralnih snovi v humusni drobir. Temperatura počasi upada na temperaturo okolice. Na koncu te faze dobimo že zrel kompost.

### 4. FAZA DOKONČNEGA ZORENJA

Zadnja faza poteka od 10 do 50 tednov. V celotni fazi je stalna temperatura (temperatura okolice). Dokončno sintetizirajo nove huminske snovi. Če je kompostnik na prostem, se v kompost naseli mikrofavna (deževniki itn.), ki rahlja kompost in ga pretvori v popolnoma zrel kompost.

Faze pridelovanja komposta niso pogojene z uporabo komposta, saj le-tega lahko uporabimo v katerikoli fazi izvajanja procesa, če smo zadovoljili minimalne predpisane uporabne vrednosti produkta.

Literatura navaja, da se nezrel kompost lahko uporablja za izboljšanje kakovosti tal, za zatravitev degradiranih območij (rastline ga že dobro prenašajo) ter kot dodatek za različne mešanice substratov za različne kulture.

V praksi pa se redko uporablja kompost, ki ni prestal vseh faz procesa kompostiranja, razen v primerih, ko se nepredelan kompost vrača v začetne faze procesa kompostiranja kot strukturni material, prepojen z mikroorganizmi.

## 5.3 Načini kompostiranja

Načine (tehnologije) kompostiranja ločimo glede na:

- Vpihovanje zraka (vpihovanje zraka v kompostni kup, brez vpihovanja zraka v kompostni kup),
- vrste (oblike) kompostnih kupov (piramida, trapezni in pravokotni) in
- prostor, v katerem se nahaja kompostni material (na prostem, v pokritem ali zaprtem prostoru in v različnih posodah - reaktorjih).

### 5.3.1 Kompostiranje v obliki blazine

Pri tem postopku se nove plasti materiala nanašajo na stare plasti in se vsakič premešajo. Blazine so 2 m visoke, 15 m široke in 20 m dolge. V njih se izmenično vgradijo tanke plasti organske biološke snovi in zelenega odreza v obliki sendviča (potreben delež zelenega odreza je vsaj 50 %), kar omogoča lažji dostop zraka nižjim plastem, ki že fermentirajo. V tem obdobju razgradnje se dosežejo temperature od 40 do 60 °C, ko pa se blazina premeša v navaden kup, pa zraste temperatura na stopnjo, ki je potrebna za higienizacijo komposta.

Postopek je statičen in enostaven (uporablja se osnovna oprema) ter traja od 4 do 6 mesecev.

### 5.3.2 Zaprti postopek v posodi - zaboju, (kompostiranje v celici, reaktorju)

V nepredušno zaprto celico (bioreaktor), volumna 30 do 60 m<sup>3</sup>, naložimo material za kompostiranje, ki je na ta način podvržen prisilnemu vročemu razkroju (razgradnji), ki traja od 7 do 14 dni. Na dnu celice se nahajajo vpihovalci zraka, ki skrbijo za ustvarjanje aerobnih pogojev fermentacije.

Zrak moramo prečistiti z biofiltrrom, kondenz pa vračamo v sistem za ponovno vlaženje substrata, s čimer vračamo nazaj v kompost tudi mikroorganizme (cepljenje substrata).

Ta postopek je statičen, ker kompostni material ves čas postopka miruje, celice pa se polnijo šaržno.

Celoten postopek je upravljan na visokem tehnološkem nivoju (računalniško voden). Avtomatsko se uravnava količina kisika, zraka in vlage ter posledično tudi višina temperature.

Uporabljamo ga za pridobivanje manjših količin komposta.

### 5.3.3 Kompostiranje v bobnih

Postopek je dinamičen, ker material vseskozi potuje po stalno ali občasno rotirajočemu, horizontalno postavljenemu, bobnu na tak način, da nov kompostni material izrinja že obdelanega (kontinuirni proces). Mikroorganizmi se nahajajo na stenah bobna in tako vstopajo v svež kompostni material. Vrtenje bobna omogoča drobljenje, homogenizacijo in prezračevanje materiala. Izstopni zrak je potrebno prečistiti s pomočjo biofiltra. Trajanje tega postopka je samo od 24 do 36 ur, ko dobimo »surov kompost«, zato se temperatura, potrebna za higienizacijo komposta, lahko doseže samo v kasnejši fazi zorenja komposta v zunanjih kupih.

### 5.3.4 Kompostiranje v stolpih

Je prav tako dinamičen postopek, ki traja samo 1 do 2 dni. Stolpi so sestavljeni iz več etažnih celic, ki imajo na dnu vrteča se strgala. Kompostni material se vnaša v najvišje ležečo celico. Mešalo obrača in usmerja material k centralni odprtini, skozi katero pada v nižjo celico in tako naprej. V stolp se dovaja

zrak, ki omogoča termofilni proces, s katerim dosežemo higieniziran kompost. Slabost takšnega kompostiranja je pogosto zagozden material v stolpu.

#### 5.3.5 Orgaver postopek

Ta poenostavljen postopek je bil razvit šele v letih 1990 in 1991 in se uporablja v mobilnih napravah za kompostiranje, ki so gnane z lastnim agregatom na notranje izgorevanje, zato je uporaba tovrstnih mobilnih naprav dobrodošla predvsem tam, kjer ni možnosti dobave električne energije. V napravi se nahaja vertikalno postavljen polž, ki trga, reže in drobi material. Sekanje, drobljenje, mletje, gnetenje in homogeniziranje organske mase je združeno v en sam postopek. Kompostno mešanico indirektno segrevamo z odpadno toploto izpušnih plinov pogonskega agregata, ki doseže od 30 do 40 °C, s tem pa skrajšamo celotni postopek fermentacije in dosežemo izhlapevanje odvečne vlage.

#### 5.3.6 Brikollare postopek

Je zelo redko uporabljen statičen način kompostiranja. S posebno stiskalnico kompostni material komprimiramo v stiskance dimenzij 20 x 30 x 15 cm. Ob tem se izloča voda, kar omogoča lažji dostop zraka do mikroorganizmov v notranjost kompostne mase. Slabost komprimiranja je preveliko izločanje vode zaradi česar se skrajša proces fermentacije, ki se popolnoma ustavi v 4. tednu. Na površju stiskancev se običajno pojavi plesen, ki kot biofilter preprečuje emisijo neprijetnih vonjav v okolje. Po končani fermentaciji stiskance zdrobimo v brikete in jih pustimo dozoreti v zrel kompost.

#### 5.3.7 Kompostiranje v piramidah

Najbolj poznan, razširjen, uporabljan in tehnološko dodelan postopek kompostiranja je kompostiranje v piramidnih kupih. Traja od 12 – 14 tednov. Omogoča najboljše razmerje med ekonomičnostjo, učinkovitostjo in kakovostjo končnega produkta, hkrati pa s tem postopkom lahko predelamo največje količine biorazgradljivih odpadkov.

Zaradi enostavnosti, nizkih investicijskih vlaganj, kakovosti končnega produkta, možnih variacij vstopnih količin, dobre kontrole celotnega procesa, se v tej nalogi še posebej osredotočam na ta način kompostiranja.



## 6 ZNAČILNOSTI, TEHNOLOGIJA IN ZAHTEVE KOMPOSTNE PIRAMIDE

V tem delu naloge sem uporabil nekaj gradiva iz literature, večinoma pa iz prakse oziroma terena. Tukaj se moram še posebej zahvaliti podjetju Saubermacher Slovenija d.o.o., Vrhnika, ki so mi posredovali podatke za ravnanje z biorazgradljivimi odpadki v svoji kompostarni CRO Vrhnika.

### 6.1 Predpriprava kompostnega materiala

Ločeno zbrane biorazgradljive odpadke, namenjene kompostiranju, se sprejema v sprejemni hali ali na odprtem platoju. Bolj ugoden sprejem odpadkov je v zaprti hali, ker nam omogoča zaježitev neugodnih emisij slabega zraka in neprijetnih vonjav (zrak se prečiščuje skozi biofilter). Sprejemna zaprta hala pa hkrati še omogoča bolj kontroliran proces kompostiranja iz vidika enakomernosti temperature in vlage ter kvalitete nadaljnje predelave.



Slika 20: Zunanost hale za sprejem kompostnega materiala (kompostarna CRO Vrhnika)



Slika 21: Notranjost hale za sprejem kompostnega materiala (kompostarna CRO Vrhnika)



Slika 22: Zeleni odrez za strukturni material (kompostarna CRO Vrhnika)

Kompostna šarža je sestavljena iz zmletih strukturnih (zeleni odrez) in preostalih biorazgradljivih odpadkov v razmerju 1 : 3. Odpadno blato in drobljeni lesni odpadki mešajo v razmerju 2 : 1, medtem, ko za les in zelene odpadke razmerje ni pomembno. Strukturni material je potreben za kroženje zraka v kasnejši kompostni piramidi, saj le tako zagotovimo aerobni proces in dobro delovanje mikroorganizmov. Minimalna velikost delcev je 5 cm, razen lubja in žagovine, ker ti delci ohranijo dobro strukturo tudi pri manjših velikostih. Velikost delcev ne sme biti prevelika, saj morajo

mikroorganizmi razgraditi preveliko površino, kar podaljša proces razgradnje. Za drobljenje in mletje se uporablja poseben stroj «VILLIBALD».



Slika 23: Mobilni drobilnik VILLIBALD MZA 4600 (kompostarna CRO Vrhnika)



Slika 24: Drobljenje kompostnega materiala (kompostarna CRO Vrhnika)

Mešanici vhodnega materiala dodajamo še substrat v razmerju med 5 in 15 % glede na celotno maso posamezne šarže. To je že kompostiran material, prepojen z mikroorganizmi, ki je ostal po sejanju s siti velikosti 30 mm (prvo sejanje) in 10 mm (drugo sejanje) ter tako stalno kroži v procesu kompostiranja. Dodaja se le primanjkljaj, ki nastaja zaradi izničenja substrata skozi več ciklov.

Substrat se skladišči ločeno ter se ga po potrebi istočasno melje z preostalimi biorazgradljivimi odpadki, ki se vgrajujejo v kompostno piramido.

Mešanje različnih vrst biodpadkov je potrebno zaradi C/N faktorja, ki mora imeti vrednost 12 za dobro rast mikroorganizmov v kompostni piramidi [13]. Mikroorganizmi za hranjenje potrebujejo dušik, da pa bi ga lahko presnovili potrebujejo ogljik. Biorazgradljivi odpadki, ki jih uporabljamo za kompostiranje vsebujejo različne vsebnosti ogljika in dušika, kar nam prikaže naslednja razpredelnica.

Preglednica 6: Razmerja med C in N v različnih snoveh, uporabljenih pri kompostiranju [14]:

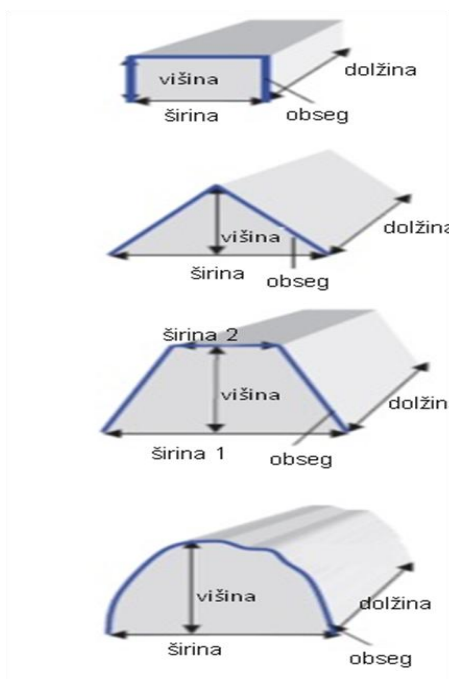
SNOV	C/N	SNOV	C/N
Živalski urin	0,8	Kuhinjski odpadki	15
Sušena kri	2	Vejjice	40
Kokošji gnoj	8	Listje	50
Svinjski gnoj	8	Ržena in ovsena slama	60
Goveji gnoj brez slame	10	Pšenična in ječmenova slama	100
Ovčji gnoj	14	Praprot	45
Ostanki zelenjave	14	Papir in karton	250
Mlada trava in pleveli	20	Poltrhla žagovina	200
Stara trava in pleveli	20	Sveža žagovina	500
Goveji gnoj s slamo	20	Humus	11

Razmerje med ogljikom in dušikom (C/N) ne sme biti preveliko oziroma premajhno, ker upočasnijo razgradnjo. Preveliko razmerje C/N zavira razgradnjo, ker omejuje rast mikroorganizmov. Odvečni ogljik mora oksidirati, da se razgradnja obnovi. Premajhno C/N razmerje prav tako zavira razgradnjo, ker se pojavi amonijak, ki deluje strupeno na organizme. Ko odvečen dušik izhlapi, se zopet vzpostavi razgradnja. Razmerje C/N mora doseči končno vrednost 12, drugače se izgubi smisel uporabe komposta za izboljšanje kakovosti tal. S C/N faktorjem je povezan tudi pH faktor, vrednost pH faktorja v kompostu mora znašati med 5,5 do 8,0 [21].

Po končanem drobljenju in mletju material premešamo z nakladalko in ga prepeljemo v prostor, namenjen kompostiranju, kjer ga vgradimo v kupe piramidne oblike.

## 6.2 Konstrukcija kompostne piramide

Literatura določa različne dimenzije kompostne piramide: širina od 4 do 6 m [21] oziroma od 3 do 4 m [15] in višina največ 2 m [21] ali 2,5 m [15]. V praksi so dimenzije kompostne piramide pogojene s prostorom in tehnološko opremo, ki je v uporabi pri posamezni kompostarni.



Slika 25: Različne oblike kompostnih piramid [9]

Kompostarna Vrhnika vgrajuje kompostni material v piramide širine 6 m, višine 2,5 m in dolžine 30 m.



Slika 26: Kompostna piramida (kompostarna CRO Vrhnika)

Podlaga, na katero se vgrajuje kompostna piramida, je praviloma betonska. Kompostni material se vgrajuje v obliki piramidnih kupov na kontinuirno betonsko ploščo, ki ima naklon 3 % zaradi odtekanja izcednih vod, ki se zbirajo v zbiralniku in se uporabljajo za vnovično vlaženje piramid. V betonsko podlago so vgrajene prezračevalne cevi, ki lahko dovajajo ali izsesavajo zrak. Redko se tovrstno kompostiranje opravlja direktno na zemljo (kmetije, daleč od naselij), ker se v tem primeru kompostne piramide ne zračijo in ne obračajo, zato v nekaterih delih kompostnega materiala prihaja do anaerobne fermentacije. Sproščajo se neprijetne vonjave, izcedne vode pa brez prečiščevanja odtekajo v zemljo.

Na začetku procesa kompostiranja, ko se želi čimprej doseči termofilna faza fermentacije, se uporablja popolnoma zaprt sistem kompostne piramide, ki se še imenuje sistem intenzivnega zorenja. Odpadki se nakladajo v tunel na tak način, da se po tleh tunela razporedijo od ene do druge stranice ter največ do 2 m v višino. Na Vrhniki uporabljajo tunele, dolge 30 m in široke 6 m. Višina na najvišji točki tunela znaša 3,1 m. Koristni volumen posameznega tunela je  $210 \text{ m}^3$ , kar ob upoštevanju povprečne gostote odpadkov znaša 189 t odpadkov/tunel.



Slika 27: Kompostna piramida v tunelu – intenzivno zorenje (kompostarna CRO Vrhnika)

### **6.3 Dovajanje zraka v kompostno piramido, temperaturna območja in vlažnost**

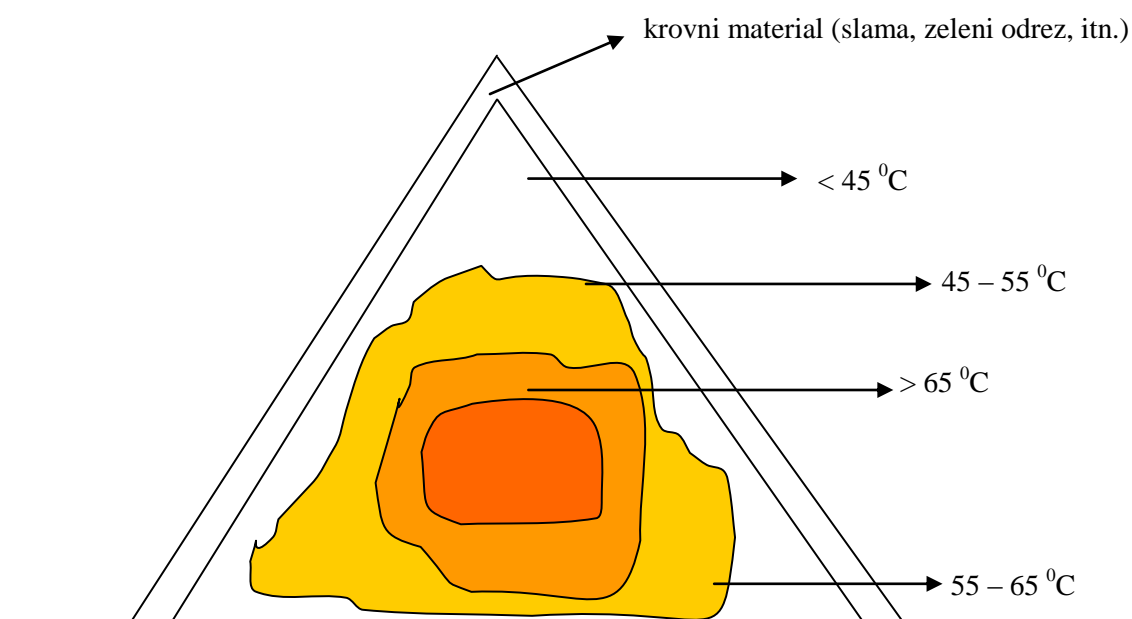
Zunanja površina zavzema do 40 % celotne prostornine piramide, kar ima za posledico nezadostno doseganje temperature, potrebne za higienizacijo komposta (uničenje patogenih organizmov in semen plevela), v tem delu kompostne piramide. Zaradi tega je potrebno zagotoviti zadostno količino zraka v kompostno piramido, kar lahko dosežemo s pomočjo obračanja piramidnega kupa ali/in z dodatnim izsesavanjem oziroma vpihovanjem zraka.

#### **6.3.1 Dovajanje zraka z obračanjem piramidnega kupa**

Tako na zelo enostaven način pridobimo zelo kvaliteten kompost v zelo kratkem času. Ne potrebujemo veliko vlaganj v tehnologijo, ker pri obračanju kupov material še dodatno homogeniziramo. Pri obračanju kupov se meša suhi in mokri del komposta, s čimer se nadomešča izgubljena vlaga, hkrati pa v vse dele kompostnega materiala dostopa svež zrak. Kompostni material in vlaga določata čas obračanja piramidnega kupa, vendar literatura določa časovna izhodišča za obračanje kupov v primeru zmletega kompostnega materiala s strojnim drobilcem [15]:

- Med fazo predrazkroja (6 - 10 tednov): 2 do 3 obračanja in
- med fazo po razkroju (6 - 10 tednov): 1 do 3 obračanja.

V praksi je slika drugačna. Pri obračanju se običajno sprošča neznosen smrad, proces je slabo kontroliran, dosežene temperature pa niso zadostne za higienizacijo komposta. Ker ni zagotovljen konstanten dotok kisika, kompost postane skoraj suh ter se pri obračanju sproščajo v zrak emisije glivičnih spor, kar je lahko nevarno za vse, ki so v stiku s procesom razgradnje [13].



Slika 28: Temperaturna območja v kompostni piramidi brez dovoda zraka [13]

### 6.3.2 Sistem z izsesavanjem zraka

V tunelskem sistemu intenzivnega zorenja se uporabljajo izsesovalni ventilatorji, ki skozi perforirane cevi, nameščene v betonsko podlago, vlečejo zrak iz notranjosti hale skozi kompostni kup. Zrak, ki potuje z vrha proti dnu kompostne piramide in skozi perforirane cevi, konča v biofiltru. S tem načinom dovajanja zraka (podtlačno) v kompostno piramido dosežemo boljše prezračevanje spodnjega dela piramide in posledično višja temperaturna območja, saj podtlak povzroča dotok zraka iz stranskih delov piramide. Vlaženje kompostne piramide se izvaja računalniško z razpršilci, nameščenimi pod stropom tunela.



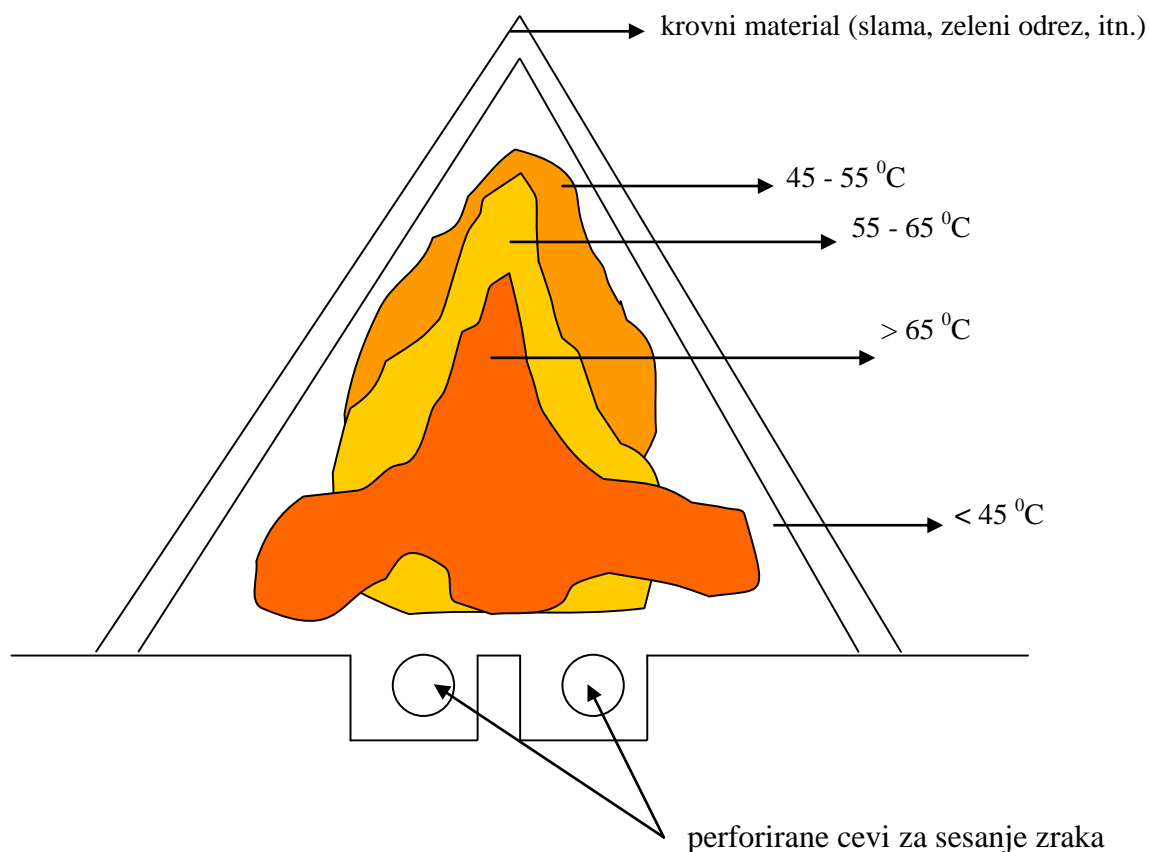


Slika 29: Perforirane talne cevi za izsesavanje oziroma vpihovanje zraka (kompostarna CRO Vrhnika)

Ta sistem uporabljamo v fazi intenzivne fermentacije kompostnega materiala, ker nam omogoča najboljšo kontrolo. V tej fazi je izredno povečano oddajanje slabega vonja, kar je najlažje rešljivo z izsesavanjem zraka in s prečiščevanjem le-tega skozi biofilter. Temperaturo v kompostnih piramidah spremljamo s sondami, ki so nameščene 30 cm pod površino, v sredici in najmanj 30 cm nad podnožjem. V praksi se doseže oziroma preseže temperatura 65 °C:

- V poletnem času drugi ali tretji dan in
- v zimskem času četrti do šesti dan.

Po dosegu temperature, potrebne za higienizacijo komposta (65 °C), se poveča dotok svežega zraka v kompostno piramido, ki prične ohlajati kompostni material.



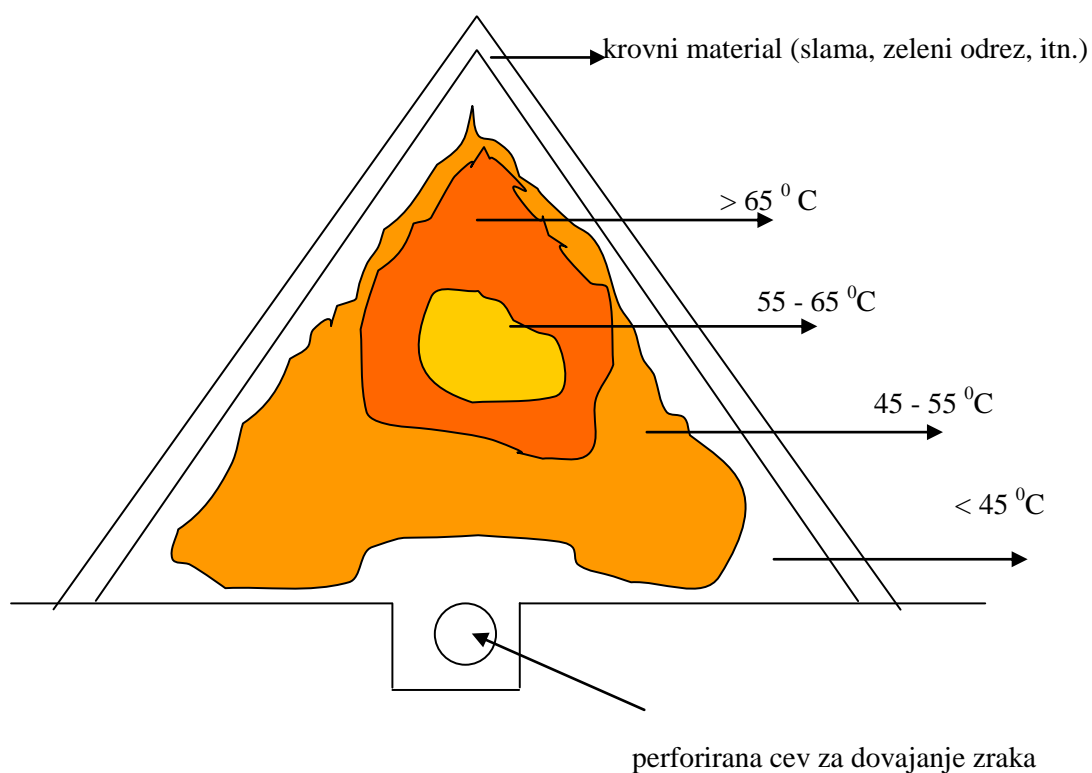
Slika 30: Kompostna piramida s sesanjem zraka [13]

### 6.3.3 Sistem z vpihovanjem zraka

Po končani fazi intenzivne fermentacije kompostnega materiala, ki traja 31 dni, se nastali nezorjeni kompost prestavi iz tunelov v zorilnico, ki je odprtega tipa (betonska plošča, pokrita s streho). Kompostni material se premeša z mobilnim mešalnikom komposta »JENZ« in vgradi v piramidne kupe.

V odprti zorilnici se proti koncu zorenja komposta zrak dovaja z vpihovanjem zraka (nadtlačno) v kompostno piramido s pomočjo perforiranih cevi, ki so nameščene v betonsko ploščo, na katero je postavljena kompostna piramida. Ker kompost ne oddaja več slabega vonja, ni potrebno prečiščevanje zraka skozi biofilter. Zaradi vpihovanja zraka v piramidni kup se najvišje temperature pojavijo v zgornjem delu piramide, saj vpihan zrak pri vstopu ohlaja kompostni material.

Vlažnost materiala se ugotavlja z otipom po principu »mokre pesti«. Če je kompostni material presuh, se ga vlaži z ročnimi razpršilci vode.



Slika 31: Kompostne piramide z dovajanjem zraka [13]



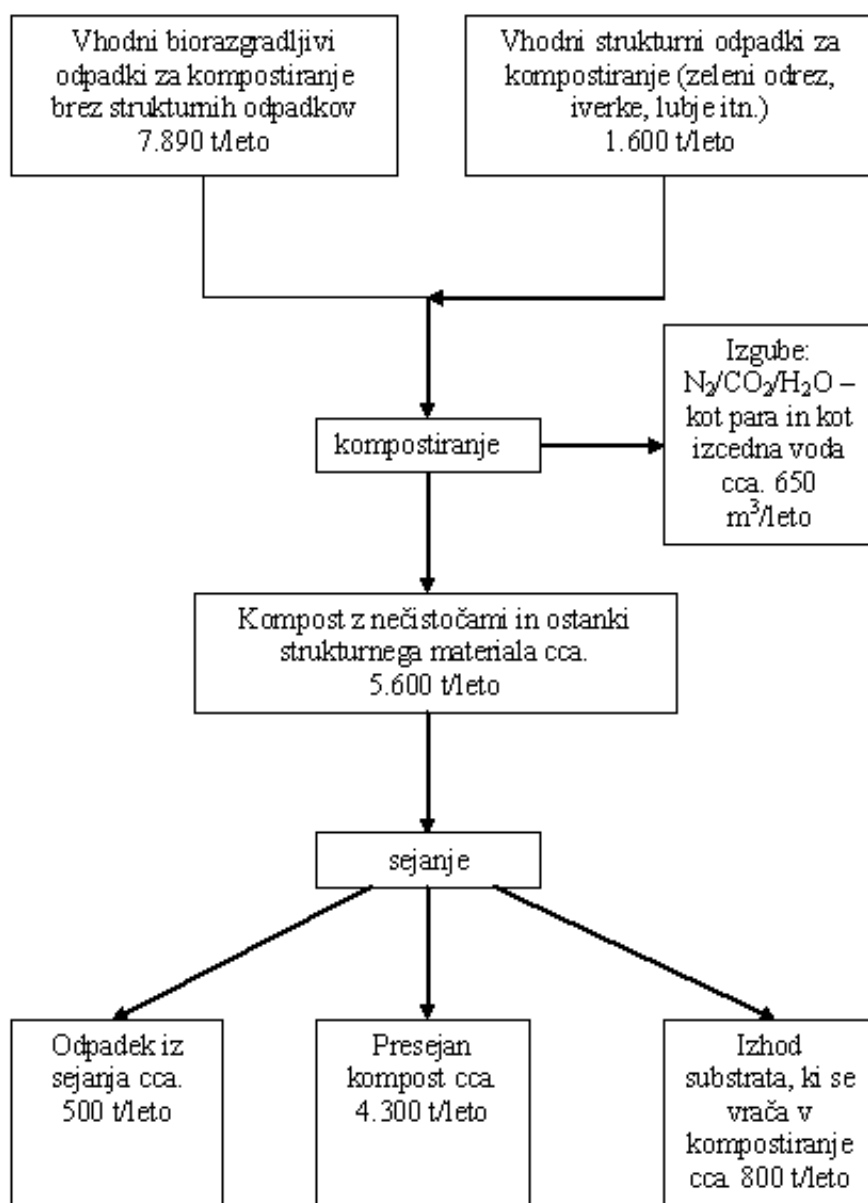
Slika 32: Mešanje kompostnega materiala z mobilnim mešalnikom komposta »JENZ MU 2000 D«  
(kompostarna CRO Vrhnika)

## **7 KONČNA OBDELAVA IN UPORABA KOMPOSTA**

### **7.1 Higienizacija in končna obdelava komposta**

Uredba [15] predpisuje, da je higienizacija komposta dosežena šele, ko je celotni kompostni material deset dni kontinuirno merjen, izpostavljen konstantni temperaturi nad 65 °C za najmanj tri dni ali 55 °C za najmanj štiri dni. Če ne dosežemo higienizacije komposta, lahko material uporabimo kot substrat k novemu materialu, namenjenemu kompostiranju oziroma ga ponovno vrnemo v začetno fazo kompostiranja.

Po končanem zorenju komposta se ves kompostni material preseje z bobnastim sitom, ki deluje po principu centrifuge. Na mreži bobna ostanejo vsi delci, večji od 30 mm (največ je plastičnih vrečk), ki se odstranijo na trajno deponijo ali v nadaljnjo predelavo. Delci velikosti med 10 mm in 30 mm se skladiščijo in vračajo nazaj v proces kompostiranja kot substrat (strukturni material). Presejani kompost se skladišči v ločeni hali.



Slika 33: Shematski prikaz predelave in predelane količine biorazgradljivih odpadkov v kompost (kompostarna CRO Vrhnika)



Slika 34: Sejanje komposta z bobnastim sitom RARWICK PRIMUS (kompostarna CRO Vrhnika)



Slika 35: Prečiščen kompost po sejanju z bobnastim sitom FARWICK PRIMUS (kompostarna CRO Vrhnika)



Slika 36: Skladiščenje presejanega komposta v ločeni hali (kompostarna CRO Vrhnika)

## 7.2 Kakovost komposta in razvrščanje po razredih

Presejani kompost je potrebno vzorčiti in opraviti analizo ustreznosti, kar narekuje uredba [15].

Kompostu ali digestatu se določi prvi ali drugi kakovostni razred skladno z zgoraj navedeno uredbo (priloga 4). Če ni možna razvrstitev v nobenega od razredov se smatra, da je kompost ali digestat še vedno odpadek. Večinoma se kompost ali digestat skladišči na območju kompostarne ali bioplinarne v primernih skladiščih.

## 7.2.1 Predpisani kakovostni razredi komposta ali digestata

V nadaljevanju je prikazana Priloga »4« za razvrščanje komposta ali digestata po razredih [15]:

Preglednica 7: Mejne vrednosti parametrov za uvrstitev komposta v kakovostni razred [15]

Parameter	Enota	mejne vrednosti za kompost	
		1. kakovostni razred	2. kakovostni razred
Kadmij (Cd)	[mg/kg] s.s.	15	3
Celotni krom (Cr)	[mg/kg] s.s.	100	250
Baker (Cu)	[mg/kg] s.s.	100	500
Živo srebro (Hg)	[mg/kg] s.s.	1	3
Nikelj (Ni)	[mg/kg] s.s.	50	100
Svinec (Pb)	[mg/kg] s.s.	120	200
Cink (Zn)	[mg/kg] s.s.	400	1800
Policiklični aromatski ogljikovodiki (PAH16)*	[mg/kg] s.s.	6	6
Poliklorirani bifenili (PCB7)**	[mg/kg] s.s.	2	1
Organska snov	% mase s.s.	> 15	> 15
Biološka stabilnost (AT4)	[mg O <sub>2</sub> /g] s.s.	< 15	< 15
Semena in vegetativni reproduktivni deli plevela	[št./l]	≤ 2	≤ 2
Določevanje učinka izboljševalcev tal in rastnih substratov na kalitev in rast rastlin	[%]	15 % m/m ali 25 % (v/v) komposta: sveže rastlinske mase (SRM): Š 100 % od kontrolnega substrata, kaljivost: Š 95 %, zamik kaljivosti: 0 dni 30 % m/m ali 50 % v/v komposta: SRM: Š 90 % od kontrolnega substrata, kaljivost: Š 90 %, /	



		zamik kaljivosti: 0 dni	
Trdni delci iz stekla, plastike ali kovine, večji od 2 mm	[%] mase s.s.	< 0,5	< 2
Mineralni trdni delci, večji od 5 mm	[%] mase s.s.	< 5	< 5
Salmonella	[odsotnost v 25 g] sveže snovi	Ni najdeno:0	Ni najdeno:0
Escherichia coli	[CFU ali MNP/1 g] sveže snovi	1000	1000

Preglednica 8: Mejne vrednosti parametrov za uvrstitev digestata v kakovostni razred [15]

Parameter	Enota	1. kakovostni razred		2. kakovostni razred
		Mejne vrednosti za digestat z manj kot 20 % suhe snovi	Mejne vrednosti za digestat vec ali enako 20 % suhe snovi	Mejne vrednosti za digestat z vec ali enako 20 % suhe snovi
Kadmij (Cd)	[mg/kg s.s.]	25	15	3
Celotni krom (Cr)	[mg/kg s.s.]	100	100	250
Baker (Cu)	[mg/kg s.s.]	200	200	500
Živo srebro (Hg)	[mg/kg s.s.]	1	1	3
Nikelj (Ni)	[mg/kg s.s.]	50	50	100
Svinec (Pb)	[mg/kg s.s.]	120	120	200
Cink (Zn)	[mg/kg s.s.]	400*	400	1800
Policiklični aromatski ogljikovodiki (PAH16)**	[mg/kg s.s.]	6	6	6

Poliklorirani bifenili (PCB7)***	[mg/kg] s.s.	2	2	1
Organska snov	[%] mase s.s.	> 15	> 15	> 15
Biološka stabilnost (KMK)**** (ocetna in propionska)	[mg/l]	< 300	< 100	< 300
Določevanje učinka izboljševalcev tal in rastnih substratov na kalitev in rast rastlin	[%]	15 % m/m ali 25 % (v/v) digestata: sveže rastlinske mase (SRM): Š 100 % od kontrolnega substrata kaljivost: Š 95%, zamik kaljivosti: 0 dni; 30 % m/m ali 50 % v/v digestata: SRM: Š 90 % od kontrolnega substrata, kaljivost: Š 90 %, zamik kaljivosti: 0 dni	15 % m/m ali 25 % (v/v) digestata: sveže rastlinske mase (SRM): Š 100 % od kontrolnega substrata kaljivost: Š 95 %, zamik kaljivosti: 0 dni; 30 % m/m ali 50 % v/v digestata: SRM: Š 90 % od kontrolnega substrata, kaljivost: Š 90 %, zamik kaljivosti: 0 dni	/
Trdni delci iz stekla, plastike ali kovine, večji od 2 mm	[%] mase s.s.	/	< 2	< 2
Mineralni trdni delci, večji od 5 mm	[%] mase s.s.	/	< 5	< 5

Semena in vegetativni reproduktivni deli plevela	[št./l]	Š 2	Š 2	Š 2
Salmonella	[odsotnost v 25 g] sveže snovi	ni najdeno:0	ni najdeno:0	ni najdeno:0
Escherichia coli	[CFU ali MNP/1 g] sveže snovi	1000	1000	1000

### 7.2.2 Prvi kakovostni razred komposta ali digestata

Pridobljeni kompost, ki spada v prvi kakovostni razred, se uporablja predvsem za:

- Prodajo na prostem trgu,
- urejanje okolice in
- izboljšanje tal v kmetijstvu.

Pri uporabi komposta prvega kakovostnega razreda moramo upoštevati zakonske omejitve mejnih vrednosti vnosa nevarnih snovi v zemljo preko komposta ali odpadnega blata iz čistilnih naprav, ki so podane v uredbi [15].

### 7.2.3 Drugi kakovostni razred komposta ali digestata

Ista uredba zakonsko ureja tudi uporabo komposta drugega kakovostnega razreda, ki je prepovedana na kmetijskih površinah, vodovarstvenih območjih, v gozdovih, otroških igriščih in kraških območjih.

Drugi kakovostni razred komposta se lahko uporablja za gnojenje okrasnih rastlin v vrtnarijah in drevesnicah, izboljšavo tal v parkih, zelenicah, športnih površinah ter obnovo kamnolomov, industrijskih površin, odlagališč odpadkov in območij prometne infrastrukture.

Če kompost ali digestat ne spada v prvi ali drugi razred ga ne smemo uporabiti kot produkt, ker ima še vedno lastnosti odpadka, zato ga zopet vrnemo v proces kompostiranja.



Slika 37: Zastirka iz komposta na odlagališču Tojnice, Vrhnika (kompostarna CRO Vrhnika)



Slika 38: Zastirka iz komposta na odlagališču Tojnice, Vrhnika (kompostarna CRO Vrhnika)

## **8 PRIMERJAVA KOMPOSTA IN STABILIZIRANEGA BLATA IZ ČISTILNE NAPRAVE**

### **8.1 Mejne vrednosti vnosa snovi v zemljo**

S predelavo biorazgradljivih odpadkov želimo na čim bolj naraven način (nesintetičen) vrniti v zemljo glavne hranljive snovi, ki so nepogrešljive za rast. Te snovi so dušik, fosfor, kalij in mikroelementi.

V procesu predelave biorazgradljivih odpadkov je nemogoče zagotoviti nekontaminirane vhodne odpadne biofrakcije, ker so v večini primerov pomešane z nevarnimi snovmi.

Največjo težavo predstavljajo težke kovine, kot so kadmij in živo srebro, ki so v večjih koncentracijah izredno strupene.

Kontaminacija biofrakcij odpadkov s težkimi kovinami se najbolj pogosto dogaja preko odpadnih baterij in akumulatorjev (kompostarna CRO Vrhnika). Še večje težave z onesnaženostjo s strupenimi snovmi in težkimi kovinami opazamo pri predelavi odpadnih voda in mulja v čistilni napravah.

V uredbi [15] so predpisane mejne vrednosti vnosa nevarnih snovi v zemljo preko komposta ali odpadnega blata iz čistilnih naprav.

Preglednica 9: Mejne vrednosti vnosa nevarnih snovi v tla [15]

Nevarna snov	(g/ha) v dveh letih
Kadmij in njegove spojine, izražene kot Cd	10
Baker in njegove spojine, izražene kot Cu	700
Nikelj in njegove spojine, izražene kot Ni	400
Svinec in njegove spojine, izražene kot Pb	600
Cink in njegove spojine, izražene kot Zn	3000
Živo srebro in njegove spojine, izražene kot Hg	10
Celotni krom	600

V zemlji moramo omejiti tudi gnojila živalskega izvora, v katerih prevladuje kalij, fosfor in dušik, ker navedeni elementi vplivajo na pH faktor v tleh oziroma na kislost tal, zato so predpisane naslednje mejne vrednosti pri vnosu gnojil živalskega izvora v tla z Uredbo o mejnih vrednostih vnosa nevarnih snovi in gnojil v tla [16]:

Preglednica 10: Mejne vrednosti za letni vnos rastlinskih hranil pri gnojenju z živinskimi gnojili [16]

Rastlinsko hranilo	Mejna vrednost letnega vnosa v [kg/ha]
Fosfor (izražen kot P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	120
Kalij (izražen kot K <sub>2</sub> O)	300

Letni vnos dušika na kmetijska zemljišča na vodovarstvenih območjih, določenih v skladu s predpisi, ki urejajo vode, na katerih je oskrbljenost z mineralnim dušikom manjša ali enaka 30 kg/ha, ne sme presegati mejnih vrednosti glede na vrsto kmetijske kulture, določenih v preglednici spodaj. Za vse ostale kmetijske kulture velja mejna vrednost 170 kg/ha.

Preglednica 11: Mejne vrednosti za letni vnos dušika na vodovarstvenih območjih [16]

Kmetijska kultura	Mejna vrednost letnega vnosa v [kg N/ha]
Ozimna pšenica, ozimna ogrščica	150
Ozimni ječmen	120
Ozimna rž, jari ječmen, oves	80
Glavnata solata	45
Kitajsko zelje	90
Repa, gorčica, oljna repica in drugi dosevki	50
Grah, bob, detelja in druge metuljnice	30

Zaradi pretiranega vnosa težkih kovin in nevarnih snovi v tla se donos na kmetijskih površinah lahko zmanjša do 25 %, kar je razvidno v naslednji preglednici:

Preglednica 12: Koncentracija škodljivih snovi v tleh in njihov prehod v rastlinsko tkivo [17]

Snov	Znana koncentracija, pri kateri se rast zmanjša [kg/ha]	Večanje koncentracije v rastlinskem tkivu
Svinec	300	DA
Cink	100	DA
Baker	300	-
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	90	-
Ca <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	400	DA
Karilenbenzen sulfomat	600	DA
Alkilaripoliglikol eter	3000	DA
Odpadno mineralno olje	2800	-

Zanimiva je tudi primerjava hranilnih snovi v odpadnem blatu in hlevskem gnoju, ki jo najdemo na naslednji strani:

Preglednica 13: Primerjava gnojilne vrednosti pregnitega blata in hlevskega gnoja [17]

Preračunana hranilna snov v $\tilde{\text{kg}}10\text{t}$	Neosušenega pregnitega blata, pri 10 % SB	Pregnitega blata, osušenega na ca. 30 – 40 % SB	Hlevskega gnoja pri 25 % SB
N	5 – 6	15 – 20	15 – 20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10	30	15 – 20
K <sub>2</sub> O	0,5 – 1	-	60 – 70
MgO	20 – 40	60 – 120	10 – 20
S	5 – 15	15 – 45	20 – 30
Alkalno delujoča masa, preračunana v CaO	80 – 200	200 – 500	60
Aktivna organska substanca	300 – 400	1500 – 2000	1800

## 8.2 Analiza in primerjava vzorcev komposta in odpadnega blata iz ČN

V tem delu naloge bi se hotel še posebej zahvaliti gospodu Bojanu Krpanu iz kompostarne CRO Vrhnika in gospe Mojci Vrbančič iz JP Vodovod – kanalizacija d. o. o. (Ljubljana), ki sta pomagala pri pridobivanju analiz in razlagi le-teh.

### *Analiza komposta iz kompostarne CRO Vrhnika, december 2015*

Analizo vzorca komposta, vzetega na kompostarni CRO Vrhnika, je opravil Nacionalni laboratorij za zdravje, okolje in hrano iz Maribora.

Analiziran vzorec komposta je material z naslednjimi lastnostmi:

- Vsebuje 53 % suhe snovi, ki ima vrednost pH 8,3,
- koncentracije hranil so: celoten dušik 1,79 % s.s., celoten fosfor (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 1,6 % s.s., kalij (K<sub>2</sub>O) 1,4 % s.s., koncentracija kalcija (CaO) 17 % s.s.,
- delež organske snovi je 33,4 % s.s.,
- koncentracija raztopljenega amonija 165 mg/l komposta, raztopljenega nitrata pa 190 mg/l komposta,
- nasipna gostota komposta je 681,44 g/l, stisnjena gostota pa 696,97 g/l,
- vzorec ne vsebuje vegetativnih reproduktivnih delov plevela,
- koncentracija celotnega kroma 37 mg/kg s.s., cinka 360 mg/kg s.s., kadmija 0,97 mg/kg s.s., niklja 25 mg/kg s.s., svineca 48 mg/kg s.s., živega srebra 0,21 mg/kg s.s. in

- koncentracija bakra je 110 mg/kg s.s., zaradi česar se obravnavani vzorec komposta razvrsti v drugi kakovostni razred po uredbi [15].

Preglednica 14: Rezultati analize vzorca komposta, vzetega na kompostarni CRO Vrhnika v decembru 2015 [18]

Parameter	Enota	Izmerjena vrednost	mejne vrednosti za kompost	
			1. kakovostni razred	2. kakovostni razred
Kadmij (Cd)	[mg/kg] s.s.	0,97	15	3
Celotni krom (Cr)	[mg/kg] s.s.	37	100	250
Baker (Cu)	[mg/kg] s.s.	<b>110</b>	100	500
Živo srebro (Hg)	[mg/kg] s.s.	0,21	1	3
Nikelj (Ni)	[mg/kg] s.s.	25	50	100
Svinec (Pb)	[mg/kg] s.s.	48	120	200
Cink (Zn)	[mg/kg] s.s.	360	400	1800
Policiklični aromatski ogljikovodiki (PAH16)*	[mg/kg] s.s.	1,2	6	6
Poliklorirani bifenili (PCB7)**	[mg/kg] s.s.	< 0,01	2	1
Organska snov	% mase s.s.	33,4	> 15	> 15
Biološka stabilnost (AT4)	[mg O <sub>2</sub> /g] s.s.	5,1	< 15	< 15
Semena in vegetativni reproduktivni deli plevla	[št./l]	< 2	≤ 2	≤ 2
Določevanje učinka izboljševalcev tal in rastnih substratov na kalitev in rast rastlin - SRM*** (redčitev 30 % m/m)	[%]	111	30 % m/m ali 50% (v/v) komposta: sveža rastlinska masa ≥ 100 % od kontrolnega substrata	/
Določevanje učinka izboljševalcev tal in rastnih substratov na kalitev in rast rastlin - kaljivost (redčitev 30 % m/m)	[%]	90	30 % m/m ali 50% (v/v) komposta: kaljivost ≥ 90 %; zamik kaljivosti je 0 dni	



Trdni delci iz stekla, plastike ali kovine, večji od 2 mm	[%] mase s.s.	0,21	< 0,5	< 2
Mineralni trdni delci, večji od 5 mm	[%] mase s.s.	4,4	< 5	< 5
Salmonella	[odstotnost v 25 g] sveže snovi	0	Ni najdeno:0	Ni najdeno:0
Escherichia coli	[CFU ali MNP/1 g] sveže snovi	< 100	1000	1000

### *Analiza odpadnega blata iz čistilnih naprav CČNL (Zalog), ČN Črnuče in ČN Brod*

Analiza vzorcev odpadnega blata iz ČN, ki jih upravlja JP Vodovod – kanalizacija d. o. o.:

- Vzorec blata CČNL: Letni reprezentativni vzorec peletov za l. 2014, št. dokumenta 14-13-TS/15 z dne 24. 2. 2015, Nacionalni laboratorij za zdravje, okolje in hrano, Center za okolje in zdravje, Oddelek za okolje in zdravje, Novo mesto,
- vzorec blata ČN Črnuče: Nacionalni laboratorij za zdravje, okolje in hrano, Poročilo o preskušanju, lab. št. 2016/3652. Datum: 9. 6. 2016 in Nacionalni laboratorij za zdravje, okolje in hrano, Poročilo o preskušanju, lab. št. 108 ODP/16. Datum: 27. 5. 2016,
- vzorec blata ČN Brod: Nacionalni laboratorij za zdravje, okolje in hrano, Poročilo o preskušanju, lab. št. 2016/2811. Datum: 14. 6. 2016 in Nacionalni laboratorij za zdravje, okolje in hrano, Poročilo o preskušanju, lab. št. 89 ODP/16. Datum: 14. 6. 2016.

Ob upoštevanju mejnih vrednosti iz uredb o predelavi biološko razgradljivih odpadkov in uporabi komposta ali digestata [12] in [2] za digestat z manj kot 20 % suhe snovi, več ali enako 20 % suhe snovi in več ali enako 20 % suhe snovi, lahko ugotovimo naslednje:

- Vzorec, vzet na CČNL (Zalog), ni primeren za uporabo kot produkt, saj vsebuje preveliko količino bakra (Cu) 540 mg/kg s.s. (dovoljena količina za 2. kakovostni razred je 500 mg/kg s.s.),
- vzorec, vzet na ČN Brod, prav tako spada v drugi kakovostni razred zaradi večje vsebnosti cinka (Zn) 590 mg/kg s.s. (dovoljena količina za 1. kakovostni razred je 400 mg/kg s.s.) in

- vzorec, vzet na ČN Črnuče, spada v drugi kakovostni razred zaradi večje vsebnosti cinka (Zn) 980 mg/kg s.s. (dovoljena količina za 1. kakovostni razred je 400 mg/kg s.s.).

Preglednica 15: Rezultati analize vzorcev odpadnega blata, vzeti iz ČN, ki jih upravlja JP Vodovod – kanalizacija d. o. o. (Ljubljana), v letu 2015 in 2016 [19], [20] in [21]

		ČČNL	ČN Črnuče	ČN Brod
Parameter	Enota	Vrednost	Vrednost	Vrednost
Suha snov	%	90,8	15,9	18,6
Žarilna izguba	% mase s.s.	64,5	83,3	/
Baker (Cu)	mg/kg s.s.	540	190	110
Cink (Zn)	mg/kg s.s.	920	980	590
Kadmij Cd	mg/kg s.s.	1,1	0,91	0,53
Krom – skupno (Cr)	mg/kg s.s.	110	46	38
Nikelj (Ni)	mg/kg s.s.	80	31	31
Svinec (Pb)	mg/kg s.s.	78	72	34
Živo srebro (Hg)	mg/kg s.s.	2,3	0,18	0,46
Kurilna vrednost	MJ/kg s.s.	14,43	20,52	20,69
Kurilna vrednost	MJ/kg	13,20	3,26	3,85
Klor	% (m/m) s.s.	0,11	0,043	0,048
Žveplo	% (m/m) s.s.	1,26	2,05	0,82

Zanimivi so tudi podatki o količini nastalega odpadnega blata v letu 2015 in 2016 ter število prebivalcev, ki uporabljajo posamezno ČN [19], [20] in [21]:

Preglednica 16: Prikaz količine odpadnega blata in števila uporabnikov posamezne ČN, ki jih upravlja JP Vodovod – kanalizacija d. o. o. (Ljubljana), v letu 2015 in 2016 [19], [20] in [21]

Komunalna čistilna naprava	Obdelano s	Količina blata - t SS	Teža odvečnega blata ob oddaji - t	Stopnja sušnosti ob odstranitvi - %	Število uporabnikov priključenih na KČN
CCNL	sušenje	6653,4	4222,1	90,9	266.131
ČN ČRNUČE	centrifuga	93,809	536,050	17,5	8.673
ČN BROD	centrifuga	76,966	405,080	19	8.572

CCNL-Centralna čistilna naprava Ljubljana (Zalog)

### *Primerjava analiz vzorcev komposta in odpadnega blata*

Smotno je v primerjavo vključiti tudi hranilno vrednost posameznega vzorca vseh obravnavanih snovi, ki je izražena v obliki lahko dostopnih rastlinskih hranil. Tu predvsem mislimo na fosforjev pentoksid, kalijev oksid, fosfor, dušik, kalij in gradnike, kot so kalcij in ogljik.

Ker se v analizah predmetnih vzorcev, ki jih izvajajo pooblaščen laboratoriji na podlagi uredbe [15], s katero so predpisane mejne vrednosti vnosa nevarnih snovi v zemljo preko komposta ali odpadnega blata iz čistilnih naprav, ne analizirajo hranilne vrednosti obravnavanih snovi ter pH vrednosti, sem se v tem delu obrnil na literaturo.

Preglednica 17: Vsebnost suhe in organske snovi, ogljika in dušika iz analize vzorca komposta iz kompostarne Vrhnika [22]

Vzorec	Delež suhe snovi (%)	Delež organske snovi (%)*	C (%)*	N (%)*	C/N	PH
Kompost	42,2	41,0	23,7	1,9	12,5	7,70 (H <sub>2</sub> O) 7,45 (KCl)

\*delež v suhi snovi.

Preglednica 18: Vsebnost rastlinam dostopnega P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in K<sub>2</sub>O iz analize vzorca komposta iz kompostarne Vrhnika [22]

Vzorec	K <sub>2</sub> O*	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *	P**	K**	Na**	Ca**	Mg**	Fe**	Al**
Kompost	376	462	3,92	1,01	1,0	70,5	14,3	16,7	14,1

\*mg/100g,

\*\*mg/g suhe snovi.

Preglednica 19: Analiza odpadnega blata čistilne naprave Domžale – Kamnik; št. vz. 886/00, št. 6 [23]

Parameter	Enota	Prinesen vzorec	Suha snov
Vlaga	gkg	714	-
Suha snov	gkg	286	1000
Pepel	gkg	155	541
Organska snov	gkg	131	459
Dušik – skupni	gkg	7,59	26,5
pH v KCl	-	-	6,8
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (dostopni)	mg/100g	-	382
K <sub>2</sub> O (dostopni)	mg/100g	-	105
Elementi iz HCl izvlečka pepela:			
Kalcij – Ca	gkg	20,2	70,4
Fosfor – P	gkg	5,32	18,6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	gkg	12,2	42,6
Magnezij – Mg	gkg	29,6	103
Kalij – K	gkg	0,50	1,75
K <sub>2</sub> O	gkg	0,61	2,11
Težke kovine iz razklopa z zlatotopko:			
Cink – Zn	mg/kg	943	3293
Baker – Cu	mg/kg	144	503
Kadmij – Cd	mg/kg	0,80	2,80
Krom Cr	mg/kg	347	1212
Nikelj – Ni	mg/kg	405	1415
Svinec	mg/kg	332	116

Preglednica 20: Primerjava analiziranih vzorcev

Vzorec		Kompostarna CRO Vrhnika	CČN Zalog
Parameter	Enota	Kompost (s.s.)	Blato (s.s.)
Kadmij (Cd)	mg/kg s.s.	0,97	1,1
Celotni krom (Cr)	mg/kg s.s.	37	110
Baker (Cu)	mg/kg s.s.	110	540
Živo srebro (Hg)	mg/kg s.s.	0,21	2,3
Nikelj (Ni)	mg/kg s.s.	25	80
Svinec (Pb)	mg/kg s.s.	48	78
Cink (Zn)	mg/kg s.s.	360	920
Magnezij (Mg)	g/kg s.s.	14,3*	103**
Kalcij (Ca)	g/kg s.s.	70,5*	70,4**
Kalij (K)	g/kg s.s.	1,01*	1,75**
Fosfor (P)	g/kg s.s.	3,92*	18,6**
Kalijev oksid (K <sub>2</sub> O)	mg/100g s.s.	376*	105**
Fosforjev pentoksid (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	mg/100g s.s.	462*	382**
pH	-	7,45*	6,8**
Dušik (N)	%	1,9*	2,65**
Delež organske snovi	%	41*	45,9**

\*analiza vzorca komposta iz kompostarne Vrhnika [22]

\*\* Analiza odpadnega blata čistilne naprave Domžale – Kamnik; št. vz. 886/00, št. 6 [23]

Pri primerjanju vzorcev sem se odločil za vzorec iz CČN Zalog, ker je vzorčena suha stabilizirana snov, ki je najbolj primerljiva kompostu. Iz primerjave analiziranih vzorcev lahko ugotovimo, da odpadno blato vsebuje največ težkih kovin, hkrati pa tudi največ lahko dostopnih hranilnih snovi in mineralov. Kompost prav tako vsebuje kar precej težkih kovin (nekaj manj kot odpadno blato), kar kaže na onesnaženost biofrakcij ob vходу v predelavo. Kompost ima tudi nekaj manj lahko dostopnih hranil in mineralov kot odpadno blato.

Ob boljšem separiranju in boljši čistosti biofrakcij lahko preko kompostiranja dosežemo najboljšo kombinacijo recikliranja biorazgradljivih odpadkov, v katero lahko vključimo tudi odpadno blato iz ČN, ki ga na tak način očistimo težkih kovin.

## 9 UGOTOVITVE

Ekološko razmišljanje, ohranitev narave, zmanjšanje onesnaženosti in obremenitve okolja nas silijo v zmanjševanje deponij odpadkov. Hkrati se usmerjamo v recikliranje odpadkov in njihovo vrnitev v snovni krogotok.

Ker so biorazgradljivi odpadki vsebovani v 61 % deležu vseh komunalnih odpadkov glede na maso, ter se lahko na naraven in ekološko sprejemljiv način z nezahtevnimi tehnološkimi postopki vrnejo kot ekološko sprejemljiv produkt (kompost) za izboljšanje kmetijskih ali kakršnih koli drugih površin, sem se v tej nalogi popolnoma osredotočil na obravnavo le-teh.

Tradicionalna obravnava komunalnih odpadkov, npr. deponiranje oziroma sežiganje, je čedalje manj zaželen zaradi negativnih vplivov na okolje v smislu emisij v podtalnico ali zrak. Tendencia je ohranjanje deponij v isti velikosti ali njihovo zmanjševanje, nikakor pa njihovo večanje.

Praktično vso odpadno blato, pridelano v Sloveniji, vozimo na sežig v Avstrijo. Takšno obravnavanje tovrstnih odpadkov ni smotrno iz dveh razlogov in sicer: metan, pridobljen iz odpadnega blata, ima zelo dobro kurilno vrednost, ki jo z odvozom tega odpadka v Avstrijo ne izkoriščamo, hkrati pa Republika Slovenija plačuje Avstriji za sprejem tovrstnih odpadkov. Drugi razlog pa je, da je sežig najslabša obravnava biorazgradljivih odpadkov, ker z njim uničimo ves potencial lahko dostopnih hranilnih snovi in mineralov, ki bi jih z drugačno obravnavo (kompostiranjem) vrnil naravi. Naloga se osredotoča na anaerobno in aerobno obravnavo biorazgradljivih odpadkov, čeprav je dejansko stanje takšno, da se v Sloveniji celostno posvečamo samo aerobni predelavi biorazgradljivih odpadkov. Ta se je kar dobro uveljavila, procesi predelave so dokaj enostavni, produkti pa so sprejemljivi z vidika vsebnosti težkih kovin in nezaželenih snovi.

Aerobna predelava (kompostiranje) nam omogoča ciklični proces predelave biorazgradljivih odpadkov v smislu, če je produkt neustrezen, ga lahko ponovno vrnemo v celotni proces predelave, da mu izboljšamo lastnosti.

Noben drug proces predelave biorazgradljivih odpadkov nam tega ne omogoča. Z aerobno predelavo (kompostiranjem) omogočamo tudi vključevanje anaerobne predelave biorazgradljivih odpadkov v sprejemljiv ekološki proces, saj drugače sploh ni možna stabilizacija odpadnega blata.

Če želimo uveljaviti produkte (kompost, stabilizirano odpadno blato), kot ekološko neoporečne, brez težkih kovin in nevarnih snovi, moramo ozavestiti vse deležnike v procesu nastajanja uporabe in predelave odpadkov, saj v nalogi obravnavane analize vzorcev komposta in odpadnega blata kažejo na preveliko vsebnost težkih kovin, ki so posledica nevestnih dejanj pri zbiranju in ločevanju biorazgradljivih odpadkov.

Pri primerjanju vzorcev sem se odločil za vzorec iz CČN Zalog, ker je vzorčena suha stabilizirana snov, ki je najbolj primerljiva kompostu. Iz primerjave analiziranih vzorcev lahko ugotovimo, da odpadno blato vsebuje največ težkih kovin, hkrati pa tudi največ lahko dostopnih hranilnih snovi in

mineralov. Kompost prav tako vsebuje kar precej težkih kovin (nekaj manj kot odpadno blato), kar kaže na onesnaženost biofrakcij ob vходу v predelavo. Kompost ima tudi nekaj manj lahko dostopnih hranil in mineralov kot odpadno blato.

Ob boljšem separiranju in boljši čistosti biofrakcij lahko preko kompostiranja dosežemo najboljšo kombinacijo recikliranja biorazgradljivih odpadkov, v katero lahko vključimo tudi odpadno blato iz ČN, ki ga na tak način očistimo težkih kovin.

## VIRI

- [1] ZVO-1: Zakon o varstvu okolja (UL RS, št. 39/2006), <https://www.uradni-list.si/1/content?id=72890> (Pridobljeno 8. 5. 2016.)
- [2] ZVO-1G: Zakon o varstvu okolja (UL RS, št. 56/2015), <https://www.uradni-list.si/1/content?id=122720> (Pridobljeno 8. 5. 2016.)
- [3] Uredba o odpadkih (UL RS, št. 37/2015), <http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED5368> (Pridobljeno 8. 5. 2016.)
- [4] Uredba o odlaganju odpadkov na odlagališčih (UL RS, št. 61/2011), <https://www.uradni-list.si/1/content?id=104808> (Pridobljeno 15. 5. 2016.)
- [5] Uredba o predelavi biološko razgradljivih odpadkov in uporabi komposta ali digestata (UL RS, št. 99/2013), <https://www.uradni-list.si/1/content?id=115208> (Pridobljeno 15. 5. 2016.)
- [6] Grilc, V., Husić, M., Medved, M. idr. 2005. Gospodarjenje z odpadki. Tehnologije ravnanja z biorazgradljivimi odpadki. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta: str. 4-55.
- [7] Vuk, D. 1998. Ravnanje z odpadki biološkega izvora. Kranj, Univerza v Mariboru, Fakulteta za organizacijske vede: str. 5-70.
- [8] Lapajne, T. 1999. Zakaj ljudje ne maramo ločevati gospodinjskih odpadkov, Gospodarjenje z odpadki. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta: str. 18–19.
- [9] Tavzes, R. 2016. Novosti na področju ravnanja z biološkimi odpadki. Strokovni seminar. Ljubljana, Forum media: str. 1-57.
- [10] Benedik, B. 1997. Ločeno zbiranje komunalnih odpadkov. Diplomsko delo visokošolskega študija. Kranj, Univerza v Mariboru, Fakulteta za organizacijske vede: 26 str.
- [11] Zore, J. 2015. Gospodarjenje z odpadki. Okoljski učbenik gospodarjenje z odpadki. Celje, Fit media d.o.o.: str. 73-85.



- [12] Koželj, B., Vuk D. 1987. Splošna ekologija z varstvom okolja. Maribor, Založba Obzorja: str. 5-65.
- [13] Gray, N. F. 1999. Water Tehnology, An Introduction for Scientist and Engineers. Dublin, Department of Civil, Structural and Enviromental Engineering, Trinity College: str. 43-116.
- [14] Znaor, D. 1993. Kompost – srce biovrta. Ljubljana, Vrtačarska univerza: str. 9-27.
- [15] Uredba o predelavi biološko razgradljivih odpadkov in uporabi komposta ali digestata (UL RS, št. 99/13 in 56/15), <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED6281>, (Pridobljeno 11. 6. 2016.)
- [16] Uredbo o mejnih vrednosti vnosa nevarnih snovi in gnojil v tla (UL RS, št. 84/2005), <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED3859> (Pridobljeno 10. 6. 2016.)
- [17] Kolar, J. 1983. Odvod odpadne vode iz naselij in zaščita voda. Ljubljana, Državna založba Slovenije, str. 83-125.
- [18] Gabrovšek, P. 2016. Analiza komposta iz kompostarne CRO Vrhnika, december 2015 (online). Sporočilo za: Buzak, Z. 21. 4. 2016. Osebna komunikacija.
- [19] Vrbančič, M. 2016. Vzorec blata CČNL: Letni reprezentativni vzorec peletov za l. 2014, št. dokumenta 14-13-TS/15 z dne 24.2.2015. Novo mesto, Nacionalni laboratorij za zdravje, okolje in hrano, Center za okolje in zdravje, Oddelek za okolje in zdravje (online). Sporočilo za: Buzak, Z. 6. 7. 2016. Osebna komunikacija.
- [20] Vrbančič, M. 2016. Vzorec blata ČN Črnuče: Nacionalni laboratorij za zdravje, okolje in hrano, Poročilo o preskušanju, lab.št.:2016/3652. Datum: 9. 6. 2016 in Nacionalni laboratorij za zdravje, okolje in hrano, Poročilo o preskušanju, lab.št.:108 ODP/16. Datum: 27. 5. 2016 (online). Sporočilo za: Buzak, Z. 6. 7. 2016. Osebna komunikacija.
- [21] Vrbančič, M. 2016. Vzorec blata ČN Brod: Nacionalni laboratorij za zdravje, okolje in hrano, Poročilo o preskušanju, lab.št.:2016/2811. Datum: 14. 6. 2016 in Nacionalni laboratorij za zdravje, okolje in hrano, Poročilo o preskušanju, lab.št.: 89 ODP/16. Datum: 14. 6. 2016 (online). Sporočilo za: Buzak, Z. 6. 7. 2016. Osebna komunikacija.

[22] Hodnik, A. 1997. Strokovno mnenje o vzorcih: kompostirano blato Č. N. IUUV in kompostirani biološki odpadki. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: str. 7-14.

[23] Žnidaršič Pongrac, V. 2000. Analiza odpadnega blata čistilne naprave Domžale – Kamnik; št. vz. 886/00, št. 6. Poročilo o preizkusu št. 2141/00. Domžale – Kamnik, Centralna čistilna naprava.