

# Ispitivanje utjecaja karakteristika bioreaktora na proces kompostiranja biootpada

---

**Mrazović, Adriana**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:852542>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-03**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ

Adriana Mrazović

**ISPITIVANJE UTJECAJA KARAKTERISTIKA BIOREAKTORA  
NA PROCES KOMPOSTIRANJA BIOOTPADA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Dajana Kučić Grgić

Članovi ispitnog povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Dajana Kučić Grgić

Dr. sc. Lidija Furač, viši predavač

Dr. sc. Martina Miloloža

Zagreb, srpanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidatkinja Adriana Mrazović

Predala je izrađen završni rad dana: 26. lipnja 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

izv. prof. dr. sc. Dajana Kučić Grgić, Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije  
dr. sc. Lidija Furač, viša predavačica, Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije  
dr. sc. Martina Miloloža, asistentica, Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije  
doc. dr. sc. Matija Cvetnić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet  
kemijskog inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada  
pred povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 1. srpnja 2024.

*Ovaj rad je izrađen u sklopu projekta Development of innovative systems for the use of geothermal energy sources and energy from biological waste - RazInoGeoBio (Project code: KK.01.2.1.02.0314) financed from the Operational Program "Competitiveness and Cohesion 2014-2020" from the European Fund for Regional Development as part of the call KK.01.2.1.02 - Increasing the development of new products and services resulting from research and development activities (IRI) - faza II na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu.*

*Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Dajani Kučić Grgić na mentorstvu, svim savjetima, pomoći, podijeljenom znanju, izdvojenom vremenu te ponajviše strpljenju i odličnom pristupu tijekom izrade ovog završnog rada.*

*Zahvaljujem se i asistentici dr. sc. Martini Miloloži na prenesenom znanju, podršci i predanosti te tehničkoj suradnici Marijani Vidaković na susretljivosti i srdačnom pristupu tijekom rada u laboratoriju Zavoda za industrijsku ekologiju.*

*Veliko hvala i mojoj obitelji i prijateljima na stalnoj potpori, ljubavi i ohrabrenju tijekom mog školovanja.*

*Hvala dragom Bogu na svemu.*

## SAŽETAK

U ovome radu, provedena su dva pokusa (P1 i P2) kompostiranja u dva reaktora (R1 i R2) različitih karakteristika, radnih volumena,  $V_r = 10$  L. Cilj ovih pokusa bio je odrediti utječu li karakteristike reaktora na proces kompostiranja kao i sastav biootpada. Pokus P1 provodio se 16 dana, a sastav biootpada nije bio definiran, dok u pokusu P2 sastav biootpada je bio definiran i provodio se 14 dana. U određenim vremenskim periodima, ovisno o temperaturi, izuzimao se uzorak supstrata i određivani su fizikalno-kemijski pokazatelji (pH-vrijednost uzorka, koncentracija otopljenog kisika, električna provodnost, sadržaj vlage, hlapive i suhe tvari u uzorku) i mikrobiološki pokazatelji (ukupan broj živih bakterija i gljiva). Po završetku pokusa, u priređenim eluatima supstrata te uzorcima procjedne vode provedena je i analiza ukupnog organskog ugljika, TOC (eng. *Total organic carbon*) te test ekotoksičnosti pomoću morske bakterije *Vibrio fischeri*. Maksimalna postignuta temperatura u P1 bila je 33,4 °C u R1 i 36,1 °C u R2, dok je u P2 postignuta maksimalna temperatura od 43,3 °C u R1 i 44,7 °C u R2. pH-vrijednost supstrata u P1 porasla je s 5,13 na 7,79 u R1 i na 7,84 u R2, a tijekom drugog pokusa sa 6,11 na 8,58 u R1 i na 8,45 u R2. Rezultati testa ekotoksičnosti pokazali su da su eluati supstrata i procjedne vode u oba pokusa toksični. U pokusu P1 postignuta je konverzija od 24,99 % u R1 i 23,76 % u R2, a u P2 37,19 % u R1 i 56,92 % u R2.

**Ključne riječi:** kompostiranje, biootpad, bioreaktor

## **ABSTRACT**

In this paper, two experiments (P1 and P2) of composting were carried out in two reactors (R1 and R2) with different characteristics and working volume of  $V_r = 10$  L. The aim of these experiments was to determine whether the reactor characteristics affect the composting process as well as the composition of biowaste. Experiment P1 was conducted for 16 days, and the composition of biowaste was not defined, while in experiment P2, the composition of biowaste was defined and experiment was conducted for 14 days. In certain periods, depending on the temperature, a sample of the substrate was taken and physicochemical indicators (pH-value of the sample, concentration of dissolved oxygen, electrical conductivity, moisture content, volatile and dry substances in the sample) and microbiological indicators (total number of living bacteria and fungi) were determined. At the end of the experiment, an analysis of total organic carbon, TOC and ecotoxicity test using the marine bacterium *Vibrio fischeri* were performed on substrate samples and leachate samples. The maximum temperature achieved in P1 was 33,4 °C in R1 and 36,1 °C in R2, while in P2 the maximum temperature achieved was 43,3 °C in R1 and 44,7 °C in R2. During experiment P1, the pH value of the substrate increased from 5,13 to 7,79 in R1 and 7,84 in R2, and during experiment P2 from 6,11 to 8,58 in R1 and 8,45 in R2. The results of the ecotoxicity test showed that the substrate eluates and leachate were toxic in both experiments. A conversion of 24,99 % in R1 and 23,76 % in R2 of the experiment P1 and 37,19 % in R1 and 56,92 % in R2 of the experiment P2 was achieved.

**Keywords:** composting, biowaste, bioreactor

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. OPĆI DIO .....	3
2.1. Biootpad .....	3
2.2. Biološki procesi obrade otpada .....	4
2.2.1. Anaerobna digestija.....	4
2.2.2. Kompostiranje .....	5
3. EKSPERIMENTALNI DIO .....	17
3.1. Materijali .....	17
3.1.1. Biootpad.....	17
3.2. Mediji i kemikalije.....	18
3.2.1. Hranjivi agar .....	18
3.2.2. Sladni (malt) agar .....	18
3.2.3. Selektivne hranjive podloge.....	18
3.2.4. Fiziološka otopina .....	19
3.2.5. Hranjiva podloga za uzgoj bakterije <i>Vibrio fischeri</i> .....	19
3.3. Mjerni instrumenti i oprema.....	20
3.4. Analitički postupci.....	23
3.4.1. Fizikalno-kemijska karakterizacija supstrata tijekom procesa kompostiranja.....	23
3.4.2. Mikrobiološka analiza supstrata tijekom procesa kompostiranja .....	24
3.4.3. Određivanja ekotoksičnosti eluata i procjedne vode (pomoću morske bakterije <i>Vibrio fischeri</i> ).....	25
3.5. Provedba procesa kompostiranja .....	27
4. REZULTATI .....	28
4.1. Provedba procesa kompostiranja u P1 .....	29
4.1.1. Kompostiranje u reaktoru R1 .....	29
4.1.2. Kompostiranje u reaktoru R2.....	31
4.2. Provedba procesa kompostiranja u P2 .....	33
4.2.1. Kompostiranje u reaktoru R1 .....	33
4.2.2. Kompostiranje u reaktoru R2.....	36
5. RASPRAVA .....	39
5.1. Fizikalno – kemijska karakterizacija supstrata u pokusu P1 .....	39
5.2. Fizikalno – kemijska karakterizacija supstrata u pokusu P2.....	40



5.3. Mikrobiološka analiza supstrata .....	42
5.3.1. Mikrobiološka analiza supstrata u pokusu P1.....	42
5.3.2. Mikrobiološka analiza supstrata u pokusu P2.....	47
5.4. Određivanja ekotoksičnosti eluata i procjedne vode .....	52
6. ZAKLJUČCI.....	53
7. LITERATURA .....	54
8. POPIS SIMBOLA I OZNAKA .....	60
9. ŽIVOTOPIS.....	62

## 1. UVOD

Kompostiranje je stari tradicionalni način smanjivanja otpada.<sup>1</sup> Općenito se smatra kontroliranim, aerobnim i visoko energetske procesom kojim se brzo razgrađuje biološki iskoristiva organska tvar i pretvara u relativno stabilan organski materijal sličan humusu tla.<sup>2</sup> Proces kompostiranja može se primijeniti na širok raspon različitih vrsta otpada.<sup>1</sup> Vrlo je koristan sustav gospodarenja otpadom, osobito na prostorima gdje su odlagališta ograničena te na gušće naseljenim područjima.<sup>3</sup> Osnovna reakcija procesa kompostiranja je oksidacija organske tvari kisikom u ugljikov dioksid i vodu uz pomoć mezofilnih i termofilnih mikroorganizama.<sup>4</sup> Razgradnja organskih tvari ovisi o aktivnosti aerobnih mikroorganizama koji su ovisni o kisiku. Jedan od zahtjeva za dobru opskrbu kisikom je poroznost kompostne smjese. Čvrsti organski biootpad je većinom zbijen i visokog sadržaja vlage te se zato koriste razni strukturni materijali za povećanje poroznosti. Sadržaj vlage je usko povezan s aktivnošću mikroorganizama. Niska vlažnost materijala zaustavit će mikrobiološku aktivnost, dok će prevelika vlažnost ispuniti pore vodom i smanjiti sadržaj kisika. Mikrobna populacija u kompostnoj hrpi mijenja se s temperaturom, termofilni mikroorganizmi zamjenjuju mezofilne mikroorganizme s početka procesa te se tako utječe na biorazgradnju. Za uništavanje prisutnih patogena u kompostnom materijalu potrebno je postići temperaturu od najmanje 55 °C. Promjena temperature funkcija je procesnih parametara kao što su strukturni materijali, volumen kompostnog materijala, sadržaj kisika i temperature okoline.<sup>5</sup> Osim spomenute temperature, vlage i sadržaja kisika, na proces kompostiranja utječu i pH-vrijednost te C/N omjer.<sup>4</sup> C/N omjer značajan je u kompostiranju jer je mikroorganizmima potrebna dobra ravnoteža ugljika i dušika (25-30) kako bi ostali aktivni. Visoki omjeri C/N mogu dovesti do produljenja procesa kompostiranja, a niski omjeri C/N do povećanog gubitka dušika.<sup>6</sup> Kućni biootpad često je kiseo s pH u rasponu između 4 i 6. Kiselost je posljedica prisutnosti kratkolančanih organskih kiselina, uglavnom mliječne i octene kiseline. Prisutnost kratkolančanih masnih kiselina u kiselim uvjetima i njihova odsutnost u alkalnim uvjetima ukazuje da su one ključni čimbenik regulacije pH tijekom kompostiranja.<sup>7</sup> Kompostiranje se može provoditi u otvorenim nereaktorskim sustavima (*windrow* sustavima i u hrpi ili stogu) te u zatvorenim reaktorskim sustavima (vertikalni reaktori s miješalom, vertikalni reaktori s nasutim slojem, horizontalni reaktori s miješalom i horizontalni rotirajući reaktori).<sup>8</sup>

U ovom radu provedeno je ispitivanje utjecaja karakteristika bioreaktora na proces kompostiranja različitih vrsta mješavina biootpada. Provedena su dva pokusa kompostiranja (P1 i P2) u dva reaktora (R1 i R2) radnih volumena  $V_r = 10$  L. U P1 sastav biootpada nije bio definiran, dok je u P2 sastav biootpada bio definiran, a u oba pokusa dodan je strukturni materijal, granje i lišće. Tijekom 16 dana procesa kompostiranja P1, odnosno 14 dana P2, pratila se temperatura, udio vlage, suhe i hlapive tvari, koncentracija otopljenog kisika, električna vodljivost, pH-vrijednost, C/N omjer, ukupan broj mezofilnih i termofilnih mikroorganizama, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Enterococcus faecalis* i *Salmonella* sp. Na kraju procesa, na uzorcima supstrata te procjednih voda, provedena je i TOC analiza te test ekotoksičnosti pomoću morske bakterije *Vibrio fischeri*. Temeljem dobivenih rezultata, izračunata je i postignuta konverzija.

## 2. OPĆI DIO

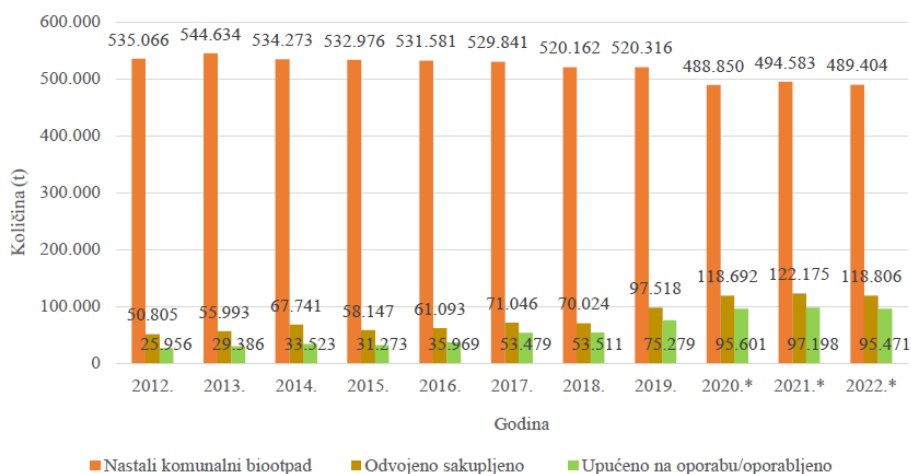
### 2.1. Biootpad

Prema Zakonu o gospodarenju otpadom<sup>9</sup>, biootpad je biološki razgradiv otpad iz vrtova i parkova, hrana i kuhinjski otpad iz kućanstava, restorana, ugostiteljskih i maloprodajnih objekata i slični otpad iz prehrambene industrije.

Prema Katalogu otpada<sup>10</sup> komunalni biootpad obuhvaća:

- 20 01 08 (biorazgradivi otpad iz kuhinja i kantina);
- 20 01 25 (jestiva ulja i masti);
- 20 02 01 (biorazgradivi otpad iz vrtova i parkova) i
- 20 03 02 (otpad s tržnica).

Iz izvješća o komunalnom otpadu za 2022. godinu u Hrvatskoj je ukupno nastalo 489 404 tona biootpada iz komunalnog otpada (Slika 2.1.). Odvojeno je sakupljeno 118 806 tona biootpada iz komunalnog otpada odnosno 24 % što je manje u odnosu na 2021. godinu. Procjenjuje se da je u 2022. godini na odlagalištima završilo 322 744 tona biootpada iz komunalnog otpada (odvojeno sakupljeni i kao sastavni dio miješanog komunalnog otpada) tj. oko 66 % nastale količine što je jednako udjelu iz prethodne godine. Oporabljeno je (kompostiranje, anaerobna digestija, energetska uporaba i dr.) oko 20 % nastalog biootpada (95 471 tona) što je gotovo jednako kao 2021. godine.<sup>11</sup>



\*Oporabljene količine, bez nečistoća i neciljanih materijala

**Slika 2.1.** Nastali biootpad iz komunalnog otpada i gospodarenje s istim, 2012.-2022. godina.<sup>11</sup>

## 2.2. Biološki procesi obrade otpada

Uobičajeni biološki procesi obrade otpada su kompostiranje i anaerobna digestija. Glavni produkti anaerobne digestije su bioplin i digestat dok se procesom kompostiranja kao produkti izdvajaju različita čvrsta gnojiva ili kompost. Anaerobna digestija i kompostiranje se često kombiniraju kako bi se poboljšala njihova izvedba.<sup>12</sup>

### 2.2.1. Anaerobna digestija

Anaerobna razgradnja ili digestija je proces u kojem se supstrat razgrađuje mikrobiološkim procesima djelovanjem različitih bakterija i arheja u uvjetima bez kisika pri čemu kao glavni produkti nastaju bioplin i digestat.<sup>12</sup>

Proces nastanka bioplina sastoji se od četiri faze (Slika 2.2.):

- **Hidroliza:**

Hidroliza je prva faza anaerobne digestije tijekom koje se organska tvar razlaže na manje jedinice. Hidrolitičke bakterije luče enzime koji transformiraju biopolimere u jednostavne topljive spojeve odnosno dolazi do razlaganja ugljikohidrata, lipida, aminokiselina i bjelančevina u glukozu, glicerol, piridine i sl.

- **Acidogeneza:**

U ovoj fazi acidogene bakterije transformiraju produkte hidrolize u metanogene spojeve. Aminokiseline, masne kiseline i jednostavni šećeri se razgrađuju na acetat, ugljikov dioksid i vodik te na hlapljive masne kiseline i alkohole.

- **Acetogeneza:**

Tijekom acetogeneze proizvode se fermentacije koje se ne mogu metanogenezom direktno transformirati u metan, nego se pretvaraju u metanogene spojeve. Hlapljive masne kiseline i alkoholi oksidiraju u acetat, vodik i ugljikov dioksid. Alkohol s više od jedne molekule ugljika te hlapljive masne kiseline čiji su lanci duži od dvije jedinice oksidiraju u acetate i vodik.

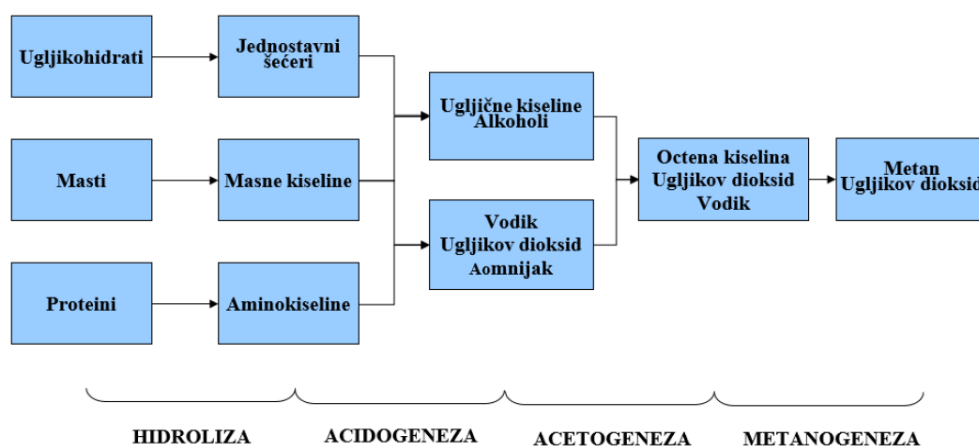
- **Metanogeneza:**

Tijekom metanogeneze dolazi do transformacije vodika u metan. Predstavlja najsporiju biokemijsku reakciju te uvelike ovisi o uvjetima rada. Djelovanjem metanogenih bakterija 70 % metana nastaje iz acetata, a ostalih 30 % nastaje iz vodika i ugljikovog dioksida.<sup>13</sup>

Kada se uspoređi toplinska energija koja nastaje tijekom aerobnih i anaerobnih procesa, može se zaključiti da je ona manja tijekom anaerobnih procesa jer se biokemijskim reakcijama najveći dio kemijskog energetskog potencijala supstrata pretvara u metan i ostale sastojke bioplina.<sup>14</sup>

Bioplin se sastoji od metana (CH<sub>4</sub>) i ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>), s malim udjelima sumporovodika (H<sub>2</sub>S) i amonijaka (NH<sub>3</sub>) te vodika (H<sub>2</sub>), dušika (N<sub>2</sub>), ugljikovog monoksida (CO), zasićenih ili halogeniranih ugljikovodika te kisika (O<sub>2</sub>). To je smjesa različitih plinova koja je u pravilu zasićena vodenom parom te može sadržavati i čestice prašine i siloksana.<sup>14</sup>

Drugi produkt tj. ostatak koji nastaje procesom anaerobne digestije je digestat. Bogat je hranjivim tvarima, no može sadržavati i veće količine teških metala ovisno o supstratu što dovodi do njegove ograničene primjene te povećanih troškova zbrinjavanja.<sup>14</sup>



Slika 2.2. Faze anaerobne digestije.<sup>15</sup>

### 2.2.2. Kompostiranje

Kompostiranje je biooksidativni proces tijekom kojeg dolazi do pretvorbe biootpada u korisne krajnje produkte te se pritom smanjuje potencijalni štetni utjecaj otpada na okoliš. Jedan je od najučestalijih načina oporabe organskog dijela komunalnog otpada od kojeg se kao produkt dobiva kompost koji se može koristiti kao gnojivo.<sup>16</sup> Biorazgradiva tvar se prevodi u stabilan produkt (kompost/humus) uz oslobađanje topline, CO<sub>2</sub> i vode (izraz 2.1.).<sup>17</sup>



Proces kompostiranja odvija se u 4 faze (Slika 2.3.):

**1. Mezofilna faza (25 – 45 °C):**

Mezofilni mikroorganizmi razgrađuju lako razgradive ugljikohidrate i proteine. Umnožavanjem mezofilnih organizama temperatura naglo raste. Produkti razgradnje koji nastaju tijekom početne faze su jednostavne organske kiseline koje nastaju kao rezultat mikrobiološke aktivnosti bakterija octenog vrenja. Slijedno tome, dolazi do pada pH-vrijednosti kompostne mase.<sup>18</sup>

**2. Termofilna faza (45 – 65 °C):**

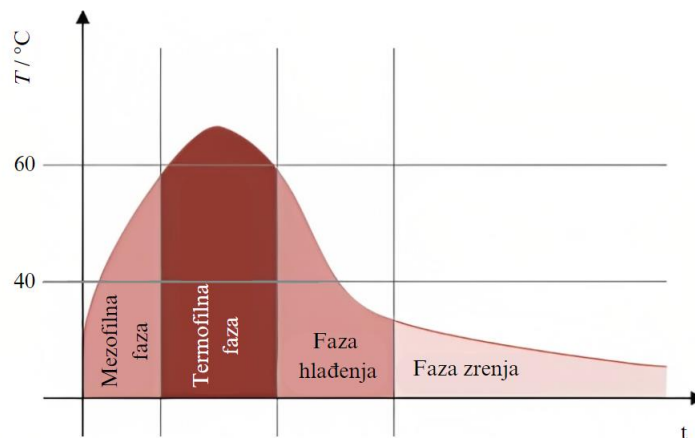
Termofilni mikroorganizmi (gljive) postaju dominantni i zamjenjuju mezofilne mikroorganizme (najčešće bakterije) te dolazi do sanitacije sirovog komposta inaktiviranjem uobičajenih virusa u organskom otpadu.<sup>11, 18</sup> Termofili su bitni za daljnju razgradnju ugljikohidrata čija je razgradnja započela tijekom mezofilne faze. Također, termofilna faza je važna zbog ubrzanja sanitacije kompostne mase što rezultira boljim i kvalitetnijim krajnjim produktom.<sup>19</sup>

**3. Druga mezofilna faza (faza hlađenja):**

Temperatura kompostne mase opada te se iz spora aktiviraju mezofilni mikroorganizmi (bakterije i gljive) koji razgrađuju škrob i celulozu.<sup>18,20</sup>

**4. Faza zrenja:**

Dolazi do izmjene mikroorganizama (bakterija i gljiva), smanjuje se broj bakterija, a raste broj gljiva.<sup>18</sup> Iscrpljivanjem razgradive organske tvari, aktivnost mikroorganizama slabi.<sup>11</sup>



**Slika 2.3.** Temperaturna krivulja procesa kompostiranja.<sup>21</sup>

Prema Pravilniku o ukidanju statusa otpada<sup>22</sup>, kompost je gnojidbeni proizvod koji udovoljava uvjetima propisa koji uređuje gnojidbene proizvode.

Zakon o gnojidbenim proizvodima<sup>23</sup> dijeli gnojidbene proizvode na:

1. HR gnojidbeni proizvod - tvar, smjesa, mikroorganizam ili bilo koji drugi materijal koji se primjenjuje ili je namijenjen primjeni na biljkama ili njihovoj rizosferi, ili na gljivama ili njihovoj mikosferi, ili koji je namijenjen da čini rizosferu ili mikosferu, samostalno ili pomiješan s drugim materijalom, radi opskrbe biljaka ili gljiva hranjivima ili poboljšavanja učinkovitosti njihove ishrane kad se na tržište Europske unije prvi put stavlja u Republici Hrvatskoj
2. EU gnojidbeni proizvod - tvar, smjesa, mikroorganizam ili bilo koji drugi materijal koji se primjenjuje ili je namijenjen primjeni na biljkama ili njihovoj rizosferi, ili na gljivama ili njihovoj mikosferi, ili koji je namijenjen da čini rizosferu ili mikosferu, samostalno ili pomiješan s drugim materijalom, radi opskrbe biljaka ili gljiva hranjivima ili poboljšavanja učinkovitosti njihove ishrane s oznakom CE kada se stavlja na raspolaganje na tržištu Republike Hrvatske

Detaljno razvrstavanje HR gnojidbenih proizvoda prema funkcijama, zahtjeve kakvoće za HR gnojidbene proizvode, način i sadržaj označivanja HR gnojidbenog proizvoda i odstupanja od deklariranog sadržaja propisuje nadležan ministar za poljoprivredu.

Uredba (EU) 2019/1009 Europskog parlamenta i Vijeća utvrđuje pravila o stavljanju gnojidbenih proizvoda EU-a na raspolaganje na tržištu.<sup>24</sup>

### **2.2.2.1. Čimbenici koji utječu na proces kompostiranja**

Uspješnost provedbe procesa kompostiranja ovisi o nizu parametara tj. čimbenicima koji su skloni promjenama te ih je potrebno pratiti i kontrolirati (Tablica 2.1). Neki od tih čimbenika su: temperatura, pH-vrijednost, sadržaj vlage u supstratu, sadržaj kisika, omjer ugljika i dušika, TOC, veličina čestica materijala, miješanje, broj i vrsta mikroorganizama.<sup>17</sup>



**Tablica 2.1.** Optimalne vrijednosti parametara kompostiranja.

Parametar	Optimalna vrijednost
Veličina čestica materijala	12-60 mm <sup>25</sup>
Temperatura	50-60 °C <sup>26</sup>
Sadržaj vlage	55 %-60 % <sup>27</sup>
pH-vrijednost	7,96-8,45 <sup>28</sup>
C/N omjer	20-35 <sup>26</sup>
Sadržaj O <sub>2</sub>	15 %-20 % <sup>29</sup>

### **Veličina čestica materijala**

Kako bi kompostiranje bilo što učinkovitije, materijal je potrebno usitniti na prihvatljivu veličinu što omogućuje dobro prozračivanje, miješanje i prodor mikroorganizama. Prema literaturi optimalne vrijednosti navode se veličine 4-7 cm te 1-5 cm. Usitnjavanje se provodi rezanjem, no ovisno o materijalu, u određenim slučajevima, nije potrebna opsežna predobrada jer tijekom početnog miješanja dolazi do dodatnog trganja i usitnjavanja.<sup>18</sup> Smanjenjem veličina čestica postiže se povećanje ukupne površine što potiče mikrobiološku aktivnost i brzinu razgradnje. Smanjenje veličine čestica također povećava dostupnost ugljika i dušika. No također, pretjeranim usitnjavanjem, može doći do zbijanja materijala te razvoja nepoželjnih anaerobnih uvjeta ako je veličina čestica premala.<sup>30</sup> Prevelika veličina čestica može dovesti do stvaranja velikih zračnih džepova te posljedično do sniženja temperature kompostne mase te sporije razgradnje.<sup>31</sup>

### **Temperatura**

Temperatura supstrata pokazatelj je mikrobiološke aktivnosti i stabilnosti konačnog produkta.<sup>16</sup> U početku temperatura brzo raste jer se oslobađa velika količina topline tijekom razgradnje jednostavnih organskih tvari, poput šećera. Povećanje temperature dovodi i do isparavanje vode iz supstrata što rezultira smanjenjem sadržaja vlage. Na početku procesa kompostiranja (do 40 °C) prevladavaju mezofilne bakterije. One uključuju bakterije koje oksidiraju vodik i sumpor, nitrifikacijske bakterije i bakterije koje fiksiraju dušik. Većina ovih bakterija može se pronaći na površinskom sloju tla. Broj spomenutih mezofilnih bakterija eksponencijalno raste tijekom početne faze kompostiranja kada one koriste jednostavne spojeve kao što su šećeri i škrob. Dolazi do povećanja metaboličke aktivnosti bakterija te posljedično do zagrijavanja kompostnog materijala. Porastom temperature iznad 40 °C mezofilne bakterije zamjenjuju termofili. Ovom fazom najčešće dominiraju bakterije roda *Bacillus*. Kada uvjeti postanu nepovoljni, bacili stvaraju endospore debelih stijenki koje su vrlo otporne na toplinu, hladnoću i nedostatak vlage, a ponovno

se aktiviraju kada okolišni uvjeti postanu povoljni. Gljive su odgovorne za razgradnju mnogih složenih biljnih polimera. U početnim fazama procesa prevladavaju kvasci kojima pogoduju kiseli uvjeti nastali razgradnjom šećera. Gljive razgrađuju čvrste ostatke uključujući celulozu, a mogu razgraditi i organske ostatke koji su presuhi, kiseli ili niskog sadržaja dušika, a koje ne mogu razgraditi bakterije. Većina gljiva izlučuje probavne enzime, a apsorbiraju produkte izvanstanične probave.<sup>30</sup> Najviša temperatura tijekom termofilne faze osigurava sanitaciju kompostne mase uklanjajući patogene mikroorganizme.<sup>33</sup> Tijekom termofilne faze kompostiranja, visoka temperatura uzrokuje ubrzavanje razgradnje proteina, masti i složenih ugljikohidrata kao što su celuloza i hemiceluloza. Kemijska se razgradnja odvija djelovanjem enzima koje proizvode mikroorganizmi. Bakterije i gljive izlučuju enzime koji razgrađuju složene organske spojeve, a apsorbiraju jednostavnije spojeve. Enzimi kataliziraju reakcije u kojima šećeri, proteini i drugi organski spojevi oksidiraju, a kao produkt nastaju ugljikov dioksid, voda, energija te spojevi otporni na daljnju razgradnju. Enzim celulaza razgrađuje celulozu, amilaza razgrađuje škrob, a proteaza proteine. Što je molekula složenija, to je složeniji i enzimski sustav koji je potreban za provedbu razgradnje. Lignini, složeni polimeri koji povezuju celulozna vlakna u drvu, jedni su od spojeva kojima je potrebno najviše vremena za razgradnju zbog njihove složene strukture koja je vrlo otporna na djelovanje enzima. Kada se iscrpe svi spojevi koje mogu iskoristiti termofilne bakterije, aktivnost kao i temperatura opada te opet prevladavaju mezofilne bakterije. Broj i vrsta mezofilnih mikroorganizama ovisi o sporama prisutnim u kompostnom materijalu. Napredovanjem faze hlađenja i zatim faze zrenja raznolikost mikroorganizama postupno raste sve do trenutka kada se potroši sav raspoloživi ugljik, a zatim posljedično ponovo opada raznolikost mikroorganizama.<sup>30</sup> Kako bi se uklonili svi patogeni, temperatura se mora održavati u rasponu 55-60 °C najmanje tri dana.<sup>33</sup>

### **Sadržaj vlage**

Početni sadržaj vlage materijala ključan je faktor kod utvrđivanja uspješnosti kompostiranja i kakvoće produkta. Sadržaj vlage može se regulirati dodatkom strukturnih materijala različitih fizikalno-kemijskih karakteristika kao što su drvena sječka i strugotine, piljevina, slama i sl. (Tablica 2.2.). Strukturni materijali apsorbiraju višak vode nastale tijekom procesa razgradnje te tako smjesa ostaje vlažna i održava se mikrobiološka aktivnost. Većina strukturnih materijala djelovat će i kao puferi organskih kiselina te posljedično utjecati na održavanje pH-vrijednosti između 6 i 8. Strukturni materijali utjecat će i na strukturu kompostne smjese osiguravajući

poroznost za pravilnu aeraciju.<sup>34</sup> Razne reakcije mikrobnog razgradnje organske tvari odvijaju se u tekućoj fazi. Voda ima važne uloge u kompostiranju: sudjeluje u metaboličkoj aktivnosti mikroorganizama, sudjeluje u reakcijama razgradnje, otapa i omekšava kompostni materijal za razgradnju, isparavanje vode utječe na temperaturu reaktora itd. Sadržaj vlage iznad 70 % utječe na cirkulaciju zraka uzrokujući djelomično anaerobne uvjete, dolazi do stvaranja hlapljivih organskih spojeva i neugodnih mirisa. Sadržaj vlage ispod 40 % ograničava mikrobiološku aktivnost, materijal se ne može u potpunosti razgraditi te dolazi do odgode fermentacije.<sup>11</sup> Sadržaj vlage ispod 30 % onemogućava mikrobiološku aktivnost.<sup>16</sup>

**Tablica 2.2.** Fizikalno-kemijske karakteristike izdvojenih strukturnih materijala.

	Nasipna gustoća / $\text{kg m}^{-3}$	Sadržaj vlage / %	pH-vrijednost / -	Optimalna veličina čestica / mm
<b>Drvena sječka i strugotine</b>	264-368 <sup>35</sup>	31,53-50,57 <sup>36</sup>	5,4 <sup>39</sup>	*0-5 <sup>42</sup>
<b>Slama</b>	34-224 <sup>35</sup>	15 <sup>37</sup>	7,5 <sup>40</sup>	
<b>Krupna piljevina</b>	208-267 <sup>35</sup>	28-31 <sup>38</sup>	bukva – 5,11 breza – 5,29 javor – 4,65 <sup>41</sup>	

\*Prema literaturi<sup>43</sup>, veličina od 1 cm omogućit će brže odvijanje kemijskih promjena tijekom kompostiranja te veći relativni sadržaj humusnih tvari.

### pH-vrijednost

pH-vrijednost utječe na aktivnost mikroorganizama, a samim time i na brzinu razgradnje organske tvari. pH-vrijednosti mijenja se tijekom procesa kompostiranja te pokazuje uzlazni trend nakon završetka kompostiranja.<sup>11</sup> U početnoj fazi kompostiranja dolazi do razgradnje jednostavnih spojeva kao što su šećeri te kao produkti nastaju organske kiseline. Nastali kiseli uvjeti pogodni su za rast gljiva, osobito kvasaca, te razgradnju lignina i celuloze. Kako kompostiranje napreduje, organske kiseline se neutraliziraju, pH-vrijednost tijekom termofilne faze raste do 8 ili 9, a zreli kompost na kraju uobičajeno ima pH-vrijednost između 6 i 8.<sup>30</sup> Također, razgradnja proteina u lignoceluloznom otpadu rezultira nakupljanjem amonijaka te posljedično povećanjem pH-vrijednosti. Početni niski pH je moguće podesiti miješanjem kiselog materijala s neutralnim ili lužnatim materijalom u odgovarajućem omjeru ili dodavanjem anorganskih soli poput natrijevog hidrogenkarbonata, natrijevog acetata ili vapna.<sup>29</sup> Neutralan do blago lužnati pH omogućava visoku aktivnost bakterija dok kiseli uvjeti procesa omogućavaju rast, razmnožavanje i

mikrobiološku aktivnost gljiva. Međutim, u uvjetima kada je  $\text{pH} < 6$  aktivnost mikroorganizama je ograničena. Kada je  $\text{pH} > 9$  aktivnost mikroorganizama također je ograničena, no doći će i do povećane emisije amonijaka ( $\text{NH}_3$ ).<sup>11</sup> Duži periodi niskih pH-vrijednosti uzrokovat će sporije razlaganje.<sup>44</sup>

### **C/N omjer**

C/N omjer kritičan je pokazatelj konačne kvalitete komposta i njegove prikladnosti za biljke te kritični faktor koji pokazuje koliko je vremena potrebno da kompost postigne zreost.<sup>19,45</sup> Mikroorganizmi koriste ugljik kao izvor energije, a dušik za formiranje staničnih struktura.<sup>10</sup> Prema literaturi<sup>45</sup>, optimalan C/N omjer između 25 i 35 omogućava stabilnu mikrobnu aktivnost. Brzina kompostiranja, tj. razlaganja porasti će smanjenjem omjera C/N.<sup>18</sup> Visok omjer C/N, viši od 35, uzrokuje sporo pokretanje procesa i dulje vrijeme potrebno za proizvodnju konačnog produkta, komposta. Niski početni omjer C/N, niži od 25, rezultira visokim emisijama amonijaka ( $\text{NH}_3$ ) te gubitkom dušika. Omjer C/N može se prilagoditi odabirom odgovarajuće kombinacije kompostnog materijala te strukturnog materijala kako bi se postigao željeni omjer.<sup>45</sup>

### **TOC (eng. *Total organic carbon*)**

Vrijednost ukupnog organskog ugljika još je jedan od pokazatelja mikrobiološke aktivnosti. Smanjenje TOC vrijednosti ukazuje na mikrobiološku aktivnost, odnosno biooksidativne procese koji se odvijaju u supstratu prilikom čega organski ugljik (C) prelazi u ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ).<sup>16</sup>

### **Sadržaj kisika**

Sadržaj kisika smatra se ključnim čimbenikom koji utječe na proces kompostiranja i kvalitetu komposta.<sup>46</sup> Razlikujemo tri vrste aeracije: prirodna, pasivna i prisilna.<sup>47</sup> Brzina prozračivanja odnosno aeracije utječe na aktivnost mikroorganizama, brzinu razgradnje supstrata te temperaturne varijacije u procesu kompostiranja.<sup>46</sup> Minimalna potrebna koncentracija kisika je 5 % pri čemu je moguće ostvariti aerobne uvjete nužne za održavanje mikrobne aktivnosti.<sup>48</sup> Premalo kisika može dovesti do anaerobnih uvjeta, međutim, pretjerana koncentracija kisika može dovesti do prekomjernog hlađenja i isušivanja kompostne smjese sprječavajući optimalne termofilne uvjete potrebne za razgradnju.<sup>46</sup> U periodima visoke temperature, stopa potrošnje kisika je najveća zbog povećane potrebe mikroorganizama za kisikom.<sup>11</sup> Prema literaturi, optimalna brzina aeracije potrebna za kompostiranje otpada voća i povrća u reaktoru s prisilnom aeracijom iznosi 0,62 L/min

po kg suhe tvari.<sup>49</sup> U drugom istraživanju koje je provedeno na kompostiranju biootpada (trava, rajčica, paprika, patlidžan) u četiri vertikalna reaktora s prisilnom aeracijom i jednom vertikalnom reaktoru s prirodnom aeracijom, zaključeno je kako je optimalna brzina aeracije postignuta prisilnom aeracijom koja je iznosila 0,4 L/min po kg suhe tvari.<sup>50</sup> Optimalna brzina aeracije za kompostiranje lignoceluloznog otpada, prema literaturi, iznosi 3,25 L/min po kg suhe tvari.<sup>51</sup>

### **2.2.2.2. Sustavi za provedbu procesa kompostiranja**

Proces kompostiranja može se provoditi u :

- Otvorenim sustavima (aerirani rovovi ili *windrow* i u hrpi ili stogu)
- Zatvorenim reaktorskim sustavima<sup>18</sup>

Izbor između različitih vrsta sustava ovisi o tehničkim i ekonomskim mogućnostima i zahtjevima.<sup>52</sup>

#### ***Windrow* sustavi**

Kompostiranje ovim sustavom provodi se slaganjem mješavine organskog otpada u duge uske hrpe koje se nazivaju "windrow", a koje se zatim redovito miješaju i okreću kako bi se osigurala aeracija odnosno dovod kisika. Dugi redovi organskog otpada se često postavljaju pod pravim kutom u odnosu na prevladavajući, učestali smjer vjetera na tom području te paralelno s nagibom tla. Podloga na kojoj se postavljaju je uglavnom dobro drenirano otvoreno zemljište, a može biti i beton ili asfalt. Beton i asfalt su poboljšane podloge koje omogućavaju kontrolu, nadziranje i mehaničko miješanje strojevima tijekom cijele godine, neovisno o vremenskim uvjetima.<sup>53</sup> Prednost ovakvog kompostiranja je mogućnost obrade relativno velikih količina materijala.

Proces okretanja i miješanja dovodi do povećane emisije plinova i neugodnih mirisa te bi se takvi sustavi trebali graditi na što udaljenijim lokacijama, izvan urbanog područja.<sup>54</sup> *Windrow* sustavima moguće je kompostirati različite vrste otpada poput masti, organskih tekućina i drugih životinjskih nusprodukata.<sup>55</sup> Faza aktivnog kompostiranja obično traje između 8 i 16 tjedana, ovisno o kompostnom materijalu, učestalosti okretanja i namjeni komposta. Uobičajeno, jedan rov se okrene oko 6 do 8 puta prije nego uđe u fazu sušenja. Visina rovova je uglavnom 1-2 metra, ali mogu biti i visine 3-4 metra. Širina može varirati od 3 metra do preko 8 metara te je često određena opremom za okretanje koja je prikazana na slici 2.4.<sup>53</sup>



**Slika 2.4.** Strojno mehaničko okretanje *windrow* sustava.<sup>56</sup>

### **Kompostiranje u hrpi ili stogu**

Kompostiranje u hrpi ili stogu sastoji se od šaržnih trapezoidnih hrpa organskog otpada kod kojih se aeracija osigurava prirodnom ili prisilnom konvekcijom zraka kroz hrpu. Prisilnom konvekcijom zrak se dovodi kroz perforirane cijevi ispod materijala (Slika 2.5.).<sup>57</sup> Hrpe su često prekrivene slojem gotovog stabiliziranog komposta ili slojem drvene sječke koji se ugrađuju u ostatak hrpe prilikom pomicanja.<sup>58</sup> Za kontrolu mirisa koriste se navlake poput polietilenskih cerada ili biogenih navlaka. Nakon završetka procesa, humus odnosno kompost može se sigurno primjenjivati u poljoprivredi.<sup>59</sup>



**Slika 2.5.** Kompostiranje u hrpi ili stogu s prisilnom aeracijom.<sup>60</sup>

## Reaktorski sustavi

Reaktorski sustavi su zatvoreni sustavi u kojima se proces kompostiranja provodi šaržno ili kontinuirano s prirodnom konvekcijom ili prisilnom aeracijom. Dije se na vertikalne (reaktori s miješalom i reaktori s nasutim slojem) i horizontalne (reaktori s miješalom ili rotirajući reaktori) koji su prikazani na slici 2.6.. Moguće su izvedbe toplinski izoliranih (adijabatskih) reaktora te izotermnih reaktora. Reaktori su uglavnom toplinski izolirani zbog egzotermnih reakcija koje se u njima odvijaju. Prednosti, nedostaci i trajanje procesa kompostiranja u otvorenim reaktorskim i zatvorenim nereaktorskim sustavima prikazano je u tablici 2.3.. Proces u reaktorskim sustavima ne ovisi o klimatskim uvjetima te sam proces kompostiranja traje kraće (15-30 dana) od onih u otvorenim sustavima. Također, u zatvorenim reaktorskim sustavima moguća je kontrola i podešavanje procesnih uvjeta i parametara. Tijekom procesa kompostiranja moguće je i sakupljanje procjednih voda i izlaznih plinova te njihova obrada.<sup>29</sup> Procjedne vode su toksični nusprodukti koji nastaju iz komunalnog otpada zbog fizikalnih, kemijskih i bioloških promjena koje se odvijaju procesom kompostiranja, no mogu nastati i kao nusprodukti na odlagalištima i spalionicama.<sup>61</sup> Nedostaci takvog procesa kompostiranja su manja količina otpada koja se može šaržno obraditi te visoka cijena reaktora i odgovarajuće mehaničke opreme.<sup>29</sup> Kompostiranje ima mnoge ekološke i ekonomske prednosti, no također i nedostatke (Tablica 2.4.).



**Slika 2.6.** Reaktorski sustavi: a) horizontalni (lijevo)<sup>62</sup>, b) vertikalni (desno)<sup>63</sup>.

**Tablica 2.3.** Prikaz prednosti, nedostataka te trajanja procesa u reaktorskim sustavima.

Vrste sustava za kompostiranje		Trajanje procesa	Prednosti	Nedostatci
Zatvoreni reaktorski sustavi	Vertikalni reaktori s miješalom	15-30 dana <sup>29</sup>	*Značajno veći postotak razgradnje organske tvari (35,7 %) u usporedbi s otvorenim sustavima. <sup>52</sup> Niski operativni troškovi <sup>66</sup> , moguće podešavanje procesnih parametara, zauzimaju manje prostora. <sup>67</sup>	Visoka cijena materijala za izradu reaktora i mehaničku opremu, visoka početna ulaganja, manja količina otpada koja se odjednom može obraditi. <sup>29</sup>
	Vertikalni reaktori s nasutim slojem			
	Horizontalni reaktori s miješalom			
	Horizontalni rotirajući reaktori			
Otvoreni nereaktorski sustavi	<i>Windrow</i> sustavi	22 tjedna <sup>64</sup>	Jednostavnije rukovanje i tehnička izvedba te manja novčana ulaganja u usporedbi sa reaktorskim sustavima. <sup>66</sup>	*Manji postotak razgradnje organske tvari ( <i>Windrow</i> - 19,4 %, hrpa ili stog – 8,9 %) u usporedbi sa zatvorenim sustavima. Velike emisije dušikovog oksida i amonijaka, neugodan miris, ograničena dostupnost velikih prikladnih površina, niska učinkovitost te veći gubici dušika u odnosu na zatvorene sustave. <sup>66</sup>
	Hrpa ili stog	Toplo kompostiranje (45 °C-70 °C) – 4-8 tjedana Hladno kompostiranje (20 °C-30 °C) – 6-12 mjeseci <sup>65</sup>		

\*tijekom prvih 7 dana procesa kompostiranja



**Tablica 2.4.** Ekonomske i ekološke prednosti te nedostaci kompostiranja i komposta.<sup>68</sup>

<b>Ekonomske prednosti kompostiranja i komposta</b>	<b>Ekološke prednosti kompostiranja i komposta</b>	<b>Nedostaci kompostiranja i komposta</b>
Povećanje prinosa usjeva te poljoprivredne proizvodnje i kvalitete	Poboljšanje kvalitete tla	Kontinuirana investicija novaca i vremena
Uništavanje sjemena korova; smanjenje troškova herbicida	Zadržavanje hranjivih tvari u tlu	Potreba za prikladnim zemljištem
Smanjenje troškova zbrinjavanja otpada	Očuvanje voda	Upravljanje tijekom nepovoljnih vremenskih prilika
Prihod od prodaje komposta	Uništavanje hormona, antibiotika i pesticida	Potencijalni gubitak dušika i stvaranje metana u anaerobnim uvjetima
Smanjenje troškova rukovanja otpadom	Smanjenje emisija stakleničkih plinova	Pritužbe na miris i druge neugodnosti

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

#### 3.1. Materijali

##### 3.1.1. Biootpad

Prilikom provedbe pokusa P1 korišten je biootpad na slici 3.1. a). Korišteni biootpad se sastojao od: ljuski kestena, kora mandarine, kora banane, kora krumpira, kora limuna, kora naranče, kora mrkve, tikve, zelene salate, jabuka te granja i lišća kao strukturnog materijala koji je dodan u cilju učvršćivanja mješavine te regulacije vlažnosti. Za provedbu pokusa P2 korišten je biootpad na slici 3.1. b) koji se sastojao od: 342,4 g kora banane, 108,8 g kora celera, 72,8 g kora cikle, 97,6 g kora jabuke, 980,8 g kora krumpira, 146,4 g kora limuna, 108,8 g kora luka, 327,2 g kora mrkve, 97,6 g kora naranče, 145,6 g kora rajčice, 72,8 g kora tikve, 368,8 g kruha, 399,2 g kupusa, 36,0 g ljuski jajeta te 99,2 g granja i 595,2 g lišća.



a)



b)

**Slika 3.1.** Mješavina biootpada: a) pokus P1, b) pokus P2

## 3.2. Mediji i kemikalije

### 3.2.1. Hranjivi agar

Za uzgoj i određivanje ukupnog broja bakterija pripremljen je hranjivi agar (HA) prema uputama proizvođača (Biolife Italiana). U Erlenmeyerovoj tikvici otopljeno je 8 g hranjivog bujona i 18 g agara u 1 L destilirane vode. Homogenizirana podloga ostavljena je 15 minuta da nabubri, a zatim je tri puta na plameniku zagrijavana do vrenja, ohlađena i potom sterilizirana 15 minuta u autoklavu pri 121 °C i 1,1 atm.

### 3.2.2. Sladni (malt) agar

Za uzgoj i određivanje ukupnog broja kvasaca (gljive i plijesni) pripremljen je sladni agar (SA) prema uputama proizvođača (Biolife Italiana). U Erlenmeyerovoj tikvici otopljeno je 47 g podloge u 1 L destilirane vode. Homogenizirana podloga ostavljena je 15 minuta da nabubri, a zatim je zagrijavana na plameniku tri puta do vrenja, ohlađena i potom sterilizirana 15 minuta u autoklavu pri 121 °C i 1,1 atm.

### 3.2.3. Selektivne hranjive podloge

Za uzgoj bakterija *Salmonelle* sp., *Pseudomonas aeruginose*, *Escherichie coli* i *Enterococcus faecalis* pripremljene su selektivne i diferencijalne podloge: Xylosa Lysine Deoxycholate agar (XLD), *Pseudomonas selective* agar (PS), Chromogenic Coliform Agar (CCA) i Azide maltose agar (FS). XLD podloga je selektivna hranjiva podloga koja koristi za određivanje *Sallmonele* sp. u vodi na 37 °C, 24 h. Kolonije *Sallmonele* sp. biti će crno obojane. *Pseudomonas selective* agar je selektivna hranjiva podloga koja se koristi za određivanje broja *Pseudomonas aeruginosa* na 37 °C, 18-24 h, prema normi HRN EN ISO 16266 (DIN EN ISO 16266 Water quality - Detection and enumeration of *Pseudomonas aeruginosa* - Method by membrane filtration (ISO 16266:2006); German version EN ISO 16266:2008. Kolonije *Pseudomonas aeruginose* će na podlozi PSA biti žuto-zelene i fluorescentne. CCA je selektivna hranjiva podloga koja se koristi za određivanje *Escherichia coli* i koliforma (*Klebsiella*, *Citrobacter*, *Enterobacter*) u vodi na 37 °C, 24-48 h prema normi HRN EN ISO 9308-1 (Kvaliteta vode -- Brojenje *Escherichia coli* i koliformnih bakterija -- 1. dio: Metoda membranske filtracije za vode s niskom pozadinom bakterijske flore

(ISO 9308-1:2014; EN ISO 9308-1:2014). Kolonije *E. coli* će na podlozi CCA biti metalno plave do ljubičaste boje, druge koliformne bakterije rozkasto-crvene, a druge bakterije bezbojne. Na podlozi neće rasti G (+) bakterije. FS podloga je selektivna hranjiva podloga koja se koristi za određivanje fekalnih streptokoka odnosno enterokoka u vodi na 37 °C, 24 h, prema normi HRN EN ISO 7899-2:2000 (Kakvoća vode -- Detekcija i brojenje crijevnih enterokoka -- 2. dio: Metoda membranske filtracije (ISO 7899-2:2000; EN ISO 7899-2:2000)). Kolonije fekalnih streptokoka biti će crveno obojane.

### **3.2.4. Fiziološka otopina**

Fiziološka otopina pripravljena je otapanjem 0,9 g soli natrijeva klorida u 100 mL destilirane vode. Pripremljena 0,9 % otopina natrijeva klorida zatim je pipetirana u epruvete potrebne za pripravu decimalnih razrjeđenja.

### **3.2.5. Hranjiva podloga za uzgoj bakterije *Vibrio fischeri***

Za pripremu i održavanje čiste bakterijske kulture *Vibrio fischeri* koristila se odgovarajuća čvrsta hranjiva podloga. Pripremala se otapanjem 30,0 g NaCl, 10,0 g glicerola, 5,0 g CaCO<sub>3</sub>, 5,0 g peptona, 3,0 g kvašćevog ekstrakta te 15,0 g agara u 1 L deionizirane vode. Tako pripravljena hranjiva podloga sterilizirala se u autoklavu vlažnom sterilizacijom. Kultura se na takvoj podlozi uzgajala u termostatu pri 20°C. Za resuspendiranje bakterijske kulture koristila se hranjiva izosmotska otopina pripravljena otapanjem 20,0 g NaCl, 0,2 g KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0,5 g CaCl<sub>2</sub>, 0,2 g MgSO<sub>4</sub>, 10,0 g glukoze, 10,0 g rafinoze te 0,5 mL glicerola u 1 L vode. Tako pripravljena otopina se prokuha i ohladi. Budući da pH-vrijednost otopine za resuspenziju mora biti između 6,8 i 7,2, po potrebi dodaje se još nekoliko kapi 1 M otopine HCl ili 1 M otopine NaOH. Nakon pripreme, otopina se čuva u zamrzivaču. Budući da se bakterija *Vibrio fischeri* prirodno nalazi u moru, otopinom natrijeva klorida simuliraju se njoj prirodni uvjeti. Otopina se pripremila otapanjem 2 g NaCl u 100 mL deionizirane vode čime se dobiva otopina s masenim udjelom NaCl od 2%. Kao i otopina za resuspenziju, otopina natrijevog klorida mora imati pH-vrijednost između 6,8 i 7,2, koja se po potrebi podesila s već spomenutim otopinama HCl i NaOH.

Kao radni standard za provjeru valjanosti bakterijske kulture, koristila se otopina kalijeva bikromata, K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, masene koncentracije  $\gamma = 0,0187 \text{ g L}^{-1}$ .

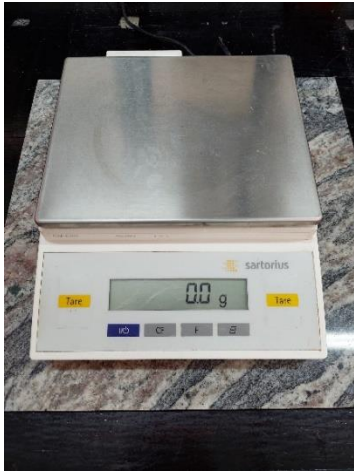
### 3.3. Mjerni instrumenti i oprema

- Vaga sartorius GM 6101 s čitljivošću od 0,1 g
- Analitička vaga KERN ALJ 220-4NM s čitljivošću od 0,0001 g
- Rotacijska tresilica Biosan Multi-functional Orbital Shaker PSU-20i
- Prijenosni mikroprocesorski mjerač Multi 3430, WTW – za određivanje pH - vrijednosti, koncentracije otopljenog kisika i električne provodnosti
- Autoklav Sutjeska - za sterilizaciju hranjivih podloga, fiziološke otopine, destilirane vode, čistog staklenog posuđa, kao i onečišćenog posuđa
- Homogenizator IKA MS2 Minishaker - za homogeniziranje pripremljenih decimalnih razrjeđenja
- Termostat Binder FED 400 - za uzgoj bakterija na 37 °C
- Termostat EBT Termomedicinski aparati Bodalec - za uzgoj gljiva na 28 °C te uzgoj bakterija i gljiva na 50 °C
- Sterilni membranski filtar s vakuum pumpom – za metodu membranske filtracije

Za potrebe gravimetrijske analize korišteni su:

- Sušionik sterimatic ST-11, Instrumentaria Zagreb pri 105 °C
- Žarna peć Controller B 180, Nabertherm pri 550 °C
- Analizator ASI-V, Shimadzu - za provedbu TOC analize
- Luminometar LUMIStox 300 i termostatirani inkubacijski blok Lumistherm s termostatom, Dr. Lange - za provedbu testa ekotoksičnosti primjenom morske bakterije *Vibrio fischeri*

Mjerni instrumenti prikazani su na slici 3.2.



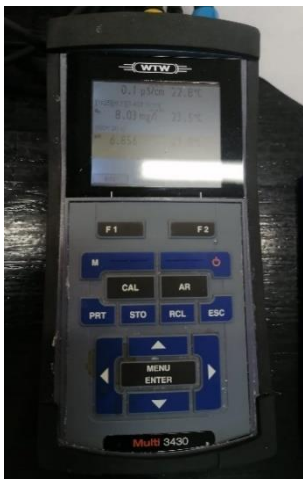
a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)



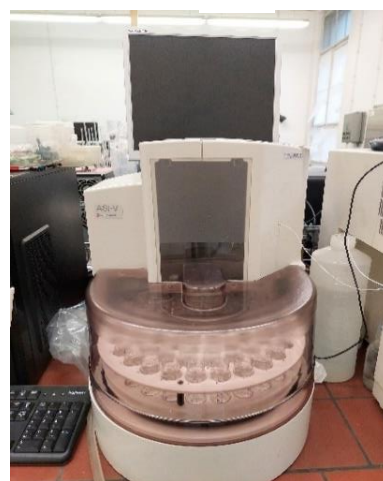
i)



j)



k)



l)

**Slika 3.2.** Mjerni instrumenti: a) vaga, b) analitička vaga, c) rotacijska tresilica, d) prijenosni mikroprocesorski mjerač, e) autoklav, f) homogenizator, g) termostat pri 37 °C, h) termostat pri 50 °C, i) sušionik, j) žarna peć, k) luminometar i termostatirani inkubacijski blok, l) analizator TOC

TOC analizator se nalazi u sklopu *spin-off* tvrtke CWT (engl. *Comprehensive Water Technology*) na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije.

### 3.4. Analitički postupci

#### 3.4.1. Fizikalno-kemijska karakterizacija supstrata tijekom procesa kompostiranja

##### 3.4.1.1. Određivanje suhe tvari

Maseni udio suhe tvari, odnosno sadržaj vlage, određivan je sušenjem uzorka pri 105 °C do konstantne mase. Iz razlike mase prije i poslije sušenja određena je masa vode, odnosno maseni udio vlage u uzorku (3.1.) te maseni udio suhe tvari (3.2.):

$$w(\text{H}_2\text{O}) = \frac{m(\text{VT}) - m(\text{ST})}{m(\text{VT})} \quad (3.1.)$$

$$w(\text{ST}) = 1 - w(\text{H}_2\text{O}) \quad (3.2.)$$

gdje  $w(\text{H}_2\text{O})$  predstavlja udio vlage u uzorku;  $m(\text{VT})$  masu vlažnog uzorka, kg;  $m(\text{ST})$  masu suhog uzorka, kg;  $w(\text{ST})$  udio suhe tvari u uzorku.

##### 3.4.1.2. Određivanje hlapive tvari

Udio hlapive tvari u kompostnoj masi određivan je žarenjem osušenog uzorka u žarnoj peći pri 500 °C 3-4 h, odnosno do konstantne mase. Osušeni uzorak prethodno je spaljen na plameniku u digestoru. Iz razlike mase suhe tvari i mase pepela, prema jednadžbi (3.3.) određen je maseni udio hlapive tvari u uzorku. Udio ugljika izračunat je iz empirijskog izraza 3.4.

$$w(\text{HT}) = \frac{m(\text{ST}) - m(\text{pepeo})}{m(\text{ST})} \quad (3.3.)$$

$$w(\text{C}) = \frac{w(\text{HT})}{1,8} \quad (3.4)$$

$m(\text{ST})$  – masa suhog uzorka,  $m(\text{pepeo})$  – masa pepela [g],  $w(\text{HT})$  – maseni udio hlapive tvari u uzorku [%],  $w(\text{C})$  – maseni udio ugljika u uzorku [%].



### **3.4.1.3. Određivanje pH - vrijednosti, koncentracije otopljenog kisika i električne provodnosti**

Određivanje se provodilo na prijenosnom mikroprocesorskom mjerачu s tri elektrode za određivanje pH-vrijednosti, koncentracije otopljenog kisika i električne provodnosti. Na rotacijskoj tresilici u Erlenmayerovoj tikvici homogenizirano je 10 g supstrata (po suhoj tvari) u 100 mL destilirane vode 15 minuta na 160 okr./min. Uzorak je zatim filtriran kroz naborani filter papir, a vrijednosti su određivane uranjanjem elektroda u filtrat.

### **3.4.1.4. Određivanje ukupnog organskog ugljika (TOC) u priređenom eluatu supstrata i procjednoj vodi**

TOC analiza provodi se u svrhu određivanja ukupnog ugljika, TC (eng. Total Carbon), organskog ugljika, TOC (eng. Total Organic Carbon) i anorganskog ugljika, TIC (eng. Total Inorganic Carbon). U Erlenmayerovu tikvicu odvagano je 10 g supstrata (po suhoj tvari) i dodano 100 mL destilirane vode te je miješano na rotacijskoj tresilici 15 minuta na 160 okr./min, a na kraju je profiltrirano kroz naborani filter papir. Za analizu je automatskom pipetom izuzeto 0,5 mL homogeniziranog miješanog uzorka ili 0,5 mL uzorka procjednih voda te se pomoću šprice profiltriralo kroz okrugli filter papir promjera pora 0,45  $\mu\text{m}$ . Uzorci nisu razrjeđivani. Za određivanje rezultata TC, u bočice se dodaje 9,5 mL destilirane vode, a za određivanje rezultata TOC u bočice se osim 9,5 mL destilirane vode dodaje i 3 kapi sumporne kiseline. Bočice se zatim stavljaju u TOC analizator na analizu. Vrijednost anorganskog ugljika, TIC, dobije se računanjem razlike ukupnog ugljika, TC, i organskog ugljika, TOC. Sve vrijednosti izražene su u mg/L.

### **3.4.2. Mikrobiološka analiza supstrata tijekom procesa kompostiranja**

Kako bi se odredio ukupan broj stanica mikroorganizama, odnosno CFU (Colony Forming Units) u Erlenmayerovu tikvicu odvagano je 10 g supstrata (po suhoj tvari) i dodano 100 mL destilirane vode. Sadržaj Erlenmayerove tikvice s uzorkom potom je miješan na rotacijskoj tresilici 15 minuta na 160 okr./min. Nakon homogenizacije pripremljena su decimalna razrjeđenja u rasponu razrjeđenja od  $10^{-1}$  do  $10^{-6}$ . U pripremljene Petrijeve zdjelice potom je otpipetiran 1 mL odgovarajućeg dobro homogeniziranog razrjeđenja uzorka koji je zatim homogeniziran zajedno s izlivenim hranjivim agarom odnosno sladnim agarom (izraz 3.5.). Prethodno je u bočicu sa sladnim agarom dodan antibiotik kako bi se inhibirao rast bakterija. Petrijeve zdjelice s hranjivim

agarom inkubirane su 24-48 h na 37 °C za rast mezofilnih bakterija te na 50 °C za rast termofilnih bakterija. Petrijeve zdjelice sa sladnim agarom inkubirane su 3-5 dana na 28 °C za rast mezofilnih gljiva te na 50 °C za rast termofilnih gljiva. Nakon inkubacije, broj izraslih kolonija određivan je izravnim brojanjem, a rezultat izražen kao  $g_{ST}^{-1}$ . Analiza je provedena sterilnom tehnikom rada.

$$CFU \text{ cm}^{-3} = \frac{\text{Broj poraslih kolonija}}{V(\text{cm}^3 \text{ korištenog uzorka})} \cdot \frac{1}{\text{razrjeđenje}} \quad (3.5)$$

U uzorcima u kojima je dokazana prisutnost bakterija, metodom membranske filtracije se odredila prisutnost *E. coli*, *E. faecalis*, *Salmonelle* sp. i *Pseudomonas aeruginose*. 1 mL uzorka profiltrirano je kroz sterilni membranski filter promjera pora 0,45 µm. Bakterije iz uzorka se na taj način skupljaju na membrani filtra, koja se aseptično prenese sterilnom pincetom iz filtarskog lijevka na diferencijalnu hranjivu podlogu za uzgoj bakterija i inkubira pri odgovarajućoj temperaturi tijekom 24 h.

### **3.4.3. Određivanja ekotoksičnosti eluata i procjedne vode (pomoću morske bakterije *Vibrio fischeri*)**

Test ekotoksičnosti primjenom morske bakterije *Vibrio fischeri* provodi se u svrhu određivanja aerobne toksičnosti. Metoda se temelji na procjeni smanjenja fiziološke aktivnosti čiste kulture bakterija *Vibrio fischeri* u prisutnosti toksičnih tvari. Za provedbu testa potreban je uzorak za analizu, otopina za resuspenziju, hranjiva podloga s bakterijskom kulturom *Vibrio fischeri* i 2% otopina NaCl. pH uzorka za analizu mora biti između 6 i 8,5. Prema potrebi pH se podesio dodatkom NaOH ili HCl. Eluat se priredio na isti način kao i za TOC analizu, poglavlje 3.4.1.4. Uzorci prikupljenih procjednih voda također nisu razrjeđivani te su profiltrirani kroz okrugli filter papir. Prije početka same analize u mračnoj sobi provjerila se luminiscencija bakterijske kulture. Resuspenzija bakterija pripremila se u bočici s čepom koja se napunila 2/3 otopinom za resuspenziju. Sterilnom tehnikom rada zatim se, u zoni plamenika, Pasteur pipetom povlačenjem izuzela čista kultura bakterije te resuspendirala u bočici s otopinom za resuspenziju. Kao zadnji korak, bočica se dopunila otopinom 2 % NaCl i dobro promućkala te zatim stavila na termostatirani inkubacijski blok na pola sata pri 15 °C kako bi se bakterijska kultura adaptirala. Prije početka izvođenja testa, kivete su postavljene i ostavljene 15 minuta pri 15 °C na termostatiranom bloku.

Termostatirani blok sastoji se od tri reda, A, B i C s po 10 mjesta za kivete. U redu A pripremljena su razrijeđenja uzorka, a u redu B i C nalazile su se kivete u koje je pipetirano 0,5 mL inokuluma.

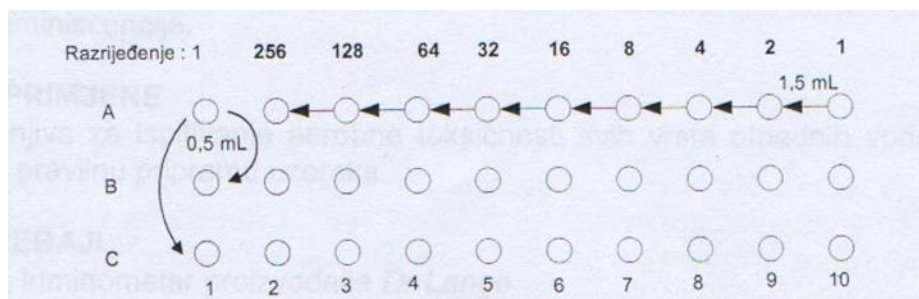
Uzorak za analizu razrijeđen je geometrijskim nizom (Slika 3.3.):

1. Prva kiveta napunjena je 2/3 kivete 2% NaCl
2. Kivete 2-9 napunjene su s 1,5 mL 2% NaCl
3. Zadnja kiveta napunjena je s 2/3 uzorka

Razrijeđenje geometrijskim nizom pripremljeno se počevši od najmanjeg do najvećeg, tako da se po 1,5 mL dobro homogeniziranog uzorka prebacivao iz kivete u kivetu, s desna na lijevo, od kivete broj 10 do kivete broj 1.

Početna luminiscencija, odnosno relativna luminiscencija, određivana je prije početka testa. Na glavnom izborniku bilo je potrebno odabrati program LU te na taj način provjeriti aktivnost bakterijske kulture koja je morala iznositi najmanje 1000 da bi se test mogao započeti.

Nakon odrađene pripreme, na luminometru je bilo potrebno odabrati EC program i postaviti odgovarajuće postavke te je zatim uslijedilo mjerenje. Mjerenje je započeto određivanjem početne luminiscencije inokuluma u kivetu B1 u koju je zatim stavljeno 0,5 ml uzorka iz kivete A1. Potom je uzeta kiveta C1 i određena početna luminiscencija te je dodano 0,5 mL uzorka iz A1 u C1. Mjerenje je na isti način nastavljeno za sve preostale kivete. B i C nizovi su bili paralele. Nakon 30 minuta inkubacije, izmjerena je luminiscencija za sve kivete B i C niza te su dobivene vrijednosti EC<sub>20</sub>, EC<sub>50</sub> i fk. Vrijednosti EC<sub>20</sub> i EC<sub>50</sub> predstavljaju volumni udio (%) uzorka pri kojemu dolazi do 20%-tnog, odnosno 50%-tnog pada luminiscencije.



**Slika 3.3.** Priprava geometrijskog niza.

### 3.5. Provedba procesa kompostiranja

Proces kompostiranja provodio se u reaktorima radnih volumena,  $V_r = 10$  L. Provedena su dva pokusa, P1 i P2, u dva reaktora, R1 i R2. Prikupljeni biootpad je isjeckan i izrezan na potrebnu veličinu, 1-5 cm. Sav biootpad je izvagan, promiješan i jednoliko raspodijeljen u dva reaktora, R1 i R2, koji su postavljeni na plastične posude u koje se skupljala procjedna voda. Početni uvjeti prikazani su u tablici 3.1. Na slici 3.4. prikazani su reaktori radnih volumena,  $V_r = 10$  L.



Slika 3.4. Reaktor 1 (R1) i reaktor 2 (R2).

Temperatura kompostne smjese u reaktorima mjerila se pomoću termometra. U određenim vremenskim periodima, ovisno o temperaturi, izuzimao se uzorak supstrata i određivani su fizikalno-kemijski i mikrobiološki pokazatelji. Početni uvjeti za oba pokusa P1 i P2 prikazani su u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Početni uvjeti pokusa kompostiranja, P1 i P2.

POKUS	P1 (R1 i R2)	P2 (R1 i R2)
Supstrat	Biootpad – nepoznati točan sastav	Biootpad – poznati točan sastav (supstrat napravljen prema početnim fiz.-kem. karakteristikama)
$m$ (vlažnog uzorka) / kg	4	
$V$ (reaktora) / dm <sup>3</sup>	10	
$w$ (vlage) / %	80 – 84	69 – 70
Omjer C:N / -	25/1	30/1
pH - vrijednost / -	5,13	6,11
Veličina čestica supstrata / cm	1 - 5	
Vrijeme trajanja / d	16	14

## 4. REZULTATI

U slikama 4.1. i 4.2. prikazan je supstrat na kraju procesa kompostiranja P1 i P2 u R1 i R2.



a)

b)

**Slika 4.1.** Supstrat na kraju procesa kompostiranja P1: a) R1 i b) R2.



a)

b)

**Slika 4.2.** Supstrat na kraju procesa kompostiranja P2: a) R1 i b) R2.

U tablici 4.1. dani su rezultati fizikalno-kemijske karakterizacije supstrata, eluata i procjednih voda za oba pokusa, P1 i P2, tijekom procesa kompostiranja.

**Tablica 4.1.** Fizikalno-kemijska karakterizacija supstrata, eluata i procjernih voda tijekom procesa kompostiranja.

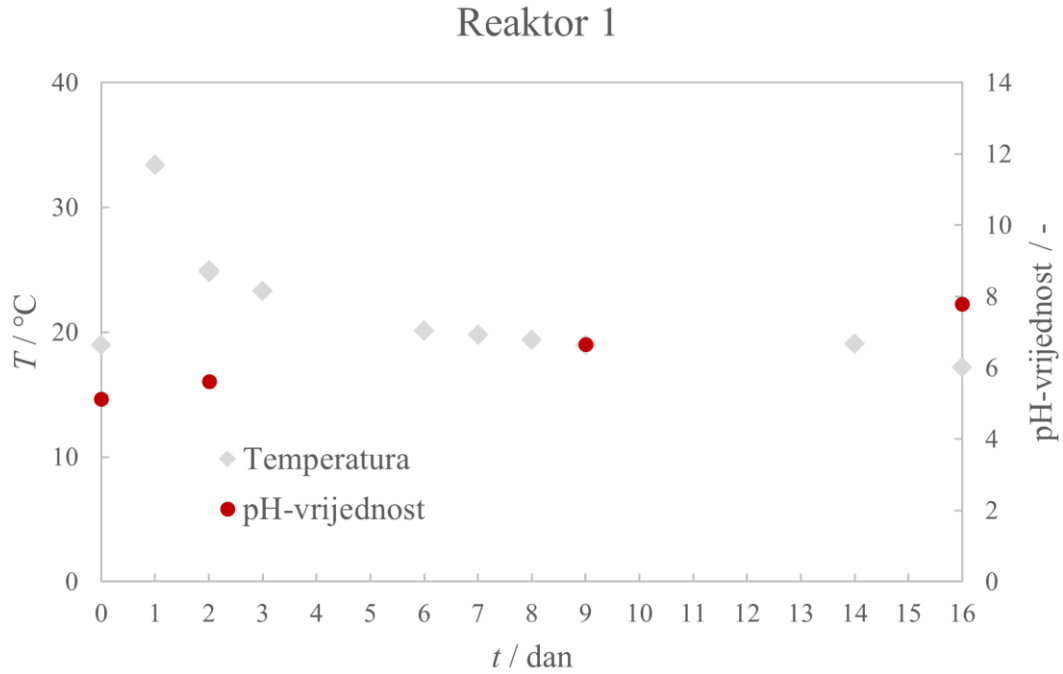
Pokus	P1				P2			
	R1		R2		R1		R2	
Reaktor								
$t$ / dan	0	16	0	16	0	14	0	14
$w$ (vlage) <sub>supstrat</sub> / %	83,54	80,42	83,54	81,15	70,38	69,67	70,38	71,13
$w$ (suhe tvari) <sub>supstrat</sub> / %	16,46	19,58	16,46	18,85	29,62	30,33	29,62	28,87
$w$ (hlapive tvari) <sub>supstrat</sub> / %	90,85	86,54	90,85	89,23	89,09	87,10	89,09	81,12
$\gamma$ (TOC <sub>eluat supstrata</sub> ) / mg/L	59,24	26,72	59,24	19,47	125,00	21,27	125,00	17,54
Omjer C/N <sub>supstrat</sub> / -	25	22	25	22	30	17	30	15
pH- vrijednost <sub>eluat supstrata</sub> / -	5,13	7,79	5,13	7,84	6,11	8,58	6,11	8,45
$\kappa$ <sub>eluat supstrata</sub> / $\mu\text{S/cm}$	682	1014	682	996	1310	2260	1310	2270
TU <sub>eluat supstrata</sub> / %	8,65	6	8,65	6,57	17,67	15,54	17,67	15,76
Kategorija toksičnosti <sub>eluat supstrata</sub>	Toksično				Toksično			
$V$ (procjedne vode) <sub>ukupno</sub> / mL	166		79		27		0	
TU <sub>procjedne vode</sub> / %	24,33		11,54		29,19			
Kategorija toksičnosti <sub>procjedne vode</sub>	Toksično				Toksično			
$\gamma$ (TOC <sub>procjedne vode</sub> ) / mg/L	114,2		203,3		200,02			
pH- vrijednost <sub>procjedne vode</sub> / -	9,79		5,67		9,889			
Konverzija <sub>supstrata</sub> / %	24,98		23,76		37,19		56,92	

#### 4.1. Provedba procesa kompostiranja u P1

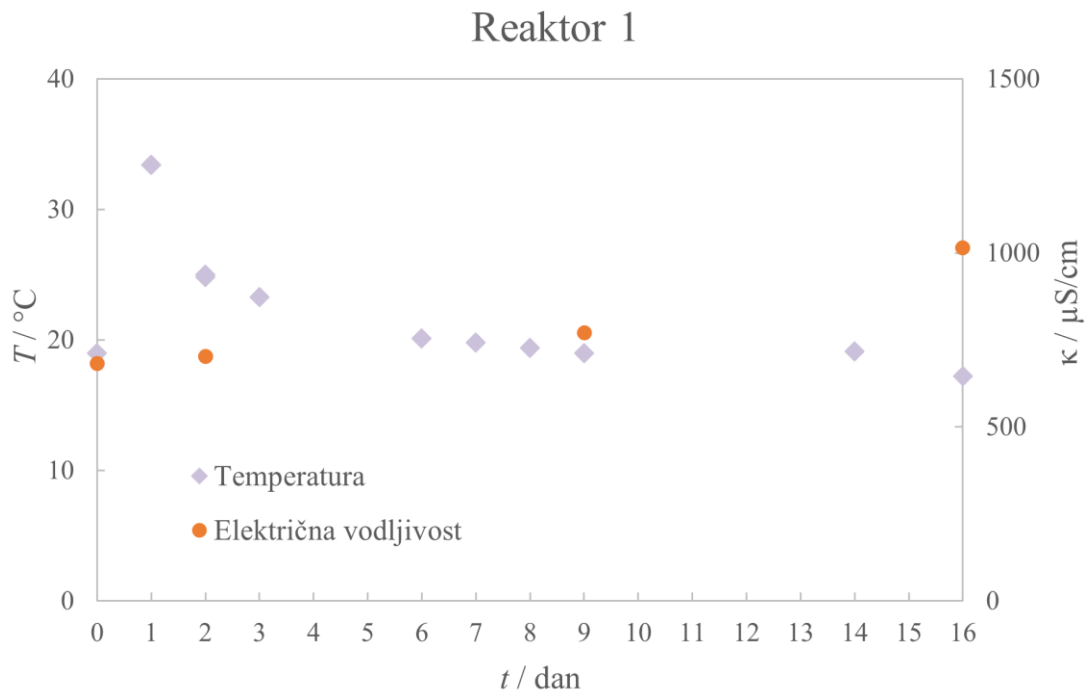
U ovom poglavlju prikazani su rezultati prvog pokusa kompostiranja u reaktorima R1 i R2 radnih volumena  $V_r = 10$  L. Proces kompostiranja za prvi pokus trajao je 16 dana.

##### 4.1.1. Kompostiranje u reaktoru R1

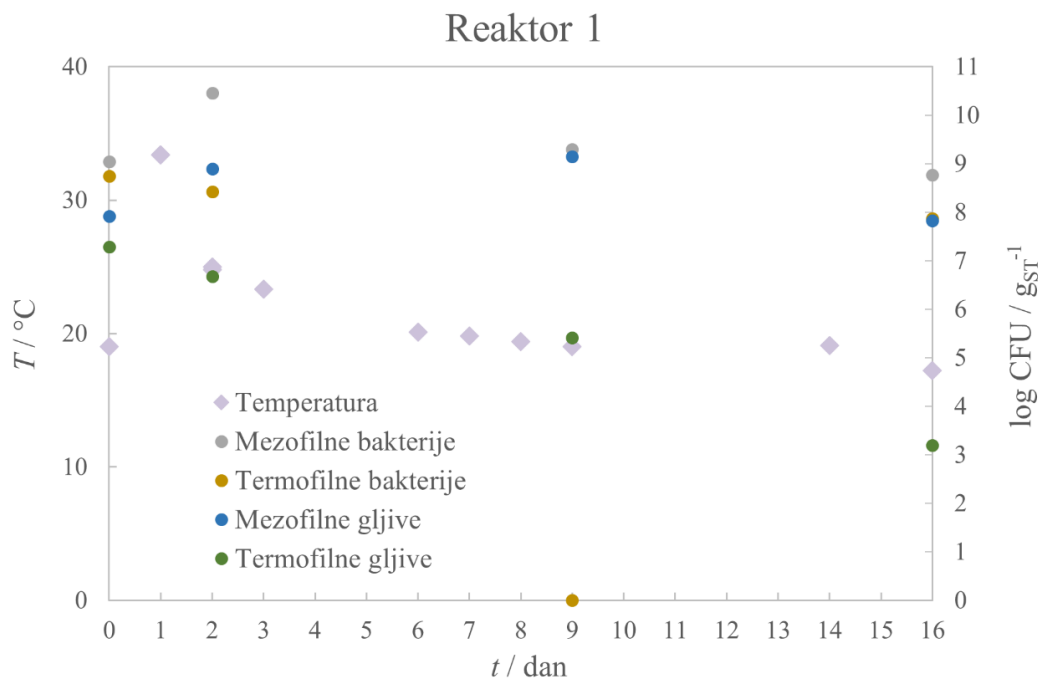
U slikama 4.3. do 4.5. prikazane su promjene pH-vrijednosti, električne vodljivosti te promjena ukupnog broja mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva u ovisnosti o temperaturi tijekom 16 dana pokusa P1 u R1.



**Slika 4.3.** Promjena pH-vrijednosti u ovisnosti o temperaturi tijekom 16 dana P1 u R1.



**Slika 4.4.** Promjena električne vodljivosti u ovisnosti o temperaturi tijekom 16 dana P1 u R1.

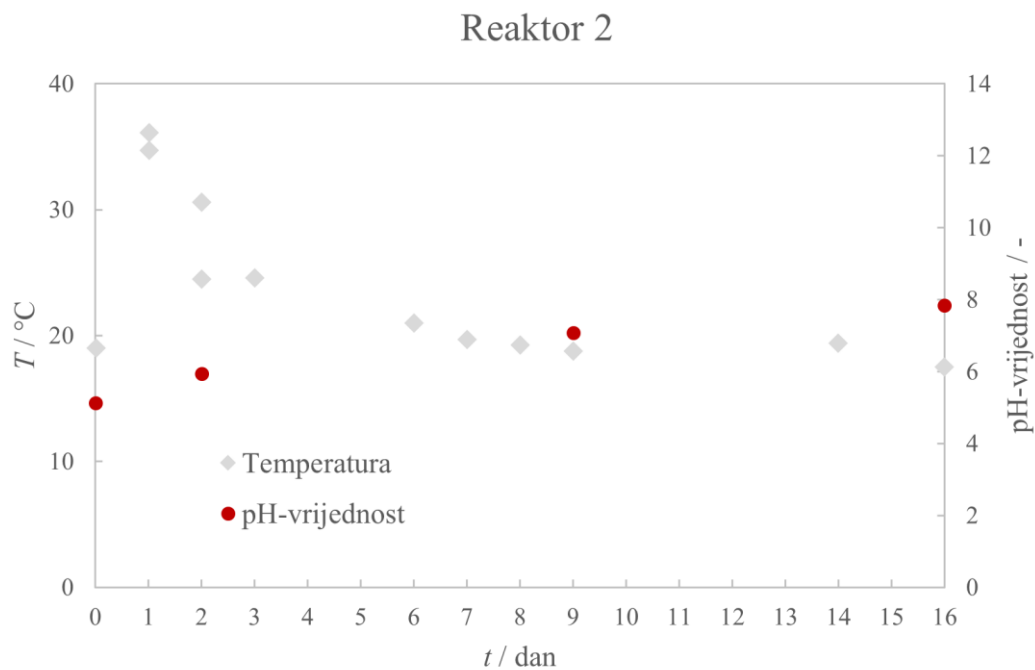


**Slika 4.5.** Promjena ukupnog broj mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva u ovisnosti o temperaturi tijekom 16 dana P1 u R1.

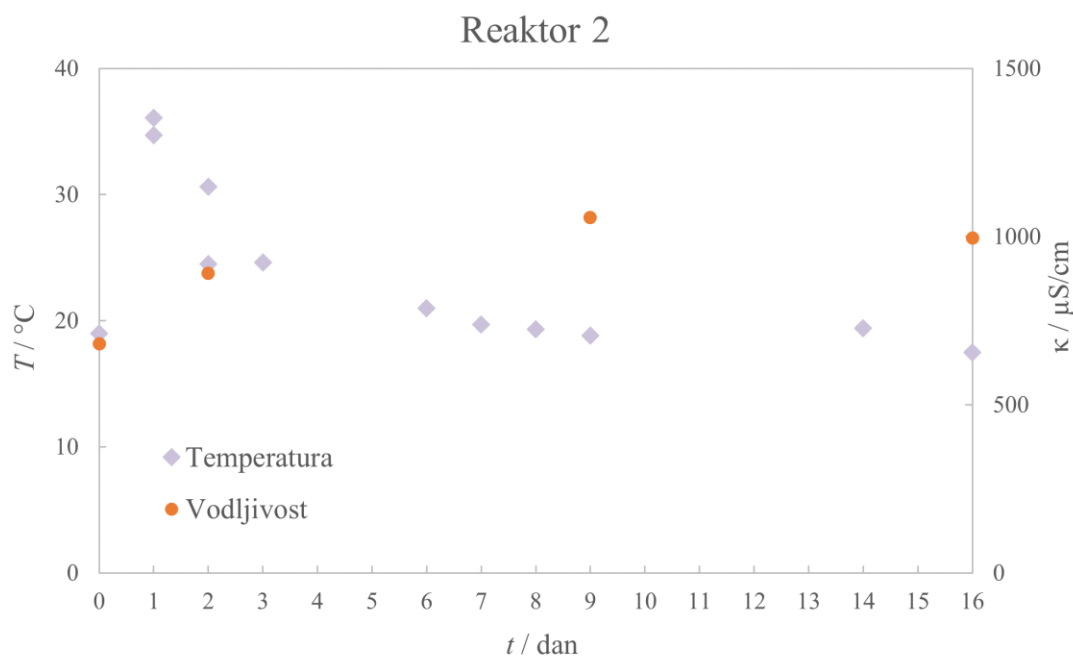
#### 4.1.2. Kompostiranje u reaktoru R2

U slikama 4.6. do 4.8. prikazane su promjene pH-vrijednosti, električne vodljivosti te promjena ukupnog broja mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva u ovisnosti o temperaturi tijekom 16 dana pokusa P1 u R2.

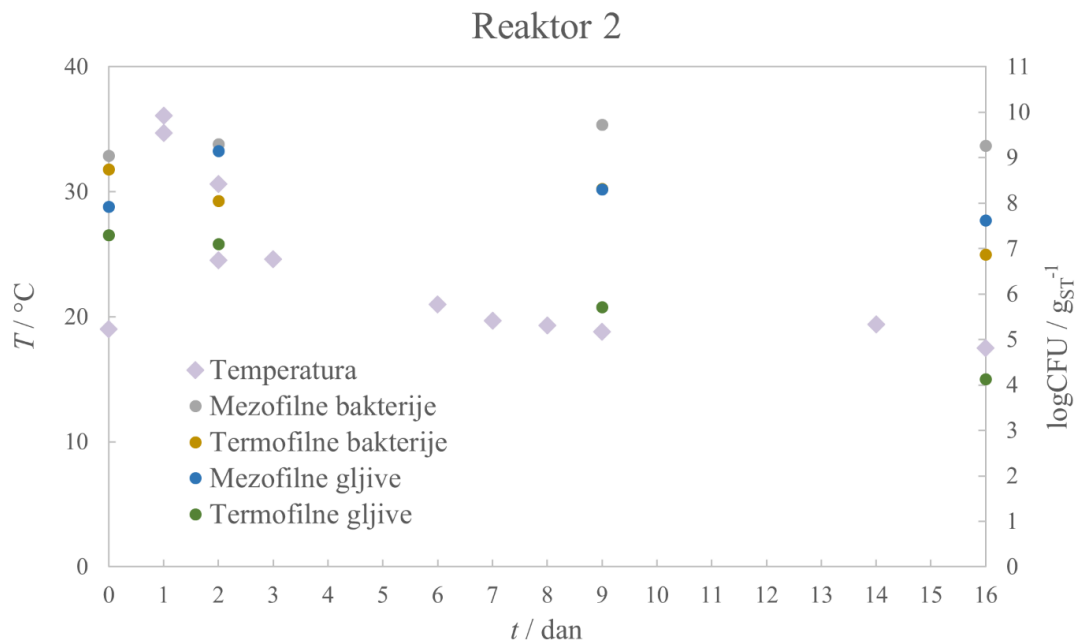




**Slika 4.6.** Promjena pH-vrijednosti u ovisnosti o temperaturi tijekom 16 dana P1 u R2.



**Slika 4.7.** Promjena električne vodljivosti u ovisnosti o temperaturi tijekom 16 dana P1 u R2.



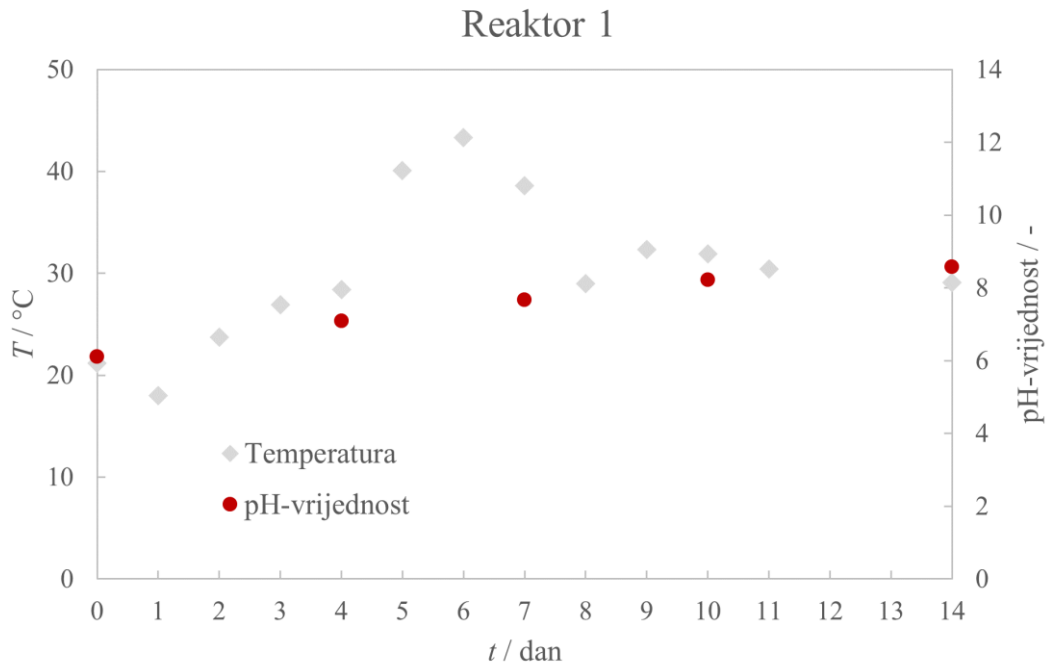
**Slika 4.8.** Promjena ukupnog broj mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva u ovisnosti o temperaturi tijekom 16 dana P1 u R2.

## 4.2. Provedba procesa kompostiranja u P2

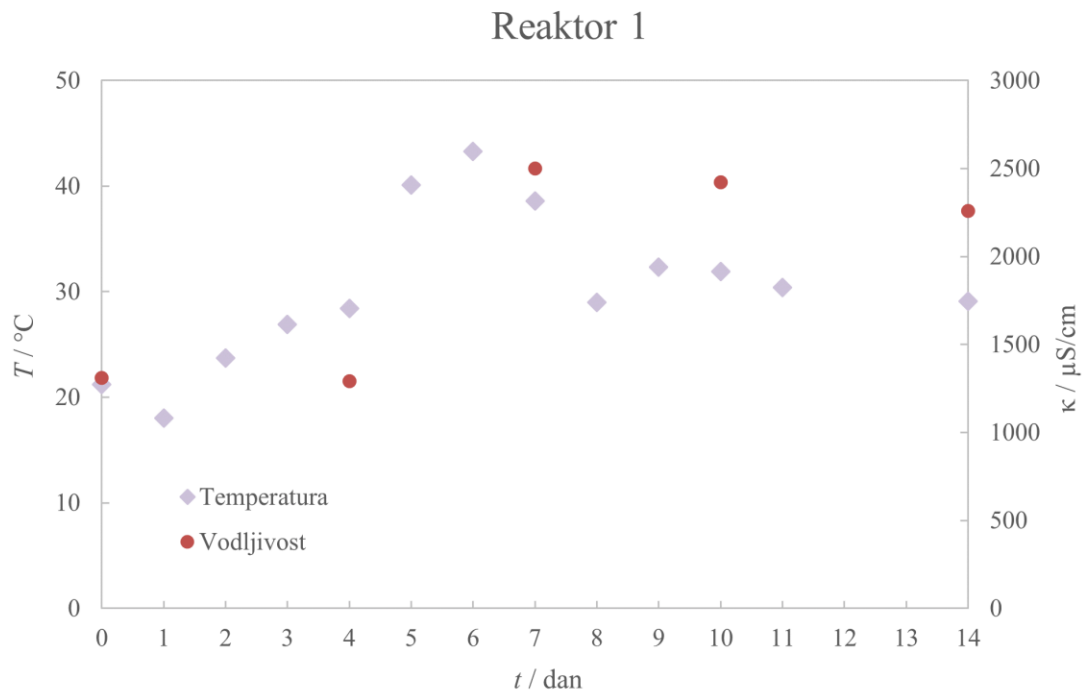
U ovom poglavlju prikazani su rezultati drugog pokusa kompostiranja u reaktorima R1 i R2 radnih volumena  $V_r = 10$  L. Proces kompostiranja za drugi pokus trajao je 14 dana.

### 4.2.1. Kompostiranje u reaktoru R1

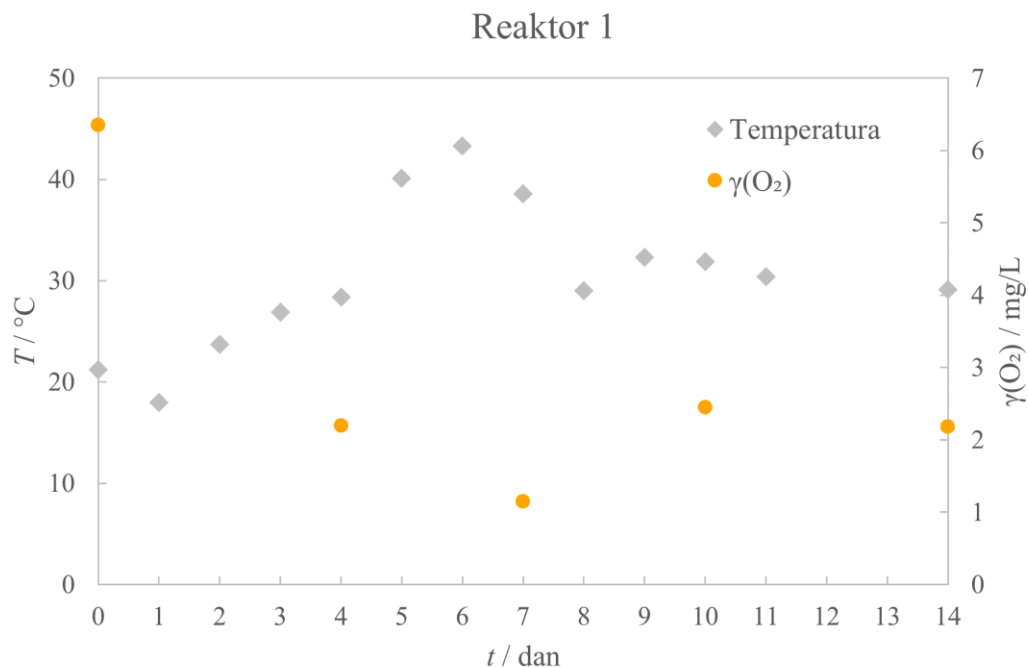
U slikama 4.9. do 4.12. prikazane su promjene pH-vrijednosti, električne vodljivosti, masene koncentracije kisika te promjena ukupnog broja mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva u ovisnosti o temperaturi tijekom 14 dana pokusa P2 u R1.



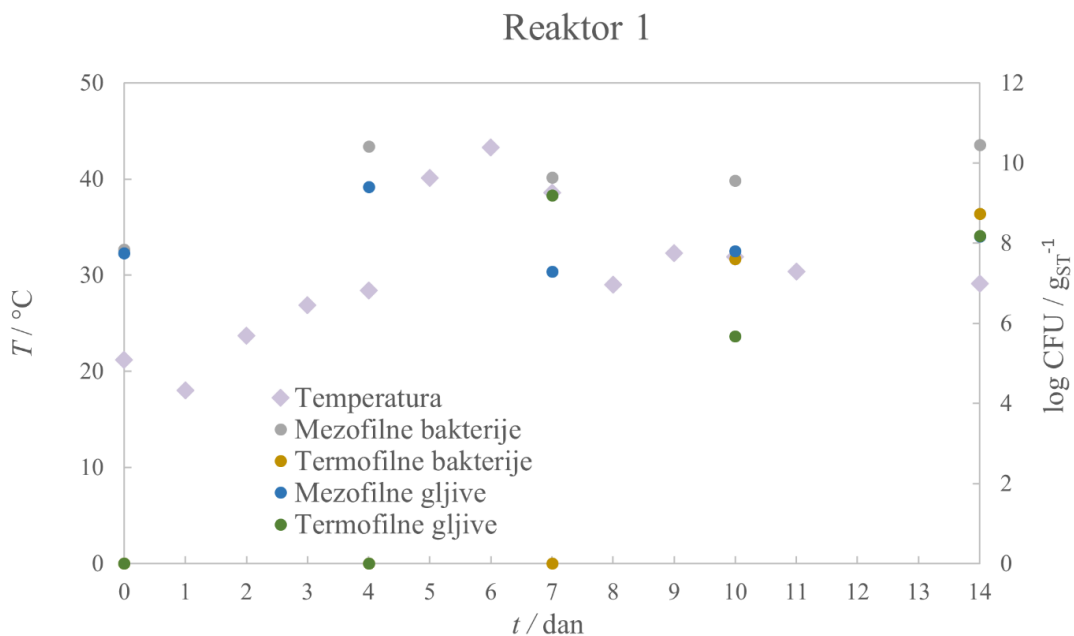
**Slika 4.9.** Promjena pH-vrijednosti u ovisnosti o temperaturi tijekom 14 dana P2 u R1.



**Slika 4.10.** Promjena električne vodljivosti u ovisnosti o temperaturi tijekom 14 dana P2 u R1.



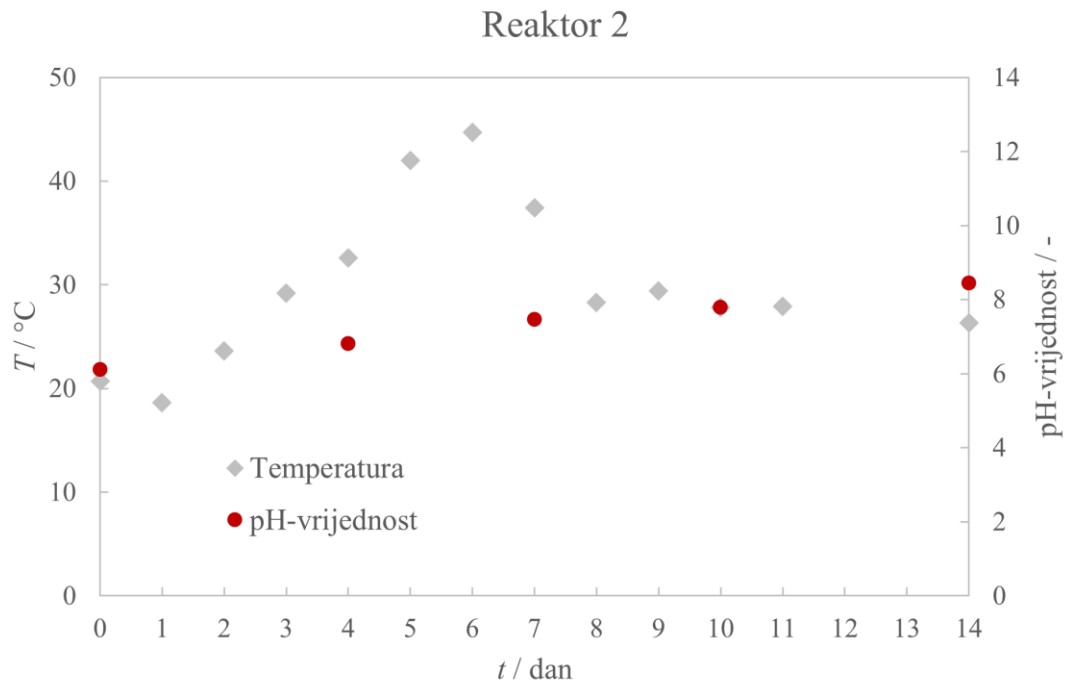
**Slika 4.11.** Promjena masene koncentracije kisika u ovisnosti o temperaturi tijekom 14 dana P2 u R1.



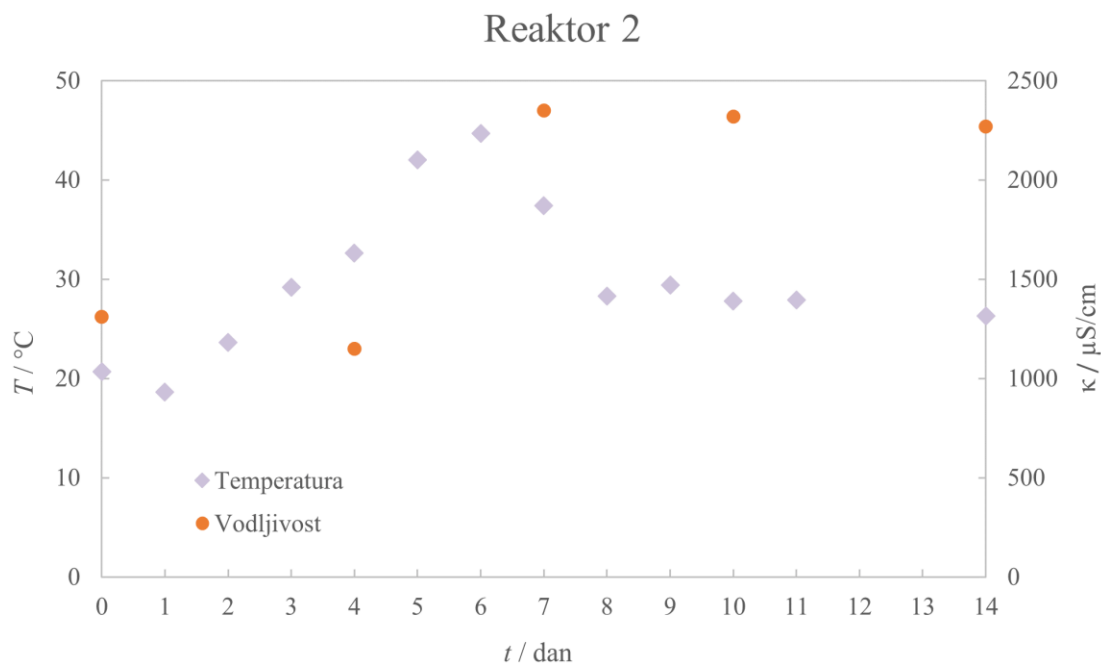
**Slika 4.12.** Promjena ukupnog broj mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva u ovisnosti o temperaturi tijekom 14 dana P2 u R1.

### 4.2.2. Kompostiranje u reaktoru R2

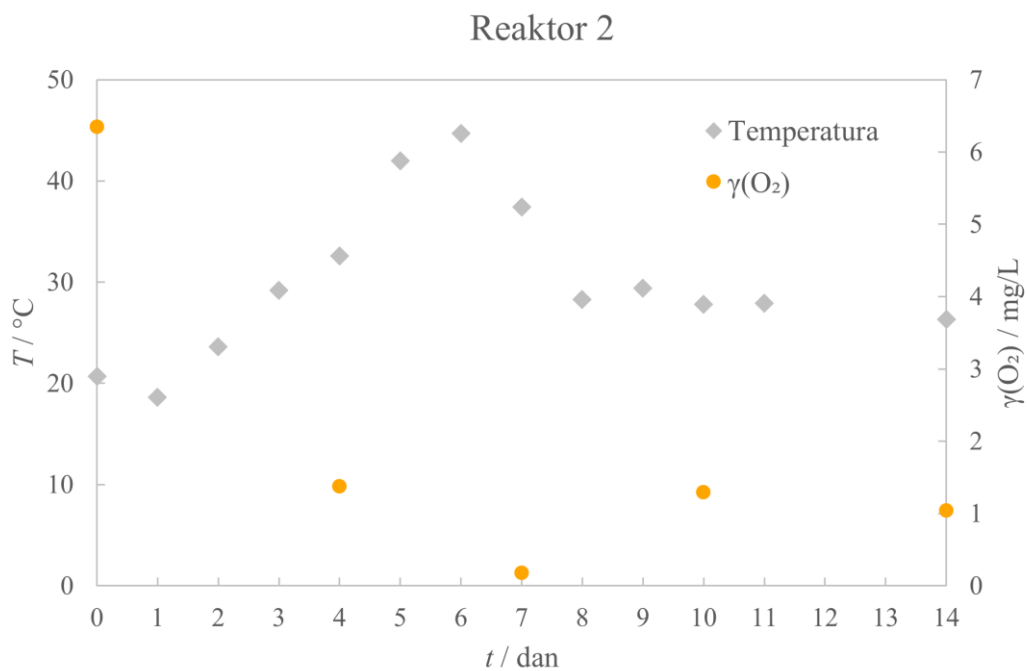
U slikama 4.13. do 4.16. prikazane su promjene pH-vrijednosti, električne vodljivosti, masene koncentracije kisika te promjena ukupnog broja mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva u ovisnosti o temperaturi tijekom 14 dana pokusa P2 u R2.



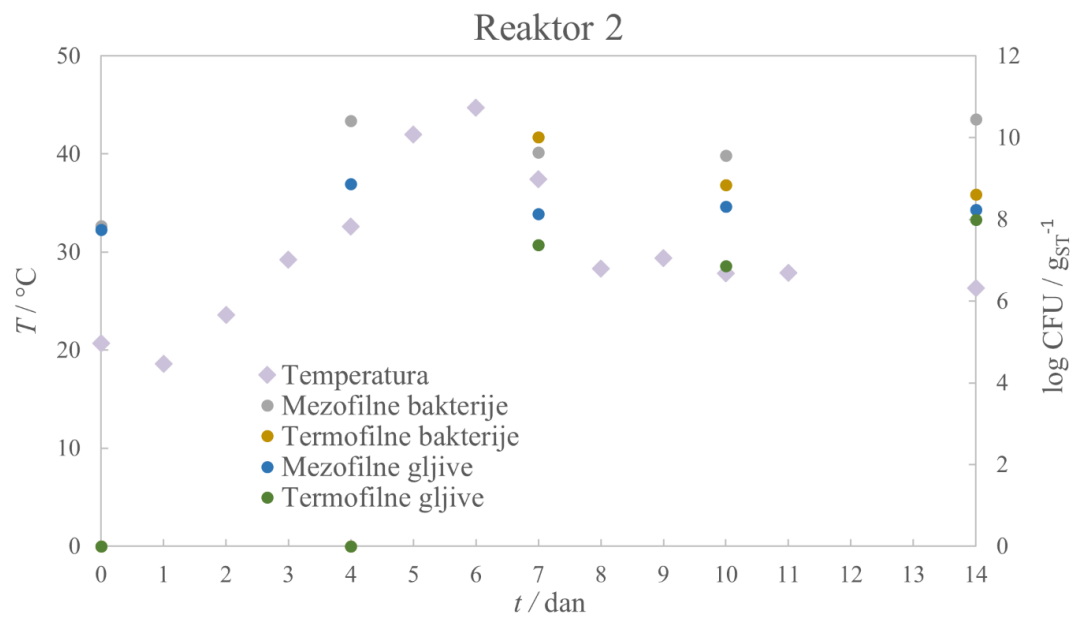
**Slika 4.13.** Promjena pH-vrijednosti u ovisnosti o temperaturi tijekom 14 dana P2 u R2.



**Slika 4.14.** Promjena električne vodljivosti u ovisnosti o temperaturi tijekom 14 dana P2 u R2.



**Slika 4.15.** Promjena masene koncentracije kisika u ovisnosti o temperaturi tijekom 14 dana P2 u R2.



**Slika 4.16.** Promjena ukupnog broj mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva u ovisnosti o temperaturi tijekom 14 dana P2 u R2.

## 5. RASPRAVA

Nepravilno odlaganje i povećana proizvodnja sve većih količina otpada negativno utječe na sve sastavnice okoliša. Oporabom otpada iskorištava se njegova vrijednost te sprječava onečišćenje okoliša. Jedan od načina uporabe otpada je proces kompostiranja biootpada. Biootpad je vrlo vrijedna sirovina čijim kompostiranjem dobivamo vrijedan produkt, kompost, te smanjujemo količine odloženog otpada na odlagalištima. Odlaganjem biootpada na odlagališta, dolazi do stvaranja velikih količina metana, jednog od štetnih stakleničkih plinova. Kompostiranjem smanjujemo emisije stakleničkih plinova i štitimo okoliš jer se za razliku od odlaganja stvara iznimno mala količina metana. Kompost služi kao hrana biljkama, osigurava prozračnost tla, zadržava vodu te na taj način povećava plodnost i kvalitetu tla.<sup>69</sup>

U ovome radu, provedena su dva pokusa (P1 i P2) kompostiranja u dva reaktora (R1 i R2) radnih volumena,  $V_r = 10$  L koji su provedeni s različitim sastavom i omjerima biootpada.

### 5.1. Fizikalno – kemijska karakterizacija supstrata u pokusu P1

Iz tablice 4.1. može se vidjeti da je početni maseni udio vlage supstrata u P1 u R1 iznosio 83,54 %, a u R2 80,42 %. Konačna vrijednost udjela vlage u R1 iznosila je 80,42 %, te u R2 81,15 %. Prema literaturi<sup>11</sup> udio vlage viši od 70 % utječe na cirkulaciju zraka, uzrokujući djelomičnu anaerobnost procesa, proizvodnju hlapivih organskih spojeva te neugodne mirise.

U P1, R1 maseni udio suhe tvari na početku, u 0. danu, iznosio je 16,46 %, a u 16. danu 19,58 %. Iz tablice 4.1. vidljivo je i smanjenje udjela hlapive tvari s početnih 90,85 % na 86,54 %. Također, omjer C/N je pao s početnih 25:1 na konačnih 22:1 u 16. danu (Tablica 4.1.). Tijekom procesa kompostiranja, prisutni mikroorganizmi razgrađuju organsku tvar te dolazi do smanjenja udjela hlapive tvari i smanjenja omjera C/N<sup>16</sup>, što je zabilježeno i u ovom radu. Mikrobiološka aktivnost dokazana je i određivanjem ukupnog organskog ugljika supstrata (TOC) čija se vrijednost smanjila s 59,24 mg/L na 26,72 mg/L. U procesu kompostiranja dolazi do stvaranja i raspada organskih kiselina, što se očituje promjenom pH-vrijednosti.<sup>30</sup> pH-vrijednost u početnim fazama procesa bila je blago kisela te je tijekom pokusa rasla s početnih 5,13 na 7,79. pH je značajan parametar koji određuje vrstu mikroorganizama koji mogu rasti i razmnožavati se te pritom razgrađivati organsku tvar.<sup>16</sup> Porast pH-vrijednost prikazan je na slici 4.3., a električne vodljivosti u slici 4.4. Postignuta konverzija tijekom 16. dana pokusa u R1 iznosila je 24,98 %.



Prisutnost procjednih voda primijećena je u 2. i 16. danu. Volumen u drugom danu iznosio je 108 mL, a u 16. danu 58 mL. Boja procjednih voda se tijekom procesa promijenila iz svijetlo smeđe u tamno smeđu boju zbog prisutnosti organske tvari. Neugodan, intenzivan i kiseo miris na početku zamijenio je blagi i nespecificirani miris zabilježen posljednjeg dana pokusa. pH-vrijednost procjednih voda 2. dana bila je blago kisela i iznosila je 5,07, dok je 16. dana iznosila 9,79.

U P1, R2 maseni udio suhe tvari na početku, u 0. danu, iznosio je 16,46 %, a u 16. danu 18,85 %. Promjena udjela hlapive tvari u R2 bila je manja u odnosu na R1 pa se tako maseni udio hlapive tvari smanjio s početnih 90,85 % na 89,23 % 16. dana. Mikrobiološka aktivnost zabilježena je i u R2 te je vrijednost omjera C/N iznosio jednakih 25:1 za 0. dan pokusa, dok je 16. dana pokusa iznosio 22:1, kao i kod R1. Maseni udio ukupnog organskog ugljika 0. dana pokusa iznosio je 59,24 mg/L, a 16. dana 19,47 mg/L. Iz slike 4.6. vidljiv je rast pH vrijednost tijekom P1. Najveća vrijednost električne vodljivosti postignuta je pri najvišoj temperaturi. Početna vrijednost električne vodljivosti iznosila je 682  $\mu\text{S}/\text{cm}$  te konačna 996  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , a promjena tijekom vremena prikazana je na slici 4.7. Konverzija postignuta tijekom 16 dana prvog pokusa kompostiranja u R2 iznosila je 23,78 %.

Procjedne vode za R2 primijećene su i prikupljene samo u 2. danu pokusa. Za razliku od R1, volumen je bio nešto niži, 79 mL. Zabilježena je tamno smeđa boja i kiseo, intenzivan miris. pH vrijednost je odgovarala blago kiselom području te je iznosila 5,673.

## **5.2. Fizikalno – kemijska karakterizacija supstrata u pokusu P2**

U P2, maseni udio vlage supstrata bio je nešto niži u odnosu na P1 te je u R1 iznosio 70,38 %, a u R2 71,13 %. Prema literaturi, optimalan sadržaj vlage kompostnog materijala je oko 55-60 %.<sup>27</sup> Sastav biootpada te posljedično niži udio vlage supstrata, bliži optimalnom, u P2 rezultirao je boljim konačnim rezultatima. Strukturni materijali, granje i lišće, dodani su kako bi se smanjila vlažnost supstrata i osigurali aerobni uvjeti. Uloga strukturnih materijala je i podešavanje C/N omjera i pH-vrijednosti supstrata.<sup>34</sup>

U P2, R1 maseni udio hlapive tvari također se smanjio s 89,9 % u 0. danu na 87,10 % u 14. danu. Udio suhe tvari supstrata tijekom procesa povećao se s početnih 29,62 % na konačnih 30,33 %. Rezultat mikrobiološke razgradnje organske tvari je promjena TOC vrijednosti koja se smanjila s 125,00 mg/L u 0. danu, na 21,27 mg/L u 14. danu. Također, početna vrijednost C/N omjera koja je iznosila 30:1 smanjila se na konačnih 17:1 u 14. danu, što se može vidjeti u tablici 4.1. Najveća vrijednost koncentracije kisika iznosila je 6,35 mg/L u 0. danu, a u 7. danu je iznosila 1,15 mg/L.

Nakon 7. dana, koncentracija kisika počinje ponovno rasti te je konačna vrijednost iznosila 2,18 mg/L. Smanjenje koncentracije kisika, rezultat je aktivnosti aerobnih mikroorganizama, slika 4.11.<sup>30</sup> Električna vodljivost postiže najveće vrijednosti pri najvećoj temperaturi. Početna vrijednost iznosila je 1310  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 7. dana pokusa bila je 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  te je 14. dana zabilježena 2260  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . pH-vrijednost na početku pokusa bila je u blago kiselom području te je iznosila 6,11. Posljednjeg dana procesa, 14. dan, zabilježena je pH-vrijednost u blago lužnatom području, 8,58. Konverzija postignuta u P2 u R1 iznosila je 37,19 %, što je u usporedbi s P1 bolji rezultat. Volumen procjednih voda u P2 značajno je manji u usporedbi s P1 te su procjedne vode zabilježene samo za R1. Volumen procjedne vode 7. dana procesa kompostiranja iznosio je 18 mL, a 9. dana kompostiranja 9 mL. pH- vrijednost procjednih voda 7. dan iznosila je 9,500, a u 9. danu je došlo do blagog povećanja na 9,889. Zabilježena masena koncentracija kisika u procjednoj vodi 7. dana iznosila je 0,05 mg/L, a 9. dana 0,27 mg/L. Vrijednost električne vodljivost pala je s 15800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  7. dana, na 6580  $\mu\text{S}/\text{cm}$  u 9. danu.

U P2, R2 maseni udio hlapive tvari supstrata u 0. danu iznosio je 89,09 % te u 14. danu 81,12 %. Smanjenje udjela hlapive tvari rezultat je mikrobiološke aktivnosti.<sup>16</sup> Zabilježena vrijednost udjela suhe tvari u 0. danu iznosila je 29,62 %, a u 14. danu 28,87 %. Početna vrijednost TOC iznosila je 125,00 mg/L, a u 14. danu, vrijednost se značajno smanjila na 17,54 mg/L. Najniža vrijednost omjera C/N zabilježena je za P2, R2 čija se vrijednost dvostruko umanjila tijekom procesa. C/N omjer u 0. danu iznosio je 30:1, a u 14. danu 15:1, što pokazuje najveću mikrobiološku aktivnost u usporedbi oba pokusa i oba reaktora. Trend promjene masene koncentracije kisika jednak je onome u R1. Početna vrijednost iznosila je 6,35 mg/L, a konačna 1,05 mg/L, slika 4.15.. Kao i kod koncentracije kisika, električna vodljivost prati isti trend kao i u R1 te su najveće vrijednosti zabilježene pri najvećoj temperaturi. Zabilježena vrijednost u 0. danu bila je 1310  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , u 7. danu 2350  $\mu\text{S}/\text{cm}$  te u 14. danu 2270  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Porast vodljivosti pripisuje se razgradnji organskih tvari prilikom čega se povećava sadržaj soli u supstratu.<sup>16</sup> pH- vrijednost u 0. danu iznosila je 8,58 te u 14. danu 8,45. Postignuta konverzija iznosila je 56,92 %, što predstavlja najbolji rezultat konverzije u oba pokusa i oba reaktora ovog rada.

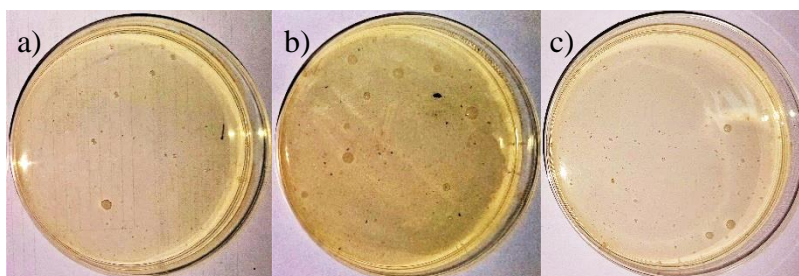
Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti da se umješavanjem točno određenih vrsta supstrata i mase može postići bolja razgradnja organske tvari i u konačnici dobiti kvalitetniji produkt, kompost. Dizajnirani reaktori predviđeni su za kućno kompostiranje te nije vidljiva značajna razlika u rezultatima.

### 5.3. Mikrobiološka analiza supstrata

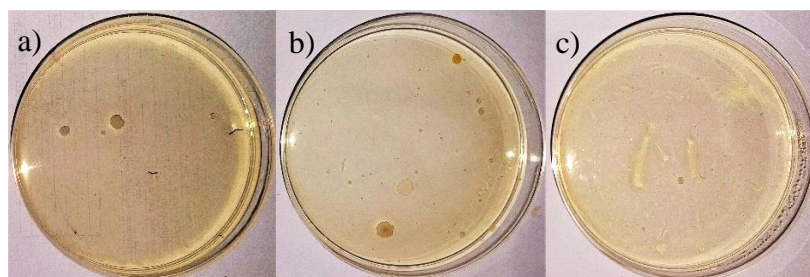
#### 5.3.1. Mikrobiološka analiza supstrata u pokusu P1

Prikaz promjene ukupnog broja mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva u ovisnosti o temperaturi tijekom 16 dana u P1 u R1 prikazana je na slici 4.5. Ovisno o temperaturi izuzeto je 4 uzorka te je provedena mikrobiološka analiza svakog uzorka. Početna temperatura koja je iznosila 19 °C pogodovala je rastu mezofilnih bakterija i gljiva. U 0. danu broj mezofilnih bakterija iznosio je  $1,1 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj mezofilnih kvasaca u 0. danu iznosio je  $8,2 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj mezofilnih plijesni  $1,70 \times 10^6 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . U prvoj fazi kompostiranja, mezofilnoj fazi, primijećena je veća zastupljenost mezofilnih kvasaca u odnosu na mezofilne plijesni i to za jednu potenciju. Razlog takvom povećanju broja mezofilnih kvasaca je niža vrijednost pH. Broj termofilnih bakterija u 0. danu iznosio je  $5,5 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih kvasaca u 0. danu iznosio je  $1,9 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj termofilnih plijesni  $4,7 \times 10^5 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Najveća temperatura u P1 u R1 ostvarena je u prvom danu pokusa i iznosila je 33,4 °C te je nakon prvog dana temperatura počela postepeno padati. Tijekom drugog dana pokusa primijećeno je povećanje broja mezofilnih bakterija, koji je iznosio  $2,9 \times 10^{10} \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj mezofilnih kvasaca također je porastao na  $7,8 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$  dok mezofilne plijesni nisu bile prisutne. Broj termofilnih bakterija u 2. danu iznosio je  $2,6 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih kvasaca u 2. danu se smanjio i iznosio je  $3,7 \times 10^6 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj termofilnih plijesni je porastao i iznosio  $1,0 \times 10^6 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Temperatura je u 9. danu pokusa bila 19 °C te je primijećeno povećanje broja mezofilnih kvasaca i plijesni te smanjenje broj mezofilnih bakterija. Broj mezofilnih bakterija u 9. danu iznosio je  $2,0 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj mezofilnih kvasaca bio je  $1,4 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj mezofilnih plijesni  $1,5 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih gljiva se smanjio te je broj termofilnih kvasaca u 9. danu bio  $2,6 \times 10^5 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a nije detektirana prisutnost plijesni. Temperatura se nakon 9. dana dodatno snizila te je bila najniža posljednjeg dana uzorkovanja i iznosila je 17,2 °C. Broj mezofilnih bakterija se ponovno smanjio i iznosio je  $5,9 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj mezofilnih gljiva se također smanjio te je broj mezofilnih kvasaca iznosio  $5,9 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj mezofilnih plijesni  $8,3 \times 10^6 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Ukupni broj termofilnih bakterija također se smanjio i iznosio je  $7,4 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih kvasaca iznosio je  $1,2 \times 10^3 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj termofilnih plijesni  $3,9 \times 10^2 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , što su također niže vrijednosti u odnosu na prethodno uzorkovanje. U P1, R1 nije nastupila termofilna faza kompostiranja jer nije postignuta temperatura od 45 °C te nije došlo do higijenizacije supstrata.

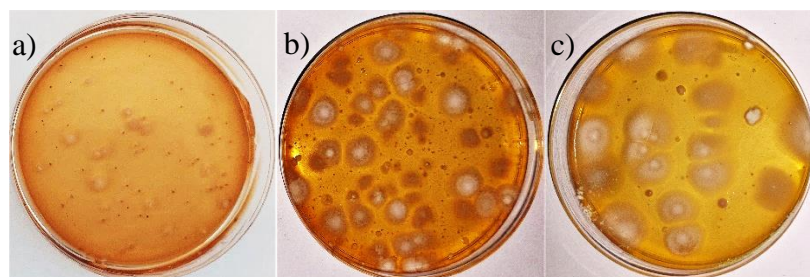
U slikama 5.1. do 5.4. prikazane su fotografirane kolonije izraslih mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva tijekom procesa kompostiranja P1 u R1.



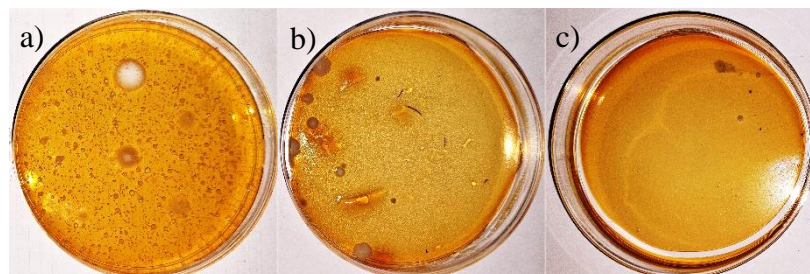
**Slika 5.1.** Prikaz mezofilnih bakterija u: a) 0., b) 9. i c) 16. danu procesa kompostiranja P1 u R1.



**Slika 5.2.** Prikaz termofilnih bakterija u: a) 0., b) 2. i c) 16. danu procesa kompostiranja P1 u R1.



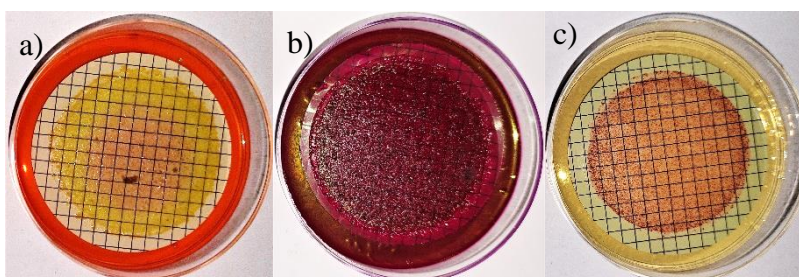
**Slika 5.3.** Prikaz mezofilnih gljiva u: a) 0., b) 9. i c) 16. danu procesa kompostiranja P1 u R1.



**Slika 5.4.** Prikaz termofilnih gljiva u: a) 0., b) 9. i c) 16. danu procesa kompostiranja P1 u R1.

Tijekom provedbe pokusa odredila se i prisutnost bakterija, *E. coli*, *P. aeruginosa*, *E. faecalis* i *Salmonella* sp.. U P1 u R1, *Salmonella* sp. zabilježena je na svim izuzetim uzorcima, dok je *Escherichia coli* zabilježena samo na uzorcima izuzetim 0. i 16. dana pokusa. Prisutnost bakterije *Pseudomonas aeruginosa* nije zabilježena. *Enterococcus faecalis* zabilježena je 2., 9. i 16. dana pokusa.

U slici 5.5. prikazane su fotografirane kolonije *Salmonelle* sp., *Escherichie coli* i *Enterococcus faecalis* u 16. danu procesa kompostiranja P1 u R1.

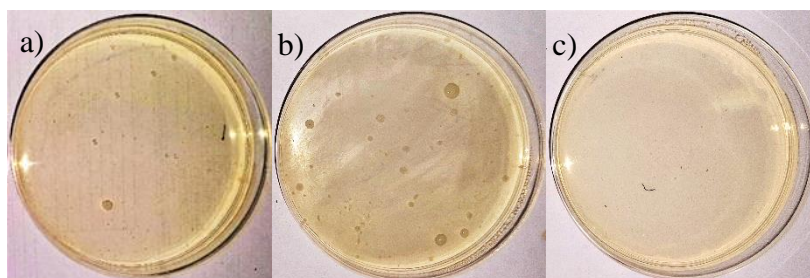


**Slika 5.5.** Prikaz *Salmonelle* sp. (a), *Escherichie coli* (b), *Enterococcus faecalis* (c) u 16. danu procesa kompostiranja P1 u R1.

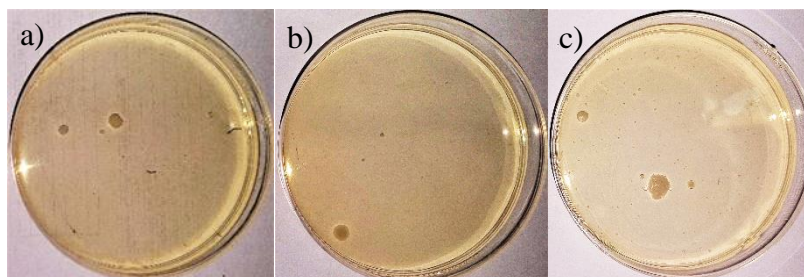
Prikaz promjene ukupnog broja mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva u ovisnosti o temperaturi tijekom 16 dana u pokusu P1 u R2 prikazana je na slici 4.8. Ovisno o temperaturi izuzeto je 4 uzorka te je provedena mikrobiološka analiza svakog uzorka. Početna temperatura u 0. danu pokusa bila je 19 °C te je nastupila mezofilna faza procesa kompostiranja kada prevladavaju mezofilne bakterije i gljive. Broj mezofilnih bakterija u 0. danu pokusa bila je  $1,1 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj mezofilnih kvasaca bio je  $8,2 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj mezofilnih plijesni  $1,7 \times 10^6 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih bakterija iznosio je  $5,5 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih kvasaca iznosio je  $1,9 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj termofilnih plijesni  $4,7 \times 10^5 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Tijekom mezofilne faze prevladavaju kvasci u odnosu na plijesni. Kao i kod R1, najveća temperatura u pokusu P1, u R2 je postignuta u prvom danu i iznosila je 36,1 °C. Uzorkovanje je provedeno 2. dana te je primijećen rast broja mezofilnih bakterija i gljiva. Broj mezofilnih bakterija u 2. danu iznosio je  $2,0 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj mezofilnih kvasaca iznosio je  $1,4 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj mezofilnih plijesni  $2,8 \times 10^6 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih bakterija se smanjio te je u 2. danu iznosio  $1,1 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih kvasaca u 2. danu

također se smanjio te je iznosio  $1,2 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , dok se broj termofilnih plijesni povećao te je iznosio  $7,7 \times 10^5 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Temperatura je nakon drugog dana nastavila padati te je tijekom trećeg uzorkovanja, 9. dan, iznosila  $18,8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Broj mezofilnih bakterija u 9. danu se povećao te je iznosio  $5,3 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj mezofilnih kvasaca se smanjio te je u 9. danu iznosio  $1,6 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj mezofilnih plijesni se upravo suprotno povećao i iznosio  $4,5 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih bakterija se nakon posljednjeg smanjenja ponovno povećao te je u 9. danu iznosio  $2,1 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih kvasaca nastavlja padati te je iznosio  $5,1 \times 10^5 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$  u 9. danu. Posljednjeg, 16. dana, uzorkovanja temperatura je bila najniža,  $17,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Broj mezofilnih bakterija se ponovno smanjio te je iznosio  $1,9 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj mezofilnih gljiva se također smanjio te je broj mezofilnih kvasaca bio  $2,3 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj mezofilnih plijesni  $1,8 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih bakterija je značajno pao za dvije potencije te je u 16. danu iznosio  $7,5 \times 10^6 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih kvasaca se također smanjio za dvije potencije na  $8,8 \times 10^3 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$  dok je broj termofilnih plijesni iznosio  $4,4 \times 10^3 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . U P1 u R2 kao i u R1, tijekom procesa kompostiranja, nije postignuta temperatura od  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  te nije nastupila termofilna faza kao ni higijenizacija supstrata.

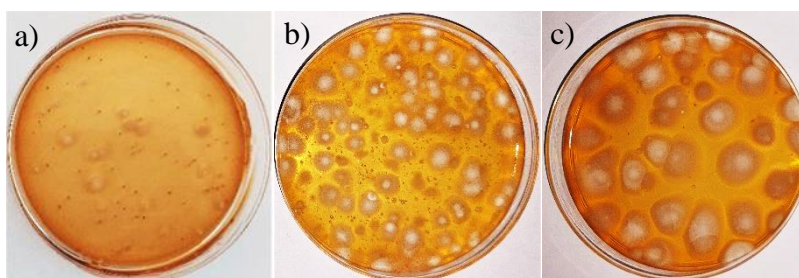
U slikama 5.6. do 5.9. prikazane su fotografirane kolonije izraslih mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva tijekom procesa kompostiranja P1 u R2.



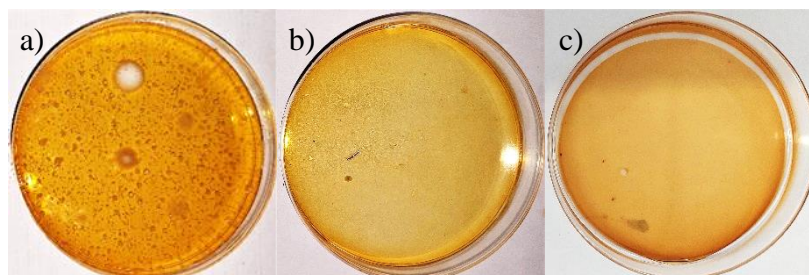
**Slika 5.6.** Prikaz mezofilnih bakterija u: a) 0., b) 9. i c) 16. danu procesa kompostiranja P1 u R2.



**Slika 5.7.** Prikaz termofilnih bakterija u: a) 0., b) 9. i c) 16. danu procesa kompostiranja P1 u R2.



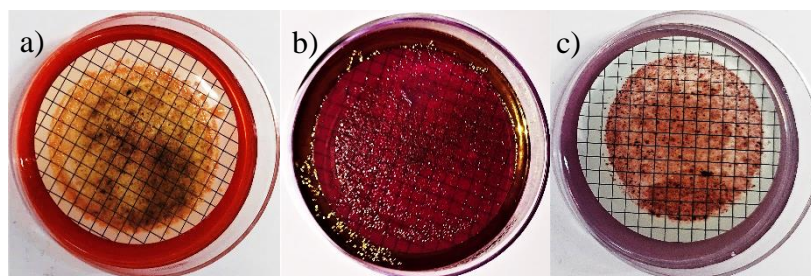
**Slika 5.8.** Prikaz mezofilnih gljiva u: a) 0., b) 9. i c) 16. danu procesa kompostiranja P1 u R2.



**Slika 5.9.** Prikaz termofilnih gljiva u: a) 0., b) 9. i c) 16. danu procesa kompostiranja P1 u R2.

Tijekom provedbe pokusa odredila se i prisutnost bakterija, *E. coli*, *P. aeruginosa*, *E. faecalis* i *Salmonella* sp.. U P1 u R2, *Salmonella* sp. zabilježena je na svim izuzetim uzorcima dok je *Escherichia coli* zabilježena na uzorcima izuzetim 0., 9. i 16. dana. Prisutnost bakterije *Pseudomonas aeruginosa* nije zabilježena. *Enterococcus faecalis* zabilježena je u uzorcima izuzetim 2., 9. i 16. dana pokusa.

U slici 5.10. prikazane su fotografirane kolonije *Salmonelle* sp., *Escherichie coli* i *Enterococcus faecalisa* u 16. danu procesa kompostiranja P1 u R2.



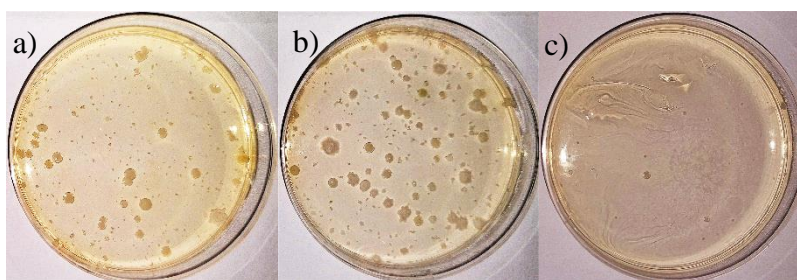
**Slika 5.10.** Prikaz *Salmonelle* sp. (a), *Escherichie coli* (b), *Enterococcus faecalisa* (c) u 16. danu procesa kompostiranja P1 u R2.

### 5.3.2. Mikrobiološka analiza supstrata u pokusu P2

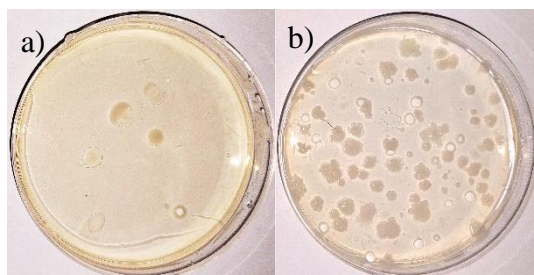
Prikaz promjene ukupnog broja mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva u ovisnosti o temperaturi tijekom 14 dana u pokusu P2 u R1 prikazana je na slici 4.12. Ovisno o temperaturi izuzeto je 5 uzoraka te je provedena mikrobiološka analiza svakog uzorka. Početna temperatura u 0. danu pokusa bila je 21,2 °C te je nastupila mezofilna faza u kojoj su prevladavale mezofilne bakterije i gljive. Broj mezofilnih bakterija u 0. danu iznosio je  $6,9 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj mezofilnih kvasaca bio je  $5,6 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a plijesni nisu detektirane.. Temperatura se nastavila postepeno povećavati te je 4. dana pokusa odnosno drugog uzorkovanja bila 28,4 °C. Broj mezofilnih bakterija 4. dana se povećao te je iznosio  $2,6 \times 10^{10} \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj mezofilnih gljiva se također povećao te je broj mezofilnih kvasaca iznosio  $2,5 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$  dok je broj mezofilnih plijesni iznosio  $1,9 \times 10^6 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Najveća vrijednost temperature postignuta je 6. dana kompostiranja te je iznosila 43,3 °C. Treće uzorkovanje provedeno je 7. dana pokusa kada je temperatura bila 38,6 °C. Broj mezofilnih bakterija se počeo smanjivati te je 7. dana iznosio  $4,4 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj mezofilnih plijesni je pao na  $2,0 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Termofilne bakterije i dalje nisu bile prisutne, dok je primijećena pojava termofilnih gljiva. Broj termofilnih kvasaca u 7. danu pokusa bio je  $1,4 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj termofilnih plijesni  $1,1 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Nakon 6. dana pokusa temperatura je počela padati do 9. dana kada je kratko ponovno porasla na 32,3 °C, no već idućeg 10. dana ponovno je pala na 31,9 °C. Broj mezofilnih bakterija u 10. danu pao je na  $3,6 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj mezofilnih gljiva se također smanjio pa je tako broj mezofilnih kvasaca bio  $5,1 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj mezofilnih plijesni  $1,1 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Termofilne bakterije primijećene su u 10. danu pokusa te je njihov broj iznosio  $4,0 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih kvasaca je bio  $0 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj termofilnih plijesni  $4,8 \times 10^5 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Posljednjeg dana pokusa temperatura je bila 29,1 °C te je tada provedeno posljednje uzorkovanje i analiza. Broj mezofilnih bakterija u 14. danu pokusa iznosio je  $2,8 \times 10^{10} \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj mezofilnih plijesni se povećao i iznosio je  $1,5 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih bakterija, posljednjeg dana kompostiranja je bio najveći i iznosio je  $5,41 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih plijesni iznosio je  $1,5 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Tijekom procesa kompostiranja nije postignuta termofilna faza zato što je najveća temperatura iznosila 43,3 °C te nije postignuta higijenzacija supstrata. U usporedbi s P1 postignuti su bolji rezultati.

U slikama 5.11. do 5.14. prikazane su fotografirane kolonije izraslih mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva tijekom procesa kompostiranja P2 u R1.

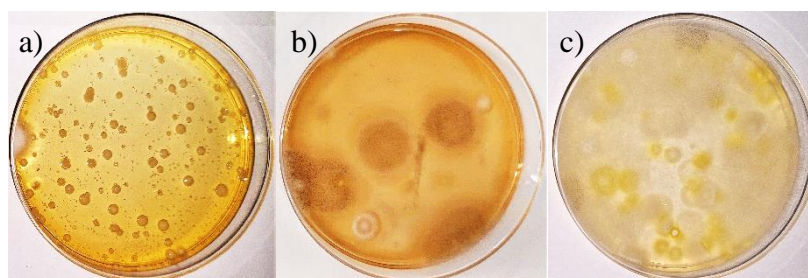




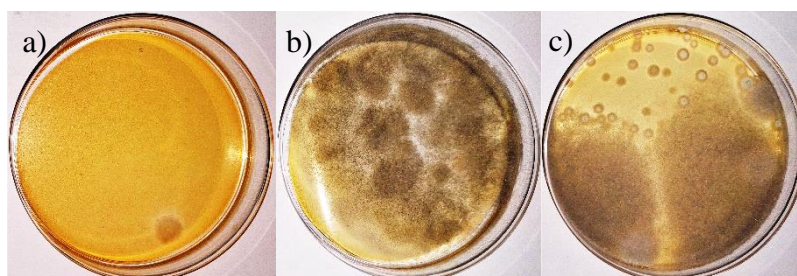
**Slika 5.11.** Prikaz mezofilnih bakterija u: a) 0., b) 7. i c) 14. danu procesa kompostiranja P2 u R1.



**Slika 5.12.** Prikaz termofilnih bakterija u: a) 10. i b) 14. danu procesa kompostiranja P2 u R1.



**Slika 5.13.** Prikaz mezofilnih gljiva u: a) 0., b) 7. i c) 14. danu procesa kompostiranja P2 u R1.

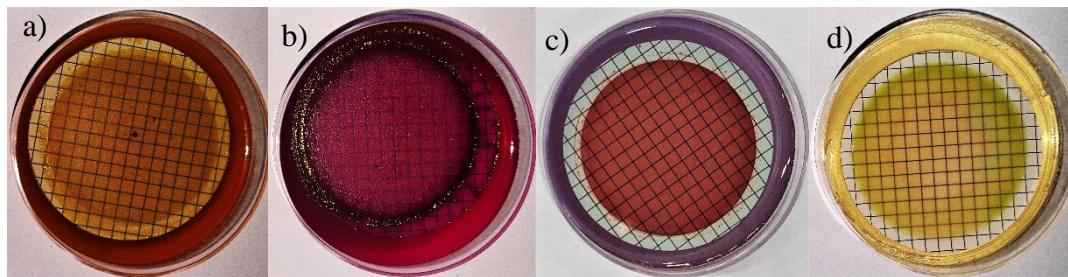


**Slika 5.14.** Prikaz termofilnih gljiva u: a) 7., b) 10. i c) 14. danu procesa kompostiranja P2 u R1.

U P2 u R1 *Salmonella* sp. zabilježena je na uzorcima izuzetim 0., 4., 7. i 14. dana pokusa. Prisutnost bakterije *Escherichia coli* zabilježena je samo na uzorku izuzetim 14. dana kompostiranja. *Pseudomonas aeruginosa* zabilježena je na uzorcima izuzetim 7. i 10. dana pokusa.

Prisutnost bakterije *Enterococcus faecalis* zabilježena je na uzorcima izuzetim 0., 4. i 10 dana pokusa.

U slici 5.15. prikazane su fotografirane kolonije *Salmonelle* sp. i *Escherichie coli* u 14. danu, *Enterococcus faecalis* u 10. danu i *Pseudomonas aeruginose* u 7. danu procesa kompostiranja P2 u R1.

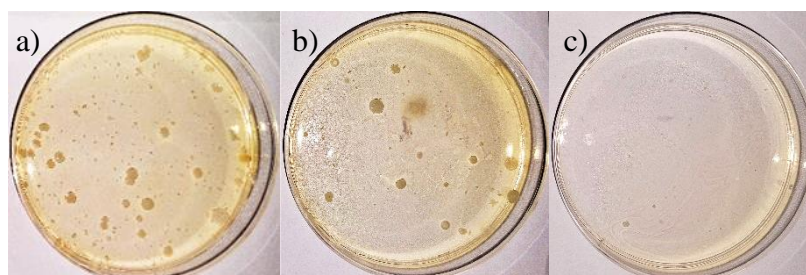


**Slika 5.15.** Prikaz *Salmonelle* sp. (a) i *Escherichie coli* (b) u 14. danu, *Enterococcus faecalis* (c) u 10. danu i *Pseudomonas aeruginose* (d) u 7. danu procesa kompostiranja P2 u R1.

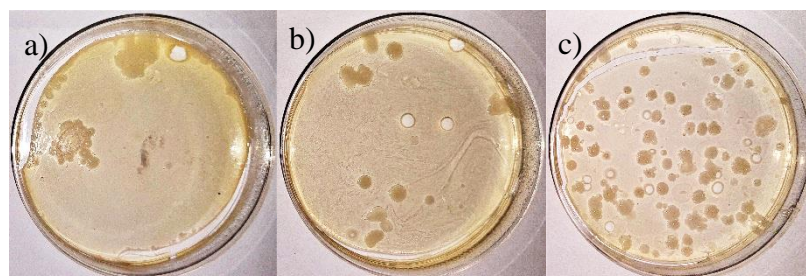
Prikaz promjene ukupnog broja mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva u ovisnosti o temperaturi tijekom 14 dana u pokusu P2 u R2 prikazana je na slici 4.16. Ovisno o temperaturi izuzeto je 5 uzoraka te je provedena mikrobiološka analiza svakog uzorka. Temperatura 0. dana pokusa bila je 20,7 °C te je nastupila mezofilna faza u kojoj prevladavaju mezofilne bakterije i gljive. Broj mezofilnih bakterija u 0. danu pokusa bio je  $6,9 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj mezofilnih kvasaca bio je  $5,6 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$  dok je broj mezofilnih plijesni bio  $0 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Temperatura je postepeno rasla te je u 4. danu iznosila 32,6 °C kada je provedeno drugo uzorkovanje. Broj mezofilnih bakterija u 4. danu se povećao te je iznosio  $4,5 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj mezofilnih gljiva je porastao te je broj mezofilnih kvasaca iznosio  $7,3 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj mezofilnih plijesni  $1,5 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Najveća temperatura postignuta je u 6. danu pokusa i iznosila je 44,7 °C. Treće uzorkovanje provedeno je 7. dana pokusa kada je temperatura kompostne mase iznosila 37,4 °C. Broj mezofilnih bakterija i dalje se povećavao te je u 7. danu pokusa iznosio  $1,5 \times 10^{10} \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj mezofilnih kvasaca se smanjio te je iznosio  $7,4 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$  dok se broj mezofilnih plijesni povećao i iznosio  $6,1 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Primijećen je i rast termofilnih bakterija čiji je broj iznosio  $1,0 \times 10^{10} \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih kvasaca u 7. danu iznosio je  $0 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj termofilnih plijesni bio je  $2,3 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Nakon 7. dana temperatura je počela padati, no 9. dana temperatura ponovo raste i iznosi 29,4 °C. Poslije

kratkog povećanja, dolazi do smanjenja temperature i 10. dana pokusa odnosno tijekom četvrtog uzorkovanja temperatura iznosi 27,8 °C. Broj mezofilnih bakterija u 10. danu iznosio je  $1,4 \times 10^{10} \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj mezofilnih kvasaca i dalje nastavlja rasti i iznosio je  $2,1 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih bakterija u 10. danu pokusa počinje padati i iznosio je  $6,8 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Posljednji dan pokusa temperatura je bila 26,3 °C te je tada izuzet zadnji uzorak za analizu. Broj mezofilnih bakterija iznosio je  $2,2 \times 10^{10} \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj mezofilnih gljiva je pao pa je tako broj mezofilnih kvasaca iznosio  $4,5 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj mezofilnih plijesni  $1,3 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih bakterija nastavio je padati te je u 10. danu iznosio  $4,0 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . Broj termofilnih gljiva se povećao pa je tako broj termofilnih kvasaca iznosio  $6,3 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ , a broj termofilnih plijesni  $3,7 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ . U P2, R2 postignuta je najveća temperatura u usporedbi oba pokusa i oba reaktora. Temperatura koja je postignuta 6. dana pokusa bila je 44,7 °C te je ona najbliža temperaturi potrebnoj da nastupi termofilna faza. Također, temperatura kompostne mase nije postigla temperature koje osiguravaju higijenzaciju supstrata.

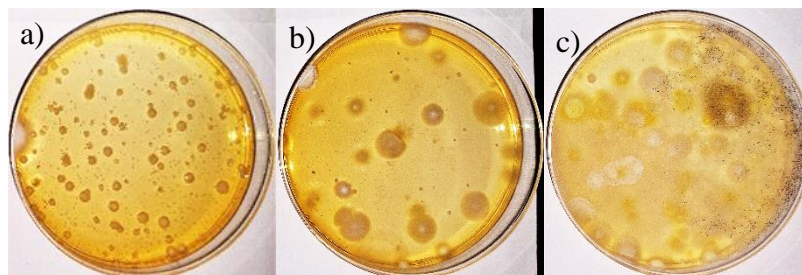
U slikama 5.16. do 5.19. prikazane su fotografirane kolonije izraslih mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva tijekom procesa kompostiranja P2 u R2.



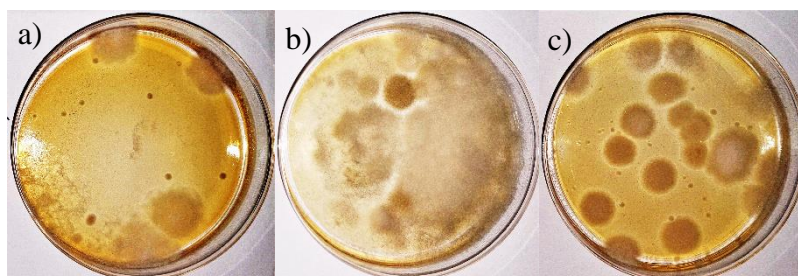
**Slika 5.16.** Prikaz mezofilnih bakterija u: a) 0., b) 7. i c) 14. danu procesa kompostiranja P2 u R2.



**Slika 5.17.** Prikaz termofilnih bakterija u: a) 7., b) 10. i c) 14. danu procesa kompostiranja P2 u R2.



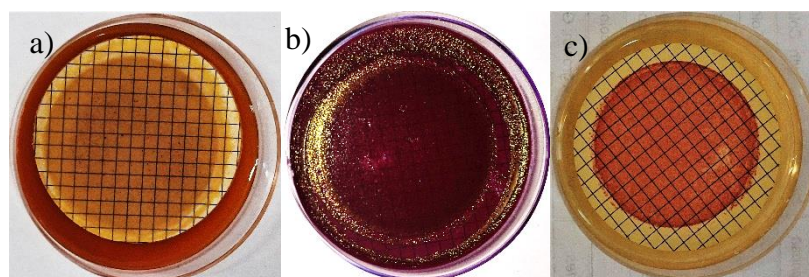
**Slika 5.18.** Prikaz mezofilnih gljiva u: a) 0., b) 7. i c) 14. danu procesa kompostiranja P2 u R2.



**Slika 5.19.** Prikaz termofilnih gljiva u: a) 7., b) 10. i c) 14. danu procesa kompostiranja P2 u R2.

U pokusu P2 u R1 *Salmonella* sp. zabilježena je na uzorcima izuzetim 0., 4. i 14. dana pokusa. Prisutnost bakterije *Escherichia coli* zabilježena je samo na uzorku izuzetim 14. dana kompostiranja. *Pseudomonas aeruginosa* nije zabilježena. Prisutnost bakterije *Enterococcus faecalis* zabilježena je na uzorcima izuzetim 0. i 4. dana pokusa.

U slici 5.20. prikazane su fotografirane kolonije *Salmonelle* sp. i *Escherichie coli* u 14. danu te *Enterococcus faecalisa* u 4. danu procesa kompostiranja P2 u R2.



**Slika 5.20.** Prikaz *Salmonelle* sp. (a) i *Escherichie coli* (b) u 14. danu i *Enterococcus faecalisa* (c) u 4. danu procesa kompostiranja P2 u R2.

#### 5.4. Određivanja ekotoksičnosti eluata i procjedne vode

Testovi ekotoksičnosti provodili su se na bakteriji *Vibrio fischeri*. Bakterija *Vibrio fischeri* ima prirodno svojstvo luminiscencije koje se koristi kao mjera fiziološke aktivnosti. Određivanje aerobne toksičnosti temelji se na procjeni smanjenja fiziološke aktivnosti čiste kulture bakterija kada se ona izlaže rastućem nizu koncentracija toksičnih tvari. Rezultati su izraženi preko vrijednosti EC<sub>20</sub> i EC<sub>50</sub> koji predstavljaju volumni udio uzorka pri kojemu dolazi do 20%-tnog, odnosno 50%-tnog pada luminiscencije. Vrijednosti inhibicije predstavljaju postotak inhibirane kulture odnosno smanjenje fiziološke aktivnosti. Postotak inhibirane kulture u P1 za oba reaktora znatno se povećao s početnih 36,51 % na 87,09-88,08 %, dok je inhibicija u P2 bila vrlo visoka tijekom svih 14 dana pokusa. Rezultati ekotoksičnosti eluata supstrata za oba pokusa prikazani su u tablici 5.1. te ukazuju na toksičnost supstrata. Rezultati inhibicije za uzorke procjednih voda u oba pokusa također ukazuju na toksičnost. Sve vrijednosti su tijekom pokusa bile vrlo visoke, iznad 90 %. Najveću toksičnost pokazale su procjedne vode Pokusa 2 u R1 (TU = 29,19). Rezultati ekotoksičnosti procjednih voda prikazani su u tablici 5.2.

**Tablica 5.1.** Rezultati ekotoksičnosti eluata supstrata.

Pokus	P1				P2			
	R1		R2		R1		R2	
Reaktor								
<i>t</i> / dan	0	16	0	16	0	14	0	14
EC <sub>20</sub> / %	/	3,16	/	4,42	1,61	/	1,61	/
EC <sub>50</sub> / %	/	26,99	/	15,21	17,67	41,78	17,67	57,98
Inhibicija / %	36,51	87,09	36,51	88,08	99,54	99,09	99,54	97,95

**Tablica 5.2.** Rezultati ekotoksičnosti procjednih voda.

Pokus	P1			P2	
	R1		R2	R1	
Reaktor					
<i>t</i> / dan	2	16	2	7	9
EC <sub>20</sub> / %	/	/	3,14	6,84	1,03
EC <sub>50</sub> / %	4,11	25,12	8,66	29,19	16,54
Inhibicija / %	99,95	90,23	99,39	93,22	93,73

## 6. ZAKLJUČCI

Cilj ovog rada bilo je kompostiranje različitih vrsta mješavina biootpada te ispitivanje utjecaja karakteristika bioreaktora na proces kompostiranja. Provedena su dva pokusa (P1 i P2) u dva reaktora (R1 i R2) radnih volumena  $V_r = 10$  L. Prvi pokus P1, vođen je 16 dana, a drugi pokus, P2, 14 dana. Pokusi su provedeni s različitim sastavom i omjerima biootpada Tijekom procesa kompostiranja praćeni su fizikalno-kemijski pokazatelji (temperatura, pH, udio suhe i hlapive tvari, električna vodljivost, koncentracija otopljenog kisika, ekotoksičnost, TOC) te mikrobiološki pokazatelji (ukupan broj mezofilnih i termofilnih bakterija i gljiva, *E. coli*, *E. faecalis*, *Salmonella*, *P. aeruginosa*). Na temelju provedenih analiza i eksperimenata mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Tijekom 16 dana kompostiranja P1 postignuta je konverzija od 24,99 % za R1 i 23,76 % za R2
- Tijekom 14 dana kompostiranja P2 postignuta je konverzija od 37,19 % za R1 i 56,92 % za R2
- Maksimalna postignuta temperatura P1 iznosila je 33,4 °C u R1 te 36,1 °C u R2 dok je maksimalna temperatura P2 iznosila 43,3 °C u R1 te 44,7 °C u R2.
- Najbolji rezultati postignuti su u P2, R2 gdje je postignuta konverzija iznosila 56,92 % te maksimalna temperatura 44,7 °C, no nije postignuta termofilna faza.
- Rezultati ekotoksičnosti procjednih voda prikupljenih tijekom oba pokusa te rezultati ekotoksičnosti eluata supstrata ukazuju na toksičnost pri čemu rezultati procjedne vode P2, R1 pokazuju najveću toksičnost.

## 7. LITERATURA

- [1] Hussain, M. C., Paulraj, S. M., Nuzhat, S., Source Reduction and Waste Minimization, Elsevier, Amsterdam, 2022, str. 23-59.
- [2] Harrison, R. B., Encyclopedia of Ecology, Academic Press, Cambridge, 2008, str. 713-719.
- [3] Farrington, D. W., Lunt, J., Davies, S., Blackburn R.S., Polyesters and Polyamides, Woodhead Publishing, Sawston, 2008, str. 140-170.
- [4] Arvanitoyannis, I. S., Plastic Films in Food Packaging, William Andrew Publishing, New York, 2013, str. 249-310.
- [5] Dentel, S. K., Qi, Y., Comprehensive Water Quality and Purification, Elsevier, Amsterdam, 2014, str. 223-243.
- [6] Akratos, C., Tekerlekopoulou, A., Vasiliadou, I., Vayenas, D., Olive Mill Waste, Academic Press, Cambridge, 2017, str. 161-182.
- [7] Sundberg, C, Low ph as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting, Bioresource Technology, 95 (2004) 145–150.
- [8] Jukić, Z., Čović-Stanić, A., Danese, E., Zorić, A., Pavlinović, A., dadić, E., Kompostiranje - Tamo gdje otpad prestaje biti smeće, Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, (2020) 1-43.
- [9] Narodne novine, (2021), Zakon o gospodarenju otpadom, Zagreb: Narodne novine d.d. NN 84/2021
- [10] [http://regdoz.azo.hr/Sifarnik\\_KatalogOtpada.aspx2](http://regdoz.azo.hr/Sifarnik_KatalogOtpada.aspx2) (pristup 6.8.2023.)
- [11] Izvješće o komunalnom otpadu za 2022. godinu, Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja.
- [12] Lewerenz, S., Sailer, G., Pelz, S., Lambrecht, H., Life cycle assessment of biowast treatment – considering uncertainties in emission factors. Cleaner Engineering and Technology, 15 (2023).
- [13] Omerdić, N., Anaerobnom digestijom do visokovrijednog organskog gnojiva, Hrvatske vode, 28 (2020) 43-50.
- [14] Hublin, A., Zelić, B., Panjičko, M., Proces anaerobne razgradnje – proizvodnja bioplina, Tehnoeko, (2023) str. 1.
- [15] Kuljak, P., (2022), Idejni projekt bioplinskog postrojenja, Diplomski rad, Rijeka
- [16] Behera, S., Samal, K., Sustainable approach to manage solid waste through biochar assisted composting, Energy Nexus, 7 (2022).

- [17] Vuković Domanovac, M., Kučić Grgić, D., Kompostiranje otpada, Interna skripta, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb
- [18] Briški, F., Zaštita okoliša. I. izdanje, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, ELEMENT d.o.o., Zagreb, 2016
- [19] Al Mussa Ugak, M., Zahrim Yaser, A., Lamaming, J., Kelly Subin, E., Rajin, M., Saalah, S., Wong Hock Tze, F., Abang, S., Comparative study on passive aerated in-vessel composting of food wastes with the addition of Sabah Ragi, *Carbon Resources Conversion*, 5 (2022) 200-210.
- [20] Rynk, R., Cooperband, L., Oshins, C., Wescott, H., Bonhotal, J., Schwarz, M., Sherman, R., Brown, S., Why compost?, *The Composting Handbook*, (2022) 1-26.
- [21] Nikoloudakis, Y., Panagiotakis, S., Manios, T., Markakis, E., Pallis, E, Composting as a service: A real-world IOT implementation, *Future Internet*, 10 (2018).
- [22] Narodne novine, (2023), Pravilnik o ukidanju statusa otpada, Zagreb: Narodne novine d.d. NN 55/2023.
- [23] Narodne novine, (2023), Zakon o gnojidbenim proizvodima, Zagreb: Narodne novine d.d. NN 39/2023.
- [24] Uredba (EU) 2019/1009 Europskog parlamenta i Vijeća (2019).
- [25] Ajmal, M., Aiping, S., Awais, M., Ullah, M., S., Saeed, R., Uddin, S., Ahmad, I., Zhou, B., Zihao, X., Optimization of pilot-scale in-vessel composting process for various agricultural wastes on elevated temperature by using Taguchi technique and compost quality assessment, *Process Safety and Environmental Protection*, 140 (2020) 34-45.
- [26] Guo, H., Wu, S., Tian, Y., Zhang, J., Liu, H., Application of machine learning methods for the prediction of organic solid waste treatment and recycling processes: A Review, *Bioresource Technology*, 319 (2021).
- [27] Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y., Shen, Y., Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost, *Bioresource Technology*, 112 (2012) 171-178.
- [28] Wang, X., Selvam, A., Wong, J. W. C., Influence of lime on Struvite Formation and nitrogen conservation during food waste composting, *Bioresource Technology*, 217 (2016) 227-232.
- [29] Diaz, L. F., Savage, G. M., *Waste Management Series*, Elsevier, Amsterdam, 2007, str. 25-48.
- [30] Trautmann, N. M., Krasny, M. E., *Composting in the classroom*, 1997



- [31] Rastogi, M., Nandal, M., Khosla, B. Microbes as vital additives for solid waste composting. *Heliyon*, 6 (2020).
- [32] Margaritis, M., Dimos, V., Malamis, D., Loizidou, M., An experimental investigation of the composting process in an innovative home composting system: The Influence of Additives, *Cleaner Materials*, 8 (2023)
- [33] Duan, H., Ji, M., Chen, A., Zhang, B., Shi, J., Liu, L., Li, X., Sun, J., Evaluating the impact of rice husk on successions of bacterial and fungal communities during cow manure composting, *Environmental Technology & Innovation*, 24 (2021).
- [34] Adhikari, B. K., Barrington, S., Martinez, J., King, S., Effectiveness of three bulking agents for food waste composting, *Waste Management*, 29 (2009) 197–203.
- [35] Ermolaev, E., Sundberg, C., Pell, M., Jönsson, H., Greenhouse gas emissions from home composting in practice, *Bioresource Technology*, 151 (2014) 174–182.
- [36] Klavina, A., Selegovskis, R., Influence of wood chip quality on Boiler House Efficiency, 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development Proceedings (2021).
- [37] Slama, *AgroBioHeat*, 2020.
- [38] Ssazipius, G. J., Miiro, M. J., Muzoora, D., Kpange, S., Babu, M., Sawdust as a filtering media in sludge drying beds, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 15 (2022) 53–61.
- [39] Larney, F. J., Olson, A. F., Miller, J. J., Demaere, P. R., Zvomuya, F., Physical and chemical changes during composting of wood chip-bedded and straw-bedded beef cattle feedlot manure, *Journal of Environmental Quality*, 37 (2008) 725–735.
- [40] Halvarsson, S., Edlund, H., Norgren, M., Wheat Straw as raw material for manufacture of medium density fiberboard (MDF) *BioResources*, 5 (2010) 1215–1231.
- [41] Geffert, A., Geffertova, J., Dudiak, M., Direct method of measuring the ph value of Wood, *Forests*, 10 (2019).
- [42] Gea, T., Barrena, R., Artola, A., Sánchez, A, Optimal bulking agent particle size and usage for heat retention and disinfection in domestic wastewater sludge composting, *Waste Management*, 27 (2007) 1108–1116.
- [43] Hubbe, M. A., Lignocellulose biodegradation in composting, *Sustainable Development and Biodiversity*, (2014) 43–66.

- [44] Sundberg, C, Yu, D., Frankie-Whittle, I., Kauppi, S., Smars, S., Insam, H., Romantschuk, M., Jonsoon, H., Effects of pH and microbial composition on odour in food waste composting, *Waste Management*, 33 (2013) 204-211.
- [45] Dume, B., Hanc, A., Svehla, P., Michal, P., Demelash Chane, A., Nigussie, A., Composting and vermicomposting of sewage sludge at various C/N ratios: Technological feasibility and end-product quality, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263 (2023).
- [46] Gao, M., Li, B., Yu, A., Liang, F., Yang, L., Sun, Y., The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and Sawdust, *Bioresource Technology*, 101 (2010) 1899–1903.
- [47] Lai, J. C., Hwang, S. S., Then, Y. L., Lee, C. S., Optimal Aeration Management Strategy for a small-scale food waste composting, *Carbon Resources Conversion*, (2023).
- [48] Boulter, J., Boland, G., Trevors, J., Compost: A study of the development process and end-product potential for suppression of turfgrass disease, *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 16 (2000) 115–134.
- [49] Arslan, E. I., Ünlü, A., Topal, M., Determination of the effect of aeration rate on composting of vegetable-fruit wastes, *CLEAN - Soil, Air, Water*, 39 (2011) 1014–1021.
- [50] Kulcu, R., Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes, *Bioresource Technology*, 93 (2004) 49–57.
- [51] Meng, X., Wang, Q., Zhao, X., cai, Y., Fu, J., Zhu, M., Ma, X., Wang, P., Liu, R., Wang, Y., Liu, W., Ren, L., Effect of aeration/micro-aeration on lignocellulosic decomposition, maturity and seedling phytotoxicity during full-scale biogas residues composting, (2023).
- [52] Bernal, M. P., G. Sommer, S., Chadwick, D., Qing, C., Guoxue, L., C. Michel Jr., F., Current approaches and future trends in compost quality criteria for agronomic, environmental, and human health benefits, *Advances in Agronomy*, (2017) 143-233.
- [53] Michel, F., O'Neill, T., Rynk, R., Gilbert, J., Wisbaum, S., Halbach, T., Passively aerated composting methods, including turned windrows, *The Composting Handbook*, (2022) 159-196.
- [54] Ranade, V. V., Bhandari, V. M., Industrial wastewater treatment, recycling, and Reuse, *Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse*, (2014) 1-80.
- [55] Ahmad, S., Khalid, R., Abbas, S., Hayat, R., Ahmed, I., Potential of compost for sustainable crop production and Soil Health, *Recent Advancement in Microbial Biotechnology* (2021) 123–170.

- [56] <https://danica.hr/komunalac-opg-ima-prodao-svih-500-tona-prvoklasnog-komposta/> (pristup 8.8.2023.)
- [57] Lin, L., Xu, F., Ge, X., Li, Y., Biological treatment of organic materials for energy and nutrients production—anaerobic digestion and composting, *Advances in Bioenergy*, (2019) 121-181.
- [58] Thomson, A., Price, G. W., Arnold, P., Dixon, M., Graham, T., Review of the potential for recycling CO<sub>2</sub> from organic waste composting into plant production under Controlled Environment Agriculture, *Journal of Cleaner Production*, 333 (2022).
- [59] Joo, S. H., Monaco, F. D., Antmann, E., Chorath, P., Sustainable approaches for minimizing biosolids Production and Maximizing Reuse Options in Sludge Management: A Review, *Journal of Environmental Management*, 158 (2015) 133-145.
- [60] <https://wasteadvantagemag.com/organic-recycling-second-of-two-parts-the-15-benefits-of-aerated-static-pile-composting/> (pristup 8.8.2023.)
- [61] Youcai, Z., *Pollution Control technology for Leachate Municipal Solid Waste*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2018, str. 31-183.
- [62] <https://xactsystemscomposting.com/composting-multiple-organic-waste-streams-separately-no-big-deal/> (pristup 20.8.2023.)
- [63] <https://www.fertilizer-machine.net/product/compost-turner/in-vessel-composting-system.html> (pristup 20.8.2023.)
- [64] Gopikumar, S., Tharanyalakshmi, R., Yukesh Kannah, R., Selvam, A., Rajesh Banu, J., *Food Waste to Valuable Resources*, Academic Press, Cambridge, 2020, str. 235-250.
- [65] <https://www.azdeq.gov/static-composting-compost-guide> (pristup 17.8.2023.)
- [66] Liu, Z., Wang, X., Wang, F., Bai, Z., Chadwick, D, R., Misselbrook, T. H., Ma, L., The progress of composting technologies from static heap to intelligent reactor: Benefits and limitations, *Journal of Cleaner Production*, 270 (2020).
- [67] Gruneklee, E., *Comparing Open versus In-Vessel Composting*, 1998, str. 10,12.
- [68] M.A. Bustamante, R. Moral, C. Paredes, M.C. Vargas-Garcia, F. Suarez-Estrella, J. Moreno, Evolution of the pathogen content during co-composting of winery and distillery wastes, *Bioresource Technology*, 99 (2008) 7299-7306.
- [69] Yasmin, N., Jamuda, M., Panda, A. K., Samal, K., Nayak, J. K., Emission of greenhouse gases (ghgs) during composting and vermicomposting: Measurement, mitigation, and Perspectives, *Energy Nexus*, 7 (2022).

[70] Ho, T. M. H., Tra, V., Le, T., Nguyen, N., Tran, C., Nguyen, P. H., Vo, T., Thai, V. N., Bui, X., Compost to improve sustainable soil cultivation and crop productivity, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6 (2022).

[71] Xie, S., Tran, H.-T., Pu, M., Zhang, T., Transformation characteristics of organic matter and phosphorus in composting processes of Agricultural Organic Waste: Research trends, *Materials Science for Energy Technologies*, 6 (2023) 331-342.

## 8. POPIS SIMBOLA I OZNAKA

P1 – prvi pokus

P2 – drugi pokus

R1 – reaktor 1

R2 – reaktor 2

$V_r$  – radni volumen

TOC – ukupni organski ugljik (eng. *Total Organic Carbon*)

C/N omjer – omjer ugljika i dušika

CH<sub>4</sub> – metan

CO<sub>2</sub> – ugljikov dioksid

H<sub>2</sub>S – sumporovodik

NH<sub>3</sub> – amonijak

H<sub>2</sub> – vodik

N<sub>2</sub> – dušik

CO – ugljikov monoksid

O<sub>2</sub> – kisik

H<sub>2</sub>O – voda, vlaga

C – ugljik

HA – hranjivi agar

SA – sladni agar

XLD – ksiloza lizin deoksiholat agar (eng. *Xylose Lysine Deoxycholate agar*)

PS – *Pseudomonas* selektivni agar (eng. *Pseudomonas selective agar*)

CCA – kromogeni koliformni agar (eng. *Chromogenic coliform agar*)

FS – azid maltoza agar (eng. *Azide maltose agar*)

$\gamma(\text{O}_2)$  – masena koncentracija kisika, mg/L

NaCl – natrijev klorid

CaCO<sub>3</sub> – kalcijev karbonat

KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> – kalijev dihidrogen fosfat

CaCl<sub>2</sub> – kalcijev klorid

MgSO<sub>4</sub> – magnezijev sulfat

HCl – klorovodična kiselina

NaOH – natrijev hidroksid

K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> – kalijev bikromat

VT – vlažna tvar

ST – suha tvar

$w$  – maseni udio, %

$m$  – masa, kg

HT – hlapiva tvar

TIC – ukupni anorganski ugljik (eng. *Total Inorganic Carbon*)

TC – ukupni ugljik (eng. *Total Carbon*)

CFU – broj živih stanica (eng. *Colony Forming Units*)

EC<sub>20</sub> - koncentracija koja uzrokuje 20 % inhibicije bakterijske kulture

EC<sub>50</sub> - koncentracija koja uzrokuje 50 % inhibicije bakterijske kulture

$V$  – volumen, dm<sup>3</sup>

$t$  – vrijeme, dan

$\kappa$  – električna vodljivost,  $\mu\text{S}/\text{cm}$

TU – jedinica toksičnosti

$T$  – temperatura, °C

## 9. ŽIVOTOPIS

Adriana Mrazović [REDACTED] Osnovnoškolsko obrazovanje završila je u Osnovnoj školi Dragutina Domjanića u Svetom Ivanu Zelini nakon čega upisuje srednju školu Zdravstveno učilište u Zagrebu, smjer Farmaceutski tehničar. Nakon završene srednje škole, 2019. godine, upisuje prijediplomski studij Ekoinženjerstvo na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu. Stručnu praksu odradila je na Nastavnom zavodu za javno zdravstvo „Dr. Andrija Štampar“ u srpnju 2023. godine na Odjelu za analitičke tehnike. U sklopu svog završnog rada pod nazivom *Ispitivanje utjecaja karakteristika bioreaktora na proces kompostiranja biootpada* pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Dajane Kučić Grgić, sudjelovala je na 4. međunarodnom ZORH susretu 2023. godine u Splitu.