

Analiza procesa kompostiranja biootpada

Šunjić, Ana-Maria

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Chemistry and Technology / Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:167:400715>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-08**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

ANALIZA PROCESA KOMPOSTIRANJA BIOOTPADA
DIPLOMSKI RAD

ANA-MARIA ŠUNJIĆ

Matični broj: 269

Split, listopad 2020.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET
DIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE
ZAŠTITA OKOLIŠA

ANALIZA PROCESA KOMPOSTIRANJA BIOOTPADA
DIPLOMSKI RAD

ANA-MARIA ŠUNJIĆ

Matični broj: 269

Split, listopad 2020.

**UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY
GRADUATE STUDY OF CHEMICAL TECHNOLOGY
ENVIRONMENTAL PROTECTION**

**ANALYSIS OF THE BIOWASTE COMPOSTING PROCESS
DIPLOMA THESIS**

ANA-MARIA ŠUNJIĆ

Parent number: 269

Split, October 2020

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište u Splitu
Kemijско-tehnološki fakultet u Splitu
Diplomski studij: Kemijсka tehnologija

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Kemijско inženjerstvo

Tema rada je prihvaćena na 28. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijско-tehnološkog fakulteta održanoj dana 25. rujna 2019.

Mentor: prof. dr. sc. Nediljka Vukojević Medvidović

ANALIZA PROCESA KOMPOSTIRANJA BIOOTPADA

Ana-Maria Šunjić, 269

Sažetak: Kompostiranje je tehnološki proces gospodarenja otpadom kojim se pomoću mikroorganizama u aerobnim uvjetima obrađuje i stabilizira biološki razgradivi otpad te prevodi u kompost. Stoga je prepoznat kao ekološki prihvatljiv način zbrinjavanja biootpada. U ovom radu praćen je proces kompostiranja biootpada u rotacijskom komposteru valjkastog oblika (zatvoreni sustav) i otvorenoj posudi (otvoreni sustav). Biootpad je prikupljen u studentskoj menzi Kampus u okviru Studentskog centra Sveučilišta u Splitu. Tijekom kompostiranja u oba sustava su praćeni parametri: temperatura, sadržaj suhe i hlapive tvari, sadržaj vlage, ugljika, dušika, pH, električna vodljivost te C/N omjer. Uspoređene su vrijednosti mjerenih parametara u otvorenom i zatvorenom sustavu. Rezultati promjene sadržaja organske tvari su obrađeni prema kinetičkom modelu prvog reda. Dobivena su dobra slaganja eksperimentalnih rezultata s modelom, a brzina razgradnje organske tvari je veća pri kompostiranju u otvorenoj posudi, u odnosu na rotacijski komposter.

Ključne riječi: kompostiranje, biootpad, rotacijski komposter, kinetika kompostiranja

Rad sadrži: 72 stranice, 25 slika, 12 tablica, 30 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za obranu:

1. prof. dr. sc. Matko Erceg - predsjednik
2. izv. prof. Ivana Smoljko - član
3. prof. dr. sc. Nediljka Vukojević Medvidović - član, mentor

Datum obrane: 30. listopad 2020.

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u Knjižnici
Kemijско-tehnološkog fakulteta u Splitu, Ruđera Boškovića 35, Split.

BASIC DOCUMENTATION CARD

DIPLOMA THESIS

University of Split
Faculty of Chemistry and Technology
Graduate Study of Chemical Technology

Scientific area: Technical Sciences

Scientific field: Chemical Engineering

Thesis subject was approved by Faculty Council of the Faculty of Chemistry and Technology, session no. 28 (September 25th 2019)

Mentor: Ph.D. full prof. Nediljka Vukojević Medvidović

ANALYSIS OF THE BIOWASTE COMPOSTING PROCESS

Ana-Maria Šunjić, 269

Abstract: Composting is a technological process of waste management which use microorganisms under aerobic conditions to treat and stabilize biodegradable waste and translate it to compost. Therefore, it is recognized as an environmentally friendly way of biowaste management. In this paper, the process of biowaste composting in a cylindrical rotary composter (closed system) and an open container (open system) was monitored. Biowaste was collected in the Campus student canteen within the Student Center of the University of Split. During composting in both systems, the following parameters were monitored: temperature, dry and volatile matter content, moisture content, carbon and nitrogen content, pH, electrical conductivity and C/N ratio. The values of measured parameters in the open and closed system were compared. The experimental results of organic matter content during composting process were tested according to the first order kinetic model. Good agreement of the experimental results with the model was obtained. The rate of organic matter decomposition was higher when composting in an open vessel, compared to a rotary composter.

Keywords: composting, biowaste, rotary composter, composting kinetics

Thesis contains: 72 pages, 25 figures, 12 tables, 30 references

Original in: Croatian

Defence committee:

1. Ph. D. Matko Erceg, full prof. - chairperson
2. Ph. D. Ivana Smoljko, associate prof. - member
3. Ph. D. Nediljka Vukojević Medvidović, full prof. - supervisor

Defence date: October 30th 2020

Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in Library of the
Faculty of Chemistry and Technology, Ruđera Boškovića 35, Split.

Eksperimentalni dio ovog diplomskog rada proveden je u rotacijskom komposteru izrađenom u okviru projekta „PAZI! - Praktično-Aktivno-Zajedno-Interdisciplinarno! – program društveno-korisnog učenja za okoliš i održivi razvoj. Nositelj projekta je Udruga Sunce, a partnerske institucije su Kemijsko-tehnološki, Pravni, Filozofski i Ekonomski fakultet Sveučilišta u Splitu te Udruge ALUMNI KTF. Projekt je financirala Nacionalna zaklada za razvoj civilnog društva, 2018.-2020. U okviru spomenutog projekta, studenti Kemijsko-tehnološkog fakulteta, Zvonimir Jukić i Ante Čović Stanić izradili su rotacijski komposter (studentski projekt UniCompoST).

Praćenje procesa kompostiranja, analize izvornog uzorka i kompostne mase, obrada rezultata i rasprava ovog diplomskog rada izrađena je na Kemijsko-tehnološkom fakultetu u Splitu u Zavodu za inženjerstvo okoliša, pod mentorstvom prof. dr. sc. Nediljke Vukojević, u razdoblju od veljače do listopada 2020.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Nediljki Vukojević Medvidović na pruženoj pomoći pri izradi ovog diplomskog rada. Veliko hvala izvršnoj direktorici Udruge Sunce i voditeljici projekta PAZI! Gabrijeli Medunić Orlić te upravi Kemijsko-tehnološkog fakulteta na financiranju izrade rotacijskog kompostera. Posebna zahvala studentima Kemijsko-tehnološkog fakulteta, Zvonimiru Jukiću i Anti Čoviću Staniću koji su dali ideju i izradili uređaj rotacijskog kompostera u okviru studentskog projekta UniCompoST (<https://www.unicompost.com>). Najveća hvala mojoj obitelji i prijateljima na strpljenju i potpori tijekom cijelog školovanja.

ZADATAK DIPLOMSKOG RADA

1. Provesti proces kompostiranja biootpada u rotacijskom komposteru (zatvoreni sustav) te ga usporediti s procesom kompostiranja u otvorenoj posudi (otvoreni sustav). Tijekom procesa kompostiranja svakodnevno provoditi ručno izmiješavanje kompostne hrpe te kontrolu vlažnosti primjenom testa gnječenja.
2. Tijekom procesa kompostiranja uzorkovati kompostnu masu te mjeriti sobnu temperaturu. U uzorcima pratiti sljedeće parametre: temperaturu, vlažnost, udio suhe tvari, udio hlapljive tvari, udio ugljika i dušika, C/N omjer te pH vrijednost i električnu vodljivost.
3. Temeljem dobivenih rezultata analizirati promjene ispitivanih parametra tijekom procesa kompostiranja u zatvorenom i otvorenom sustavu te izvesti zaključke.
4. Rezultate promjene hlapljive tvari tijekom procesa kompostiranja obraditi prema kinetičkom modelu prvog reda te izvesti zaključke o kinetici kompostiranja u otvorenom i zatvorenom sustavu.

SAŽETAK

Kompostiranje je tehnološki proces gospodarenja otpadom kojim se pomoću mikroorganizama u aerobnim uvjetima obrađuje i stabilizira biološki razgradivi otpad te prevodi u kompost. Stoga je prepoznat kao ekološki prihvatljiv način zbrinjavanja biootpada. U ovom radu praćen je proces kompostiranja biootpada u rotacijskom komposteru valjkastog oblika (zatvoreni sustav) i otvorenoj posudi (otvoreni sustav). Biootpad je prikupljen u studentskoj menzi Kampus u okviru Studentskog centra Sveučilišta u Splitu. Tijekom kompostiranja u oba sustava su praćeni parametri: temperatura, sadržaj suhe i hlapive tvari, sadržaj vlage, ugljika, dušika, pH, električna vodljivost te C/N omjer. Uspoređene su vrijednosti mjerenih parametara u otvorenom i zatvorenom sustavu. Rezultati promjene sadržaja organske tvari su obrađeni prema kinetičkom modelu prvog reda. Dobivena su dobra slaganja eksperimentalnih rezultata s modelom, a brzina razgradnje organske tvari je veća pri kompostiranju u otvorenoj posudi, u odnosu na rotacijski komposter.

Ključne riječi: kompostiranje, biootpad, rotacijski komposter, kinetika kompostiranja

SUMMARY

Composting is a technological process of waste management which use microorganisms under aerobic conditions to treats and stabilize biodegradable waste and translate it to compost. Therefore, it is recognized as an environmentally friendly way of disposing of biowaste. In this paper, the process of biowaste composting in a cylindrical rotary composter (closed system) and an open container (open system) was monitored. Biowaste was collected in the Campus student canteen within the Student Center of the University of Split. During composting in both systems, the following parameters were monitored: temperature, dry and volatile matter content, moisture content, carbon and nitrogen content, pH, electrical conductivity and C/N ratio. The values of measured parameters in the open and closed system were compared. The experimental results of organic matter content during composting process were tested according to the first order kinetic model. Good agreement of the experimental results with the model was obtained. The rate of organic matter decomposition was higher when composting in an open vessel, compared to a rotary composter.

Key words: composting, biowaste, rotary composter, composting kinetics

SADRŽAJ	Str.
UVOD	1
1. OPĆI DIO	3
1.1. Model kružnog gospodarstva i red prvenstva gospodarenja otpada	4
1.2. Otpad i vrste otpada	6
1.2.1. Komunalni otpad	7
1.3. Biološka obrada otpada	8
1.4. Kompostiranje	9
1.4.1. Temperature faze kompostiranja	11
1.4.2. Ključni čimbenici procesa kompostiranja	12
1.4.3. Sustavi za proces kompostiranja	19
1.4.4. Kinetika kompostiranja	22
2. EKSPERIMENTALNI DIO	23
2.1. Opis procesa kompostiranja	24
2.2. Analiza kompostne mase	26
2.2.1. Određivanje temperature komposta i sobne temperature tijekom procesa kompostiranja	27
2.2.2. Određivanje sadržaja vlage i suhe tvari	27
2.2.3. Određivanje hlapive tvari i sadržaja ugljika	29
2.2.4. Određivanje pH-vrijednosti i električne vodljivosti	30
2.2.5. Određivanje dušika po Kjeldahlu	31
3. REZULTATI	35
3.1. Rezultati mjerenja parametara tijekom procesa kompostiranja	36
4. RASPRAVA	42
4.1. Analiza procesa kompostiranja	43
4.1.1. Analiza temperature komposta i sobne temperature tijekom procesa kompostiranja	43
4.1.2. Analiza rezultata sadržaja vlage i suhe tvari u kompostu	44
4.1.3. Analiza rezultata sadržaja hlapive tvari i ugljika u kompostu	45
4.1.4. Analiza rezultata pH vrijednosti komposta	47
4.1.5. Analiza rezultata električne vodljivosti komposta	48
4.1.6. Analiza rezultata sadržaja dušika po Kjeldahlu u kompostu	49

4.1.7. Analiza C/N omjera u kompostu	50
4.2. Usporedba fizikalno - kemijskih parametara izvornog uzorka i konačnog komposta	51
4.3. Analiza kinetike procesa kompostiranja	52
5. ZAKLJUČAK	56
6. LITERATURA	58

UVOD

Industrijalizacija i sve veći porast broja stanovnika i njihova standarda dovodi do nastajanje sve veće količine otpada. Rješavanje otpada odlaganjem predstavlja rizik za zdravlje ljudi i dugotrajno onečišćenje okoliša. Najveći problem predstavlja biološka frakcija iz miješanog komunalnog otpada budući njezina razgradnja na odlagalištima predstavlja opasnost za podzemne vode. Uslijed ispiranja i procijeđivanja oborina nastaju štetni plinovi i neugodni mirisi. Jedan od načina rješavanja ovog problema je kompostiranje. Kompostiranje je tehnološki proces gospodarenja biootpadom kojim se, pomoću mikroorganizama, u aerobnim uvjetima, obrađuje i stabilizira biološki razgradivi otpad uz razvoj topline. Biološka razgradnja otpada kojom se ne upravlja (npr. truljenje biološki razgradivog otpada) ne smatra se kompostiranjem. Osnovni ciljevi kompostiranja su smanjenje količine biootpada u otpadu te njegovo iskorištavanje za proizvodnju kvalitetnog komposta. U aerobnoj razgradnji biomasa se prosušuje, zagrijava (do približno 70 °C) čime dolazi do higijenizacije, a toplina se nepovratno gubi u okoliš. Time se dio biomase nepovratno gubi te je aerobna obrada teorijski manje učinkovita od anaerobne [1]. Kompostiranjem nastaje i CO₂ koji na taj način sudjeluje u kruženju ugljika u prirodi. Veći dio vezanog ugljika se bakterijskom razgradnjom ispušta u obliku ugljikova dioksida u zrak. Stabla, trave i ostale zelene biljke, pretvaraju ugljikov dioksid u ugljikohidrate, procesom koji se naziva fotosinteza, oslobađajući kisik u zrak [3]. Hrvatska, uz izuzetak par svijetlih primjera, zaostaje u odnosu na ostale zemlje Europske Unije s odvojenim sakupljanje i obradom biorazgradivih frakcija komunalnog otpada. Prema podacima iz Plana gospodarenja otpadom u RH 2017.-2022., količine oporabljenog komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj od 2010. do 2015. su se blago povećavale te je u 2015. godini iznosio 18%, u odnosu na 2010. godinu kada je oporabljeno samo 4% komunalnog otpada. Međutim, od tih 18% oporabljenog otpada samo 2% se odnosilo na kompostiranje i anaerobnu digestiju, dok je čak 80% otpada završilo na odlagalištima, a 2% je činilo uskladišteni komunalni otpad. Razlog tome je nedovoljno razvijen sustav odvojenog sakupljanja biootpada. Broj kompostišta je jako mali (Jakuševac, Markuševac, Prelog) i većinom se nalaze na sjeveru Hrvatske, dok ih u Dalmaciji niti nema. Dalmacija je krško područje koje je osjetljivo na zagađenja, posebno zbog procijeđivanja s neuređenih odlagališta otpada. S druge strane, u RH do 2016. godine registrirana su 23 postrojenja za energetske oporabu otpada i spaljivanje otpada te je predviđena izgradnja 13 Centara za gospodarenje otpadom za obradu miješanog

komunalnog otpada te ostalog otpada kojeg nije moguće prethodno reciklirati. Dva takva centra su u provedbi u Dalmaciji: CGO Kaštijun (Šibensko-kninska županija) i CGO Biljane Donje (Zadarska županija), a CGO Lećevica (Splitsko-dalmatinska županija) se još nalazi u pripreмноj fazi [3,4]. Ključno je uspostaviti odvojeno prikupljanje otpada te odvajanje bioloških frakcija otpada posebno što su to frakcije koje nakon nekoliko tjedana uzrokuju neugodne mirise i druge ugroze okoliša. No, kako se u RH zaostaje u rješavanju problematike odlaganja biorazgradivih frakcija komunalnog otpada te odlaganje neobrađenog otpada ugrožava zdravlje ljudi, moguća rješenja se pronalaze u manjim uređajima za obradu biorazgradivog otpada. Jedno takvo pilot postrojenje rotacijskog kompostera izgrađeno je na Kemijsko-tehnološkom fakultetu u Splitu. U ovom radu provedena su preliminarna istraživanja praćenja procesa kompostiranja biootpada u rotacijskom komposteru.

1. OPĆI DIO

1.1. Model kružnog gospodarstva i red prvenstva gospodarenja otpada

Industrijalizacija, nagli porast stanovnika i njihova standarda, ograničenost prirodnih resursa i negativni utjecaji na okoliš uzrokovani njihovom potrošnjom zahtijevaju unaprjeđenje postojećih i iznalaženje novih modela za njihovo održivo korištenje. Stoga se danas stavlja naglasak na smanjenje intenziteta potrošnje prirodnih resursa, povećanje učinkovitosti njihove potrošnje, uz ublažavanje nepovoljnih utjecaja na okoliš. Desetogodišnja razvojna strategija Europa 2020. predlaže održivi rast, tj. promicanje razvoja gospodarstva temeljen na učinkovitijem iskorištavanju resursa te da je rast "zeleniji" i konkurentniji. Središnji aspekt ove strategije je prelazak s postojećeg linearnog modela na kružni model (slika 1.1). Kružni model osigurava održivo gospodarenje resursima i produžavanje životnog vijeka materijala i proizvoda. Faze ovog modela međusobno su povezane, jer se materijali mogu koristiti više puta tijekom procesa, u industriji se razmjenjuju nusproizvodi, proizvodi se obnavljaju ili prerađuju, a potrošači mogu zamijeniti proizvode s uslugama korištenja tih proizvoda [5].

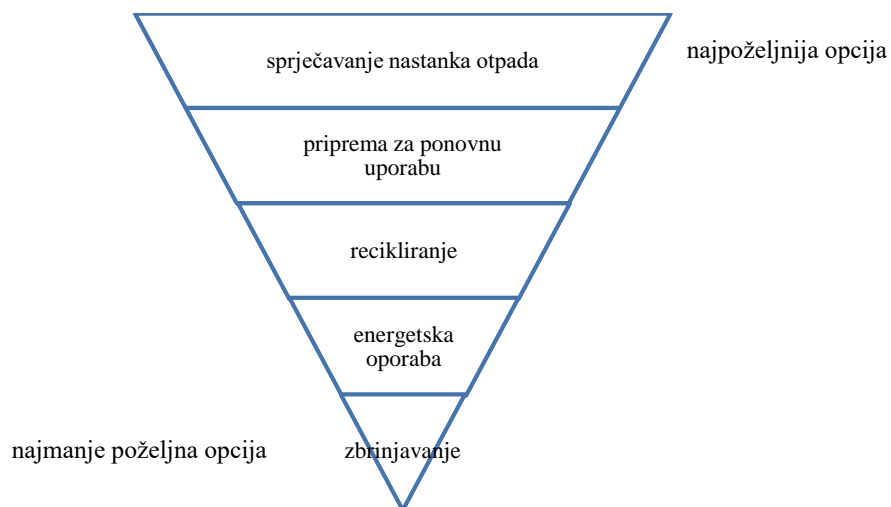


Slika 1.1. Model kružnog gospodarstva [4]

Cilj ovog modela je svesti nastajanje otpada na najmanju moguću mjeru, i to ne samo otpada koji nastaje u proizvodnim procesima, već sustavno, tijekom čitavog životnog

ciklusa proizvoda i njegovih komponenti [1]. Da bi se to postiglo, nužno je raditi na inovacijama u cijelom lancu vrijednosti, smanjiti količine materijala i energije kroz povećanje učinkovitosti, opasne i toksične materijale zamijeniti s manje toksičnim i reciklabilnim itd. Važnu ulogu ima ekološki dizajn proizvoda kojim se aspekti utjecaja na okoliš uključuju u dizajn proizvoda s ciljem poboljšanja djelovanja na okoliš tijekom cijeloga životnog ciklusa proizvoda od sirovina do konačnoga odlaganja. U kružnom modelu se samim dizajniranjem proizvoda nastoji smanjiti otpad, razvijanjem funkcionalnih i energetski štedljivih proizvoda koji su dugotrajni, sigurni te ih je moguće ponovno upotrijebiti i reciklirati i u konačnici postići "nula otpada" na odlagalištima [5]. Upotreba sekundarnih sirovina omogućava da se dio otpada reciklira, odnosno ponovno koristi u procesu proizvodnje. No, preduvjet za upotrebu sekundarnih sirovina je odgovarajuće gospodarenje otpadom.

U RH se 2030. godine očekuje blagi rast količina komunalnog otpada s trenutnih 1.650.000 t/god, u 2030. godini predviđa se proizvodnja oko 2.000.000 tona komunalnog otpada. Kako bi zaustavili trend rasta proizvedenog komunalnog otpada, povećali stupanj odvojenog prikupljanja i recikliranja te smanjili udio odloženog biorazgradivog otpada potrebno je uspostaviti sustav gospodarenja komunalnim otpadom koji potiče sprječavanje nastanka otpada te odvajanje otpada na mjestu nastanka i sadrži infrastrukturu koja omogućuje ispunjavanje ciljeva i gospodarenje otpadom sukladno redu prvenstva gospodarenja otpadom [4]. Slika 1.2 prikazuje Red prvenstva gospodarenja otpadom s jasnom naznakom najpoželjnije i najmanje poželjne opcije.



Slika 1.2. Red prvenstva gospodarenja otpadom [4]

Najpoželjnija opcija je spriječavanje nastanka otpada. Priprema za ponovnu uporabu (engl. *preparing for re-use*) odnosi se na postupke kojima se proizvodi ili dijelovi proizvoda koji su postali otpad provjerom, čišćenjem ili popravkom, pripremaju za ponovnu uporabu bez dodatne prethodne obrade. Recikliranje (engl. *recycling*) je postupak uporabe, kojim se otpadni materijali prerađuju u proizvode, materijale ili tvari za izvornu ili drugu svrhu, osim uporabe otpada u energetske svrhe. Nakon energetske uporabe, ukoliko se slijedi red prvenstva gospodarenja otpadom, količina otpada koja se zbrinjava na odlagalištima otpada svest će se na minimum [5].

1.2. Otpad i vrste otpada

Otpad je svaka tvar ili objekt koji posjednik odbaci, namjerava odbaciti ili je dužan odbaciti. Otpad je jedan od najvećih problema današnjice te se njegovim neadekvatnim postupanjem nepovoljno utječe na zdravlje ljudi i kvalitetu života. Svaki dan proizvodimo otpad: od ambalažnog otpada (plastika, staklene i plastične boce, papir, karton), baterija, akumulatora, lijekova, kućanskih aparata, građevinskog otpada do biorazgradivog otpada [6].

Može se razvrstati prema svojstvima i mjestu nastanka. Prema svojstvima otpad možemo podijeliti na:

- opasni - svaki otkad koji sadrži neko od sljedećih svojstava: zapaljivost, toksičnost, eksplozivnost, štetnost, mutagenost, reaktivnost, kancerogenost, ekotoksičnost, svojstvo nagrizanja, svojstvo oksidiranja, svojstvo otpuštanja otrovnih plinova, itd.
- neopasni - otpad koji nema niti jedno od svojstava opasnog otpada
- inertni - otpad koji nije topiv u vodi, nije goriv, niti na bilo koji način reaktivan ili biorazgradiv [7].

Prema mjestu nastanka otpad dijelimo na:

- proizvodni otpad – otpad koji nastaje u proizvodnji
- komunalni otpad - otpad iz kućanstva, otpad koji nastaje čišćenje javnih površina i otpad koji je po svojstvima sličan otpadu iz kućanstva, a nastaje u gospodarstvu, ustanovama i uslužnim djelatnostima [7].

Važno je napomenuti da otpad nije isto što i smeće. Smeće je otpad s kojim se neprimjereno ili pogrešno rukuje, tj. neiskoristive tvari koje se ne mogu upotrijebiti kao sirovina. Zbog toga prije nego što se nešto potpuno odbaci, treba se sagledati može li se odbačena tvar iskoristiti u neke druge svrhe kako ne bi postala smeće.

1.2.1. Komunalni otpad

Količina otpada koja se proizvede usko je povezana s našim obrascima potrošnje i proizvodnje. Europa proizvodi velike količine otpada, a 10% od ukupne količine tog otpada je komunalni otpad. Komunalni otpad je otpad koji nastaje u kućanstvima te u drugim manjim poduzećima kao što su škole i bolnice čije je otpad po prirodi i sastavu sličan komunalnom otpadu [6]. Procijenjeni prosječni sastav miješanog komunalnog otpada u RH prikazan je na slici 1.3.



Slika 1.3. Prosječni sastav miješanog komunalnog otpada u RH [8]

Sa slike 1.3 je vidljivo da biorazgradivi otpad čini 63,5% ukupne količine miješanog komunalnog otpada te se njegovim odvajanjem pridonosi znatnom smanjenju ukupne količine otpada koja se odlaže na odlagališta. Čine ga biorazgradive komponente komunalnog otpada kao što su papir, karton, otpad iz vrtova i parkova, otpad od hrane,

drvo, tekstil te biootpad. Biootpad je biorazgradivi otpad iz vrtova i parkova te hrana i otpad iz kućanstava, ugostiteljskih i malo prodajnih objekata, a podrijetlom može biti komunalni ili proizvodni otpad. On čini gotovo trećinu (37%) kućanskog otpada te se zbog svog sastava smatra vrijednom sirovinom za proizvodnju komposta. Osim biorazgradivog komunalnog otpada i biootpada, u biorazgradiv otpad se ubraja svaki otpad ili dio otpada koji je podložan anaerobnoj ili aerobnoj razgradnji (npr. agroindustrijski otpad, proizvodni otpad i otpad iz poljoprivrede i šumarstva, muljevi, itd.). Agroindustrijski otpad čine duhanski otpad, otpad iz proizvodnje vina i maslina, itd. [9]. U tablici 1.1 uspoređeni su primjeri biorazgradivog i bio-nerazgradivog otpada.

Tablica 1.1. Biorazgradivi i bio-nerazgradivi otpad [10]

Biorazgradivi otpad	Bio-nerazgradivi otpad
Ostaci voća i povrća	Meso, kosti i izmet
Ljuske od jaja	Plastika, metal i staklo
Pokošena trava i ostatci biljaka	Pelene
Talog kave/čaja	Pepeo
Slama, sijeno, piljevina	Korov alergena (ambrozija i sl.)
Usitnjeno suho granje i lišće	Lakirano drvo

1.3. Biološka obrada otpada

Razlikuju se tri su osnovna postupka biološke obrade/oporabe otpada:

- biološka obrada aerobnim mikroorganizmima (kompostiranje, aerobna stabilizacija, aerobno biološko sušenje)
- biološka obrada anaerobnim mikroorganizmima (fermentacija/digestija uz proizvodnju bioplina, anaerobna stabilizacija)
- biološka obrada gujavicama [1].

Biološka obrada aerobnim mikroorganizmima odvija se uz kisik, a kao krajnji produkti nastaju ugljikov(IV) oksid i voda te biomasa uz oslobađanje topline. Temperatura biomase kod aerobne obrade viša je nego kod anaerobnih postupaka te se aerobna biološka razgradnja naziva i toplom biološkom obradom, dok se anaerobna naziva

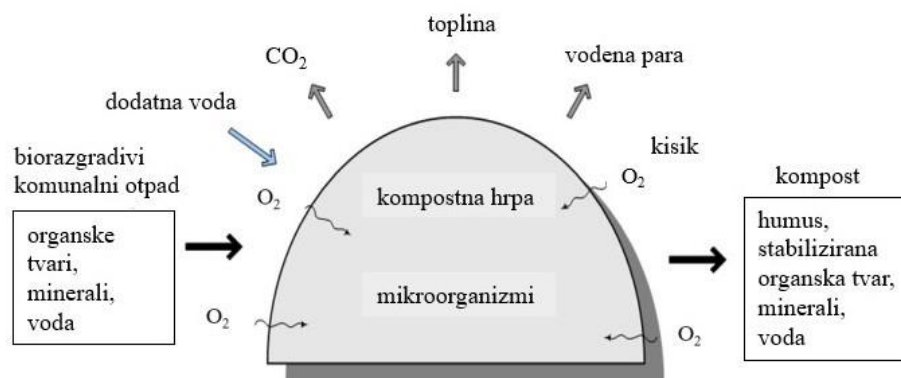
hladnom biološkom obradom. Aerobna biološka obrada otpada prakticira se na tri načina: sušenje otpada (kao i sušenje otpadnog mulja), stabilizacija otpada (smanjenje biorazgradivosti prije odlaganja), kompostiranje, odnosno materijalna uporaba [1].

Biološka obrada anaerobnim mikroorganizmima je razgradnja organske tvari bez prisustva kisika, a provodi se kroz stupnjeve acidogeneze, acetogeneze i metanogeneze. Kao krajni produkti nastaju ugljikov (IV) oksid i metan, tzv. bioplin te određena količina biomase i mulja. Anaerobna obrada se koristi za fermentaciju/digestiju uz proizvodnju bioplina i anaerobnu stabilizaciju.

Obrada gujavicama je vrlo učinkovit način iskorištavanja prikupljenog biootpada koji se primjenjuje u vrtlarstvu. Najčešća gujavica u ovom procesu je kišna kalifornijska gujavica ("najproduktivnije živo biće"), a konačni proizvod – gnoj koji je vrlo bogat humusom [1].

1.4. Kompostiranje

Kompostiranje predstavlja proces kojim se čvrsta organska tvar razgrađuje pomoću zajednice mikroorganizama u aerobnim uvjetima, a kao produkti nastaju stabilan produkt (kompost), plinovi amonijak i ugljikov(IV) oksid, voda i toplina [11, 12].



Slika 1.4. Slikoviti prikaz procesa kompostiranja [7]

Kompostiranje se može prikazati općom jednačbom [13]:



Ovaj proces smatra se ekološkim prihvatljivim za zbrinjavanje biootpada sa stajališta zaštite okoliša u odnosu na odlaganje na odlagališta, a dobiveni kompost se može koristiti u ekološkoj proizvodnji i poljoprivredi. Međutim, postoje i neki nedostaci kao što su emisije amonijaka, ugljikova dioksida te pojava neugodnih mirisa [7].

Ovisno o vrsti otpada koji ulazi u postupak oporabe za proizvodnju, kompostiranjem kao konačni proizvod dobiva se kompost različite klase. Kompost klase I namijenjen je korištenju u ekološkoj proizvodnji na način propisan posebnim propisom koji uređuje ekološku proizvodnju i korištenje u poljoprivredi. Kompost klase II namijenjen je korištenju u poljoprivredi na način propisan posebnim propisom koji uređuje gnojivo i poboljšivače tla. Kompost klase III namijenjen je korištenju na tlu koje se ne koristi za proizvodnju hrane, šumskom odnosno parkovnom zemljištu, za potrebe uređenja odnosno rekultivacije zemljišta i za izradu završnog rekultivacijskog sloja odlagališta [14]. U tablici 1.2 navedene su klase komposta.

Tablica 1.2. Klase komposta [14]

Kompost	Namjena
Klasa I	-ekološka proizvodnja - poljoprivreda
Klasa II	-poljoprivreda
Klasa III	-tlo koje se ne odosi za proizvodnju hrane -šumsko/parkovno zemljište -rekultivacija zemljišta

Razlozi sve češće pretvorbe biootpada u kompost su:

- izbjegavanje fitotoksičnosti
- uklanjanje patogenih mikroorganizama
- proizvodnja gnojiva za oplemenjivanje
- recikliranje organskog otpada i biomase [7].

1.4.1. Temperaturne faze kompostiranja

U procesu kompostiranja složena struktura organskih tvari se razgrađuje pomoću različitih mikrobnih zajednica koje su aktivne pri različitim temperaturama. Stoga se kompostiranje može podijeliti na faze:

- mezofilna faza (25-45°C)
- termofilna faza (45-65°C)
- faza hlađenja
- faza zrenja [12].

Mezofilna faza

Faza u kojoj bakterije, aktinomiceti i gljive započinju razgradnju lako razgradivih molekula (šećeri i proteini) koje su bogate energijom. Za vrijeme njihove razgradnje zbog metaboličke aktivnosti dolazi do porasta temperature kompostne mase pa bakterije prelaze u svoj uspavani oblik – endospore. Endospore su otporne na povišenu temperaturu, UV zračenje i kemikalije, te mogu preživjeti sljedeću, topliju fazu i nakon nje se vratiti u svoje aktivno stanje. U ovoj fazi broj mezofilnih organizama je tri puta veći od broja termofilnih organizama.

Termofilna faza

U ovoj fazi djeluju mikroorganizmi koji podnose visoke temperature pa zbog toga dolazi do naglog smanjivanja broja mezofilnih organizama, a porast termofilnih organizama. Maximalna brzina razgradnje je kod temperature od 65 °C. Iznad te temperature broj termofilnih gljiva se smanjuje, dok termofilnih bakterija i aktinomiceta raste. Visoka temperatura uzrokuje higijenizaciju, tj. uništavanje patogenih mikroorganizama, sjemenki korova te jajašaca kukaca. Temperature iznad 70 °C su nepođodne jer dolazi do uništavanja mezofilnih mikroorganizama koji su potrebni ponovno u fazi hlađenja, dok su temperature iznad 80 °C posljedica egzotermnih reakcija u kojima sudjeluju temperaturno stabilni enzimi autokataliziranih aktinomiceta.

Faza hlađenja

Ovo je druga mezofilna faza gdje dolazi do ponovne aktivnosti mezofilnih mikroorganizama jer je većina organske tvari biološki razgrađena te opada aktivnost

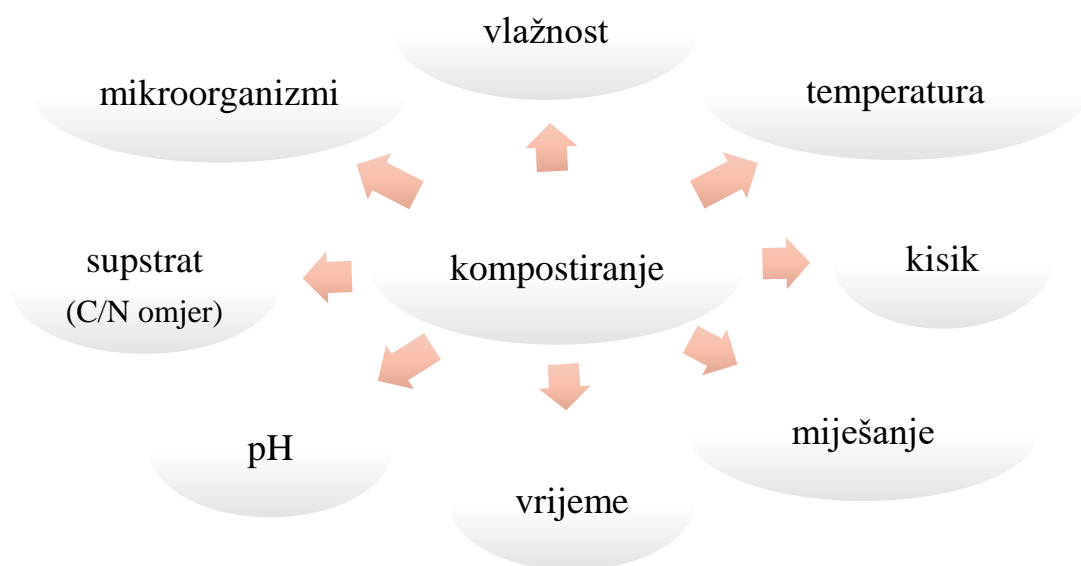
termofilnih mikroorganizama, što znači da se temperatura kompotne mase također snizuje. Pri temperaturi od 40 °C bakterije se iz endospora vraćaju u svoj aktivni oblik, a s njima i mikroorganizmi s ruba kompotne mase se vraćaju u unutrašnjost. U ovoj fazi aktinomiceti i gljive razgrađuju celulozu i škrob.

Faza zrenja

Ova faza može trajati od nekoliko tjedana do nekoliko mjeseci. Broj bakterija se smanjuje, a raste broj gljiva koje razgrađuju teže razgradive sastojke kao što su lignin i agar. Faza zrenja traje sve dokle dolazi do razgradnje ugljikovih spojeva, odnosno do nastanka CO₂, vode, nižeg omjera C/N te blago lužnate pH vrijednosti kompotne mase [12].

1.4.2. Ključni čimbenici procesa kompostiranja

Kompostiranje ovisi o velikom broju fizikalnih, kemijskih i bioloških čimbenika koji utječu na njegovu uspješnost [15], a posebno se izdvajaju: supstrat, mikroorganizmi, vlažnost, temperatura, kisik, pH vrijednost, miješanje i vrijeme (slika 1.5).



Slika 1.5. Čimbenici kompostiranja

Supstrat

Za kompostiranje je bitno imati dobar supstrat, a to najčešće uključuje ostatke voća i povrća, ostatke iz vrtova, kuhinjski otpaci, slama, karton, papir itd. Biljni i životinjski sastojci mogu se miješati, ali se preporučuje za osnove kompostiranja koristiti isključivo biljne sastojke. Glavni spojevi u supstratu su: bjelančevine, aminokiseline, lipidi, ugljikohidrati, celuloza, lignini, itd. Također, vrlo je bitno imati dobar omjer materijala koji daju dovoljno dušika (zelena trava, zeleni dijelovi biljaka itd.), ali i ugljika (slama, piljevina, karton, sijeno itd.) kako bi C/N omjer bio optimalan. Ukoliko je previše sastojaka koji sadrže dušik, dolazi do stvaranja sluzave mase, dok prevelika količina ugljika usporava razgradnju [16].

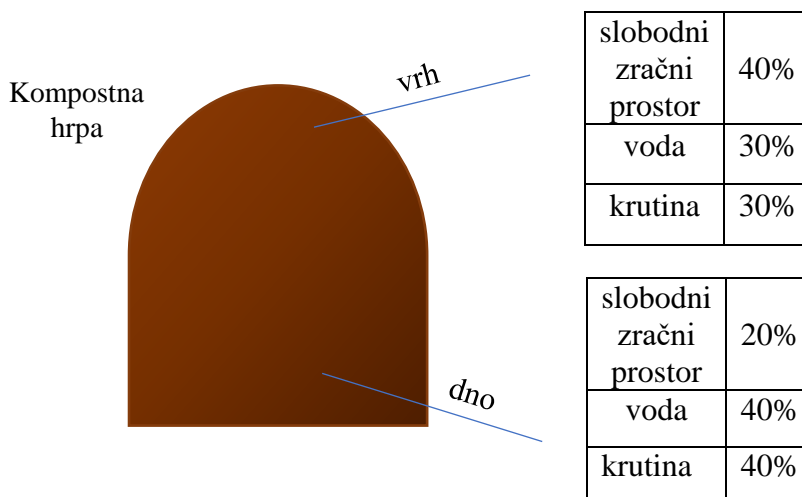
Omjer ugljika i dušika

Za biološku razgradnju u supstratu su odgovorni mikroorganizmi, a za aktivnost njihovog metabolizma potrebne su hranjive tvari od kojih su najbitniji ugljik i dušik, te fosfor i kalij u tragovima. Omjer ugljika i dušika (C/N) jedan je od najvažnijih pokazatelja ravnoteže hranjivih tvari. Na svaku jedinicu dušika uključeno je oko 30 jedinica ugljika, a čak 20 tih jedinica ugljika je oksidirano u ugljikov(IV) oksid [12]. Upravo zbog toga se smatra da je optimalni omjer C/N za proces kompostiranje u rasponu od 25:1 do 35:1. Ukoliko je omjer veći od optimalnog dolazi do usporavanja procesa kompostiranja, dok se pri nižim omjerima C/N dušik gubi i stvara se amonijak. Pojavom amonijaka smanjuje se uporabna vrijednost konačnog produkta, a osim toga, amonijak je štetan za atmosferu i uzrokuje povećavanje pH vrijednosti komposta i pojavu neugodnih mirisa. Stalnim smanjenjem C/N omjera postiže se uspješnost procesa te zrelost i stabilnost konačnog produkta [17]. U tablici 1.3 dani su primjeri izvora ugljika i dušika.

Tablica 1.3. Izvori ugljika i dušika [17]

Izvori			
C/N omjer (izvori bogati ugljikom)		C/N omjer (izvori bogati dušikom)	
Karton	200-500	Ostatci hrane	15-25
Lišće	30-80	Ostaci trave	15-25
Novine	560	Kravlji gnoj	20
Piljevina	100-230	Svinjski gnoj	5-7
Zob, ražena slama	70-90	Stajsko gnojivo	5-10
Pšenična slama	140-150	Vrtni ostavi	20-60
Drvena iverica	200-700	Talag kave	20

Fizikalne karakteristike supstrata se očituju kroz veličinu čestica, poroznost, strukturu, gustoću, slobodni zračni prostor. Optimalna veličina čestica se kreće od 4 do 7 cm. Sitnije čestice povećavaju površinu materijala i utječu na brzinu procesa kompostiranja. Međutim, smanjeni promjer čestica uzrokuje sabijanje kompostne mase, a time i na smanjeni prolaz kisika pa dolazi do anaerobnih uvjeta. Krupnije čestice potpomažu zračenju i daju rahliju strukturu. Dakle, može se zaključiti da veličina čestica i poroznost utječu na aeraciju. Poroznost je određena veličinom i vrstom čestica te visinom kompostne hrpe (slika 1.6). Slobodni zračni prostor predstavlja dio pore koji nije zauzet tekućinom, a njegov udio u hrpi varira od početka do kraja procesa (na početku je veći od 50%), tj. mijenja se vremenom zbog zbijanja čestica [17].



Slika 1.6. Udio slobodnog zračnog prostora, vode i krutine ovisno o visini kompostne hrpe [17]

Gustoća je također povezana sa slobodnim zračnim prostorom. Manja gustoća podrazumijeva manju poroznost i manji udio slobodnog zračnog prostora [17].

Mikroorganizmi

U procesu kompostiranja veliku ulogu imaju aerobni mikroorganizmi i to bakterije i gljive čija aktivnost ovisi o vlažnosti kompostne mase, količini kisika, pH vrijednosti i vrsti supstrata [18]. Mikroorganizmi koriste supstrat kako bi dobili energiju i hranjive tvari, a njihova aktivnost uzrokuje rast temperature. Zbog toga je potrebno osigurati da supstrat ima dovoljnu količinu:

- ugljika - kako bi se ubrzao njihov metabolizam
- dušika - potiče rad enzima u procesu raspadanja

Mikroorganizmi izlučuju enzime - specijalizirane proteine koji imaju moć razbijanja kemijskih veza i tako razgrađuju organsku tvar. U proces kompostiranja uključeni su sljedeći mikroorganizmi:

Bakterije - mikroorganizmi koji su najodgovorniji za razgradnju organske tvari i stvaranje topline. Većina mikrobioloških komponenata se odnosi upravo na njih, tj. čine 80-90% mikroba u kompostnoj hrpi, a hrane se ugljikovim spojevima.

Gljive - najbrojnije su tijekom mezofilnih faza. One mijenjaju kemijska i mehanička svojstva kompostne mase tvoreći manje nakupine te tako poboljšavaju propusnost i aeraciju. Kada su temperature previsoke, gljive odlaze u vanjski dio kompostne mase gdje je temperatura niža u odnosu na sredinu. Imaju vrlo važnu ulogu u razgradnji žilavih i složenih organskih ostataka kao što su celuloza, hemiceluloza i lignin, a mogu razgraditi i suhe, kisele ostatke te ostatke s niskim sadržajem dušika koji su otporni na bakterijsko djelovanje.

Aktinomiceti - posebna su skupina bakterija, ali svojim izgledom nalikuju gljivama jer tvore niti (kao siva paukova mreža). Pojedine vrste djeluju u termofilnoj fazi, dok neke vrste djeluju u fazi zrenja. Njihove niti im služe za stvaranje stabilnih organskih nakupina u fazi zrenja. Razgrađuju celulozu, lignin, hitin, proteine, koru, papir i drvenaste stabljike, a žive u širem rasponu pH vrijednosti nego neke bakterije [12].

Praživotinje - jednostanični su organizmi koji žive u kapljicama vode u kompostu. Za razliku od ostalih mikroorganizama imaju manju ulogu u razgradnji [19].

Kolnjaci - vrlo su male životinje koje pripadaju natkoljenu oblenjaka. Također se hrane organskom tvari, bakterijama i gljivicama, a nalaze se u kapljicama vode komposta [20].

Vlažnost

Kako za druge žive organizma tako i za rad mikroorganizama potrebna je voda. Idealna važnost na početku procesa kompostiranja je oko 50-60%. Međutim, udio vlage ovisi i o otpadu koji se kompostira, o njegovim fizikalnim svojstvima, veličini čestica i samom sustavu u kojem se proces provodi. Prevelika količina vlage smanjuje zračni prostor i otežava prolaz i prijenos kisika čime se stvaraju anaerobni uvjeti u sustavu što dovodi do smanjenje brzine procesa i nastanka anaerobnih plinova. Ako je sadržaj vode ispod 40% dolazi do dehidriranja kompostne mase i zaustavljanja biološkog procesa. Nastaje fizički stabilan, ali biološki nestabilan produkt. Vlažnost ispod 8% je nedopustiva jer tada prestaju sve mikrobne aktivnosti [15,17,18]. Vlažnost se određuje trenutno testom gnečenja.

Kisik

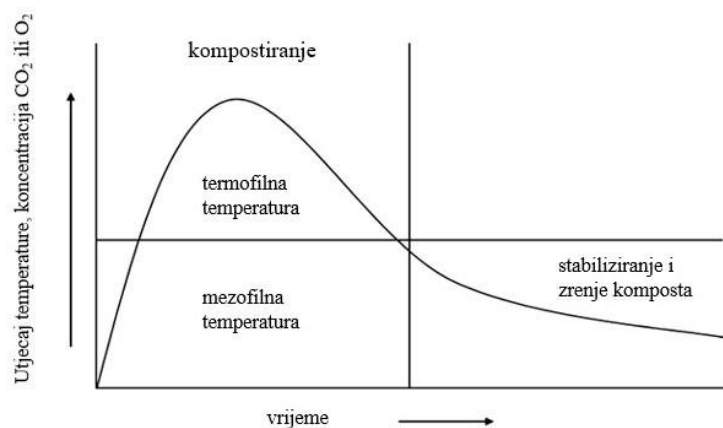
Protok kisika (zraka) kroz kompostnu masu jedan je od najvažnijih čimbenika procesa kompostiranja. Prozračivanjem kompostne mase omogućuju se aerobni uvjeti. Za održavanje idealnih aerobnih uvjeta koncentracije kisika trebaju biti iznad 10%. Koncentracije kisika ispod 5% dovode do stvaranja anaerobnih uvjeta i nastanka plina metana. Aeracija se može vršiti prirodnom i prisilno. Previsoke koncentracije kisika pak dovode do isušivanja kompostne mase. Tijekom procesa razina zraka se mijenja jer se mijenja koncentracija ugljikova (IV) oksida, tj. kako se povećava koncentracija CO₂, koncentracija kisika postepeno opada. Koncentracija CO₂ se kreće između 0,5-5%, a kisika između 15-20%. Aeracijom se doprema kisik do kompostne mase, ali se omogućuje i kontrola temperature i vlažnosti.

Aeracija može biti:

- Prirodna – temperatura u sredini hrpe je viša od temperature okoliša pa se zrak giba uvis zbog čega se stvara podtlak koji usisava svjež zrak na bočnim stranama hrpe.
- Prisilna – razlikuje se pozitivna i negativna prisilna aeracija. Pozitivna prisilna aeracija je upuhivanje zraka ventilatorima kroz perforirane cijevi na dnu hrpe, dok negativna prisilna aeracija predstavlja vakuum crpku koja crpi zrak iz hrpe i tako uvlači zrak iz okoline putem površine hrpe [7].

Temperatura

Procesom kompostiranja se oslobađa velika količina topline jer je kompostiranje egzoterman proces. Temperatura kompostne mase raste visoko iznad okolišne što je jedan od rezultata mikrobne aktivnosti. Mikroorganizmi koriste za sintezu ATP-a samo 40-50% te topline, dok ostatak ostaje izgubljen u masi. Najveća mikrobiološka aktivnost je pri temperaturama od 30 do 45 °C (prva mezofilna faza). Sve do 70 °C moguća je razgradnja jednostavnih molekula, dok pri većim temperaturama dolazi do inhibicije rasta mikroorganizama i samo pojedine vrste termofilnih bakterija ostaju aktivne. Osim za razgradnju složenih molekula, visoka temperatura je važna za higijenzaciju, odnosno uništavanje patogenih organizama te jajašaca insekata. U drugoj mezofilnoj fazi nastupa hlađenje kompostne mase te zrenje i stabiliziranje produkta [12].



Slika 1.7. Promjena temperature i koncentracije ugljikovog dioksida u procesu kompostiranja [21]

pH vrijednost

pH vrijednost supstrata u procesu kompostiranja se kreće u rasponu od 5,5 do 8,0. U početnoj fazi pH vrijednost je niža jer razgradnjom jednostavnih organskih molekula kao međuprodukt nastaju organske kiseline. Mineralizacijom organskog dušika oslobađa se amonijak što dovodi do povećanja pH vrijednosti do 8,5. Vrijednost pH se može vrlo lako regulirati dodatkom supstrata vapna ili natrijev hidrogen-karbonata u slučaju da je supstrat prelužnat ili dodatkom supstrata lužnate ili neutralne vrijednosti u slučaju kiselog supstrata [7].

Miješanje

Miješanje je bitan segment procesa kompostiranja jer se postiže homogenizacija cijele smjese, raspodjeljuju se mikroorganizmi, a ujedno se obavlja i aeracija kompostne mase te se pogoduje isparavanju plinova i vode. Naime, za rad mikroorganizama potreban je kisik, a miješanjem se postiže dovod svježeg zraka, a samim time se omogućuje ispuštanje amonijaka koji nastaje i povećava pH vrijednost kompostne mase [17].

Vrijeme

Prema literaturi, proces kompostiranja je gotov nakon 6 mjeseci, ali to može trajati i kraće ukoliko su uvjeti odgovarajući. Kompostiranje je završeno kad:

- toplina se miješanjem zadržava
- volumen izvornog materijala je smanjen na 2/3
- izvorna tvar se ne može prepoznati
- kompost je tamne boje
- kompost miriše na zemlju [17].

1.4.3. Sustavi za proces kompostiranja

Za proces kompostiranja, osim vrste otpada koja se želi kompostirati, bitno je sagledati ekonomsku isplativost, zakonske propise te lokaciju i kvalitetu konačnog produkta. Zbog toga je sustav provedbe procesa kompostiranja bitna stavka. Sustavi za kompostiranje sa stajališta kemijskog inženjerstva dijele se na :

- nereaktorske (otvorene)
- reaktorske (zatvorene).

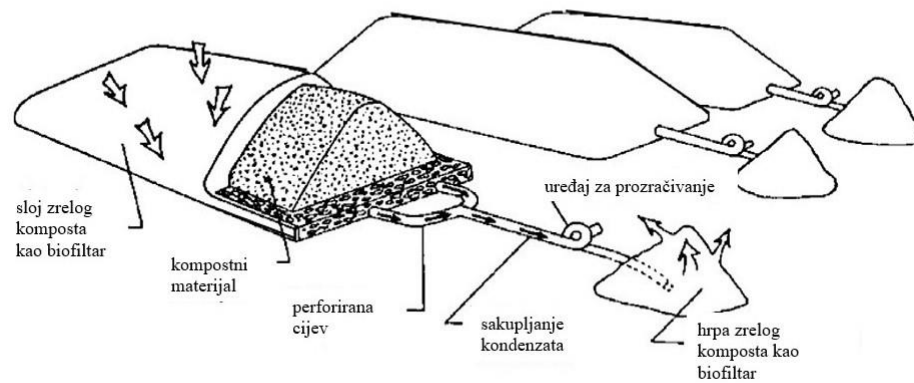
Otvoreni sustavi su jeftiniji i jednostavniji za korištenje pa se zbog toga češće i primjenjuju. Međutim, njihov veliki nedostatak je gubitak plinova koji nastaju kao nusprodukt kompostiranja. Ti plinovi se gube isparavanjem u atmosferu (staklenički plinovi) ili ispiranjem u podzemne vode. Drugi nedostaci ovog sustava su i dugotrajnost procesa, ovisnost o vremenskim uvjetima, širenje neugodnih mirisa te mogućnost samozapaljenja ukoliko nema miješanja sustava [11,18]. Dvije osnovne vrste ovakvih sustava su:

- *windrow sustavi* – sustavi kojima se dobiva kompost nalazi u dugim redovima. Obrađuje se primjenom mehanizacije i stoga se primjenjuje za velika gospodarstva.



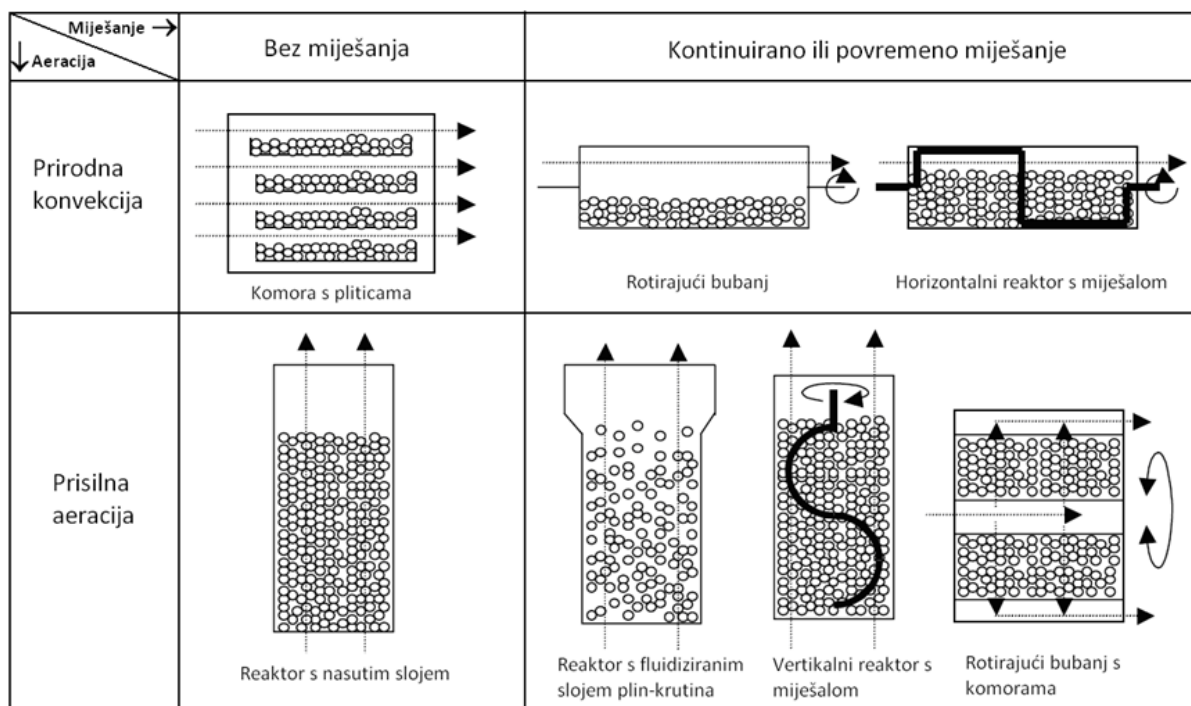
Slika 1.8. *Windrow sustav* kompostiranja [22]

- kompostiranje u hrpi ili stogu – najjednostavniji i najjeftiniji sustavi za kompostiranje koji se koriste za manja gospodarstva. Provodi se izvedbom hrpe ili stoga pa nema miješanja niti prevrtanja materijala, a primjenjuje se u manjim gospodarstvima.



Slika 1.9. Kompostiranje u hrapama s prisilnom aeracijom [11]

Zatvoreni (reaktorski) sustavi se općenito mogu podijeliti na vertikalne (reaktori s nasutim slojem ili reaktori s miješalom) i horizontalne (reaktori s miješalom ili rotirajući reaktori) što se vidi iz slike 1.10. Glavna prednost zatvorenih sustava u odnosu na otvorene sustave je mogućnost kontrole procesa (temperatura, vlaga, prozračnost) što značajno utječe na vrijeme trajanja procesa (15-30 dana). Smanjena je emisija štetnih plinova i potreba za ljudskim radom, a nastala otpadna voda se može sakupljati i obrađivati. Zbog kontrole procesnih parametara sprječava se značajan gubitak topline i isparavanja vode što je inače slučaj kod otvorenih reaktorskih sustava. Najveći nedostatak je izgradnja ovakvih sustava jer cijena materijala i prateće mehaničke opreme zahtjeva veliki ekonomski trošak [12].



Slika 1.10. Osnovna podjela reaktora u procesima biorazgradnje u čvrstom stanju [23]

1.4.4. Kinetika kompostiranja

Kompostiranje je proces aerobne pretvorbe kojim se pomoću mikroorganizama obrađuje i stabilizira biološki razgradivi otpad uz razvoj topline. Uključuje tri faze unutar kojih se odvija reakcija te mikroorganizme koji imaju određenu dinamiku izmjene mikrobne populacije. Zbog složenosti, proces se analizira kao proces biološke razgradnje u čvrstom stanju. Kao alati za optimizaciju procesa kompostiranja koriste se kinetički modeli. Upravo pomoću kinetičkog modela i kontroliranjem procesnih parametara (temperatura, sadržaj organske tvari, sadržaj vlage, omjer koncentracije O₂/CO₂, pH vrijednost, omjer C/N, veličina čestica) može se predvidjeti stupanj razgradnje otpada. Kinetika kompostiranja bitna je za dizajniranje i rad postrojenja za kompostiranje [24].

Proces kompostiranja matematički se može najjednostavnije opisati pomoću kinetičkog modela prvog reda prema jednadžbi (1-2), [24, 25]:

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (1-2)$$

gdje je:

C - sadržaj biorazgradive tvari, g

k - konstanta brzine razgradnje, dan⁻¹

t - vrijeme, dan.

Konstanta brzine razgradnje ovisna je o temperaturu i u literaturu se mogu naći različiti modeli kojima se opisuje vrijednost konstante.

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1. Opis procesa kompostiranja

Biootpad upotrijebljen u ovom diplomskom radu prikupljen je u studentskoj menzi Kampus u okviru Studentskog centra Sveučilišta u Splitu. Biootpad (supstrat) se sastojao se od kore luka, zelene salate, krastavca, naranče, rajčice i taloga kave (slika 2.1.a). Ukupnja masa biootpada bila je 23kg. Biootpad je samljeven pomoću sjeckalice (slika 2.1.b), izmiješan te je prepolovljen na dva uzorka jednake mase: jedan uzorak je potom smješten u otvorenu posudu pravokutnog oblika (30x45x35cm) i izmiješan sa slamom kao strukturnim materijalom (uzorak A), dok je drugi uzorak izmiješan s piljevinom kao strukturnim materijalom i smješten u rotirajućem bubnju ručne kompostera (uzorak B). Dimenzije konstrukcije su: 95x108x50cm, a dimenzije bubnja su: D (duljina) = 80 cm, R (promjer) = 48 cm, V (volumen) = 150 L. Izgled otvorene posude, u kojoj je bio kompost A i kompostera s rotirajućim bubnjem su dani na slici 2.2. Tijekom kompostiranja dodavana je piljevina zbog bolje regulacije vlažnosti te organsko gnojivo biogarden u cilju podešavanja C/N omjera. Vlažnost kompostne mase svakodnevno je određivana testom gnječenja. Test gnječenja jednostavna je metoda za približno određivanje stanja vlažnosti kompostne mase:

- ako se stiskom šake može ocijediti voda iz kompostne mase, kompostna masa je previše vlažna
- ako se nakon otpuštanja šake kompostna masa – tvorivo zadržava oblik šake, stupanj vlažnosti je dobar
- ako se prilikom stiska ne osjeti vlažnost, a nakon otpuštanja šake tvorivo se mrvi, vlage je premalo.

Proces kompostiranja je trajao 25 dana tijekom kojih se svakodnevno vršilo ručno miješanje 2-3 puta dnevno uz dodavanje vode po potrebi.



a)



b)

Slika 2.1. a) biootpad, b) sjeckalica Hurricane HMH-E 2440

Za dobar postupak kompostiranja temperatura, kisik i vlaga trebaju biti konstantni u cijeloj kompostnoj masi.



a)



b)

Slika 2.2. Izvedbe procesa kompostiranja: a) otvorena posuda, b) rotacijski komposter

Uzorkovanje kompostne mase

Uzorkovanje je provedeno ručno iz posude otvorenog tipa (A) i iz rotirajućeg bubnja kompostera (B) na način da se na šest mjesta (cik-cak) uzimao uzorak kompostne mase, uz prethodno miješanje i homogeniziranje obje hrpe. Nakon svakog uzorkovanja provedene su analize izvornog materijala i komposta.

2.2. Analiza kompostne mase

Tijekom procesa kompostiranja praćeni su sljedeći parametri: sobna temperatura, temperatura uzorka A i B, vlažnost, udio suhe tvari, udio hlapljive tvari, udio ugljika i dušika, C/N omjer te pH vrijednost i električna vodljivost. Nakon analize, ostatak uzorka je stavljen u plastične vreće (da se spriječi gubitak vlage) te čuvan u hladnjaku.

Temperatura kompostne mase i sobna temperatura su praćene minimalno dva puta na dnevno, a ostali parametri su određivani u kompostnoj masi koji je uzorkovan svako 3-5 dana. Oznake uzoraka i vrijeme uzorkovanja kompostne mase naznačeni su u sljedećoj tablici.

Tablica 2.1. Oznake uzoraka i vrijeme uzorkovanja kompostne mase

Oznaka uzorka	Opis
A ₀	Kompostna masa 18. 6. 2020.
B ₀	Kompostna masa 18. 6. 2020.
A ₁	Kompostna masa 23. 6. 2020.
B ₁	Kompostna masa 23. 6. 2020.
A ₂	Kompostna masa 26. 6. 2020.
B ₂	Kompostna masa 26. 6. 2020.
A ₃	Kompostna masa 29. 6. 2020.
B ₃	Kompostna masa 29. 6. 2020.
A ₄	Kompostna masa 02. 7. 2020.
B ₄	Kompostna masa 02. 7. 2020.
A ₅	Kompostna masa 07. 7. 2020.
B ₅	Kompostna masa 07. 7. 2020.
A ₆	Kompostna masa 13. 7. 2020.
B ₆	Kompostna masa 13. 7. 2020.

2.2.1. Određivanje temperature kompostne mase i sobne temperature tijekom procesa kompostiranja

Temperatura kompostne mase je mjerena svaki dan 2-3 puta pomoću kontaktnog termometra jednostavnim postavljenjem termometra u sredinu kompostne mase. Također je mjerena i sobna temperatura.

Rezultati mjerenja sobne temperature i kompostne mase su prikazani u tablici 3.1.

2.2.2. Određivanje sadržaja vlage i 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 prema jednadžbi (2-1) te maseni udio suhe tvari prema jednadžbi (2-2), [12]:

$$w(\text{H}_2\text{O}) = \frac{m(\text{VT}) - m(\text{ST})}{m(\text{VT})} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2-1)$$

$$w(\text{ST}) = 1 - w(\text{H}_2\text{O}) \quad [\%] \quad (2-2)$$

gdje:

$w(\text{H}_2\text{O})$ - udio vlage u uzorku, %

$m(\text{VT})$ - masa vlažnog uzorka, g

$m(\text{ST})$ - masa suhog uzorka, g

$w(\text{ST})$ - udio suhe tvari u uzorku, %.

Primjer proračuna za A_0 :

$$m(\text{VT}) = 1,1880 \text{ g}$$

$$m(\text{ST}) = 0,3226 \text{ g}$$

$$w(\text{H}_2\text{O}) = ?$$

$$w(\text{ST}) = ?$$

$$w(\text{H}_2\text{O}) = \frac{1,1880 - 0,3226}{1,1880} \cdot 100 = 72,84\%$$

$$w(\text{ST}) = 1 - 0,7284 = 0,2716 \cdot 100 = 27,16\%$$

Rezultati određivanja sadržaja vlage i suhe tvari su prikazani u tablici 3.2.

2.2.3. Određivanje hlapive tvari i sadržaja ugljika

Uzorci su nakon sušenja spaljeni na plameniku u digesteru, a zatim žareni u mufolnoj peći pri 550 °C do konstantne mase. Udio hlapive tvari u supstratu izračunava se prema izrazu (2-3). Udio ugljika se prema literaturi [12] izračunava prema izrazu (2-4):

$$w(\text{HT}) = \frac{m(\text{ST}) - m(\text{pepeo})}{m(\text{ST})} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2-3)$$

$$w(\text{C}) = \frac{w(\text{HT})}{1,8} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2-4)$$

gdje je:

$w(\text{HT})$ - udio hlapljive tvari, %

$m(\text{pepeo})$ - masa uzorka nakon žarenja, g

$w(\text{C})$ - udio ugljika, %.

Primjer proračuna za A_0 :

$$m(\text{HT}) = 1,1672 \text{ g}$$

$$m(\text{ST}) = 0,3226 \text{ g}$$

$$m(\text{pepeo}) = 0,8654 \text{ g}$$

$$w(\text{HT}) = ?$$

$$w(\text{C}) = ?$$

$$w(\text{HT}) = \frac{1,1672 - 0,8654}{0,3226} \cdot 100 = 93,55\%$$

$$w(\text{C}) = \frac{0,9355}{1,8} \cdot 100 = 51,97 \%$$

Rezultati određivanja hlapive tvari i sadržaja ugljika prikazani su u tablici 3.3.

2.2.4. Određivanje pH-vrijednosti i električne vodljivosti

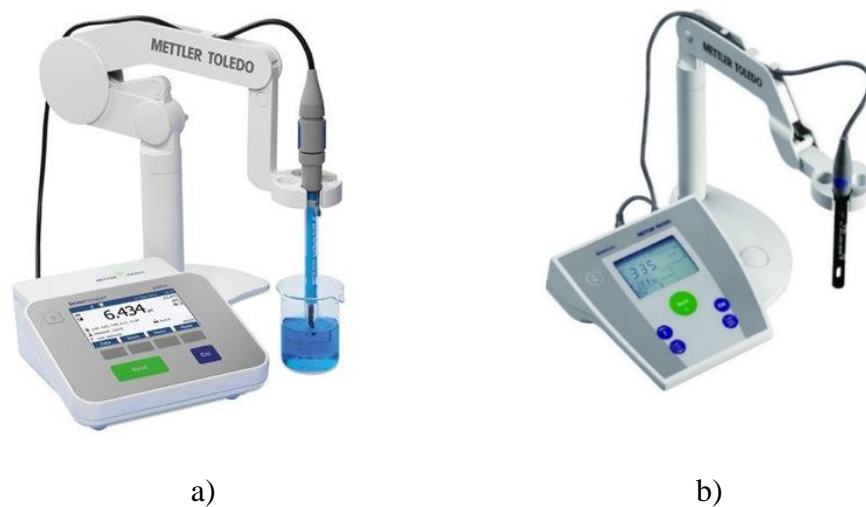
U Erlenmeyer tikvicu odvagano je 5 g uzorka i dodano 100 cm³ deionizirane vode. Nakon 15 minuta miješanja na mješalici uzorak je filtriran kroz naborani filter papir te su određivani pH-vrijednost i električna vodljivost. U filtratu su pH-vrijednost i električna vodljivost određene izravnim uranjanjem elektroda.

pH vrijednost

pH vrijednost je mjera kiselosti ili lužnatosti vodenih otopina. Ispitivanje pH vrijednosti provedeno je laboratorijskim pH metrom koji je prikazan na slici 2.1. Elektroda pH- metra se ispere destiliranom vodom, osuši te se uroni u uzorak. Nakon što se mjerenje stabilizira, očitava se vrijednost pH.

Električna vodljivost

Recipročna je vrijednost električne otpornosti i izražava se u S/m ili $\mu\text{S}/\text{m}$. Električna vodljivost čiste vode je vrlo niska, ali ako voda sadrži ione otopljenih soli koji vode struju, električna vodljivost je znatno veća. Zbog toga ona može poslužiti kao pokazatelj ukupne koncentracije soli u vodi. Temperatura utječe na vrijednost električne vodljivosti. Standardna temperatura za određivanje je 25°C. Određivanje treba biti pri navedenoj ili što bližoj temperaturi. Na Slici 2.2 prikazan je konduktometar korišten u navedenim mjerenjima.



Slika 2.3. a) pH – metar tipa Mettler Toledo, b) konduktometar tipa Mettler Toledo [26]

Rezultati mjerenja pH i električne vodljivosti prikazani su u tablici 3.4.

2.2.5. Određivanje dušika po Kjeldahlu

Dušik po Kjeldahlu predstavlja organski i amonijakalni dušik, a određuje se metodom po Kjeldahlu koja se temelji na prethodnoj mineralizaciji/oksidaciji uzorka s jakim oksidansom pri 420 °C uz katalizator $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ i K_2SO_4 (postupak razgradnje). Reakcijom nastaje amonijev sulfat iz kojeg se oslobađa amonijak destilacijom, a koji se određuje volumetrijski, kiselo – baznom titracijom s NaOH do prijelaza boje iz ružičaste u žutu (postupak destilacije).

Opis reakcija:

- Mineralizacija



- Alkalizacija s NaOH u suvišku



- Destilacija uz kloridnu kiselinu u suvišku



- Titracija viška neizreagirane kloridne kiseline s otopinom NaOH



Potreban pribor:

- uređaj za digestiju
- uređaj za destilaciju
- 6 staklenih epruveta
- 6 Erlenmayerovih tikvica
- bireta.

Potrebne kemikalije:

- koncentrirana sulfatna kiselina
- katalizator, $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ i K_2SO_4 , 1:9
- 0,1 mol/L HCl
- 0,1 mol/L NaOH
- 40 % otopina NaOH
- indikator metilcrveno.

Postupak razgradnje:

Nakon sušenja uzorka na zraku i usitnjavanja u tarioniku (da se postigne homogenizacija uzorka), odvagana je određena masa uzorka u staklene kivete te je dodan katalizator u omjeru 1:9 (1g + 9 g) i 10 mL koncentrirane sulfatne kiseline. Potom se staklene kivete se prenesu u uređaj za digestiju i zagrijavaju 20 minuta na 150 °C, 30 minuta na 250 °C i 1 sat na 420 °C. Nakon mineralizacije tekućina u epruvetama je zelene boje, a nakon hlađenja sadržaj poprima svijetlo plavu boju. Nakon što otopina poprimi svijetlo plavu boju, u svaku epruvetu se doda po 75 mL destilirane vode. Na slici 2.3 prikazan je uređaj za digestiju uzorka.



Slika 2.4. Uređaj za digestiju uzorka

Postupak destilacije:

Ohlađena epruveta s ispitivanim uzorkom se stavi u uređaj za destilaciju po Kjeldahlu. U prihvatnu Erlenmayerovu tikvicu koja služi za sakupljanje amonijaka, otpipetira se 20 mL 0,1 mol/L kloridne kiseline i stavi par kapi indikatora metilcrveno. Uređaj za destilaciju podesi se tako da je vrijeme trajanja destilacije 5 minuta, a zadani volumen 40 %-tne NaOH 50 mL. Nakon destilacije se provodi titracija neizreagirane HCl s 0,1 mol/L NaOH do promjene boje iz ružičaste u žutu. Isti postupak se ponavlja za slijepu probu. Na slici 2.6. prikazan je uređaj za destilaciju.



Slika 2.5. Uređaj za destilaciju

Izračunavanje dušika po Kjeldahlu [12]:

$$\gamma(\text{N}_2) = \frac{(V_{\text{NaOH,SP}} - V_{\text{NaOH,uzorak}}) \cdot c(\text{NaOH}) \cdot f(\text{NaOH}) \cdot M(\text{N}_2) \cdot 100}{m_{\text{uzorak}}} [\%] \quad (2-9)$$

gdje je:

$V_{\text{NaOH, SP}}$ - volumen 0,1 mol L⁻¹ NaOH za titraciju slijepe probe

$V_{\text{NaOH, uzorak}}$ - volumen 0,1 mol L⁻¹ NaOH za titraciju uzorka

$c(\text{NaOH})$ - koncentracija otopine NaOH, titranta

$M(\text{N}_2)$ - molarna masa dušika, 14,007 g mol⁻¹

m_{uzorak} - masa uzorka, g.

Primjer proračuna za uzorak A₀:

$V_{\text{NaOH, SP}} = 19,65 \text{ mL}$

$V_{\text{NaOH, uzorak}} = 15,8 \text{ mL}$

$c(\text{NaOH}) = 0,1 \text{ mol L}^{-1}$

$m_{\text{uzorak}} = 2,5733 \text{ g}$

$\gamma(\text{N}_2) = ?$

$$\gamma(\text{N}_2) = \frac{(19,65 - 15,8) \cdot 0,1 \cdot 14,007}{2,5733} \cdot 100 = 0,2096 \%$$

Rezultati određivanja dušika prikazani su u tablici 3.5.

3. REZULTATI

3.1. Rezultati mjerenja parametara tijekom procesa kompostiranja

Rezultati mjerenja temperature kompostne mase i sobne temperature tijekom procesa kompostiranja od 18. 6. 2020 do 13. 7. 2020. prikazani su u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Rezultati mjerenja temperature kompostne mase i sobne temperature tijekom procesa kompostiranja

Broj dana	Vrijeme mjerenja/h	t/h	$t/dani$	$T_{sobna}/^{\circ}C$	$T_A/^{\circ}C$	$T_B/^{\circ}C$
0	12	0	0	25,5	22,0	22,0
	19	7	0,2917	25,0	25,0	26,0
1	8	20	0,8333	23,0	26,0	27,0
	17	29	1,2083	26,5	31,0	32,5
2	9	45	1,8750	25,5	41,0	33,0
	19	55	2,2917	25,0	45,0	33,0
3	10	70	2,9167	19,0	46,0	34,0
	19	79	3,2917	26,0	47,0	36,0
4	9	99	4,1250	25,0	44,0	34,0
	19	99	4,1250	26	46,0	36,0
5	9	113	4,7083	25,5	46,0	32,0
	14	118	4,9167	25,5	41,0	30,0
	19	123	5,1250	26,0	42,0	31,0
6	9	137	5,7083	25,5	39,0	30,0
	19	147	6,1250	27,0	40,0	30,0
7	9	161	6,7083	26,0	38,0	32,0
	16	168	7,0000	27,0	37,0	30,0
8	9	185	7,7083	26,5	37,0	32,0
	16	192	8,0000	27,5	36,0	30,0
9	9	209	8,7083	25,5	35,0	30,0
	19	219	9,1250	25,0	35,0	31,0

nastavak tablice 3.1.

10	9	233	9,7083	26,5	36,0	31,5
	19	243	10,1250	28,5	36,0	31,5
11	9	257	10,7083	27,0	38,0	36,0
	15	263	10,9583	28,0	37,5	31,0
12	9	281	11,7083	27,5	37,0	31,0
	16	288	12,0000	27,0	36,0	31,0
13	9	305	12,7083	27,5	35,5	30,5
	14	310	12,9167	2,08	35,0	31,0
	19	315	13,1250	25,5	35,0	31,0
14	9	329	13,7083	28,0	37,5	30,0
	15	335	13,9583	28,5	37,0	30,0
15	9	353	14,7083	28,0	38,0	31,0
	16	360	15,0000	29,0	37,0	30,0
16	10	378	15,7500	28,0	35,0	29,5
	19	387	16,1250	29,0	36,0	30,0
17	12	404	16,8333	28,0	34,0	29,0
18	9	425	17,7083	28,0	34,0	28,5
	14	430	17,9167	28,0	33,0	28,0
19	9	449	18,7083	27,5	33,0	28,0
	15	455	18,9583	28,0	32,0	27,5
20	9	473	19,7083	27,0	30,0	27,0
	20	484	20,1667	28,0	30,5	28,0
21	8	496	20,6667	28,0	30,0	28,0
	18	506	21,0833	30,5	32,0	30,5
22	9	521	21,7083	27,0	31,0	27,5
	13	525	21,8750	27,5	31,0	28,0
23	11	543	22,6250	27,0	31,0	28,5
24	12	568	23,6667	27,0	33,0	29,0
25	9	589	24,5417	26,5	30,0	27,0

Rezultati određivanja sadržaja vlage i suhe tvari prikazani su u tablici 3.2.

Tablica 3.2. Prikaz sadržaja vlage i suhe tvari u uzorcima

uzorak	$w(\text{H}_2\text{O}) / \%$	$w(\text{ST}) / \%$
A ₀	72,84	27,16
B ₀	75,52	24,48
A ₁	73,25	26,75
B ₁	74,66	25,34
A ₂	75,31	24,69
B ₂	73,56	26,44
A ₃	72,88	27,12
B ₃	72,33	27,67
A ₄	72,60	27,40
B ₄	72,11	27,89
A ₅	72,07	27,93
B ₅	72,14	27,86
A ₆	69,08	30,92
B ₆	69,25	30,75

Rezultati određivanja sadržaja vlage i suhe tvari prikazani su u tablici 3.3.

Tablica 3.3. Prikaz sadržaja hlapljive tvari u uzorcima

uzorak	w(HT) / %	w(C) / %
A ₀	93,55	51,9946
B ₀	93,91	52,3375
A ₁	93,76	51,7282
B ₁	94,31	52,1980
A ₂	91,40	50,7171
B ₂	93,34	52,0462
A ₃	93,47	50,4182
B ₃	94,05	52,2476
A ₄	90,69	50,3852
B ₄	92,55	51,4192
A ₅	90,13	50,0701
B ₅	91,18	50,6576
A ₆	88,02	48,9026
B ₆	91,41	50,7406

Rezultati određivanja pH vrijednosti i električne vodljivosti su prikazani u tablici 3.4.

Tablica 3.4. Prikaz određivanja pH vrijednosti i električne vodljivosti

uzorak	pH	$G / \mu\text{S cm}^{-1}$
A ₀	6,36	455
B ₀	6,17	392
A ₁	7,67	405
B ₁	7,32	273
A ₂	7,94	416
B ₂	7,68	313
A ₃	7,87	449
B ₃	7,88	363
A ₄	7,96	494
B ₄	8,65	472
A ₅	8,56	521
B ₅	8,84	429
A ₆	7,54	671
B ₆	7,59	565

Rezultati određivanja dušika po Kjeldahlu su prikazani u tablici 3.5.

Tablica 3.5. Prikaz određivanja dušika po Kjeldahlu

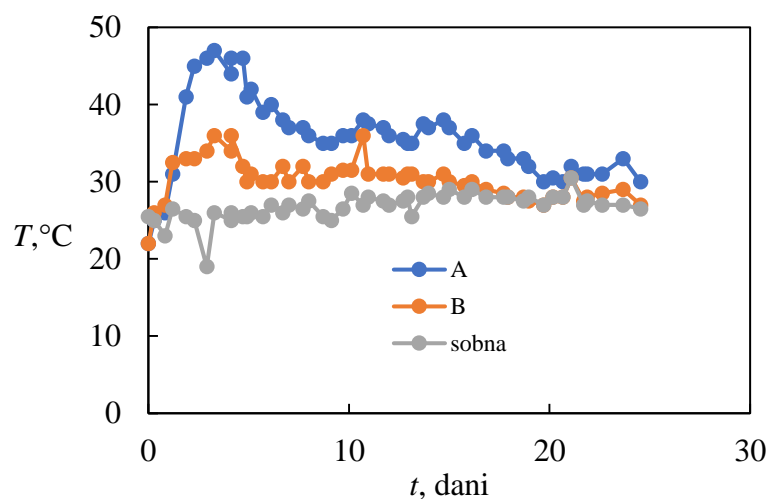
uzorak	$w(\text{N}_2) / \%$
A ₀	0,2096
B ₀	0,2463
A ₁	0,1974
B ₁	0,2186
A ₂	0,3208
B ₂	0,2867
A ₃	0,3089
B ₃	0,3631
A ₄	0,3960
B ₄	0,3296
A ₅	0,5011
B ₅	0,2654
A ₆	0,4728
B ₆	0,3603

4. RASPRAVA

4.1 Analiza procesa kompostiranja

4.1.1. Analiza temperature kompostne mase i sobne temperature tijekom procesa kompostiranja

Promjena temperature izravno je povezana s biokemijskom aktivnošću mikroorganizama, koji razgradnjom organske tvari oslobađaju toplinu i time uzrokuju porast temperature u supstratu. Promjenom temperature u kompostnoj masi dolazi do promjene broja i vrsta članova u mješovitoj kulturi mikroorganizama koji sudjeluju u razgradnji supstrata. Rezultati praćenja temperature kompostne mase i sobne temperature tijekom procesa kompostiranja dani u tablici 3.1, grafički su prikazani na slici 4.1.



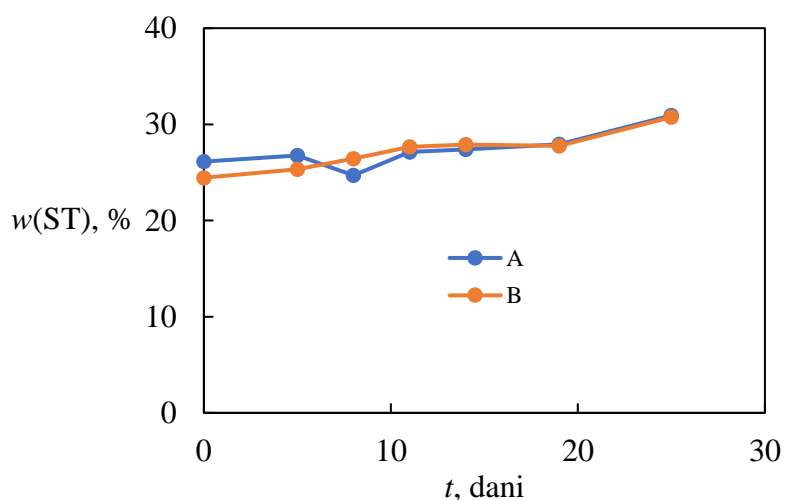
Slika 4.1. Rezultati praćenja temperature komposta i sobne temperature tijekom procesa kompostiranja

Rezultati pokazuju da temperatura uzorka A raste naglo tijekom prvih tri dana, od sobne temperature 22 °C do 47 °C. Nagli porast temperature je posljedica aktivnosti termofilnih mikroorganizama. Nakon tri dana slijedi temperaturni pad do 11-tog dana kada temperatura ponovno poprima vrijednost od 38 °C. Nakon toga slijedi kontinuirani lagani pad do 30 °C u 25-tom danu. Kod uzorka B, tijekom prvih 3-5 dana, temperatura prvo naglo raste od sobne temperature do 36 °C te kontinuirano raste do 26 °C. Vidljivo je da uzorak A ima zadovoljavajući porast temperature (termofilno područje), dok uzorak B postiže nižu temperaturu od 36 °C. Razlog ovakvom ponašanju može biti izvedba procesa

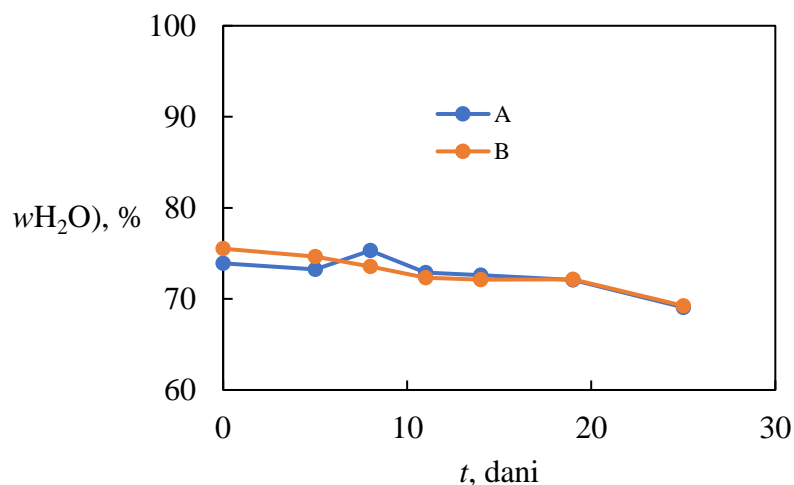
kompostiranja. Kompostiranje uzorka A je provedeno u otvorenom sustavu, a uzorka B u zatvorenom rotacijskom bubnju. Tijekom mjerenja temperature kompostne mase, temperatura komposta A u sredini je bila znatno viša od temperature kompostne mase s vanjske strane, dok kod komposta u rotirajućem bubnju je temperatura u cijeloj masi bila ujednačena. Također, razlike u temperaturi u uzorcima A i B se mogu pripisati i različitim strukturnom materijalu koji je korišten. Sobna temperatura tijekom cijelog procesa ne varira previše i većinom se kreće oko 25-26 °C s manjim iznimkama. Dobiveni rezultati promjene temperature tijekom kompostiranja slažu se s literaturnim podacima [27,28].

4.1.2. Analiza rezultata sadržaja vlage i suhe tvari u kompostnoj masi

Rezultati praćenja sadržaja vlage i suhe tvari tijekom procesa kompostiranja dani u tablici 3.2 grafički su prikazani na slikama 4.2 i 4.3.



Slika 4.2. Sadržaj suhe tvari tijekom procesa kompostiranja

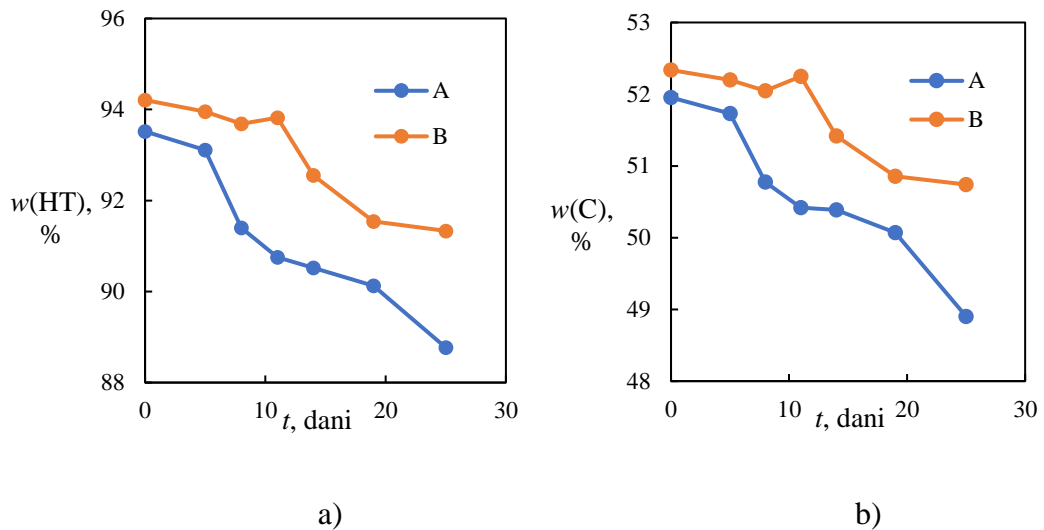


Slika 4.3. Sadržaj vlage tijekom procesa kompostiranja

Slika 4.2 pokazuje da maseni udio suhe tvari s vremenom raste tijekom procesa kompostiranja kod oba uzorka te na kraju procesa iznosi oko 30%. Analogno, na slici 4.3 uočava se pad masenog udjela vode. To je i očekivano s obzirom da kompostna masa postaje rahlija te se smanjuje kapacitet vezanja vode kako proces napreduje. Na početku procesa vlažnost je bila oko 75,5% kod oba komposta, a na kraju procesa je iznosila 69%. Tijekom procesa kompostiranja sakupljena je procjedna voda. Zanimljivo je da osim na početku procesa, nastajanja procjedne vode tijekom procesa kompostiranja gotovo da nije ni bilo kod oba sustava.

4.1.3. Analiza rezultata sadržaja hlapive tvari i ugljika u kompostnoj masi

Rezultati praćenja sadržaja hlapive tvari i ugljika tijekom procesa kompostiranja dani u tablici 3.3, a grafički su prikazani na slici 4.4. Iz sadržaja hlapive tvari sadržaj ugljika se preračunava prema jednadžbi (2-4).

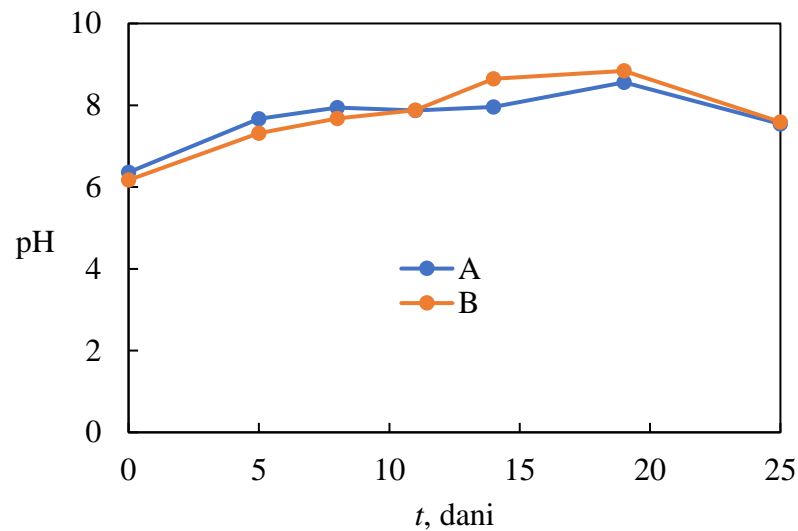


Slika 4.4. a) Sadržaj hlapljive tvari tijekom procesa kompostiranja, b) Sadržaj ugljika tijekom procesa kompostiranja

Na slici 4.4 se primjećuju blagi pad vrijednosti udjela hlapljive tvari kod oba uzorka, od početka do kraja procesa. Vrijednosti se kreću od 93,5% do 89% za uzorak A te od 94% do 91% za uzorak B. Budući da je sadržaj hlapljive tvari mjera sadržaja organske tvari u kompostu, vidljivo je da je pad izraženiji kod uzorka A (otvoreni sustav) u odnosu na uzorak B (zatvoreni sustav). Osim izvedbe sustava (otvoreni nasuprot zatvoreni), razlog tome može biti i strukturni materijal - piljevina koja se dodavala za kontroliranje vlažnosti, a koja ima visok omjer C/N. Zbog toga se sugerira upotrebljavati neki drugi materijal za regulaciju vlažnosti.

4.1.4. Analiza rezultata pH vrijednosti kompostne mase

Rezultati praćenja pH vrijednosti tijekom procesa kompostiranja dani u tablici 3.4 grafički su prikazani na slici 4.5.

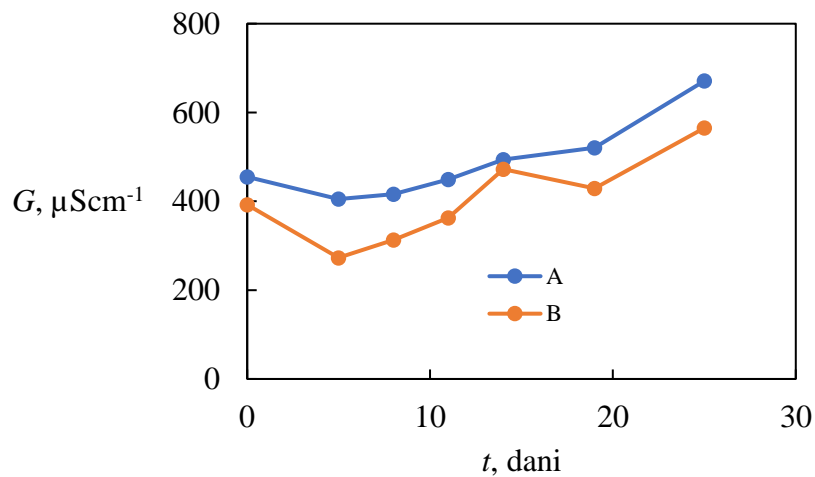


Slika 4.5. Promjena pH vrijednosti tijekom procesa kompostiranja

Na početku procesa pH vrijednost oba komposta se kretala oko 6, tj. kod uzorka A vrijednost je iznosila 6,36, a kod uzorka B je iznosila 6,17. Tijekom procesa pH vrijednost lagano raste, što se može pripisati aktivnosti mikroorganizama. Najveća pH vrijednost je bila u 19. danu i iznosila je 8,56 za uzorak A i 8,84 kod uzorka B, vjerojatno zbog nastajanja veće količine amonijaka. Nakon termofilne faze u uvjetima dobre prozračnosti amonijak oksidira u nitrat što postupno smanjuje pH vrijednost [28,29]. Konačna pH vrijednost nakon 25 dana je bila 7,59.

4.1.5. Analiza rezultata električne vodljivosti kompostne mase

Rezultati praćenja električne vodljivosti tijekom procesa kompostiranja dani u tablici 3.4 grafički su prikazani na slici 4.6.

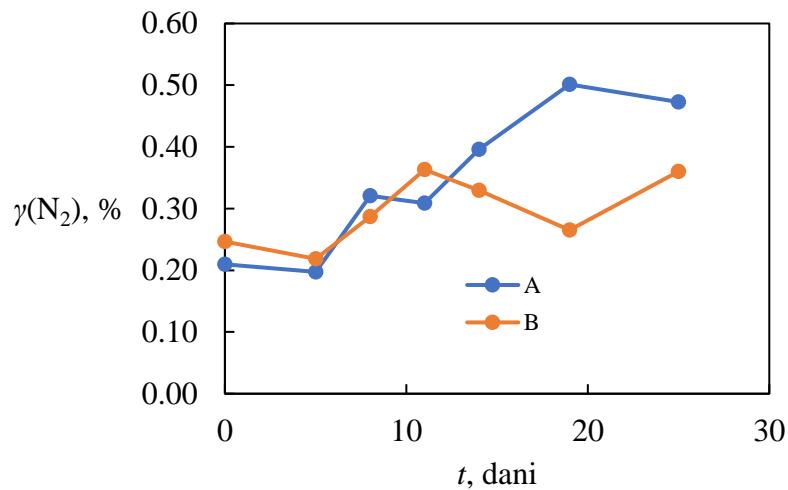


Slika 4.6. Vrijednosti električne vodljivosti tijekom procesa kompostiranja

Električna vodljivost je pokazatelj sadržaja topljivosti soli u kompostu i mijenja se ovisno o količini i vrsti iona u otopini. Niska vrijednost električne vodljivosti može utjecati na nižu plodnost komposta zbog niskog sadržaja kalija, kalcija i magnezija. Međutim, visoka koncentracija soli može ukazati na potencijalnu fitotoksičnost (zaustavljanje klijanja ili usporeni rad korijena) [29]. Vrijednost iznad $3500 \mu\text{S cm}^{-1}$ se uzima kao gornja granica za supstrat u kontejnerskoj proizvodnji. Prema rezultatima na slici 4.6, vidljivo je da se vrijednosti za uzorak A kreću od 455 do $671 \mu\text{S cm}^{-1}$, odnosno od 392 do $565 \mu\text{S cm}^{-1}$ za uzorak B.

4.1.6. Analiza rezultata sadržaja dušika po Kjeldahlu u kompostnoj masi

Rezultati praćenja udjela dušika tijekom procesa kompostiranja dani u tablici 3.5 grafički su prikazani na slici 4.7.

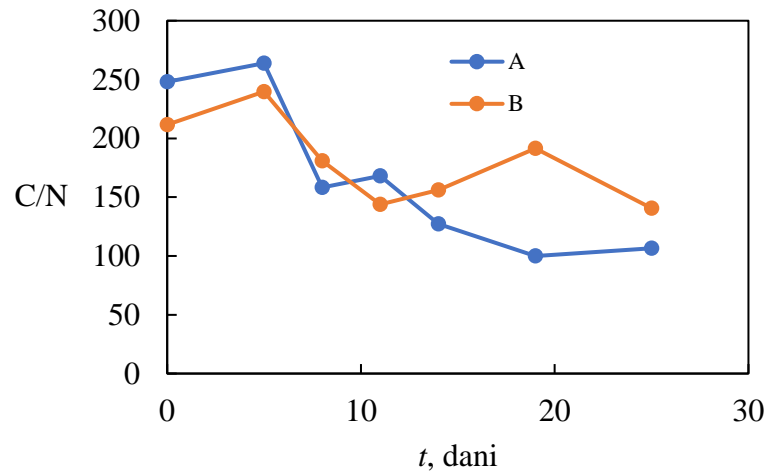


Slika 4.7. Sadržaj dušika tijekom procesa kompostiranja

Tijekom procesa kompostiranja dolazi do blagog povećanja sadržaja dušika, a što se pripisuje gubitku mase i mineralizacije organske tvari. Blagi porast sadržaja dušika je vidljiv kod uzorka A (otvoreni sustav), dok kod uzorka B pokazuje oscilacije (zatvoreni sustav). Očito izvedba reaktorskog sustava utječe na sadržaj dušika te je otvoreni sustav u tom slučaju povoljniji. Otvoreni sustav ima i svoje nedostatke koji se povezuju s emisijom plinova, neugodnim mirisima te pojavom kukaca u kompostu. Također, razlog ovako slabog porasta dušika može biti u prevelikoj količini piljevine u kompostu, a koja ima povećan sadržaj ugljika te dovodi do imobilizacije procesa kompostiranja.

4.1.7. Analiza C/N omjera u kompostnoj masi

Rezultati praćenja C/N omjera tijekom procesa kompostiranja grafički su prikazani na slici 4.8.



Slika 4.8. Omjer C/N tijekom procesa kompostiranja

Brza razgradnja organske tvari rezultira padom sadržaja organskog ugljika, akumulacijom hranjive i mikrobiološke mase, a što dovodi do smanjenja C/N omjera. Kod uzorka A je vidljiv konstantni pad C/N omjera, dok kod uzorka B C/N omjer oscilira. Pad C/N omjera kod uzorka A je prilično velik (od 248 do 106) što ukazuje na izrazitu brzinu razgradnje. Međutim, teorijski C/N omjer oko 30 nije postignut. Ovakav rezultat može se pripisati opet dodatku piljevine čiji omjer C/N iznosi 325:1 i samim time utječe na smanjeni udio dušika u kompostu. To ukazuje da bi neki drugi materijal (lišće, drvo) bilo bolje upotrijebiti kao strukturni materijal.

U tablici 4.1 navedene su C/N vrijednosti za neke organske materijale.

Tablica 4.1. C/N omjer organskih materijala [30]

Organski materijal	C/N omjer
Pepeo, drvo	25:1
Usitnjeni karton	350:1
Stabljike kukuruza	75:1
Lišće	60:1
Piljevina	325:1
Slama	75:1
Ostatci voća	35:1

4.2. Usporedba fizikalno-kemijskih parametara supstrata (biootpada) i komposta

Ispitivani su parametri su: temperatura, sadržaj suhe i hlapljive tvari, sadržaj vlage, ugljika, dušika, pH, električna vodljivost te C/N omjer izvornog biootpada i otpada tijekom kompostiranja. Dana je usporedba procesa kompostiranja u rotacijskom komposteru (zatvoreni reaktor) i otvorenoj posudi (otvoreni sustav) u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Usporedba fizikalno-kemijskih parametara supstrata (biootpada) i komposta

Parametar	A _{izvorni uzorak}	A _{nakon 25 dana}	B _{izvorni uzorak}	B _{nakon 25 dana}
T, °C	22,0	30,0	22,0	27,0
w(ST)	0,2610	0,3092	0,2448	0,3075
w(H ₂ O)	0,7390	0,6908	0,7552	0,6925
w(HT)	0,9352	0,8802	0,9391	0,9141
w(C), %	51,9946	48,9026	52,3375	50,7406
pH	6,36	7,54	6,17	7,59
G, μS cm ⁻¹	455	671	392	565
w(N ₂), %	0,2096	0,4728	0,2463	0,3603
C/N omjer	248	106	211	140

Temeljem podataka u tablici 4.2 vidljivo je da se ispitani parametri kreću u prema literaturnim podacima, osim C/N omjera koji je povećan [29]. Tijekom aktivne razgradnje zabilježen je ugodan zemljani miris kao pokazatelj pravilnog prozračivanja i odsutnosti anaerobnih uvjeta te su bile vidljive promjene u izgledu materijala za kompostiranje u pogledu boje i teksture kako je proces napredovao. Postupno smanjenje volumena kompostne mase također je primijećeno tijekom razgradnje. Promjene u fizikalno-kemijskim parametrima pokazuju napredak i ishod postupka kompostiranja u skladu s literaturnim podacima [29].

4.3. Analiza kinetike procesa kompostiranja

Sadržaj biorazgradive organske tvari odgovara sadržaju hlapive tvari u kompostu. Integracijom jednadžbe (1-2) te pretpostavku da je $C = C_0$ za $t = 0$, slijedi da je

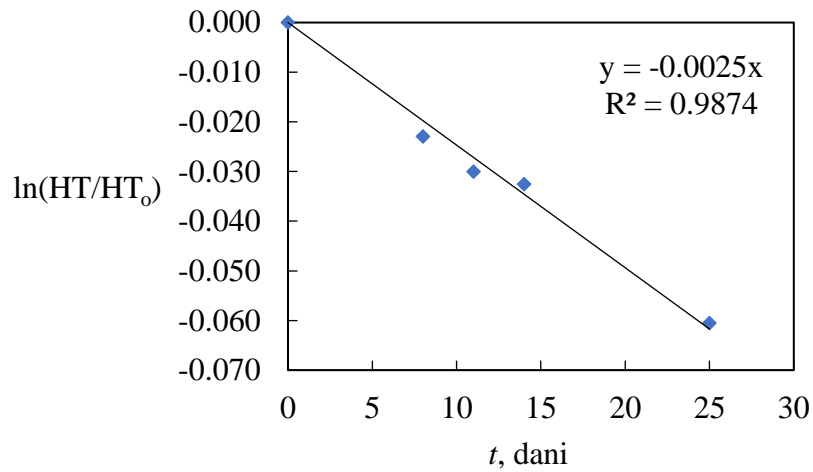
$$\ln \frac{C}{C_0} = -kt \quad (4-1)$$

gdje je:

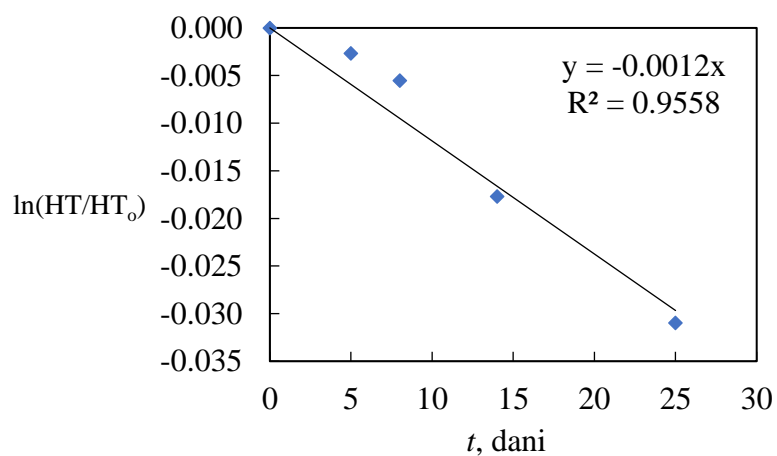
C - sadržaj hlapive tvari u kompostu u vremenu t,

C₀ - sadržaj hlapive tvari u kompostu na početku procesa kompostiranja.

Iz grafičkog prikaza ovisnosti $\ln(C/C_0)$ o vremenu, iz nagiba pravca se izračunava konstanta brzine razgradnje, k . Grafički prikaz obrade eksperimentalnih podataka sadržaja hlapive tvari tijekom kompostiranja prema kinetičkom modelu prvog reda za oba komposta dani su na slikama 4.9 i 4.10.



Slika 4.9. Obrada eksperimentalnih podataka prema kinetičkom modelu prvog reda za uzorak A



Slika 4.10. Obrada eksperimentalnih podataka prema kinetičkom modelu prvog reda za uzorak B

Kako bi se postigao bolji regresijski pravac za uzorak A nisu prikazane vrijednosti u 5-tom i 19-tom danu, a za uzorak B u 11-tom i 19-tom danu. U tablici 4.3 prikazani su parametri modela dobiveni obradom eksperimentalnih podataka sadržaja hlapive tvari tijekom procesa kompostiranja prema kinetičkom modelu prvog reda za oba uzorka.

Tablica 4.3. Parametri modela dobiveni obradom eksperimentalnih podataka sadržaja hlapive tvari tijekom procesa kompostiranja prema kinetičkom modelu prvog reda za oba uzorka

Parametri	Uzorak A	Uzorak B
konstanta brzine razgradnje, k (dan^{-1})	0,0025	0,0012
R^2	0,9961	0,9776

Obradom eksperimentalnih podataka prema kinetičkom modelu prvog reda vidljivo je da je brzina razgradnje supstrata veća kod uzorka u otvorenom sustavu ($0,0025 \text{ dan}^{-1}$) u odnosu na zatvoreni sustav ($0,0012 \text{ dan}^{-1}$), a što je i očekivano zbog izvedbe sustava i strukturnog materijala koji je korišten.

Također su vidljiva dobra slaganja točaka s regresijskim pravcem R^2 kod uzorka A i uzorka B, što je i očekivano budući se kompostirao biootpad koji se sastojao od lakorazgradivih komponenti (kora luka, zelena salate, krastavac, naranča, rajčica i talog kave). No, iako se dobivena dobra slaganja razgranje organske tvari prema kinetičkom modelu prvog reda, treba imati na umu da brzina razgradnje složenijih supstrata tijekom vremena nije samo funkcija koncentracije supstrata, već i promjena strukture čestica, izvedbe sustava (otvoreni vs. zatvoreni), načina miješanja, vlažnosti, temperature te koncentracije kisika.

5. ZAKLJUČAK

Temeljem provedenih ispitivanja praćenja procesa kompostiranja biootpada u rotacijskom bubnju (zatvoreni sustav) i otvorenoj posudi (otvoreni sustav), mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Tijekom kompostiranja oba uzorka supstrata temperatura prvo naglo raste, a zatim slijedi kontinuirani pad. Kod uzorka A je vidljivo da ima zadovoljavajući porast temperature (termofilno područje), dok uzorak B postiže nižu temperaturu od 36°C, a što se pripisuje različitoj izvedbi sustava.
- Sadržaj suhe tvari kod oba uzorka lagano raste tijekom procesa kompostiranja, a sadržaj vlage opada. To se može pripisati promjenama u strukturi komposta, budući kompost postaje rahliji te mu se smanjuje kapacitet vezanja vode kako proces napreduje. Nastajanje procjedne vode uočeno je samo na početku procesa kompostiranja.
- Sadržaj hlapive tvari, odnosno sadržaj ugljika, kod oba uzorka lagano opada. Pad je izraženiji kod uzorka A (otvoreni sustav), nego kod uzorka B (zatvoreni sustav).
- pH vrijednost kod oba uzorka tijekom procesa kompostiranja lagano raste do 8,56 za uzorak A te 8,84 za uzorak B do 19-tog dana, nakon čega se vrijednost postepeno smanjuje i stabilizira na 7,59.
- Vrijednosti električne vodljivosti kod oba uzorka postupno rastu tijekom procesa kompostiranja te nakon 25 dana iznosi 671 $\mu\text{S cm}^{-1}$ kod uzorka A, odnosno 565 $\mu\text{S cm}^{-1}$ kod uzorka B. Vrijednosti električne vodljivosti kod oba uzorka su ispod gornje granice električne vrijednosti za supstrat u kontejnerskoj proizvodnji (3500 $\mu\text{S cm}^{-1}$).
- Sadržaj dušika tijekom procesa kompostiranja pokazuje trend rasta kod uzorka A, dok kod uzorka B vrijednosti osciliraju, a što se pripisuje izvedbi sustava (otvoreni nasprot zatvoreni sustav) te količini dodane piljevine čiji povećani sadržaj ugljika dovodi do imobilizacije procesa kompostiranja.
- Tijekom procesa kompostiranja vidljiv je konstantni pad C/N omjera kod uzorka A što ukazuje na izrazitu brzinu razgradnje supstrata. Kod uzorka B vrijednosti C/N omjera također pokazuju trend pada te osciliraju u rasponu 211-140. Teorijski C/N omjer oko 30 nije postignut. Razlog ovakvom rezultatu pripisuje se odabiru strukturnog materijala (piljevini) koja ima preveliki C/N omjer te utječe

na smanjeni udio dušika u kompostu. Stoga bi neki drugi materijal s nižim C/N omjerom dao bolje rezultate.

- Usporedbom fizikalno-kemijskih parametara praćenih tijekom procesa kompostiranja vidljivo je da je otvoreni sustav pokazao bolje rezultate u odnosu na zatvoreni sustav (rotacijski komposter). Kod oba sustava dobiven je dobar kompost u pogledu boje i teksture.
- Obradom eksperimentalnih podataka prema kinetičkom modelu prvog reda vidljivo je da je brzina razgradnje organske tvari veća kod komposta u otvorenom sustavu ($0,0025 \text{ dan}^{-1}$) u odnosu na zatvoreni sustav ($0,0012 \text{ dan}^{-1}$), a što je i očekivano zbog izvedbe sustava i strukturnog materijala koji je korišten. Međutim, kod rotacijskog kompostera je temperatura u cijeloj kompostnoj masi bila ujednačena, a što osigurava ujednačenost obrade i stabilizaciju komposta u cijeloj masi. Također je smanjena i emisija neugodnih mirisa, kao i pojava kukaca u kompostu.

6. LITERATURA

1. *Milanović Z.*, Kompostiranje - sušenje - stabilizacija, Tehnoeko, 2019.
2. *Kalamdkad A.S., Kazmi A.A.*, Mixed organic waste composting using rotary drum composter, *Int. J. Environment and Waste Managment, Waste Management & Research* **27** (2009) 129–137.
3. *Margeta J.*, Upravljanje krutim komunalnim otpadom, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, 2017.
4. Plan gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj 2017. - 2022., https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_01_3_120.html, pristup (5. 10. 2020.)
5. *Andabaka A.*, Potencijali i ograničenja primjene kružne ekonomije u kontekstu održivoga razvoja Hrvatske, Ekonomski fakultet, Zagreb, 2018.
6. Otpad: problem ili resurs, <https://www.eea.europa.eu/hr/signals/signali-2014/clanci/otpad-problem-ili-resurs>, pristup (12. 8. 2020.)
7. *Smoljko I.*, Recikliranje krutog otpada, nerecenzirani materijali, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2019.
8. Gospodarenje otpadom u RH. [https://lifeprogramhrvatska.hr/wp-content/uploads/2018/04/Prezentacija- Aleksandar-Rajili%20Gospodarenje-otpadom-u-RH.pdf](https://lifeprogramhrvatska.hr/wp-content/uploads/2018/04/Prezentacija-Aleksandar-Rajili%20Gospodarenje-otpadom-u-RH.pdf), pristup (14. 10. 2020.)
9. Hrvatska agencija za okoliš i prirodu, http://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021_otpad/Upute/OTP_D_Upute_Biorazgradivi_komunalni_otpad.pdf, pristup (12. 8. 2020.)
10. Komunalac d.o.o., <https://komunalac-kc.hr/biorazgradivi-otpad/>, pristup (13. 8. 2020.)
11. *Diaz L. F., de Bertoldi M., Bidlingmaier W., Stentiford E.*, Compost science and technology, Waste Management Series 8, Amsterdam. 2007.
12. *Krivičić D.*, Biorazgradnja lignoceluloznog otpada procesom kompostiranja, diplomski rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2017.
13. *Haug R.T.*, The Practical Handbook of Compost Engineering, CRC Press LLC, Florida, 1993.
14. Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, <https://mzoe.gov.hr/UserDocsImages/NASLOVNE%20FOTOGRAFIJE%20>

- [I%20KORI%C5%A0TENI%20LOGOTIPOVI/doc/nacrt_pravilnika.pdf](#), pristup (15.8.2020.)
15. *El Kader, N. A., Robin, P., Paillat, J.-M., Leterme, P.*, Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting, *Bioresour. Technol.* **98** (2007) 2619 – 2628
 16. Eko-proizvodnja, <https://www.agroklub.com/eko-proizvodnja/osnove-i-pravila-kompostiranja/24548/>, pristup (17.8.2020.)
 17. *Sherman R.*, The Composting Process, NC State University, prezentacija, 2016.
 18. *Briški, F.*, Zaštita okoliša, Element, Zagreb, 2016.
 19. Praživotinje, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Praživotinje>, pristup (18.8.2020.)
 20. Kolnjaci, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Kolnjaci>, pristup (18.8.2020.)
 21. *Epstein, E.*, *Industrial composting Enviromental Engineering and Facilities Management*, Taylor & Francis Group, 2011., USA.
 22. Windrow Composting Process, <http://userspecial.com/windrow-composting-process/>, pristup (19. 8. 2020.)
 23. *Kopčić N.*, Studij procesa anaerobnog kompostiranja čvrstog otpada, doktorska disertacija, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2011.
 24. *Kulcu R.*, New kinetic modeling parametars for composting process applied to composting of chicken manure, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **18** (2016) 734–741.
 25. *Manu M.K., Kumar R., Garg A.*, Drum Composting of Food Waste: A Kinetic Study, *Procedia Environ Sci.* **5** (2016) 456–463.
 26. Daigger Scientific, <https://www.daigger.com/mettler-toledo-sevencompact-benchtoper-meter-i-1111084>, pristup (19. 8. 2020.)
 27. *Kučić Grgić D., Briški F., Očelić Bulatović V., Vuković Domanovac M., Domanovac T., Šabić Runjavec M., Miloloža M., Cvetnić M.*, Kompostriranje agroindustrijskog otpada, biootpada i biorazgradivog komunalnog otpada u adijabatskom reaktoru, *Kem. Ind.*, **68** (9-10) (2019) 381-388
 28. *Kalamdkad A.S., Kazmi A.A.*, Mixed organic waste composting using rotary drum composter, *Int. J. Environment and Waste Managment, Waste Management & Research* **27** (2009) 129–137.

29. *Vukobratović M., Lončarić Z., Vukobratović Ž., Dadaček N.,* Promjene kemijskih svojstava stajskih gnojiva pri kompostiranju, *Poljoprivreda* **14** (2008) 29-37.
30. Planet natural, <https://www.planetnatural.com/composting-101/making/c-n-ratio/>, pristup (10. 9. 2020.)