

Ko-kompostiranje biootpada i mulja

Jukić, Petra

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Food Technology and Biotechnology / Sveučilište u Zagrebu, Prehrambeno-biotehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:159:023598>

Rights / Prava: [Attribution-NoDerivatives 4.0 International](#)/[Imenovanje-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-26**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Food Technology and Biotechnology](#)



Sveučilište u Zagrebu
Prehrambeno-biotehnološki fakultet
Preddiplomski studij Prehrambena tehnologija

Petra Jukić

7501/PT

KO-KOMPOSTIRANJE BIOOTPADA I MULJA

ZAVRŠNI RAD

Predmet: Biološka razgradnja organskih spojeva

Mentor: Prof. dr. sc. *Tibela Landeka Dragičević*

Zagreb, 2020.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Završni rad

Sveučilište u Zagrebu

Prehrambeno-biotehnološki fakultet

Preddiplomski sveučilišni studij Prehrambena tehnologija

Zavod za prehrambeno-tehnološko inženjerstvo

Laboratorij za biološku obradu otpadnih voda

Znanstveno područje: Biotehničke znanosti

Znanstveno polje: Prehrambena tehnologija

Ko-kompostiranje biootpada i mulja

Petra Jukić, 0058211410

Sažetak: Kompostiranje je aerobni biološki proces razgradnje organskih spojeva u stabilan produkt-kompost. Provođi se u četiri faze, a važni čimbenici provođenja procesa kompostiranja su temperatura, vlažnost, pH, sadržaj kisika, omjer C/N. Ko-kompostiranje je metoda kompostiranja dvije ili više vrsta organskog otpada u odgovarajućem omjeru kako bi se nadomjestili nedostaci pojedinog otpada. Kompostiranje je učinkovit i ekonomičan način recikliranja organskog otpada kojim se smanjuje volumen otpada i emisija stakleničkih plinova te osigurava stabilizacija organskih supstrata.

Ključne riječi: biootpad, ko-kompostiranje, kompost, mulj

Rad sadrži: 25 stranica, 2 slike, 6 tablica, 62 literaturna navoda

Jezik izvornika: hrvatski

Rad je u tiskanom i elektroničkom obliku pohranjen u knjižnici Prehrambeno-biotehnološkog fakulteta, Kačićeva 23, 10000 Zagreb

Mentor: prof. dr. sc. Tibela Landeka Dragičević

Datum obrane: 1. srpnja 2020.

BASIC DOCUMENTATION CARD

Bachelor thesis

University of Zagreb

Faculty of Food Technology and Biotechnology

University undergraduate study Food Technology

Department of Food Engineering

Laboratory for Biological Wastewater Treatment

Scientific area: Biotechnical Science

Scientific field: Food Technology

Co-composting of biowaste and sludge

Petra Jukić, 0058211410

Abstract: Composting is an aerobic biological process of transforming the organic matter into stable product-compost. The process includes four phases and the important parameters affecting the process are: temperature, moisture content, pH, aeration rate, C/N ratio. Co-composting is a method of composting two or more types of organic wastes in appropriate proportion to overcome the disadvantages of one waste. Composting is also defined as an effective and economical way for recycling organic waste because it reduces the volume of waste, emissions of greenhouse gas and provides stabilization of organic substrates.

Keywords: biowaste, co-composting, compost, sludge

Thesis contains: 25 pages, 2 figures, 6 tables, 62 references

Original in: Croatian

Thesis is in printed and electronic form deposited in the library of the Faculty of Food Technology and Biotechnology, University of Zagreb, Kačićeva 23, 10000 Zagreb

Mentor: PhD Tibela Landeka Dragičević, Full Professor

Defence date: July 1st 2020

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. KOMPOSTIRANJE	2
2.2. POVIJEST KOMPOSTIRANJA	3
2.3. CILJEVI KOMPOSTIRANJA	4
2.4. SASTAV KOMPOSTNE HRPE.....	4
2.5. PROCESNI ČIMBENICI KOMPOSTIRANJA.....	5
2.6. METODE KOMPOSTIRANJA: REAKTORSKI I NEREAKTORSKI POSTUPCI	10
2.6.1. Reaktorski postupci.....	11
2.6.2. Nereaktorski postupci	11
2.7. FAZE PROCESA KOMPOSTIRANJA	11
2.8. MIKROBNE VRSTE U PROCESU KOMPOSTIRANJA.....	13
2.9. KOMPOST – SASTAV I PARAMETRI ZRELOSTI.....	14
2.10. EMISIJA PLINOVA I OTPADNE VODE U PROCESU KOMPOSTIRANJA	15
2.10.1. Emisija plinova tijekom kompostiranja	15
2.10.2. Otpadne vode kompostiranja	16
2.11. PODJELA KOMPOSTA I NJEGOVA PRIMJENA	16
2.12. PREDNOSTI I NEDOSTATCI PROCESA KOMPOSTIRANJA.....	17
2.12.1. Prednosti procesa	17
2.12.2. Nedostatci procesa	18
2.13. KO-KOMPOSTIRANJE	19
3. ZAKLJUČAK	20
4. LITERATURA	21

1. UVOD

Kompostiranje je jeftin, ekološki opravdan i jednostavan način zbrinjavanja organskog otpada, procesom biološke transformacije otpada prirodno prisutnim mikroorganizmima uobičajeno u prisustvu kisika i pri termofilnim uvjetima. Konačan produkt je kompost, proizvod bez patogena koji se može uporabiti kao organsko gnojivo u poljoprivredi (Haug, 1993). U zemljama Europske unije zeleni i kuhinjski/prehrambeni otpad čine približno 30-40 % ukupnog otpada kućanstva. Od 1999. godine Vijeće Europske Unije (1999/31/EZ) zahtijeva od zemalja članica smanjenje količine biorazgradivog otpada na odlagalištima te potiče razvrstavanje otpada po podrijetlu, recikliranje i oporabu. Uređaji za biološku obradu otpadnih voda također doprinose s muljem kojeg je potrebno zbrinuti na odgovarajući način. Ko-kompostiranje nekoliko vrsta otpada u odgovarajućem omjeru može rezultirati kvalitetnim kompostom (Malakahmad i sur., 2017; Mortula i sur., 2016). Čimbenici procesa kompostiranja su omjer C/N, vlažnost, pH, temperatura, kisik, sastav mješavina kompostnih hrpa. Omjer C/N 25-30 je općenito prihvaćen kao optimalan za proces kompostiranja (Kumar i sur., 2010) iako neki autori sugeriraju C/N 15 kao povoljan za učinkovit proces (Huang i sur., 2004; Zhu, 2007). Mulj karakterizira mali omjer C/N, velika vlažnost i gusta/zbijena struktura (Bernai i sur., 1998; Wang i sur., 2013), zeleni otpad visoki udio ugljika i niski sadržaj vlage (Mortula i sur., 2016) dok kuhinjski otpad karakterizira visoki udio dušika (Malakahmad i sur., 2017). Ko-kompostiranje različitih vrsta otpada je predmet brojnih istraživanja, primjerice, ko-kompostiranje mulja iz uređaja za obradu otpadnih voda s različitim strukturnim materijalom (Neugebauer i sur., 2017; Uçaroğlu i Alkan, 2016; Wang i sur., 2013), zelenog i kuhinjskog otpada (Kumar i sur., 2010; Malakahmad i sur., 2017). Izazov u razmatranju oporabe mulja, zelenog i kuhinjskog otpada, a time i smanjenja otpada na odlagalištu je u prikazu znanstvenih spoznaja iz literature o rezultatima procesa ko-kompostiranja.

Cilj ovog rada je dati prikaz opisa procesa i čimbenika procesa kompostiranja, istaknuti prednosti i nedostatke procesa, dati prikaz rezultata istraživanja procesa ko-kompostiranja mulja i biootpada iz dostupne literature, kao i istaknuti nove spoznaje u provedbi tih istraživanja.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. KOMPOSTIRANJE

Porastom broja stanovnika raste i produkcija krutog otpada. Otpad predstavlja svaku tvar ili predmet koju posjednik odbaci, namjerava odbaciti ili je dužan odbaciti (NN 94/13, NN 73/17, NN 14/19). Većina proizvedenog otpada završava na odlagalištima što nije zadovoljavajuće rješenje zbrinjavanja otpada i iz tog razloga je u zemljama Europske unije zabranjeno odlaganje organskog otpada s više od 5 % organskog ugljika.

Kompostiranje je prikladan postupak ponovnog korištenja biološki razgradivog otpada poput biootpada i mulja. To je aerobni biološki proces razgradnje organskih spojeva uz pomoć mikroorganizama u konačne produkte procesa: kompost, vodu, ugljikov dioksid i amonijak (Epstein, 1997; Haug, 1993). Vrijedni produkt tog procesa je kompost koji je definiran kao organsko gnojivo i poboljšivač tla (NN 117/14). Kompostiranjem se poboljšava rast biljaka, uklanjanju patogeni mikroorganizmi i smanjuje volumen otpada na odlagalištu (Epstein, 1997; Haug, 1993).

Prema podacima Hrvatske agencije za okoliš i prirodu, 64,5 % otpada u Republici Hrvatskoj čini biorazgradivi otpad. Biološki razgradivi otpad je definiran kao otpad koji se može razgraditi biološkim aerobnim ili anaerobnim postupkom, a biootpad je biološki razgradiv otpad iz vrtova i parkova, hrana i kuhinjski otpad iz kućanstava, restorana, ugostiteljskih i maloprodajnih objekata i slični otpad iz proizvodnje prehrambenih proizvoda (NN 94/13, NN 73/17, NN 14/19). U biootpadu su najviše zastupljeni prehrambeni/kuhinjski otpad (ostaci voća i povrća, talog kave ili čaja, ljuške jaja) i zeleni/vrtni otpad (pokošena trava, piljevina, lišće, suho granje, ostatci biljaka) (tablica 1).

Tablica 1. Procijenjeni sastav miješanog komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj u 2015. godini (Hrvatska agencija za okoliš i prirodu, HAOP)

Sastavnica	Udio (%)
Metal	2,07
Drvo	0,98
Tekstil/odjeća	3,71
Papir i karton	23,19
Staklo	3,65
Plastika	22,87
Guma	0,22
Koža/kosti	0,45
Kuhinjski otpad	30,93
Vrtni otpad	5,68
Ostali otpad	6,25
100 % (64,5 % biorazgradivog otpada)	

Sav biootpad ipak nije pogodan za preradu u kompost, poput osjemenjenog korova, bolesnih biljaka, ostataka kuhane hrane.

Poželjna sirovina za kompostiranje je i mulj koji nastaje biološkom obradom otpadnih voda. Mulj karakterizira visoki sadržaj vlage i niske vrijednosti omjera C/N (Mortula i sur., 2016) pa je kod obrade mulja potrebno dodati strukturni materijal (engl. *bulking agent*) koji će upiti višak vlage te povećati poroznost supstrata i omjer C/N (Neugebauer i sur., 2017). Najčešće se kao strukturni materijali koriste rižina ljuska, slama, piljevina, kukuruzni klip, stabljike suncokreta, pšenična slama (Guo i sur., 2012; Iqbal i sur., 2015; Neugebauer i sur., 2017; Uçaroğlu i Alkan, 2016). Upotrebom strukturnih materijala osiguravaju se potrebni parametri za uspješno kompostiranje i ekonomičnost procesa. U tablici 2 dan je prikaz poželjnih i nepoželjnih sirovina za kompostiranje.

Tablica 2. Primjeri poželjnih i nepoželjnih sirovina za kompostiranje

Poželjne sirovine za kompostiranje	Nepoželjne sirovine za kompostiranje
Kora drveta, lišće, piljevina, slama, sijeno, dijelovi biljaka, uvenulo cvijeće, mulj, ostatci voća i povrća, talog kave, vrećice čaja, ljuske jaja	Osjemenjeni korov, guma, plastika, staklo, časopisi u boji, lišće oraha, lijekovi, ostatci kuhane hrane

Kompostiranje biootpada je sastavni dio cjelovitog sustava gospodarenja otpadom pri čemu se otpad uvažava kao prirodni resurs koji treba materijalno i energetske iskoristiti mjerama koje su tehnički provedive i ekološki svrsishodne.

2.2. POVIJEST KOMPOSTIRANJA

Kompostiranje biorazgradivog otpada je bitan dio cjelovitog sustava gospodarenja otpadom, oblik je recikliranja otpada. Povijest kompostiranja stara je gotovo koliko i čovječanstvo. Prvi zapisi o „kompostiranju“ datiraju iz doba Sumerana prije više od 6000 godina (Diaz i sur., 2007). Proces kompostiranja bio je poznat i starim Rimljanima i Grcima koji su odvojeno sakupljali i odvozili otpad izvan gradova te su dobiveni produkt razgradnje ponovno koristili. Kompostiranje su poznavali i vitezovi templari u 13. st. Biološka razgradnja organskog materijala koristila se intenzivno do pojave kemijskih gnojiva. Međutim, daljnjim istraživanjima o potencijalnom štetnom djelovanju takvih gnojiva i zbog sve veće produkcije otpada, poljoprivrednici se odlučuju ponovo koristiti kompost. Tome je doprinijelo i istraživanje Sir Howarda, začetnika Indore metode, prema kojoj je proces kompostiranja trajao 6 mjeseci i uključivao je sirovine poput stajskog gnoja, lišća i komunalnog otpada

(Diaz i sur., 2007). Golueke (1976) je objasnio utjecaj pojedinih čimbenika poput temperature, vlažnosti i omjera C/N na kompostiranje.

U Europi je današnji princip kompostiranja korišten tijekom 1970-tih, a tijekom 20. i 21. st. provedena su razna istraživanja s ciljem potpunog objašnjenja provođenja procesa i odgovarajućih čimbenika, uporabe različitih sirovina i metoda s ciljem dobivanja kvalitetnog proizvoda - komposta i smanjenja količine otpada na odlagalištima.

2.3. CILJEVI KOMPOSTIRANJA

Kompostiranje je atraktivna metoda zbrinjavanja biootpada zbog proizvodnje korisnog proizvoda – komposta kao i zbog zakonskih propisa o ograničenju odlaganja biorazgradivog organskog otpada, pojačanog interesa za ekološki proizvedenom hranom, sve većih troškova odlaganja otpada i za pojedince i za jedinice lokalne samouprave.

Kompost obogaćuje tlo hranjivim sastojcima, poboljšava i održava plodnost tla, smanjuje upotrebu umjetnih gnojiva i emisiju plinova u atmosferu, no, može djelovati štetno ako primjerice sadrži teške metale poput olova, kadmija, žive i dr. Kompost se može uporabiti i za rekultivaciju prostora poput sanitarnih odlagališta otpada, rudnika, kamenoloma i dr.

Osnovni ciljevi kompostiranja različitih organskih sastojaka su (Epstein, 1997; Haug, 1993):

- razgradnja organske frakcije otpada u biološki stabilnije forme; proizvodnja sastojaka koji se mogu uporabiti kao poboljšivači tla;
- razgradnja otpada u koristan proizvod koji se može koristiti kao gnojivo ili sredstvo za kondicioniranje tla;
- dezinfekcija organskog otpada (inficiran patogenim organizmima, insektima i drugim mikroorganizmima prisutnim u otpadu); njegova daljnja uporaba na siguran način za ljude i okoliš;
- biološka razgradnja i inaktivacija opasnog otpada;
- smanjenje početne količine otpada;
- postizanje maksimalnog omjera nutrijenata (omjer dušika, fosfora i kalija) u konačnom proizvodu

2.4. SASTAV KOMPOSTNE HRPE

Kompostiranje je ekonomski prihvatljiv i ekološki održiv način upravljanja biorazgradivim otpadom. Kompostiranje, lat. *compositum* znači mješavina, predstavlja aeroban proces nastanka stabilnog produkta - komposta, topline i vode uz oslobađanje ugljikovog dioksida i amonijaka (Haug, 1993). Kompost dobiven iz biootpada se svrstava u klasu I i namijenjen je uporabi u ekološkoj proizvodnji prema Pravilniku o nusproizvodima i ukidanju statusa otpada

(NN 117/14). Sirovine za kompostiranje mogu biti: mulj, zeleni/vrtni otpad, kuhinjski/prehrambeni otpad.

Mulj karakterizira visok sadržaj vlage, nizak omjer C/N i zbijena struktura (Wang i sur., 2013). Zbog takvih početnih karakteristika, prilikom kompostiranja mulja se dodaje strukturni materijal. Zeleni otpad se zbog niskog sadržaja vlage, visokog saliniteta i omjera C/N može koristiti kao poželjan strukturni materijal koji će u kompostnoj hrpi osigurati povoljan sadržaj vlage i C/N omjer (Mortula i sur., 2016). Kuhinjski otpad karakterizira visoki sadržaj dušika i nizak sadržaj vlage (Malakahmad i sur., 2017). Mulj treba biti stabiliziran i sanitiran prije uporabe/primjene na poljoprivrednom tlu (Neugebauer i sur., 2017).

2.5. PROCESNI ČIMBENICI KOMPOSTIRANJA

2.5.1. Veličina čestica

Veličina čestica koje se kompostiraju je čimbenik koji izravno utječe na uspješnost procesa. Sirovine – materijal za kompostne mješavine je potrebno usitniti na dužinu palca kako bi se povećala ukupna površina dostupna mikroorganizmima što povoljno utječe na povećanje temperature i brže provođenje procesa kompostiranja (Tognetti i sur., 2007). Malakahmad i sur. (2017) navode kako bi maksimalna duljina usitnjenih sirovina trebala biti 4-5 cm. No, previše usitnjene sirovine za kompostiranje mogu doprinijeti nastanku anaerobnih uvjeta. Usitnjavanje se najčešće provodi različitim sjeckalicama i drobilicama.

2.5.2. Vlažnost

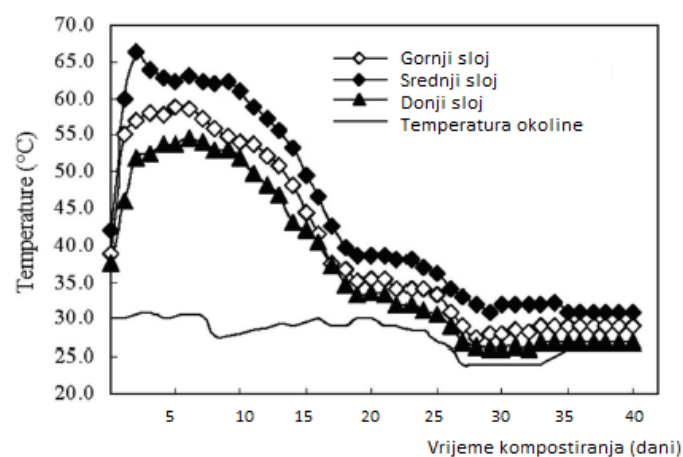
Vlažnost je jedan od kritičnih faktora provođenja procesa kompostiranja. Kumar i sur. (2010) navode da je optimalan sadržaj vlage za provođenje procesa 55-60 %. Prevelika vlažnost može dovesti do smanjenja slobodnog zračnog prostora (Himanen i Hänninen, 2011), odnosno anaerobnih uvjeta, što dovodi do oslobađanja neugodnih mirisa, usporavanja procesa i u konačnici lošijeg proizvoda. Suprotno tome, premala količina vlage negativno djeluje na mikroorganizme te može zaustaviti razgradnju organskih tvari.

Napredovanjem procesa kompostiranja smanjuje se početni sadržaj vode u sirovinama pa je poželjno dodavanje vode u cilju postizanja željene vlažnosti (Malakahmad i sur., 2017). Sadržaj vlage u kompostnoj hrpi se najlakše može provjeriti stiskanjem u ruci (Funtak, 2016) pri čemu se iz materijala ne smije cijediti voda niti ispužanjem šake materijal treba biti u rasutom stanju, što su znakovi prevlažnog odnosno presuhog materijala.

2.5.3. Temperatura

Temperatura je važan čimbenik praćenja procesa kompostiranja. Provodeći proces uočava se porast temperature. Zahvaljujući aktivnosti mezofilnih mikroorganizama temperatura raste do vrijednosti 25-45 °C razgradnjom lako razgradivih organskih spojeva. Porast je vidljiv i zbog akumulacije topline koju stvaraju mikroorganizmi. Prema istraživanju kojeg su proveli Majbar i sur. (2018) temperatura je u prvoj fazi dosegla vrijednost od 47 °C. Tijekom trećeg tjedna provođenja procesa temperatura je porasla na vrijednost oko 60 °C što odgovara razgradnji preostalih složenijih organskih spojeva čiju razgradnju provode termofilni mikroorganizmi kojima pogoduju više temperature.

Hachicha i sur. (2008) navode kako je porast temperature značajan za sanitaciju kompostne hrpe i smanjenje patogena, za što je potrebna temperatura iznad 60 °C tijekom najmanje 3 dana (Raj i Antil, 2011). Zhang i He (2006) navode da je uništenje patogenih mikroorganizama moguće postići i pri 55 °C. Smanjenjem količine lako razgradive organske tvari, dolazi do smanjenja temperature čija se vrijednosti približava vrijednostima oko 30 °C i razgradnju organskih spojeva ponovno provode mezofilni mikroorganizmi. Kako se proces primiče kraju, vrijednosti temperature se stabiliziraju i postaju približno slične vanjskim temperaturama (Majbar i sur., 2018). Usporedne vrijednosti temperature određene tijekom procesa kompostiranja mulja i kukuruzovine kao strukturnog materijala pri omjeru C/N 25 u reaktoru volumena 600 litara, pri čemu je temperatura mjerena u kompostnoj masi od dna na dubini 0,3 m (donji sloj), 0,55 m (srednji sloj) i 0,8 m (gornji sloj) pomoću temperaturnih senzora, prikazane su slikom 1 (Wang i sur., 2013).

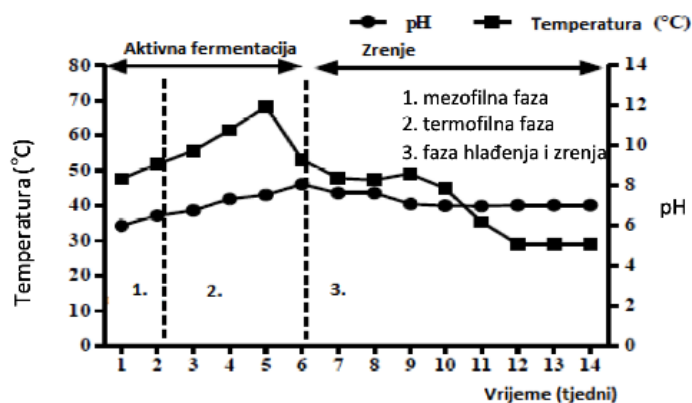


Slika 1. Temperatura u slojevima kompostne mješavine pri kompostiranju mulja i kukuruzovine uz omjer C/N 25 (Wang i sur., 2013)

2.5.4. pH

pH vrijednost izravno utječe na aktivnost mikroorganizama koji provode razgradnju organskih spojeva. Optimalan pH za većinu bakterija i aktinomiceta je 6-8 što odgovara i konačnoj pH vrijednosti zrelog komposta. U početnoj mezofilnoj fazi uočava se smanjenje pH vrijednosti zbog nastalih organskih kiselina i međuprodukata koji nastaju iz lako razgradive organske materije (Tognetti i sur., 2007). Tijekom termofilne faze, razgradnjom amina nastaje amonijak i uočava se porast pH vrijednosti (Ouatmane i sur., 2000). U fazi hlađenja dolazi do ponovnog pada vrijednosti pH uslijed smanjenja aktivnosti mikroorganizama. Tijekom posljednje faze procesa dolazi do stabilizacije pH na neutralnu vrijednost što objašnjava puferski kapacitet humusa (Ouatmane i sur., 2000).

Krivulje promjena pH i temperature tijekom procesa ko-kompostiranja otpadne vode iz prerade maslina, zelenog otpada i komine grožđa prikazane su slikom 2 (Majbar i sur., 2017). Odabrane sirovine su prikupljene, usitnjene i pomiješane, a proces je proveden koristeći windrow sustav. Optimalan sadržaj vlage osiguran je dodatkom dovoljne količine otpadne vode iz prerade maslina.



Slika 2. Promjena vrijednosti temperature i pH tijekom ko-kompostiranja otpadne vode iz prerade maslina, zelenog otpada i komine grožđa (Majbar i sur., 2017)

2.5.5. Sadržaj kisika

Aerobni uvjeti su jedan od najvažnijih čimbenika procesa kompostiranja. Potrebno je osigurati dovoljnu količinu kisika mikroorganizmima koji provode razgradnju. Najčešće je sadržaj kisika u kompostnoj masi/mješavini dovoljan za početak procesa, međutim kako ne bi nastali neželjeni anaerobni uvjeti, potrebna je opskrba kisikom. Prozračivanje kompostne mase može se provoditi preokretanjem mase ili prisilnom aeracijom pri čemu sadržaj kisika za aktivnost mikroorganizama mora biti veći od 10 % (Magalhaes i sur., 1993).

Previsoki sadržaj kisika može usporiti proces kompostiranja dok se u suprotnom stvaraju nepovoljni anaerobni uvjeti (Guo i sur., 2012). Za provjeru sadržaja kisika odnosno aeracije cijelog sadržaja kompostne mase, može se odrediti koncentracija metana jer visoke koncentracije metana sugeriraju nedovoljnu aeraciju (Awasthi i sur., 2016). Sadržaj kisika tijekom kompostiranja opada s viših vrijednosti tijekom termofilne faze na niže tijekom faze zrenja jer se usporava mikrobiološka aktivnost i nastaje ugljikov dioksid.

2.5.6. Omjer C/N

Sadržaj ugljika i dušika je važan za mikroorganizme koji ugljik najvećim dijelom koriste kao izvor energije, a dušik za izgradnju stanica (Iqbal i sur., 2010). Omjer C/N se određuje na temelju ukupnog organskog ugljika i ukupnog dušika. Optimalan omjer C/N za kompostiranje je 25-30 (Kumar i sur., 2010) jer veći omjer C/N znači i višu temperaturu (Neugebauer i sur., 2017). Ipak, moguće je provesti uspješan proces i pri vrijednostima koje su niže od zadanih kao što je prikazano u tablici 3.

Tablica 3. Primjeri uspješno provedenog kompostiranja pri nižim vrijednostima omjera C/N (Guo i sur., 2012)

Omjer C/N	Materijali	Reference
19,6	Zeleni otpad i prehrambeni otpad	Kumar i sur. (2010)
20	Pileći gnoj s piljevinom	Ogunwande i sur. (2008)
20	Svinjski gnoj s rižinom slamom	Zhu (2007)
15	Svinjski gnoj s piljevinom	Huang i sur. (2004)

Početna vrijednost omjera C/N se tijekom procesa smanjuje uslijed oslobađanja ugljikovog dioksida i mineralizacije organskih spojeva. Ako je omjer C/N nizak može doći do formiranja amonijaka i neugodnih mirisa (Malakahmad i sur., 2017) dok visok omjer C/N nepovoljno utječe na rast mikroorganizama (Maheshwari, 2014) koji sporije razgrađuju dostupne organske spojeve i time se produljuje trajanje procesa kompostiranja.

Smanjenje C/N omjera može se postići dodatkom otpada bogatog dušikom (primjerice ostatci voća i povrća) dok se povećanje omjera C/N postiže dodatkom sirovine s većim sadržajem ugljika poput papira i kartona (Makan i Mountadar, 2012).

2.5.7. Ukupni organski ugljik

Ukupni organski ugljik se smanjuje tijekom procesa kompostiranja. Izrazit pad se zbiva na početku procesa kada se razgrađuju lako razgradivi spojevi poput šećera, proteina i masti. Nakon toga se razgrađuju teže razgradivi spojevi kao što su celuloza i hemiceluloza. Guo i

sur. (2012) navode kako je pad ukupnog organskog ugljika najveći tijekom termofilne faze, a manje vrijednosti su uočene tijekom faze hlađenja. Uspoređujući odnos ukupnog organskog ugljika i omjera C/N istaknuto je da je gubitak ukupnog organskog ugljika manji ako je početni omjer C/N manji, zbog nedostatka izvora ugljika (Wang i sur., 2013).

2.5.8. Ukupni dušik

Prilikom ko-kompostiranja biootpada i mulja dolazi do povećanja koncentracije ukupnog dušika, a razlog povećanja koncentracije je gubitak mase (Sanchez-Monedero i sur., 2001) i biološka razgradnja organskih komponenti (El Fels i sur., 2014). Usporedne vrijednosti ukupnog ugljika i dušika, omjera C/N i anorganskog dušika na početku i na kraju procesa kompostiranja biootpada, aerobnog i anaerobnog mulja dane su u tablici 4 (Himanen i Hänninen, 2011).

Tablica 4. Usporedne vrijednosti ukupnog ugljika i dušika, omjera C/N i anorganskog dušika tijekom kompostiranja biootpada, aerobnog i anaerobnog mulja (Himanen i Hänninen, 2011)

	Ukupni ugljik (% s.tv.)	Ukupni dušik (% s.tv.)	Omjer C/N	% anorganskog dušika	Gubitak dušika	
					% N	kg N/t s.tv.
Biootpad						
1. tjedan	39,0 ± 0,6	2,0 ± 0,1	20	4,5	-	-
63. tjedan	33,4 ± 1,3	2,6 ± 0,1	13	16,6	5,32	0,97
Aerobni mulj						
1. tjedan	36,5 ± 0,4	2,4 ± 0,02	15	10,8	-	-
63. tjedan	34,2 ± 0,4	1,7 ± 0,10	20	23,5	41,38	0,99
Anaerobni mulj						
1. tjedan	34,1 ± 0,6	2,1 ± 0,03	16	9,5	-	-
63. tjedan	28,1 ± 0,9	1,7 ± 0,04	16	6,9	38,79	0,58

2.5.9. Vodljivost

Vodljivost je važan parametar kakvoće komposta koji pokazuje njegov mogući fitotoksični učinak na biljke. Predstavlja stupanj slanosti kompostne mase (Wang i sur., 2013). Povećana vodljivost uzrokuje manjak vode koja je potrebna za rast biljke jer se smanjuje osmotski tlak između korijena biljke i njezinog nadzemnog dijela (Bewley i Black, 1994). U prvim fazama proizvodnje komposta, povećanu vodljivost uzrokuje nastanak organskih kiselina i mineralizacija (Gómez-Brandón i sur., 2008). Pad vrijednosti se uočava zbog nastanka amonijaka i taloženja mineralnih soli (Gao i sur., 2010). Kako vodljivost ne bi bila limitirajući

faktor korištenja komposta u poljoprivredi, Soumaré i sur. (2002) ističu kako je granična vrijednost $3000 \mu\text{S cm}^{-1}$.

2.5.10. Karboksilne kiseline

Karboksilne kiseline su česti međuprodukti u početnim fazama procesa kompostiranja te se kao dokaz napredovanja procesa određuju njihove koncentracije. Mogu dovesti do nastanka neugodnih mirisa ovisno o koncentraciji i strukturi kiselina.

Tijekom kompostiranja aerobnog mulja, anaerobnog mulja i biootpada Himanen i Hänninen (2011) su uočili da su maksimalne koncentracije karboksilnih kiselina bile dvostruko veće u biootpadu nego u muljevima. U kompostima mulja je koncentracija kiselina bila najviša na početku procesa, a u biootpadu su koncentracije rasle tijekom drugog tjedna i u kasnijim fazama varirale oko istih vrijednosti. Isto tako, tijekom kompostiranja mulja je uočeno da je 100 % kiselina u mulju vodeno ekstrahirano. Nakon tjedan dana ta vrijednost je pala na 10-50 %. Sličan obrazac je utvrđen i kod biootpada gdje je nakon osmog tjedna samo 30-50 % kiselina ekstrahirano s natrijevim hidroksidom i vodom. Takvi rezultati su posljedica vezanja kiselina na druge spojeve koji nastaju u procesu. Dominantne kiseline su octena, maslačna, propionska te u nešto manjim koncentracijama izovalerijanska, valerijanska i izobutirična kiselina. Octena kiselina je, kao najčešći međuprodukt, prisutna u najvećim koncentracijama.

2.5.11. Kapacitet izmjene kationa

Kapacitet izmjene kationa se prati za procjenu stupnja zrelosti komposta. Prilikom kompostiranja dolazi do povećanja vrijednosti kapaciteta izmjene kationa zbog nastanka lignina i sličnih spojeva koji su nosioci negativnog naboja. Također, porastu doprinose i različite hidroksilne skupine (Lax i sur., 1986). Kako bi kompost smatrali zrelim, Harada i Inoko (1980) navode da bi vrijednosti kapaciteta izmjene kationa trebale biti veće od 60 cmol kg^{-1} .

2.6. METODE KOMPOSTIRANJA: REAKTORSKI I NEREAKTORSKI POSTUPCI

Ovisno o količini otpada, karakteristikama sirovine, potrebnim ulaganjima, prostoru i u konačnici željenoj kvaliteti proizvoda dva su osnovna postupka kompostiranja, reaktorski i nereaktorski postupci (Biddlestone i Gray, 1991). Metode kompostiranja se često dijele i kao kompostiranje na otvorenom i kompostiranje u zatvorenom. Kompostiranje na otvorenom se provodi pri aerobnim uvjetima dok je kompostiranje u zatvorenom aeroban ili anaeroban proces.

2.6.1. Reaktorski postupci

Reaktorski postupci (engl. *In-vessel*) se prema bioreaktorima dijele na horizontalne i vertikalne bioreaktore (Haug, 1993).

Vertikalni reaktori su, kao i svi ostali reaktori, toplinski izolirani kako bi gubitak topline bio što manji. Građeni su tako da se pune sirovinama na vrhu, a prisilna aeracija se provodi ili s dna ili vrha uređaja (Diaz i sur., 2007). Kompostiranje traje nekoliko tjedna uz praćenje svih osnovnih parametara. Horizontalne reaktore možemo podijeliti na reaktore u formi tunela, spremnika ili kanala (Diaz i sur., 2007). Prednosti korištenja reaktorskih postupaka su kraće trajanje procesa (An i sur., 2012), neovisnost o vremenskim uvjetima, bolja kontrola temperature, a glavni nedostatak je visoka cijena (Cekmecelioglu i sur., 2005).

2.6.2. Nereaktorski postupci

Nereaktorski postupci se dijele na windrow sustave i kompostiranje u hrpama ili stogu (Briški i sur., 2003).

Windrow sustave karakterizira slaganje kompostnih materijala u hrpe ili redove, a aeracija se osigurava miješanjem-prevrtanjem hrpe. Najčešće se koriste za kompostiranje zelenog otpada, pri čemu sadržaj makroelemenata poput dušika, fosfora i kalija može biti manji nego korištenjem reaktorskih postupaka (Malakahmad i sur., 2017). Prilikom kompostiranja u hrpama ili stogu, hrpe se najčešće prekrivaju već dobivenim zrelim kompostom kako bi se spriječio gubitak topline i nastanak neugodnih mirisa (Lončarić i sur., 2015).

Suprotno reaktorskim postupcima, nereaktorski postupci mogu ovisiti o vremenskim uvjetima, proces kompostiranja traje dulje i moguć je nastanak neželjenih plinova što je često ograničavajući faktor ako se kompostiranje provodi u blizini naseljenih područja. Glavna prednost nereaktorskih postupaka je svakako niska cijena.

2.7. FAZE PROCESA KOMPOSTIRANJA

Proces kompostiranja obuhvaća procese: (i) pripreme otpada, (ii) razgradnje organske komponente otpada i (iii) pripremanja i distribucije komposta na tržište

Priprema otpada obuhvaća procese:

- odstranjivanja komponenti otpada koje se ne mogu reciklirati, poput metala, stakla, plastike; prosijavanje
- usitnjavanje
- podešavanje omjera C/N
- primjenu mehaničkih postupaka potrebnih za provođenje procesa kompostiranja, poput podešavanje vlage – dodavanje vode, aditiva i sl.

Razgradnja organskih komponenti otpada može se podijeliti u četiri faze: mezofilna, termofilna, faza hlađenja (druga mezofilna faza) i faza zrenja (Diaz i sur., 2007).

Mezofilna faza

Mezofilnu fazu karakterizira razgradnja lako razgradivih organskih molekula poput jednostavnih šećera i proteina. Razgradnju provode bakterije, fungi i aktinomicete čime se oslobađa toplina što dovodi do povećanja temperature koja se kreće između 25 i 40 °C. U ovoj je fazi broj mezofilnih mikroorganizama veći od broja termofilnih za tri reda veličine. Isto tako se u mezofilnoj fazi uočava smanjenje pH vrijednosti uslijed nastanka raznih međuprodukata razgradnje i organskih kiselina.

Termofilna faza

Visoka temperatura koja nastaje aktivnošću mezofilnih vrsta, pogoduje termofilnim mikroorganizmima. Naime, daljnjim rastom temperature mezofilne vrste su zamijenjene termofilnima koji nastavljaju razgradnju sporije razgradive organske materije. U termofilnoj fazi se oslobađa toplina, temperatura se kreće u rasponu od 35 °C do 65 °C što pogoduje sanitaciji odnosno higijenizaciji komposta. Time se osigurava smanjenje patogenih mikroorganizama. Daljnji porast temperature iznad 65 °C nije pogodan za mezofilne mikroorganizme koji sudjeluju u provođenju faze hlađenja.

Faza hlađenja (druga mezofilna faza)

Tijekom faze hlađenja se temperatura kompostne hrpe počinje snižavati. Time se iz spora, stvorenih tijekom za njih nepoželjnih termofilnih uvjeta, ponovno aktiviraju preživjeli mezofilni mikroorganizmi koji provode daljnji proces razgradnje. U fazi hlađenja se razgrađuju teže razgradivi spojevi poput celuloze, škroba i hemiceluloze, a razgradnju provode bakterije i fungi. Zbog ponovne dominacije mezofilnih vrsta, faza hlađenja se često naziva i drugom mezofilnom fazom.

Faza zrenja

U fazi zrenja dolazi do snižavanja temperature na vrijednosti slične temperaturama okoline. Od prisutnih mikroorganizama prevladavaju fungi i počinje formacija komposta. Usporavanjem aktivnosti mikroorganizama i pH vrijednost postaje neutralna što je važno za njegovu primjenu u poljoprivredi. Tijekom faze zrenja kompost poprima karakterističnu smeđe-crnu boju i miris na zemlju.

Trajanje pojedinih faza procesa kompostiranja kao i vrijeme zrenja komposta je različito, a ovisi o klimi, sastavu i usitnjenosti materijala za kompostiranje.

Zreli kompost je tamnosmeđe do crne boje, mekan, rahli, bez neugodnih mirisa, mirisa na šumsku zemlju.

Kompost za upotrebu mora odgovarati standardima kvalitete kako primjena ne bi uzrokovala štetne posljedice za tlo, biljke, životinje i čovjeka (Radović, 1997). Pravilnikom o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja štetnim tvarima (NN 15/92, NN 9/2014) regulirana je primjena komposta iz gradskog mulja i otpada na poljoprivrednoj površini u Republici Hrvatskoj samo uz provedenu analizu koja potvrđuje da je mulj stabiliziran, da su u njemu uništeni patogeni mikroorganizmi i da je sadržaj štetnih tvari ispod dozvoljenih graničnih količina. Prije distribucije komposta do konačnih korisnika provode se procesi prosijavanja, klasifikacije zračnim strujanjem, miješanje s aditivima, granulacija, pakiranje, skladištenje i transport (Mikulić i sur., 2000).

2.8. MIKROBNE VRSTE U PROCESU KOMPOSTIRANJA

2.8.1. Bakterije

Najzastupljenija skupina mikroorganizama u kompostu su bakterije. Na početku procesa dominiraju mezofilne bakterije koje svojim enzimima razgrađuju lako dostupne organske tvari. Porastom temperature odnosno tvorbom nepovoljnih uvjeta mezofilne vrste prelaze u sporogeni oblik. Osim visoke temperature, promjena pH vrijednosti i nedostatak hranjivih tvari uzrokuju nastanak endospora. Usljed toga, prevladavaju termofilne bakterije koje dobro podnose temperature između 55-60 °C, a posebno se ističe rod *Bacillus* (Diaz i sur., 2007). Padom temperature i stvaranjem povoljnih uvjeta iz endospora se aktiviraju preživjeli mezofilni mikroorganizmi koji sudjeluju u provedbi druge mezofilne faze, a broj bakterija se sve više smanjuje u fazi zrenja.

2.8.2. Aktinomicete

Aktinomicete su gram-pozitivne bakterije. Sudjeluju u razgradnji složenih organskih spojeva kao što su celuloza i lignin. Prevladavaju u fazama kada su već razgrađeni lako razgradivi organski spojevi i kada su temperature iznad 45 °C. Poželjan pH za njihov optimalan rast se kreće od neutralnog do blago lužnatog, a temperature koje im odgovaraju su u termofilnom rasponu (Diaz i sur., 2007).

2.8.3. Gljive (fungi)

Iz ovog carstva su u procesu kompostiranja dominantni kvasci i plijesni. Zajedno s bakterijama sudjeluju u razgradnji lako razgradivih organskih molekula tijekom mezofilne faze jer im za rast odgovara kiseli pH. Visoke temperature nisu optimalne za njihov rast te su dominantne vrste u završnim fazama kada razgrađuju lignin i celulozu. Često se mogu uočiti na površini kompostne hrpe.

2.8.4. Protozoe i višestanični organizmi

Protozoe su jednostanični organizmi koji pridonose plodnosti tla razgradnjom organskih spojeva. Javljaju se u završnoj fazi tvorbe humusa uz višestanične organizme, a sudjeluju i u razgradnji celuloze. Od višestaničnih organizama, gliste, stonoge, gujavice, nematode i grinje je nakon završenog procesa kompostiranja sve teže pronaći te konačni produkt postaje homogen i poprima karakterističnu boju.

2.9. KOMPOST – SASTAV I PARAMETRI ZRELOSTI

Nakon 6-12 mjeseci, proizvedeni kompost je potrebno prosijati i ako nije homogena masa, crne boje i ugodnog šumskog mirisa, pojedine frakcije se mogu ponovno dodati u kompostnu masu u proces kompostiranja. Također, po završetku procesa kompostiranja omjer C/N mora biti manji od 20 kako bi kompost smatrali zrelim i uporabljivim produktom (Golueke, 1981), a konačne vrijednosti pH zrelog komposta moraju biti između 6 i 8.

Dobiveni kompost za korištenje u poljoprivredi ne smije biti štetan za biljke i tlo te su stoga definirana dva važna pojma: stabilnost i zrelost komposta. Stabilnost se određuje prema mikrobnj aktivnosti, a zrelost sukladno degradaciji fitotoksičnih organskih tvari (Gao i sur., 2010). Za definiranje stope zrelosti komposta koristi se indeks klijanja. Ispitivanje se provodi tako da se svježi uzorci pomiješaju s deioniziranom vodom, centrifugiraju i profiltriraju kako bi dobili vodeni ekstrakt. Željene sjemenke, najčešće *Lepidium sativum* L., se inkubiraju pri određenim uvjetima i temperaturi uz deioniziranu vodu kao standard. Guo i sur. (2012) navode kako se indeks klijanja računa prema sljedećoj formuli:

$$[\text{klijavost sjemena uzorka (\%)} * \text{duljina korijena uzorka}] * 100$$

$$\text{Indeks klijanja (\%)} = \frac{\text{[klijavost sjemena uzorka (\%)} * \text{duljina korijena uzorka}]}{\text{[klijavost sjemena kontrolnog uzorka (\%)} * \text{duljina korijena kontrolnog uzorka}]}$$

Nefitotoksičan kompost ima vrijednost indeksa klijanja veću od 80 % (Tiquia i Tam, 1998). Istu vrijednost ističu Mitelut i Popa (2011) za sjemenke rotkvice.

Drugi način određivanja zrelosti komposta je biljni biotest koji se provodi 21 dan na svijetlu i u mraku uz vlažnost od 60 % (Himanen i Hänninen, 2011).

Indeks klijanja je češće korištena metoda u kojoj je praćenje razvoja biljke vrlo kratko dok biljni biotest odlikuju suprotne karakteristike (Himanen i Hänninen, 2011).

Kao parametar zrelosti komposta Iqbal i sur. (2015) navode stupanj polimerizacije odnosno omjer huminske i fulvinske kiseline. Prema istraživanju kojeg su proveli, uočen je porast

koncentracije huminske kiseline dok je koncentracija fulvinske kiseline nakon početnog povećanja smanjena što je dovelo do porasta vrijednosti stupnja polimerizacije. Takav trend je rezultat degradacije lignina do aromatskih jedinica odnosno pretvorbe nehuminskih u huminske tvari, posebno tijekom termofilne faze (Iqbal i sur., 2015). Koncentracije navedenih kiselina se prate kako bi se utvrdilo napredovanje procesa, ali i zbog njihove uloge u rastu biljaka.

Za upotrebu u poljoprivredi je važan i sadržaj makroelemenata u kompostu. Jaafarzadeh Haghighi Fard i sur. (2015) navode kako kompost obično sadrži 0,4 –3,5 % dušika, 0,3–3,5 % fosfora i 0,5–1,8 % kalija.

Pojedini makroelementi i mikroelementi će doprinijeti rastu biljka i sastavu tla, a tijekom kompostiranja se koncentracija makroelemenata može povećati 20-50 % (Himanen i Hänninen, 2011).

2.10. EMISIJA PLINOVA I OTPADNE VODE U PROCESU KOMPOSTIRANJA

2.10.1. Emisija plinova tijekom kompostiranja

Tijekom procesa kompostiranja nastaju plinovi poput ugljikovog dioksida, metana i amonijaka. Iako vrijednosti pojedinih plinova nisu zakonski regulirane tijekom procesa se motri njihova koncentracija.

Jedan od najčešće spominjanih nedostataka procesa kompostiranja je oslobađanje stakleničkih plinova. Pošto je proces kompostiranja definiran kao biološki proces razgradnje organskih spojeva, ugljik se oslobađa u obliku ugljikovog dioksida i metana. Kako se u procesu koriste i sirovine bogate dušikom, dušik se prevodi u amonijak i dušikov (I) oksid procesima nitrifikacije i denitrifikacije (Hwang i sur., 2020). Emisija ugljikovog dioksida je zabilježena tijekom termofilne faze i faze hlađenja (Guo i sur., 2012) razgradnjom lako dostupnih organskih spojeva aktivnošću bakterija, ali i razgradnjom celuloze, hemiceluloze i sličnih sporije razgradivih spojeva prisutnim gljivama i aktinomicetama. U završnoj fazi zrenja uočava se najniža koncentracija ugljikovog dioksida pa se može zaključiti da je ugljikov dioksid u pozitivnoj korelaciji s temperaturom (Hwang i sur., 2020).

Isto tako, koncentracija $\text{NH}_4\text{-N}$ se smanjuje po završetku procesa. U početnim fazama kompostiranja uočava se porast koncentracije $\text{NH}_4\text{-N}$ koji je objašnjen amonifikacijom, dok je pad koncentracije zabilježen u završnoj fazi zbog nastanka amonijaka i porasta koncentracije $\text{NO}_3\text{-N}$ (Wang i sur., 2013). Koncentracije $\text{NH}_4\text{-N}$ i $\text{NO}_3\text{-N}$ se motre jer ih biljke koriste za rast.

2.10.2. Odpadne vode kompostiranja

Aerobnim kompostiranjem nastaje otpadna voda koja se može ponovno koristiti u procesu jer ima malo opterećenje. Dobivena otpadna voda se može upotrijebiti za poboljšanje sadržaja vlage kako bi se osiguralo recikliranje.

2.11. PODJELA KOMPOSTA I NJEGOVA PRIMJENA

Prema Pravilniku o nusproizvodima i ukidanju statusa otpada (NN 117/14), kompost klase I je namijenjen ekološkoj proizvodnji. Posebnim propisom uređuje se ekološka proizvodnja i korištenje u poljoprivredi tako da je posebnim propisom uređen sadržaj gnojiva i poboljšivača tla. Za proizvodnju komposta klase I poželjne sirovine su, između ostalog, otpad iz šumarstva, otpadna kora i otpaci drveta, biorazgradivi otpad, biorazgradivi otpad iz kuhinja i kantina (tablica 5).

Tablica 5. Vrste otpada za proizvodnju komposta klase I (NN 117/14)

Ključni broj	Naziv	Dodatni uvjeti i primjeri
02 01 07	otpada iz šumarstva	dopuštena su samo otpadna biljna tkiva
03 03 01	otpadna kora i otpaci drveta	dopušteno je samo netretirano drvo koje ne sadrži aditive i ostatke toksičnih/onečišćujućih tvari
20 01 08	biorazgradivi otpad iz kuhinja i iz kantina	dopušteno je otpadno voće i povrće, žitarice, ostatci od pripreme kave i čaja, ljuske od jaja i sl. nisu dopušteni nusproizvodi životinjskog podrijetla
20 02 01	biorazgradivi otpad	dopušten je otpad iz vrtova, zeleni otpad, otpad iz vrtlarstva, otpaci od obrezivanja živica i drveća, trava, biološki razgradivi otpad s groblja

Pravilnikom (NN 117/14) je definiran kompost klase II namijenjen korištenju u poljoprivredi, prema posebnom propisu koji uređuje sadržaj gnojiva i poboljšivača tla, a kompost klase III je namijenjen korištenju na tlu koje se ne koristi za proizvodnju hrane, na šumskom odnosno parkovnom zemljištu, za potrebe uređenja odnosno rekultivacije zemljišta i za izradu završnog rekultivacijskog sloja odlagališta. Sirovine za kompost klase III su primjerice muljevi od obrade efluenata na mjestu njihova nastanka, muljevi od obrade komunalnih otpadnih voda, jestiva ulja i masti, plastika (tablica 6).

Tablica 6. Vrste otpada za proizvodnju komposta klase III (NN 117/14)

Ključni broj	Naziv otpada	Dodatni uvjeti i primjeri
02 02 04	muljevi od obrade efluenta na mjestu njihova nastanka	dopušten je otpad iz separatora masti i sredstava za flotaciju (moguće porijeklo: klaonica i proizvodnja mesa/ribe)
19 08 05	muljevi od obrade komunalnih otpadnih voda	dopušten je samo aerobno ili anaerobno stabilizirani mulj čiji je sadržaj propisanih tvari manji od graničnih vrijednosti za te tvari sukladno posebnom propisu koji uređuje gospodarenje muljem iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda
20 01 25	jestiva ulja i masti	-
20 01 39	Plastika	dopuštena je samo biološki razgradiva plastika

Sukladno direktivi Vijeća Europske unije o zaštiti okoliša, posebno tla, kod upotrebe mulja iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u poljoprivredi (86/278/EEC), zabranjuje se upotreba obrađenog mulja na:

- a) travnjacima i pašnjacima koji se koriste za ispašu stoke ili površinama na kojima se uzgaja krmno bilje ako će se krmno bilje brati prije isteka određenog vremenskog razdoblja. To razdoblje, koje određuju države članice posebno uzimajući u obzir svoju zemljopisnu i klimatsku situaciju, nipošto ne smije biti kraće od tri tjedna;
- b) tlu na kojem rastu nasadi voća i povrća, uz iznimku voćaka;
- c) tlu namijenjenom uzgoju voća i povrća koje je obično u izravnom dodiru s tlom i koje se obično jede sirovo, u razdoblju od 10 mjeseci prije i za vrijeme berbe ili žetve.

Prema istoj direktivi se upotrebom mulja ne smije nanositi šteta tlu ili vodama i posebno se pazi na sadržaj teških metala.

2.12. PREDNOSTI I NEDOSTATCI PROCESA KOMPOSTIRANJA

2.12.1. Prednosti procesa

Jednostavan biološki proces

Kompostiranje je biološki proces koji se stalno događa u prirodi i osigurava kruženje organskog materijala. Razne vrste mikroorganizama i viših organizama stalno usitnjavaju i razgrađuju dostupne raspoložive organske tvari koje vraćaju biljkama i tlu. Pri tome koriste sve navedene čimbenike poput temperature, kisika, vlažnosti i pH. Za uspješno provođenje procesa nisu potrebna velika ulaganja pa kompostiranje smatramo ekonomičnim procesom važnim za očuvanje okoliša.

Smanjenje količine otpada

Kako se kao sirovine za kompostiranje mogu koristiti biološki razgradivi supstrati poput biootpada i mulja, smanjuje se količina otpada koji se odlaže na odlagališta. Regni i sur.

(2017) ističu kako je kompostiranje učinkovita metoda recikliranja organskog otpada. Isto tako, konačni produkt je kvalitetan proizvod koji se koristi u poljoprivredi pa se prodajom komposta može ostvariti dobit.

Sanitacija organskog otpada

Uslijed povišenja temperature tijekom termofilne faze provođenjem procesa kompostiranja se uklanjaju patogeni mikroorganizmi i sjemenje korova. Sukladno propisima, pojedine zemlje definiraju potrebno vrijeme i temperaturu za uspješnu sanitaciju. Prema Pravilniku (117/14) za Republiku Hrvatsku potrebno je kontrolom temperature šarže osigurati biološku stabilizaciju, uklanjanje patogenih mikroorganizama i klijabilnih sjemenki bilja iz otpada u trajanju najmanje 14 dana pri temperaturi 55 °C i do 7 dana pri temperaturi 65 °C. Također, važno je da temperatura kompostiranja ne prelazi 75 °C. Vrijednost temperature od 55 °C navode i Nizozemska, Italija i Danska uz potrebno vrijeme od 2, 3 odnosno 14 dana (Milanović, 2019). Time se osigurava sigurna upotreba dobivenog proizvoda koji neće štetiti biljkama i tlu te u konačnici ni čovjeku.

Poboljšanje sastava tla

Kompost koji se koristi u poljoprivredi utječe na organski sastav, mikrobiološku raznolikost, sastav makronutrijenata i mikronutrijenata, pH tla. Dodatkom komposta se povećava udio organskih komponenti u tlu i time njegova struktura. Također, dolazi do stabilizacije pH vrijednosti što povoljno utječe na prisutne mikroorganizme, a poboljšanom sastavu tla doprinose dušik, fosfor, kalij, magnezij i drugi makroelementi koje kompost sadrži u željenim količinama.

2.12.2. Nedostatci procesa

Tvorba neugodnih mirisa

Iako je kompostiranje jednostavan i ekonomski isplativ proces, sve parametre treba stalno kontrolirati. Naime, ako se zanemari utjecaj pojedinog čimbenika i proces provodi nepravilno može doći do tvorbe neugodnih mirisa. Zato je važno poštivati sva pravilna uspjehnog provođenja procesa i koristiti samo one sirovine koje su uistinu biološki razgradive. Isto tako, vrlo je važno da se provodi aeroban proces jer se pri anaerobnom oslobađaju neugodni mirisi koji potječu od reduktivnih spojeva. Ako ipak nastanu, neugodni mirisi se u postrojenjima mogu ukloniti primjenom biofiltera.

Emisija stakleničkih plinova

Provođenjem procesa nastaju staklenički plinovi poput ugljikova dioksida i metana. Vrijednosti njihovih koncentracija se stalno prate tijekom procesa i uočava se trend smanjenja njihove koncentracije. Isto tako, konačne koncentracije nisu štetne za okoliš i primjenu zrelog komposta tako da navedena emisija plinova zapravo nije nedostatak procesa ako se on pravilno provodi.

2.13. KO-KOMPOSTIRANJE

Zbog sve veće produkcije otpada i pronalaženja rješenja njegovog učinkovitog saniranja te korištenja konačnog produkta definiran je proces ko-kompostiranja. Radi se o procesu u kojem su u poželjnom omjeru pomiješane različite sirovine kako bi se nadomjestili neželjeni početni parametri kompostiranja pojedinog otpada (Kumar i sur., 2010).

Mortula i sur. (2016) su proveli proces ko-kompostiranja mulja, zelenog i prehrambenog otpada koristeći decentralizirani stroj za kompostiranje (*The Naturemill setup*). Zeleni otpad je korišten kao strukturni materijal. Proces je proveden uz omjer C/N 20,9-24,7 i uz niži sadržaj vlage 37,8-47,3 %. Nakon završenog procesa i analize dobivenih produkata, zaključeno je kako je ko-kompostiranjem 30 % mulja, 50 % zelenog otpada i 20 % prehrambenog otpada dobiven kvalitetan produkt iako je konačni omjer C/N iznosio 25. Također je zabilježen visok salinitet zbog korištenja zelenog otpada.

Nizak sadržaj vlage zbog upotrebe zelenog otpada bilježe i Malakahmad i sur. (2017) prilikom ko-kompostiranja zelenog i prehrambenog otpada. Iako su dobivene vrijednosti pH bile u zadovoljavajućem rasponu 7-9, vrijednosti sadržaja vlage 15,4-32,1 % su preniske. Za razliku od procesa ko-kompostiranja kojeg su proveli Mortula i sur. (2016), završne vrijednosti omjera C/N su bile oko 20 što označava zreli kompost.

Vrijednosti omjera C/N do 20 bilježe Tweib i Ekhmaj (2017) koji su ko-kompostirali prehrambeni otpad i mulj koristeći omjer sirovina 1:2 i 1:3. pH vrijednosti dobivenih produkata su bile neutralne kao i u istraživanju Malakahmad i sur. (2017) te je postignut značajan porast koncentracije makroelemenata (dušika, fosfora i kalija) u odnosu na prethodna istraživanja. Važnost optimalnog omjera C/N i početnog omjera sirovina prilikom ko-kompostiranja dokazana je u istraživanjima koje su proveli Wang i sur. (2013) i Kumar i sur. (2010). Wang i sur. (2013) su proveli proces ko-kompostiranja mulja s kukuruzovinom kao strukturnim materijalom uz omjere C/N 14, 20 i 25. Zaključeno je kako pri omjeru C/N 14 nije postignuta dovoljno visoka temperatura, koncentracija $\text{NH}_4\text{-N}$ kao ni indeks klijanja veći od 80 %. Isto bilježe Kumar i sur. (2010) ko-kompostiranjem zelenog i prehrambenog

otpada uz omjer C/N 14,5 i sadržaj vlage 70,61 %. Također, naglašeno je kako više vrijednosti sadržaja vlage (> 60 %) nisu nepovoljno utjecale na dinamiku promjene vlažnosti. Wang i sur. (2013) naglašavaju kako je pri omjeru C/N od 25 postignuta najviša vrijednost indeksa klijanja, ali i najniži pH zbog veće količine dodanog strukturnog materijala. Niže vrijednosti indeksa klijanja bilježe Kumar i sur. (2010), međutim dokazano je kako je optimalan sadržaj vlage u procesu 60 % i omjer C/N 19,6. Time dobiveni komposti neće negativno utjecati na rast biljaka i sastav tla.

3. ZAKLJUČAK

U komunalnom otpadu, ovisno o načinu i standardu življenja, količinski udio biootpada se kreće u rasponu 20-70 %. Biootpad pripada posebnoj kategoriji otpada te se mora odvajati na mjestu nastanka, odvojeno sakupljati i skladišti u skladu s propisom kojim će se urediti gospodarenje biootpadom. Kompostiranje biootpada predstavlja sastavni dio cjelovitog sustava gospodarenja otpadom s ciljem dobivanja komposta koji se upotrebljava kao organski dodatak za poboljšanje svojstava tla. Poželjna sirovina za kompost je i otpadni mulj koji se zbog velikog sadržaja biološki aktivne tvari može koristiti u poljoprivredi. Na taj način mulj postaje gnojivo bez otpadnog potencijala. Međutim, sadržaj anorganskih i organskih onečišćujućih tvari u mulju zahtijeva veliki oprez. Ko-kompostiranjem biološki razgradivog otpada kao što su mulj i biootpad, uklanjaju se mogući nedostaci pojedine sirovine i dobiva se uporabljiv produkt - kompost. Time se osigurava smanjenje količine otpada koji završava na odlagalištima, ali i stabilizacija organske frakcije komunalnog otpada, smanjenje negativnog potencijala procjednih voda u odlagalištima te smanjenje količine neugodnih mirisa i bioplina.

Sustavom cjelovitog gospodarenja otpadom se otpad prvenstveno uvažava kao prirodni resurs koji treba materijalno i energetski iskoristiti. Ponovno korištenje otpada ili njegovo predavanje na daljnje korištenje središnje su aktivnosti sustava odgovornog i održivog gospodarenja otpadom.

4. LITERATURA

1. An C-J., Huang G-H., Yao Y., Sun W., An K. (2012) Performance of in-vessel composting of food waste in the presence of coal ash and uric acid. *Journal of Hazardous Materials* **203–204**: 38 – 45.
2. Awasthi M. K., Pandey A. K., Bundela P. S., Wong J. W. C., Li R., Zhang Z. (2016) Cocomposting of gelatin industry sludge combined with organic fraction of municipal solid waste and poultry waste employing zeolite mixed with enriched nitrifying bacterial consortium. *Bioresource Technology* **213**: 181 – 189.
3. Bernai M. P., Paredes C., Sánchez-Monedero M. A., Cegarra J. (1998) Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology* **63**: 91 – 99.
4. Bewley J. D., Black M. (1994) *Seeds, Physiology of Development and Germination*, 2. izd., Plenum Press, New York, USA.
5. Biddlestone A. J., Gray K. R. (1991) Aerobic processing of solid organic wastes for the production of a peat alternative: a review. *Process Biochemistry* **26**: 275 – 279.
6. Briški F., Gomzi Z., Hublin A., Vuković M. (2003) Aerobno kompostiranje otpadaka voća i povrća: modeliranje procesa. *Kemija u industriji* **52** (3): 95 – 102.
7. Cekmecelioglu D., Demirci A., Graves R. E., Davitt N. H. (2005) Applicability of optimised in-vessel food waste composting for windrow systems. *Biosystems Engineering* **91**: 479 – 486.
8. Diaz L. F., de Bertoldi M., Bidlingmaier W., Stentiford E. (2007) *Compost science and technology*, 1.izd., Elsevier Science. str. 7 – 20; 32 – 38; 79 – 80.
9. Direktiva Vijeća Europske unije o odlagalištima otpada, 1999/31/EZ.
10. Direktiva Vijeća Europske unije o zaštiti okoliša, posebno tla, kod upotrebe mulja iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u poljoprivredi, 86/278/EEC.
11. El Fels L., Zamama M., El Asli A., Hafidi M. (2014) Assessment of biotransformation of organic matter during co-composting of sewage sludge-lignocelulosic waste by chemical, FTIR analyses, and phytotoxicity tests. *International Biodeterioration & Biodegradation* **87**: 128 – 137.
12. Epstein E. (1997) *The science of composting*, 1. izd., Technomic Publishing Company Lancaster, Pennsylvania, USA.

13. Funtak A. (2016) Kompostiranje i gospodarenje tlom. *Gospodarski list* <<https://gospodarski.hr/rubrike/ostalo/prilog-broja-kompostiranje-i-gospodarenje-tlom/>> Pristupljeno 05. lipnja 2020.
14. Gao M., Li B., Yu A., Liang F., Yang L., Sun Y. (2010) The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust. *Bioresource Technology* **101**: 1899 – 1903.
15. Golueke C. G. (1976) Composting- A study of the process and its principles. Rodale Press, Pennsylvania.
16. Golueke C. G. (1981) Principles of biological resources recovery. *Biocycle* **22**: 36 – 40.
17. Gómez-Brandón M., Lazcano C., Domínguez J. (2008) The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure. *Chemosphere* **70**: 436 – 444.
18. Guo R., Li G., Jiang T., Schuchardt F., Chen T., Zhao Y., Shen Y. (2012) Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresource Technology* **112**: 171 – 178.
19. Hachicha S., Sallemi F., Medhioub K., Hachicha R., Ammar E. (2008) Quality assessment of composts prepared with olive mill wastewater and agricultural wastes. *Waste Management* **28**: 2593 – 2603.
20. Harada Y., Inoko A. (1980) The measurement of the cation-exchange capacity of composts for the estimation of the degree of maturity. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* **26**: 127 – 134.
21. Haug R. T. (1993) The practical handbook of compost engineering, 1. izd., Lewis Publishers, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA. isbn 0-87371-373-7.
22. Himanen M., Hänninen K. (2011) Composting of bio-waste, aerobic and anaerobic sludges – Effect of feedstock on the process and quality of compost. *Bioresource Technology* **102**: 2842 – 2852.
23. Hrvatska agencija za okoliš i prirodu (HAOP) <http://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021_otpad/Projekti/OTP_PR_Metodologija%20za%20odredivanje%20sustava%20komunalnog%20otpada.pdf> Pristupljeno 02. lipnja 2020.
24. Huang G. F., Wong J. W. C., We Q. T., Nagar B. B. (2004) Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust. *Waste Management* **24**: 805 – 813.
25. Hwang H. Y., Kim S. H., Kim M. S., Park S. J., Lee C. H. (2020) Co-composting of chicken manure with organic wastes: characterization of gases emissions and compost quality. *Applied Biological Chemistry* **63**: 1 – 10.

26. Iqbal M. K., Nadeem A., Sherazi F., Khan R. A. (2015) Optimization of process parameters for kitchen waste composting by response surface methodology. *International Journal of Environmental Science and Technology* **12**: 1759 – 1768.
27. Iqbal M. K., Shafiq T., Hussain A., Ahmed K. (2010) Effect of enrichment on chemical properties of MSW compost. *Bioresource Technology* **101** (15): 5969 – 5977.
28. Jaafarzadeh Haghighi Fard N., Moradi B., Abbasi M., Alivar Babadi R., Bahrani H., Mirzaie A., Zare Javid A., Ravanbakhsh M. (2015) Feasibility study of green wastes composting with digested and dewatering sludge from municipal wastewater treatment plant in Iran. *Environmental Health Engineering and Management Journal* **2**: 149 – 155.
29. Kumar M., Ou Y. L., Lin J. G. (2010) Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. *Waste Management* **30** (4): 602 – 609.
30. Lax A., Roig A., Costa F. (1986) A method for determining the cation exchange capacity of organic materials. *Plant and Soil* **94**: 349 – 355.
31. Lončarić Z., Parađiković N., Popović B., Lončarić R., Kanisek J. (2015) Gnojidba povrća, organska gnojiva i kompostiranje, Poljoprivredni fakultet u Osijeku, Grafika d. o. o. Osijek. ISBN 978-953-7871-36-9.
32. Magalhaes A. M. T., Shea P. J., Jawson M. D., Wicklund E. A., Nelson D. W. (1993) Practical simulation of composting in the laboratory. *Waste Management & Research* **11**: 143 – 154.
33. Maheshwari D. K. (2014) Composting for sustainable agriculture, Springer International Publishing, Switzerland. str. 88.
34. Majbar Z., Lahlou K., Ben Abbou M., Ammar E., Triki A., Abid W., Nawdali M., Bouka H., Taleb M., El Haji M., Rais Z. (2018) Co-composting of Olive Mill Waste and Wine-Processing Waste: An Application of Compost as Soil Amendment. *Journal of Chemistry* **2018**: 1 – 9.
35. Majbar Z., Rais Z., El Haji M., Ben Abbou M., Bouka H., Nawdali M. (2017) Olive mill wastewater and wine by-products valorization by co-composting. *Journal of Materials and Environmental Sciences* **8**: 3162 – 3167.
36. Makan A., Mountadar M. (2012) Effect of C/N ratio on the in-vessel composting under air pressure of organic fraction of municipal solid waste in Morocco. *Journal of Material Cycles and Waste Management* **14**: 241 – 249.
37. Malakahmad A., Idrus N. B. , Abualqumboz M. S., Yavari S., Kutty S. R. M. (2017) In-vessel co-composting of yard waste and food waste: an approach for sustainable

- waste management in Cameron Highlands, Malaysia. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* **6**: 149 – 157.
38. Mikulić K., Majhen H., Burela S. (2000) Izbor optimalne tehnologije kompostiranja komunalnih otpadaka, VI. Međunarodni simpozij Gospodarenje otpadom Zagreb, 2000.
39. Milanović Z. (2019) Kompostiranje-sušenje-stabilizacija-prioriteti gospodarenja komunalnim otpadom u Hrvatskoj. *Tehnoeko* str. 21 – 32.
40. Mitelut A. C., Popa M. E. (2011) Seed germination bioassay for toxicity evaluation of different composting biodegradable materials. *Romanian Biotechnological Letters* **16**: 121 – 129.
41. Mortula M. M., Ahmad A., Shah S. A. (2016) Assessment of Mixing Potential of Sewage Sludge, Green Waste and Food Waste for Co-Composting in Sharjah, UAE. *International Journal of Environment and Sustainability* **5** (2): 12 – 17.
42. Neugebauer M., Sołowiej P., Piechocki J., Czekala W., Janczak D. (2017) The influence of the C: N ratio on the composting rate. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy* **6** (1): 54 – 60.
43. Ogunwande G. A., Osunade K. O., Adekalu K. O., Ogunjimi L. A. O. (2008) Nitrogen loss in chicken litter compost as affected by carbon to nitrogen ratio and turning frequency. *Bioresource Technology* **99**: 7495 – 7503.
44. Ouattmane A., Provenzano M. R., Hafidi M., Sensi N. (2000) Compost maturity assessment using calorimetry, spectroscopy and chemical analysis. *Compost Science and Utilization* **8**: 124 – 134.
45. Pravilnik o nusproizvodima i ukidanju statusa otpada (2014) *Narodne novine* **117** (NN 117/2014).
46. Pravilnik o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja (2014) *Narodne novine* **9** (NN 9/2014).
47. Pravilnik o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja štetnim tvarima (1992) *Narodne novine* **15** (NN 15/1992).
48. Radović S. (1997) Biološka obrada otpada, *Gospodarstvo i okoliš*, 27/97, 308-313.
49. Raj D., Antil R. S. (2011) Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from agro-industrial wastes. *Bioresource Technology* **102**: 2868 – 2873.
50. Regni L., Nasini L., Ilarioni L., Brunori A., Massaccesi L., Agnelli A., Proietti P. (2017) Long term amendment with fresh and composted solid olive mill waste on olive grove

- affects carbon sequestration by prunings, fruits, and soil. *Frontiers in Plant Science* **7**: 1 – 18.
51. Sanchez-Monedero M. A., Roig A., Paredes C., Bernal M. P. (2001) Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rudgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresource Technology* **78**: 301 – 308.
 52. Soumaré M., Demeyer A., Tack F. M. G., Verloo M. G. (2002) Chemical characteristics of Malian and Belgian solid waste composts. *Bioresource Technology* **81**: 97 – 101.
 53. Tiquia S. M., Tam N. F. Y. (1998) Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge. *Bioresource Technology* **65**: 43 – 49.
 54. Tognetti C., Mazzarino M. J., Laos F. (2007) Improving the quality of municipal organic waste compost. *Bioresource Technology* **98**: 1067 – 1076.
 55. Tweib S. A. K., Ekhmaj A. I. (2017) Co-Composting of Sewage Sludge with Food Waste Using Bin Composter. *Al-Mukhtar Journal of Sciences* **33** (1): 24 – 35.
 56. Uçaroğlu S., Alkan U. (2016) Composting of wastewater treatment sludge with different bulking agents. *Journal of the Air & Waste Management Association* **66**: 288 – 295.
 57. Wang Z., Gao M., Wang Z., She Z., Hu B., Wang Y., Zhao C. (2013) Comparison of physicochemical parameters during the forced-aeration composting of sewage sludge and maize straw at different initial C/N Ratios. *Journal of the Air & Waste Management Association* **63**: 1130 – 1136.
 58. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o održivom gospodarenju otpadom (2017) *Narodne novine* **73** (NN 73/2017).
 59. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o održivom gospodarenju otpadom (2019) *Narodne novine* **14** (NN 14/2019).
 60. Zakon o održivom gospodarenju otpadom (2013) *Narodne novine* **94** (NN 94/2013).
 61. Zhang Y., He Y. (2006) Co-composting solid swine manure with pine sawdust as organic substrate. *Bioresource Technology* **97**: 2024 – 2031.
 62. Zhu N. (2007) Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw. *Bioresource Technology* **98**: 9 – 13.

Izjava o izvornosti

Izjavljujem da je ovaj završni rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u njegovoj izradi nisam koristio drugim izvorima, osim onih koji su u njemu navedeni.

Petra Jukić

ime i prezime studenta