

Sveučilište u Zagrebu
Prehrambeno-biotehnološki fakultet
Preddiplomski studij Biotehnologija

Ivan Kovač

7627/BT

KOMPOSTIRANJE BIOPLASTIKE

ZAVRŠNI RAD

Predmet: Biološka razgradnja organskih spojeva

Mentor: dr. sc. Dijana Grgas, poslijedoktorand

Zagreb, 2020.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Završni rad

Sveučilište u Zagrebu
Prehrambeno-biotehnološki fakultet
Preddiplomski studij Biotehnologija
Zavod za prehrambeno-tehnološko inženjerstvo
Laboratorij za biološku obradu otpadnih voda

KOMPOSTIRANJE BIOPLASTIKE

Ivan Kovač, 7627/BT

Sažetak: Većina uobičajeno korištene plastike se ne razgrađuje pod djelovanjem okolišnih čimbenika poput vode, zraka, sunčeve svjetlosti ili mikroorganizama, pa udio plastike u otpadu konstantno raste i ima snažan negativan učinak na ekosustav. Zbog toga je u posljednje vrijeme sve veći interes za biorazgradivu bioplastiku. Jedan od načina zbrinjavanje bioplastike je kompostiranje. Proces kompostiranja bioplastike ovisi o temperaturi, sadržaju vlage, broju i vrsti prisutnih mikroorganizama, sastavu ulaznih sirovina, te količini prisutnog zraka. Prilikom industrijskog kompostiranja bioplastike, bioplastika se konvertira u biomasu, vodu i ugljikov dioksid tijekom oko 6-12 tjedana. Kompostiranjem bioplastike se smanjuje količina otpada na odlagalištu otpada i proizvodi se vrijedan proizvod, kompost, koji se može primijeniti u agrikulturi.

Ključne riječi: bioplastika, kompostiranje

Rad sadrži: 23 stranice, 5 slika, 1 tablicu, 52 literaturna navoda

Jezik izvornika: hrvatski

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf formatu) obliku pohranjen u: Knjižnici

Prehrambeno-biotehnološkog fakulteta, Kačićeva 23, Zagreb

Mentor: dr. sc. Dijana Grgas, poslijedoktorand

Rad predan: rujna, 2020

BASIC DOCUMENTATION CARD

Final work

University of Zagreb
Faculty of food Technology and Biotechnology
Undergraduate studies Biotechnology
Department of Food Engineering
Laboratory for biological wastewater treatment

COMPOSTING OF BIOPLASTICS

Ivan Kovač, 7627/BT

Abstract: Most commonly used plastics do not decompose under the influence of environmental factors such as water, air, sunlight or microorganisms, so the ratio of plastics in waste has been constantly growing and has a strong negative effect on the ecosystem. Therefore, a growing interest in biodegradable bioplastics has been recorded lately. One of the ways for the disposal of bioplastics is composting. The process of composting of bioplastics depends on the temperature, moisture content, the number and type of microorganisms present, the composition of the raw materials, and the amount of air present. In the industrial composting of bioplastics, bioplastics are converted to biomass, water and carbon dioxide over a period of about 6-12 weeks. Composting of bioplastics reduces the amount of waste in the landfill and produces a valuable product, compost, which can be applied in the agriculture.

Keyword: bioplastics, composting

Thesis contains: 23 pages, 5 figures, 1 table, 52 references

Original in: Croatian

Final work in printed and electronic (pdf format) version is deposited in: Library of the Faculty of Food Technology and Biotechnology, Kačićeva 23, Zagreb

Mentor: PhD. Dijana Grgas, Senior researcher

Thesis delivered: September, 2020

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. Plastika	2
2.2. Bioplastika	3
2.3. Kompostiranje	8
2.4. Kompostiranje bioplastike	11
3. ZAKLJUČCI	18
4. POPIS LITERATURE	19

1. UVOD

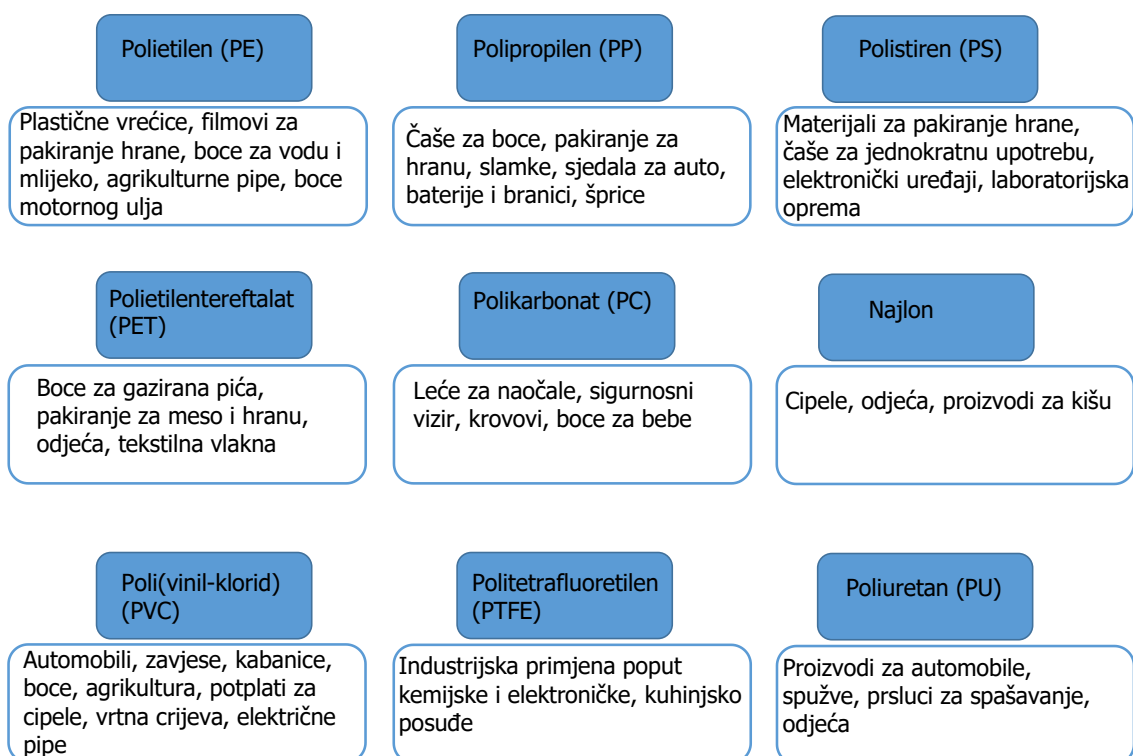
Plastika je dio današnje svakodnevnice, te ima vrlo široku primjenu u brojnim područjima (Siracusa, 2019). Neodgovarajuće upravljanje plastičnim otpadom rezultiralo je značajnim onečišćenjem cijelog ekosustava (Mitchell, 2015; Derraik, 2002; Browne i sur., 2011). Jedno od rješenja za plastiku je razvoj bioplastike, te njezina implementacija u industrijsku proizvodnju i primjenu (Siegenthaler i sur., 2012; Narayan 2006a,b; ASTM International, 2017). Jedna od mogućnosti za zbrinjavanje otpada bioplastike je kompostiranje bioplastike (Ciriminna i Pagliaro, 2020; Rudeekit i sur., 2008; Narancic i sur., 2018; Markowicz i Symańska-Pulikowska (2019)). Kompostiranjem se proizvodi visoko vrijedan proizvod, kompost, koji se koristi kao gnojivo u agrikulturi. Također, kompostiranjem se smanjuje količina stakleničkih plinova i tako doprinosi sprečavanju klimatskih promjena (Cooperband, 2000). Nadalje, kompostiranjem bioplastike se smanjuje količina otpada koja dopijeva na odlagalište otpada, te se tako produžuje njegov životni vijek (Markowicz i sur., 2019; Agarwal i sur., 1998; Scott i Wiles, 2001; Tokiwa i Jarerat, 2004).

Cilj ovog rada je bio istražiti nove spoznaje o kompostiranju bioplastike.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Plastika

Tijekom proteklih 60 godina, polimerni materijali, plastika, su postali najprivlačniji materijali zahvaljujući niskoj cijeni, jednostavnosti rukovanja, lakoći, visokoj otpornosti na fizikalno, mehaničko i kemijsko starenje, i biološku razgradnju. Riječ plastika dolazi od grčke riječi *plastikos* i znači "može se oblikovati u različite oblike". Stabilnost i trajnost sintetskih polimera se kontinuirano poboljšavaju, te su postali sinonim za materijal otporan na okolišno raspadanje. Na početku je otpornost na razgradnju bila prednost plastike, međutim, budući da se plastika koristi ograničeno vrijeme, brzo je postala otpad. Plastika se koristi u brojnim područjima, poput kirurgije, farmakologije, agrikulture, prehrane i inženjerstva. Plastika ima široku primjenu u pakiranju za hranu, farmaceutike, kozmetike, detergenata i kemikalija (Shah i sur., 2008; Siracusa, 2019). Na slici 1 je prikazana najčešća sintetska plastika, te njezina najčešća upotreba (Siracusa, 2019).



Slika 1. Sintetska plastika (Siracusa, 2019)

Trenutno se godišnje proizvodi oko 140 miliona tona polimera širom svijeta, a većina iz nafte (Siracusa, 2019). Proizvodnja plastičnog otpada je globalni problem, a jedan od najvećih problema je akumulacija plastičnog otpada u oceanima (Mitchell, 2015). Neodgovarajuće upravljanje plastičnim otpadom i njegova akumulacija utječe na ekosustav, divlje životinje i kvalitetu života ljudi. Specifični učinci uključuju zapetljanje, blokiranje probavnog sustava različitih vrsta, formiranje mikroplastike, i gubitak estetske vrijednosti (Derraik, 2002; Browne i sur., 2011).

Plastika se zbrinjava odlaganjem na odlagalište otpada, spaljivanjem i recikliranjem. Neodgovarajuće zbrinuta plastika stoljećima predstavlja značajan izvor onečišćenja okoliša. Ukoliko se neodgovarajuće spali, proizvodi perzistentne organske polutante poput furana i dioksina. Ukoliko se neodgovarajuću reciklira, postane daljnji otpad, koji se teško obrađuje (Siracusa, 2019). Trenutno se oko 75% plastičnog otpada odlaže na odlagalištu otpada i oko 25% se reciklira (Pollution Control Department, 2017). Za zbrinjavanja plastičnog otpada predložena su različita rješenja, koja uključuju osim recikliranja, obnove energije, i zabranu specifičnih produkata, kao i proizvodnju biorazgradive plastike (Quecholac-Piña i sur., 2020).

2.2. Bioplastika

Alternativa plastici je proizvodnja plastike koja se razgrađuje u specifičnim uvjetima, poput kompostiranja, vodenom okolišu i odlagalištu otpada (Siegenthaler i sur., 2012). Konačan cilj je reintegrirati elementalne komponente plastike u prirodne cikluse, poništavajući učinak akumulacije plastike. Dok razgradiva plastika može biti bilo koja dizajnirana plastika koja prolazi značajne promjene u kemijskoj strukturi u specifičnim okolišnim uvjetima, biorazgradiva plastika zahtijeva da promjena bude uzrokovana izričito djelovanjem mikroorganizama (ASTM International, 2017).

Na temelju čimbenika koji uzrokuju razgradnju, razlikuju se različiti tipovi razgradive plastike (ASTM International, 2017):

- (i) fotorazgradiva, čiji se polimerni lanci fragmentiraju zbog formiranja slobodnih radikala koje proizvodi ultraljubičasto zračenje;

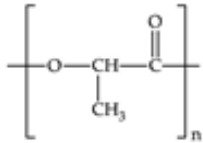
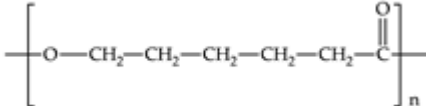
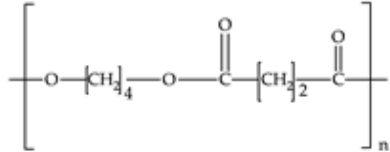
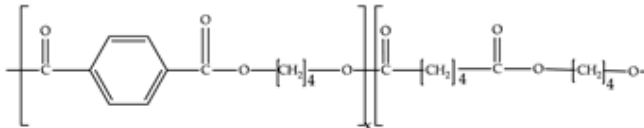
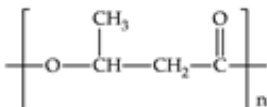
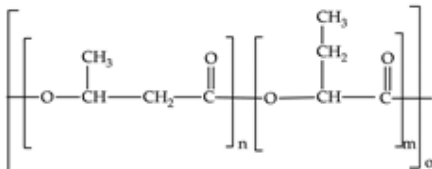
- (ii) oksorazgradiva, koja sadrži aditive koji unaprjeđuju njihovu abiotičku razgradnju sve dok ne dosegnu veličinu koja se može razgraditi biotički; i
- (iii) biorazgradiva, koju mogu izravno razgraditi živi organizmi, poput bakterija, funga, i alga, i proizvesti mineralne plinove i biomasu.

Song i sur. (2009) ovisno o podrijetlu, biorazgradivu plastiku klasificiraju kao biobaziranu ili petrokemijski-baziranu. Biobazirana plastika (tablica 1) je biorazgradiva u prirodi i proizvodi se iz prirodnog podrijetla (biljke, životinje ili mikroorganizmi) poput polisaharida (primjerice škrob, celuloza, lignin i hitin), proteini (primjerice želatina, kazein, gluten pšenice, svila i vuna) i lipidi (primjerice biljna ulja i životinjske masnoće). Prirodna guma kao i određeni poliesteri bilo da su ih proizveli mikroorganizmi/biljke (primjerice polihidroksialkanoati (PHA) i poli-3-hidroksibutirat (PHB)) ili sintetizirani bioderivirani monomeri (primjerice polilaktična kiselina, PLA) spadaju u tu kategoriju. Petrokemijski-bazirana biorazgradiva plastika poput alifatskih poliestera (primjerice poliglikolna kiselina, polibutilen sukcinat i polikaprolakton, PCL), aromateski kopoliesteri (primjerice polibutilen sukcinat tereftalat) i poli(vinil alkohol) se proizvode iz sintetski dobivenih monomera dobivenih iz petrokemijskog rafiniranja, koji posjeduju određeni stupanj biorazgradivosti (Smith, 2005). Ova klasifikacija se razlikuje od obnovljivih (biobazirane) i neobnovljivih (petrokemijski-bazirane) izvora, međutim, brojne komercijalne formulacije biorazgradive plastike kombiniraju materijale iz obe skupine zbog smanjenja troška i/ili poboljšanja izvedbe (Song i sur., 2009).

Bioplastika osim što se može proizvesti prirodno, poput celuloze i škroba (Christopher, 2018), može se proizvesti i pomoću kemijskih modifikacija (Da Luz i sur., 2013). Bioplastika uključuje biorazgradivu i okso-biorazgradivu plastiku. Prirodna biorazgradiva plastika je napravljena iz polimernog matriksa iz prirodnih izvora (npr. polisaharid-celuloza, škrob i njihovi derivati). Prirodna vlakna iz uobičajeno uzgajanih biljaka, poput lana, jute ili konoplje, se koriste da popune takve materijale (Bismarck i sur., 2002; Kaisangsri i sur, 2012). Sintetski biorazgradivi polimeri uključuju: polikaprolakton, poli(vinil-alkohol), poli(etilen-oksidi), poliestere dobivene pomoću fermentacijske polimerizacije polisaharida, npr. polihidroksi butirat ili polilaktična kiselina (What Makes Green Plastics Green?). Okso-biorazgradiva plastika može biti npr. polietilen visoke gustoće – HDPE (engl. high-density polyethylene) s prooksidativnim aditivima, koji bi trebali osigurati njegovu razgradnju na kraju života proizvoda. Razgradnja biorazgradivih polimera se odvija pomoću mikroorganizama poput bakterija i funga. Ipak, razgradnja okso-biorazgradivih polimera je složenija i sastoji se od dva stupnja. Prvi stupanj je aktivacija aditiva odgovornih za oksidaciju materijala. To se može dogoditi, primjerice, pod utjecajem

ultraljubičastih zraka/topline (Yashchuk i sur., 2012; Contat-Rodrigo, 2013; Jolanta i sur., 2018). Drugi stupanj je razgradnja sa sudjelovanjem mikroorganizama.

Tablica 1. Uobičajeni monomeri biorazgradive plastike (Quecholac-Piña i sur., 2020)

Biorazgradiva plastika	Akronim	Monomer	Literatura
Polilaktična kiselina	PLA		Lv i sur. (2019)
Polikaprolakton	PCL		Lv i sur. (2019)
Polibutilen sukcinat	PBS		Jamaluddin i sur. (2016)
Poli(butilen-adipat-tereftalat)	PBAT		Shi i sur. (2005)
Poli-(3-hidroksibutirat)	PHB		Lv i sur. (2019)
Polihidroksibutirat-ko-polihidroksivalerat	PHBV		Lv i sur. (2019)

Song i sur. (2009) su istaknuli da se termin biorazgradivi polimeri ili biorazgradiva plastika odnosi na polimerne materijale koji su „sposobni proći proces razgradnje do ugljikovog dioksida, metana, vode, anorganskih spojeva, ili biomase u kojem je dominantan mehanizam enzimsko djelovanje mikroorganizama, koja se može mjeriti standardiziranim testovima, u određenom vremenskom periodu, odražavajući dostupne uvjete odlaganja“ (ASTM standard D6813). Podskupina biorazgradive plastike može također biti i kompostabilna s naglaskom na njezinu biorazgradnju u kompostnom sustavu, te se mora pokazati da je „sposobna za biološku razgradnju na kompostnom mjestu kao dio dostupnog programa, poput da plastika nije vizualno prepoznatljiva i da se razgrađuje do ugljikovog dioksida, vode, anorganskih spojeva i biomase, pri brzini u skladu s poznatim kompostabilnim materijalima (primjerice celuloza)“ (ASTM standard D996, D6400). Početni koraci mogu uključivati abiotičke (termalne, foto) i biotičke procese za razgradnju polimera, u odgovarajućim uvjetima, do niskomolekularnih spojeva. Ipak, rezultirajući fragmenti razgradnje moraju biti potpuno korišteni od strane mikroorganizama, u suprotnom postoji potencijal za okolišne i zdravstvene posljedice (Narayan 2006a,b). Produkti industrijskog procesa kompostiranja (obično 12 tjedana s temperaturnom fazom iznad 50 °C) moraju zadovoljiti kriterije poput sadržaja teških metala (regulirano), ekotoksičnost i nedostatak očitih prepoznatljivih ostataka polimera (Song i sur., 2009).

Dok se sintetski biopolimeri moraju proizvoditi iz obnovljivih izvora zato što moraju biti biorazgradivi i kompostabilni, bioplastični materijali se mogu dobiti i iz drugih izvora osim onih obnovljivih, zato što je njihova biorazgradiva priroda izravno povezana s njihovom kemijskom strukturom a ne s njihovim izvorom (Siracusa, 2016).

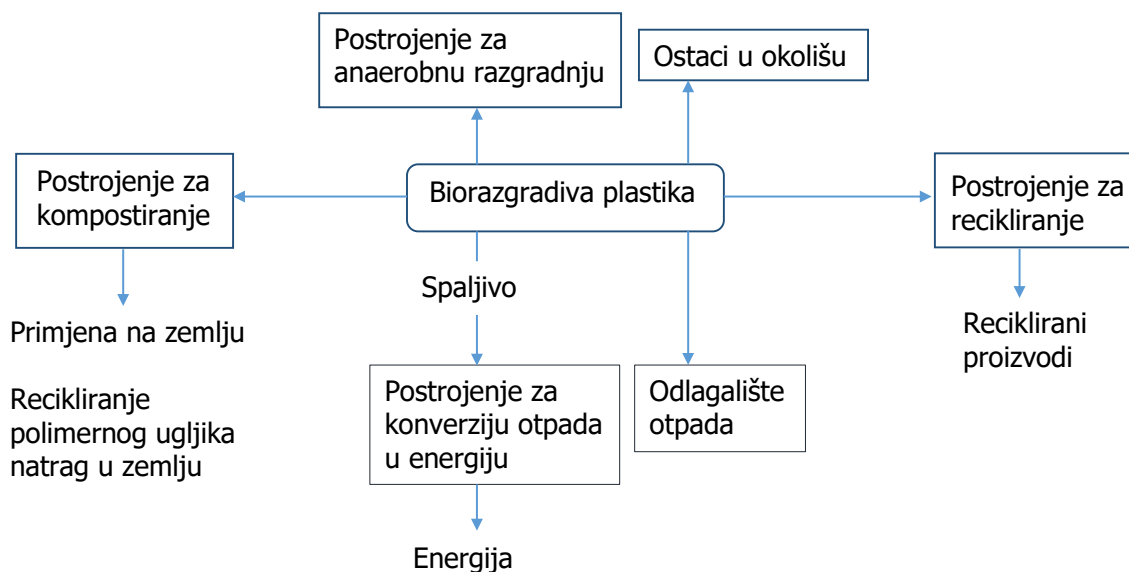
Bioplastika ima manji okolišni učinak obzirom na emisiju stakleničkih plinova i iscrpljenje fosila u odnosu na konvencionalnu plastiku (Tsiropoulos i sur., 2015; Suwanmanee i sur., 2013). Bioplastika se proizvodi iz obnovljive sirovine biomase, poput kukuruza, tropske biljke i šećerne trske pomoću procesa mikrobne fermentacije (Curran, 2000). Sirovina biomasa za opskrbu industrije bioplastike se također koristi i za proizvodnju hrane, stočne hrane i energije za domaću potrošnju. Unatoč tome što se troši manje fosilnih izvora, kultivacija agrikulturnih usjeva za sirovine može rezultirati okolišnim učinkom poput promjene upotrebe zemlje i također može pokrenuti pitanja koja se odnose na kompeticiju između hrane, energije i materijala. Da bi se proizvela bioplastika prvo se trebaju uzgojiti sirovine, poput šećerne trske ili tropske biljke. Zatim se u postrojenju za proizvodnju šećera iz sirovine poput šećerne trske ekstrahira šećer. Prilikom proizvodnje bioplastike iz tropske biljke, korijenje tropske biljke se prvo konvertira u škrob tropske biljke. Škrob se ne može izravno koristiti u procesu bakterijske

fermentacije, prvo se treba konvertirati u šećer. PLA na bazi šećerne trske (SPLA) i PLA na bazi tropske biljke (CPLA) se proizvode procesom fermentacije u kojem se šećer konvertira u laktičnu kiselinu prije polimerizacije u PLA. Polihidroksi alkanoati su linearni polimeri koji se proizvode bakterijskom fermentacijom šećera. Obzirom na sirovinu, postoje PHA na bazi šećerne trske (SPHA) i PHA na bazi tropske biljke (CPHA). PBS se proizvodi bakterijskom fermentacijom iz jantarne kiseline i 1,4 butandiola. Obzirom na sirovinu, postoje PBS na bazi šećerne trske (SPBS) i PBS na bazi tropske biljke (CPBS) (Changwichan i sur., 2018).

Polilaktična kiselina, polihidroksi alkanoati i polibutilen sukcinat (PBS) su obećavajuća biobazirana i biorazgradiva bioplastika (tablica 1). Zahvaljujući fleksibilnosti njihovih svojstava, PLA, PHA i PBS bi mogli zamijeniti konvencionalnu plastiku poput polipropilena, polietilen tereftalata i polistirena (slika 1) (Chen i Patel, 2012; Shen i sur., 2010).

Nakon upotrebe, biorazgradiva plastika se može:

- (i) reciklirati;
- (ii) spaliti uz obnovu energije;
- (iii) odložiti na odlagalište otpada; te
- (iv) biološki obraditi otpad: kompostiranje ili anaerobna razgradnja (slika 2) (Song i sur., 2009).



Slika 2. Integracija biorazgradive plastike s infrastrukturom odlaganja (Song i sur., 2009)

Bioplastika se može razgraditi u anaerobnim uvjetima na odlagalištu otpada pri čemu dolazi do proizvodnje metana, koji je jedan od stakleničkih plinova. U odgovarajućem postrojenju za kompostiranje, bioplastika se može konvertirati u kompost (slika 2). Također, tehnički se bioplastika također može i reciklirati (Changwichan i sur., 2018). Bioplastika ima široku primjenu, uključujući vrećice za odlaganje organskog otpada i vrećice za pakiranje hrane. Nakon korištenja, najčešće se odlaže u organski otpad, i zatim u postrojenje za kompostiranje ili postrojenje za fermentaciju otpada. Iz tih je razloga važno da je takav materijal u potpunosti biorazgradiv. Kada dospije u postrojenje za kompostiranje, postane dio komposta i ne bi se smio kontaminirati (Markowicz i Symańska-Pulikowska, 2019).

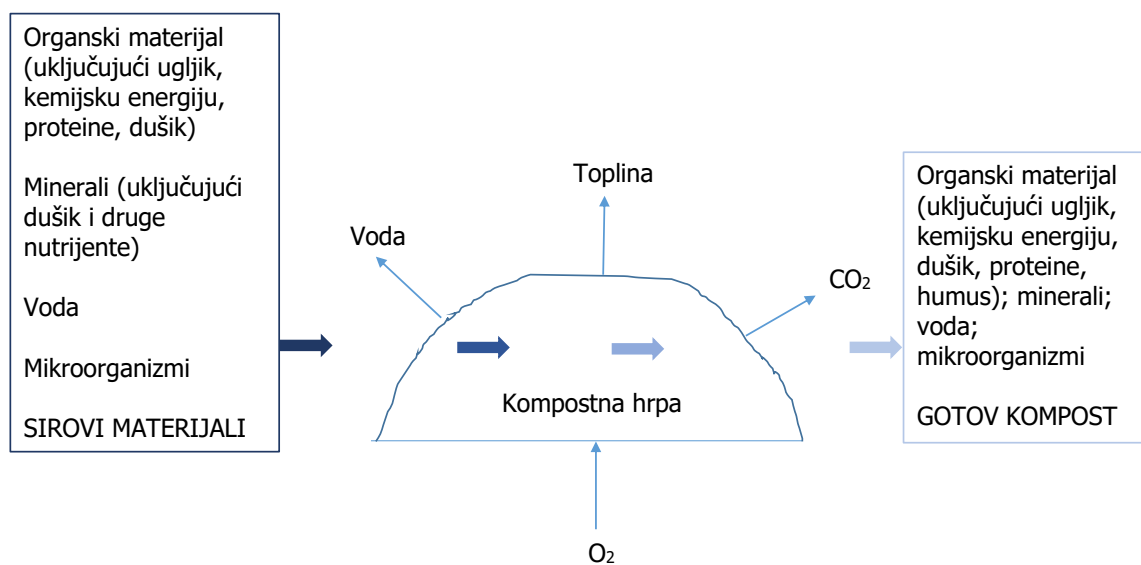
Prema tržišnim podacima za bioplastiku od Europske Bioplastike, globalni kapacitet proizvodnje bioplastike je bio 2,05 miliona tona u 2017. godini, što je činilo 0,6% proizvedene plastike. Ipak, predviđa se da će proizvodnja bioplastike dosegnuti 2,44 miliona tona do 2022. Azija je središte proizvodnje bioplastike, sa proizvedenih oko 56% bioplastike 2017. godine (European-Bioplastics, 2018).

U literaturi je istaknuto prisustvo klorida, fosfora i brojnih teških metala (cinka, kadmija, olova, nikala, bakra, kobalta, željeza i mangana) u kemijskom sastavu biorazgradive i oksobiorazgradive plastike (Bradney i sur., 2019; Alam i sur., 2018a; Alam i sur., 2018b; Pivnenko i sur., 2016; Tang i sur., 2015; Rochman i sur., 2013). Izvori metala poput cinka, olova, bakra i kadmija u ispitivanim materijalima mogu biti aditivi poput boja, ispuna, antioksidansa, stabilizatora ili plastifikatora korištenih u proizvodnji različitih vrsta plastika (Alam i sur., 2018a; Munier i Bendell, 2018; Jundong i sur., 2017). Metali imaju sposobnost akumuliranja u okolišu, i njihova količina raste s vremenom (Rochman i sur., 2014). Stoga kompostiranje bioplastike takvog sastava predstavlja mogućnost akumuliranja metala u kompostu, i posljedično u biljnom i životinjskom svijetu.

2.3. Kompostiranje

Kompostiranje je transformacija sirovih organskih materijala u biološki stabilne, huminske tvari pogodne za razna tla i uzgoj biljaka. Kompostiranje je kontrolirana razgradnja, prirodan proces razgradnje koji se javlja kada organski ostaci dođu u kontakt sa zemljom. Budući da je kompostiranje proces kojeg provode mikroorganizmi, za uspješno kompostiranje ključno je

omogućiti odgovarajuće okolišne uvjete za mikroorganizme da razgrade sirove organske materijale (slika 3). Tri najvažnija čimbenika za proizvodnju dobrog komposta su kemijski sastav sirovine (sastav i količina ugljika i minerala, pH vrijednost), veličina i oblik sirovine, poroznost kompostne hrpe, populacija organizama uključenih u proces kompostiranja (makrofauna i mezofauna; mikroorganizmi uključujući bakterije, aktinomicete, funge). Kompostiranje se odvija bilo aerobno ili anaerobno kada su organski materijali pomiješani i postavljeni u kompostnu hrpu. Aerobno kompostiranje je najučinkovitiji oblik razgradnje i proizvodi gotov kompost u najkraćem vremenu (Cooperband, 2000).



Slika 3. Shematski prikaz procesa kompostiranja. Ugljik, kemijska energija, proteini, i voda u gotovom kompostu su u manjoj količini nego u sirovom materijalu, a gotovi produkt ima više humusa. Volumen gotovog komposta je oko 50% manji nego u sirovom materijalu (Cooperband, 2000)

Mikroorganizmi razgrađuju organske spojeve da dobiju energiju potrebnu za životne procese. U aerobnim uvjetima, proizvedena toplina tijekom kompostiranja je nusproizvod aerobne oksidacije organskih sastojaka do ugljikovog dioksida (slika 3). Ukoliko je osigurana odgovarajuća količina ugljika, vode i zraka, aerobni organizmi će dominirati u kompostnoj hrpi i učinkovitije razgraditi sirovi organski materijal. Optimalni uvjeti za brzo aerobno kompostiranje uključuju omjer ugljika prema dušiku (C/N) kombiniranih sirovina u rasponu 25-

35, sadržaj vlage između 45% i 60% po masi, dostupnu koncentraciju kisika veću od 5%, veličinu čestica sirovine ne veću od 2,5 cm, gustoću mase manju od oko 500 kg/m³ i pH vrijednost između 5,5 i 8,5 (Cooperband, 2000).

Mezofauna poput grinja, crva, mrava, nematoda i kornjaša su odgovorni za početno mehaničko cijepanje organskih materijala u manje čestice. Mezofilne bakterije, funge, aktinomicete i protozoa (mikroorganizmi koji funkcioniraju pri temperaturi između 10-45 °C) započinju proces kompostiranja i kako temperatura raste kao rezultat oksidacije organskih spojeva, termofili (45-70 °C) preuzimaju dominaciju. Temperatura u kompostnoj hrpi obično ima brzi porast na 49-60 °C unutar 24-72 sata od formiranja kompostne hrpe i zatim se drži na toj temperaturi nekoliko tjedana. To je aktivna faza kompostiranja, tijekom koje se troše lako razgradivi spojevi i kisik, a patogeni (poput *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, *Clostridium botulinum*) i sjeme korova se uništavaju, i fitotoksini (organski spojevi toksični za biljke) se uklanjaju. Tijekom termofilne, aktivne faze kompostiranja, kisik se mora nadomjestiti miješanjem, forsiranom aeracijom, ili preokretanjem kompostne hrpe. Kako završava aktivna faza kompostiranja, temperatura pada na oko 38 °C. Mezofilni organizmi opet koloniziraju kompostnu hrpu, te započinje faza zrenja. Brzina potrošnje kisika opada na razinu pri kojoj kompost može biti na hrpi bez preokretanja. Tijekom zrenja, organski materijal se nastavlja razgrađivati te se konvertira u biološki stabilne huminske tvari (slika 3) (Cooperband, 2000).

Niski sadržaj vlage ometa proces kompostiranja jer mikroorganizmima treba voda (slika 3). Niski udio vlage također čini kompostne hrpe podložnije spontanom zapaljenju jer sadržaj vlage regulira temperaturu. Sadržaj vlage u suvišku od 60% znači da su pore prostora u kompostnoj hrpi ispunjene vodom a ne zrakom (kisikom), što vodi do anaerobnih uvjeta. Sirovine s različitim kapacitetom zadržavanja vlage se mogu kombinirati za postizanje idealnog sadržaja vlage. Materijali koji sadrže ugljik poput novina i nusproizvoda drveta poput piljevine se često koriste kao strukturni materijal (engl. bulking agent) (Cooperband, 2000).

Za aerobno kompostiranje potrebno je minimalno 5% kisika (slika 3). Kako raste mikrobna aktivnost u kompostnoj hrpi, veća je potrošnja kisika. Ukoliko se ne nadomjesti razina kisika, kompostiranje se odvija u anaerobnim uvjetima, što obično rezultira neugodnim mirisom. Bakterije u procesu kompostiranja preferiraju pH u rasponu 6,0-7,5, a funge 5,5-8,0. Za kompostiranje je važna veličina čestica organskog otpada zbog aktivnosti mikroorganizama i protoka zraka u kompostnoj hrpi. Manje čestice imaju veću površinu prema jedinici volumena, pa mikroorganizmi imaju veći pristup supstratu. Stoga, usitnjavanje sirovine za kompostiranje može ubrzati proces kompostiranja. Ipak, ukoliko su čestice premale, protok zraka (i

dostupnost kisika) unutar kompostne hrpe će biti ograničen, te rezultira anaerobnim uvjetima. Veličina i oblik kompostne hrpe su važni za temperaturu i sadržaj kisika. Za kompostnu hrpu minimalni potreban volumen da se zagrije i ostane topla je oko 0,8 m³. Idealna visina kompostne hrpe ne bi trebala biti veća od 1,5-1,8 m (Cooperband, 2000).

Omjer C/N određuje hoće li se dogoditi ukupna mineralizacija ili imobilizacija dušika. Mineralizacija je konverzija organskog dušika u mineralne oblike (tj. amonijak i nitrat); imobilizacija je inkorporacija dušika u mikrobnu biomasu. Kao općenito pravilo, ako je omjer C/N veći od 20, mikroorganizmi će imobilizirati dušik u svoju biomasu. Ako je C/N omjer niži od 20, dušik se može izgubiti u atmosferi kao plin amonijak, uzrokujući neugodan miris (slika 3). Općenito, zeleni materijali imaju niži omjer C/N od drvenastih materijala ili uvelog lišća, a životinjski otpad je bogatiji dušikom nego biljni otpad. Složenost ugljikovih spojeva može također utjecati na brzinu razgradnje organskih otpada. Lakoća kojom se razgrađuju spojevi općenito slijedi niz: ugljikohidrati > hemiceluloza > celuloza = hitin > lignin. Otpad voća i povrća se lako razgrađuje jer sadrži uglavnom šećere i škrob. Suprotno tome, lišće, stabljike, ljuske oraha, kora, grane i grančice se sporije razgrađuju jer sadrže celulozu, hemicelulozu i lignin (Cooperband, 2000).

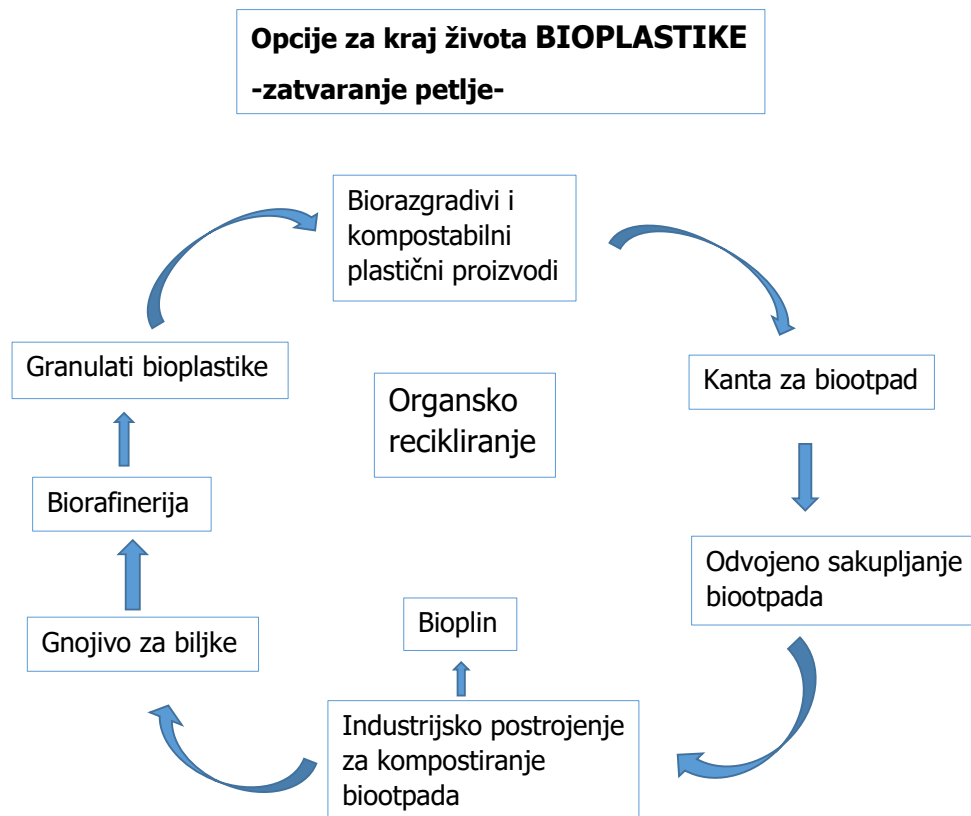
2.4. Kompostiranje bioplastike

U Europi se jednokratna plastična pakiranja i lignocelulozni materijali smatraju biorazgradivi i kompostabilni kada zadovoljavaju kriterije Europskog standarda EN 13432 „Zahtjevi za povratnu ambalažu kroz kompostiranje i biorazgradnju – Sheme testa i evaluacijski kriteriji za konačno prihvaćanje pakiranja“. Slične zahtjeve za nepakirajuće plastične materijale je odredio Europski standard EN 14995, koji definira karakteristike koje materijal mora imati da bi se smatrao kompostabilnim, da može biti recikliran preko organske obnove (kompostiranje i anaerobna razgradnja) (slika 4) (Ciriminna i Pagliaro, 2020).

EN 13432 zahtijeva testiranje slijedećih karakteristika u laboratoriju:

- (i) Raspadanje, fragmentaciju i gubitak vidljivosti u konačnom kompostu – mjeri se u testu pilot kompostiranja u kojem se uzorci ispitivanih materijala kompostiraju s biootpadom tijekom 3 mjeseca. Nakon toga, masa ostataka ispitivanih materijala treba čini manje od 10% originalne mase.

- (ii) Biorazgradivost, sposobnost kompostabilnog materijala da se konvertira do ugljikovog dioksida pod djelovanjem mikroorganizama. Standard sadrži obavezni prag od najmanje 90% biorazgradnje koja se mora postići tijekom manje od 6 mjeseci.
- (iii) Odsutnost negativnih učinaka na proces kompostiranja.
- (iv) Količina teških metala mora biti manja od maksimalne vrijednosti, a konačan kompost ne smije imati negativan učinak (bez smanjenja agronomske vrijednosti i bez ekotoksikološkog učinka na rast biljaka). Plastika koja je certificirana prema EN 13432 se može označiti sa logom „Sadnice“ (slika 5) (Ciriminna i Pagliaro, 2020).



Slika 4. Recikliranje biorazgradivih i kompostabilnih plastičnih proizvoda proizvodi kompost (vrijedno gnojivo) i bioplin. Kompost se koristi za poboljšanje rasta biljaka nakon čega se procesima zelene kemije u biorafineriji konvertiraju šećeri biljnog porijekla ili terpeni u novu bioplastiku (Ciriminna i Pagliaro, 2020)



kompostabilno

Slika 5. Oznaka „Sadnice“ za kompostabilnost (Ciriminna i Pagliaro, 2020)

Certificirana, kompostabilna plastika, uključujući PLA predmete, se šalje u industrijsko postrojenje za kompostiranje kao organski otpad. PLA, biorazgradivi i kompostabilan materijal, je vrlo svestran materijal i odlična zamjena za polistirene i polipropilene u zahtjevanim primjenama (Ciriminna i Pagliaro, 2020). Primjerice, pokazano je da prilikom razgradnje PLA ploča u uvjetima postrojenja za kompostiranje nakon 8 dana pri relativno visokoj temperaturi i vlazi (50-60 °C i 60%), ploče su postale krhke i počele su se raspadati na manje dijelove (Rudeekit i sur., 2008). Uobičajena temperatura u postrojenju za kompostiranje je viša od temperature staklenog prijelaza PLA, što omogućava prodiranje molekula vode kroz neravnomjerne lance polimera, što omogućava reakcije hidrolize (Ciriminna i Pagliaro, 2020). Čak i u kućanstvu, PLA, koja nije kompostabilna kod kuće, kada se stopi s polikaprolaktonom postaje kompostabilna kod kuće (Narancic i sur., 2018). Drugim riječima, proizvođači bioplastike mogu proizvesti smjese plastike na bazi PLA koje se mogu kompostirati kod kuće ili u industriji, manje ili više brzo biorazgradiva, ovisno o upotrebi komercijalnih predmeta od bioplastike. Kao rezultat, kompostabilno stolno posuđe i pribor za jelo načinjeni od PLA ili PHA, primjerice na velikim događajima, kao i u restoranima, mogu se skupa odlagati s otpacima hrane u jednom kompostabilnom toku otpada. Otpad, pak, će se konvertirati u kompost/zemlju visoke kvalitete kao gnojivo i vrijedan bioplin prema principima kružne ekonomije. Kompostiranje se odvija u istom postrojenju za kompostiranje, sveprisutno primjerice u Italiji ili u Njemačkoj, gdje se hrana i drugi organski otpad podvrgava konverziji u kompost i bioplin (Ciriminna i Pagliaro, 2020).

Song i sur. (2009) su karakterizirali doseg biorazgradnje različitih biorazgradivih ili potencijalno biorazgradivih materijala za pakiranje tijekom simuliranog kompostiranja kod kuće. Cilj im je bio ustanoviti hoće li potencijalni biorazgradivi materijali za pakiranje pokazati odgovarajuću

razinu biorazgradnje kada se izlože „tipičnim“ uvjetima kompostiranja kod kuće (netermofilnim) skupa sa zelenim vrtnim otpadom tijekom 24 tjedna između studenog i svibnja na jugoistoku Ujedinjenog Kraljevstva. Kao kontrolne kompostere su postavili kompostere bez biorazgradivih materijala za pakiranje. Preokretanje komposta je bilo jednom mjesečno. Vizualna procjena je pokazala da se potpuno raspadanje i inkorporacija pladnjeva od škroba u kompostni matriks dogodio nakon 90 dana kompostiranja. Materijal papirnati tanjuri se također u velikoj mjeri razlomio tijekom perioda kompostiranja, iako je bilo moguće razlikovati elemente originalnog materijala tanjura nakon 180 dana, unatoč tome što su bili značajno obezbojeni i nisu imali strukturalni integritet. PLA polimer nije pokazao vizualni dokaz mikrobne razgradnje nakon 180 dana, iako su se neki fragmenti razlomili s pladnjeva. To nisu smatrali da je razgrađeno kao rezultat biorazgradnje nego su pripisali uznemiravanju kompostera i mehaničkoj šteti tijekom dohvaćanja uzoraka. Tijekom 90 dana izlaganja, mogle su se razlikovati tri skupine materijala:

- (i) Oni koji su se brzo razgrađivali (polimeri na bazi škroba i biljna vlakna na bazi srebrne trave) su pokazali gubitak mase oko 80%
- (ii) Oni koji su se razgrađivali srednjom brzinom (papir na bazi drvenih vlakana i vlakna kokosa) s gubitkom mase oko 40%
- (iii) Oni koji su se sporo razgrađivali (PLA, PP s aditivima i škrob/PCL) sa zanemarivim gubitkom mase <5%.

Ova razlika u tri skupine je zatim održavana do kraja pokusa 180. dan. Oni koji su se brzo razgrađivali su izgubili oko 90% mase i postali su vizualno neprepoznatljivi u odnosu na zapečaćene pakete uzorka biorazgradivog materijala; oni koji su se razgrađivali srednjom brzinom izgubili su oko 50% mase i ostali su prepoznatljivi prilikom pomnog pogleda. Oni koji su se sporo razgrađivali su izgubili manje od 5% mase i ostali su jasno prepoznatljivi. Rezultati sadržaja vlage su pokazali da oni koji su se razgrađivali brzo i srednjom brzinom su brzo apsorbirali vlagu tijekom procesa kompostiranja, 100-300% za škrobne i vlaknaste materijale tijekom 30-180-dnevnog perioda. Skupina onih koji su se sporo razgrađivali su pokazali nisku razinu apsorpcije vlage sa škrob/PCL, PP/škrob i PLA ispod 10% i PP/modifikator ispod 1%. Ovo istraživanje je pokazalo da su biorazgradivi materijali za pakiranje pokazali široki raspon svojstava biorazgradnje u simuliranom sustavu kompostiranja kod kuće koje je provedeno u netermofilnim uvjetima (režim u kojem su dominirali mezofilni mikroorganizmi). Jasno je da su mezofilni uvjeti kod kućnog kompostiranja manje pogodni za biorazgradnju nego oni koji su specificirani standardima. Primjerice, sustav kućnog kompostiranja korišten u ovom radu je radio u temperaturnom rasponu 5-18 °C a ne u rasponu 20-30 °C koji je određen standardom

kućnog kompostiranja. Bioplastika koja se brzo razgrađivala, bazirana na visokoj razini škroba i kompozita vlakna trave/škroba, su bili brzo biorazgrađeni u sustavu kućnog kompostiranja. Materijali koji su se razgrađivali srednjom brzinom bazirani na vlaknima od drveta ili kokosa su pokazali gubitak mase oko 50% tijekom perioda kompostiranja. Lako fragmentabilna priroda preostalog materijala na kraju 180-dnevnog perioda je omogućila materijalima koji su se razgrađivali srednjom brzinom da budu brzo inkorporirani u matriks komposta te su autori zaključili da bi materijali koji se razgrađuju srednjom brzinom bili prihvatljivi u terminima raspadanja. Doseg biorazgradnje tih materijala nije uspio zadovoljiti > 90% zahtjeva unutar 180 dana BS EN 13432. Oni koji se sporo razgrađuju (primjerice kombinacija škrob/biorazgradivi poliestar formulacija i PLA), uključujući polimere bioplastike koji imaju certifikat da su kompostabilni u EN 13432 uvjetima, su pokazali ili nikakvu ili vrlo nisku razinu biorazgradnje i fragmentacije tijekom perioda kompostiranja (Song i sur., 2009). Iako se veća razgradnja može postići tijekom dužeg perioda (produljenje do 360 dana), povišena temperatura oko 60 °C se pokazala kao ključan čimbenik, što omogućuje indukciju biorazgradnje polimera poput PLA (Agarwal i sur., 1998; Scott i Wiles, 2001; Tokiwa i Jarerat, 2004). Takve temperature jasno nedostaju u sustavu kompostiranja kod kuće. Test germinacije je pokazao da je kompost dobiven iz zelenog otpada koji je sadržavao oko 6% mase u kompostnoj mješavini škrobne ili papirne pladnjeve daje medij za rast koji rezultira dobrom germinacijom sjemena i razvojem sadnica. Iako su slični rezultati također postignuti s kompostom koji je inkorporiran s nebiorazgradivim PLA materijalom, kompost s PLA pladnjevima nije zadovoljio zahtjeve raspadanja koje je postavilo kućno kompostiranje jer su PLA pladnjevi preostali skoro netaknuti. Ovo istraživanje pokazuje da se nekoliko biorazgradivih materijala za pakiranje može kompostirati kod kuće i postići kompost koji je odgovarajući za rast biljaka. Ta sposobnost će omogućiti takvim materijalima da se odlažu u dobro vođenim sustavima kompostiranja kod kuće i rezultirati značajnom rasterećenju tokova gradskog otpada. Ipak, brojni materijali za pakiranje koji se inače dobro biorazgrađuju u industrijskim, termofilnim sustavima za kompostiranje nisu se uspjeli odgovarajuće biorazgraditi u okolišu kućnog kompostiranja koji radi pri niskoj temperaturi, odnosno mezofilnim uvjetima. Na praktičnoj razini, ovi rezultati sugeriraju da je važno jasno razlikovati materijale biorazgradivog pakiranja koji se mogu biorazgraditi u ambijentalnim, mezofilnim uvjetima, tipičnim za Ujedinjeno Kraljevstvo u sustavu za kompostiranje kod kuće od onih koji se potpuno biorazgrade u termofilno-mezofilnim (55-65 °C) uvjetima u sustavu industrijskog kompostiranja (Song i sur., 2009).

Markowicz i Symańska-Pulikowska (2019) su proveli istraživanje u kojem su ispitali mogućnost kompostiranja odabrane bioplastike (vrećice za kupovanje, vrećice za odlaganje otpada) skupa s organskim otpadom u stvarnim uvjetima u industrijskom postrojenju za kompostiranje. Proučavali su analizu promjena u kemijskom sastavu testiranih pakiranja, odabir komponenata koji najbolje karakteriziraju sastav, preliminarnu procjenu mogućnosti formiranja fizikalnih komponenata (mikroplastika) tijekom kompostiranja. Mikroplastika su male čestice polimera veličine 1 μm -5 mm, a čestice manje od 1 μm spadaju u nanoplastiku (Frias i Nash, 2019). Također, proveli su procjenu mogućnosti korištenja ultraljubičastog zračenja za inicijaciju procesa okso-biorazgradnje plastike tijekom pohrane otpada prije punjenja bioreaktora (Markowicz i Symańska-Pulikowska, 2019). Preliminarno istraživanja odabranih 10 pakiranja je pokazalo da se većina kompostiranih uzoraka biorazgradive i okso-biorazgradive plastike nije razgradilo ili su se samo djelomično fragmentirali (Markowicz i sur., 2019). Zato su u ovom istraživanju proširili pokuse na 12 uzoraka. Proizvođači su sve uzorke karakterizirali kao razgradive u procesu kompostiranja, biorazgradive, okso-biorazgradive, ili namijenjene za organski otpad. Da bi započeli proces razgradnje okso-biorazgradive plastike, izložili su uzorke ultraljubičastoj lampi od 36 W. Tri serije uzoraka su kompostirane. Bioreaktori u industrijskom postrojenju za kompostiranje su punjeni uzorcima i otpadom. Nisu zabilježili značajan učinak ultraljubičastog zračenja na stupanj razgradnje i na sastav okso-biorazgradive plastike. Njihovi rezultati su pokazali da se odvijaju višesmjernje promjene u sadržaju makro- i mikroelemenata tijekom kompostiranja i oni bi mogli biti izvor kontaminacije proizvedenog gnojiva. Kontaminanti u obliku mikroplastike također mogu dospjeti u okoliš, što predstavlja prijatnu brojnim elementima okoliša, uključujući životinje i ljude (Markowicz i Symańska-Pulikowska, 2019).

Adamcová i sur. (2019) su proveli istraživanje o kompostiranju odabranih polimernih materijala u laboratorijskim uvjetima i u kućnom kompostiranju. Odabrani polimerni materijali su kupljeni u trgovinama u Češkoj Republici. Koristili su četiri vrste plastičnih vrećica i celulozni filter papir kao pozitivnu kontrolu. Tri uzorka vrećica je proizvođač označio kao kompostabilne, a četvrti je bila plastična vrećica napravljena od HDPE pomiješana s potpuno razgradivim plastičnim aditivom, koju je proizvođač označio kao 100% biorazgradiv. Test biorazgradnje u laboratorijskim uvjetima je proveden na način da su uzorci pomiješani sa čvrstim biorazgradivim sintetskim materijalom i podvrgnuti aerobnoj razgradnji. Pokus je vođen tijekom 12 tjedana pri kontroliranoj temperaturi 58 °C. Tijekom pokusa, sadržaj posuda je redovito ručno miješan i aeriran. Sintetski biorazgradivi materijal se sastojao od komposta, piljevine, biorazgradivog gradskog otpada i glukoze. Kompostiranje kod kuće je provedeno u

drvenim komposterima, tijekom 12 mjeseci. Polimerni uzorci koji su imali certifikat da su kompostabilni su se razgradili u laboratorijskom uvjetima, međutim u stvarnim uvjetima kompostiranja su postigli nisku razinu razgradnje. Polimerni uzorak koji je proizvođač okarakterizao kao 100% razgradiv nije pokazao nikakve znakove razgradnje niti u laboratorijskim niti u stvarnim uvjetima kompostiranja. Da bi testirali kvalitetu komposta napravili su test fitotoksičnosti sa *Sinapis alba* L. i *Hordeum vulgare* L. Zbog preniskog pH nisu uspjeli procijeniti učinak uzoraka na kvalitetu komposta. Nisu zabilježili germinaciju sjemena u 81% posuda. U svom radu su postigli različite ishode prilikom testiranja u laboratorijskim uvjetima i u stvarnim uvjetima kompostiranja kod kuće. Uzorak polimerni materijal, koje je proizvođač označio kao 100% razgradiv, je ostao stabilan i nije se razgradio.

3. ZAKLJUČCI

Iz ovog rada proizašli su slijedeći zaključci:

1. Plastika je dugogodišnji izazov za cijeli svijet
2. Bioplastika se ubrzano istražuje i razvija
3. Do danas su razvijene vrste bioplastike koje se komercijalno koriste i koje su zadovoljavajuća zamjena za konvencionalnu plastiku
4. Kompostiranje bioplastike je moguće, i već se provodi kao dio industrijskog kompostiranja
5. Kompostiranjem bioplastike se rasterećuje odlagalište otpada, produžuje životni vijek odlagališta otpada, smanjuje količina stakleničkih plinova i dobiva se vrijedan proizvod – kompost

4. POPIS LITERATURE

Adamcová D., Zloch J., Brtnický M., Vaverková M. D. (2019) Biodegradation/Disintegration of Selected Range of Polymers: Impact on the Compost Quality. *Journal of Polymers and the Environment* **27**: 892-899.

Agarwal M., Koelling K., Chalmes J. (1998) Characterization of the degradation of polylactic acid polymer in a solid substrate environment. *Biotechnology Progress* **14**: 517-526.

Alam O., Billah M., Yajie D. (2018a) Characteristics of plastic bags and their potential environmental hazards. *Resources, Conservation and Recycling* **132**: 121-129.

Alam O., Wang S., Lu W. (2018b) Heavy metals dispersion during thermal treatment of plastic bags and its recovery. *Journal of Environmental Management* **212**: 367-374.

ASTM International (2017) ASTM D883-17 Standard Terminology Relating to Plastics; ASTM International: Pennsylvania, PA, USA, p. 16.

Bismarck A., Aranberri-Askargorta I., Lampke T., Wielage B., Stamboulis A., Shenderovich I., Limbach H.-H. (2002) Surface characterization of flax, hemp and cellulose fibers; Surface properties and the water uptake behavior. *Polymer Composites* **23**: 872-894.

Bradney L., Wijesekara H., Palansooriya K. N., Obadamudalige N., Bolan N. S., Ok Y. S., Rinklebe J., Kim K.-H., Kirkham M. (2019) Particulate plastics as a vector for toxic trace-element uptake by aquatic and terrestrial organisms and human health risk. *Environment International* **131**: 104937.

Browne M. A., Crump P., Niven S. J., Teuten E., Tonkin A., Galloway T., Thompson R. (2011) Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks. *Environmental Science and Technology* **45**: 9175-9179.

Changwichan K., Silalertruksa T., Gheewala S. H. (2018) Eco-Efficiency Assessment of Bioplastics Production Systems and End-of-Life Options. *Sustainability* **10**: 952.

Chen G. Q., Patel M. K. (2012) Plastics derived from biological sources: Present and future: A technical and environmental review. *Chemical Reviews* **112**: 2082-2099.

Christopher B. (2018) Biopolymers: Biodegradable Alternatives to Traditional Plastics. U Green Chemistry: An Inclusive Approach; Béla T., Timothy D., Ur.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp. 753-770.

Ciriminna R., Pagliaro M. (2020) Biodegradable and Compostable Plastics: A Critical Perspective on the Dawn of their Global Adoption. *ChemistryOpen*. **9**: 8-13.

Contat-Rodrigo L. (2013) Thermal characterization of the oxo-degradation of polypropylene containing a pro-oxidant/pro-degradant additive. *Polymer Degradation and Stability* **98**: 2117-2124.

Cooperband L. R. (2000) Composting: Art and Science of Organic Waste Conversion to a Valuable Soil Resource. *Laboratory Medicine* **31**: 283-290.

Curran M. A. (2000) Biobased materials. In Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology; John Wiley & Sons Inc.: Hoboken, NJ, USA.

Da Luz J. M. R., Paes S. A., Nunes M. D., Silva M. D. C. S. D., Kasuya M. C. M. (2013) Degradation of Oxo-Biodegradable Plastic by *Pleurotus ostreatus*. *PLOS ONE* **8**: 69386.

Derraik J. G. (2002) The pollution of the marine environment by plastic debris: A review. *Marine Pollution Bulletin* **44**: 842-852.

European-Bioplastics. Bioplastics Market Data. Dostupno online: <http://www.european-bioplastics.org/market/> (pristupljeno 2 siječnja 2018).

Frias J., Nash R. (2019) Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin* **138**: 145-147.

Jamaluddin N., Razaina M. T., Ishak Z. A. M. (2016) Mechanical and Morphology Behaviours of Polybutylene (succinate)/Thermoplastic Polyurethaneblend. *Procedia Chemistry* **19**: 426-432.

Jolanta W.-K., Tomasz R., Gabriel B., Mieczysław S., Tomasz K., Vijay K. T. (2018) Recent progress in biodegradable polymers and nanocomposite-based packaging materials for sustainable environment. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization* **23**: 383-395.

Jundong W., Jinping P., Zhi T., Yifan G., Zhiwei Z., Qiuqiang C., Liqi C. (2017) Microplastics in the surface sediments from the Beijiang River littoral zone: Composition, abundance, surface textures and interaction with heavy metals. *Chemosphere* **171**: 248-258.

Kaisangsri N., Kerdchoechuen O., Laohakunjit N. (2012) Biodegradable foam tray from cassava starch blended with natural fiber and chitosan. *Industrial Crops and Products* **37**: 542-545.

- Lv S., Zhang Y., Tan H. (2019) Thermal and thermo-oxidative degradation kinetics and characteristics of poly (lactic acid) and its composites. *Waste Management* **87**: 335-344.
- Markowicz F., Król G., Szymańska-Pulikowska A. (2019) Biodegradable Package – Innovative Purpose or Source of the Problem. *Journal of Ecological Engineering* **20**: 228-237.
- Markowicz F., Szymańska-Pulikowska A. (2019) Analysis of the Possibility of Environmental Pollution by Composted Biodegradable and Oxo-Biodegradable Plastics. *Geosciences* **9**: 460.
- Mitchell A. (2015) Thinking without the 'circle': Marine plastic and global ethics. *Political Geography* **47**: 77-85.
- Munier B., Bendell L. I. (2018) Macro and micro plastics sorb and desorb metals and act as a point source of trace metals to coastal ecosystems. *PLOS ONE* **13**: e0191759.
- Narancic T., Verstichel S., Reddy Chaganti S., Morales-Gamez L., Kenny S. T., De Wilde B., Babu Padamati R., O'Connor K. E. (2018) Biodegradable Plastic Blends Create New Possibilities for End-of-Life Management of Plastics but They Are Not a Panacea for Plastic Pollution. *Environmental Science and Technology* **52**: 10441-10452.
- Narayan R. (2006a) Biobased and biodegradable polymer materials: rationale, drivers, and technology exemplars. *American Chemical Society Symposium Series* 939, p. 282.
- Narayan R. (2006b) Rationale, drivers, standards, and technology for biobased materials. U Renewable resources and renewable energy (Ur. Graziani M., Fornasiero P.). Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Pivnenko K., Eriksen M., Martín-Fernández J., Eriksson E., Astrup T. F. (2016) Recycling of plastic waste: Presence of phthalates in plastics from households and industry. *Waste Management* **54**: 44-52.
- Pollution Control Department (PCD) (2017) The Draft of the Integrated Plastic Waste Management Plan (2017–2021); Pollution Control Department: Bangkok, Thailand.
- Quecholac-Piña X., del Consuelo Hernández-Berriel M., del Consuelo Mañón-Salas M., Espinosa-Valdemar R. M., Vázquez-Morillas A. (2020) Degradation of Plastics under Anaerobic Conditions: A Short Review. *Polymers* **12**: 109.
- Rochman C. M., Browne M. A., Halpern B. S., Hentschel B. T., Hoh E., Karapanagioti H. K., Rios-Mendoza L. M., Takada H., Teh S., Thompson R. C. (2013) Classify plastic waste as hazardous. *Nature* **494**: 169-171.

- Rochman C. M., Hentschel B. T., Teh S. J. (2014) Long-Term Sorption of Metals Is Similar among Plastic Types: Implications for Plastic Debris in Aquatic Environments. *PLOS ONE* **9**: e85433.
- Rudeekit Y., Numnoi J., Tajan M., Chaiwutthinan P., Leejarkpai T. (2008) Determining biodegradability of polylactic acid under different environments. *Journal of Metals, Materials and Minerals* **18**: 83-87.
- Scott G., Wiles D. (2001) Programmed-life plastics from polyolefins: a new look at sustainability. *Biomacromolecules* **2**: 615-622.
- Shah A. A., Hasan F., Hameed A., Ahmed S. (2008) Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances* **26**: 246-265.
- Shen L., Worrell E., Patel M. (2010) Present and future development in plastics from biomass. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* **4**: 25-40.
- Shi X. Q., Ito H., Kikutani T. (2005) Characterization on mixed-crystal structure and properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate) biodegradable fibers. *Polymer* **46**: 11442-11450.
- Siegenthaler K. O., Künkel A., Skupin G., Yamamoto M. (2012) Ecoflex® and Ecovio®: Biodegradable, Performance-Enabling Plastics. U: *Advances in Polymer Science*; Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 91-136.
- Siracusa V. (2016) Packaging Material in the Food Industry. U: *Antimicrobial Food Packaging*; Barros-Velázquez, J., Ur.; Elsevier Academic Press: San Diego, CA, pp. 95-106.
- Siracusa V. (2019) Microbial degradation of synthetic biopolymers waste. *Polymers* **11**: 1066.
- Smith R. (2005) *Biodegradable polymers for industrial applications* Cambridge: Woodhead Publishing.
- Song J. H., Murphy R. J., Narayan R., Davies G. B. H. (2009) Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **364**: 2127-2139.
- Suwanmanee U., Varabuntoonvit V., Chaiwutthinan P., Tajan M., Mungcharoen T., Leejarkpai T. (2013) Life cycle assessment of single use thermoform boxes made from polystyrene (ps), polylactic acid, (pla), and pla/starch: Cradle to consumer gate. *The International Journal of Life Cycle Assessment* **18**: 401-417.

Tang Z., Zhang L., Huang Q., Yang Y., Nie Z., Cheng J., Yang J., Wang Y., Chai M. (2015) Contamination and risk of heavy metals in soils and sediments from a typical plastic waste recycling area in North China. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **122**: 343-351.

Tokiwa Y., Jarerat A. (2004) Biodegradation of poly(l-lactide). *Biotechnology Letters* **26**: 771-777.

Tsiropoulos I., Faaij A. P. C., Lundquist L., Schenker U., Briois J. F., Patel M. K. (2015) Life cycle impact assessment of bio-based plastics from sugarcane ethanol. *Journal of Cleaner Production* **90**: 114-127.

What Makes Green Plastics Green? Available online: <https://www.google.com.hk/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=11&ved=2ahUKEwiy43spLflAhVUMd4KHU1gDQcQFjAKegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fpdfs.semanticscholar.org%2F00f0%2Fd5de50ede924c1f1973a73eab40af466e0f7.pdf&usg=AOvVaw3Pye84bHWTIOkwFc3xHj7z> (accessed on 25 October 2019).

Yashchuk O., Portillo F., Hermida É. B. (2012) Degradation of Polyethylene Film Samples Containing Oxo-Degradable Additives. *Procedia Materials Science* **1**: 439-445.

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.

Ivan Kovač

ime i prezime studenta