

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO – MATEMATIČKI FAKULTET
BIOLOŠKI ODSJEK

BAKTERIOLOŠKA RAZGRADNJA PLASTIKE

BACTERIAL DEGRADATION OF PLASTICS

SEMINARSKI RAD

Lucija Nuskern

Preddiplomski studij Znanosti o okolišu

(Undergraduate Study of Environmental Sciences)

Mentor: doc. dr. sc. Jasna Hrenović

ZAGREB, 2010.

Popis kratica korištenih u radu

NY11 – najlon 11

PBS – poli(butilen sukcinat)

PCL – polikaprolakton

PE – polietilen

PES – poli(etilen sukcinat)

PET – polietilen tetraftalat

PHA – polihidroksialkanoati

PHB – poli(3 – hidroksibutirat)

PHBV – poli(3 – hidroksibutirat – *co* – 3 – hidroksivalerat)

PLA – polimer mliječne kiseline

SADRŽAJ

1. UVOD	3
2. BIORAZGRADIVA PLASTIKA	4
2.1. Plastike dobivene iz obnovljivih izvora.....	5
2.2. Plastike dobivene iz fosilnih izvora.....	5
2.3. Smjese polimera	6
3. BIOLOŠKA RAZGRADNJA PLASTIKE.....	8
3.1. Čimbenici koji utječu na biološku razgradivost plastike.....	10
4. BIORAZNOLIKOST BAKTERIJA KOJE RAZGRAĐUJU PLASTIKU	11
5. ZAKLJUČAK	13
6. LITERATURA	14
7. SAŽETAK	15
8. SUMMARY	15

1. UVOD

Napredak u tehnologiji i veliki rast svjetskog stanovništva doveli su do povećane potražnje za plastičnim materijalima koji se primjenjuju u svim područjima svakodnevnog života, u industriji i u poljoprivredi (Tokiwa i sur. 2009., Orhan i sur. 2004.). Plastika je naziv za niz umjetno stvorenih dugolančanih polimera koji se uglavnom dobivaju iz materijala dobivenih prilikom prerade nafte. U svijetu se proizvodi oko 140 milijuna tona sintetskih polimera godišnje, od čega se oko 30% koristi za pakiranje proizvoda kao što su hrana, lijekovi, kozmetički proizvodi, deterdženti i kemikalije, a ta potrošnja raste oko 12% godišnje. Plastični materijali su za potrebe pakiranja proizvoda zamijenili papir i druge proizvode od celuloze zbog svojih povoljnih osobina kao što su mehanička, kemijska i toplinska svojstva, te stabilnost i otpornost (Shah i sur. 2008.). Većina tih polimera je izuzetno stabilna i ne ulazi u cikluse razgradnje u biosferi, te se nakupljaju u okolišu. Zbog toga se u novije vrijeme javio veliki problem onečišćenja okoliša otpadnim plastičnim materijalima (Shimao 2001.).

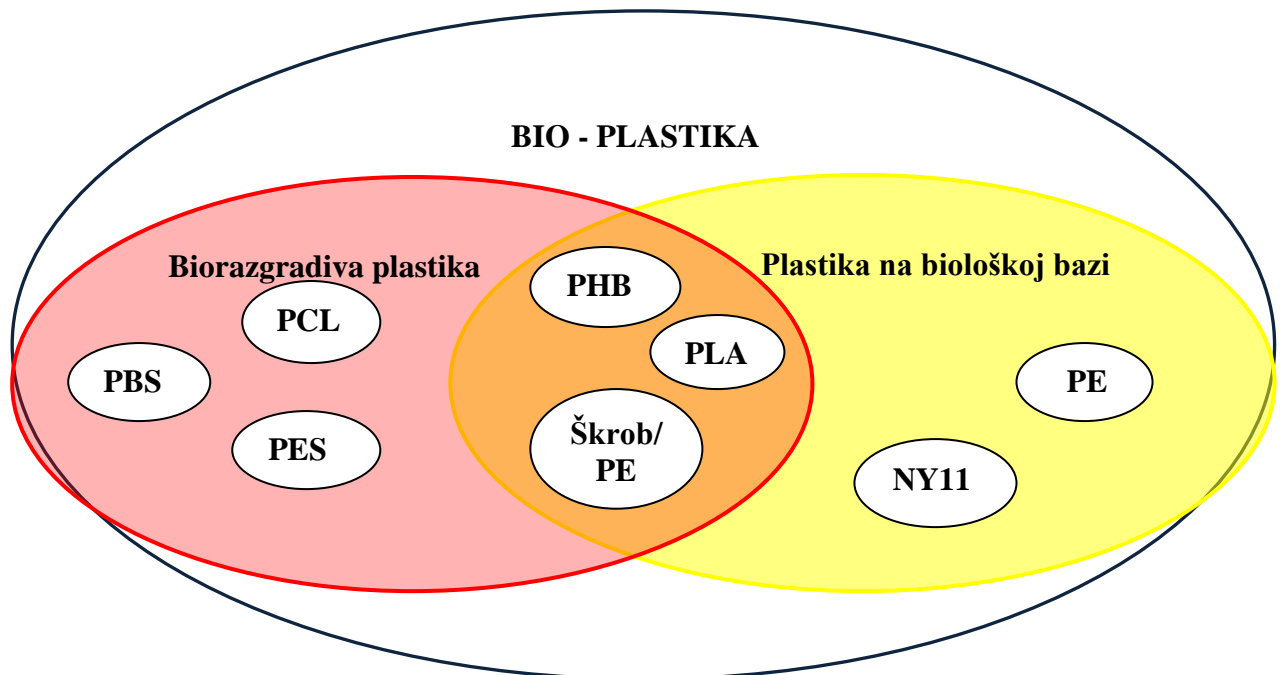
Plastični otpad se zbrinjava na odlagalištima otpada, spaljivanjem ili recikliranjem. Nepravilno zbrinuta plastika štetno utječe na biljke i životinje u prirodi (npr. morske životinje se mogu ugušiti plastičnim vrećicama) a ima i negativan estetski utjecaj na izgled gradova i šuma. Također, prilikom spaljivanja nekih vrsta plastika, primjerice PVC – a, nastaju trajna organska zagađivala kao što su furani i dioksini (Shah i sur. 2008.). Plastični otpad čini između 20 i 30 % komunalnog otpada te predstavlja veliki problem za odlagališta takvog otpada. Naime, čovječanstvo danas stvara enormne količine otpada pa smještaj i kapacitet odlagališta otpada postaje sve veći problem, posebno u gradskim područjima. Za postizanje odgovarajućeg kapaciteta odlagališta otpada trebala bi se smanjiti količina proizvedenog otpada, a onaj dio koji dolazi na odlagalište bi trebao biti razgradiv. Budući da su plastični materijali vrlo teško razgradivi, smatra se da oni trajno ostaju na odlagalištu, te tako značajno smanjuju vrijeme trajanja odlagališta otpada (Ishigaki i sur. 2004.).

Zbog svih navedenih razloga zadnjih tridesetak godina se počelo intenzivno istraživati biorazgradive polimere. Želi se postići veća i brža razgradivost postojećih polimera ili razviti alternativne polimere koji bi bili biorazgradivi, a imali sva pozitivna svojstva postojećih plastičnih materijala. (Tokiwa i sur. 2009., Shah i sur. 2008., Orhan i sur. 2004., Shimao 2001.).

Cilj ovog rada je prikazati najznačajnije vrste biorazgradive plastike i mehanizme njezine razgradnje, te prikazati biorazgradivost bakterija koje razgrađuju takvu plastiku.

2. BIORAZGRADIVA PLASTIKA

Biorazgradivu plastiku možemo svrstati u širu kategoriju bio – plastike. Bio – plastika se sastoji od biorazgradive plastike i plastike na biološkoj bazi (ona koja se proizvedena iz biomase ili obnovljivih izvora). U biorazgradivu plastiku se ubraja i plastika proizvedena iz fosilnih goriva i plastika na biološkoj bazi, ako su podložne biološkoj razgradnji. Neke plastike proizvedene na biološkoj bazi nisu podložne biološkoj razgradnji. Međuodnos biorazgradive plastike i plastike na biološkoj bazi prikazan je na Slici 1. Može se vidjeti da neke vrste plastike proizvedene na bazi nafte, kao što su polikaprolakton (PCL) i poli(butilen sukcinat) (PBS), mogu biti biorazgradive. Poli(hidroksibutirat) (PHB), polimer mliječne kiseline (PLA) i uklopine škroba su proizvedene iz biomase ili obnovljivih izvora te su stoga biorazgradive. Međutim, i polietilen (PE) i najlon 11 (NY11) mogu biti proizvedeni iz biomase ili obnovljivih izvora, ali nisu biorazgradivi (Tokiwa i sur. 2009.).



Slika 1. Bio – plastiku čine biorazgradiva plastika i plastika na biološkoj bazi (prilagođeno prema Tokiwa i sur. 2009.).

Neke od biorazgradivih plastika se proizvode iz obnovljivih izvora i zbog toga smanjuju emisiju stakleničkih plinova. Primjerice, polihidroksialkanoati i mliječna kiselina (materijali potrebni za proizvodnju PLA) se proizvode fermentacijom proizvoda agrikulture pomoću mikroorganizama. Biorazgradiva plastika se može reciklirati u korisne metabolite

(monomere i oligomere) pomoću mikroorganizama i enzima, a ti metaboliti se apsorbiraju u prirodni okoliš i na taj način povećavaju plodnost tla. Biorazgradiva plastika ima i drugih prednosti, smanjuje nakupljanje glomaznog plastičnog otpada u okolišu i smanjuje troškove upravljanja otpadom (Tokiwa i sur. 2009).

2.1. Plastike dobivene iz obnovljivih izvora

Najvažnija skupina plastika dobivenih iz obnovljivih izvora su polihidroksialkanoati (PHA). To je naziv za linearne prirodne poliestere (monomeri povezani esterskom vezom) koji nastaju bakterijskom fermentacijom šećera i lipida, a bakterijama služe kao zaliha ugljika i energije (<http://en.wikipedia.org/wiki/Polyhydroxyalkanoates>). Organizmi koji proizvode ove spojeve, mogu ih i razgrađivati, ali ne nužno ako se ti spojevi nalaze izvan stanice. Za ekstracelularnu razgradnju polihidroksialkanoata potrebni su hidrolitički enzimi esteraze, koji su sveprisutni u živom svijetu. Najpoznatiji spoj iz skupine PHA je poli(3 – hidroksibutirat) (PHB) koji je privukao pažnju znanstvenika jer se može proizvesti iz prirodnih rezervi hrane uz minimalan utjecaj na okoliš, a može biti biološki razgrađen u aerobnim i anaerobnim uvjetima bez nastanka štetnih spojeva. Proizvod razgradnje PHB je R – 3 – hidroksi - maslačna kiselina. Još jedan spoj iz skupine PHA koji se koristi za proizvodnju biorazgradive plastike je poli(3 – hidroksibutirat – *co* – 3 – hidroksivalerat) (PHBV) (Tokiwa i sur. 2009., Shah i sur. 2008., Shima 2001.).

Polimer mliječne kiseline (PLA) je također biorazgradiva plastika koja se dobiva fermentacijom škroba iz obnovljivih izvora. Dobiva se katalitičkom polimerizacijom mliječne kiseline ili polimerizacijom laktida uz otvaranje prstena u prisutnosti katalizatora. Vjeruje se da se u životinjskom i ljudskom tijelu PLA razgrađuje ne – enzimskom hidrolizom, ali su identificirani i enzimi koji ju mogu razgrađivati: proteinaza K, pronaza i bromelain (Tokiwa i sur. 2009., Shima 2001.). PLA se koristi za proizvodnju čaša, plastičnih poslužavnika i različitih spremnika, te se smatra da bi za mnoge primjene ova plastika mogla zamijeniti polistiren i PET (polietilen tetaftalat) (Shah i sur. 2008.).

2.2. Plastike dobivene iz fosilnih izvora

Od mnogo vrsta plastike koje se svrstavaju u ovu skupinu ukratko će biti opisane samo biorazgradive plastike dobivene iz fosilnih izvora koje su u najčešćoj upotrebi. Poli(butilen sukcinat) (PBS) je biorazgradiv alifatski sintetski polimer odličnih mehaničkih svojstava, sličnih polietilenu niske gustoće. Temperatura taljenja mu je visoka, 112 – 114 °C (Tokiwa i

sur. 2009.). Primjenjuje se za izradu plastičnih prekrivala za biljke u staklenicima i plastenicima, različitih ambalaža, vrećica i higijenskih proizvoda. Biološka razgradnja PBS-a počinje hidrolizom esterskih veza, pri čemu se smanjuje molekulska masa polimera i omogućuje daljnja mikrobiološka razgradnja. SK Chemicals (Koreja), vodeći proizvođač PBS-a, navodi da se u jednom mjesecu razgradi 50 % filma PBS –a debljine 40 μm (Shah i sur. 2008.). Poli(etilen sukcinat) (PES) je također kemosintetski proizveden polimer visoke temperature taljenja (103 – 106 °C), međutim njegova biološka razgradnja jako ovisi o okolišnim čimbenicima (Tokiwa i sur. 2009.).

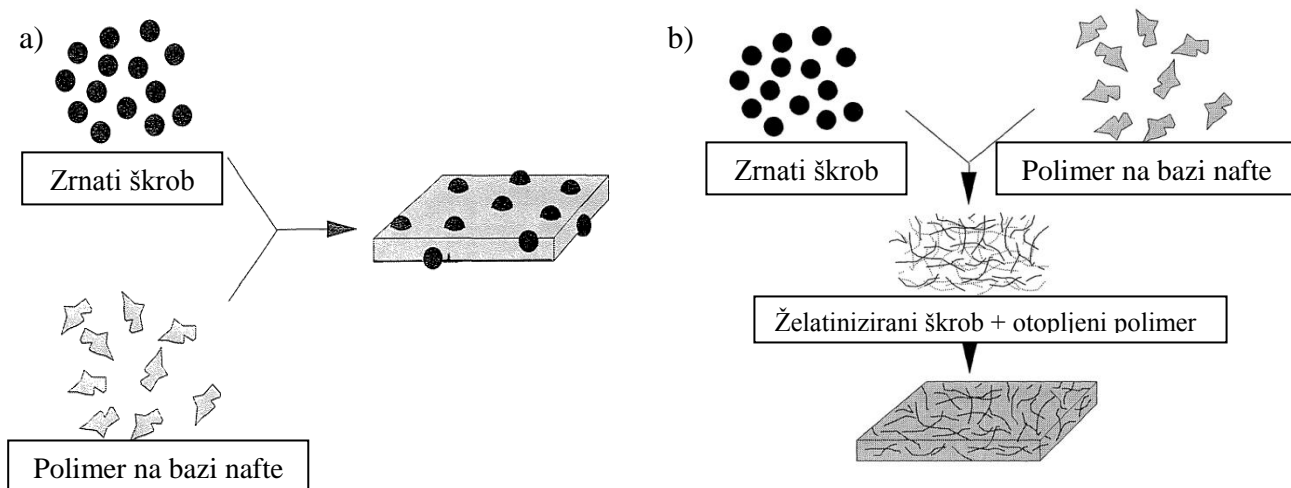
Polikaprolakton (PCL) je biorazgradivi sintetski djelomično kristalinični poliester s niskom temperaturom taljenja (60 °C). Proizvodi se polimerizacijom ε – kaprolaktona. Mikroorganizmi koji ga razgrađuju su rasprostranjeni u prirodi i biološka razgradnja ovog spoja je laka. Enzimi koji razgrađuju PCL su lipaze i esteraze (Tokiwa i sur. 2009., Shima 2001.).

2.3. Smjese polimera

Većina biorazgradivih plastika koje trenutno postoje na tržištu su skupe i zbog toga im je primjena vrlo ograničena. Kako bi se smanjili troškovi proizvodnje takve plastike osmislio se postupak miješanja polimera, kojim se omogućuje kombinacija skupog polimera sa jeftinijim, ali i brzo postizanje željenih svojstava polimera. Kako bi konačni proizvod imao odgovarajuća svojstva, polimeri od kojih se sastoji moraju se moći dobro međusobno stopiti (Tokiwa i sur. 2009.). Često se ovako miješaju dva polimera koja su različito podložna biorazgradnji, a brzina razgradnje je kontrolirana razgradnjom komponente koja se lakše biološki razgrađuje (Shah i sur. 2008.).

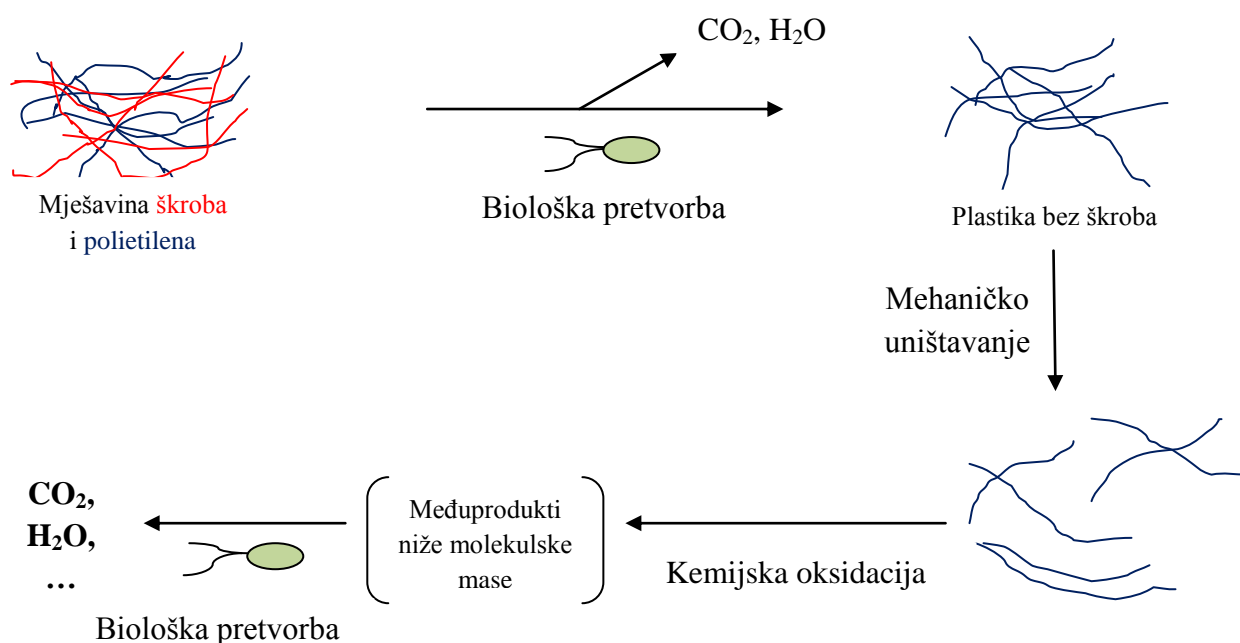
Škrob je vrlo povoljna sirovina za izradu biorazgradivih smjesa polimera jer je jeftin, dolazi iz obnovljivih izvora i dostupan je cijele godine (Tokiwa i sur. 2009.). U zadnje vrijeme se puno radi na istraživanju mješavine polietilena i škroba. Polietilen je dugolančani polimer građen od monomernih jedinica etilena i to je jedna od najčešće korištenih plastika. Problem je što je polietilen jedan od najinertnijih sintetskih polimera i smatra se da nije biološki razgradiv. Ako se biološka razgradnja i događa, ona ide u dva koraka. Prvo mora doći do abiotičke oksidacije, a tek nakon što tako nastanu manji dijelovi polimera ili se stvore nove funkcionalne skupine, dolazi do mikrobiološke razgradnje (Hrenović i sur. 2010.). Kako bi se riješio problem velikih količina inertnog polietilena koji se nakuplja u okolišu, razvijene su metode miješanja polietilena sa škrobom. Griffin je razvio postupak ugrađivanja znatog

škroba u plastičnu foliju (Slika 2. a)). Ovako proizvedena plastika sadrži 6 – 12 % škroba. Drugi postupak je razvio Otey; miješanjem želatiniziranog škroba s rastopljenom polietilenom, dobio je ravnomjerniju raspodjelu škroba u plastičnom matriksu (Slika 2. b)). Ovom tehnologijom se može dobiti plastika koja sadrži 20 – 50 % škroba (Gould i sur. 1990.).



Slika 2. Proizvodnja mješavina plastike i škroba prema Griffinu (a) i Oteyu (b) (preuzeto iz Gould i sur. 1990.)

Međutim, brojna istraživanja su pokazala da ovakve smjese polietilena i škroba nisu biorazgradive u punom smislu te riječi. Mikroorganizmi mogu razgraditi mrežu škroba u tim mješavinama, ali okosnica polietilena ostaje netaknuta i nakon dužeg vremena. Ipak, brzo uklanjanje škroba dovodi do mehaničkog slabljenja polietilenskog matriksa koji je onda podložan bržem fizičkom uništavanju (Shah i sur. 2001., Orhan i sur. 2004., Gould i sur. 1990.). No, ako se u takvu plastiku dodaju prooksidansi koji u određenim uvjetima stvaraju slobodne radikale, u polietilenskom lancu dolazi do oksidacije i promjena fizikalnih i kemijskih svojstava. Nakon takve oksidacije, može doći do mikrobiološke razgradnje i tog polietilenskog dijela smjese, te se tako postiže kvalitetnija biološka razgradnja i iz okoliša se mogu ukloniti veće količine ovog problematičnog polimera. Korištenjem mješavina škroba i polietilena se može i za 20 % smanjiti količina materijala koji puni smetlišta (Orhan i sur. 2004., Gould i sur. 1990.). Mehanizam bakteriološke razgradnje smjesa polimera prikazan je na Slici 3.

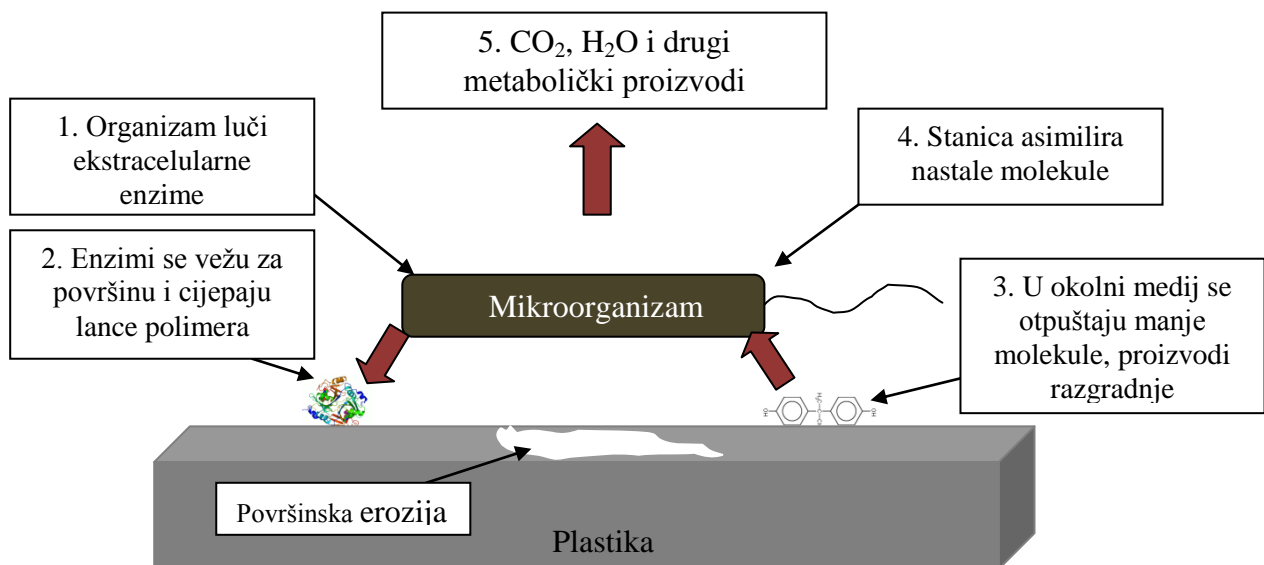


Slika 3. Mehanizam razgradnje plastičnih mješavina polietilena i škroba (prilagođeno prema Gould i sur. 1990.).

3. BIOLOŠKA RAZGRADNJA PLASTIKE

Razgradnjom plastike se smatra bilo koja fizikalna ili kemijska promjena u polimeru, a rezultat je okolišnih čimbenika kao što su svjetlost, toplina, vlaga, kemijski uvjeti i biološka aktivnost (Shah i sur. 2008., Orhan i sur. 2004.). Prilikom razgradnje dolazi do promjene svojstava polimera (smanjenje funkcionalnosti) zbog kemijskih, fizikalnih ili bioloških reakcija koje su dovele do cijepanja kemijskih veza u polimeru. Mijenjaju se mehanička, optička ili električna svojstva polimera, dolazi do pucanja, erozije, promjene boje, odvajanja faza i delaminacije polimera. Biološka razgradnja je podvrsta razgradnje, a definiramo ju kao proces kojim se organske tvari razgrađuju pomoću živih organizama. Uz nju se često spominje i pojam biološka mineralizacija, proces pretvorbe organskih tvari u minerale. Neki autori pod pojmom mineralizacija smatraju pretvorbu organskih molekula do vode, ugljikovog dioksida i metana. U biološkoj razgradnji plastike (prirodne i sintetske) najznačajniju ulogu imaju mikroorganizmi, i to bakterije i gljive (Shah i sur. 2008.). Upotreba bioloških čimbenika, kao što su gljive i bakterije, za razgradnju ili detoksikaciju zagađivala u nekom okolišu naziva se bioremedijacijom (Nester i sur. 2004.).

Polimeri su vrlo velike molekule i ne mogu slobodno difundirati kroz staničnu membranu, pa da bi polimer mogao biti biološki razgrađen on se prvo mora pretvoriti u manje fragmente, monomere ili dimere, koji se dalje razgrađuju do krajnjih produkata. Tu početnu razgradnju može izazvati niz fizikalnih faktora kao što su promjena temperature ili vlažnosti polimera, no za mikrobiološku razgradnju plastike najvažniji su enzimi. Mikroorganizmi stvaraju dva tipa enzima koji su važni za biološku razgradnju, a to su ekstracelularne i intracelularne depolimeraze. Ekstracelularni enzimi (egzoenzimi) se izlučuju izvan stanice izravno na supstrat i razgrađuju ga na manje fragmente koji su dovoljno mali da difundiraju kroz polupropusnu staničnu membranu. Taj proces se naziva depolimerizacija, a enzimi depolimeraze. Nastali oligomeri, dimeri i monomeri se u stanici razgrađuju pomoću intracelularnih enzima, sve do H_2O , CO_2 i/ili CH_4 . Općeniti mehanizam biološke razgradnje plastike prikazan je na Slici 4. Najčešći oblik depolimerizacije je hidrolitičko cijepanje (hidroliza) (Tokiwa i sur. 2009., Shah i sur. 2008.).



Slika 4. Općeniti mehanizam biološke razgradnje plastike u aerobnim uvjetima (prilagođeno prema Shah i sur. 2008.).

Biološka razgradnja plastike se odvija u aerobnim uvjetima, u sedimentu i odlagalištima otpada u anaerobnim uvjetima, a u kompostu i tlu u djelomično aerobnim a djelomično anaerobnim uvjetima. Pri aerobnoj razgradnji nastaju ugljikov dioksid i voda, a pri anaerobnoj razgradnji ugljikov dioksid, voda i metan (Shah i sur. 2008.).

U prirodi bakterije često rastu u bliskoj vezi s mnogim drugim organizmima. Aerobi i fakultativni anaerobi koriste kisik, stvarajući mikro - okoliše u kojima se nastanjuju anaerobi. Često metabolički nusproizvod jedne vrste služi kao nutrijent i izvor energije za drugu vrstu (Nester i sur. 2004.). To se događa i pri razgradnji plastičnih polimera do ugljikovog dioksida, za što je često potrebna zajednica nekoliko različitih mikroorganizama. Primjerice, jedna bakterija razlaže polimer do monomera, druga vrsta koristi te monomere i stvara još jednostavnije molekule, koje su supstrat za rast treće vrste (Shah i sur. 2008.). Očito je da su to vrlo kompleksni odnosi koje je teško reproducirati u laboratoriju pa možemo zaključiti da istraživanje biorazgradivosti plastike nije nimalo lak zadatak.

3.1. Čimbenici koji utječu na biološku razgradivost plastike

Biološka razgradivost plastike uvelike ovisi o kemijskim i fizikalnim svojstvima plastike. Neka od tih svojstava su veličina površine izložene vanjskim utjecajima, hidrofilnost i hidrofobnost površina, kemijska struktura i molekulska masa polimera, temperatura taljenja, stupanj kristaliniteta, elastičnost i dr.

Općenito vrijedi da se s povećanjem molekulske mase polimera smanjuje mogućnost njegove mikrobiološke razgradnje (Tokiwa i sur. 2009.). Naime, s porastom molekulske mase naglo se smanjuje topivost polimera, a bakterije mogu asimilirati samo otopljene supstrate koji prolaze kroz njihovu membranu (Shah i sur. 2008.). Pokazano je da su poliesteri s više bočnih lanaca manje podložni bakterijskoj asimilaciji nego oni bez bočnih lanaca. Stupanj kristaliniteta je također važan za biorazgradnju polimera jer enzimi uglavnom napadaju amorfne dijelove polimera. U tim dijelovima molekule su slabije povezane, što ih čini podložnijima za razgradnju. Što se temperature taljenja tiče, polimeri s višom temperaturom taljenja imaju manju biorazgradivost (Tokiwa i sur. 2009.). Hidrofilnost odnosno hidrofobnost površine polimera je značajna jer o njoj ovisi podložnost polimera hidrolitičkoj razgradnji. Hidrofobne plastike (kao što je PE) nisu podložne bakteriološkoj razgradnji jer ne omogućuju pristup hidrolitičkim enzimima, dok plastike koje su hidrofilne (PE polimeriziran sa škrobom) omogućuju kolonizaciju bakterija i na njihovim hidrofilnim dijelovima je moguća hidrolitička razgradnja (Orhan i sur. 2004.).

Uz kemijska i fizikalna svojstva plastičnih materijala, važnu ulogu pri (mikro)biološkoj razgradnji plastike imaju osobine samih (mikro)organizama. Vrlo je bitna rasprostranjenost i zastupljenost različitih organizama u prirodi, kao i uvjeti u kojima oni

optimalno rastu (pH, temperatura, vlažnost, količina kisika, nutrijenti itd). Kako bioraznolikost i zastupljenost mikroorganizama koji razgrađuju polimere varira od okoliša do okoliša (tlo, more, kompost, aktivni mulj i dr.), vrlo je bitno istražiti rasprostranjenost i populacije tih organizama u raznim ekosustavima (Tokiwa i sur. 2009., Shah i sur. 2008.). Također, zbog različitih uvjeta koji vladaju u različitim staništima, biorazgradivost polimera bi trebala biti procjenjivana u prirodnim okolišima u kojima se očekuje da će oni biti razgrađivani (npr. odlagališta otpada ili kompostišta) (Orhan i sur. 2008.).

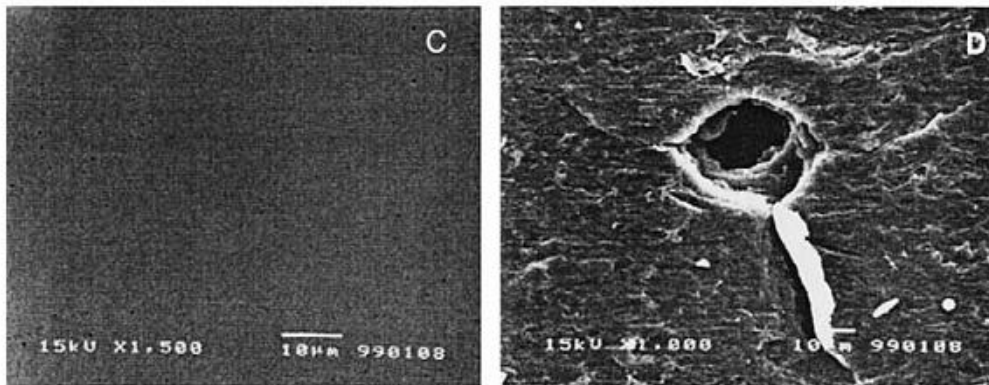
4. BIORAZNOLIKOST BAKTERIJA KOJE RAZGRADUJU PLASTIKU

Iz raznih okoliša su izolirane brojne aerobne i anaerobne bakterije koje razgrađuju polihidroksialkanoate. Procijenjeno je da 0.5 – 9.6 % mikroorganizama iz okoliša može razgrađivati PHB, i to na normalnoj ili mezofilnoj temperaturi. Razgrađivači PHB-a izolirani iz tla su vrste *Pseudomonas lemoigne*, *Comamonas* sp., *Streptomyces* sp., *Acidovorax faecalis*, i *Variovorax paradoxus*. U aktivnom i anaerobnom mulju nađene su *Alcaligenes faecalis*, *Pseudomonas* sp. i *Illyobacter delafieldi*, a vrste *Comamonas testosterone* i *Pseudomonas stutzeri* izolirane su iz mora i jezera (Tokiwa i sur. 2009.). Termofilna vrsta *Streptomyces* sp. izolirana iz tla, uz PHB može razgrađivati i PES i PBS. Pokazano je da mnogi od tih organizama luče ekstracelularne PHB depolimeraze, što pokazuje da su ti enzimi sveprisutni u okolišu. (Tokiwa i sur. 2009., Shah i sur 2008.).

Ekološka istraživanja su pokazala da mikroorganizmi koji razgrađuju PLA nisu široko rasprostranjeni u okolišu, zbog čega je PLA manje podložna biološkoj razgradnji u usporedbi s drugim razgradivim polimerima. Razgradnja PLA u tlu je polagana i potrebno je duže vrijeme da proces razgradnje započne. Identificirano je samo nekoliko bakterija koje razgrađuju PLA, a to su *Amycolatopsis* sp. i termofilna bakterija *Bacillus brevis*. Zanimljivo je da je PLA u potpunosti razgradiva u kompostištima na temperaturi od 60 °C i višoj, iako su mikrobiološki mehanizmi uključeni u tu razgradnju još nedovoljno poznati (Tokiwa i sur. 2009., Shah i sur. 2008., Shima 2001.).

Iako je pokazano da su organizmi koji razgrađuju PCL široko rasprostranjeni u aerobnim i anaerobnim okolišima, većina onih koji su identificirani su gljive, a ne bakterije. Pokazano je da novootkrivena vrsta iz roda *Clostridium* može razgrađivati PCL u anaerobnim

uvjetima (Tokiwa i sur. 2009). Izgled plastičnog PCL filma prije i nakon aerobne razgradnje u smetlištu prikazan je na Slici 5.



Slika 5. Površina PCL filma prije razgradnje (C); površina PCL filma nakon 25 – dnevne razgradnje u aerobnom smetlištu (D) (preuzeto iz Ishigaki i sur. 2004.).

Mikroorganizmi koji razgrađuju PBS su široko rasprostranjeni u okolišu, ali njihov udio u ukupnom broju mikroorganizama je niži od udjela razgrađivača PCL – a. Pokazano je da PBS razgrađuju *Amycolatopsis* sp., i nekoliko termofilnih aktinomiceta: *Microbiospora rosea*, *Excellospora japonica* i *E. viridilutea*. U usporedbi s mikroorganizmima koji razgrađuju PHB i PCL, mikroorganizmi koji razgrađuju PES imaju ograničenu rasprostranjenost u prirodi. Iz tla je izolirana jedna termofilna vrsta iz roda *Bacillus* koja može razgrađivati PES. Također, pronađeno je i nekoliko mezofilnih razgrađivača PES – a, i to u tlu i vodenim staništima, a svi su svrstani u rodove *Bacillus* i *Paenibacillus* (Tokiwa i sur. 2009.).

Iako se biorazgradivost mješavina škroba i polietilena puno istražuje, u malom broju istraživanja se mogu naći podatci o taksonomskoj pripadnosti članova mikrobiološke zajednice koja razgrađuje taj spoj. Takve zajednice nalazimo u tlu, na smetlištima i u aktivnom mulju, a čini ih velik broj raznih bakterija i gljiva (Orhan i sur. 2004., Gould i sur 1990.). Pokazano je da bakterije iz roda *Streptomyces* koje razgrađuju lignin razgrađuju mješavine škroba i polietilena koje sadrže prooksidans i 6 % škroba (Shah i sur 2008.).

5. ZAKLJUČAK

Biološki razgradiva plastika se pokazuje kao potencijalno rješenje sve većeg globalnog problema nakupljanja plastičnog otpada u okolišu. Uobičajene plastike dobivene iz fosilnih izvora su kemijski inertne, te ih smatramo biološki nerazgradivima. Neke od biorazgradivih plastika (na primjer PBS, PES, PCL) su proizvedene od materijala dobivenih preradom nafte, dok su neke (PHA, PLA) dobivene iz prirodnih izvora. Mješavine prirodnih i sintetskih polimera (kao što su škrob i PE) mnogi autori smatraju biorazgradivima, ali one to zapravo nisu. Razgradiv je samo dio od prirodnih polimera, dok je za razgradnju sintetskog dijela potreban dodatak prooksidansa koji potiče daljnju biološku razgradnju.

Biološka razgradivost polimera ovisi o fizikalnim i kemijskim svojstvima polimera, ali i o svojstvima samih mikroorganizama. Za procjenu biorazgradivosti polimera nužno je poznavati rasprostranjenost i zastupljenost mikroorganizama koji ga razgrađuju u prirodi. Često se dogodi da se neki polimer pokaže biorazgradivim u laboratorijskim uvjetima, dok se u prirodi ta razgradnja ne odvija ili se odvija puno sporije. Zato je procjenu biorazgradivosti polimera najbolje provoditi u uvjetima u kojima se očekuje da će se on razgrađivati u prirodi.

Iako se biorazgradiva plastika pokazuje sve prihvatljivijom, potrebno je još mnogo koraka do njezine masovne upotrebe. Biorazgradive plastike su vrlo skupe u odnosu na klasične plastične materijale i to je vrlo velika prepreka njihovom komercijalnom korištenju. Nakon što se odrede uvjeti u kojima je određena plastika biorazgradiva, potrebno je takve uvjete reproducirati na odlagalištima otpada i kompostištima (količina kisika, temperatura). Tako bi se postigla maksimalna razgradnja otpadne plastike, što bi donekle smanjilo problem gomilanja plastičnog otpada u okolišu.

6. LITERATURA

- Gould, J. M., Gordon, S. H., Dexter, L. B., Swanson, C. L. 1990. Biodegradation of starch – containing plastics. U: *Agricultural and Synthetic Polymers: Biodegradability and Utilization* (reprinted from ACS Symposium Series No. 433). Ed. J. Edward Glass and G. Swift, American Chemical Society, pp. 65 - 75.
- Hrenović, J., Kovač, V., Ivanković, T. 2010. Microbial resistance of high density polyethylene garbage bags. *Eurasian Journal of Biosciences*. In print.
- Ishigaki, T., Sugano, W., Nakanishi, A., Tateda, M., Ike, M., Fujita, M. 2004. The degradability of biodegradable plastics in aerobic and anaerobic waste landfill model reactors. *Chemosphere* **54**, 225 – 233.
- Nester, E. W., Anderson, D. G., Evans Roberts Jr., C., Pearsall, N. N., Nester, M. T. 2004. *Microbiology: a human perspective*, fourth edition. McGraw – Hill, 1221 Avenue of the Americas, New York, pp. 104, 797.
- Orhan, Y., Hrenović, J., Büyükgüngör, H. 2004. Biodegradation of plastic compost bags under controlled soil conditions. *Acta Chim. Slov.* **51**, 579 – 588.
- Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., Ahmed, S. 2008. Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances* **26**, 246 – 265.
- Shimao, M. 2001. Biodegradation of plastics. *Current Opinion in Biotechnology* **12**, 242 – 247.
- Tokiwa, Y., Calabia, B. P., Ugwu, C. U., Aiba, S. 2009. Biodegradability of plastics. *International Journal of Molecular Sciences* **10**, 3722 – 3742.
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Polyhydroxyalkanoates>

7. SAŽETAK

Sve veća proizvodnja plastičnih materijala dovela je do velikog problema otpadne plastike koja se zbog svoje inertnosti nagomilava u okolišu i smanjuje vijek trajanja odlagališta otpada. Da bi se riješilo taj okolišni problem, započelo se s proizvodnjom biološki razgradive plastike. U ovom radu dan je pregled najčešće korištenih biorazgradivih plastika, kako onih proizvedenih iz fosilnih izvora, tako i onih proizvedenih iz prirodnih izvora. Prikazan je pregled osnovnih mehanizama biološke razgradnje kao i uvjeti u kojima se ona odvija, te su definirani čimbenici koji utječu na tu razgradnju. Također, prikazan je pregled bakterijskih vrsta koje su do sada identificirane kao razgrađivači predstavljenih vrsta plastike. Na kraju, navedene su neke prepreke koje treba prevladati da bi široka upotreba biorazgradive plastike postala moguća, čime bi se riješio problem plastičnog otpada.

8. SUMMARY

Increasing production of plastic materials has led to big problem of waste plastics which, due to their chemical inertness, accumulate in environment and significantly decrease lifetime of waste landfills. To solve that environmental problem biodegradable plastics have been developed. This paper gives overview of the most common biodegradable plastics, the ones produced from fossil resources as well as the ones produced from renewable resources. Basic mechanisms and environments of biological degradation are clarified, and factors affecting biodegradability are defined. It gives an overview of bacterial species indentified up to now as degraders of enumerated plastics. In the end, it specifies some obstacles that need to be conquered to enable wide use of biodegradable plastics, leading to the solution of plastic waste problem.