

Vodič za studente na temu:

BIO-POLIMERI

Vodič pripremili:

Pavle Spasojević

Vesna Panić

Sanja Savić

Katarina Antić

Maja Marković

Milica Spasojević Savković

Olga Pantić



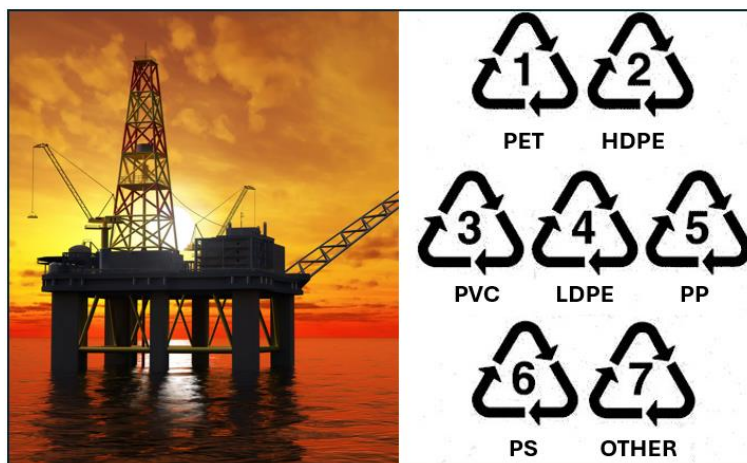


Sadržaj

1. Uvod u polimere dobijene iz bio-obnovljivih izvora	2
2. Istorijski razvoj polimera dobijenih iz bio-obnovljivih izvora	5
3. Sirovine za proizvodnju bio-polimera	6
4. Proces proizvodnje bio-polimera	9
5. Svojstva komercijalnih bio-polimera i njihova primena	11
5.1. Polimlečna kiselina	11
5.2. Polihidroksi alkanoati	14
5.3. Skrob i bio-polimeri na bazi skroba	16
5.4. Bio-polimeri na bazi celuloze	18
5.5. Bio-polimeri na bazi hitina i hitozana	21
5.6. Bio-polimeri na bazi proteina	24
6. Biodegradabilnost i ekološki uticaj bio-polimera	25
7. Ekonomski aspekti bio-polimera	27
8. Regulativa i standardi za bio-polimere	28
9. Budućnost i perspektiva u oblasti bio-polimera	30
10. Literatura	31
Zahvalnica	39

1. Uvod u polimere dobijene iz bio-obnovljivih izvora

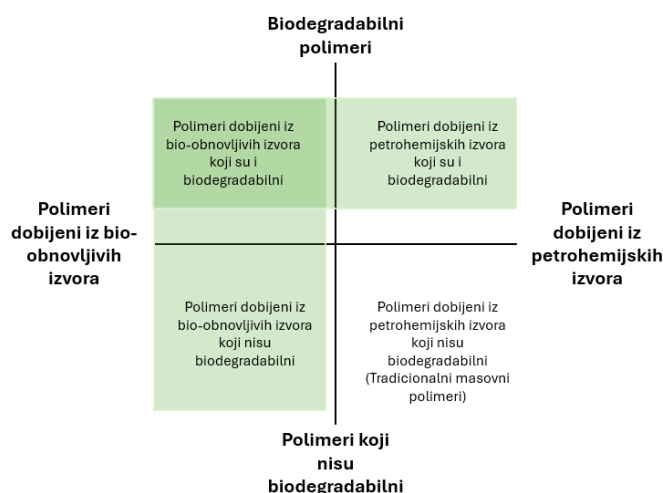
Polimeri dobijeni iz bio-obnovljivih izvora predstavljaju kategoriju materijala koji igraju ključnu ulogu u smanjenju negativnog uticaja ljudske aktivnosti na životnu sredinu. Tradicionalni masovni polimeri kao što su: polietilena (PE), polipropilena (PP), polivinil hlorid (PVC), polistiren (PS), polietilen tereftalat (PET), komercijalno se dobijaju koristeći sirovine petrohemijske industrije, i njihova masovna proizvodnja doprinosi zagađenju i klimatskim promenama (Narayan, 2001). Petrohemijske sirovine koje se koriste za njihovo dobijanje, čini tradicionalne polimere izuzetno dugotrajnim, povoljnim i samim tim veoma prisutnim u našoj svakodnevnicu. Međutim, prethodno pomenute karakteristike čine ih i problematičnim za zbrinjavanje nakon upotrebe. Plastični otpad je postao globalni ekološki problem, sa ogromnim količinama plastike koje završavaju u okeanima i deponijama, gde mogu ostati stotinama godina (Barnes et al., 2009). Upotreba polimera dobijenih iz bio-obnovljivih izvora predstavlja rešenje koje može smanjiti ovaj problem (Tokiwa et al., 2009).



Slika 1. Piktogrami različitih masovnih polimera koji se dobijaju iz sirovina petrohemijske industrije.

Polimeri dobijeni iz bio-obnovljivih izvora, poznati i kao bio-polimeri, proizvode se koristeći sirovine se smatraju obnovljivim. U ove sirovine spadaju biljni i životinjski materijali, kao i metabolički proizvodi određenih mikroorganizama, upotrebom ovih sirovina se smanjuje zavisnost od nafte i drugih proizvoda petrohemijske industrije (Stevens, 2002). Postoje različiti procesi kojima se dobijaju polazne sirovine za dobijanje polimera iz bio-obnovljivih izvora u koje spadaju fermentacija, ekstrakcija i hemijska modifikacija prethodno pomenutih obnovljivih sirovina, čime se određenim reakcijama dobijaju različite vrste bio-polimera sa specifičnim svojstvima koja odgovaraju različitim primenama (Aeschelmann & Carus, 2015). O ovim proizvodnim procesima će biti više reči u okviru narednih poglavlja.

Bio-polimeri nisu samo održiviji u odnosu na tradicionalne polimerne materijale, već često poseduju i biodegradabilna svojstva, što znači da se mogu razgraditi u prirodi bez štetnih efekata po životnu sredinu (Vert et al., 2012). Takođe, bio-polimeri mogu smanjiti emisiju ugljen dioksida, koji spada u gasove koji doprinose efektu staklene bašte, jer tokom životnog ciklusa biljaka za rast upravo koriste ugljen dioksid iz atmosfere. Sa druge strane, treba imati u vidu da prekomerna proizvodnja sirovina za bio-polimere može imati i negativne efekte na životnu sredinu sa aspekta smanjenja poljoprivrednog zemljišta (Koller & Salerno, 2016). Važno je napomenuti nisu nužno svi bio-polimeri biodegradabilni. Neki se mogu proizvesti koristeći bio-obnovljive sirovine a da nisu biorazgradivi, dok neki koji poseduju biodegradabilna svojstva ne moraju biti proizvedena koristeći bio-obnovljive sirovine (Chen & Patel, 2012). Takođe, samo svojstvo biodegradabilnosti nije poželjno u svim primenama stoga je veoma bitno razmatrati čitav životni ciklus ovih materijala prilikom procene njihove održivosti (Koller & Salerno, 2016).



Slika 2. Razlika između polimera dobijenih iz bio-obnovljivih izvora i biodegradabilnih polimera.

Bez obzira na svoje ekološke prednosti, bio-polimeri često pokazuju lošije svojstva u poređenju sa petrohemijskim polimerima. Na primer, mehanička svojstva i termička stabilnost bio-polimera često nisu na istom nivou kao kod polimera iz petrohemijskih izvora kao što su polietilen (PE) i polipropilen (PP) (Narayan, 2001). Petrohemijski polimeri su poznati po svojoj izuzetnoj izdržljivosti i širokoj primeni u industriji upravo zbog svojih izuzetno stabilnih fizičkih i hemijskih svojstava (Barnes et al., 2009), tako da se prelazak na bio-obnovljive izvore u polimernoj industriji odvija postepeno.

Godišnja globalna proizvodnja polimera prelazi 360 miliona tona, od čega je samo mali procenat bio-polimera. U 2019. godini, proizvodnja bio-polimera iznosila je oko 2,11 miliona tona, što je manje od 1% ukupne proizvodnje polimera. Najveći deo plastike, preko 98%, i dalje se proizvodi iz naftnih derivata (Geyer et al., 2017). Jedan od ključnih aspekata razvoja polimera dobijenih iz bio-obnovljivih izvora je njihova ekonomska održivost. Dok su troškovi proizvodnje ovih polimera često viši od petrohemijskih alternativa, inovacije u proizvodnim procesima, kao i povećanje kapaciteta proizvodnje, doprinose smanjenju troškova. Takođe, regulative koje podržavaju održivost i smanjenje tzv. ugljeničnog otiska (engl. *carbon footprint*) dodatno podstiču razvoj tržišta polimera dobijenih iz bio-obnovljivih izvora.



Slika 3. Slikovit prikaz ugljeničnog otiska (engl. carbon footprint).

Polimeri dobijeni iz bio-obnovljivih izvora predstavljaju ključni korak ka održivoj budućnosti. Njihovo dobijanje, kao i oni sami smanjuju negativan uticaj na životnu sredinu koji imaju tradicionalni polimeri, pored toga imaju značajnu ulogu u očuvanju resursa. Sa napredovanjem tehnoloških postupaka i naučnih dostignuća, očekuje se da će bio-polimeri igrati sve veću ulogu u različitim industrijama, pružajući ekološki prihvatljive alternative tradicionalnim plastičnim materijalima (Emadian et al., 2017).

2. Istorijski razvoj polimera dobijenih iz bio-obnovljivih izvora

Razvoj polimera dobijenih iz bio-obnovljivih izvora ima dugu i fascinantnu istoriju, prvi polimeri koje je čovek koristio bili su prirodni materijali poput kaučuka, vune i celuloze. Međutim, Druga industrijska revolucija donela je sintetičke polimere izrađene od proizvoda petrohemijske industrije, čime je započeta masovna globalna proizvodnje sintetičkih polimera koji su nam danas vrlo dobro poznati (Shen et al., 2009).

Prva značajna prekretnica u razvoju bio-polimera desila se sredinom 19. veka otkrićem Celluloid™, prvi termoplastični polimer dobijen iz bio-obnovljivih izvora. Celluloid™, napravljen od nitroceluloze i kamfora, bio je revolucionaran materijal korišćen za proizvodnju predmeta poput kugli za bilijar, filmske trake i češljeva (Stevens, 2002). Nakon toga, još jedna zanimljiva prekretnica je bila početkom 20. veka u laboratorijama američke hemijske kompanije DuPont su razvijena prva sintetička vlakna poliamida poznatija pod komercijalnim nazivom najlon (Narayan, 2001). Tokom Drugog svetskog rata, proizvodnja najlona je privremeno zaustavljena jer je tada veći prioritet imala vojna industrija, i najlon se počeo koristiti na mnogim drugim poljima kao npr., zamena za svilu pri proizvodnji padobrana, proizvodnja šatora, raznih vrsta guma, itd.



Proizvodi na bazi Celluloid™-a

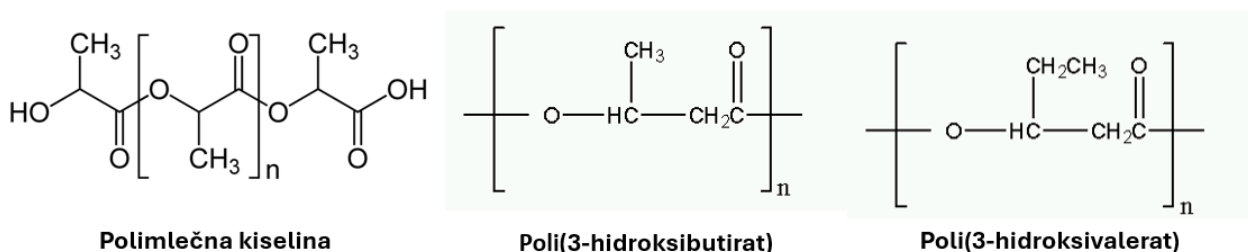


Nylon vlakna

Slika 4. Prikaz proizvoda na bazi Celluloid™ i Nylon vlakna.

Nakon Drugog svetskog rata, pažnja se sve više usmeravala na ekološke aspekte polimere i njihova biodegradabilna svojstva. Tokom 70-ih godina prošlog veka je prvi put uspešno dobijena polimlečna kiselina, kao biodegradabilni bio-polimer, koji se dobija fermentacijom šećerne trske i kukuruza. Polimlečna kiselina se upravo zbog svoje biodegradabilnosti koristi u proizvodnji ambalažnih materijala, kao i u nekim oblastima medicine (Vert et al., 2012). Kasnije, tokom 90-ih, napretkom biotehnoloških procesa dobijeni su novi bio-polimeri: poli(3-hidroksibutirat) i poli(3-hidroksivalerat). Oni se dobijaju mikrobiološkom fermentacijom različitih šećera dobijenih iz biomase, i pokazali su se pogodnim za mnoge primene upravo zbog svoje biodegradabilnosti i ponašanja koja odgovaraju termoplastičnim polimerima (Aeschelmann & Carus, 2015).

Nedavni napredak u oblasti bio-polimera je doveo do razvoja poliolefina dobijenih iz bio-obnovljivih izvora, koji pokazuju svojstva tradicionalnih poliolefina sa ekološkim pogodnostima. Na primer, bio-polietilen i bio-polipropilen, koji se dobijaju dehidratacijom bioetanola koji se dobija alkoholnom fermentacijom šećerne trske i druge biomase, privukli su pažnju zbog svog potencijala da zamene tradicionalne poliolefine (Koller & Salerno, 2016).



Slika 5. Strukturne formule nekih biodegradabilnih bio-polimera.

Na osnovu kratkog prikaza istorije razvoja polimera iz dobijenih bio-obnovljivih izvora možemo da zaključimo da postoji konstantan napredak u tehnološkim dostignućima i naučnim istraživanjima, koja su vođena potrebom za održivim rešenjima.

3. Sirovine za proizvodnju bio-polimera

Sirovine za proizvodnju bio-polimera dolaze iz različitih obnovljivih izvora. Ove sirovine mogu biti biljnog, životinjskog ili mikrobiološkog porekla, čime se značajno smanjuje zavisnost od proizvoda petrohemijske industrije i samim tim smanjuju negativan uticaj na životnu sredinu. Upravo raznovrsnost sirovina omogućava razvoj širokog spektra bio-polimera sa različitim svojstvima i primenama (Reddy et al., 2013).

Biljne sirovine su najčešće korišćene za proizvodnju bio-polimera. Kukuruz, šećernu trsku, krompir, soja su samo neke od biljnih sirovina od kojih se dobijaju monomeri dobijanje bio-polimera. Skrob koji se nalazi u kukuruzu se prevodi u mlečnu kiselinu, pomoću bakterija koje vrše mlečno-kiselinsku fermentaciju. Mlečna kiselina se može dalje prečišćavati putem različitih metoda kao što su isparavanje, ekstrakcija sa rastvaračima, ili kristalizacija kako bi se dobio čist proizvod. Nakon toga se prečišćena mlečna kiselina kondenzuje u oligomere mlečne kiseline, dobijeni oligomeri mlečne kiseline se zagrevaju u prisustvu katalizatora kako bi se formirali laktidi, ciklični diestri mlečne kiseline. Ovaj proces uključuje dehidrataciju i ciklizaciju. Laktidi su ciklična jedinjenja koja u toku polimerizacije otvaraju prsten, i kao krajnji proizvod se dobija **polimlečna kiselina**, o čijim svojstvima će biti više reči u narednom poglavlju (Auras et al., 2010). Šećerna trska se koristi kao polazna sirovina za dobijanje bioetanola, čija proizvodnja podrazumeva ekstrakciju soka iz šećerne trske, fermentaciju šećera u soku, destilaciju etanola, i pročišćavanje. Dobijeni bioetanol se dehidrira kako bi se dobio etilen, koji se zatim polimerizuje u **bio-polietilen**. Bio-polietilen ima identična svojstva kao i konvencionalni polietilen, ali sa značajno nižim ugljeničnim otiskom (Lima et al., 2012).

Sojino ulje se dobija ekstrakcijom iz sojinih zrna, mlevenjem i/ili hemijsku koristeći organske rastvarače. Sojino ulje se epoksiduje kako bi se dobilo epoksidovano sojino ulje. Epoksidovano sojino ulje reaguje sa alkoholima da bi se otvorile epoksi grupe i formirali polioli. Polioli nastaju reakcijom otvaranje prstena i pri čemu hidroksilne grupe dolaze na mesto epoksidnih grupa. Dobijeni polioli zatim reaguju sa izocijanatom, obrazujući poliuretanske veze, stvarajući **poliuretan** (Petrovic, 2008). Ovaj proces ne samo da koristi sirovine dobijene iz bio-obnovljivih izvora, već i omogućava proizvodnju poliuretana sa širokim spektrom primena, pružajući ekološki prihvatljive alternative tradicionalnim poliuretanima.

Životinjske sirovine koje se koriste za dobijanje bio-polimera uključuju proteine i lipide dobijene iz otpadnih sirovina prehrambene industrije. Kolagen, želatin, hitin i hitosan su neki od polimera dobijenih iz životinjskih izvora. **Kolagen** se ekstrahuje iz kostiju i kože životinja i koristi se za proizvodnju biordegradabilnih polimera koji se dalje primenjuju u medicini, posebno u inženjerstvu tkiva i kontrolisanom otpuštnju lekova (Parenteau-Bareil et al., 2010). **Želatin**, dobijen hidrolizom kolagena, koristi se u prehrambenoj, farmaceutskoj i kozmetičkoj industriji kao stabilizator, emulgator, u izradi kapsula, tableta i u izradi različitih biomaterijala zbog svojih biokompatibilnih i biordegradabilnih svojstava (Schrieber & Gareis, 2007). **Hitin** je drugi najzastupljeniji polisaharid u prirodi, prisutan u ljuskama rakova i insekata. Hidrolizom hitina dobija se **hitozan**, koji ima široku primenu u medicini, zbog svojih antimikrobnih i biokompatibilnih svojstava pogodnih za izradu obloga za rane i zavoja, kao i u kontrolisanom otpuštanju lekova. Zbog svojih biordegradabilnih svojstava se koriste i prehrambenoj industriji kao prehrambeni aditivi i biološki konzervansi, kao i u poljoprivrednoj industriji za dobijanje regulatora rasta i biopesticida (Kumar, 2000).



Slika 6. Prikaz biljnih i životinjskih sirovina prisutnih u proizvodnji bio-polimera.

Fermentacija je biotehnološki postupak gde **mikroorganizmi (bakterije, kvasaci, alge)** unose šećere kao hranu u svoje ćelije i tamo ih u veoma složenom sistemu biohemijskih reakcija, preko niza prelaznih jedinjenja, transformišu u krajnje proizvode koje izbacuju u okolnu sredinu. Prema ovim proizvodima, koji se postepeno nakupljaju, fermentaciji se daju odgovarajući nazivi: alkoholna (etil-alkohol), mlečna (mlečna kiselina), sirćetna (sirćetna kiselina) itd. Posredstvom ovih reakcija mogu nastati i različiti biopolimeri.

Polihidroksi alkanoati su biodegradabilni polimeri koje proizvode različite vrste bakterija aerobnom i anaerobnom fermentacijom u uslovima kada je prisutan višak ugljenikovih izvora (šećera), a manjak drugih esencijalnih nutrijenata (npr. azota ili fosfora). Koriste se za izradu ambalažnih materijala, medicinskih implantata, za kontrolisano otpuštanje lekova i za izradu poljoprivrednih folija (Chen, 2010). **Alginati** su polisaharidi koje proizvode smeđe alge. Koriste se u prehrambenoj industriji kao zgušnjivači i stabilizatori, u farmaceutskoj industriji se koriste za izradu sistema za kontrolisano otpuštanje lekova, dok u medicini se koriste za izradu hidrogelova i trodimenzionalnih mreža u okviru inženjerstva tkiva (Draget, 2009).



Slika 7. Prikaz različitih vrsta mikroorganizama koji se koriste za dobijanje bio-polimera.

Načelno, sirovine za proizvodnju bio-polimera predstavljaju održivu alternativu tradicionalnim polimerima koji se dobijaju iz petrohemijskih izvora. Bio-polimeri dobijeni koristeći biljne sirovine, životinjske sirovine ili sirovine dobijene mikrobiološkim putem omogućavaju proizvodnju raznovrsnih bio-polimera sa širokim spektrom primena. Međutim, postoje određeni nedostaci u proizvodnji bio-polimera koji potencijalno negativno utiču na održivost poljoprivredne industrije, pri čemu postoje i troškove prerade, kao i potreba za optimizacijom svojstava bio-polimera ukoliko bi oni imali komercijalnu upotrebu. Dalja istraživanja i razvoj u ovom području su neophodni za povećanje efikasnosti i ekonomičnosti proizvodnje bio-polimera (Niaounakis, 2015).



4. Proces proizvodnje bio-polimera

Proizvodnja bio-polimera je kompleksan proces koji obuhvata nekoliko faza, uključujući proizvodnju sirovina, ekstrakciju monomera, polimerizaciju i formiranje konačnih proizvoda. Proces se može razlikovati u zavisnosti od vrste bio-polimera koji se proizvodi, kao i od korišćenih sirovina. U nastavku su opisane ključne koraci u proizvodnji bio-polimera.

Prvi korak u proizvodnji bio-polimera je **priprema sirovina**. Razlikujemo biljne sirovine, životinjske sirovine ili sirovine dobijene mikrobiološkim putem, neke od kojih su opisane u okviru prethodnog poglavlja. U opštem slučaju priprema sirovina podrazumeva određeni predtremen sirovine kao što je fizički (usitnjavanje, mlevenje, seckanje), hemijski (korišćenje razblaženih kiselina, baza, amonijaka, organskih rastvarača) ili biološki tretman (Stevens, 2002). Nakon pripreme sirovina, sledeća faza je dobijanje monomera, i kao što je opisano u okviru prethodnog poglavlja to je najčešće neka vrsta **ekstrakcije** ili **mikrobiološke fermentacije**.

Polimerizacija je najznačajniji korak u proizvodnji bio-polimera, gde se monomeri povezuju u duge lance i nastaju polimera. Postoje različite vrste polimerizacije koje se zavise od načina reagovanja samih monomera:

Polikondenzacija je vrsta polimerizacije u kojoj monomeri reaguju uz oslobađanje malih molekula poput vode ili metanola. U našem slučaju je karakteristična za polimerizaciju mlečne kiseline, odnosno za dobijanje polimlečne kiseline. Polikondenzacija se može odigrati u rastvoru ili u masi, i zavisi od temperature, pritiska i prisustva katalizatora (Auras et al., 2010).

Polimerizacija otvaranjem prstena predstavlja vrstu polimerizacije koja je karakteristična za ciklične monomere. Na primer, laktid koji je cikličan monomer, polimerizuje reakcijom otvaranjem prstena uz prisustvo katalizatora, pri čemu su krajnji proizvodi polilaktidi (Södergård & Stolt, 2002).

Polimerizacija pomoću slobodnih radikala je u našem slučaju posebno zanimljiva jer se na taj način dobijaju poliolefini iz sirovina dobijenih iz bio-obnovljivih izvora kao što su bio-polietilen i bio-polipropilen. Polimerizacija pomoću slobodnih radikala se često odvija na visokim temperaturama i pritiscima (Lima et al., 2012).

U okviru ovog vodiča posebna je posvećena polimlečnoj kiselini, polihidroksi alkanoatima, bio-poliolefinima koji po svojim svojstvima pripadaju termoplastičnim polimerima. Što znači da oni nakon polimerizacije, u zavisnosti od željene primene dobijeni bio-polimer se mogu preraditi koristeći sledeće tehnike:

Ekstruzija se koristi za proizvodnju vlakana, filmova i cevi, tako što se polimer zagreva i uvodi u poseban uređaj koji se zove ekstruder, koji na svom kraju ima alat pomoću kojeg se dobija polimer željenog oblika (Vroman & Tighzert, 2009).

Injekciono brizganje polimera koristi se za proizvodnju složenih oblika i delova visoke preciznosti, kao što su medicinski uređaji, ambalaža i komponente automobila. Polimer se prevodi u rastop i ubrizgava u kalupe pod visokim pritiskom (Gupta & Bashir, 2012).

Duvanje polimera se koristi za proizvodnju šupljih proizvoda, kao što su flaše i rezervoari. Polimer se zagreva i oblikuje pomoću vazdušnog pritiska (Crawford & Throne, 2002).



Slika 8. Prikaz prerade termoplastičnih polimerna.

Prerada prethodno pomenutih bio-polimeri kao što su kolagen, želatin, hitin, hitozan i alginati se vrši nekim drugim tehnikama zato što se oni ne smatraju tipičnim termoplastičnim polimerima koji se mogu topiti i oblikovati pod dejstvom toplote u istom obimu kao tradicionalni termoplastični polimeri. Takođe, u okviru prethodnog poglavlja je opisano dobijanje poliuretana koji pripada termoreaktivnim polimerima, koristeći sirovine iz bio-obnovljivih sirovina, pri čemu su takođe u pitanju drugačije tehnike prerade.

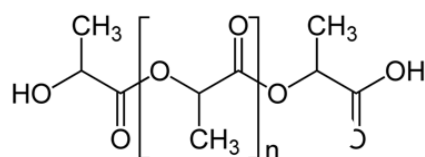
Proces proizvodnje bio-polimera je višefazni i zahteva pažljivo upravljanje sirovinama, fermentacijom, polimerizacijom i obradom kako bi se dobili visokokvalitetni i funkcionalni proizvodi. Napredak u tehnologiji i istraživanjima omogućava sve veću efikasnost i ekonomičnost ovih procesa, što će doprineti većoj upotrebi bio-polimera u različitim industrijama (Niaounakis, 2015)

Prema izveštaju Nova Instituta, globalna proizvodnja bio-polimera iznosila je oko 2,11 miliona tona u 2019. godini, sa očekivanim rastom na preko 2,87 miliona tona do 2024. godine (Aeschelmann & Carus, 2015). Iako još uvek čine mali deo ukupne proizvodnje plastike, bio-polimeri doživljavaju značajan rast zbog sve veće potražnje za održivim i ekološki prihvatljivim materijalima.

5. Svojstva komercijalnih bio-polimera i njihova primena

5.1. Polimlečna kiselina

Polimlečna kiselina su jedan je od najznačajnijih bio-polimera, koji se koriste u raznim industrijskim primenama zbog svojih ekoloških prednosti, biodegradabilnosti i svojstava koja su slična konvencionalnim polimerima. S obzirom da je već bilo reči o načinu kako se proizvodi ovaj bio-polimer, u okviru ovog poglavlja će se detaljnije razmotriti svojstva i primena polimlečne kiseline.



Slika 9. Strukurna formula polimlečne kiseline.

Polimlečna kiselina ima dobra mehanička svojstva, u koje spadaju visoka krutost i čvrstoća, koja su slična onima kod polietilen-tereftalata (PET) i polistirena (PS). Međutim, polimlečna kiselina je viša krhka u odnosu na druge masovne termoplastične polimere, što može ograničiti njegovu upotrebu u nekim primenama gde je nepoželjno koristiti krhak materijal (Farrington et al., 2005). Tačka ostakljivanja (T_g) polimlečne kiseline je oko 60°C, dok je tačka topljenja (T_m) između 130°C i 180°C, zavisno od stepena kristaliničnosti. Opseg temperatura na kojoj polimlečna kiselina prelazi u rastop, odgovara mnogim tradicionalnim termoplastičnim polimerima, što znači da se mogu koristiti isti postupci prerade (Martin & Averous, 2001).

Polimlečna kiselina ima dobra barijerna svojstva što se tiče migracije vlage i arome kroz polimerni materijal, što je čini pogodnim za izradu ambalažnih materijala. Međutim, u poređenju sa PET-om koji je veoma zastupljen u izradi ambalažnih materijala polimlečna kiselina ima lošija barijerna svojstva koja se odnose na migraciju kiseonika i ugljen dioksida kroz polimerni materijal (Auras et al., 2004).



Zahvaljujući svojim svojstvima i ekološkim prednostima, polimlečna kiselina ima primenu u sledećim oblastima:

Polimlečna kiselina se koristi za proizvodnju **ambalažnih materijala** koji se koriste pakovanje hrane, pića, u izradi tanjira, čaša, folija i kontejnera. Uz pogodna mehanička i barijerna svojstva, polimlečna kiselina je i biodegradabilna čime smanjuje problem plastičnog otpada (Lim et al., 2008).

Dobra mehanička svojstva i relativno niske tačke ostakljivanja čini polimlečnu kiselinu veoma jednostavnom za obradu i samim tim veoma popularnu za **3D štampu** (Balla et al., 2017).

Polimlečna kiselina je pored pomenutih svojstava i biokompatibilan polimer, što je čini pogodnim za izradu hirurških konaca, sistema za kontrolisano otpuštanje lekova, implantata, kao i mnogih drugih materijala koji se koriste u **medicini** (Middleton & Tipton, 2000).

Polimlečna kiselina se smatra bio-polimerom koji ima ekološke prednosti u poređenju sa tradicionalnim polimerima koji se dobijaju iz petrohemijskih izvora. Pod ekološkim prednostima se podrazumeva sledeće:

Sam postupak proizvodnje polimlečne kiseline generiše **manje emisije ugljen dioksida** jer za njeno dobijanje koriste bio-obnovljive sirovine. Istraživanja su pokazala da proizvodnja polimlečne kiseline može smanjiti emisije gasova koji izazivaju efekat staklene bašte za 60% u poređenju sa PET-om (Vink et al., 2007).

Upotrebom **sirovina dobijenih iz bio-obnovljivih izvora** za proizvodnju polimlečne kiseline se smanjuje zavisnost od petrohemijskih izvora. Iz ovih razloga se smatra da je proizvodnja polimlečne kiseline u skladu sa principima održivog razvoja i cirkularne ekonomije, i sveukupno smanjuje ugljeni otisak (Jamshidian et al., 2010).

Polimlečna kiselina je **biodegradabilna** i na taj način doprinosi smanjenju akumulacije plastičnog otpada na deponijama i u prirodi, pružajući održiviju alternativu konvencionalnim plastikama (Hopewell et al., 2009).



Slika 10. Slikovit prikaz komercijalno proizvedenih peleta polimlečne kiseline.

Ove ekološke prednosti predstavljaju i prednosti upotrebe polimlečne kiseline, međutim postoje i određena ograničenja koja treba razmotriti:

Polimlečna kiselina je **krhkija** u nekih tradicionalnih polimera, što može ograničiti njenu primenu u izradi materijala koje zahtevaju visoke mehaničke karakteristike, kao što je otpornost na udar (Farrington et al., 2005).

Iako je proizvodnja polimlečne kiseline vremenom postala efikasnija, i dalje je **skuplja** od proizvodnje nekih tradicionalnih polimera. Razvojem novih metoda proizvodnje može pomoći u smanjenju troškova (Nampoothiri et al., 2010).

S obzirom da polimlečna kiselina ima relativno nisku tačku ostakljivanja, koja može ograničiti njenu oblast primene. Odnosno ograničava njenu upotrebu u izradi materijala koji zahtevaju visoku **termičku stabilnost** (Martin & Averous, 2001).

Komercijalna proizvodnja i primena polimlečne kiseline predstavlja značajan korak ka održivoj budućnosti polimera. U tom kontekstu će se pomenuti sledeće kompanije koje komercijalno proizvode polimlečnu kiselinu iz bio-obnovljivih izvora:

NatureWorks LLC jedan je od najvećih proizvođača polimlečne kiseline, poznat po svom brendu Ingeo. NatureWorks proizvodi polimlečnu kiselinu iz kukurznog šećera i ima kapacitet od 150 000 tona godišnje (Vink et al., 2004).

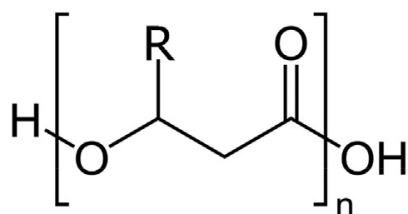
Total Corbion PLA je u stvari saradnja između kompanija Total i Corbion, koja se bavi proizvodnjom polimlečne kiseline koristeći šećernu trsku kao polaznu sirovinu. Njihov proizvodni kapacitet iznosi 75 000 tona godišnje, a kompanija planira dalju ekspanziju (Total Corbion PLA, 2021).

Futerra je francuska kompanija specijalizovana za proizvodnju polimlečne kiseline i razvoj tehnologija za reciklažu polimlečne kiseline. Futerra koristi šećernu trsku i kukuruz kao polazne sirovine za svoju proizvodnju (Futerra, 2020).

Sa svojim ekološkim prednostima, biodegradabilnim svojstvima i širokim spektrom primena, polimlečna kiselina ima potencijal da zameni mnoge konvencionalne plastike i smanji negativan uticaj na životnu sredinu. Ipak, dalji razvoj i optimizacija proizvodnih procesa, kao i poboljšanje njenih svojstava, ključni su za njegu širu primenu i prihvaćenost na tržištu.

5.2. Polihidroksi alkanoati

Polihidroksi alkanoati predstavljaju raznovrsnu klasu biodegradabilnih poliestara koji se u stvari dobijaju posredstvom mikroorganizama, kao što je opisano u okviru Poglavlja 3. Polihidroksi alkanoati od velikog interesa za različite industrijske primene, u okviru ovog poglavlja detaljno će se obraditi i oblasti primene, razmatrajući prednosti i ograničenja ovog bio-polimera.



Slika 11. Opšta formula polihidroksi alkanoata gde je R CH₃ za polihidroksi butirat, a za polihidroksi valerat je R C₂H₅.

Polihidroksi alkanoati su poznati po svojim različitim fizičkim, termičkim i mehaničkim svojstvima koja se mogu prilagoditi zavisno od vrste monomera koji se koriste za njihovu u polimerizaciju. Mehanička svojstva polihidroksi alkanoata variraju od od krutih i krhkih materijala sličnih polipropilenu do fleksibilnih materijala sličnih elastomerima (Philip et al., 2007). U zavisnosti od vrste monomera koji se koristi za dobijanje polihidroksi alkanoata zavise i njihova termička svojstva, na primer tačka ostakljivanja polihidroksi butirata je oko 4°C, dok je njegova temperatura topljenja između 160-175°C (Laycock et al., 2013). Uopšteno, polihidroksi alkanoati pokazuju dobra barijerna svojstva koja se odnose na migraciju vodene pare i drugih gasova, čineći ih pogodnih za izradu ambalažnih materijala. Međutim, treba imati u vidu da barijerna svojstva mogu varirati od stepena kristaliničnosti i debljine samog polimernog materijala (Chen, 2009).

Zahvaljujući svojim svojstvima, polihidroksi alkanoati imaju primenu u sledećim oblastima:

Polihidroksi alkanoati se koriste za proizvodnju **ambalažnih materijala** kao što su prehrambene folije, filmovi, flaše, zbog svojih povoljnih barijernih svojstava i toga što su biodegradabilni. Predstavljaju ekološki pogodnu zamenu tradicionalnim polimerima u mnogim ambalažnim aplikacijama (Sudesh et al., 2000).

Polihidroksi alkanoati su biokompatibilni bio-polimer, što ih čini pogodnim za izradu hirurških konaca, sistema za kontrolisano otpuštanje lekova, implantata, kao i mnogih drugih materijala koji se koriste u **medicini** (Williams & Martin, 2002).



Zbog svoje biodegradabilnosti polihidroksi alkanoati su našli primenu u **poljoprivredi** za izradu biodegradabilnih folija, saksija, sistema za otpuštanje pesticida, čime se smanjuje polimerni otpad u poljoprivredi (Shen et al., 2009).

Polihidroksi alkanoati su klasa biodegradabilnih bio-polimera koji različitih ekoloških prednosti u koje spadaju:

Za dobijanje polihidroksi alkanoata najčešće se koriste biljne sirovine čime se podstiče **upotreba sirovina dobijenih iz bio-obnovljivih izvora** kao i **smanjenje emisije ugljen-dioksida** kao gasa koji doprinosi efektu staklene bašte (Koller et al., 2010, Rehm, 2010).

Zahvaljujući tome što su biodegradabilni, upotreba polihidroksi alkanoata doprinosi **smanjenju otpada**, posebno u morskom okruženju gde tradicionalni polimeri mogu trajati vekovima (Pometto et al., 2009).

Ove ekološke prednosti predstavljaju i prednosti upotrebe polihidroksi alkanoata, međutim postoje i određena ograničenja koja treba uzeti u obzir:

Proizvodnja polihidroksi alkanoata je je **skuplja** od tradicionalnih polimera zbog složenih biotehnoloških procesa koji zahtevaju čiste polazne supstance za proizvodnju. daljim razvojem će se povećati efikasnost same fermentacije i na taj način će doprineti smanjenju troškova (Chen, 2010).

Polihidroksi alkanoati, kao što je polihidroksi butirat mogu imati **lošija mehanička svojstva** kao što je krhkost i niska otpornost na udar, što dalje može ograničiti njihovu primenu u određenim sektorima (Laycock et al., 2013).

Često polihidroksi alkanoati pokazuju **lošiju termičku stabilnost**, što dalje može zahtevati modifikacije ili mešanje sa drugim polimerima kako bi se poboljšala njihova svojstva (Philip et al., 2007).

Komercijalna proizvodnja i primena polihidroksi alkanoata predstavlja značajan korak ka održivoj budućnosti polimera. U tom kontekstu će se pomenuti sledeće kompanije koje komercijalno proizvode polihidroksi alkanoate koristeći sirovine dobijene iz bio-obnovljivih izvora:

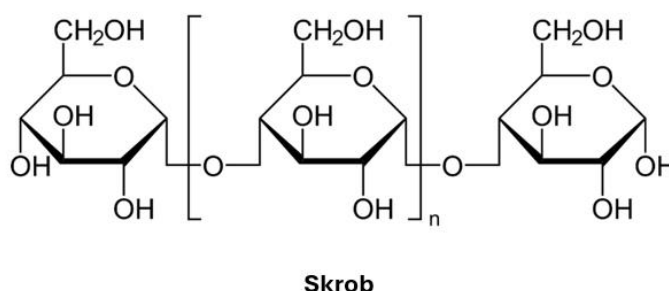
Danimer Scientific se bavi proizvodnjom različitih tipova polihidroksi alkanoata za primenu u izradi ambalažnih materijala, polimernim materijalima za jednokratnu upotrebu i biomedicini.

TianAn Biopolymer je kineska kompanija koja proizvodi polihidroksi alkanoate za širok spektar primena, uključujući ambalažne materijale i predmete koji bi se koristili u poljoprivrednoj industriji. .

Metabolix (Yield10 Bioscience) je američka kompanija fokusirana na razvoj polihidroksi alkanoata za različite industrijske primene, uključujući i aditive za polimere.

5.3. Skrob i bio-polimeri na bazi skroba

U Poglavlju 3. je skrob pomenut kao monomer koji se dobija iz različitih biljnih sirovina. U okviru ovog poglavlja će se detaljnije opisati njegova svojstva i primena. Skrob je prirodni polimer koji se nalazi u biljkama kao što su kukuruz, krompir, pšenica i tapioka.



Slika 12. Prikaz kukuruza i krompira kao polazne bio-obnovljive sirovine za dobijanje skroba.

Skrob se sastoji od amiloze i amilopektina. Da bi se skrob koristio u svojstvo polimera, neophodno je da se izvrši njegova prerade. Uobičajene metode obrade podrazumevaju mešanje skroba sa plastifikatorima kao što su glicerol ili sorbitol, kako bi se smanjio njegov stepen kristaliničnosti i poboljšala mehanička svojstva (Guilbert et al., 1996; Averous & Pollet, 2012). Postoji nekoliko vrste bio-polimera na bazi skroba, pri čemu razlikujemo:

Termoplastični skrob koji se dobija mešanjem skroba sa plastifikatorima pod visokim temperaturama i pritiscima, čime se dobija fleksibilan materijal pogodan za dalju preradu (Halasz & Csiszar, 2018).

Polimerni kompoziti na bazi skroba kod kojih se skrob kombinuje sa drugim polimerima, kao što su polimlečna kiselina ili polietilen (PE), kako bi se poboljšala njegova mehanička svojstva i otpornost na vlagu (Wang et al., 2003).

S obzirom da je skrob po svojoj prirodi biodegradabilan, kao i biokompatibilan bio-polimer, može se primeniti u različitim oblastima kao što su:

Skrob i polimeri na bazi skroba se često primenjuju u izradi **ambalažnih materijala** konkretno biodegradabilnih kesa i folija, čime doprinose smanjenju plastičnog otpada (Averous & Boquillon, 2004).



Pored ambalažnih materijala, pogodni su za izradu različitih poljoprivrednih folija, saksija, kao i drugih polimernih materijala koji se koriste u **poljoprivrednoj industriji** pre svega zbog toga što su biodegradabilni, ali takođe se mogu koristiti kao đubrivo (Bastioli, 2005).

Zbog svoje biokompatibilnosti, Skrob i polimeri na bazi skroba se koriste za izradu medicinskih implantata, šavova i sistema za kontrolisano otpuštanje lekova, kao i mnogih drugih proizvoda koji se primenjuju u **medicini** (Guilbert et al., 1996).

Skrob i polimeri na bazi skroba su biodegradabilni bio-polimeri za čiju proizvodnju se koriste sirovine dobijene iz bio-obnovljivih sirovina, uz to netoksični, bezbedni materijali zbog čega i imaju široku primenu koja je već opisana. Ali postoje i određena nedostaci koja treba uzeti u obzir:

Polimeri na bazi skroba imaju tendenciju da **apsorbuju vlagu**, što može uticati na njihova mehanička svojstva i stabilnost (Averous & Pollet, 2012).

Polimeri na bazi skroba su često **lošijih mehaničkih svojstava**, odnosno krhki su i imaju nisku otpornost na udar i savijanje u poređenju sa tradicionalnim polimerima koji se dobijaju iz petrohemijskih izvora (Wang et al., 2003).

Troškovi proizvodnje polimera na bazi skroba su viši poređenju sa tradicionalnih polimerima, što ograničava mogućnost njihove komercijalne primene (Averous & Boquillon, 2004).

Jedan od načina za poboljšanje svojstava polimera na bazi skroba je njihovo kombinovanje sa drugim polimerima. Na primer, polimerni kompoziti na bazi skroba i polimlečne kiseline prisvaja biodegradabilna svojstva koja potiču od skroba, a dobra mehanička svojstva koja potiču od polimlečne kiseline, rezultujući polimernim materijalom sveukupno poboljšanih svojstava (Wang et al., 2003; Bastioli, 2005).

Polimeri na bazi skroba predstavljaju važnu grupu bio-polimera u aspektu razvoja održivih polimernih materijala. Iako postoje određeni izazovi kao što je niska otpornost na vlagu i lošija mehanička svojstva, ne treba zanemariti njihove prednosti koje se tiču ekoloških pogodnosti. Dalji razvoj i istraživanje u oblasti polimernih kompozita dobijenih iz bio-obnovljivih sirovina su neophodni kako bi se postiglo unapređenje njihovih svojstava i širu primenu u industriji (Guilbert et al., 1996; Averous & Pollet, 2012; Wang et al., 2003; Bastioli, 2005). U tom kontekstu, važno je pomenuti kompanije koje su bave proizvodnjom polimera na bazi skroba:

Novamont je italijanska kompanija poznata po proizvodnji Mater-Bi, polimera na bazi skroba koji se koristi u širokom spektru biodegradabilnih proizvoda. Mater-Bi se koristi za proizvodnju biorazgradivih kesa, folija i jednokratnih posuda (Novamont, 2021).

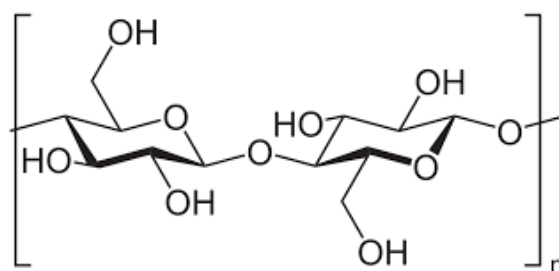
Biome Bioplastics je britanska kompanija koja je proizvela BiomeStarch, polimer na bazi skroba koji koristi se u izradi ambalažnih materijala, poljoprivrednih folija i raznim proizvodima široke potrošnje (Biome Bioplastics, 2021).

Plantic Technologies je australijska kompanija čiji proizvod, Plantic HP, je široko korišćen u izradi ambalažnih materijala korišćenih za pakovanje hrane i druge proizvode široke potrošnje (Plantic Technologies, 2021).

Roquette je francuska kompanija koja proizvodi polimere na bazi skroba pod brendom Roquette Starch. Ovi polimeri se koriste u izradi ambalažnih materijala, poljoprivrednih folija i medicinskih proizvoda (Roquette, 2021).

5.4. Bio-polimeri na bazi celuloze

Pored skroba, celuloza predstavlja jednu od najvažnijih i najšire rasprostranjenih prirodnih polimer dobijenih iz biljnih sirovina. Celuloza je linearan polimer sastavljen od D-glukoznih jedinica povezanih β -1,4-glikozidnim vezama. Drvo je glavni izvor celuloze, ali se takođe može dobiti iz poljoprivrednih ostataka, kao što su pšenična slama i kukuruzna stabljika, te iz otpadnih materijala, poput starog papira (Mohanty, Misra, & Drzal, 2005).



Slika 13. Strukturna formula celuloze.

Proizvodnja celuloze i bio-polimera na bazi celuloze uključuje nekoliko koraka:

Ekstrakcija celuloze: Celuloza se obično dobija iz drveta, pamuka ili drugih biljnih izvora kroz procese kao što su prečišćavanje, ekstrakcija koristeći najčešće različite hemijska sredstva.

Modifikacija celuloze: Da bi se poboljšala obradljivost i svojstva celuloze, ona se može hemijski modifikovati. Celuloza ima 3 slobodne -OH grupe koje omogućavaju izvođenje različitih reakcija modifikacije, kao što su na primer: esterifikacija (npr. acetilacija) ili eterifikacija (npr. karboksimetilacija). Ove modifikacije rezultiraju različitim derivatima. Jedan od ključnih proizvoda je celulozni acetat, koji se koristi za proizvodnju filmova, vlakana i plastičnih proizvoda (Shen, Haufe, & Patel, 2009). Veoma su poznate i korišćene i nitroceluloza i karboksimetilceluloza.



Formiranje materijala: Modifikovana celuloza se može dalje obrađivati u vlakna, filmove, membrane ili kompozite putem tehnika kao što su ekstruzija, livenje i pređenje.

Nakon ekstrakcije i željene obrade, celuloza i bio-polimeri na bazi celuloze poseduju sledeća svojstva:

Celuloza je prirodno **biodegradabilna**, što znači da se može razgraditi mikroorganizmima u okolini, smanjujući akumulaciju otpada (Chandra & Rustgi, 1998). Pored toga je i **biokompatibilan** polimer koji je netoksičan i samim tim bezbedan u kontaktu sa hranom i za izradu materijala koji bi imali farmaceutsku i medicinsku upotrebu (Dufresne, 2012).

Celuloza i bio-polimeri na bazi celuloze poseduju **dobra mehanička svojstva**, kao što su visoka zatezna čvrstoća i izduženje pri kidanju, što ih čini pogodnim za upotrebu u ambalaži i tekstilnoj industriji (Dufresne, 2012).

Ovi polimeri pokazuju relativno **dobru termičku stabilnost** (Mohanty, Misra, & Drzal, 2005). Celuloza i bio-polimeri na bazi celuloze se dobija iz **bio-obnovljivih biljnih izvora**, čime se smanjuje zavisnost od fosilnih goriva.

Zbog pomenutih svojstava, celuloza i bio-polimeri na bazi celuloze imaju širok spektar primena u različitim industrijama kao što su:

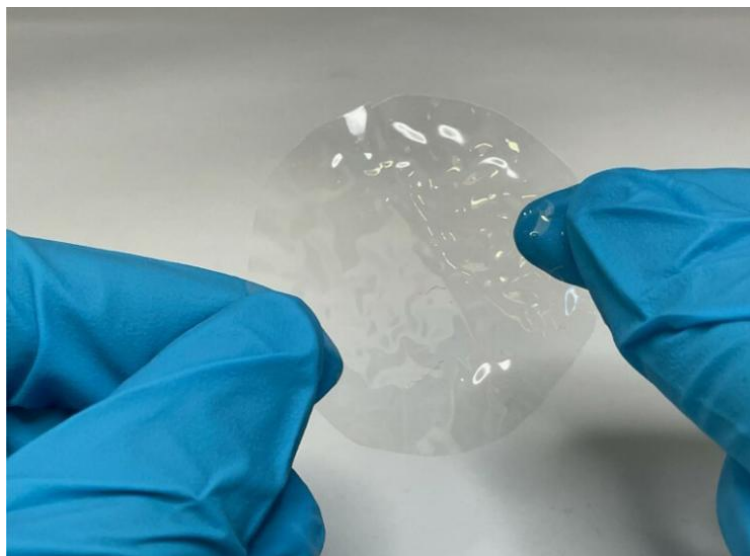
Filmovi na bazi celuloze se koriste za **pakovanje hrane** zbog njihove transparentnosti, fleksibilnosti i biodegradabilnosti (Shen, Haufe, & Patel, 2009).

Celulozna vlakna, poput viskoze i acetatnih vlakana, široko su prisutna u **tekstilnoj industriji** zbog svoje mekoće, sjaja i sposobnosti apsorpcije vlage (Dufresne, 2012).

Celuloza je glavni sastojan **industrije papira** jer ulazi u sastav papira i kartona, pružajući osnovu za mnoge papirne proizvode.

Derivati celuloze kao što su metilceluloza i hidroksipropilceluloza, koriste se kao zgušnjivači, emulgatori i filmogenih agenasa u različitim proizvodima **farmaceutske industrije** (Chandra & Rustgi, 1998).

Polimerni materijali na bazi celuloze se koriste za izradu kompozitnih materijala za **unutrašnje delove automobila**, zahvaljujući njihovoj lakoći i otpornosti (Mohanty, Misra, & Drzal, 2005).



Slika 14. Prikaz celofana, ambalažnog materijala koji je prisutan u svakodnevnom životu na bazi celuloze.

Celuloza i polimeri na bazi celuloze su biodegradabilni bio-polimeri za čiju proizvodnju se koriste sirovine dobijene iz bio-obnovljivih sirovina, uz to netoksični, bezbedni materijali zbog čega i imaju široku primenu koja je već opisana. Ali postoje i određena nedostaci koja treba uzeti u obzir:

Proizvodnja polimera na bazi celuloze može biti **skuplja** u poređenju sa konvencionalnim plastikama, što može ograničiti njihovu komercijalizaciju (Shen, Haufe, & Patel, 2009).

Neki polimeri na bazi celuloze mogu imati **lošija mehanička i barijerna svojstva** u poređenju sa polimerima dobijenih iz petrohemijskih izvora, što može ograničiti njihovu primenu u određenim oblastima (Mohanty, Misra, & Drzal, 2005).

Iako su i celuloza i polimeri na bazi celuloze po prirodi biodegradabilni uslovi okoline, kao što su vlažnost i prisustvo mikroorganizama, mogu značajno uticati na brzinu i efikasnost razgradnje (Chandra & Rustgi, 1998).

Jedan od načina za poboljšanje svojstava na bazi celuloze je koristeći ih kao punila u polimernim kompozitnim materijalima da bi se poboljšala njihova mehanička svojstva i održivost. Na primer, kompoziti koji kombinuju celulozu sa polimerima kao što su polimlečna kiselina ili polihidroksialkanoati pokazala su poboljšane performanse, uključujući veću čvrstoću, otpornost na vlagu i termičku stabilnost.

Celulozni polimeri predstavljaju ključne materijale za budućnost održivih i ekološki prihvatljivih proizvoda. Sa širokim spektrom primena u ambalaži, tekstilu, farmaciji i drugim industrijama, oni nude značajne ekološke prednosti u odnosu na polimere dobijene iz petrohemijskih izvora.

U tom kontekstu, postoji nekoliko kompanija koje prednjače u proizvodnji celuloze i polimera na bazi celuloze:

NatureWorks proizvode polimere na bazi celuloze za upotrebu u ambalažnoj industriji, tekstilnoj industriji i proizvodima široke proizvodnje (European Bioplastics, 2020).

Novamont se fokusira na dobijanje biodegradabilne materijale za primenu u poljoprivremoj industriji, ambalažnoj industriji i proizvodima koji imaju higijensku primenu (European Bioplastics, 2020).

Eastman Chemical Company proizvodi acetat celulozu koja se koristi u proizvodnji filtera za cigarete, plastičnih filmova i tekstilnih vlakana (Shen, Haufe, & Patel, 2009).

Sappi Biotech proizvodi različite celulozne derivate kao što su nanoceluloza, koja se koristi u kompozitnim materijalima, papirnoj industriji i farmaceutskoj industriji.

Celanese Corporation proizvodi acetat celulozu koji se koriste u filterima, tekstilnim i ambalažnim materijalima.

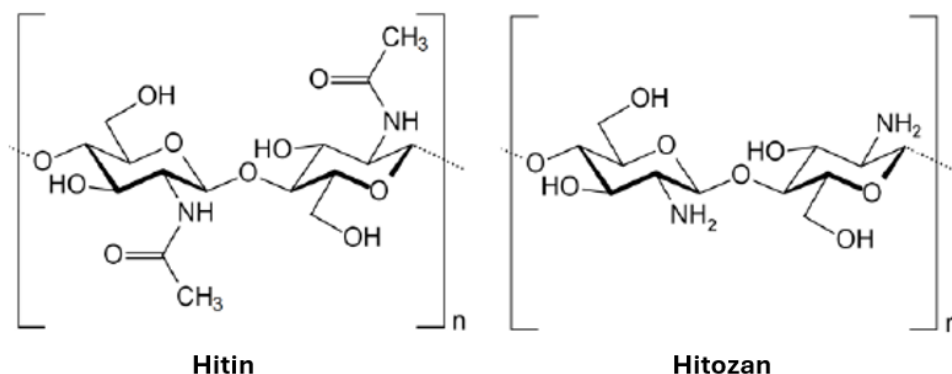
5.5. Bio-polimeri na bazi hitina i hitozana

Hitin i hitozan su bio-polimeri koji se nalaze u spoljašnje ljuske rakova, insekata i ćelijskim zidovima gljiva. Oni predstavljaju važnu grupu bio-polimera zahvaljujući svojim jedinstvenim svojstvima, uključujući biodegradabilnost, biokompatibilnost i antimikrobne aktivnosti.



Slika 15. Slikovit prikaz zglavkara čija spoljašnja ljuska predstavlja polaznu sirovinu za dobijanje hitina.

Hitin je drugi najrasprostranjeniji polisaharid u prirodi, odmah iza celuloze. Sastoji se od jedinica N-acetilglukozamina koje su povezane beta-1,4-glikozidnim vezama. **Hitozan** je deacetilovani derivat hitina, koji se dobija uklanjanjem acetilnih grupa iz hitina, čime se povećava njegova rastvorljivost u vodi. Proces deacetilacije obično uključuje tretman hitina sa jakim bazama kao što je natrijum hidroksid (Pillai, 2013; Zhang, 2015).



Slika 16. Strukturna formula hitina i hitozana.

Bio-polimeri na bazi hitina i hitozana imaju široku primenu u različitim industrijama:

Hitozan se koristi za proizvodnju hemostatskih sredstava koja pomažu u zaustavljanju krvarenja, kao i za izradu biokompatibilnih šavova i veštačkog tkiva. Takođe se koristi u sistemima za kontrolisano otpuštanje lekova i drugih **medicinskih proizvoda** (Khor, 2001; Jayakumar, 2011).

Hitozan se koristi u **prehrambenoj industriji** kao aditiv zbog svojih antimikrobnih svojstava i sposobnosti da formira jestive filmove koji produžavaju rok trajanja hrane (Islam, 2016).

Hitozan se koristi kao biostimulator za biljke, poboljšavajući njihov rast i otpornost na bolesti. Takođe se koristi za tretman semena, kao sredstvo za kontrolu štetočina i mnogim drugim proizvodima **poljoprivredne industrije** (Kurita, 2011).

Zbog svojih adsorpcionih svojstava, hitozan se koristi za **tretman otpadnih voda** i kao koagulant za uklanjanje nečistoća (Crini, 2009).



Zahvaljujući njihovim jedinstvenim svojstvima hitin i hitozan imaju široku primenu u različitim industrijama (Pillai, 2013), međutim treba imati u vidu da postoje i određeni nedostaci:

Proizvodnja hitina i hitozana može biti **skupa** zbog složenog procesa ekstrakcije i prečišćavanja (Islam, 2016).

Hitin **nije rastvorljiv u vodi**, što ograničava njegovu primenu, dok je hitozan rastvorljiv samo u kiselim uslovima (Zhang, 2015).

Bio-polimeri na bazi hitina i hitozana predstavljaju ekološki prihvatljivu alternativu sintetičkim polimerima koji se dobijaju iz petrohemijski izvora, sa širokim spektrom primena u medicini, poljoprivrednoj i prehrambenoj industriji. Njihova biodegradabilnost, biokompatibilnost i antimikrobna svojstva čine ih atraktivnim za održive i zelene tehnologije materijala. Postoji nekoliko vodećih kompanija koje se bave proizvodnjom hitina i hitozana:

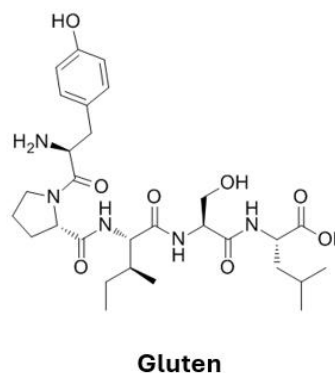
Primex EHF je specijalizovana za proizvodnju hitozana visoke čistoće iz severnoatlantskih škampa (Primex EHF, 2023).

KitoZyme proizvodi hitozan za medicinske i prehrambene primene (KitoZyme, 2023).

Heppe Medical Chitosan GmbH je fokusirana na proizvodnju hitozana za biomedicinske i farmaceutske primene (Heppe Medical Chitosan GmbH, 2023).

5.6. Bio-polimeri na bazi proteina

Bio-polimeri na bazi proteina, kao što su kazein i gluten, predstavljaju značajnu grupu bio-polimera sa širokom primenom u prehrambenoj industriji, medicini i industriji ambalažnih materijala.



Slika 16. Slikovit prikaz bio-polimera na bazi proteina i njihove strukturne formule.

Kazein je glavni protein mleka koji se koristi u proizvodnji sira i drugih mlečnih proizvoda. Kazein ima jedinstvena svojstva kao što su visoka nutritivna vrednost i sposobnost formiranja filмова i gelova. **Gluten** je proteinski kompleks koji se nalazi u pšenici, raži i ječmu. Glavni proteini u glutenu su gliadin i glutenin, koji doprinose elastičnosti testa.

Oba ova bio-polimera imaju specifične primene koje im omogućavaju upotrebu u različitim industrijama:

Prehrambena industrija: Većina polimera na bazi proteina se koristi u prehrambenoj industriji. Na primer, kazein se koristi za pravljenje sira, gluten za pekarske proizvode.

Industrija ambalažnih materijala: Iako je ovo manji segment, polimeri na bazi proteina se sve više koriste za izradu jestivih filмова i biodegradabilnih ambalažnih materijala zbog rastuće svesti o ekološkim pitanjima (Garcia et al., 2010; Tang et al., 2012).



Medicina i farmaceutska industrija: Biokompatibilnost kazeina omogućava njihovu upotrebu u biomedicinskim primenama kao što su bioaktivni filmovi i nosači lekova (Peña-Ramos & Xiong, 2003; Kim et al., 2000).

Međutim, iako polimeri na bazi proteina imaju značajne prednosti, njihov udeo u ukupnoj industriji polimera je još uvek mali u poređenju sa polimerima dobijenih iz petrohemijskih izvora. Prema podacima, godišnja proizvodnja polimera iz obnovljivih izvora čini manje od 5% ukupne proizvodnje polimera (Shen et al., 2009). Međutim, postoji nekoliko kompanija koje se bave proizvodnjom polimera na bazi proteina:

Arla Foods Ingredients: Proizvodi kazein za prehrambene i industrijske primene.

ADM: Proizvodi širok spektar proteinskih polimera, uključujući gluten i protein dobijene iz soje.

6. Biodegradabilnost i ekološki uticaj bio-polimera

Biodegradabilnost i ekološki uticaj bio-polimera su ključni aspekti koji doprinose njihovoj atraktivnosti u poređenju sa tradicionalnim polimerima koji se dobijaju iz petrohemijskih izvora. Bio-polimeri se proizvode koristeći sirovine dobijene iz bio-obnovljivih sirovina, pri čemu neki imaju sposobnost biodegradacije, što ih čini održivim rešenjem za smanjenje plastičnog otpada i negativnih uticaja na životnu sredinu. U ovom poglavlju ćemo detaljno razmotriti mehanizme biodegradacije, faktore koji utiču na degradaciju, ekološke prednosti i izazove vezane za upotrebu bio-polimera.

Biodegradacija je proces kojim mikroorganizmi, kao što su bakterije i gljive, razlažu polimere na manje molekule, poput ugljen-dioksida, vode, metana, biomase i neorganskih jedinjenja. Proces Biodegradacije bio-polimera zavisi od njihove hemijske strukture, molekulske mase, stepena kristaliničnosti i funkcionalnih grupa koje se nalaze u njihovoj strukturi koje potencijalno olakšavaju interakciju sa mikroorganizmima (Shah et al., 2008).

Postoje različiti faktori koji utiču na proces biodegradacije, uključujući:

Temperaturu, povećana temperatura ubrzava biodegradaciju jer se povećava kinetička energija molekula i aktivnost mikroorganizama posredstvom kojih se vrši biodegradacija (Kale et al., 2007).

Vlaga, odnosno prisustvo vode je ključno za hidrolizu i aktivnost mikroorganizama. Relativan stepen vlažnosti u kompostu ili zemljištu pomaže u razgradnji bio-polimera (Vert et al., 1994).

Mikroorganizmi imaju optimalni **pH opseg** u kojem su najaktivniji. Neutralan do blago bazna pH sredine je obično najpogodnija za biodegradaciju većine bio-polimera (Yamamoto-Tamura et al., 2015).

Različite **vrste mikroorganizama** imaju sposobnost razgradnje specifičnih bio-polimera. Prisustvo enzima koji mogu hidrolizovati polimerne lance je ključno za efikasnu biodegradaciju.

U okviru prethodnih poglavlja su pomenute različite ekološke prednosti različitih bio-materijala, pri čemu se može uopšteno zaključiti da se proizvodnjom bio-polimera smanjuje emisija ugljen dioksida kao gasa koji doprinosi efektu staklene bašte, za njihovu proizvodnju se koriste sirovine dobijene iz bio-obnovljivih izvora i konačno, njihovom upotrebom se doprinosi smanjenju plastčnog otpada (Vink et al., 2007, Weber et al., 2010, Hopewell et al., 2009).



Slika 17. Prikaz biodegradacije plastične flaše, za čiju proizvodnju su korišćene alge kao polazne bio-obnovljive sirovine.

Takođe, razmotreni su i određeni izazovi koji se javljaju kod proizvodnje i upotrebe bio-polimera, kao što je povećana cena proizvodnje i svojstva koja su često lošija u odnosu na tradicionalne polimere (Drumright et al., 2000, Philip et al., 2007). Bez obzira što su neki bio-polimeri biodegradabilni treba voditi računa o njihovom odlaganju, odnosno efikasna biodegradacija bio-polimera često zahteva specifične uslove koji nisu uvek dostupni u svim regionima. Razvoj infrastrukture za industrijski kompost i reciklažu bio-polimera je od suštinskog značaja (Philp et al., 2013).

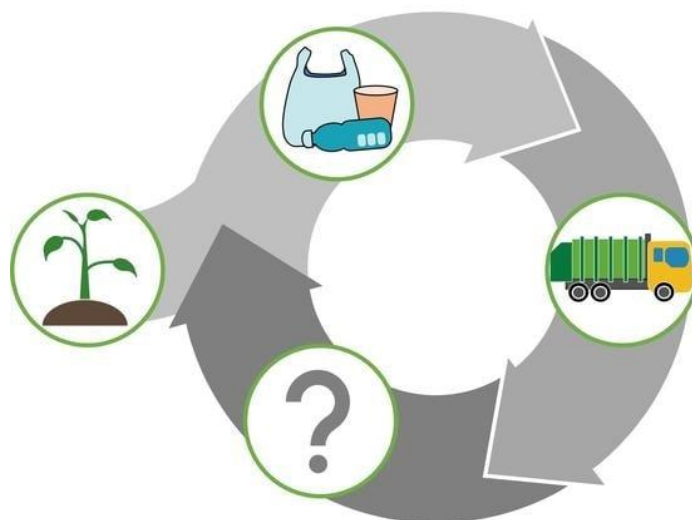
Pored biodegradabilnih svojstava, neki bio-polimeri mogu biti kompostabilni. Kompostabilni bio-polimeri predstavljaju jednu od najvažnijih kategorija bio-polimera, zahvaljujući svojoj sposobnosti da se razgrade u prirodnim uslovima, čime značajno smanjuju zagađenje životne sredine. Treba razlikovati biodegradabilne od kompostabilnih polimernih materijala: biodegradabilnost se može odnositi na bilo koji materijal koji se razgrađuje posredstvom mikroorganizama, dok su kompostabilnim smatraju samo oni čija razgradnja se odvija u kontrolisanim kompostnim uslovima, ostavljajući za sobom neškodljive ostatke kao što su voda, ugljen-dioksid i biomasa. Ključni faktori koji utiču na kompostabilnost uključuju sastav polimera, molekularnu strukturu i prisustvo aditiva.

7. Ekonomski aspekti bio-polimera

Ekonomski aspekti bio-polimera igraju ključnu ulogu u njihovoj primeni i komercijalnoj proizvodnji na globalnom tržištu. U ovom poglavlju ćemo analizirati trenutnu situaciju na tržištu, troškove proizvodnje, ekonomske prednosti i izazove, kao i buduće predviđanja za industriju bio-polimera.

Globalno tržište bio-polimera je u stalnom porastu. Prema izveštaju "Markets and Markets", vrednost tržišta bio-polimera je bila procenjena na 10,5 milijardi američkih dolara u 2021. godini i očekuje se da dostigne 27.3 milijardi američkih dolara do 2026. godine, sa godišnjom stopom rasta od 21,7% . Glavni pokretači ovog rasta su povećanje svesti o održivom razvoju, sve rigoroznije regulative o plastici i rastuća potražnja za ekološki prihvatljivim materijalima.

Troškovi proizvodnje bio-polimera su generalno veći poređenju sa proizvodnjom polimera dobijenih koristeći petrohemijske izvora. Glavni razlozi za to su visoki troškovi sirovina, energetske intenzivni procesi proizvodnje i relativno niska proizvodna efikasnost. Na primer, cena proizvodnje polimlečne kiseline je oko 1,6 do 2,5 američkih dolara po kilogramu, dok je cena proizvodnje polietilena koji se dobija iz petrohemijskih izvora između 1 i 1,5 američkih dolara po kilogramu. Međutim, sa povećanjem proizvodnih kapaciteta kao i sa novim tehnološkim dostignućima očekuju se smanjenje ovih troškova u narednim godinama.



Slika 18. Slikovit prikaz implementacije principa cirkularne ekonomije u životnom ciklusu bio-polimera.

Pored ekonomskih nedostataka treba uzeti u obzir prednosti proizvodnje bio-polimera. Odnosno da se za proizvodnju bio-polimera koriste sirovine dobijene iz bio-obnovljivih izvora kao što su kukuruz, šećerna trska i skrob. Ovo smanjuje zavisnost od fosilnih goriva i može pomoći u smanjenju emisija ugljen-dioksida. Takođe, bio-polimeri su često biodegradabilni, čime doprinose smanjenju količine plastičnog otpada u životnoj sredini.



Kao i to da mnoge vlade pružaju subvencije i poreske olakšice za proizvodnju i upotrebu bio-polimera, što dodatno smanjuje ekonomski teret na proizvođače.

Predviđa se da će u narednom periodu, tržište bio-polimera nastaviti da raste upravo sa razvojem novih tehnologija i materijala koje mogu smanjiti troškove proizvodnje i poboljšati tehnička svojstva bio-polimera. Uz to, globalne inicijative za smanjenje plastičnog otpada i strožija ekološka regulativa mogu ubrzati komercijalizaciju bio-polimera. Na primer, Evropska unija je uvela strategiju za plastiku koja ima za cilj povećanje upotrebe bio-polimera i recikliranje plastike do 2030. godine, pored ove strategije u narednom poglavlju će biti više reči o regulativima koje se tiču bio-polimera. I posebno zanimljivo je rast svesti potrošača o ekološkim pitanjima čime se povećava potražnja za održivim proizvodima, što pozitivno utiče na tržište bio-polimera.

8. Regulativa i standardi za bio-polimere

Uvođenjem regulativa i definisanjem standarda za bio-polimere predstavljaju ključnu stavku za njihov razvoj i komercijalnu proizvodnju. Na osnovu njih se definišu smernice za proizvodnju, upotrebu i konačno odlaganje bio-polimera. U okviru ovog poglavlja će se analizirati važne regulative i standarde na globalnom i evropskom nivou, kao i njihov uticaj na industriju bio-polimera.

Na globalnom nivou, postoji nekoliko ključnih regulativa koje se odnose na bio-polimere:

ISO standardi: Međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO) razvila je niz standarda koji se odnose na bio-polimere, uključujući ISO 17088:2012 za specifikacije i zahteve na osnovu kojih se polimer može definisati kao kompastabilnim i biodegradabilnim. U okviru ISO 14855-1:2012 standarda definisani su uslovi aerobne biodegradacije plastičnih materijala za kontrolisanim kompostiranjem.

ASTM standardi: Američko društvo za ispitivanje i materijale (ASTM) takođe je razvilo standarde za bio-polimere, uključujući ASTM D6400 za specifikacije za kompostabilne polimerne materijale i ASTM D6866 za određivanje sadržaja sirovina dobijenih iz bio-obnovljivih izvora u uzorku polimernog materijala.

Evropska unija (EU) ima nekoliko ključnih regulativa i direktiva koje se odnose na bio-polimere:

EU Direktiva o plastici za jednokratnu upotrebu (SUP Direktiva): Ova direktiva, koja je stupila na snagu u julu 2021. godine, zabranjuje određene plastične proizvode za jednokratnu upotrebu i podstiče upotrebu biodegradabilnih i kompostabilnih plastika (European Commission, 2021).

EU Direktiva o ambalaži i ambalažnom otpadu: Ova direktiva postavlja ciljeve za reciklažu i kompostiranje ambalaže, uključujući bio-polimere (European Parliament, 2018).



EN 13432: Ovaj evropski standard definiše zahteve koje ambalažni materijal mora da ispunjava kako bi se smatralo kompostabilno. Pakovanja koja ispunjavaju ovaj standard mogu nositi oznaku "kompostabilno" (European Bioplastics, 2020).

Pored ISO i ASTM standarda, postoji nekoliko drugih važnih standarda koji se odnose na bio-polimere:

DIN CERTCO: Nemačka organizacija DIN CERTCO sertifikuje proizvode koji su kompostabilni i ispunjavaju standarde EN 13432 ili ASTM D6400 (DIN CERTCO, 2021).

OK Compost: Sertifikat koji izdaje TÜV Austria za proizvode koji ispunjavaju zahteve za industrijsko kompostiranje prema standardu EN 13432 (TÜV Austria, 2021).

USDA Biopreferred: Program američkog Ministarstva poljoprivrede koji promoviše upotrebu proizvoda na bazi sirovina dobijenih iz bio-obnovljivih izvora, uključujući bio-polimere (USDA, 2020).

U Srbiji, regulativa o bio-polimerima je još u razvoju, ali prati evropske standarde i direktive koje promovišu upotrebu biodegradabilnih materijala. **Zakon o upravljanju otpadom i Zakon o ambalaži i ambalažnom otpadu** nalažu smanjenje plastičnog otpada i podstiču upotrebu održivih materijala. Srpska Agencija za zaštitu životne sredine implementira regulative koje se odnose na bio-polimere u skladu sa smernicama EU. Standardi kao što su EN 13432 za industrijsko kompostiranje i EN 14995 za biodegradabilne polimerne materijale se primenjuju i u Srbiji. Očekuje se da će dalja usklađivanja sa EU regulativom dodatno poboljšati upotrebu bio-polimera u Srbiji.

Regulativa i standardi igraju ključnu ulogu u razvoju i primeni bio-polimera. Na osnovu njih se definiše okvir za proizvodnju, upotrebu i zbrinjavanje ovih materijala, što pomaže u smanjenju negativnog uticaja na životnu sredinu kao i promovisanju principa održivog razvoja. Budući razvoj regulative i standarda biće ključan za dalji rast i prihvatanje bio-polimera na globalnom tržištu.



9. Budućnost i perspektiva u oblasti bio-polimera

Istraživanje i razvoj u oblasti bio-polimera je u intenzivnom porastu kao odgovor na rastuće potrebe za održivim materijalima. Fokus istraživanja je na poboljšanju svojstava bio-polimera, povećanju njihove ekonomske isplativosti i uopšteno smanjenju ugljeničnog otiska.

Razvijaju se novi bio-polimeri sa poboljšanim mehaničkim i termičkim svojstvima kako bi zadovoljili specifične industrijske potrebe. Na primer, poli(3-hidroksibutirat-ko-3-hidroksivalerat) pokazuje obećavajuće rezultate zbog svoje izdržljivosti i biorazgradivosti (Nair et al., 2018). U oblasti molekularnog i genetskog inženjerstvo naučno-istraživački rad je usmeren na inženjerstvo različitih mikroorganizama koji se koriste za stvaranje samih bio-polimera sa specifičnim svojstvima ili polaznih sirovina koje se koriste za njihovo dobijanje. Tehnike poput rekombinantne DNK tehnologije koriste se za proizvodnju polimera sa unapred definisanim karakteristikama, kao što su povećana čvrstoća ili poboljšana otpornost na vlagu (Chen, 2010). Razvoj tehnologija koje omogućavaju konverziju poljoprivrednog i industrijskog otpada u bio-polimere značajno doprinosi održivosti. Na primer, lignin, nusproizvod u industriji papira, može se koristiti za proizvodnju bio-polimera sa visokim sadržajem ugljenika (Liu et al., 2017).

Inovacije u oblasti bio-polimera su ključne za njihovu širu primenu i integraciju u razne industrijske sektore. Očekuje se da će sledeći trendovi oblikovati budućnost bio-polimera:

Razvoj bio-polimera koji mogu odgovoriti na spoljne stimuluse kao što su temperatura, pH ili prisustvo određenih hemikalija tzv. **pametnih bio-polimera** otvara nove mogućnosti u medicini i elektronici. Na primer, bio-polimeri koji oslobađaju lekove u kontrolisanim uslovima mogu revolucionisati tretmane (Hoffman, 2012).

Kombinovanje bio-polimera sa drugim materijalima može značajno poboljšati njihova svojstva. **Bio-kompoziti**, napravljeni od bio-polimera i prirodnih vlakana, mogu se koristiti u automobilske industriji za smanjenje težine vozila i povećanje energetske efikasnosti (Mohanty et al., 2018).

Integracija nanomaterijala u bio-polimere može unaprediti njihova mehanička, termička i barijerna svojstva. **Nanokompoziti na bazi bio-polimera** imaju potencijal za primenu u pakovanju hrane, elektronici i medicini (Dufresne, 2010).

Razvoj bio-polimera koji se lako mogu reciklirati i ponovo koristiti deo je šireg trenda **cirkularne ekonomije**. Ovi materijali dizajnirani su tako da smanjuju otpad i ugljenični otisak tokom celog životnog ciklusa proizvoda (Geyer et al., 2017).

Očekuje se da će globalna regulativa postati stroža, sa ciljem smanjenja upotrebe fosilnih goriva i promovisanja održivih materijala. Inovacije u bio-polimerima će biti ključne za ispunjavanje novih standarda i regulativa (European Bioplastics, 2020).



10. Literatura

- "Heppe Medical Chitosan GmbH," available at: [Heppe Medical Chitosan GmbH](#)
- "KitoZyme," available at: [KitoZyme](#)
- "Primex EHF," available at: [Primex](#)
- Aeschelmann, F., & Carus, M. (2015). "Bio-based Building Blocks and Polymers – Global Capacities, Production and Trends 2014-2019." *Nova Institute*.
- Arrieta, M. P., Samper, M. D., Aldas, M., & López, J. (2014). "On the use of PLA-PHB blends for sustainable food packaging applications." *Materials*, 7(8), 5452-5466.
- Auras, R., Harte, B., & Selke, S. (2004). "An Overview of Polylactides as Packaging Materials." *Macromolecular Bioscience*, 4(9), 835-864.
- Auras, R., Lim, L. T., Selke, S. E. M., & Tsuji, H. (Eds.). (2011). *Poly(lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications*. John Wiley & Sons.
- Avérous, L. (2004). "Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: A review." *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, 44(3), 231-274.
- Avérous, L., & Halley, P. J. (2009). "Biocomposites based on plasticized starch." In *Biodegradable Polymers* (pp. 83-100). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Avérous, L., & Pollet, E. (2012). *Environmental Silicate Nano-Biocomposites*. Springer.
- Balla, E., Jinga, S. I., Rusu, A. G., & Nita, L. E. (2017). "3D Printing of PLA-Based Composites." *Materials*, 10(8), 881.
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). "Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1985-1998.
- Bastioli, C. (2001). "Global status of the production of biobased packaging materials." *Starch/Stärke*, 53(8), 351-355.
- Bastioli, C. (2005). *Handbook of biodegradable polymers*. *Smithers Rapra Technology*.
- Bio-based Industries Consortium. (2020). "The Bioeconomy and the EU Green Deal."
- Biome Bioplastics. (2021). *BiomeStarch: The future of sustainable packaging*. Retrieved from biomebioplastics.com.
- Biotec. (2023). *Bioplast*. Retrieved from <https://www.biotec.de/bioplast>
- Brzoska, M. M., et al. (2003). "Soybean protein-based films: an alternative to synthetic polymers for food packaging." *Journal of Food Engineering*, 59(4), 459-467.
- Celanese Corporation. (2023). "Cellulose Acetate." Retrieved from <https://www.celanese.com/cellulose-acetate>
- Chandra, R., & Rustgi, R. (1998). "Biodegradable Polymers." *Progress in Polymer Science*, 23(7), 1273-1335.
- Chen, G. Q. (2009). "A microbial polyhydroxyalkanoates (PHA) based bio- and materials industry." *Chemical Society Reviews*, 38(8), 2434-2446.



- Chen, G. Q. (2010). "Plastics Completely Synthesized by Bacteria: Polyhydroxyalkanoates." *In: Plastics from Bacteria: Natural Functions and Applications*, Springer.
- Chen, G. Q. (2010). "Plastics completely synthesized by bacteria: polyhydroxyalkanoates." *In Plastics from bacteria* (pp. 17-37). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Chen, G. Q., & Patel, M. K. (2012). "Plastics Derived from Biological Sources: Present and Future: A Technical and Environmental Review." *Chemical Reviews*, 112(4), 2082-2099.
- Chen, G.-Q. (2010). Plastics Derived from Biological Sources: Present and Future: A Technical and Environmental Review. *Chemical Reviews*, 110(6), 2249-2292.
- Chinaglia, S., Tosin, M., & Degli-Innocenti, F. (2018). "Biodegradation rate of biodegradable plastics at molecular level." *Polymer Degradation and Stability*, 147, 237-244.
- Crawford, R. J., & Throne, J. L. (2002). *Rotational Molding Technology*. William Andrew.
- Day, L., Augustin, M. A., Batey, I. L., & Wrigley, C. W. (2006). "Wheat-gluten uses and industry needs." *Trends in Food Science & Technology*, 17(2), 82-90.
- DIN CERTCO. (2021). "Certification Scheme for Products Made of Compostable Materials."
- Draget, K. I. (2009). "Alginates." *In: Handbook of Hydrocolloids*, 2nd ed., Woodhead Publishing, 807-828.
- Drumright, R. E., Gruber, P. R., & Henton, D. E. (2000). "Polylactic Acid Technology." *Advanced Materials*, 12(23), 1841-1846.
- Dufresne, A. (2010). Nanocellulose: From Nature to High Performance Tailored Materials. *De Gruyter*.
- Dufresne, A. (2012). "Nanocellulose: From Nature to High Performance Tailored Materials." *De Gruyter*.
- E. Khor, "Chitin: Fulfilling a Biomaterials Promise," Elsevier Science, 2001.
- Eastman Chemical Company. (2023). "Cellulose Esters." Retrieved from <https://www.eastman.com>
- Emadian, S. M., Onay, T. T., & Demirel, B. (2017). "Biodegradation of bioplastics in natural environments." *Waste Management*, 59, 526-536.
- European Bioplastics. (2020). "Bioplastics market data."
- European Commission. (2018). "A European Strategy for Plastics in a Circular Economy."
- European Commission. (2021). "Directive (EU) 2019/904 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment."
- European Parliament. (2018). "Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste."
- Farrington, D. W., Lunt, J., Davies, S., & Blackburn, R. S. (2005). "Poly(lactic acid) fibres." *In Synthetic fibres: nylon, polyester, acrylic, polyolefin* (pp. 191-220). Woodhead Publishing.



- Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection. (2017). "Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)."
- FMC Corporation. (2023). "Carboxymethyl Cellulose (CMC)." Retrieved from <https://www.fmc.com/cmc>
- Fox, P. F. (2003). "Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology." Springer.
- French Ministry for the Ecological and Inclusive Transition. (2019). "Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte."
- Futerro. (2020). "Futerro launches first fully integrated PLA biorefinery in China." *Futerro News*. Retrieved from Futerro.
- G. Crini, "Chitosan-Based Derivatives for Wastewater Treatment," *Green Chemistry*, vol. 11, no. 10, pp. 1413-1422, 2009.
- Garcia, M. A., Martino, M. N., & Zaritzky, N. E. (2010). "Edible starch films and coatings characterization: scanning electron microscopy, water vapor, and gas permeabilities." *Scanning Electron Microscopy*.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). "Production, use, and fate of all plastics ever made." *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- Gross, R. A., & Kalra, B. (2002). "Biodegradable Polymers for the Environment." *Science*, 297(5582), 803-807.
- Guilbert, S., et al. (1996). Biodegradable materials from renewable resources. *Macromolecular Symposia*, 118(1), 563-571.
- Gupta, A. P., & Kumar, V. (2007). "New emerging trends in synthetic biodegradable polymers – Polylactide: A critique." *European Polymer Journal*, 43(10), 4053-4074.
- Gupta, B., & Bashir, T. (2012). "Poly(lactic acid) fiber: An overview." *Progress in Polymer Science*, 37(2), 268-297.
- H. Zhang, "Properties and Applications of Chitin and Chitosan," *Journal of Polymer Science*, vol. 51, no. 3, pp. 658-675, 2015.
- Habibi, Y., Lucia, L. A., & Rojas, O. J. (2010). "Cellulose nanocrystals: chemistry, self-assembly, and applications." *Chemical reviews*, 110(6), 3479-3500.
- Halasz, K., & Csiszar, E. (2018). Structure and properties of thermoplastic starch. *Journal of Polymer Research*, 25(4), 87.
- Halley, P. J., & Dorgan, J. R. (2011). "Starch-Polyester Bioplastics: State of the Art and Future Trends." *Macromolecular Bioscience*, 11(3), 185-204.
- Hoffman, A. S. (2012). Hydrogels for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 64, 18-23.
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). "Plastics recycling: challenges and opportunities." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126.
- Jain, R., Agarwal, S., & Mahajan, S. (2010). "Evaluating biodegradability of polylactic acid (PLA) under composting conditions." *Journal of Polymers and the Environment*, 18(2), 80-84.



- Jamshidian, M., Tehrany, E. A., Imran, M., Jacquot, M., & Desobry, S. (2010). "Poly-lactic acid: production, applications, nanocomposites, and release studies." *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(5), 552-571.
- K. Kurita, "Chitin and Chitosan: Functional Biopolymers from Marine Crustaceans," *Marine Biotechnology*, vol. 13, no. 4, pp. 883-901, 2011.
- Kalagasidis Krušić, M. (2020) "Prirodni polimerni materijali", Interna skripta Katedre za OHT
- Kale, G., Auras, R., & Singh, S. P. (2007). "Comparison of the degradability of poly(lactide) packages in composting and ambient exposure conditions." *Packaging Technology and Science*, 20(1), 49-70.
- Kale, G., Auras, R., Singh, S. P., & Narayan, R. (2007). "Biodegradability of polylactide bottles in real and simulated composting conditions." *Polymer Testing*, 26(8), 1049-1061.
- Khanna, S., & Srivastava, A. K. (2005). "Recent advances in microbial polyhydroxyalkanoates." *Process Biochemistry*, 40(2), 607-619.
- Kim, K. M., et al. (2000). "Edible films based on soy protein isolate." *Journal of Food Science*, 65(3), 1088-1090.
- Kinsella, J. E. (1979). "Functional properties of soy proteins." *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 56(3), 242-258.
- Klemm, D., Heublein, B., Fink, H. P., & Bohn, A. (2005). "Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material." *Angewandte Chemie International Edition*, 44(22), 3358-3393.
- Koller, M., & Salerno, A. (2016). "Biopolymer Production from Industrial Waste." *Polymer Engineering and Science*, 56(10), 1272-1283.
- Koller, M., Bona, R., Chiellini, E., Fernandes, E. G., Horvat, P., Kutschera, C., ... & Braunegg, G. (2010). "Polyhydroxyalkanoate production from whey by *Pseudomonas hydrogenovora*." *Bioresource Technology*, 101(21), 7434-7441.
- Korhonen, H., Pihlanto, A., & Parvez, S. (2011). "Bioactive Components in Milk and Dairy Products." Wiley-Blackwell.
- Kumar, M. N. (2000). "A review of chitin and chitosan applications." *Reactive and Functional Polymers*, 46(1), 1-27.
- Laycock, B., Halley, P., Pratt, S., Werker, A., & Lant, P. (2013). "The chemomechanical properties of microbial polyhydroxyalkanoates." *Progress in Polymer Science*, 38(3-4), 536-583.
- Lim, L. T., Auras, R., & Rubino, M. (2008). "Processing technologies for poly(lactic acid)." *Progress in Polymer Science*, 33(8), 820-852.
- Lima, M. A., Gomez, L. D., & McQueen-Mason, S. J. (2012). "Cell wall disassembly in sugarcane biomass processing for bioethanol production." *Current Opinion in Biotechnology*, 23(3), 330-338.
- Liu, D., Yuan, X., Bhattacharya, M., & Qin, F. (2017). Lignin-based Polymers and Nanomaterials. *Green Chemistry*, 19(2), 235-253.



- Liu, K. (1997). "Soybeans: Chemistry, Technology, and Utilization." Springer.
- Liu, X., et al. (2005). "Wheat gluten, hemicellulose, and thermoplastic mixtures: Properties and applications." *Carbohydrate Polymers*, 61(2), 121-127
- Lourdin, D., Della Valle, G., & Colonna, P. (1995). "Influence of amylose content on starch films and foams." *Carbohydrate Polymers*, 27(4), 261-270.
- M. S. Islam, "Chitosan Based Bio-materials: Chemistry and Applications," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 130, no. 3, pp. 1859-1870, 2016.
- Madison, L. L., & Huisman, G. W. (1999). "Metabolic engineering of poly(3-hydroxyalkanoates): from DNA to plastic." *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 63(1), 21-53.
- Markets and Markets. (2021). "Biodegradable Plastics Market by Type, End-use Industry, Region - Global Forecast to 2026."
- Martin, O., & Averous, L. (2001). "Poly(lactic acid): plasticization and properties of biodegradable multiphase systems." *Polymer*, 42(14), 6209-6219.
- Middleton, J. C., & Tipton, A. J. (2000). "Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices." *Biomaterials*, 21(23), 2335-2346.
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2005). "Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites." CRC Press.
- Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., & Youngblood, J. (2011). "Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites." *Chemical Society Reviews*, 40(7), 3941-3994.
- Müller, R. J., Kleeberg, I., & Deckwer, W. D. (2001). "Biodegradation of polyesters containing aromatic constituents." *Journal of Biotechnology*, 86(2), 87-95.
- Nair, L. S., Laurencin, C. T., & Thomas, V. (2018). Biodegradable polymers as biomaterials. *Progress in Polymer Science*, 32(8-9), 762-798.
- Nampoothiri, K. M., Nair, N. R., & John, R. P. (2010). "An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research." *Bioresource Technology*, 101(22), 8493-8501.
- Narayan, R. (2001). "Biopolymers and Biodegradable Plastics in the Environment." *Macromolecular Symposia*, 163(1), 83-104.
- Niaounakis, M. (2015). "Biopolymers: Processing and Products." William Andrew.
- Nielsen, T. D., Hasselbalch, J., Holmberg, K., & Stripple, J. (2020). "Politics and the Plastic Crisis: A Review throughout the Plastic Life Cycle." *WIREs Climate Change*, 11(4), e660.
- Novamont. (2021). Mater-Bi: Innovative solutions for everyday life. Retrieved from [novamont.com](https://www.novamont.com).
- Novamont. (2023). Mater-Bi. Retrieved from <https://www.novamont.com/mater-bi>
- Parenteau-Bareil, R., Gauvin, R., & Berthod, F. (2010). "Collagen-Based Biomaterials for Tissue Engineering Applications." *Materials*, 3(3), 1863-1887.



- Park, S., Baker, J. O., Himmel, M. E., Parilla, P. A., & Johnson, D. K. (2010). "Cellulose crystallinity index: measurement techniques and their impact on interpreting cellulase performance." *Biotechnology for Biofuels*, 3(1), 10.
- Peña-Ramos, E. A., & Xiong, Y. L. (2003). "Antioxidant activity of soy protein hydrolysates in a liposomal system." *Journal of Food Science*, 68(8), 2442-2447.
- Petrovic, Z. S. (2008). "Polyurethanes from Vegetable Oils." *Polymer Reviews*, 48(1), 109-155.
- Philip, S., Keshavarz, T., & Roy, I. (2007). "Polyhydroxyalkanoates: biodegradable polymers with a range of applications." *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 82(3), 233-247.
- Plantic Technologies. (2021). Plantic HP: High-performance bioplastics. Retrieved from plantic.com.
- Plantic Technologies. (2023). Plantic™. Retrieved from <https://www.plantic.com.au/plantic-products>
- Pometto, A. L., Shetty, K., Paliyath, G., & Levin, R. E. (2009). "Food biotechnology." In *Production of Polyhydroxyalkanoates* (pp. 445-472). CRC Press.
- R. Jayakumar, "Chitosan Based Scaffolds for Tissue Engineering," *Advances in Polymer Science*, vol. 244, pp. 151-209, 2011.
- Ragauskas, A. J., Williams, C. K., Davison, B. H., Britovsek, G., Cairney, J., Eckert, C. A., Frederick, W. J., Hallett, J. P., Leak, D. J., Liotta, C.
- Ramsay, B. A., Lomaliza, K., Chavarie, C., Dubé, B., Bataille, P., & Ramsay, J. A. (1994). "Production of poly-(beta-hydroxybutyric-co-beta-hydroxyvaleric) acids." *Applied and Environmental Microbiology*, 60(10), 3620-3627.
- Reddy, C. S. K., Ghai, R., Rashmi, & Kalia, V. C. (2013). "Polyhydroxyalkanoates: an overview." *Bioresource Technology*, 87(2), 137-146.
- Reddy, R. L., Reddy, V. S., & Gupta, G. A. (2013). "Study of bio-plastics as green & sustainable alternative to plastics." *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(5), 82-89.
- Rehm, B. H. A. (2010). "Bacterial polymers: biosynthesis, modifications and applications." *Nature Reviews Microbiology*, 8(8), 578-592.
- Rhim, J. W., et al. (2013). "Preparation and characterization of soy protein-based nanocomposite films reinforced with clay nanoplatelets." *LWT-Food Science and Technology*, 51(1), 68-76.
- Roquette. (2021). Roquette Starch: Sustainable solutions for various industries. Retrieved from roquette.com.
- Roquette. (2023). GAÏALENE. Retrieved from <https://www.roquette.com/gaialene>
- Rudeekit, Y., Numnoi, S., & Tajan, M. (2008). "Polylactic acid: Biodegradability testing in compost condition." *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 18(2), 83-87.
- S. K. Pillai, "Chitosan and Its Derivatives: A Review of Applications in Medicine, Pharmaceuticals, and Biotechnology," *Carbohydrate Polymers*, vol. 75, no. 2, pp. 201-214, 2013.



- Sannigrahi, P., Ragauskas, A. J., & Tuskan, G. A. (2010). "Poplar as a feedstock for biofuels: A review of compositional characteristics." *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(2), 209-226.
- Sappi Biotech. (2023). "Nanocellulose." Retrieved from <https://www.sappi.com/nanocellulose>
- Schrieber, R., & Gareis, H. (2007). *Gelatine Handbook: Theory and Industrial Practice*. John Wiley & Sons.
- Semo, E., Kesselman, E., Danino, D., & Livney, Y. D. (2007). "Casein micelle as a natural nano-capsular vehicle for nutraceuticals." *Food Hydrocolloids*, 21(5-6), 936-942.
- Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (2008). "Biological degradation of plastics: A comprehensive review." *Biotechnology Advances*, 26(3), 246-265.
- Shen, L., Haufe, J., & Patel, M. K. (2009). "Product overview and market projection of emerging bio-based plastics." *Report*, 243(262), 52.
- Shen, L., Haufe, J., & Patel, M. K. (2009). "Product overview and market projection of emerging bio-based plastics." *PRO-BIP 2009*, 243.
- Singh, J., & Kaur, L. (2016). "Advances in starch and starch-based products." *Current Opinion in Food Science*, 9, 76-82.
- Södergård, A., & Stolt, M. (2002). "Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition." *Progress in Polymer Science*, 27(6), 1123-1163.
- 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(1526), 2127-2139.
- Stevens, E. S. (2002). "Green Plastics: An Introduction to the New Science of Biodegradable Plastics." *Princeton University Press*.
- Sudesh, K., Abe, H., & Doi, Y. (2000). "Synthesis, structure and properties of polyhydroxyalkanoates: biological polyesters." *Progress in Polymer Science*, 25(10), 1503-1555.
- Šaric, M., Saletovic, M., & Vukelic, N. (2020). "Biodegradability of cellulose acetate in the environment." *Journal of Polymers and the Environment*, 28(4), 1234-1245.
- Tang, C. H., Jiang, Y., & Wen, Q. B. (2012). "Structure and properties of edible films made from pea and corn protein isolates." *Journal of Food Science*, 77(3), 105-114.
- Tharanathan, R. N. (2003). "Biodegradable films and composite coatings: past, present and future." *Trends in Food Science & Technology*, 14(3), 71-78.
- Tokiwa, Y., & Calabia, B. P. (2004). "Degradation of microbial polyesters." *Biotechnology Letters*, 26(15), 1181-1189.
- Tokiwa, Y., & Calabia, B. P. (2006). "Biodegradability and biodegradation of poly(lactide)." *Applied Microbiology and Biotechnology*, 72(2), 244-251.
- Tokiwa, Y., Calabia, B. P., Ugwu, C. U., & Aiba, S. (2009). "Biodegradability of Plastics." *International Journal of Molecular Sciences*, 10(9), 3722-3742.
- Total Corbion PLA. (2021). "Total Corbion PLA announces start-up of its 75,000 tons per year PLA plant in Thailand." *Total Corbion PLA News*. Retrieved from Total Corbion PLA.



- Tsuji, H., & Suzuyoshi, K. (2006). "Environmental degradation of biodegradable polyesters 1. Poly(l-lactide) and poly(ϵ -caprolactone) in aerobic and anaerobic soil systems." *Polymer Degradation and Stability*, 91(2), 278-288.
- TÜV Austria. (2021). "OK Compost Certification."
- USDA. (2020). "BioPreferred Program."
- Vert, M., Doi, Y., Hellwich, K.-H., Hess, M., Hodge, P., & Kubisa, P. (2012). "Terminology for biorelated polymers and applications (IUPAC Recommendations 2012)." *Pure and Applied Chemistry*, 84(2), 377-410.
- Vert, M., Feijen, J., Albertsson, A. C., Scott, G., & Chiellini, E. (1994). "Biodegradable Polymers and Plastics." *Royal Society of Chemistry*.
- Vink, E. T. H., Rabago, K. R., Glassner, D. A., & Gruber, P. R. (2003). "Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production." *Polymer Degradation and Stability*, 80(3), 403-419.
- Vroman, I., & Tighzert, L. (2009). "Biodegradable Polymers." *Materials*, 2(2), 307-344.
- Wang, Y., et al. (2003). Polylactic acid/starch blends: Properties, morphology, and their biodegradability. *Journal of Applied Polymer Science*, 89(13), 3382-3390.
- Wieser, H. (2007). "Chemistry of gluten proteins." *Food Microbiology*, 24(2), 115-119.
- Williams, S. F., & Martin, D. P. (2002). "Applications of PHAs in medicine and pharmacy." In *Biopolymers Online*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Y. Rinaudo, "Chitin and Chitosan: Properties and Applications," *Progress in Polymer Science*, vol. 31, no. 7, pp. 603-632, 2006.
- Yamamoto-Tamura, K., Hiradate, S., Watanabe, T., Koitabashi, M., Yarimizu, T., & Sameshima-Yamashita, Y. (2015). "Contribution of soil esterase to biodegradation of aliphatic polyester agricultural mulch film in cultivated soils." *AMB Express*, 5, 11.
- Zhang, J., et al. (2012). "Soy protein-based films and their application in drug delivery systems." *Food Hydrocolloids*, 27(2), 482-490.



Zahvalnica

Studentska radionica i vodič za studente je pripremljen pod pokroviteljstvom Step2PolyGreen Projekta koji je finansiran od strane Fonda za Nauku Republike Srbije GRANT No. 6793.

U tom kontekstu Vas pozivamo da posetite naš zvaničan sajt i da nas podržite društvenim mrežama.

