

»Mladi raziskovalci Slovenije 2020«

54. državno srečanje

Raziskave biopolimernih materialov

Raziskovalno področje: kemija ali kemijska tehnologija

RAZISKOVALNA NALOGA

Osnovna šola Bojana Iliča Maribor

Avtorica: Julija Krajnc Urbanek

Mentorica: Metka Kovač, učiteljica biologije in kemije

Maribor, junij 2020

KAZALO VSEBINE

1	Uvod.....	9
1.1	Raziskovalno vprašanje.....	10
1.2	Hipoteze	10
1.3	Cilji.....	10
1.4	Teoretično ozadje	11
1.4.1	Zgodovina in nekateri mejniki na področju razvoja bioplastike	11
1.4.2	Kaj so biopolimeri?	11
1.4.2.1	Razgradljivi biopolimeri naftnega izvora	12
1.4.2.2	Razgradljivi biopolimeri iz bioloških virov.....	12
1.4.2.3	Nerazgradljivi biopolimeri iz naravnih virov	13
1.4.3	Opis uporabljenih biopolimerov in dodatkov glede na strukturo	13
1.4.3.1	Agar	13
1.4.3.2	Želatina	14
1.4.3.3	Biopolimerni kompoziti in dodatki za kompozite	14
1.4.3.3.1	Kaolin	15
1.4.3.3.2	Lesna moka.....	15
1.4.3.3.3	Glicerol	16
1.4.4	Načini razgradnje biopolimernih odpadkov	17
1.4.4.1	Foto-razgradnja.....	17
1.4.4.2	Toplotna razgradnja.....	17
1.4.4.3	Razgradnja s pomočjo mikroorganizmov	17
1.4.4.4	Kemična razgradnja	18

1.5	Rezultati dosedanjih raziskav na področju biopolimerov na osnovi želatine in agarja .	18
2	Materiali in metode	19
2.1	Uporabljene kemikalije	19
2.2	Pripomočki	19
2.3	Priprava biopolimerov na osnovi želatine	21
2.4	Priprava biopolimerov na osnovi agarja.....	22
2.4.1	Opomba k pripravi polimerov na osnovi agarja	22
2.5	Priprava biopolimerov iz kaolina na osnovi želatine	23
2.6	Priprava biopolimerov iz kaolina na osnovi agarja.....	24
2.7	Priprava biopolimerov iz lesne moke na osnovi želatine.....	25
2.8	Priprava biopolimerov iz lesne moke na osnovi agarja.....	26
2.9	Preizkus nabrekanja.....	28
2.10	Preizkus odpornosti na kislino	28
2.11	Preizkus odpornosti na UV	28
2.12	Preizkus odpornosti na temperaturo.....	28
2.13	Preizkus natezne trdnosti	29
2.14	Obdelava podatkov	31
3	Rezultati	32
3.1	Ugotavljanje osnovnih značilnosti biopolimerov.....	32
3.2	Odpornost na klorovodikovo kislino.....	37
3.3	Odpornost na UV	37
3.4	Odpornost na temperaturo	40
3.5	Rezultati preizkusa natezne trdnosti.....	43
3.5.1	Sila ob prelomu.....	43
3.5.2	Raztezek in sprememba dolžine pred prelomom.....	43

3.5.3	Natezna trdnost pred prelomom	44
3.5.4	Primerjava natezne trdnosti in raztezka polimerov ob obremenitvi	49
4	Razprava.....	51
4.1	Osnovne značilnosti	51
4.2	Odpornost na klorovodikovo kislino.....	52
4.3	Odpornost na UV	52
4.4	Odpornost na temperaturo.....	53
4.5	Preizkus natezne trdnosti.....	53
5	Zaključek.....	55
6	Upoštevanje družbene odgovornosti	57
7	Bibliografija	58

SEZNAM SLIK

Slika 1.1: Delitev biopolimerov, prirejeno po (Šprajcar, Horvat in Kržan 2012).	12
Slika 1.2: Zgradba agaroze in agaropektina kot osnovnih polimerov agarja (Varshosaz, in drugi 2015).	13
Slika 1.3: Zgradba kolagena. Kolagenska vlakna so glavni gradnik medceličnine, ki ji dajejo zgradbo in oporo. Kolagen ima nenavadno aminokislinsko sestavo in niz treh vijačnic. Na osnovno strukturo so vezani še sladkorji (Rousselot Biomedical 2020).	14
Slika 1.4: Zgradba kaolinita (Finkelnburg 2018).	15
Slika 1.5: Slonova trava (<i>Miscanthus</i>) je primerna za predelavo v bioplastične materiale, saj vsebuje visok delež lesnih vlaken. To so dolge celice z odebeljeno celično steno in visokim deležem celuloze in hemiceluloze. Zgradba celuloze, ki je homopolimer iz glukoznih molekul. (Office of Biological and Environmental Research of the U.S. Department of Energy Office of Science 2020).	16
Slika 1.6: Struktura glicerola (propan-1,2,3-ol, glicerol).	16
Slika 2.1: Uporabljene kemikalije. A) Tehnična želatina, B) Rastlinski agar, C) Lesna moka, D) Kaolin, E) Glicerol, F) Kemikalije, pregledna slika.	20
Slika 2.2: Slikovni prikaz postopkov dela v laboratoriju. A) Tehtanje agarja z analitsko tehtnico, B) Dodajanje vode k agarju z merilnim valjem, C) Tehtanje glicerola z analitsko tehtnico, D) Mešanje in segrevanje z mešalnim grelnikom, E) Odmerjanje raztopine z merilnim valjem, F) Vlivanje raztopine v petrijevke pod laminarjem.	27
Slika 2.3. Slikovni prikaz merjenja fizikalnih lastnosti biopolimerov. A) Merjenje debeline polimernih trakov z mikrometrskim vijakom oz. vijačnim merilom, B) Biopolimerni trakovi, C) Dodajanje vode s puhalko v merilni valj, D) Merjenje dolžine trakov ob obremenitvi, E) Zapisovanje meritev in opažanj.	30
Slika 3.1: Osnovni biopolimeri in biopolimerni kompoziti po vlivanju. A-E Biopolimeri na osnovi želatine: A) Želatina + 3 g glicerola, B) Želatina + 6 g glicerola, C) Želatina + 12 g glicerola, D) Želatina + kaolin, E) Želatina + lesna moka, F-J Biopolimeri na osnovi agarja: F) Agar+ 3,5 g glicerola, G) Agar+ 6,75 g glicerola, H) Agar+ 13,5 g glicerola, I) Agar + kaolin, J) Agar + lesna moka. Presevnost je prikazana na črtastem papirju.	34
Slika 3.2: Nabrekanje biopolimerov po 8-urnem namakanju v destilirani vodi. A-E Biopolimeri na osnovi želatine: A) Želatina + 3 g glicerola, B) Želatina + 6 g glicerola, C) Želatina + 12 g glicerola, D) Želatina + kaolin, E) Želatina + lesna moka, F-J Biopolimeri na osnovi agarja: F) Agar+ 3,5 g glicerola, G) Agar+ 6,75 g glicerola, H) Agar+ 13,5 g glicerola, I) Agar + kaolin, J) Agar + lesna moka.	36
Slika 3.3: Spremembe površine biopolimerov ob nanosu kapljice klorovodikove kisline (HCl). Področje nanosa HCl z vidnimi spremembami je označeno s krogom. A-E Biopolimeri na osnovi želatine: A) Želatina + 3 g glicerola, B) Želatina + 6 g glicerola, C) Želatina + 12 g glicerola, D) Želatina + kaolin, E) Želatina + lesna moka, F-J Biopolimeri na osnovi agarja: F) Agar+ 3,5 g glicerola, G) Agar+ 6,75 g glicerola, H) Agar+ 13,5 g glicerola, I) Agar + kaolin, J) Agar + lesna moka. S puščico je prikazan pojav plesni. Za boljšo vidljivost sprememb smo presevnost dosegli z osvetlitvijo podlage na grafoskopu. Barva polimerov zaradi osvetlitve odstopa. Grafikon 3.1:	38

Slika 3.4: Spremembe biopolimerov po sušenju na temperaturi 55 °C tri dni. Slika: Osnovni biopolimeri in biopolimerni kompoziti po vlivanju. A-E Biopolimeri na osnovi želatine: A) Želatina + 3 g glicerola, B) Želatina + 6 g glicerola, C) Želatina + 12 g glicerola, D) Želatina + kaolin, E) Želatina + lesna moka, F-J Biopolimeri na osnovi agarja: F) Agar+ 3,5 g glicerola, G) Agar+ 6,75 g glicerola, H) Agar+ 13,5 g glicerola, I) Agar + kaolin, J) Agar + lesna moka. Presevnost je prikazana na črtastem papirju..... 42

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Uporabljene kemikalije z navedenimi proizvajalci.	19
Preglednica 3.1: Ocenjevanje osnovnih lastnosti biopolimerov na osnovi želatine in agarja. Datum ocenjevanja: 10. december 2019.	33
Preglednica 3.2: Ocenjevanje osnovnih lastnosti biopolimernih kompozitov na osnovi želatine in agarja. Datum ocenjevanja: 10. december 2019.	35
Preglednica 3.3: Zatehta pred omočenjem z vodo in po 8 urnem nabrekanju v vodi in indeks nabrekanja za posamezne biopolimere.	35
Preglednica 3.4: Vpliv temperature sušenja (55°C) na povprečni premer in debelino biopolimerov podano v mm. ..	41
Preglednica 3.5: Dolžina preizkušancev (mm) pri obremenitvi.	45
Preglednica 3.6: Sprememba dolžine Δl preizkušancev (mm) pri obremenitvi.	46
Preglednica 3.7: Raztezek ε preizkušancev (%) pri obremenitvi.	47
Preglednica 3.8: Natezna trdnost preizkušancev (MPa) pri obremenitvi.	48
Preglednica 3.9: Pregled natezne trdnosti, raztezka in sile ob prelomu ter opažanja materialov.	50

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 3.1: A) Svetlost (L^*) osnovnih in biopolimernih kompozitov po obsevanju z UV svetlobo v primerjavi s kontrolnimi (neobsevanimi) biopolimeri. B) Parameter a^* , ki izraža prehod iz zelene v rdečo barvo pri osnovnih in biopolimernih kompozitih po obsevanju z UV svetlobo v primerjavi s kontrolnimi (neobsevanimi) biopolimeri. C) Parameter b^* , ki izraža prehod iz modre v rumeno barvo, pri osnovnih in biopolimernih kompozitih po obsevanju z UV svetlobo v primerjavi s kontrolnimi (neobsevanimi) biopolimeri.	38
Grafikon 3.2: Primerjava natezne trdnosti in raztezka preizkušancev na osnovi želatine.	49
Grafikon 3.3: Primerjava natezne trdnosti in raztezka preizkušancev na osnovi agarja.	50

Slika 3.3: Spremembe površine biopolimerov ob nanosu kapljice klorovodikove kisline (HCl). Področje nanosa HCl z vidnimi spremembami je označeno s krogom. A-E Biopolimeri na osnovi želatine: A) Želatina + 3 g glicerola, B) Želatina + 6 g glicerola, C) Želatina + 12 g glicerola, D) Želatina + kaolin, E) Želatina + lesna moka, F-J Biopolimeri na osnovi agarja: F) Agar+ 3,5 g glicerola, G) Agar+ 6,75 g glicerola, H) Agar+ 13,5 g glicerola, I) Agar + kaolin, J) Agar + lesna moka. S puščico je prikazan pojav plesni. Za boljšo vidljivost sprememb smo presevnost dosegli z osvetlitvijo podlage na grafoskopu. Barva polimerov zaradi osvetlitve odstopa. Grafikon 3.1: ...38

Grafikon 3.2: Primerjava natezne trdnosti in raztezka preizkušancev na osnovi želatine.49

Grafikon 3.3: Primerjava natezne trdnosti in raztezka preizkušancev na osnovi agarja.50

Povzetek

Zaradi izkoriščanja fosilnih virov in onesnaževanja okolja z odpadno plastiko je potreba po razvoju trajnostnih in ekološko prijaznejših biopolimernih materialov vse večja. Biopolimeri so organske molekule ponavljajočih se enot z visoko molekulsko maso, ki so biološkega izvora in/ali biorazgradljivi.

V raziskovalni nalogi smo izdelali biopolimere na osnovi agarja in želatine z različno vsebnostjo glicerina ter kompozite iz kaolina in lesne moka. Testirali smo odpornost na vodo, kislino, UV svetlobo, temperaturo, raztezek in natezno trdnost ob delovanju sile. Ob primerjavi obeh polimernih osnov smo ugotovili, da so polimeri na osnovi agarja v primerjavi z želatino bili bolj odporni na kislino, a so se po sušenju skrčili. UV svetloba je polimere posvetlila. Osnovni polimeri na osnovi agarja so imeli večjo natezno trdnost, a manjši raztezek v primerjavi z biopolimeri na osnovi želatine. Z večjo vsebnostjo glicerola se je natezna trdnost zmanjšala, raztezek pa zvečal. Kompoziti na osnovi agarja so bili v vseh fizikalnih lastnostih slabši od tistih na osnovi želatine. Največjo obremenitev ob prelomu je dosegel kompozit iz kaolina na osnovi želatine. Na podlagi rezultatov smo proučili možnost uporabe biopolimerov v različnih proizvodnih panogah.

Ključne besede:

Biopolimeri, agar, želatina, biokompoziti, kaolin, lesna moka, fizikalne lastnosti, kemijske lastnosti;

Keywords:

Biopolymers, agar, gelatine, bio-composites, kaolin, sawdust, physical properties, chemical properties;

OP: 65 s., 13 slik, 9 pregl., 3 graf., 46 ref.

Zahvala

Iskreno se zahvaljujem mentorici Metki Kovač, učiteljici kemije, za koristne predloge med raziskovalnim delom in usmerjanje pri razpravi kemijskih lastnosti. Nadalje se zahvaljujem učitelju fizike Martinu Knupležu za temeljit pregled in koristne napotke pri meritvah fizikalnih lastnosti. Iskrena hvala tudi mami in očetu, ki sta me uvajala v raziskovalno delo in znanstveno pisanje.

1 UVOD

Že od pradavnine je človek posegal po polimerih rastlinskega in živalskega izvora za pripravo hrane, nego, izdelavo oblačil, papirja, gradnjo in opremljanje bivalnih prostorov (Chassenieux, in drugi 2013). Od industrijske revolucije dalje so fosilni viri, kot je nafta, glavna surovina v razvoju polimernih materialov. Proizvodnja plastike na osnovi neobnovljivih virov je še zmeraj v porastu, čeprav se zavedamo velikih okoljskih problemov, ki jih raba plastike prinaša.

Trenutno bioplastika predstavlja približno 1 % od več kot 359 milijonov ton letno proizvedene plastike na svetu. Ker pa povpraševanje narašča in se razvijajo bolj izpopolnjeni biopolimeri, trg bioplastike nenehno raste in se širi. Po zadnjih podatkih združenja Evropske bioplastike naj bi se svetovna proizvodna zmogljivost bioplastike povečala z okoli 2,11 milijona ton v letu 2019 na približno 2,43 milijona ton leta 2024 (European Bioplastics 2019).

Pozvani smo k vedenju v skladu z načeli trajnostnega razvoja, kar pomeni, da morajo biti viri obnovljivi z naravnim ciklom našega planeta. V zadnjih dveh desetletjih je bioplastika doživela nov preporod in zanimanje. Če želimo, da bi se proizvodnja bioplastike povečevala, morajo biti biopolimerni materiali primerljivi tako po funkcionalnih lastnostih kot tudi ceni. Ti materiali bodo konkurenčni kadar bo cena fosilnih virov visoka, medtem ko bo cena biomasnih surovin, kot je koruza, nizka. Slednje pa odpira velike pomisleke iz vidika, da so mnoge surovine, ki bi bile primerne za proizvodnjo biopolimerov (npr. koruza, sirek, sladkorna pesa ipd.) primarno namenjene potrebam prehrane za ljudi. Ta pomislek je pripeljal do odkrivanja novih polimerov proizvedenih predvsem iz odpadnih materialov ali stranskih produktov pridelave ali predelave drugih proizvodov (Chassenieux, in drugi 2013).

Biopolimeri rastlinskega in živalskega izvora so gradniki celic in so se izgradili v presnovi na celičnem nivoju, zato raziskovanje biopolimerov zahteva dobro predznanje strukturne in funkcionalne biologije rastlin in živali. Področje raziskovanja biopolimerov iz vidika njihovih lastnosti in biorazgradljivosti je interdisciplinarno in vključuje kemike, biokemike, biologe, fizike, farmakologe in medicinsko stroko.

V raziskovalni nalogi bomo pripravili izbrane biopolimere rastlinskega, živalskega in anorganskega izvora in proučili njihovo obstojnost na UV svetlobo, višje temperature, kemijsko odpornost na kisline, omočljivost z vodo in njihovo natezno trdnost.

1.1 Raziskovalno vprašanje

Ali je možno proizvesti bioplastične materiale, ki bi imeli dobre fizikalne in kemijske lastnosti in bi jih lahko nadomestili klasično proizvedeno plastiko?

1.2 Hipoteze

H1: »Možno je izdelati bioplastične materiale, ki bi imeli dobre fizikalne in kemijske lastnosti, kot nadomestilo klasičnim polimernim materialom.«

H2: »Večja vsebnost glicerola bo izboljšala raztezek polimera.«

H3: »Biopolimerni materiali na osnovi agarja bodo med raziskovanimi materiali glede na, odpornost na vodo, kislino, temperaturo in UV primernejši od polimerov na osnovi želatine.«

H4: »Polimeri na osnovi agarja z najvišjo vsebnostjo glicerola bodo imeli manjšo natezno trdnost in večji raztezek kot na osnovi želatine.«

H5: »Ob dodatku utrjevalcev, kot so lesna moka in kaolin bodo biopolimeri manj elastični, vendar odpornejši na kislino, temperaturo sušenja in UV svetlobo.«

1.3 Cilji

Namen raziskovalne naloge je bil:

1. Pripraviti biopolimerne materiale na osnovi želatine, kot živalskega vira, in na osnovi agarja, kot rastlinskega vira, ter kompozite iz kaolina in lesne moke.
2. Določiti primerno vsebnost glicerola v biopolimerih z vidika sile obremenitve, raztezka in natezne trdnosti.
3. Preizkusiti odpornost biopolimerov na kislino, omočljivost z vodo, temperaturo in UV, kot najbolj ključnih dejavnikov za trajnost in obstojnost biopolimernih proizvodov.
4. Med seboj primerjati biopolimere na osnovi agarja in želatine na ključne fizikalne parametre, kot so raztezek in natezna trdnost, ob delovanju sile.

1.4 Teoretično ozadje

1.4.1 Zgodovina in nekateri mejniki na področju razvoja bioplastike

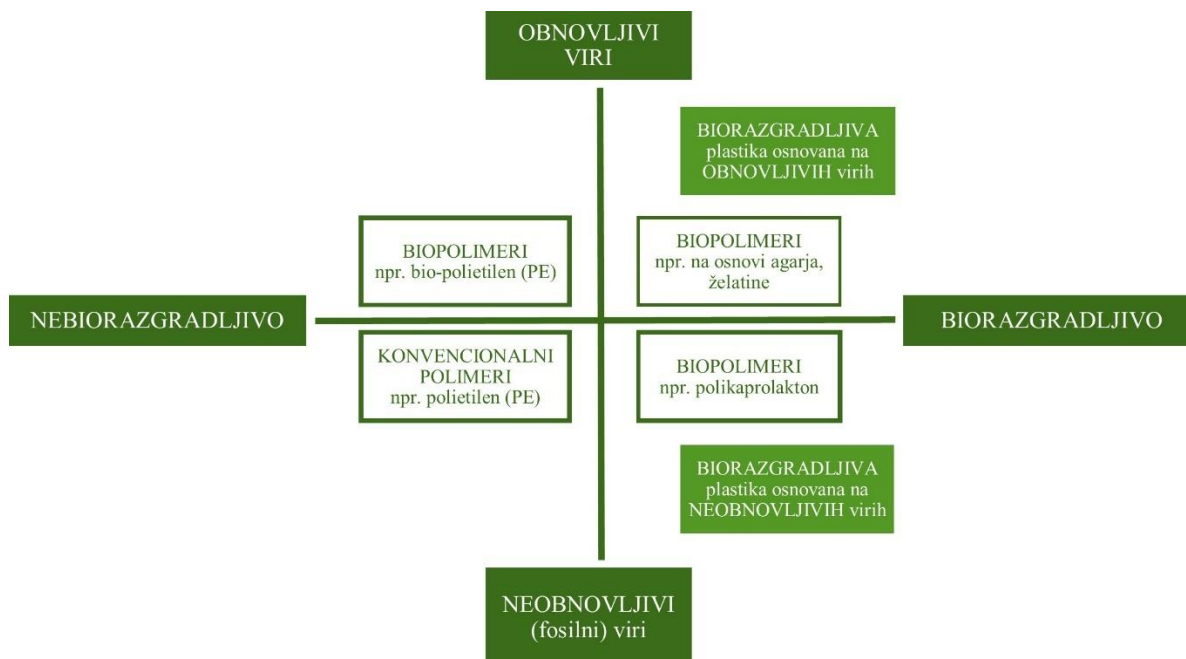
Človek je že od pradavnine uporabljal biopolimerne materiale pridobljene iz rastlin, kot so rastlinska tekstilna vlakna iz stebel (konoplja, kopriva, lan itd.), listov, plodov (palmovi plodovi), semen (bombaž), jantar, smola in mleček. Biopolimerne materiale živalskega izvora so pridobivali iz kože, kosti, volne, svile (Grumezescu in Holban 2018). Že prve starodavne ameriške kulture, kot so Maji in Azteki, so 1500 let p.n.š. uporabljali naravni mleček ali lateks za posode in nepremočljiva oblačila. Prva komercialno uspešna bioplastika je prišla na tržišče leta 1869, znana kot *celluloid* (Kržan 2014). Leta 1912 so izumili celofan iz lesa in bombaža. Henry Ford (ZDA) je na začetku za nekatere dele avtomobila uporabljal bioplastiko iz soje, dokler ni zaradi poceni nafte prešel na uporabo fosilnih virov. Leta 1997 so iz koruze začeli proizvajati bioplastiko na osnovi polimlečne kisline. Podjetje Algapack je leta 2010 uporabilo morske alge kot biomaso. Prvi avtomobil, v celoti izdelan iz bioplastike, je bil proizveden leta 2018 (Barrett 2018).

1.4.2 Kaj so biopolimeri?

Polimeri so organske molekule z visoko molekulsko maso, ki so zgrajene iz ponavljajočih se enakih (homopolimeri) ali različnih (heteropolimeri) podenot, t.i. monomerov, ki so lahko enostavni sladkorji, aminokislina, nukleinske kisline, ogljikovodiki (Batič, in drugi 2011). Biopolimeri so snovi, ki so narejene iz bioloških (obnovljivih) surovin in/ali so biorazgradljivi. Govorimo o 1) bioosnovanih polimerih, ki so pridobljeni iz naravnih virov, in 2) biorazgradljivih polimerih, ki se v odvisnosti od pogojev aerobno ali anaerobno v celoti razgradijo. Na razgradljivost polimernih materialov vpliva kemična in fizikalna mikrostruktura polimera. Ločimo 3 osnovne skupine biopolimerov (Slika 1.1):

- razgradljivi biopolimeri naftnega izvora,
- razgradljivi biopolimeri iz obnovljivih virov,
- nerazgradljivi biopolimeri iz obnovljivih virov.

To pomeni, da biopolimeri niso pridobljeni izključno iz obnovljivih virov, lahko so narejeni tudi iz neobnovljivih naftnih surovin. Vsi biopolimeri, pridobljeni iz obnovljivih virov, tudi niso biorazgradljivi (Kržan 2014), (Cvelbar 2019).



Slika 1.1: Delitev biopolimerov, prirejeno po (Kržan 2014).

1.4.2.1 Razgradljivi biopolimeri naftnega izvora

Biopolimeri iz fosilnih goriv so osnovani na ogljikovodikovih monomerih, pridobljenih iz surove nafte, zemeljskega plina ali premoga, kot tudi iz njihovih sekundarnih proizvodov z različnimi metodami. Lastnosti teh biopolimerov so odvisne od različnih polimerizacijskih postopkov, procesnih parametrov (temperatura, vlaga, pritisk) in dodatkov (topila, soli, nanodelci ipd.). Cilj razgradljivih biopolimerov iz fosilnih surovin je doseči čim boljšo razgradljivost. Predstavniki skupine razgradljivih biopolimerov naftnega izvora so alifatski poliestri, poliesteri amidi, poliamidi in poliuretani (Enders in Siebert-Raths 2011). Slabost teh polimerov je predvsem, da so narejeni iz nafte, ki pa ni obnovljiv vir. Prednost pa je, da so razgradljivi. Te polimere nadaljnje odlikuje njihova izjemna temperaturna odpornost. Uporabljajo se za laboratorijske in higienske izdelke, oblačila, premaze in plastenke (Rudnik 2007).

1.4.2.2 Razgradljivi biopolimeri iz bioloških virov

Razgradljivi polimeri iz bioloških virov so narejeni iz obnovljivih virov in so tudi razgradljivi. Kot obnovljivi viri se lahko uporabljajo celuloza, škrob, sladkor, rastlinska olja in njihovi

sekundarni produkti (Enders in Siebert-Raths 2011). Med razgradljive biopolimere iz bioloških virov spadajo polimlečna kislina, polisaharidi (škrob, celuloza) in beljakovine. Medtem ko je njihova razgradljivost prednost, je njihova slabost, da niso najbolj mehansko, termično in kemično odporni. Uporabljajo se za embalažo za pakiranje hrane in izdelkov, lepil, elektroniko, premaze, pene, igrače ipd. (Rudnik 2007).

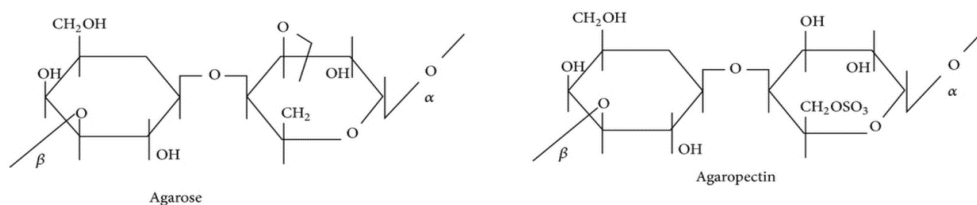
1.4.2.3 Nerazgradljivi biopolimeri iz naravnih virov

Prvi polimeri so bili narejeni iz naravnih, lažje dostopnih materialov kot so celuloza in naravni lateks (Enders in Siebert-Raths 2011). Med nerazgradljive biopolimere iz naravnih virov spada *poliamid 11*. Pridobljen je iz ricinusovega olja in je izjemno odporen na kemijske in toplotne spremembe. Uporablja se za električne kable in cevi (Kržan 2014).

1.4.3 Opis uporabljenih biopolimerov in dodatkov glede na strukturo

1.4.3.1 Agar

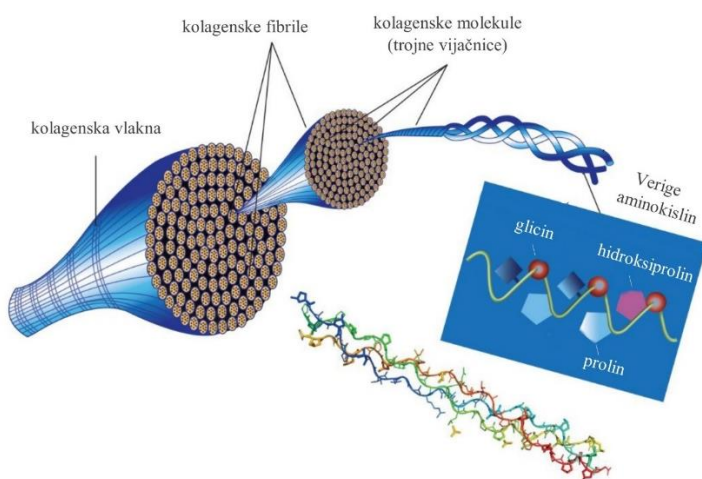
Agar je zmes polisaharidov, pridobljen iz morskih rdečih alg (Rhodobionta). Polisaharidi so polimerne strukture ogljikovih hidratov, kjer so monomeri enostavni sladkorji, ki so med seboj povezani z glikozidnimi vezmi v polisaharide. Glavni monosaharid v agarju je galaktoza. Agar je podobno kot škrob sestavljen iz dveh polisaharidov agaroze (70 %) in agaropektina (30 %). Za mnoge mikroorganizme je agar nerazgradljiva zmes, zato ima potencial uporabe v pridobivanju biopolimerov (Enders in Siebert-Raths 2011), (Batič, in drugi 2011).



Slika 1.2: Zgradba agaroze in agaropektina kot osnovnih polimerov agarja (Varshosaz, in drugi 2015).

1.4.3.2 Želatina

Želatina spada med beljakovinske polimere, ki so zgrajene iz aminokislin. Je čista in brezbarvna ali rahlo rumena snov, skoraj brez okusa in vonja. Pridobimo jo s podaljšanim vrenjem živalskih kož, vezivnega tkiva ali kosti, kar omogoča hidrolizo kolagena. Pri tem se naravne molekulske vezi med dvema kolagenskima deloma pretrgajo v obliko, ki se lažje na novo prerazporedi (Kodjo Boady, Zhang in Shiyong 2001). Kolagen (Slika 1.3) je glavna beljakovina, ki pri sesalcih predstavlja 25 % vse beljakovinske mase. Zanj je značilna velika natezna trdnost. Želatina je uporabna predvsem v živilski industriji, medicini in znanosti (Wikipedia 2020).



Slika 1.3: Zgradba kolagena. Kolagenska vlakna so glavni gradnik medceličnine, ki ji dajejo zgradbo in oporo. Kolagen ima nenavadno aminokislinsko sestavo in niz treh vijačnic. Na osnovno strukturo so vezani še sladkorji (Rousselot Biomedical 2020).

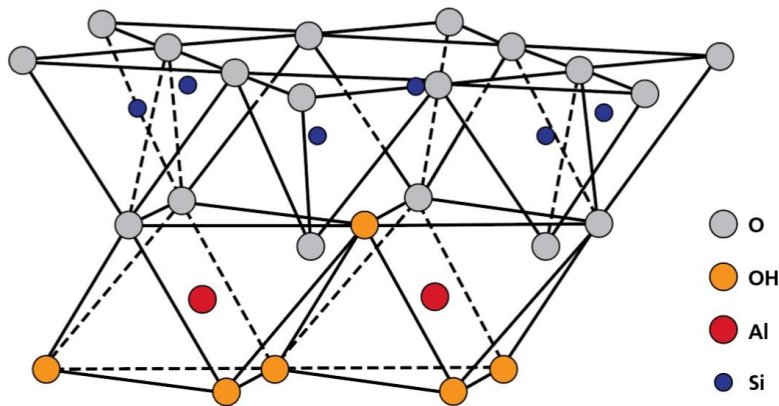
1.4.3.3 Biopolimerni kompoziti in dodatki za kompozite

Obstaja veliko polimernih mešanic ali tako imenovanih kompozitov, ki so sestavljeni iz različnih surovih materialov, kombiniranih z različnimi vrstami biopolimerov. Poleg glavne surovine biopolimera, mešanice vsebujejo različne dodatke, ki spreminjajo lastnosti končnega materiala (Enders in Siebert-Raths 2011). Eden izmed najbolj uporabljenih dodatkov je škrob, predvsem zaradi njegove nizke cene in razgradljivosti (Kržan 2014).

V našem poskusu smo kompozitom dodali kaolin, lesno moko in glicerol. V nadaljevanju opisujemo njihove lastnosti.

1.4.3.3.1 Kaolin

Kaolin je belosiva zmes brez vonja, ki je v glavnini sestavljena iz minerala kaolinita z majhnim deležem drugih mineralov predvsem kremena. Kaolinit je alumosilikatni mineral iz aluminijevega in silicijevega oksida ter je sestavina gline. Je osnovna komponenta kitajskega porcelana in se široko uporablja za izboljšanje mehanskih lastnosti v papirni industriji, pri pridobivanju gum, barv in drugih biopolimernih produktov (Encyclopedia Britannica 1998).

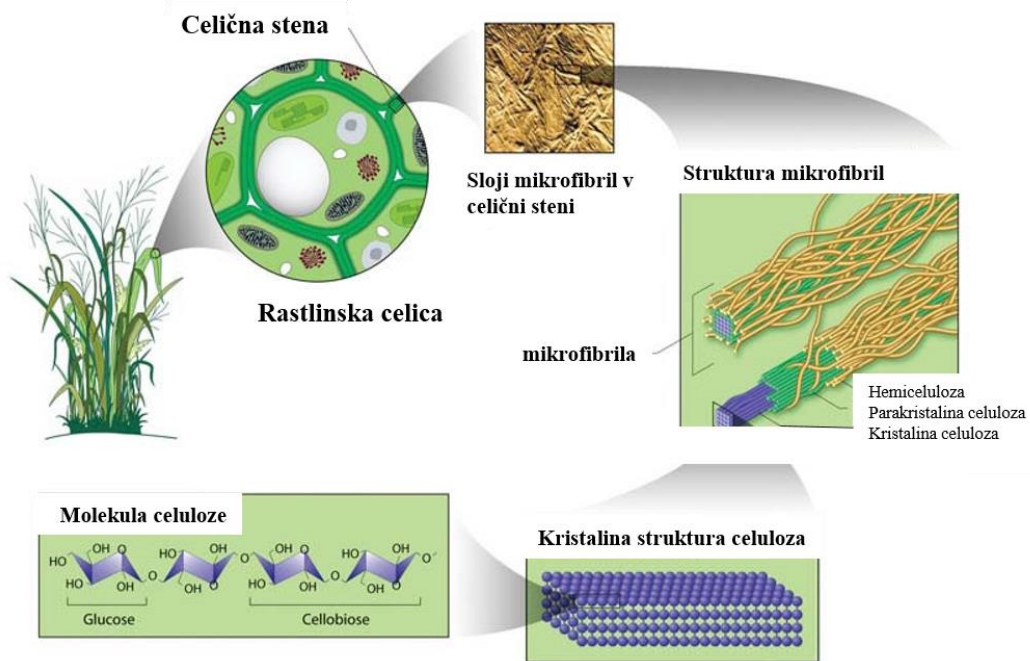


Slika 1.4: Zgradba kaolinita (Finkelnburg 2018).

1.4.3.3.2 Lesna moka

Lesna moka (žagovina) je stranski proizvod ali odpadni material pri postopkih obdelave lesa, kot so žaganje, skobljanje, struženje, vrtanje in brušenje. Sestavljena je iz fino mletih delcev lesa in se uporablja kot industrijska surovina (Kržan 2014), (Wikipedia 2017).

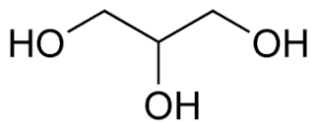
Glavna sestavina lesne moke je celuloza, ki je, tako kot škrob, ogljikov hidrat, sestavljen iz dolge verige glukoznih molekul. Je glavni strukturni polimer rastlinske celične stene (Batič, in drugi 2011). Glavni vir celuloze sta les in rastlinska tekstilna vlakna pridobljena iz bombaža, lana, konoplje, koprive in drugih tekstilnih rastlin (Sfiligoj-Smole 2019). Prva industrijska polimera osnovana na celulozi sta bila celuloid in celofan. Celuloza ima velik potencial v embalažni industriji, vendar je še precej neraziskana. Uporablja se za proizvodnjo vlaken in filmov (Kržan 2014).



Slika 1.5: Slonova trava (*Miscanthus*) je primerna za predelavo v bioplastične materiale, saj vsebuje visok delež lesnih vlaken. To so dolge celice z odebeljeno celično steno in visokim deležem celuloze in hemiceluloze. Zgradba celuloze, ki je homopolimer iz glukoznih molekul. (Office of Biological and Environmental Research of the U.S. Department of Energy Office of Science 2020)

1.4.3.3.3 Glicerol

Glicerol (1,2,3-propantriol, $\text{HOCH}_2\text{-CHOH-CH}_2\text{OH}$) je gosta brezbarvna tekočina brez vonja in sladkega okusa. Uporablja se v kozmetiki, za izdelavo umetnih smol in za proizvodnjo dinamita (FKKT UL 2020). Z dodajanjem glicerola k biopolimerom izboljšamo nekatere fizikalne lastnosti, kot je elastičnost (Arham, in drugi 2016), (Dunne 2018).



Slika 1.6: Struktura glicerola (propan-1,2,3-ol, glicerin) (FKKT UL 2020).

1.4.4 Načini razgradnje biopolimernih odpadkov

Razgradnja lahko poteka na osnovi svetlobne, toplotne, biološke in kemične razgradnje. Biopolimeri se največkrat razgrajujejo s pomočjo kombinacije zgoraj naštetih metod. Najpomembnejša in najbolj pogosta načina sta biološka in foto-razgradnja.

1.4.4.1 Foto-razgradnja

Foto-razgradnja je postopek razgrajevanja molekul, ki jo povzroča sončna svetloba, kot so UV svetloba, vidna svetloba in infrardeča svetloba. Svetlobna razgradnja polimerov vključuje fizikalne in kemijske spremembe. Najbolj uničujoča je UV svetloba valovnih dolžin do okoli 380 nm, ki lahko sproži razgradnjo polimerov, po daljšem obsevanju material razpade v prah. Uničujoče vpliva predvsem kadar so v polimeru prisotne molekule barvil, ki se ob sprejetju UV svetlobe vzbudijo in razgradijo, kar je vidno kot bledenje materiala (Yousif in Haddad 2013).

1.4.4.2 Toplotna razgradnja

Pri visokih temperaturah se lahko verige polimera razcepijo in medsebojno reagirajo tako, da spremenijo lastnosti polimera. Toplotna razgradnja predstavlja zgornjo mejo, pri kateri polimer izgubi mehanske lastnosti na primer zmanjšanje elastičnosti ali izguba trdnosti. Toplotna razgradnja vključuje spremembe molekulske mase polimera, druge tipične spremembe lastnosti so sprememba barve in razpoke (Pathak in Navneet 2017).

1.4.4.3 Razgradnja s pomočjo mikroorganizmov

Biorazgradljive biopolimere lahko razgradimo s kompostiranjem. Mikroorganizmi v kompostu te razgradijo v manjše molekule z encimi, ki jih izločajo. Celulozo lahko razgradijo razne bakterije in glive, predvsem plesni, ki proizvajajo veliko encimov kot je celulaza. Njihovi elementi se reciklirajo naravno, še posebej ogljik in vodik, iz katerih poleg komposta nastaneta voda in ogljikov dioksid. Slednje rastline uporabijo v procesu fotosinteze, s katero rastlina tvori sladkorje in posredno druge snovi, ki jih vgrajuje v svojo biomaso. Ta je ponovno vir za nove polimere (Kržan 2014) (Pathak in Navneet 2017).

1.4.4.4 Kemična razgradnja

Večina biopolimerov je kemijsko manj odpornih od klasičnih polimernih materialov, zato potrebujemo manj energije za kemijsko razgradnjo v primerjavi z drugimi polimeri. Najbolj učinkovita je oksidativna razgradnja. Za biopolimere, proizvedene s polikondenzacijo, se lahko za namensko razgradnjo uporabi obraten proces, ki se imenuje hidroliza. To je kemijski proces, pri katerem se določena spojina razcepi s pomočjo vode, s katerimi pridobimo spet monomere. Na tak način se lahko razgrajuje škrob (Enders in Siebert-Raths 2011), (Lucas, in drugi 2008).

1.5 Rezultati dosedanjih raziskav na področju biopolimerov na osnovi želatine in agarja

Ob pregledu dosedanjih tem raziskovalnih nalog smo zasledili, da je srednješolska raziskovalna naloga z naslovom: »Bioplastika« (Likeb 2019) že obravnavala nekatere bioplastične materiale, vendar je ta izhajala iz kompozitov na osnovi škroba ob dodatku organskih ostankov kot so olupki krompirja, mandarin in listje. Sistematična obravnava biopolimerov na osnovi želatine in agarja, njihovih fizikalnih in kemijskih lastnosti ob dodatku različnih vsebnosti glicerola, še v okviru programa Mladi za napredek Maribora ni bila predmet raziskav. V nadaljevanju navajamo nekaj pomembnih referenc kot iztočnica našim raziskavam. Neelam in sodelavci (2018) so proučevali različne fizikalne lastnosti biopolimerov na osnovi želatine ob dodatku 3 mL glicerola. Navajajo slabo natezno trdnost biopolimera in visoko omočljivost, vendar zaključujejo, da imajo polimeri na osnovi želatine potencial kot kompoziti (Neelam, in drugi 2018). Različne študije so pokazale, da imajo polimeri na osnovi agarja podobne lastnosti kot plastika iz fosilnih surovin. Raziskovalci navajajo, da se z večanjem vsebnosti agarja (1-3 %) večja debelina biopolimernega filma kot tudi natezna trdnost in raztezek ob prelomu, zmanjša pa se omočljivost (Arham, in drugi 2016). Hkrati navajajo, da se z višanjem vsebnosti glicerola večja debelina filma in manjša natezna trdnost. Kot najbolj primerno razmerje med agarjem in glicerolom navajajo 3 g agarja in 10 mL glicerola. Nadalje so avtorji (Hajra in Murat 2019) raziskovali različne kombinacije polimernih trakov iz agarja, vode, glicerola in kisa in ugotavljali spremembe v fizikalnih lastnostih. Navedbe zgoraj omenjenih avtorjev so osnova za postavitev našega poskusa in izbor primernih koncentracij osnovnih sestavin kot so želatina, agar, glicerol s ciljem, da preizkusimo kemijske in fizikalne lastnosti biopolimerov na osnovi želatine in agarja.

2 MATERIALI IN METODE

Raziskave biopolimerov so potekale v dveh sklopih. V prvem sklopu smo pripravili osnovne biopolimere na osnovi želatine in agarja z različnimi vsebnostmi glicerola. V drugem sklopu smo pripravili biopolimerne kompozite na osnovi želatine in agarja ob dodatku lesne moke in kaolina.

2.1 Uporabljene kemikalije

V raziskavi smo uporabili kemikalije kot jih prikazuje Preglednica 2.1. in Slika 2.1.

Preglednica 2.1: Uporabljene kemikalije z navedenimi proizvajalci.

Surovina	Masa pakiranja [g]	Proizvajalec
glicerol	1000	Samson Kamnik
lesna moka	300	Samson Kamnik
želatina - tehnična	250	Samson Kamnik
kaolin	1000	Samson Kamnik
agar - rastlinski	1000	Duchefa Biochemie, NL

2.2 Pripomočki

- čaše (50 mL, 100 mL, 150 mL)
- merilni valj (100 mL, 250 mL, 500 mL)
- puhalka
- steklena palčka
- petrijevke
- analitska tehtnica Kern
- laminarij
- avtoklav
- kuhalnik
- kalibrirana avtomatska pipeta
- kljunasto merilo
- mikrometrski vijak oz. vijačno merilo
- 2 stojala
- prižeme
- ravnilo



Slika 2.1: Uporabljene kemikalije. A) Tehnična želatina, B) Rastlinski agar, C) Lesna moka, D) Kaolin, E) Glicerol, F) Kemikalije, pregledna slika.

2.3 Priprava biopolimerov na osnovi želatine

Glede na pregled obstoječe literature in različnih receptur (Dunne 2018), smo pripravili 3 mešanice na osnovi želatine, ki so vsebovale različne deleže glicerola (GLI). Recepturo smo preračunali glede na 100 mL vode.

Materiali:

MATERIAL	želatina + 3 g GLI	želatina + 6 g GLI	želatina + 12 g GLI
Glicerol	3 g	6 g	12 g
Voda	100 mL	100 mL	100 mL
Želatina	20 g	20 g	20 g

Postopek:

1. Pripravili smo tri čaše, v katere smo zaporedoma odpipetirali različne vsebnosti glicerola (vzorec 1, 2, 3), ki smo ga predhodno stehtali. Dodali smo vodo, ki smo jo umerili z merilnim valjem in želatino. V vse tri čaše smo dali mešalno kost.
2. Na mešalniku z grelnikom smo kuhali približno pet minut na srednji vročini 80-90°C, dokler se želatina ni raztopila in raztopina zgostila.
3. Raztopino smo vlili v 4 petrijevke po 25 mL na vsako. Preostanek smo uporabili za pred teste odpornosti.
4. Polimere smo pustili 3 dni pri sobni temperaturi, da se posušijo.

2.4 Priprava biopolimerov na osnovi agarja

Recepturo smo povzeli po (Dunne 2018) in jo preračunali glede na 100 mL vode.

Materiali:

MATERIAL	agar + 3,5 g GLI	agar + 6,75 g GLI	agar + 13,5 g GLI
Glicerol	3,5 g	6,75 g	13,5 g
Voda	100 mL	100 mL	100 mL
Agar	4 g	4 g	4 g

Postopek:

1. Pripravili smo tri čaše, v katere smo zaporedoma odpipetirali različne vsebnosti glicerola (vzorec 1, 2, 3), ki smo ga predhodno stehtali. Dodali smo vodo, ki smo jo umerili z merilnim valjem in agar. V vse tri čaše smo dali mešalno kost.
2. Na mešalniku z grelnikom smo kuhali približno deset minut na višji temperaturi 120-150°C, dokler se agar ni raztopil in raztopina zgostila.
3. Raztopino smo vlili v 4 petrijevke po 25 mL na vsako. Preostanek smo uporabili za pred teste odpornosti.
4. Polimere smo pustili 3 dni pri sobni temperaturi, da se posušijo.

2.4.1 Opomba k pripravi polimerov na osnovi agarja

Polimeri na osnovi agarja, ki smo jih v začetnem poskusu kuhali na mešalnem grelniku, so se hitro strdili, težko so se vlivali, po sušenju so popokali, kar kaže na neustrezno polimerizacijo. Poskus smo zato ponovili in umešane polimere na osnovi agarja avtoklavirali, kar je bolj običajem postopek priprave agarja (Ambrožič Dolinšek 2017). Prav tako smo ponovili postopek sušenja.

2.5 Priprava biopolimerov iz kaolina na osnovi želatine

Recepturo smo povzeli po (Dunne 2018) in jo preračunali glede na 100 mL vode.

Materiali:

MATERIAL	želatina + kaolin
Glicerol	12 g
Voda	100 mL
Želatina	20 g
Kaolin	8,3 g

Postopek:

1. V čašo smo odpipetirali glicerol, ki smo ga predhodno stehali. Dodali smo vodo, ki smo jo umerili z merilnim valjem, želatino in kaolin. Zmesi smo dali mešalno kost.
2. Na mešalniku z grelnikom smo kuhali na srednji vročini 80-90°C, dokler se želatina ni raztopila in raztopina zgostila.
3. Raztopino smo vlili v 4 petrijevke po 25 mL na vsako. Preostanek smo uporabili za pred teste odpornosti.
4. Polimere smo pustili 3 dni pri sobni temperaturi, da se posušijo.

2.6 Priprava biopolimerov iz kaolina na osnovi agarja

Recepturo smo povzeli po (Dunne 2018) in jo preračunali glede na 100 mL vode.

Materiali:

MATERIAL	agar + kaolin
Glicerol	12 g
Voda	100 mL
Agar	3 g
Kaolin	8,3 g

Postopek:

1. V čašo smo odpipetirali glicerol, ki smo ga predhodno stehali. Dodali smo vodo, ki smo jo umerili z merilnim valjem, agar in kaolin. Zmesi smo dali mešalno kost.
2. Na mešalniku z grelnikom smo kuhali na srednji vročini 100-120°C, dokler se agar ni raztopil in raztopina zgostila. Zaradi gostote kompozita smo število vrtljajev povečali, vendar se je raztopina začela peniti.
3. Raztopino smo nemudoma vlili v 4 petrijevke po 25 mL na vsako. Preostanek smo uporabili za pred teste odpornosti.
4. Polimere smo pustili 3 dni pri sobni temperaturi, da se posušijo.

2.7 Priprava biopolimerov iz lesne moke na osnovi želatine

Recepturo smo povzeli po (Dunne 2018) in jo preračunali glede na 100 mL vode.

Materiali:

MATERIAL	želatina + lesna moka
Glicerol	12 g
Voda	100 mL
Želatina	20 g
Lesna moka	8,3 g

Postopek:

1. V čašo smo odpipetirali glicerol, ki smo ga predhodno stehali. Dodali smo vodo, ki smo jo umerili z merilnim valjem, želatino in lesno moko. Zmesi smo dali mešalno kost.
2. Na mešalniku z grelnikom smo kuhali na srednji vročini 80-90°C, dokler se želatina ni raztopila in raztopina zgostila. Zaradi gostote lesne moke smo pojačali število vrtljajev mešanja.
3. Raztopino smo vlili v 4 petrijevke po 25 mL na vsako. Preostanek smo uporabili za pred teste odpornosti.
4. Polimere smo pustili 3 dni pri sobni temperaturi, da se posušijo.

2.8 Priprava biopolimerov iz lesne moke na osnovi agarja

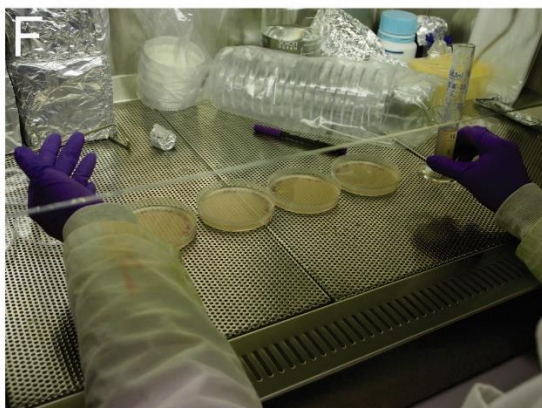
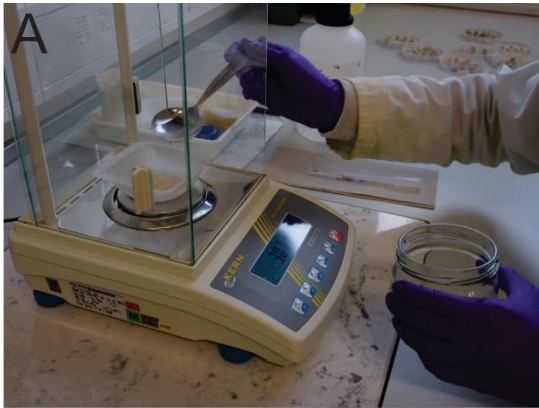
Recepturo smo povzeli po (Dunne 2018) in jo preračunali glede na 100 mL vode.

Materiali:

MATERIAL	agar + lesna moka
Glicerol	12 g
Voda	100 mL
Agar	3 g
Lesna moka	8,3 g

Postopek:

1. V čašo smo odpipetirali glicerol, ki smo ga predhodno stehali. Dodali smo vodo, ki smo jo umerili z merilnim valjem, agar in lesno moko. Zmesi smo dali mešalno kost.
2. Na mešalniku z grelnikom smo kuhali na srednji vročini 100-120°C, dokler se agar ni raztopil in raztopina zgostila. Zaradi gostote lesne moke in agarja smo pojačali število vrtljajev mešanja.
3. Raztopino smo nemudoma vlili v 4 petrijevke po 25 mL na vsako. Preostanek smo uporabili za pred teste odpornosti.
4. Polimere smo pustili 3 dni pri sobni temperaturi, da se posušijo.



Slika 2.2: Slikovni prikaz postopkov dela v laboratoriju. A) Tehtanje agarja z analitsko tehtnico, B) Dodajanje vode k agarju z merilnim valjem, C) Tehtanje glicerola z analitsko tehtnico, D) Mešanje in segrevanje z mešalnim grelnikom, E) Odmerjanje raztopine z merilnim valjem, F) Vlivanje raztopine v petrijevke pod laminarijem.

2.9 Preizkus nabrekanja

Preizkusili smo odpornost na vodo in v kolikšni meri preizkušanci nabreknejo v vodi. Posušene polimerne trakove širine 5 mm smo stehali in jih namočili v 20 mL destilirane vode. Po 8 h namakanja smo jih ponovno stehali in s pomočjo mase pred (m_0) in po namakanju (m) izračunali indeks nabrekanja (en. 2.1).

$$I_{\text{omoč.}} = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100 \% \quad (\text{en. 2.1})$$

2.10 Preizkus odpornosti na kislino

Da bi proučili odpornost biopolimerov na kislino, smo na eno petrijevko vsakega pridobljenega polimera s kapalko kanili kapljico 1 M klorovodikove kisline (HCl). Pustili smo jih 3 dni pri sobni temperaturi in zapisali ter fotografirali opazovane spremembe (Slika 3.3).

2.11 Preizkus odpornosti na UV

Da bi proučili odpornost biopolimerov na UV, smo jih 3 dni obsevali v laminariju z UV svetlobo (UVC Philips žarnica, valovna dolžina 254-185 nm). Parametre barve smo merili s kolorimetrom Minolta CR2/400, ki ima površino merjenja 8 mm in jih podali s parametri svetlosti (L^*), prehoda iz zelene v rdečo barvo (a^*) in prehoda iz modre v rumeno barvo (b^*). Pridobljene rezultate smo primerjali s parametri barve neobsevanih kontrolnih polimerov. Vsak biopolimer smo v treh ponovitvah fotografirali 5-krat in zapisali rezultate.

2.12 Preizkus odpornosti na temperaturo

Pridobljene polimere smo po osnovnem vrednotenju segrevali do temperature 55 °C tri dni, z namenom, da bi materiale hitreje posušili in se izognili okužbi s plesnijo ob počasnem sušenju. Višje temperature nismo uporabili, ker je to meja taljivosti želatine (Neelam, in drugi 2018).

Po sušenju smo premer polimerov merili s kljunastim merilom in debelino polimerov z mikrometrskim vijakom oz. vijačnim merilom (Slika 2.3).

2.13 Preizkus natezne trdnosti

Natezni preizkus spada med preizkuse materialov, s katerim lahko ugotavljamo mehansko trdnost preizkušanca. Ta nam pove kolikšno silo vzdrži material ob obremenitvi glede na njegov presek. Enota natezne trdnosti je običajno MPa.

Preizkus smo izvajali pri sobni temperaturi 22°C. Biopolimerne materiale smo narezali na 0,5 cm široke in med obema vpetjema 5,5 cm dolge trakove s pravokotnim presekom. Debelino vzorcev smo izmerili z merilno pripravo mikrometrski vijak oz. vijlačno merilo (Slika 2.3). Na ta način smo lahko izmerili debelino vzorcev s točnostjo do 0,01 mm. Izmerjene parametre vzorcev prikazuje Preglednica 3.4 (glej poglavje *Rezultati Debelina 1*).

Trakove smo vpeli s prižemo na vrh stojala. Spodnji del polimernega traku smo s sponko povezali z merilnim valjem. Trak smo obremenili tako, da smo vsakič s puhalko dodajali po 30 mL vode in se s tem izognili uporabi uteži (Slika 2.3). Ob upoštevanju enačbe gostote vode in volumna smo izračunali maso (en. 2.2). To smo vključili v enačbo za izračun sile teže upoštevajoč gravitacijski pospešek in tako dobili silo teže v Newtonih (en. 2.3).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad m = \rho \cdot V \quad (\text{en. 2.2})$$

$$F_g = m \cdot g \quad (\text{en. 2.3})$$

Pri vsaki obremenitvi smo izmerili dolžino traku in izračunali spremembo dolžine kot razliko (Δl) med izmerjeno dolžino (l) in začetno dolžino (l_0) (en. 2.4).

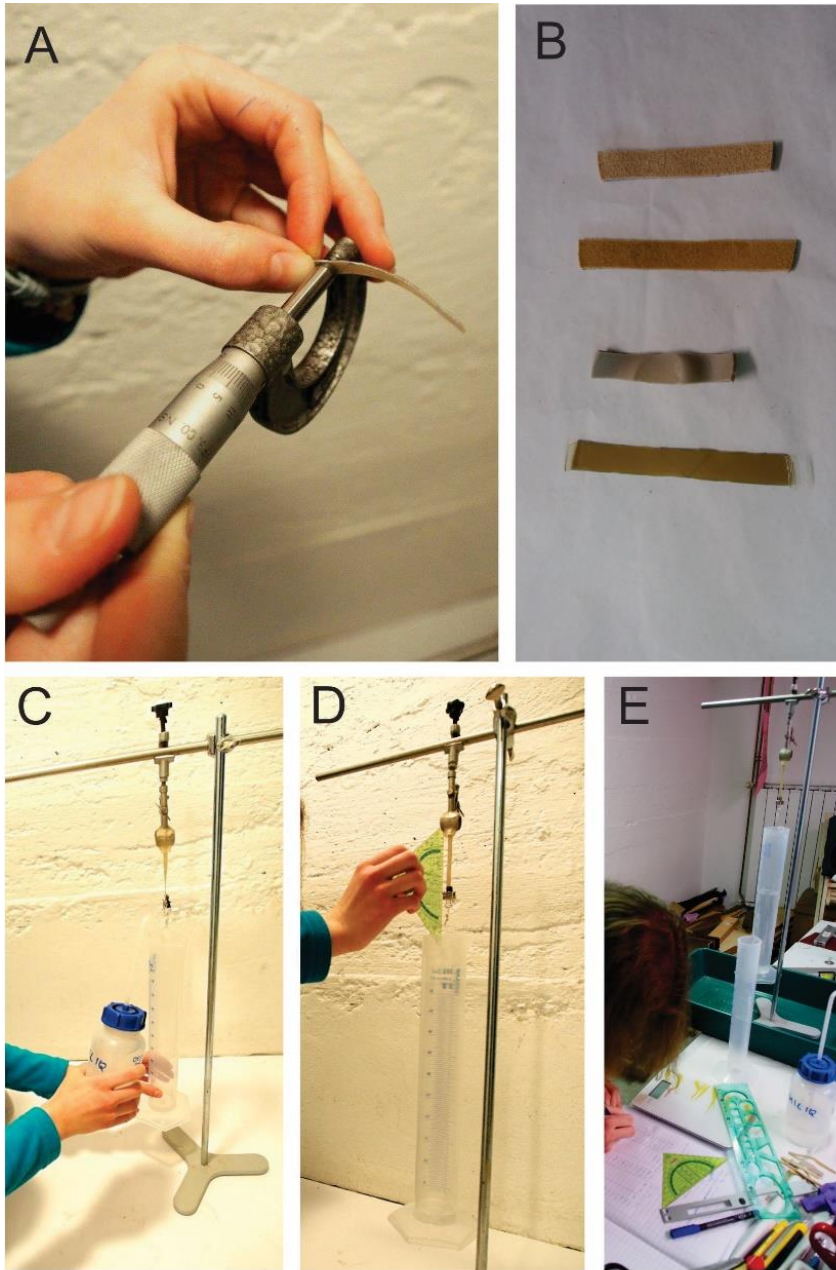
$$\Delta l = l - l_0 \quad (\text{en. 2.4})$$

Na podlagi zgornjih podatkov smo izračunali tudi raztezek v procentih (en. 2.5).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \% \quad (\text{en. 2.5})$$

Nato smo na podlagi meritev debeline in širine izračunali natezno trdnost (en. 2.6).

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (\text{en. 2.6})$$



Slika 2.3: Slikovni prikaz merjenja fizikalnih lastnosti biopolimerov. A) Merjenje debeline polimernih trakov z mikrometrskim vijakom oz. vijačnim merilom, B) Biopolimerni trakovi, C) Dodajanje vode s puhalko v merilni valj, D) Merjenje dolžine trakov ob obremenitvi, E) Zapisovanje meritev in opažanj.

2.14 Obdelava podatkov

Rezultate parametrov barve in fizikalnih lastnosti smo obdelali tako, da smo pri vsakem obravnavanem polimeru na posamezen parameter izvedli štiri do šest meritev, ki smo jih podali v preglednicah. Iz podatkov smo izračunali povprečje ali aritmetično sredino. Povprečje ali aritmetična sredina je seštevek vseh vrednosti deljen s skupnim številom seštevancev. (Smogavec in Govejšek 2012). Za konstruiranje grafov in preglednic smo uporabili program Excel 2016 (Windows) in Origin Pro 8.0. Slikovno gradivo smo zložili v programu Corel X6 in Microsoft PowerPoint.

3 REZULTATI

3.1 Ugotavljanje osnovnih značilnosti biopolimerov

Polimere na osnovi želatine smo pripravili z različnimi vsebnostmi glicerola, da bi primerjali parametre kakovosti. Vrednotili smo prozornost, vonj, otip (trdoto, prožnost), barvo, vlivanje, pojavnost plesni, homogenost in omočljivost z vodo.

Opazili smo, da so polimeri na osnovi želatine zelo prozorni in svetlo oker barve. Imajo blag vonj po želatini. Na otip so prožni, vendar dokaj trdi. Vlivanje je zelo dobro, saj so polimeri zmerno viskozni in se ne penijo. Biopolimeri so homogeni, vendar polimer z 12 g glicerola mestoma emulgira. Polimera s 6 g in 12 g glicerola hitro plesnita, plesen se je pojavila po enem tednu, do čimer se pri polimeru z vsebnostjo 3 g glicerola plesen po enem tednu ni pojavila (Preglednica 3.1, Slika 3.1). Indeks nabrekanja se z večanjem glicerola manjša (Preglednica 3.3, Slika 3.2).

Polimere na osnovi agarja smo prav tako pripravili z različnimi vsebnostmi glicerola (Slika 3.1). Le-ti so v primerjavi s polimeri na osnovi želatine rahlo motni, blede barve jajčne lupine in imajo izrazit vonj po agarju. Na otip so mehki, vlažni in prožni. Polimeri, ki smo jih sušili na zraku, po enem tednu ne plesnijo. Vsi trije polimeri so homogeni (Preglednica 3.1). Indeks nabrekanja se z večanjem glicerola manjša (Preglednica 3.3, Slika 3.2).

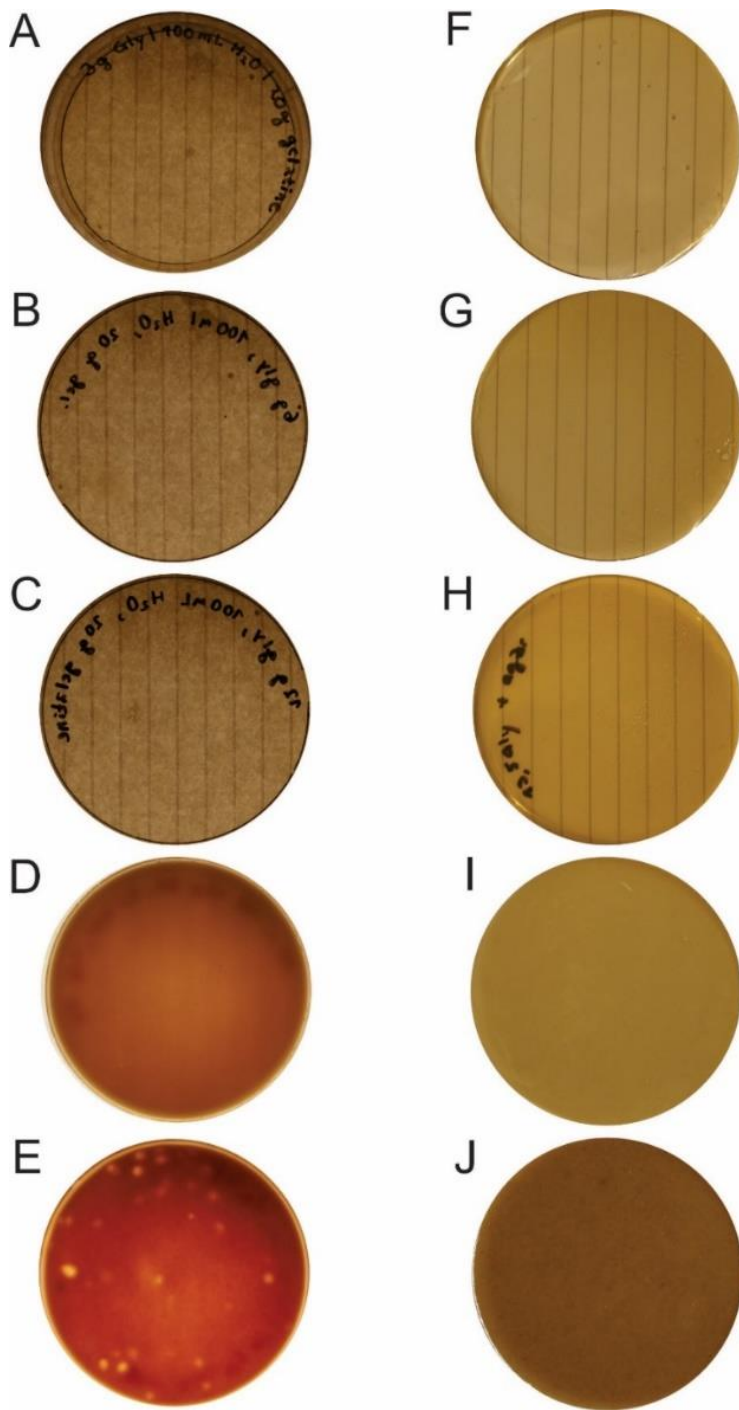
V drugem sklopu poskusa smo na osnovi želatine in agarja pripravili polimerne kompozite iz kaolina. Za boljšo elastičnost smo na podlagi predposkusa dodali 12 g glicerola.

Kompoziti iz kaolina so pri obeh osnovah porcelanasto beige barve, niso prozorni in imajo vonj po želatini oz. agarju ter zemeljski vonj po glini. Na otip so precej trdi in manj prožni. Vlivanje kompozitov z agarjem je težje, saj so zelo viskozni, penasti in se hitro strdijo. Kompoziti z želatino se lažje vlivajo, saj so zmerno viskozni in se počasneje strjujejo. Biopolimeri po enem tednu niso plesneli (Slika 3.1). So homogeni, vendar se pri kompozitih z agarjem pojavijo drobni zračni mehurčki, pri polimerih z želatino pa se kaolin posede (Preglednica 3.2). Polimeri iz kaolina na osnovi želatine v poskusu omočljivosti močno nabreknejo po dolžini in širini ter se kačasto in cevasto zvijejo. Polimeri iz kaolina na osnovi agarja bistveno ne nabreknejo (Preglednica 3.3, Slika 3.2).

Kompoziti iz lesne moke na osnovi želatine in agarja niso prozorni in imajo vonj po lesu. Na otip so trdni in manj prožni. Polimeri z agarjem so svetlejši kot polimeri z želatino (Slika 3.1). Težje jih je vlivati, saj so zelo viskozni in se že med kuhanjem zelo hitro strdijo, medtem ko so kompoziti z želatino manj viskozni, a jih je potrebno zaradi lesne moke med segrevanjem dobro mešati. Kompoziti na osnovi agarja in želatine so homogeni, vendar se lesna vlakna pri polimerih na osnovi želatine posedejo in glicerol močno emulgira. Pojavijo se presevne emulzijske kapljice (Preglednica 3.2). Polimeri na zraku pri obeh osnovah ne plesnijo. Pri poskusu omočljivosti polimeri iz lesne moke na osnovi želatine in agarja le malo nabreknejo (Preglednica 3.3, Slika 3.2).

Preglednica 3.1: Ocenjevanje osnovnih lastnosti biopolimerov na osnovi želatine in agarja. Datum ocenjevanja: 10. december 2019.

	20 g želatine + 3 g GLI	20 g želatine + 6 g GLI	20 g želatine + 12 g GLI	4 g agar + 3,5 g GLI	4 g agar + 6,75 g GLI	4 g agar + 13,5 g GLI
prozornost vonj	popolna blagi vonj po želatini	popolna blagi vonj po želatini	popolna blagi vonj po želatini	rahlo moten vlažni vonj, bolj izrazit po agarju	rahlo moten vlažni vonj, bolj izrazit po agarju	rahlo moten vlažni vonj, bolj izrazit po agarju
otip (trdota, prožnost)	žlatinast, trd in prožen	žlatinast, trd in prožen	žlatinast, trd, prožen in rahlo masten	mehek, vlažen in prožen	mehek, vlažen in prožen	mehek, vlažen, prožen in masten
barva	rahlo oker	rahlo oker	rahlo oker	bleda, barva jajčne lupine	bleda, barva jajčne lupine	bleda, barva jajčne lupine
vlivanje	zelo dobro, zmerno viskozno, brez penic	zelo dobro, zmerno viskozno, brez penic	zelo dobro, zmerno viskozno, brez penic	bolj viskozno, hitro se strdi, potrebno takojšnje vlivanje	bolj viskozno, hitro se strdi, potrebno takojšnje vlivanje	še bolj viskozno, zelo hitro se strdi, potrebno takojšnje vlivanje
plesen (po 1 tednu)	brez	hitro plesni	hitro plesni	brez plesni	brez plesni	brez plesni
homogenost	popolna	popolna	popolna, a mestoma glicerol emulgira	popolna	popolna	popolna



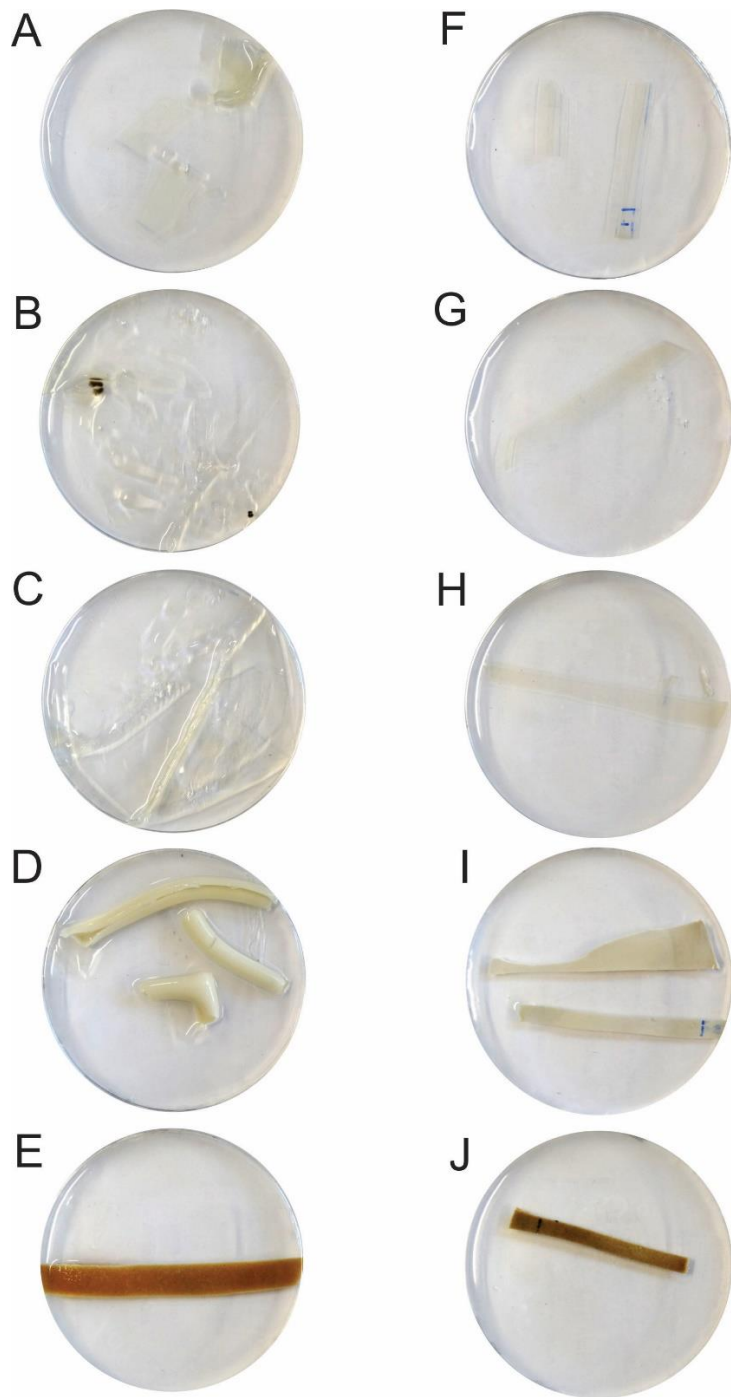
Slika 3.1: Osnovni biopolimeri in biopolimerni kompoziti po vlivanju. A-E Biopolimeri na osnovi želatine: A) Želatina + 3 g glicerola, B) Želatina + 6 g glicerola, C) Želatina + 12 g glicerola, D) Želatina + kaolin, E) Želatina + lesna moka, F-J Biopolimeri na osnovi agarja: F) Agar+ 3,5 g glicerola, G) Agar+ 6,75 g glicerola, H) Agar+ 13,5 g glicerola, I) Agar + kaolin, J) Agar + lesna moka. Presevnost je prikazana na črtastem papirju.

Preglednica 3.2: Ocenjevanje osnovnih lastnosti biopolimernih kompozitov na osnovi želatine in agarja. Datum ocenjevanja: 10. december 2019.

	20 g želatina + 8,3 g kaolina + 12 g GLI	3 g agar + 8,3 g kaolina + 12 g GLI	20 g želatine + 8,3 g lesne moke + 12 g GLI	3 g agar + 8,3 g lesne moke + 12 g GLI
prozornost	ni	ni	ni	ni
vonj	blagi vonj po želatini, zemeljski vonj po glini	blagi vonj po agarju, zemeljski vonj po glini	vonj po lesu	vonj po lesu
Otip (trdota, prožnost)	trden in prožen	precej trd in prožen	trden in prožen	bolj trd in zmerno prožen
barva	temno beige	porcelanasto beige	temno rjava	svetlo rjava
vlivanje	se lažje vliva, zmerno viskozno, se počasi strjuje	se peni, se težje vliva, viskozno, se hitro strdi	lahko vlivanje, vendar potrebno dobro mešati zaradi lesnih vlaken	zelo viskozno zaradi preveč agarja, se težko vliva, se izjemno hitro strdi
plesen	ni	ni	ni	ni
homogenost	popolna, a se kaolin pri ohlajanju posede	popolna, z drobnimi zračnimi mehurčki velikosti 0,2 mm	homogen, vendar se lesna vlakna posedejo, glicerol močno emulgira (emulzijske kapljice)	homogen, vendar zelo nasičen z lesnimi vlakni

Preglednica 3.3: Zatehta pred omočenjem z vodo in po 8 urnem nabrekanju v vodi in indeks nabrekanja za posamezne biopolimere.

obravnavanje	zatehta suhega polimera (g)	zatehta po omočenosti (g)	indeks nabrekanja (%)
želatina + 3,0 g GLI	0,247	3,85	1459
želatina + 6,0 g GLI	0,493	6,661	1252
želatina + 12,0 g GLI	0,774	7,360	851
želatina + lesna moka	0,760	1,744	129
želatina + kaolin	0,714	3,971	456
agar + 3,5 g GLI	0,080	0,294	269
agar + 6,75 g GLI	0,285	0,485	70
agar + 13,5 g GLI	0,303	0,421	39
agar + lesna moka	0,267	0,547	105
agar + kaolin	0,689	0,961	39



Slika 3.2: Nabrekanje biopolimerov po 8-urnem namakanju v destilirani vodi. **A-E** Biopolimeri na osnovi želatine: A) Želatina + 3 g glicerola, B) Želatina + 6 g glicerola, C) Želatina + 12 g glicerola, D) Želatina + kaolin, E) Želatina + lesna moka, **F-J** Biopolimeri na osnovi agarja: F) Agar+ 3,5 g glicerola, G) Agar+ 6,75 g glicerola, H) Agar+ 13,5 g glicerola, I) Agar + kaolin, J) Agar + lesna moka.

3.2 Odpornost na klorovodikovo kislino

Da bi proučili odpornost biopolimerov na kislino, smo na polimere kanili kapljico 1M klorovodikove kisline (HCl). Pri polimerih na osnovi želatine, na mestu nanosa HCl površina lečasto nabrekne. Grbina je mehkejša od preostale površine. Pri polimerih na osnovi agarja se ne glede na vsebnost glicerola na mestu nanosa HCl pojavi razpoka oz. lezija v obliki črke V. Drugih sprememb na površini nismo opazili (Slika 3.3).

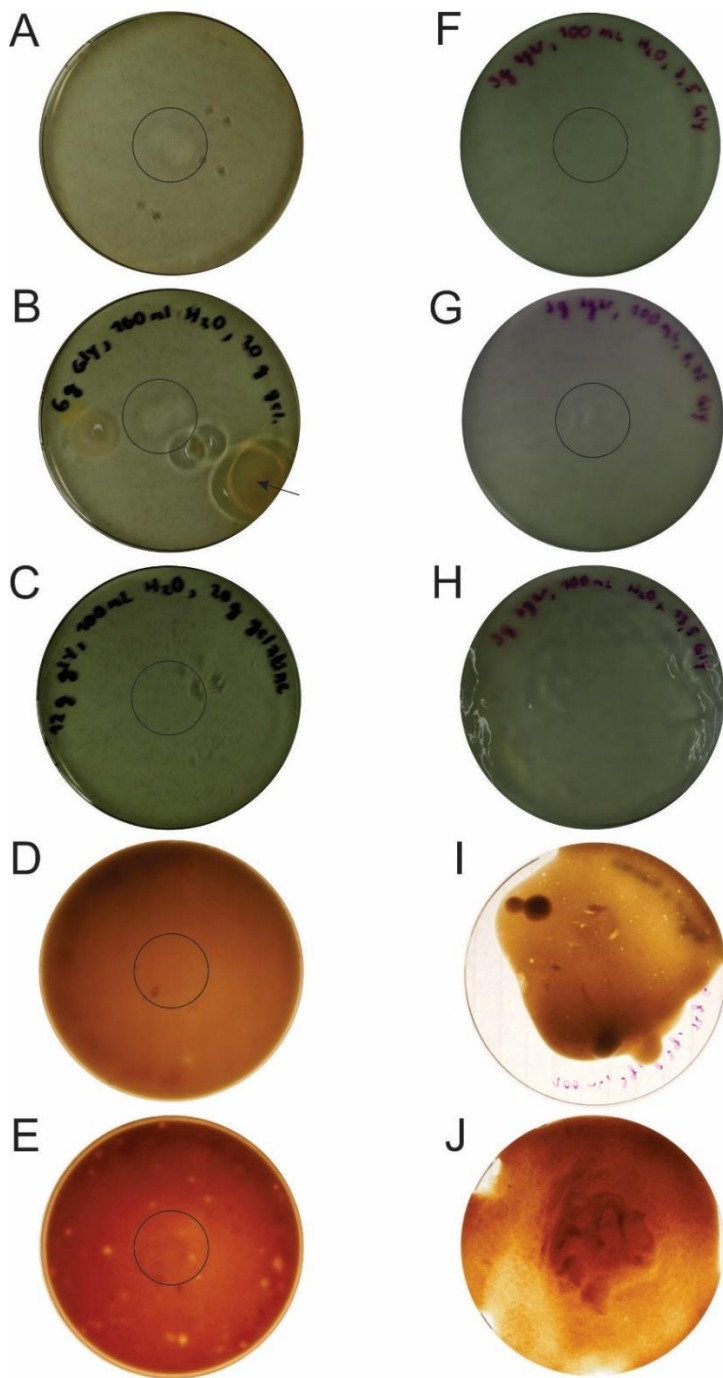
Pri kompozitih iz kaolina na osnovi želatine, smo opazili lečasto izboklino, ki je mehkejša in svetlejša od preostale površine. Biopolimerni kompoziti iz kaolina na osnovi agarja pa so dobro odporni na kislino. Opazna je samo posušena skorja HCl brez površinskih sprememb (Slika 3.3).

Pri kompozitih iz lesne moke na osnovi želatine se pojavi tekoča izboklina HCl, lesna moka se posede. Kompoziti na osnovi agarja iz lesne moke so odporni na HCl, saj ni opaziti sprememb (Slika 3.3).

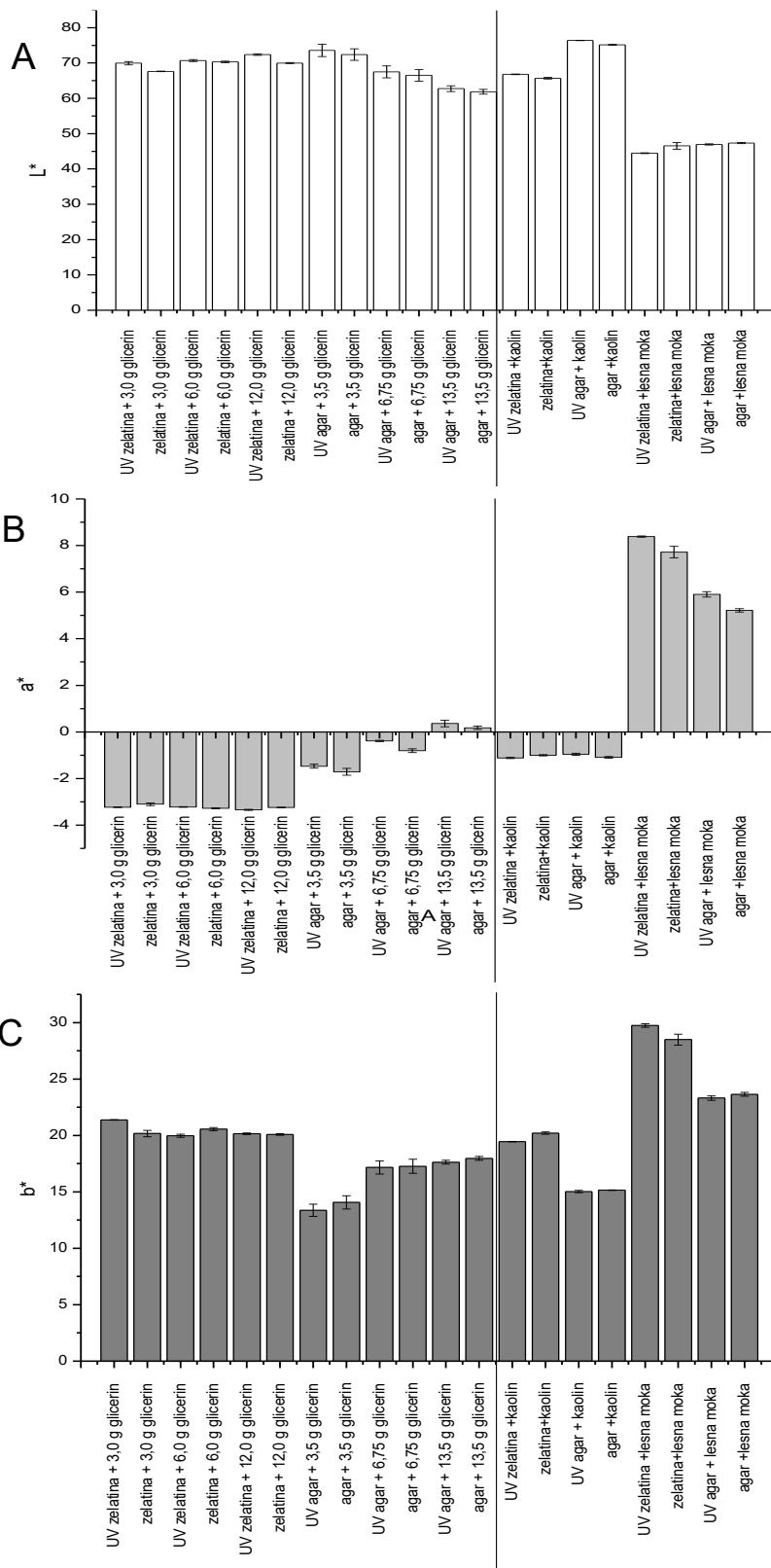
3.3 Odpornost na UV

Odpornost biopolimerov na UV smo vrednotili z merjenjem parametrov barve. Iz prikaza parametra svetlosti L^* (Grafikon 3.1) je razvidno, da vsi polimeri na UV posvetlijo, razen biokompozita lesna moka + želatina in lesna moka + agar potemnita (Grafikon 3.1).

Pri parametru a^* , ki določa lego barve na zeleno-rdeči osi, smo opazili, da kompoziti iz lesne moke po obsevanju z UV najbolj pordečijo, saj se vrednost a^* poviša. Pri parametru b^* , ki določa lego na modro-rumeni osi, prav tako opazamo, da kompozit iz lesne moke na osnovi želatine po UV obsevanju najbolj porumeni, pri polimerih na osnovi agarja pa ni bistvenih sprememb (Grafikon 3.1).



Slika 3.3: Spremembe površine biopolimerov ob nanosu kapljice klorovodikove kisline (HCl). Področje nanosa HCl z vidnimi spremembami je označeno s krogom. A-E Biopolimeri na osnovi želatine: A) Želatina + 3 g glicerola, B) Želatina + 6 g glicerola, C) Želatina + 12 g glicerola, D) Želatina + kaolin, E) Želatina + lesna moka, F-J Biopolimeri na osnovi agarja: F) Agar+ 3,5 g glicerola, G) Agar+ 6,75 g glicerola, H) Agar+ 13,5 g glicerola, I) Agar + kaolin, J) Agar + lesna moka. S puščico je prikazan pojav plesni. Za boljšo vidljivost sprememb smo presevnost dosegli z osvetlitvijo podlage na grafoskopu. Barva polimerov zaradi osvetlitve odstopa.



Grafikon 3.1:

A) Svetlost (L^*) osnovnih in biopolimernih kompozitov po obsevanju z UV svetlobo v primerjavi s kontrolnimi (neobsevanimi) biopolimeri.

B) Parameter a^* , ki izraža prehod iz zelene v rdečo barvo pri osnovnih in biopolimernih kompozitih po obsevanju z UV svetlobo v primerjavi s kontrolnimi (neobsevanimi) biopolimeri.

C) Parameter b^* , ki izraža prehod iz modre v rumeno barvo, pri osnovnih in biopolimernih kompozitih po obsevanju z UV svetlobo v primerjavi s kontrolnimi (neobsevanimi) biopolimeri.

3.4 Odpornost na temperaturo

Polimere smo segrevali pri temperaturi 55 °C tri dni, z namenom da bi materiale hitreje posušili in se izognili okužbi s plesnijo.

Osnovni polimeri na osnovi želatine so se pri segrevanju utekočinili in se nato pri ohlajanju ponovno strdili. Premer se pri tem ni spremenil. Po debelini so se najbolj stanjšali polimeri z največjo vsebnostjo glicerola, najmanj pa z najmanjšo vsebnostjo glicerola. Biopolimeri so plastični, trdi in manj prožni (Preglednica 3.4, Slika 3.4).

Osnovni polimeri na osnovi agarja se pri segrevanju niso utekočinili, ampak samo zmehčali. Premer se je pri tem najbolj skrčil pri najvišji vsebnosti glicerola in najmanj pri srednji vrednosti glicerola. Po debelini se je najmanj stanjšal polimer z najmanjšo vsebnostjo glicerola in najbolj tisti z največjo vsebnostjo glicerola. Biopolimeri so prožni, upogljivi in mehki. (Preglednica 3.4, Slika 3.4).

Pri polimernih kompozitih iz kaolina na osnovi želatine se je med segrevanjem želatina utekočinila, zato se je kaolin posedel, a so polimeri pri ohlajanju spet postali homogeni in trdni. Polimerni kompoziti se po dolžini niso skrčili. Skrčili so se samo po debelini iz prvotnih 3,68 mm na 1,70 mm. So plastični, prožni, lahko se dobro zvijejo v tanki zvitek (Preglednica 3.4, Slika 3.4).

Pri polimernih kompozitih iz lesne moke na osnovi želatine se je želatina med segrevanjem utekočinila. Pri ohlajanju se je želatina znova vezala v kompozit in na dnu ustvarila gladko površino. Glicerol je po segrevanju še vedno emulgiral, kar je vidno v presevnih emulzijskih kapljicah. Polimeri se po dolžini niso skrčili. Po debelini so se skrčili iz prvotnih 2,99 mm na 1,62 mm. Polimeri so prožni in se lahko dobro zvijejo. So homogeni, vendar se na določenih mestih lisasto temno rjavo obarvajo. Opaznih je nekaj zračnih mehurčkov (Preglednica 3.4, Slika 3.4).

Polimerni kompoziti iz kaolina na osnovi agarja se pri temperaturi sušenja niso stalili. Iz prvotnega premera 87,30 mm so se po dolžini skrčili na 66,33 mm. Po debelini so se skrčili iz prvotnih 2,53 mm na povprečno 0,63 mm. Polimeri so bolj prožni, gumijasti in upogljivi. Niso homogeni, saj so porozni na izgled in vidne so grudice (Preglednica 3.4, Slika 3.4).

Polimerni kompoziti iz lesne moke na osnovi agarja se pri temperaturi sušenja niso stalili. Iz prvotnega premera 87,30 mm so se skrčili na 64,43 mm. Po debelini so se stanjšali iz prvotnih 2,92 mm na povprečno 1,07 mm. Polimeri so homogeni, prožni in se lahko dobro zvijejo (Preglednica 3.4, Slika 3.4).

Preglednica 3.4: Vpliv temperature sušenja (55 °C) na povprečni premer in debelino biopolimerov podano v mm.

Obravnavanje	premer 1	premer 2	Δ premer	debelina 1	debelina 2	Δ debelina
želatina+3 g glicerola	87,30	87,30	0,00	2,12	1,38	0,73
želatina+6 g glicerola	87,30	87,30	0,00	2,48	1,25	1,23
želatina+12 g glicerola	87,30	87,30	0,00	3,90	1,13	2,76
agar+3,5 g glicerola	87,30	73,00	14,30	0,87	0,75	0,12
agar+6,75 g glicerola	87,30	76,67	10,63	2,17	1,43	0,73
agar+13,5 g glicerola	87,30	71,00	16,30	2,80	0,62	2,18
želatina + kaolin	87,30	87,30	0,00	3,68	1,70	1,98
želatina + lesna moka	87,30	87,30	0,00	2,99	1,62	1,37
agar + kaolin	87,30	66,33	20,97	2,53	0,63	1,90
agar + lesna moka	87,30	64,43	22,87	2,92	1,07	1,85

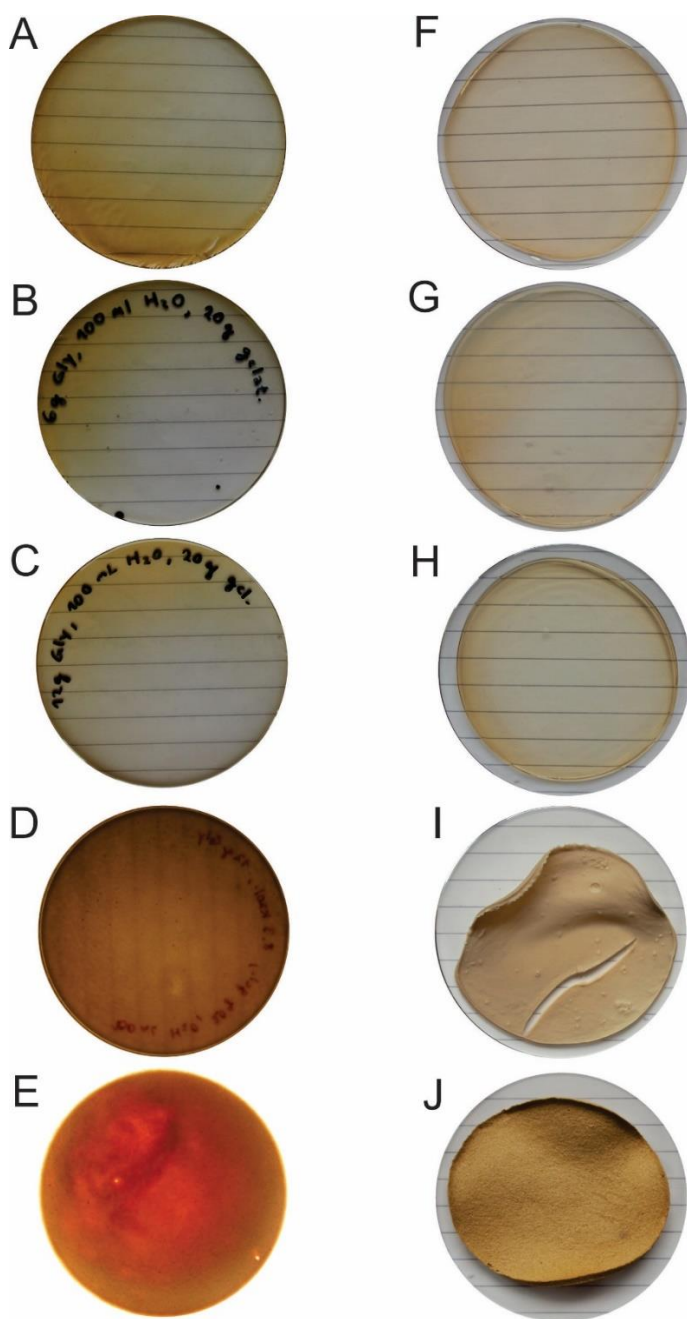
Legenda:

Premer 1 = premer biopolimerov pred sušenjem

Premer 2 = premer biopolimerov po sušenju

Debelina 1 = debelina biopolimerov pred sušenjem

Debelina 2 = debelina biopolimerov po sušenju



Slika 3.4: Spremembe biopolimerov po sušenju na temperaturi 55 °C tri dni. Slika: Osnovni biopolimeri in biopolimerni kompoziti po vlijanju. A-E Biopolimeri na osnovi želatine: A) Želatina + 3 g glicerola, B) Želatina + 6 g glicerola, C) Želatina + 12 g glicerola, D) Želatina + kaolin, E) Želatina + lesna moka, F-J Biopolimeri na osnovi agarja: F) Agar+ 3,5 g glicerola, G) Agar+ 6,75 g glicerola, H) Agar+ 13,5 g glicerola, I) Agar + kaolin, J) Agar + lesna moka. Prosojnost je prikazana na črtastem papirju.

3.5 Rezultati preizkusa natezne trdnosti

Pri nateznem preizkusu smo merili dolžino preizkušancev med obremenjevanjem. Na podlagi teh rezultatov smo izračunali spremembo dolžine, raztezek in natezno trdnost. Da bi lahko izračunali spremembo dolžine in raztezek materialov, smo pri vsaki obremenitvi najprej izmerili dolžino preizkušancev med obema vpetjema (Preglednica 3.5).

3.5.1 Sila ob prelomu

Z večanjem vsebnosti glicerola pri polimerih na osnovi želatine smo prelom opazili pri nižji obremenitvi in sicer polimer na osnovi želatine z najnižjo vsebnostjo glicerola je ob prelomu dosegel silo 5,23 N, z najvišjo pa 3,13 N. Največjo obremenitev ob prelomu je dosegel polimerni kompozit iz kaolina na osnovi želatine in sicer 6,13 N. Polimer iz lesne moke na osnovi želatine se je prelomil ob sili 3,43 N (Preglednica 3.5).

Prav tako, smo z večanjem vsebnosti glicerola pri polimerih na osnovi agarja prelom opazili pri nižji obremenitvi, in sicer polimer na osnovi agarja z najnižjo vsebnostjo glicerola je ob prelomu dosegel silo 5,23 N, z najvišjo pa 3,43 N. Najmanjšo obremenitev ob prelomu 1,63 N je vzdržal polimerni kompozit iz kaolina na osnovi agarja. Prav tako majhno silo ob prelomu je vzdržal kompozit iz lesne moke in sicer le 2,23 N (Preglednica 3.5).

3.5.2 Raztezek in sprememba dolžine pred prelomom

Polimer na osnovi želatine s 3 g glicerola je pred prelomom dosegel obremenitev 4,93 N, pri tem pa se je raztegnil za 13,82 % ($\Delta l = 7,6$ mm). Z dodajanjem glicerola sta se raztezek in sprememba dolžine večala, pri tem pa smo dosegli manjšo vzdržljivost ob obremenitvi. Najvišji raztezek 250,91 % ($\Delta l = 138$ mm) smo dosegli le ob obremenitvi 2,8 N pri polimeru z 12 g glicerola. Polimer iz kaolina na osnovi želatine je ob največji obremenitvi 5,83 N dosegel raztezek 40,55 % ($\Delta l = 22,30$ mm). Polimer iz lesne moke na osnovi želatine pa je dosegel ob obremenitvi 3,13 N raztezek 13,82 % ($\Delta l = 7,6$ mm) (Preglednica 3.6, Preglednica 3.7).

Polimer na osnovi agarja s 3,5 g glicerola je glede na vse polimere na osnovi agarja pred prelomom dosegel največjo obremenitev 4,93 N in se pri tem raztegnil za 18,36 % ($\Delta l = 10,1$ mm). Z dodajanjem glicerola sta se raztezek in sprememba dolžine večala, pri tem pa smo dosegli manjšo

vzdržljivost ob obremenitvi. Najvišji raztezek 88,36 % ($\Delta l = 48,6$ mm) smo dosegli ob obremenitvi 3,13 N pri polimeru z 13,5 g glicerola. Polimerni kompozit iz kaolina je pred prelomom ob najmanjši obremenitvi 1,33 N dosegel najmanjši raztezek 1,09 % ($\Delta l = 0,6$ mm). Prav tako majhen raztezek ob sili 1,93 N je dosegel kompozit iz lesne moke, in sicer 12,18 % ($\Delta l = 6,7$ mm) (Preglednica 3.6., Preglednica 3.7).

3.5.3 Natezna trdnost pred prelomom

Zanimala nas je mehanska trdnost materialov, zato smo izračunali kako trdni so materiali pri določenih presekih. Pri polimerih na osnovi želatine se z večanjem vsebnosti glicerola natezna trdnost manjša, in sicer smo pri polimeru z najnižjo vsebnostjo glicerola izračunali natezno trdnost $0,71 \text{ N/cm}^2$, z najvišjo pa $0,5 \text{ N/cm}^2$. Najmanjšo natezno trdnost je imel kompozit iz lesne moke in sicer $0,38 \text{ N/cm}^2$. Najbolj vzdržljiv polimer iz kaolina je dosegel natezno trdnost $0,68 \text{ N/cm}^2$ (Preglednica 3.8).

Polimer na osnovi agarja z najmanjšo vsebnostjo glicerola je imel največjo natezno trdnost $1,31 \text{ N/cm}^2$. Visoko natezno trdnost je dosegel tudi polimer z največjo vsebnostjo glicerola in sicer $1,00 \text{ N/cm}^2$. Najmanjšo natezno trdnost je imel kompozit iz lesne moke in sicer $0,36 \text{ N/cm}^2$. Najmanj vzdržljiv kompozit iz kaolina je dosegel natezno trdnost $0,41 \text{ N/cm}^2$ (Preglednica 3.8).

Preglednica 3.5: Dolžina preizkušancev (mm) pri obremenitvi.

Sila (N)	želatina + 3,0 g GLI (mm)	želatina + 6,0 g GLI (mm)	želatina + 12,0 g GLI(mm)	želatina + kaolin (mm)	želatina + lesna moka (mm)
1,33	55,00	66,00	120,00	58,00	55,00
1,63	55,00	80,00	132,00	60,00	58,00
1,93	55,30	85,00	155,20	64,00	60,00
2,23	57,00	85,00	174,00	64,00	62,00
2,53	58,00	99,00	177,20	64,00	62,20
2,83	61,00	104,00	193,00	64,20	62,50
3,13	61,20	110,00	PRELOM	64,50	62,60
3,43	61,20	116,00		66,00	PRELOM
3,73	61,40	122,00		66,70	
4,03	62,00	125,00		68,00	
4,33	62,20	130,00		69,20	
4,63	62,20	PRELOM		71,00	
4,93	62,60			73,30	
5,23	PRELOM			73,00	
5,53				74,10	
5,83				77,30	
6,13				PRELOM	
Sila (N)	agar + 3,5 g GLI (mm)	agar + 6,75 g GLI (mm)	agar + 13,5 g GLI (mm)	agar + kaolin (mm)	agar + lesna moka (mm)
1,33	55,30	62,90	66,90	55,60	56,20
1,63	55,90	69,40	71,20	PRELOM	59,00
1,93	56,40	74,80	77,40		61,70
2,23	56,40	78,10	84,40		PRELOM
2,53	56,60	79,60	88,90		
2,83	58,70	80,30	96,60		
3,13	58,70	80,90	103,60		
3,43	58,70	82,10	PRELOM		
3,73	58,70	83,40			
4,03	58,70	83,90			
4,33	61,70	PRELOM			
4,63	64,50				
4,93	65,10				
5,23	PRELOM				

Preglednica 3.6: Sprememba dolžine Δl preizkušancev (mm) pri obremenitvi.

Sila (N)	želatina + 3,0 g GLI (mm)	želatina + 6,0 g GLI (mm)	želatina + 12,0 g GLI (mm)	želatina + kaolin (mm)	želatina + lesna moka (mm)
1,33	0,00	11,00	65,00	3,00	0,00
1,63	0,00	25,00	77,00	5,00	3,00
1,93	0,30	30,00	100,20	9,00	5,00
2,23	2,00	30,00	119,00	9,00	7,00
2,53	3,00	44,00	122,20	9,00	7,20
2,83	6,00	49,00	138,00	9,20	7,50
3,13	6,20	55,00	PRELOM	9,50	7,60
3,43	6,20	61,00		11,00	PRELOM
3,73	6,40	67,00		11,70	
4,03	7,00	70,00		13,00	
4,33	7,20	75,00		14,20	
4,63	7,20	PRELOM		16,00	
4,93	7,60			18,30	
5,23	PRELOM			18,00	
5,53				19,10	
5,83				22,30	
6,13				PRELOM	
Sila (N)	agar + 3,5 g GLI (mm)	agar + 6,75 g GLI (mm)	agar + 13,5 g GLI (mm)	agar + kaolin (mm)	agar + lesna moka (mm)
1,33	0,30	7,90	11,90	0,60	1,20
1,63	0,90	14,40	16,20	PRELOM	4,00
1,93	1,40	19,80	22,40		6,70
2,23	1,40	23,10	29,40		PRELOM
2,53	1,60	24,60	33,90		
2,83	3,70	25,30	41,60		
3,13	3,70	25,90	48,60		
3,43	3,70	27,10	PRELOM		
3,73	3,70	28,40			
4,03	3,70	28,90			
4,33	6,70	PRELOM			
4,63	9,50				
4,93	10,10				
5,23	PRELOM				

Preglednica 3.7: Raztezek ε preizkušancev (%) pri obremenitvi.

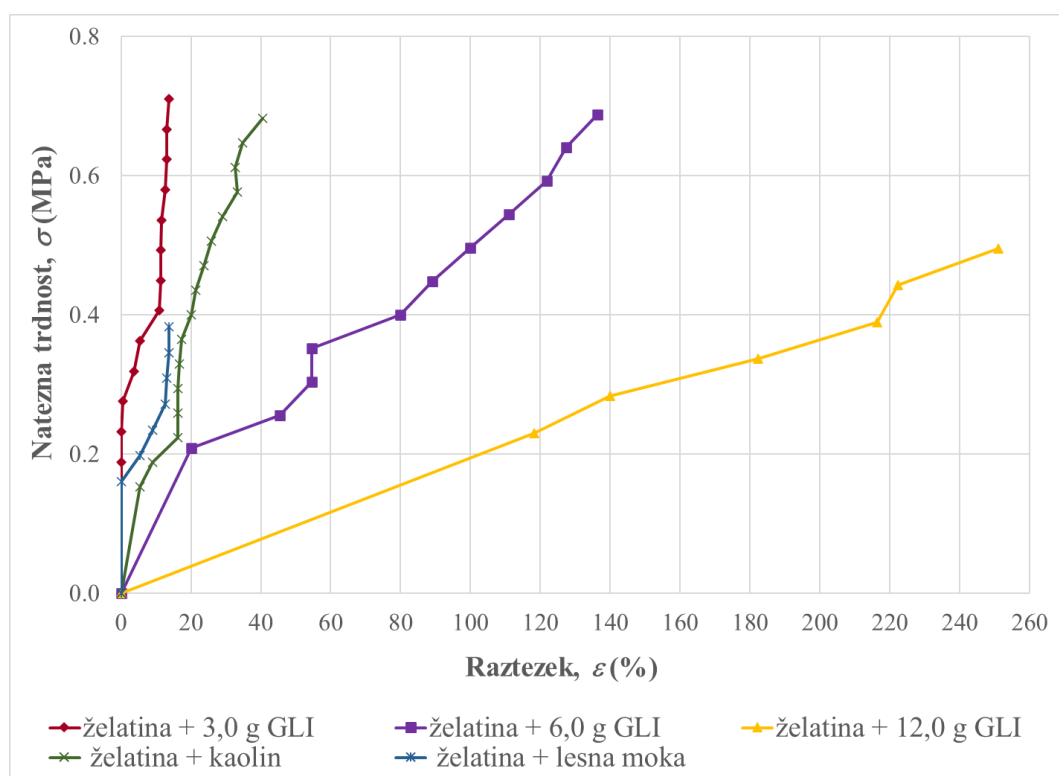
Sila (N)	želatina + 3,0 g GLI (%)	želatina + 6,0 g GLI (%)	želatina + 12,0 g GLI (%)	želatina + kaolin (%)	želatina + lesna moka (%)
1,33	0,00	20,00	118,18	5,45	0,00
1,63	0,00	45,45	140,00	9,09	5,45
1,93	0,55	54,55	182,18	16,36	9,09
2,23	3,64	54,55	216,36	16,36	12,73
2,53	5,45	80,00	222,18	16,36	13,09
2,83	10,91	89,09	250,91	16,73	13,64
3,13	11,27	100,00	PRELOM	17,27	13,82
3,43	11,27	110,91		20,00	PRELOM
3,73	11,64	121,82		21,27	
4,03	12,73	127,27		23,64	
4,33	13,09	136,36		25,82	
4,63	13,09	PRELOM		29,09	
4,93	13,82			33,27	
5,23	PRELOM			32,73	
5,53				34,73	
5,83				40,55	
6,13				PRELOM	
Sila (N)	agar + 3,5 g GLI (%)	agar + 6,75 g GLI (%)	agar + 13,5 g GLI (%)	agar + kaolin (%)	agar + lesna moka (%)
1,33	0,55	14,36	21,64	1,09	2,18
1,63	1,64	26,18	29,45	PRELOM	7,27
1,93	2,55	36,00	40,73		12,18
2,23	2,55	42,00	53,45		PRELOM
2,53	2,91	44,73	61,64		
2,83	6,73	46,00	75,64		
3,13	6,73	47,09	88,36		
3,43	6,73	49,27	PRELOM		
3,73	6,73	51,64			
4,03	6,73	52,55			
4,33	12,18	PRELOM			
4,63	17,27				
4,93	18,36				
5,23	PRELOM				

Preglednica 3.8: Natezna trdnost preizkušancev (MPa) pri obremenitvi.

Sila (N)	želatina + 3,0 g GLI	želatina + 6,0 g GLI	želatina + 12,0 g GLI	želatina + kaolin	želatina + lesna moka
1,33	0,19	0,21	0,23	0,15	0,16
1,63	0,23	0,26	0,28	0,19	0,20
1,93	0,28	0,30	0,34	0,22	0,23
2,23	0,32	0,35	0,39	0,26	0,27
2,53	0,36	0,40	0,44	0,29	0,31
2,83	0,41	0,45	0,50	0,33	0,35
3,13	0,45	0,50	PRELOM	0,36	0,38
3,43	0,49	0,54		0,40	PRELOM
3,73	0,54	0,59		0,44	
4,03	0,58	0,64		0,47	
4,33	0,62	0,69		0,51	
4,63	0,67	PRELOM		0,54	
4,93	0,71			0,58	
5,23	PRELOM			0,61	
5,53				0,65	
5,83				0,68	
6,13				PRELOM	
Sila (N)	agar + 3,5 g GLI	agar + 6,75 g GLI	agar + 13,5 g GLI	agar + kaolin	agar + lesna moka
1,33	0,35	0,18	0,42	0,41	0,24
1,63	0,43	0,22	0,52	PRELOM	0,30
1,93	0,51	0,27	0,61		0,36
2,23	0,59	0,31	0,71		PRELOM
2,53	0,67	0,35	0,81		
2,83	0,75	0,39	0,90		
3,13	0,83	0,43	1,00		
3,43	0,91	0,48	PRELOM		
3,73	0,99	0,52			
4,03	1,07	0,56			
4,33	1,15	PRELOM			
4,63	1,23				
4,93	1,31				
5,23	PRELOM				

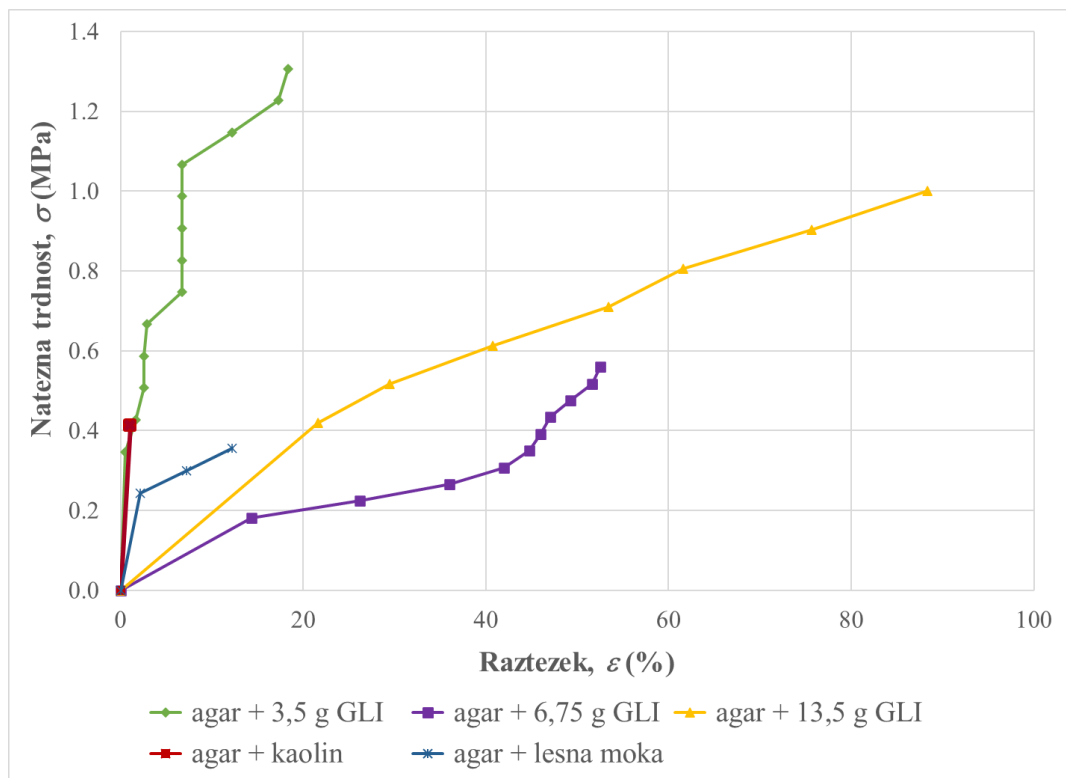
3.5.4 Primerjava natezne trdnosti in raztezka polimerov ob obremenitvi

Pri polimerih na osnovi želatine smo opazili, da se z dodajanjem vsebnosti glicerola, natezna trdnost manjša, raztezek pa večja. Polimerni kompozit iz kaolina na osnovi želatine ima zmerni raztezek in visoko natezno trdnost. Kompozit iz lesne moke na osnovi želatine ima med vsemi polimeri na osnovi želatine najmanjšo natezno trdnost in hkrati majhen raztezek. Največji raztezek ob dokaj visoki natezni trdnosti smo izračunali pri polimeru z najvišjo vsebnostjo glicerola (Grafikon 3.2, Preglednica 3.9).



Grafikon 3.2: Primerjava natezne trdnosti in raztezka preizkušancev na osnovi želatine.

Pri polimerih na osnovi agarja smo opazili, da se z dodajanjem vsebnosti glicerola raztezek večja. To pa ne velja za natezno trdnost, ki je najmanjša pri polimeru na osnovi agarja s 6,75 g glicerola. Biopolimerni kompozit iz kaolina na osnovi agarja ima manjšo natezno trdnost in med vsemi polimeri najmanjši raztezek (glej zvezdico, Grafikon 3.3). Kompozit iz lesne moke je dosegel najnižjo natezno trdnost in manjši raztezek. Največji raztezek ob dokaj visoki natezni trdnosti smo izračunali pri polimeru z najvišjo vsebnostjo glicerola (Grafikon 3.3, Preglednica 3.9).



Grafikon 3.3: Primerjava natezne trdnosti in raztezka preizkušancev na osnovi agarja.

Preglednica 3.9: Pregled natezne trdnosti, raztezka in sile ob prelomu ter opažanja materialov.

Preizkušanec	natezna trdnost ob prelomu (MPa)	Raztezek (%)	sila ob prelomu (N)
želatina + 3,0 g GLI	0,71	13,82	5,23
želatina + 6,0 g GLI	0,69	136,36	4,63
želatina + 12,0 g GLI	0,50	250,91	3,13
želatina + lesna moka	0,38	13,82	3,43
želatina + kaolin	0,68	40,55	6,13
agar + 3,5 g GLI	1,31	18,36	5,23
agar + 6,75 g GLI	0,56	52,55	4,33
agar + 13,5 g GLI	1,00	88,36	3,43
agar + lesna moka	0,36	12,18	2,23
agar + kaolin	0,41	1,09	1,63

4 RAZPRAVA

V okviru raziskovalne naloge smo izdelali biopolimere na osnovi želatine in agarja z različno vsebnostjo glicerola in njihove kompozite. V nadaljevanju na podlagi širokega pregleda literature razpravljamo njihove osnovne značilnosti, omočljivost z vodo, odpornost na kislino, UV svetlobo, temperaturo sušenja in fizikalne lastnosti.

4.1 Osnovne značilnosti

Vsi biopolimeri razen biokompozitov so prozorni in so prozornost ohranili tudi po segrevanju na 55 °C. To prinaša prednost pri izdelavi embalaže, ki zahteva vidljivost svoje vsebine. Polimerom bi lahko olepšali barvo z dodatkom naravnega barvila kot je na primer barvilo sladkorne pese, kurkume itd. Polimeri nimajo posebnega vonja, tako jih ni potrebno prikrivati s posebnimi dišavami, lahko pa bi jih vseeno dodali.

Pri polimerih na osnovi želatine smo opazili plesen, ki se je večinoma pojavila že po treh dneh. Na mestu okužbe se je želatina raztopila. Nastala je vdolbina. To je dokaz, da proteine razgrajujejo hidrolizni encimi in peroksidaze, ki jih proizvajajo glive (Rudnik 2007). Polimeri na osnovi agarja po tednu sušenja pri sobni temperaturi niso kazali okužb, zato lahko zaključimo, da so bolj odporni na razgradnjo z mikroorganizmi.

Eden izmed ključnih lastnosti biopolimerov z vidika uporabnosti je njihova omočljivost. Nabrekanje je sprejemanje vode v polimerno strukturo zaradi hidrofilnih lastnosti beljakovinskih vlaken v želatini oz. polisaharidih v agarju, ki je še dodatno povečano s kapilarnostjo med vlakni (Batič, in drugi 2011). Osnovnim biopolimerom se indeks nabrekanja z večanjem glicerola manjša, kar sicer ni v skladu z navedbami nekaterih avtorjev (Ahmadi, in drugi 2012), ki trdijo, da glicerol zaradi svoje hidrofilnosti še bolj veže vodo na polimer. Naše mnenje je, da glicerol že zapolnjuje mesta z hidroksilnimi vezmi in tako preprečuje, da bi se voda vezala na polimer. Biokompozit iz kaolina na osnovi želatine močno nabrekne po dolžini in širini in se kačasto ter cevasto zvije. Polimer iz kaolina na osnovi agarja vidno bistveno ne nabrekne. Kompozita iz lesne moke na osnovi želatine in agarja le malo nabrekmeta. Na podlagi rezultatov lahko zaključimo, da so biopolimeri na osnovi agarja manj omočljivi in zato bolj odporni na vodo. Kompozite bi lahko

uporabljali za posodo v zamenjavo za plastično posodo. Polimeri na osnovi želatine so manj primerni za izdelavo embalaže, ki pride v stik s tekočino.

4.2 Odpornost na klorovodikovo kislino

Pri polimerih na osnovi želatine na mestu nanosa HCl površina lečasto nabrekne. Grbina je mehkejša od preostale površine. To nakazuje, da so biopolimeri na osnovi želatine precej občutljivi na kislino. Beljakovina zgubi svoje lastnosti in ne more več opravljati svoje biološke funkcije. Denaturirana beljakovina se obori iz vodne raztopine, kar imenujemo koagulacija ali sesirjanje beljakovine (Dolenc, Graunar in Modec 2017).

Pri polimerih na osnovi agarja se ne glede na vsebnost glicerola na mestu nanosa HCl pojavi razpoka oz. lezija v obliki črke V. Drugih sprememb na površini nismo opazili, zato lahko zaključimo, da so polimeri na osnovi agarja odporni na kislino. Uporabimo jih lahko v proizvodnji embalaže za sadje z visoko vsebnostjo kisline, kot so agrumi, in za laboratorijske rokavice za delo s kislinami.

4.3 Odpornost na UV

Pri polimerih nismo opazili vidnih sprememb morda zato, ker smo jih obsevali z UV le tri dni, vendar smo spremembe izmerili z instrumentom za merjenje barve. Polimeri so ne glede na obravnavanje posvetlili, razen polimeri iz lesne moke kažejo potemnitev. Podobno opažamo, da so kompoziti iz lesne moke na osnovi agarja pordečeli, na osnovi želatine pa porumeneli. Sklepamo lahko, da so kompoziti iz lesne moke najmanj odporni na UV, ker so v njem prisotne molekule rastlinskih barvil, ki se ob sprejetju UV svetlobe vzbudijo in razgradijo, kar je vidno kot sprememba barve (Yousif in Haddad 2013). Če bi poskus ponovili, bi bilo ključno polimere izpostaviti UV svetlobi dlje časa, da bi lažje ocenili njihovo odpornost na UV. Naši rezultati sovpadajo z navedbami drugih avtorjev, da so polimeri iz lesne moke na osnovi agarja občutljivi na UV. V raziskavi so avtorji polimere obsevali 30 dni in ugotovili spremembe v masi, obliki in mehanski trdnosti polimerov, ki kažejo na razpad materiala (Suwon University (Biosystem Lab) 2020).

4.4 Odpornost na temperaturo

Med sušenjem na temperaturi 55 °C smo opazili, da so se polimeri na osnovi želatine utekočinili, medtem ko se polimeri na osnovi agarja niso. Temperatura, pri kateri se prične želatina taliti je okoli 40 °C, pri tem se verige razcepijo in ponovno vzpostavijo v želatinasto strukturo, kar je ključna lastnost želatine (Hayashi in Oh 1983). Agar se utekočini pri temperaturi med 95 °C in 100 °C (Ambrožič Dolinšek 2017).

Pri vplivu temperature sušenja na biopolimere na osnovi želatine se polimeri po premeru niso skrčili, medtem ko so se polimeri na osnovi agarja skrčili. Pri visokih temperaturah se namreč lahko verige polimera razcepijo in medsebojno reagirajo tako, da spremenijo lastnosti polimera, kar vidimo kot krčenje, spremembo barve in razpoke (Pathak in Navneet 2017). Biopolimeri na osnovi želatine so bili po segrevanju trdi in plastični, na osnovi agarja pa mehki in elastični. Iz rezultatov lahko zaključimo, da so polimeri na osnovi želatine primernejši za izdelavo materialov, za katere je ključno, da ohranijo velikost in so trdi. Uporabimo jih lahko na primer za embalažo za jagodičevje, saj hkrati predstavljajo zelo zdrav primer za embalažo sadja. Za polimere iz želatine je splošno znano, da so obetavni v razvoju biorazgradljive embalaže, saj jih je možno nanašati v tanko plast, imajo dobro odpornost na pline in olja, niso zdravju škodljivi ter so poceni materiali, ki so popolnoma razgradljivi (Neelam, in drugi 2018), (Iwata 2015). Slaba lastnost je zgoraj omenjen visok indeks omočljivosti in občutljivost na HCl, zato so bolj obetavni kot kompoziti.

Biopolimeri na osnovi agarja po segrevanju ne bi bili uporabni za embalažo, kjer je potrebna trdnost in ohranjanje oblike, vendar pa so ti elastični in zato primerni za izdelavo elastičnih materialov kot so gumice, laboratorijske rokavice ali folije za živila, kjer je možna izredna nateznost in prozornost.

4.5 Preizkus natezne trdnosti

Pri polimerih na osnovi želatine smo opazili, da se z dodajanjem vsebnosti glicerola, natezna trdnost manjša, raztezek pa večja. Pri najnižji vsebnosti glicerola je bil material sicer trden in plastičen, a zelo krhek in lomljiv. Zaradi teh lastnosti ga ne moramo uporabiti za izdelavo platenk, lahko pa ga uporabimo za izdelavo plastičnega pribora. Ker je jantarjevega izgleda, se lahko uporablja za nakit. Polimera z višjo vsebnostjo glicerola sta bolj obetavna, saj sta raztegljiva in prožna, na kar nakazuje nizka natezna trdnost in visok raztezek. Uporabimo ju lahko za izdelavo folij za živila in gumic. Avtorji navajajo tudi uporabo le teh kot kompozitov v medicinske namene,

na primer za biorazgradljive povoje in širše v regenerativni medicini (Mukhopadhyay 2017). Polimerni kompozit iz kaolina na osnovi želatine se je izkazal v vseh fizikalnih lastnostih. Je prožen, raztegljiv z zmernim raztežkom, visoko natezno trdnostjo in od vseh polimerov največjo silo ob prelomu, ki je znašala 6,13 N. Zaradi teh lastnosti je primeren za izdelavo gumic, za vezanje sadnega drevja, vinske trte in cepljenje dreves v kmetijstvu, kjer je ključna visoka natezna trdnost in manjši raztezek. Kompozit iz lesne moke na osnovi želatine je precej upogibljiv in prožen. Med vsemi polimeri na osnovi želatine ima najmanjšo natezno trdnost. Njegov raztezek je enak raztežku polimera s 3 g glicerola. Sila ob prelomu je približno enaka sili polimera z najvišjo vsebnostjo glicerola. Z nizko vsebnostjo glicerola bi kompozit iz lesne moke bil uporaben za izdelavo bioplastične posode.

Pri polimerih na osnovi agarja smo opazili, da se z dodajanjem vsebnosti glicerola raztezek večja. To pa ne velja za natezno trdnost, ki je najmanjša pri polimeru na osnovi agarja s 6,75 g glicerola. Polimeri z glicerolom so zelo upogibljivi in prožni, vendar je polimer z najvišjo vsebnostjo glicerola precej masten, kar nakazuje izpad glicerola. Polimera z nižjo vsebnostjo glicerola lahko uporabimo za izdelavo folij za živila, rokavic, gumic, biofilmov za tablete in sadje. Biopolimerni kompozit iz kaolina na osnovi agarja je najmanj obetaven z vidika manjše natezne trdnosti in med vsemi najmanjšega raztežka. Po pregledu literature smo ugotovili, da je ta kompozit primeren za izdelavo membran v kemijske namene, saj izkazuje visoko poroznost in visoko odpornost na kisline (Lertwittayanon 2018). Kompozit iz lesne moke je upogibljiv in ima papirnato strukturo. Po natezni trdnosti in raztežku je slab. Vzdrži tudi zelo majhne obremenitve. Avtorji navajajo, da s primesjo lesne moke biopolimeri na osnovi agarja pridobijo boljše mehansko trdnost in boljše odpornost na mikroorganizme (Suwon University (Biosystem Lab) 2020). Imajo potencial uporabe za izdelavo bioplastične posode, vendar z bolj nizko vsebnostjo glicerola.

Če primerjamo osnovne polimere na osnovi želatine s polimeri na osnovi agarja ugotovimo, da imajo biopolimeri na osnovi agarja večjo natezno trdnost, a manjši raztezek. Sile ob prelomu so približno enake. Če pa primerjamo kompozite na osnovi želatine s kompoziti na osnovi agarja, ugotovimo, da so kompoziti na osnovi želatine v vseh fizikalnih lastnostih boljši od agarja.

5 ZAKLJUČEK

Ugotovili smo, da imajo osnovni polimeri iz želatine veliko prednosti, ker so prozorni, kar prinaša prednosti za izdelavo preseвне embalaže. So dokaj trdni, njihova prožnost narašča z večjim deležem glicerola. So homogeni, se dobro vlivajo in so odporni na UV svetlobo pri vseh parametrih barve. Pri sušenju se v primerjavi s polimeri na osnovi agarja skrčijo samo po debelini in ne po premeru. Z večanjem vsebnosti glicerola smo izmerili izjemne raztezke, vendar se je natezna trdnost zmanjšala in prelom smo dosegli pri nižji obremenitvi. Slabosti osnovnih polimerov na osnovi želatine so, da v vodi močno nabreknejo in niso odporni na HCl, saj se zmeščajo v obliki lečaste izbokline. Po enem tednu polimeri na zraku plesnijo, zato priporočamo, da se jih suši v sušilcu na temperaturi 55 °C.

Kompoziti z želatino prinašajo polimerom več prednosti, saj so bolj trdni, homogeni, po enem tednu na zraku ne plesnijo, se lažje vlivajo, so dokaj odporni na UV z manjšimi spremembami pri parametrih barve. Največ sprememb je vidnih pri kompozitu iz lesne moke. Po segrevanju se skrčijo samo po debelini. To prinaša veliko prednosti pri izdelavi materialov, ker so polimeri tanki, gladki in svetleči, zelo elastični in predvsem pri kompozitu iz kaolina dosegajo visoko silo ob zmernem raztežku in natezni trdnosti. Slabosti kompozitov na osnovi želatine so, da so slabše odporni na HCl in v stiku z vodo močno nabreknejo.

Številne prednosti smo ugotovili tudi pri polimerih na osnovi agarja, ki se precej razlikujejo od polimerov na osnovi želatine. Prednosti so, da po enem tednu na zraku ne plesnijo in so odporni na kislino. So homogeni in dokaj odporni na UV svetlobo. V primerjavi z želatino dosegajo večjo natezno trdnost, a manjši raztežek ob višji vsebnosti glicerola. V stiku z vodo nabreknejo manj kot želatina, pri sušenju pa se skrčijo po debelini in premeru.

Kompoziti z agarjem prinašajo polimerom prednosti, ker so trdi, po enem tednu na zraku ne plesnijo, so homogeni, razen polimer iz kaolina, ki je porozen. Nadalje so odporni na kislino in UV, razen polimer iz lesne moke, ki precej pordeči. Po segrevanju so prožni in upogljivi. Slabosti le-teh pa so, da niso prozorni, se težje vlivajo, vzdržijo nižjo natezno trdnost in obremenitev ter se po segrevanju skrčijo tudi po dolžini oz. premeru. Z vidika nabrekanja v vodi so kompoziti na osnovi agarja bolj primerni kot kompoziti na osnovi želatine, saj imajo manjši indeks nabrekanja.

Na podlagi naših raziskav lahko potrdimo oz. ovržemo naslednje hipoteze:

H1: »Možno je izdelati bioplastične materiale, ki bi imeli dobre fizikalne in kemijske lastnosti, kot nadomestilo klasičnim polimernim materialom.« **POTRDIMO.**

V raziskavi smo dokazali, da so polimeri na osnovi želatine in agarja obetavni materiali z vidika kemijskih in fizikalnih lastnosti. Glede na dobljene rezultate smo analizirali možnost uporabe le-teh v različnih proizvodnih panogah.

H2: »Večja vsebnost glicerola bo izboljšala raztezek polimera.« **POTRDIMO.**

Z večanjem vsebnosti glicerola smo pri vseh polimerih dosegli visok raztezek, s tem pa manjšo vzdržljivost ob obremenitvi in manjšo natezno trdnost.

H3: »Biopolimerni materiali na osnovi agarja bodo med raziskovanimi materiali glede na, odpornost na vodo, kislino, temperaturo in UV primernejši od polimerov na osnovi želatine.« **DELNO POTRDIMO.**

Biopolimeri na osnovi agarja imajo številne prednosti, so bolj odporni na klorovodikovo kislino, saj ob nanosu ne kažejo površinskih sprememb. Nadaljnja prednost je, da imajo polimeri na osnovi agarja nižji indeks omočljivosti, in da se talijo pri višji temperaturi kot polimeri na osnovi želatine. Slabost je, da se po segrevanju polimeri na osnovi agarja skrčijo po debelini in dolžini. Po obsevanju z UV svetlobo nekoliko posvetlijo, kompozit iz lesne moka pordeči.

H4: »Polimeri na osnovi agarja z najvišjo vsebnostjo glicerola bodo imeli manjšo natezno trdnost in večji raztezek kot na osnovi želatine.« **OVRŽEMO.**

Pri polimerih na osnovi agarja smo ob prelomu izmerili večjo natezno trdnost in manjši raztezek v primerjavi s polimerom na osnovi želatine s 12 g glicerola, pri katerem smo izmerili kar 250 % raztezek. Obremenitev ob prelomu je bila pri obeh polimerih enaka.

H5: »Ob dodatku utrjevalcev, kot so lesna moka in kaolin bodo biopolimeri manj elastični, vendar odpornejši na kislino, temperaturo sušenja in UV.« **DELNO POTRDIMO.**

Dokazali smo, da imajo kompoziti na osnovi želatine in agarja ob prelomu manjši raztezek. Odpornost na kislino in temperaturo sušenja je odvisna od osnovne sestave. Kompoziti na osnovi želatine so bolj občutljivi na kislino. Kompoziti na osnovi agarja se po sušenju skrčijo. Kompoziti

iz lesne moke so bili najbolj občutljivi na UV, saj so pri polimerih osnovi želatine porumeneli, na osnovi agarja pa pordečeli.

Na podlagi naših raziskav lahko zaključimo, da so biopolimeri na osnovi želatine in agarja obetavni materiali za vsestransko uporabo v proizvodnji embalaže, živilski, farmacevtski in kemijski industriji. Vse te panoge si prizadevajo uveljaviti biopolimerne materiale z namenom zmanjšati porabo fosilnih virov in količino odpadkov, s čimer bi se zmanjšalo breme na okolje.

6 UPOŠTEVANJE DRUŽBENE ODGOVORNOSTI

Zanimanje družbe za okoljsko ozaveščenost vedno bolj narašča in s tem povpraševanje po trajnostnih, okolju prijaznejših plastičnih materialih in izdelkih iz naravnih surovin. V nalogi smo raziskovali nove možnosti proizvodnje biopolimernih materialov, s katerimi bi zmanjšali količino nastalih odpadkov in s tem posledično pozitivno vplivali na okolje. Z raziskavo želimo prispevati k reševanju problematike zmanjševanja odvisnosti družbe od uporabe plastike iz fosilnih virov. Predstavljena naloga je skladna z načelom *odgovornosti za vpliv*, saj spodbuja trajnostni razvoj, krožno gospodarstvo in družbeno odgovorno ravnanje z okoljem.

7 BIBLIOGRAFIJA

- Ahmadi, R., A. Kalbasi-Ashtari, A. Oromiehie, M. S. Yarmand, in F. Jahandideh. „Development and characterization of a novel biodegradable edible film obtained from psyllium seed (*Plantago ovata* Forsk).“ *Journal of Food Engineering*, 2012: 109: 745-751. .
- Ambrožič Dolinšek, Jana. „Laboratorijski priročnik za delo z rastlinskimi tkivnimi kulturami, s poudarkom na mikropropagaciji : laboratorij za fiziologijo rastlin.“ 53. Maribor: Univerzitetna založba Univerze v Mariboru, 2017.
- Arham, Rusli, M.T. Mulyati, M. Metusalach, in S. Salengke. „Physical and mechanical properties of agar based edible film with glycerol plasticizer.“ *International Food Research Journal* 23 (4), 2016: 1669-1675.
- Barrett, Axel. *BioplasticsNews.com*. 2018. <https://bioplasticsnews.com/author/axelbarrett/> (poskus dostopa januar 2020).
- Batič, F., in drugi. *Botanični terminološki slovar*. Ljubljana: ZRC SAZU, 2011.
- Chassenieux, Christophe, Dominique Durand, Parameswaranpillai Jyotishkumar, in Sabu Thomas. „Biopolymers: State of the Art, New Challenges, and Opportunities.“ V *Handbook of Biopolymer-based Materials: From Blends and Composites to Gels and Complex Networks*, avtor Thomas Sabu, Dominique Durand, Christophe Chassenieux in P. Jyotishkumar. Wiley, 2013.
- Cvelbar, Jan. *Vpliv strukture na razgradljivost polimerov*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, 2019.
- Dolenc, Darko, Mojca Graunar, in Barbara Modec. *Kemija danes 2, Delovni zvezek za kemijo v 9. razredu osnovne šole*. Ljubljana: DZS, 2017.
- Dunne, Margaret. *Bioplastic Cook Book - A catalogue of bioplastic recipes*. Barcelona: FabTextiles, Fab Lab Barcelona, 2018.
- Encyclopedia Britannica. *Kaolin*. 1998. <https://www.britannica.com/science/kaolin> (poskus dostopa 2020).
- Enders, H. J., in A. Siebert-Raths. *Engineering Biopolymers*. Munchen: Hanser Publications, 2011.

- European Bioplastics. *Bioplastics market data*. 2019. <https://www.european-bioplastics.org/market/> (poskus dostopa 2020).
- Finkelburg, Dave. *Ceramic Arts Network*. 18. Oktober 2018. <https://ceramicartsnetwork.org/ceramic-recipes/reference/clay-minerals/> (poskus dostopa Februar 2020).
- FKKT UL. *Kemijski slovar*. 2020. <https://www.fkkt.um.si/kslovar/index.php?page=6> (poskus dostopa 9. februar 2020).
- Grumezescu, Alexandru Mihai, in Alina Maria Holban. *Handbook of Food Bioengineering Biopolymers for Food Design*. Izv. Volume 20. Elsevier Inc., 2018.
- Hajra, Zuberi, in Bengisu Murat. „Agar-Based Adaptable DIY Materials.“ *FME Transactions* 47 (2019): 442-451.
- Hayashi, Akira, in Shin-Chol Oh. „Gelation of Gelatin Solution.“ *Agricultural and Biological Chemistry*, 1983: 1711-1716.
- Iwata, T. „Biodegradable and bio-based polymers: future prospects of eco-friendly.“ *Angewandte Chemie International Edition Engl*, 2015: 3210-3215.
- Kodjo Boady, Djagny, Wang Zhang, in Xu Shiyang. „Gelatin: A Valuable Protein for Food and Pharmaceutical Industries: Review.“ *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2001: 481-492.
- Kržan, A. *Bioplastika - priložnost za prihodnost*. Ljubljana: Central Europe program, 2014.
- Lertwittayanon, Kowit. „Effect of agar-kaolin interaction in gelcasting mixtures on forming of alumina membrane support.“ *Jurnal Teknologi*, 2018.
- Likeb, Tjaša. *Bioplastika*. Raziskovalna naloga, Celje: Mestna občina Celje, Mladi za Celje, 2019.
- Lucas, N., C. Bienaime, C. Belloy, M. Queneudec, F. Silvestre, in J. E. Nava-Saucedo. „Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques.“ *Chemosphere*, 2008: 429-442.
- Mukhopadhyay, Asok. *Regenerative Medicine: Laboratory to Clinic*. Singapore: Springer, 2017.
- Neelam, Asia, Omm-e Hany, Syed Junaid Mahmood, in Shagufta Ishteyaq. „Properties and thermal Degradation Studies of Gelatin-Based Film - Exploring the Biopolymer for Plastic Advancement.“ *International Journal of Food and Nutritional Science*, 2018: 69-73.

- Office of Biological and Environmental Research of the U.S. Department of Energy Office of Science. *Cellulose structure and hydrolysis challenges*. 2020. <http://ircb.online/faq/cellulose-structure-and-hydrolysis-challenges/> (poskus dostopa 5. februar 2020).
- Pathak, V.M., in Navneet. „Review on the current status of polymer degradation: a microbial approach.“ *Bioresour. Bioprocess.* 4, 2017: 15 .
- Rousselot Biomedical. *A protein of natural origin offering many different functionalities*. 2020. <https://www.rousselot.com/biomedical/x-pure/gelatins-and-collagens> (poskus dostopa februar 2020).
- Rudnik, Ewa. *Compostable Polymer Materials*. Elsevier Science, 2007.
- Sfiligoj-Smole, Majda, Hribernik, Silvo, Kurečič, Manja, Urbanek Krajnc, Andreja, Kreže, Tatjana, Stana-Kleinschek, Karin. *Surface properties of non-conventional cellulose fibres, Springer briefs in molecular science, Biobased polymers*. Switzerland: Springer Nature, 2019.
- Smogavec, Jožica, in Cvetka Govejšek. *Matematika za radovedneže 9, učbenik*. Kamnik: ICO, 2012.
- Suwon University (Biosystem Lab). *Agar-lignin based bioplastic film for food packaging material*. 2020. <https://www.googleusercontent.com/intl/ko/projects/2018/c2299b12555d81f3a10798451c25a5ef6aa24ef6e7e0239a10e0410a8db5e803> (poskus dostopa februar 2020).
- Varshosaz, Jaleh, Mohammad Zaki, Mohsen Minaiyan, in Jaafar Banoozadeh. „Preparation, Optimization, and Screening of the Effect of Processing Variables on Agar Nanospheres Loaded with Bupropion HCl by a D-Optimal Design.“ *BioMed Research Internat*, 2015.
- Wikipedia. *Sawdust*. 2017. <https://en.wikipedia.org/wiki/Sawdust> (poskus dostopa februar 2020).
- . *Želatina*. 2020. <https://sl.wikipedia.org/wiki/zelatina> (poskus dostopa 2020).
- Yousif, E., in R. Haddad. „Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review.“ *SpringerPlus*, 2013: 398.