



Gimnazija Franca Miklošiča Ljutomer

Vpliv postpotrošniško recikliranega materiala na mehanske in optične lastnosti polietilenskih folij

Raziskovalno področje tehnika in tehnologija

Avtorica: Asja Hozjan

Letnik: 3. c

Mentorica: mag. Nina Žuman, prof.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici, mag. Nini Žuman, za usmerjanje skozi raziskovalno nalogo. Zahvala gre tudi ge. Milici Makoter, ki me je prijazno sprejela v podjetju Makoter d.o.o. in mi omogočila ogled proizvodnje in opravljanje raziskovalnega dela v njihovem mehanskem laboratoriju. Iskrena hvala g. Srečku Dolamiču in tehnologinji ge. Janji Toth za čas, usmerjanje, motivacijo in pomoč pri praktični izvedbi meritev v mehanskem laboratoriju podjetja. Za pomoč se zahvaljujem tudi profesorici Lilijani Fijavž za lektoriranje naloge.

POVZETEK

Odpadna plastika je uporabna surovina, ki se lahko reciklira in uporabi kot sekundarna surovina za izdelavo novih plastičnih produktov. Polietilen LDPE je zelo uporaben in reciklabilen termoplast. V raziskovalni nalogi sem ugotavljala, kako delež uporabljenega recikliranega (PCR) materiala vpliva na mehanske in optične lastnosti polietilenskih LDPE embalažnih folij in možnost ponovne uporabe v sistemu krožnega gospodarstva. Za preizkušance sem uporabila vzorce folij izdelanih iz primarnega LDPE materiala in folije dveh mešanic primarnega materiala z dodanim 30% in 60 % PCR. Za analizo mehanskih lastnosti sem izvedla preizkus natezne trdnosti, raztezka ob pretrgu ter preizkus trgalne trdnosti. Izmerila sem sijaj in motnost vzorcev ter določala velikost in količino gelov v preizkušancih. Ugotovila sem, da količina dodanega deleža reciklata PCR poslabša mehanske lastnosti folij: natezno trdnost, raztezek ob pretrgu in trgalno trdnost za približno 30%. Preizkušanci folij z dodanim deležem PCR so v primerjavi s preizkušanci iz primarnega LDPE bili bolj motni, imeli so nekoliko manjši sijaj, njihova površina je bila na otip bolj hrapava.

Ključne besede: polietilenske folije, recikliranje, reciklati PCR, mehanske lastnosti, optične lastnosti

ABSTRACT

Plastic waste is a useful raw material that can be recycled and used as a secondary raw material for the production of new plastic products. Polyethylene LDPE is a widely used and recyclable thermoplastic. In the research project, I determined how the proportion of recycled (PCR) material used affects the mechanical and optical properties of polyethylene LDPE packaging films and the possibility of reuse in circular economy. For the test subjects, I used samples of foils made of primary LDPE material and foils of two mixtures of primary material with added 30% and 60% PCR. To analyze the mechanical properties, I tested the foils' tensile strength, elongation at break and tear strength. I measured the gloss and opacity of the samples and determined the size and amount of gels in the test samples. Tests show that the amount of added PCR recyclate worsens the mechanical properties of the foils: tensile strength, elongation at break and tear strength by about 30%. Compared to the samples made from primary LDPE, the tested films with the PCR added proportion were more cloudy, had a slightly lower gloss, and their surface was rougher to the touch.

Keywords: polyethylene films, recycling, PCR recycles, mechanical properties, optical properties

KAZALO VSEBINE

ZAHVALA.....	1
POVZETEK.....	2
ABSTRACT	3
KAZALO SLIK	5
KAZALO TABEL.....	6
1. UVOD.....	7
1.1. Opis raziskovalnega problema	8
1.2. Cilji in hipoteze	9
1.3. Opredelitev pojmov.....	10
2. TEORETIČNI DEL.....	11
2.1. Polietilen.....	11
2.1.1. Lastnosti PE.....	11
2.1.2. Polietilen LDPE.....	12
2.1.3. Označevanje različnih vrst plastike	14
2.1.4. Hierarhija ravnanja z odpadki in krožno gospodarstvo	15
2.1.5. Mehansko recikliranje	17
2.1.6. Znanstvena spoznanja o mehanskem recikliranju polietilena LDPE	19
3. RAZISKOVALNI DEL	20
3.1. Metode dela materiali.....	20
3.2. Analiza mehanskih lastnosti preizkušancev	23
3.3 Analiza optičnih lastnosti preizkuševalcev PCR (30 35 in 60 35).....	28
4. REZULTATI IN RAZPRAVA	32
5. ZAKLJUČEK.....	37
6. VIRI IN LITERATURA.....	39
Viri slik:.....	41
Viri tabel:	42

KAZALO SLIK

Slika 1: Strukturna formula polimerizacije etena.....	11
Slika 2: Razvejanost verige HDPE in LDPE	12
Slika 3: Granulat HDPE in LDPE	13
Slika 4: Folija iz LDPE	13
Slika 5: Oznake za 7 vrst plastike	14
Slika 6: Znaka za recikliranje MOBIUSOVA ZANKA in ZELENA PIKA.....	15
Slika 7: Hierarhija ravnanja z odpadki	15
Slika 8: Tehnologija recikliranja odpadne plastike z mehanskim postopkom.....	18
Slika 9: Reciklat (PCR	18
Slika 10: Primarni LDPE, uporabljen za izdelavo folij.	21
Slika 11: PCR, uporabljen v mešanici.....	21
Slika 12: Folije, proizvedene v podjetju Makoter.....	22
Slika 13: Označene folije za vzorce preizkušancev.	22
Slika 14: Natezni preizkus na napravi Zwicki Z1.0 TH.	24
Slika 15: Naprava Elmendorf Tear Tester za preizkus trgalne trdnosti.	26
Slika 16: Merjenje sijaja z merilnikom GLOSSMETER 45°.....	28
Slika 17: Merilnik motnosti NOVO – HAZE TX TRANSMISSION HAZEMETER.	30

KAZALO TABEL

Tabela 1: Kode za vrste plastike, možnost recikliranja, nevarnosti.....	14
Tabela 2: Primerjava meritev nateznega preizkusa raztezka ob pretrgu reciklirane folije iz mešanice čistega LDPE in 30% reciklata (PCR).....	24
Tabela 3: Primerjava meritev nateznega preizkusa raztezka ob pretrgu reciklirane folije iz mešanice čistega LDPE in 60% reciklata (PCR).....	25
Tabela 4: Primerjava meritev nateznega preizkusa natezne trdnosti reciklirane folije iz mešanice čistega LDPE in 30% dodanega reciklata (PCR).....	25
Tabela 5: Primerjava meritev nateznega preizkusa natezne trdnosti reciklirane folije iz mešanice 60% dodanega reciklata (PCR).	25
Tabela 6: Primerjava meritev trgalne trdnosti reciklirane folije iz mešanice čistega LDPE in 30% dodanega reciklata (PCR).	27
Tabela 7: Primerjava meritev trgalne trdnosti reciklirane folije iz mešanice čistega LDPE in 60% dodanega reciklata (PCR).	27
Tabela 8: Izmerjene povprečne, minimalne in maksimalne vrednosti sijaja.	29
Tabela 9: Rezultati meritev sijaja vseh preizkušancev glede na 30% in 60% PCR. .	29
Tabela 10: Izmerjene povprečne vrednosti prepustne motnosti.	30
Tabela 11: Izmerjene vrednosti števila in velikosti gelov za preizkušanece PCR 30 35.	31
Tabela 12: Izmerjene vrednosti števila in velikosti gelov za preizkušanece PCR 60 35.	31
Tabela 13: Poslabšanje mehanskih lastnosti recikliranih folij v odstotkih (%).....	34
Tabela 14: Poslabšanje sijaja in motnosti recikliranih folij v odstotkih (%).....	36

1. UVOD

Reševanje problema s plastiko zahteva celosten pristop, ki vključuje zmanjševanje porabe, spodbujanje recikliranja in ponovne uporabe, razvoj biološko razgradljivih materialov in ozaveščanje ter izobraževanje javnosti o okoljskih vplivih plastike. Če z odpadki neprimerno ravnamo in jih ne odstranjujemo, predstavljajo novo nevarnost za okolje in ljudi. Inovacije v zadnjih letih so omogočile, da je plastika veliko bolj trajnostna kot v preteklosti. Opažamo vedno več reciklirane embalaže z določenim deležem reciklata, saj se družba vedno bolj zaveda onesnaževanja okolja in prevelikega izkoriščanja neobnovljivih virov energije. Odpadki se obravnavajo kot koristen vir sekundarnih surovin in ne več kot odpadke. Proizvajalci plastičnih izdelkov uporabljajo 3R strategijo, ki vključuje zmanjšano nastajanje odpadkov (reduce), ponovno uporabo odpadkov (reuse) in recikliranje odpadkov (recycle).

Literatura navaja, da se za izdelavo polietilenskih LDPE embalažnih folij uporabljata dve vrsti reciklatov glede na tok odpadnih surovin. PIR ali postindustrijski reciklat, ki je pridobljen iz odpadkov nastalih med proizvodnjo in PCR ali postpotrošniški reciklat, pridobljen iz že uporabljenih, odvrženih in zbranih LDPE materialov, ki ne vključujejo drugih vrst polietilena. V proizvodnji reciklirane embalaže se PCR se meša v odstotkih od 10 % do 100 % skupaj s primarnim granulatom LDPE, odvisno od želje proizvajalca in zahtev naročnika.

Raziskovalna naloga se osredotoča na možnosti uporabe postindustrijskega reciklata (PCR) v mešanici s primarno surovino - granulatom LDPE za izdelavo embalažnih folij. V teoretičnem delu naloge predstavim osnovne značilnosti polietilena LDPE, oznake polimernih materialov, pomen ločevanja plastičnih odpadkov, krožnost virov, ekološki pomen recikliranja in uporabo reciklatov v sistemu krožnega gospodarstva. Zadnje podpoglavje v teoretičnem delu prikazuje izsledke raziskav, ki služijo kot podlaga za razumevanje poslabšanja mehanskih in optičnih lastnosti večkrat recikliranih folij iz polietilena nizke gostote LDPE.

V eksperimentalnem delu me je zanimalo, kako odstotek uporabljenega postindustrijsko recikliranega (PCR) materiala v krožnem gospodarstvu vpliva na mehanske in optične lastnosti večkrat recikliranih folij in ali je mogoče doseči kakovost, ki omogoča ponovno uporabo teh materialov v krožnem gospodarstvu.

Tema se mi zdi aktualna z vidika spreminjanja obnašanja potrošnikov in proizvajalcev, saj menim, da z ustreznimi navadami in praksami lahko prispevamo k temu, da plastika ne postane škodljiv odpad, ampak koristen vir sekundarne surovine.

Glede na izbrano temo mi je mentorica mag. Nina Žuman predlagala, da se povežem s podjetjem Makoter d.o.o. na Cvenu, ki se ukvarja s proizvodnjo polietilenskih LDPE folij in vrečk. V podjetju proizvodni odpadni material z lastnim reciklažnim strojem predelajo v reciklat. Reciklate kot sekundarne surovine v proizvodnji nato v določenem razmerju mešajo s primarnim LDPE materialom in tako uporabijo kot vir surovine za nove izdelke. Za izdelavo svojih produktov uporabljajo tudi PCR material, saj lastne količine PIR materiala ne zadoščajo kapacitetam proizvodnje.

1.1. Opis raziskovalnega problema

Mehansko recikliranje LDPE embalažnih folij je ena izmed najpogostejših metod za pridobivanje recikliranega LDPE materiala. Proces vključuje taljenje odpadnih LDPE materialov s čimer se dobi PCR (post-consumer recycled) material, ki se uporablja za reciklirane polietilenske LDPE embalažne folije. V proizvodnji se PCR kot surovina lahko meša v odstotkih od 10 % do 100 % skupaj s primarno surovino - granulatom LDPE. Mešanje sekundarnih surovin PCR ali PIR s primarnim granulatom je eden najpogostejših in dobro uveljavljenih postopkov, ki se uporablja v industriji termoplastičnih polimerov. V raziskovalni nalogi želim ugotoviti, ali in kako delež PCR materiala vpliva na mehanske in optične lastnosti večkrat recikliranih folij ter kakšna odstopanja se pojavljajo. Iz pridobljenih rezultatov presojamo, ali je uporaba večkrat recikliranih folij, ekološko koristna v smislu preprečevanja onesnaževanja okolja in varčevanja z neobnovljivimi viri.

1. 2. Cilji in hipoteze

Cilj moje raziskovalne naloge je ugotoviti:

- kako odstotek dodanega deleža PCR vpliva na mehanske lastnosti folij predvsem na raztezek ob pretrgu, natezno trdnost in trgalno trdnost /odpornost na trganje,
- kako odstotek dodanega deleža PCR vpliva na spremembo optičnih lastnosti (motnost, sijaj, število gelov),
- na podlagi odstopanj sklepati ali je uporaba večkrat recikliranih folij ekološko koristna v smislu preprečevanja onesnaževanja okolja in varčevanja z neobnovljivimi viri surovin.

Hipoteza 1: Mehanske lastnosti folije izdelane iz primarnega LDPE in večkrat reciklirane folije izdelane iz 30% PCR so primerljive.

Hipoteza 2: Mehanske lastnosti folije izdelane iz primarnega LDPE in večkrat reciklirane folije izdelane iz 60% PCR kažejo velika odstopanja.

Hipoteza 3: Optične lastnosti folij izdelanih iz 30% in 60% deležem PCR se spremenijo.

1.3. Opredelitev pojmov

POLIMERI - so spojine z visoko molekulsko maso, sestavljeni iz enakih ali različnih monomernih enot, ki so med seboj povezane s kovalentnimi vezmi.

POLIMERIZACIJA - reakcija vezanja dveh monomerov v en polimer.

HDPE - polietilen visoke gostote.

LDPE - polietilen nizke gostote.

KROŽNO GOSPODARSTVO - proizvodnja in potrošnja, ki temelji na ponovni uporabi, popravilu, prenovi in recikliranju obstoječih materialov in izdelkov.

3R STRATEGIJA : reduce, reuse, recycle - zmanjševanje, ponovna uporaba in predelava odpadkov v krožnem gospodarstvu.

MEHANSKO RECIKLIRANJE - ponovna predelava proizvodnega odpada v zaprti zanki krožnega gospodarstva.

RECIKLAT - sekundarna krožna surovina, pridobljena iz odpadnih materialov.

REGRANULAT (rLDPE) - reciklat v obliki granul, proizveden iz zbranih in ločenih odpadkov polietilena nizke gostote.

PCR (Post Consumer Recycling) - postpotrošniški reciklat, ki je izdelan iz zavržene, zbrane, ločene in očiščene odpadne plastike.

PIR (Post-industrial Material) - reciklat izdelan iz odpadkov, ki nastanejo v proizvodnji in nikoli niso zapustili proizvodnje.

ZAPRTA ZANKA - krožni tok virov ali surovin v proizvodnji.

EKSTRUDIRANJE - toplotna obdelava in predelava termoplastov.

DOWNCYCLING - vrednost recikliranega materiala je nižje kakovosti in funkcionalnosti od prvotnega materiala.

UPCYCLING - vrednost recikliranih izdelkov je enaka kakovosti izdelka izdelanega iz primarne surovine.

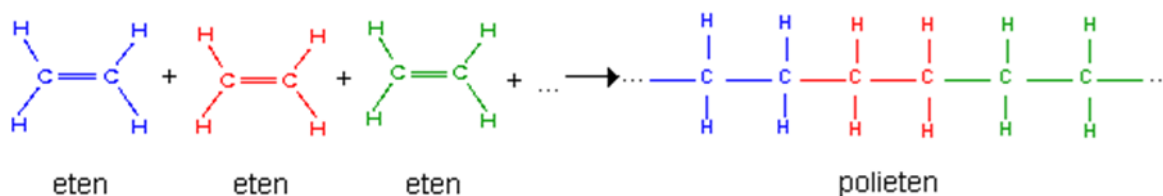
KONDICIONIRANJE - izpostavljanje določeni temperaturi, vlažnosti v zaprtem prostoru; klimatiziranje.

KALIBRACIJA - je postopek umerjanja merilne naprave, s katerim določimo merilne enote in odstopanje med izmerjenimi vrednostmi merilnega sistema in referenčno vrednostjo.

2. TEORETIČNI DEL

2.1. Polietilen

Polietilen je najbolj uporabljen polimerni material na svetu. Izraz polimer – grško, pomeni veliko delov. Polimerne materiale v vsakdanjem življenju srečujemo pod imenom plastika ali plastični materiali (plastein – po grško pomeni oblikovati), ki ponazarjajo enostavno predelavo in oblikovanje. Spada med čiste ogljikovodike (sestavljata ga ogljik in vodik). Surovina za pridobivanje polietilena je surova nafta, ki pri visoki temperaturi sprošča plin etilen. Eten s sintezo molekul z visokimi molskimi masami iz monomerov pretvorijo v polimer imenovan polieten. Proces se imenuje verižna ali adicijska polimerizacija. (Polimerni materiali, studentski.net, 2023; Plastika, Wikipedija)



Slika 1: Strukturna formula polimerizacije etena

2.1.1. Lastnosti PE

Polieten ($[\text{CH}_2\text{-CH}_2]_n$) je po kemijski sestavi najbolj enostaven sintetičen polimer. Po obsegu proizvodnje je na prvem mestu. Sintetiziramo ga iz etena ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$), ki ga dobimo iz nafte ali zemeljskega plina s krekingom. Z visokotlačnim postopkom (100 – 300 MPa) pridobivajo PE nizke gostote (LDPE), z nizkotlačnim postopkom (do 20 MPa) pa linearne PE nizke gostote (LLDPE) in PE visoke gostote (HDPE).

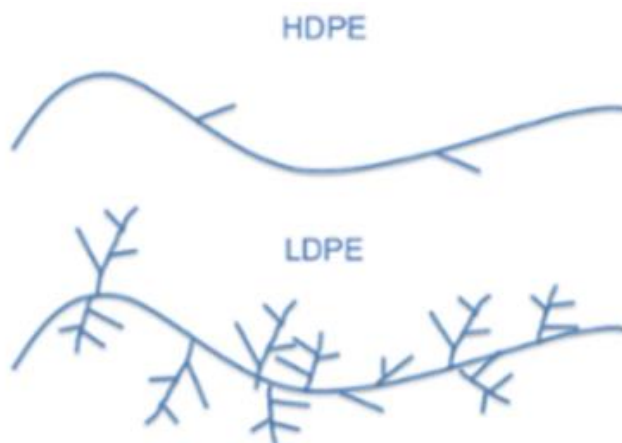
Polietilen ali polieten spada med termoplaste, ima podobne kemijske lastnosti kot parafini (voski), pri sobni temperaturi je prosojen (ima amorfna in kristalinična področja), pri povišani temperaturi postane prozoren. Z dodatkom barvil ga lahko obarvamo. (Verižni polimeri, študentski net, 2023, str. 106, 107)

Mehanske lastnosti polietilena so odvisne od stopnje kristaliničnosti – višja kristaliničnost pomeni boljše lastnosti. Pri povišani temperaturi nad 100 °C se topi le v nekaterih ogljikovodikih in kloriranih topilih. Ker je nepolaren, je hidrofoben – vodo odbojen. (Eurolab, Analiza plastike, 2024)

2.1.2. Polietilen LDPE

Polietilen nizke gostote (LDPE) je največkrat uporabljen termoplast. Proizvaja se s polimerizacijo etilena pri visokem tlaku in temperaturi z uporabo katalizatorja. LDPE ima gostoto 0,910–0,940 g/cm³. Tališče LDPE je med 105 - 115 °C, zato je toplotno stabilen material. Je razvejan termoplast, z dolgimi stranskimi verigami, stopnja kristaliničnosti je nižja kot pri drugih PE (45-55%), zato je žilav in prožen. Uporaben je v območju od -50 do 80 °C. (Verižni polimeri, 2023, str. 106, 107).

Mogoče ga je večkrat stopiti in preoblikovati, ne da bi pri tem izgubil želene lastnosti. Odporen je na vlago, kemikalije in UV sevanje, zaradi česar je robusten in dolgotrajen material. Zaradi razvejanih molekulskih struktur se enostavno prilagaja, ima večjo prožnost in sposobnost deformacije. Zaradi nizke toplotne prevodnosti ima dobre izolacijske lastnosti. LDPE je mogoče reciklirati, zaradi česar je okolju prijazna izbira. Primeren je za izdelavo plastičnih vrečk, posodic za shranjevanje hrane, folij za omotavanje, folij v gradbeništvu, embalažo za papirne izdelke in za embalažo prehranskih izdelkov (npr. zmrznjena hrana, mleko, kava, začimbe), za izolacijski material in premaze, igrače. (Xometry, 2022).



Slika 2: Razvejanost verige HDPE in LDPE



Slika 3: Granulat HDPE in LDPE



Slika 4: Folija iz LDPE

2.1.3. Označevanje različnih vrst plastike

Tabela 1: Kode za vrste plastike, možnost recikliranja, nevarnosti

TOXICITY CODE:  LOW  HIGH

Polymer Name	POLYETHYLENE TEREPHTHALATE	HIGH-DENSITY POLYETHYLENE	POLYVINYL CHLORIDE	LOW-DENSITY POLYETHYLENE	POLYPROPYLENE	POLYSTYRENE	All other plastics, including acrylic, fiberglass, nylon, polycarbonate, and polylactic acid (a bioplastic)
Resin Identification Code							
Abbreviation	PET or PETE	HDPE	PVC	LDPE	PP	PS	OTHER
Recyclable?	Commonly Recycled	Commonly Recycled	Sometimes Recycled	Sometimes Recycled	Occasionally Recycled	Commonly Recycled (but difficult to do)	Difficult to Recycle
Percentage Recycled Annually							
How Long to Decompose Under Perfect Conditions	5-10 Years	100 Years	Never	500-1,000 Years	20-30 Years	50 Years	Majority of these plastics: never Polylactic acid: 6 months
Maximum Temperature	 70°C (158°F)	 120°C (248°F)	 70°C (158°F)	 80°C (176°F)	 135°C (275°F)	 90°C (194°F)	Polycarbonate: 135°C (275°F) Polylactic acid: 150°C (302°F)
Brittleness Temperature	 -40°C (-40°F)	 -100°C (-148°F)	 -30°C (-22°F)	 -100°C (-148°F)	 0°C (32°F)	 -20°C (-4°F)	Polycarbonate: -135°C (-211°F) Polylactic acid: 60°C (140°F)
Toxicity Level							



Slika 5: Oznake za 7 vrst plastike

Polimerni materiali so označeni s trikotnikom, v katerem je številka. Označevanje so razvili v ameriškem Združenju plastične industrije (American Society of Plastics Industry) v osemdesetih letih prejšnjega stoletja. Oznake nam povedo, iz katere vrste polimernega materiala je izdelek narejen. Oznake omogočajo lažje sortiranje in recikliranje vendar ne pomenijo, da bo izdelek res recikliran (Bernau Jr, A. 2024). Mobiusova zanka - simbol za izdelek, ki spada v del verige, potrebne za uspešno recikliranje, označuje tudi izdelek, ki je že izdelan iz recikliranih materialov. Vsak krak predstavlja del verige recikliranja: zbiranje, predelavo v nov izdelek in nakup izdelka iz reciklata.

Zelena pika označuje embalažo, ki se zbira, ponovno uporabi, reciklira ali drugače ustrezno predela. Je najbolj razširjen ekološki znak v Evropi. (Ekološke oznake ..., jp voka snaga, 2024)

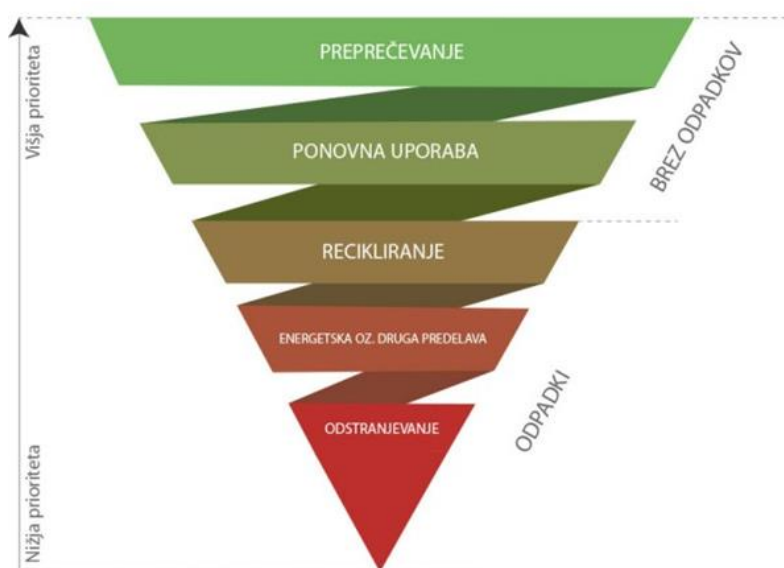


Slika 6: Znaka za recikliranje MOBIUSOVA ZANKA in ZELENA PIKA

2.1.4. Hierarhija ravnanja z odpadki in krožno gospodarstvo

Hierarhijo ravnanja z odpadki določata slovenska in evropska zakonodaja. Zapovedujeta preprečevanje odpadkov, ponovno uporabo, reciklažo, energetska ali drugo predelavo in na koncu odstranjevanje. Ravnanje z odpadki prispeva k učinkoviti rabi virov, kakovosti reciklatov in varovanju okolja. (Embakom, 2024)

Odpadki so lahko dragocen vir surovin. Da bi zagotovili visoko kakovost recikliranega materiala, je treba odpadke ustrezno sortirati in očistiti. Če materiala ni mogoče reciklirati in predelati v energijo, bo odložen na odlagališče, kar je najmanj zaželena stopnja v hierarhiji ravnanja z odpadki. Za recikliranje se ne šteje energetska predelava ali ponovna predelava v materiale, ki se bodo uporabili kot gorivo ali za zasipanje. (Ravnanje z odpadki, portal gov.si, 2024)



Slika 7: Hierarhija ravnanja z odpadki

Lamtai A. idr.(2023) navajajo, da recikliranje plastike ni najbolj enostavno, saj različne snovi, ki jim pravimo »plastika«, zahtevajo različne postopke predelave.

Za doseg cilja 100-odstotne predelave plastike je treba sistem ravnanja z odpadki razširiti na vsa področja uporabe plastike.

Za zaščito okolja se uporablja gospodarski model ravnanja z odpadki, imenovan krožno gospodarstvo, ki odpravlja linearni ekonomski model. Ta deluje po načelu vzemi, porabi, zavrzi.

Rešitve, ki jih na področju plastičnih odpadkov ponuja krožno gospodarstvo so: proizvodnja plastičnih produktov iz alternativnih surovin kot so reciklati; preoblikovanje postopkov proizvodnje plastike in plastičnih izdelkov ter podaljšanje njihove življenjske dobe; ponovna uporaba izdelkov in preprečevanje nastajanja odpadkov; sodelovanje med podjetji in potrošniki za spodbujanje recikliranja. Cilj krožnega gospodarstva je ohraniti surovine v uporabi kar se da dolgo in iz njih izvleči največjo možno vrednost. (Ministrstvo za gospodarski razvoj, 2020)

Glavni cilji Evropske strategije za plastiko so reciklirati vso plastično embalažo na trgu do leta 2030, zmanjšati potrošnjo plastike za enkratno uporabo in povečati kapacitete za recikliranje plastike v EU do leta 2030 za štirikrat. (Plastični odpadki, EU, 2018)

2.1.5. Mehansko recikliranje

Recikliranje polimerov se lahko izvede z mehanskimi ali kemičnimi postopki. Mehansko recikliranje je najpreprostejši in najbolj dostopen način recikliranja plastike. Za mehansko recikliranje so zanimivi le termoplastični materiali, ki jih je mogoče s tehniko brizganja oz. ekstrudiranja ponovno stopiti in predelati v izdelke. Izzivi mehanskega recikliranja so razgradnja materiala med ponovno obdelavo, heterogenost materialov, ki jih je treba reciklirati, široka paleta plastike po uporabi, ki se ne reciklira zaradi premajhne količine ali nehomogenosti (večplastni filmi), mešanice različnih vrst polimerov (PET plastenka), onesnaženost s hrano in nečistočami. (Lamtaš A. idr., Mechanical Recycling of Thermoplastics, 2023)

Mehansko recikliranje zajema primarni in sekundarni pristop recikliranja.

Postindustrijsko ali primarno recikliranje vključuje predelavo proizvodnega odpada, ki nastane med proizvodnjo in nikoli ne zapusti proizvodnje. Surovine za primarno reciklažo so znan homogen odpadni material, ki je manj onesnažen. S postopkom ekstrudiranja se dobi reciklat ali regranulat PIR, ki se meša s čistim materialom in se uporablja za izdelavo istega ali podobnega izdelka. Z vidika kakovosti imajo zato PIR reciklati prednost pred PCR reciklati.

Postpotrošniško ali sekundarno recikliranje se izvaja v reciklažnih centrih, kjer se reciklirajo plastični odpadki, ki jih potrošniki po uporabi zavržemo. Odpadni material je heterogen in onesnažen, zato se najprej razvrsti glede na vrsto polimera, očisti in sterilizira ter nato reciklira. Vsaka vrsta materiala ima svoj proces recikliranja, v katerem se iz njega oblikuje nov vir sekundarne surovine - PCR reciklat.

PCR se običajno uporablja v izdelkih z nižjimi zahtevami (downcycling) glede zmogljivosti v primerjavi s prvotno uporabo. Po proizvedeni količini imajo PCR materiali prednost pred PIR materiali. (Consumer vs. Post Industrial Recycled Materials, 2023)

Mehansko recikliranje LDPE materialov zahteva več korakov predelave:

Zbiranje in razvrščanje materialov po vrsti polimernega materiala in barvi, ker je pomembno, da ne mešamo različnih materialov skupaj, saj pomešanih materialov večinoma ne moremo reciklirati skupaj ali pa pomešan material poslabša končne lastnosti PCR.

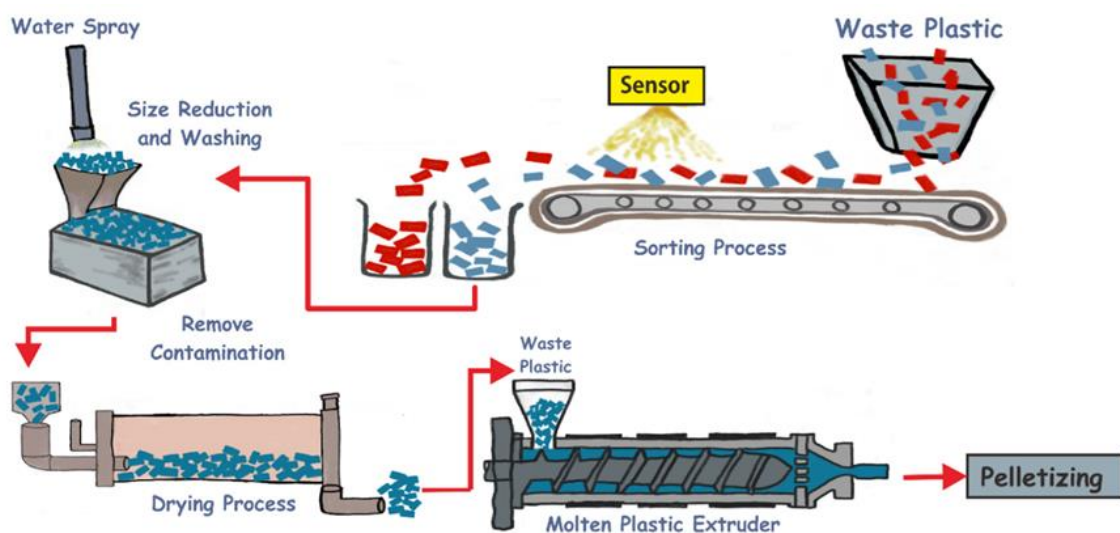
Mletje/drobljenje in pranje, da se odstranijo morebitni onesnaževalci (umazanija, nalepke in lepila).

Taljenje in ekstrudiranje je korak, ko polimerni material segrejejo, pretalijo, ekstrudirajo in nato iztisnejo ter seseklajo v regranulat ali reciklat (PIR ali PCR).

Reciklata se uporablja kot surovina za proizvodnjo novih izdelkov, tako da se mešata s primarnim granulatom (npr. LDPE). (Laboratorijske vaje, 2015)

Ekstrudiranje je eden od postopkov, ki se večinoma uporablja za proizvodnjo termoplastičnih polimerov. Ekstruder uporablja vrtenje polža in grelne elemente za mehčanje in mešanje materialov. Visoka temperatura in vijak delujeta na polimerni material s strižno silo, ki povzroči razcep v zamreževanju materiala. (Lamtai A. idr, Mechanical Recycling of Thermoplastics, 2023)

Mešanje reciklatov s primarnimi polimernimi materiali je dobro uveljavljen postopek v proizvodnji termoplastov. Monopolimerne mešanice čistih in recikliranih polimerov imajo lahko različno porazdelitev molekulske mase, različne molekularne strukture (razvejanost, zamreženje) in različno stopnjo razgradnje, kar vpliva na lastnosti recikliranih izdelkov. Za izboljšanje in ohranjanje kakovosti produktov iz mešanic se zato uporabljajo stabilizatorji. (Kassab idr., Advancing Plastic Recycling. 2023)



Slika 8: Tehnologija recikliranja odpadne plastike z mehanskim postopkom



Slika 9: Reciklat (PCR)

2.1.6. Znanstvena spoznanja o mehanskem recikliranju polietilena LDPE

Lamtai A. idr (2023) navajajo, da nečistoče prisotne v materialu vplivajo na kakovost PCR. Visoka temperatura pri ekstruziji in vijak pa delujeta na polimer s strižno silo, ki povzroči razcep in zamreževanje materiala. Ta verižna degradacija vpliva na termomehanske lastnosti LDPE. Predelava polietilena je zapletena zaradi podobnih gostot polietilena visoke gostote (HDPE) in polietilena nizke gostote (LDPE). Postopek recikliranja zmanjša njune termomehanske lastnosti. Po več ciklih iztiskanja se kompleksna viskoznost poveča zaradi zamreženja, zato je za izboljšanje lastnosti materiala potrebno uporabiti stabilizatorje.

Morgani (2020) povzema po Jin et al. (2012), da se indeks pretoka taline LDPE med večkratno predelavo spreminja, kar je lahko posledica zamreženja molekul med postopkom recikliranja. Rezultati so pokazali, majhne spremembe mehanskih lastnosti po 5 ciklih iztiskanja. Recikliran material je bil še vedno primeren za proizvodnjo.

Cecon in idr. (2021) navajajo, da se razvejani polimeri, kot je polietilen nizke gostote (LDPE) nagibajo k razgradnji predvsem zaradi cepitve verig in molekularnega prepletanja, kar povzroči razvejanje in zamreževanje verig. Posledica zamreževanja je zmanjšanje kristaliničnosti, fizikalnih in mehanskih lastnosti materiala in izdelkov. Zmanjšane stopnje kristaliničnosti lahko sčasoma povzroči izgubo trdnosti.

Interno študijsko gradivo: Laboratorijske vaje iz fizikalne kemije polimerov (2015) navaja, da podrobna kemijska analiza recikliranega materiala (PCR) razkrije prisotnost tipičnih polnil in dodatkov, ki se uporabljajo v proizvodnji plastičnih mas (npr. barve) in drugih primesi. Vsebnost teh primesi lahko spremeni končne lastnosti izdelkov do te mere, da ti izdelki več ne ustrezajo zahtevanim kriterijem.

Da se izognemo vračanju neustrezno predelanih polimernih materialov v proizvodnjo, je praviloma potrebno opraviti še analizo nekaterih fizikalnih in kemijskih lastnosti recikliranih regranulatov preden tako surovino ponovno uporabimo v proizvodnem procesu.

Kržan A. (2013) navaja, da že majhen dodatek katalizatorja pod vplivom toplote ali UV svetlobe povzroči pospešeno oksidacijo polimerne verige in s tem degradacijo in poslabšanje kakovosti reciklata. Za ohranjanje in izboljšanje lastnosti polimernega materiala se zato dodajajo stabilizatorji, ki bistveno upočasnijo razpad verig.

3. RAZISKOVALNI DEL

3.1. Metode dela materiali

Do odgovorov sem poskušala priti na več načinov. Najprej sem pregledala literaturo s področja mehanskega recikliranja polimernih materialov, pridobivanja PCR in možnosti uporabe reciklatov v zaprti zanki. Za raziskovalni del sem obiskala podjetje Makoter d.o.o. in si predhodno v več zaporednih obiskih ogledala proizvodni proces izdelovanja polietilenskih folij, reciklažo odpadnega materiala, testiranje recikliranih folij in opravljanje sprotnih analiz. Za raziskovalni del sem po posvetu z tehnologinjo Janjo Toth, zaposleno v podjetju Makoter, opredelila raziskovalni problem, si zastavila cilje in raziskovalna vprašanja ter postavila hipoteze raziskovalnega dela. Praktično testiranje sem opravila v mehanskem laboratoriju v omenjenem podjetju pod vodenjem tehnologinje. Tam sem spoznala testne naprave, postopke in metode dela za pridobitev rezultatov. Preizkuse sem opravila v času od 15.1. 2024 do 1. 2. 2024. Za pripravo vzorcev sem uporabila material, ki se uporablja v njihovi proizvodnji, in sicer nepotiskane embalažne folije, izdelane iz primarnega granulata LDPE, in folije, izdelane iz mešanice reciklata (PCR) in primarnega LDPE granulata. Folije, iz katerih so bili pripravljeni vzorci, so bile proizvedene v času izvajanja meritev in pridobivanja rezultatov izključno za namen raziskovalne naloge. Folijam niso bili dodani nobeni dodatki, kot so stabilizatorji, mehčala, barvila, ki bi lahko vplivali na izboljšanje lastnosti preizkušancev.

Pred preizkušanjem sem poskrbela za ustrezno varnost. Najprej sem zbrala vzorce folij za preizkušanje in jih označila. Za pripravo preizkušancev sem uporabila oznake glede na material, iz katerega je bila folija narejena. Uporabila sem oznake Original 0 35, PCR 30 35 in PCR 60 35. Številka 35 pomeni debelino folije, to je 0,035 mm, številki 30 in 60 pomenita % dodanega reciklata v mešanici s primarnim LDPE granulatom, oznaka original 0 pomeni, da je folija izdelana iz primarnega, torej čistega LDPE granulata.

Preverjanje mehanskih in optičnih lastnosti vzorcev je potekalo pod točno določenimi pogoji 23 ± 2 °C in relativni vlažnosti 50 ± 10 % v mehanskem laboratoriju. Vse folije so bile predhodno kondicionirane glede na standardne zahteve meritev.

Za analizo mehanskih lastnosti vzorcev sem izvedla natezni preizkus natezne trdnosti in raztezka ob pretrgu in izvedla preizkus trgalne trdnosti.

Za analizo optičnih lastnosti vzorcev sem izmerila sijaj vzorcev, motnost vzorcev in določila velikost in količino gelov v preizkuševalcih.

Pred preizkušanjem sem za posamezne meritve mehanskih in optičnih lastnosti folij po določenih standardih pripravila vzorce preizkušancev in jih označila z enakimi oznakami kot sem označila material. Na koncu sem glede na preizkuse izdelala tabele dobljenih rezultatov, jih med seboj primerjala in analizirala glede na zastavljene hipoteze. Glede na spoznanja iz pregledane literature in lastne ugotovitve sem na koncu podala zaključek.



Slika 10: Primarni LDPE, uporabljen za izdelavo folij.



Slika 11: PCR, uporabljen v mešanici.



Slika 12: Folije, proizvedene v podjetju Makoter.



Slika 13: Označene folije za vzorce preizkušancev.

3.2. Analiza mehanskih lastnosti preizkušancev

Preizkušanje natezne trdnosti in raztezka ob pretrgu

Rezultati meritev natezne trdnosti so pomembni za oceno mehanskih lastnosti materiala. Natezna trdnost /trdnost pri natezanju je največja natezna sila, ki jo material prenese pred pretrganjem, deljena s prečnim prerezom vzorca. Preizkušanec se razteguje po njegovi najdaljši dimenziji. Preizkus poteka, dokler se preizkušanec ne poruši ali ko je dosežena željena vrednost raztezka oz. napetosti. Med preizkusom se beleži natezno silo in spremembo dolžine preizkušanca.

Priprava preizkušancev

Preizkušanci so bili pripravljeni iz folij debeline 0,035 mm:

- Original 0 35 - preizkušanec folije, izdelane iz primarnega LDPE, brez reciklata;
- PCR 30 35 - preizkušanec folije, izdelan iz mešanice z 30% deležem reciklata;
- PCR 60 35 - preizkušanec folije, izdelane iz mešanice z 60% deležem reciklata.

Iz vsake folije sem izrezala 5 trakov dimenzije 150 mm x 25 mm v prečni legi (CD) in 5 trakov enake dimenzije v vzdolžni legi (MD). Oznake trakov so identične oznakam folij. Za izrez sem uporabila avtomatski rezalnik za folijo LDPE in alfa nož za odrezke. Za vsak preizkušanec sem pripravila 10 trakov. Za vsak trak sem izvedla 1 meritev. Trakovi so bili kondicionirani 16 ur pred izvedbo preizkusa pri temperaturi 23 ± 2 °C in relativni vlažnosti $50 \pm 10\%$.

Izvedba nateznega preizkusa

Natezni preizkus sem izvedla z napravo Zwicki Z1.0 TH in z metodo tensile tester. Preizkušanec - trak dimenzije 150mm x 25mm določenega vzorca sem na obeh koncih vpela v oprijemki oz. prižemi na napravi. Najprej sem vpela trak folije v oprijemko zgoraj in nato še spodaj. Pred začetkom preizkusa sem preverila poravnanoost in vpetje traka vzorca, da ni polzel iz oprijemke, ker bi to vplivalo na rezultat. Po pritisku na gumb FORCE 0 in START se je zgornja prižema začela premikati navzgor s konstantno hitrostjo 500mm/min. Naprava je postopoma s konstantno hitrostjo raztegovala vzorec in ga z natezno silo obremenjevala do pretrga. Ker je naprava bila povezana z računalnikom, je program sproti shranjeval podatke in na zaslonu podal analizo meritev v tabelah.



Slika 14: Natezni preizkus na napravi Zwicki Z1.0 TH.

Tabela 2: Primerjava meritev nateznega preizkusa raztezka ob pretrgu reciklirane folije iz mešanice čistega LDPE in 30% reciklata (PCR).

Raztezek ob pretrgu (%)		
N =5	Original 0 35	PCR 30 35
Smer stroja MD (vzdolžna)		
Min	718	288
Max	821	396
$\bar{x}$	771	362
S	46	44
Smer stroja CD (prečna)		
Min	1294	1176
Max	1369	1346
$\bar{x}$	1332	1243
S	53	71

LEGENDA:

Min-minimalna vrednost

Max-maksimalna vrednost

$\bar{x}$ -povprečna vrednost

s- standardni odklon

Tabela 3: Primerjava meritev nateznega preizkusa raztezka ob pretrgu reciklirane folije iz mešanice čistega LDPE in 60% reciklata (PCR).

Raztezek ob pretrgu (%)		
N =5	Original 0 35	PCR 60 35
Smer stroja MD (vzdolžna)		
min	718	299
max	821	390
$\bar{x}$	771	349
s	46	31
Smer stroja CD (prečna)		
min	1294	1163
max	1369	1338
$\bar{x}$	1332	1238
s	53	75

Tabela 4: Primerjava meritev nateznega preizkusa natezne trdnosti reciklirane folije iz mešanice čistega LDPE in 30% dodanega reciklata (PCR).

Natezna trdnost (N/mm ²)		
N =5	Original 0 35	PCR 30 35
Smer stroja MD (vzdolžna)		
min	30,6	18,5
max	34,5	21,5
$\bar{x}$	32,4	20,2
s	1,55	1,29
Smer stroja CD (prečna)		
min	26,0	22,1
max	30,3	27,2
$\bar{x}$	28,0	23,9
s	1,66	1,97

Tabela 5: Primerjava meritev nateznega preizkusa natezne trdnosti reciklirane folije iz mešanice 60% dodanega reciklata (PCR).

Natezna trdnost (N/mm ²)		
N =5	Original 0 35	PCR 60 35
Smer stroja MD (vzdolžna)		
min	30,6	15,4
max	34,5	18,7
$\bar{x}$	32,4	17,5
s	1,55	1,29
Smer stroja CD (prečna)		
min	26,0	20,0
max	30,3	23,7
$\bar{x}$	28,0	22,3
s	1,66	1,48

Preizkus trgalne trdnosti

Preizkus trgalne trdnosti je standardni postopek za merjenje odpornosti materiala na raztrganje ali trganje.

Priprava preizkušanca: Za preizkus sem pripravila 10 vzorec za vsak preizkušanec Original 0 35 in PCR 60 35 pravokotne oblike dimenzije 63 mm (višina) x 76 mm (dolžina).

Izvedba preizkusa trgalne trdnosti: Za preizkus sem uporabila napravo Elmendorf Tear Tester, ki pokaže širjenje raztrganine v realnem času. Vzorec sem vstavila v napravo med objemke. Z ročico naprave sem nato na sredini vzorca naredila zarezo 20 mm (dobimo obliko hlač). Naprava nato vzorec z natezno silo s konstantno hitrostjo gibanja prižeme obremenjuje do končnega pretrga že zarezanega preizkušanca. Z analizo krivulje se določi sila nadaljnjega trganja (F).



Slika 15: Naprava Elmendorf Tear Tester za preizkus trgalne trdnosti.

Tabela 6: Primerjava meritev trgalne trdnosti reciklirane folije iz mešanice čistega LDPE in 30% dodanega reciklata (PCR).

Trgalna trdnost (%)		
Smer stroja MD (vzdolžna)		
N= 10	Original 0 35	PCR 30 35
min	63,2	43,2
max	78,6	67,3
$\bar{x}$	72,7	58,1
s	5,8	9,0
Smer stroja CD (prečna)		
min	37,6	38,3
max	49,2	42,8
$\bar{x}$	42,9	40,9
s	3,3	1,5

Tabela 7: Primerjava meritev trgalne trdnosti reciklirane folije iz mešanice čistega LDPE in 60% dodanega reciklata (PCR).

Trgalna trdnost (%)		
Smer stroja MD (vzdolžna)		
N= 10	Original 0 35	PCR 60 35
min	63,2	35,9
max	78,6	59,1
$\bar{x}$	72,7	50,7
s	5,8	7,7
Smer stroja CD (prečna)		
min	37,6	36,5
max	49,2	44,4
$\bar{x}$	42,9	40,4
s	3,3	2,4

3.3 Analiza optičnih lastnosti preizkuševalcev PCR (30 35 in 60 35)

Za analizo optičnih lastnosti preizkušancev sem uporabila metodo določanja gelov, analizirala sijaj in prepustno motnost preizkušancev.

Preizkus sijajnosti

Meritev sijaja s pomočjo glossmetra pokaže, kako se svetloba odbije od površine materiala pod določenim kotom.

Priprava preizkušanca: Za preizkus sijajnosti in prepustne motnosti sem pripravila 3 vzorce - trakove dimenzije 5 cm x 50 cm za vsak preizkušanec Original 0 35, PCR 30 35, PCR 60 35. Skupaj jih je bilo 9. Vzorci so bili pripravljani na nepotiskanem zunanem delu folije, čisti in brez vidnih poškodb. Po predpisanem standardu so bili vzorci predhodno kondicionirani (izpostavljeni temperaturi 23 ± 2 °C in relativni vlažnosti 50 ± 5 %).

Za merjenje sijaja preizkušancev sem uporabila merilnik sijajnosti pri kotu 45°, Glossmeter 45°. Pred izvedbo meritve smo merilnik kalibrirali, to je prilagodili nastavitve za primerjavo izhodnih vrednosti merilne naprave s standardnimi referenčnimi vrednostmi. S tem se zagotovi ustrezno natančnost meritve.



Slika 16: Merjenje sijaja z merilnikom GLOSSMETER 45°.

Izvedba meritve sijaja: Vzorec vsakega preizkušanca z oznakami se postavi na belo podlago. Na preizkušanec (folijo) se položi merilnik sijaja in se ga premika po vzorcu preizkušanca. Merilnik na 10 točkah vzorca izmeri sijaj. Na zaslonu merilnika se izpišejo vrednosti sijaja na posameznih točkah in povprečna vrednost sijaja.

Rezultate meritev sem računalniško zapisala v Excel datoteko.

Tabela 8: Izmerjene povprečne, minimalne in maksimalne vrednosti sijaja.

Meritve sijaja			
N= 10	Original 0 35	PCR 30 35	PCR 60 35
Min	57	52,6	47,5
Max	59,5	56,8	57,2
$\bar{x}$	58,7	54,9	52,8

Tabela 9: Rezultati meritev sijaja vseh preizkušancev glede na 30% in 60% PCR.

N= 10	Meritve sijaja		
Original 0 35	PCR 30 35	PCR 60 35	
59,32	55,72	52,33	
59,42	54,56	54,33	
58,14	55,86	54,74	
58,64	52,62	55,22	
58,17	56,31	51,48	
59,50	54,73	52,47	
59,03	56,79	57,15	
58,93	53,38	49,75	
58,35	54,83	52,07	
57,96	53,72	47,71	

Preizkus prepustne motnosti folij

Za merjenje sem uporabila merilnik NOVO – HAZE TX TRANSMISSION HAZEMETER. Merilnik uporablja LED diodo z belo svetlobo. Naprava pošilja svetlobni žarek skozi vzorec in meri stopnjo razpršenosti svetlobe. Merilnik meri skupno prepustnost in motnost prepustnosti.

Priprava vzorcev: Uporabila sem iste vzorce preizkušancev kot za preizkušanje sijaja, in sicer trakove dimenzije 5 cm x 50 cm za Original 0 35, PCR 30 35, PCR 60 35. Pred izvedbo meritve smo merilnik kalibrirali, to je prilagodili nastavitve za primerjavo izhodnih vrednosti merilne naprave s standardnimi referenčnimi vrednostmi).

Izvedba meritve: Za izvedbo meritve je potrebno dvigniti svetlobno pregrado HAZEMETRA in pod njo postaviti vzorec preizkušanca. Nato se pregrado spusti na vzorec.

Svetlobni žarek potuje skozi vzorec, merilnik zazna razpršenost svetlobe in jo beleži ter izračuna motnost folije v odstotkih. Naprava meritve prikaže na zaslonu. Naprava je zabeležila 10 meritev za posamezen vzorec na različnih mestih vzorca.

Za primerjavo sem uporabila povprečno vrednost motnosti za posamezen vzorec, ker povprečna vrednost zagotavlja zanesljivejši rezultat. Rezultate meritev sem računalniško zapisala v Excel datoteko.



Slika 17: Merilnik motnosti NOVO – HAZE TX TRANSMISSION HAZEMETER.

Tabela 10: Izmerjene povprečne vrednosti prepustne motnosti.

Meritve prepustne motnosti			
N= 10	Original 0 35	PCR 30 35	PCR 60 35
$\bar{x}$	11,42	13,63	16,03

Določanje števila gelov v recikliranih folijah

Geli, ki se pojavijo v recikliranih folijah, nastanejo zaradi različnih tališč materialov PCR, ki so uporabljeni v proizvodnji.

Priprava vzorcev: Iz nepotiskanih recikliranih folij (30% in 60% PCR) sem za vsak preizkušanec z alfa nožem izrezala vzorec dimenzije 110 x 110 mm.

Za določanje gelov sem uporabila skener oz. optični bralnik Epson Perfection Pro V850Pro, povezan z računalnikom in programsko opremo Essity Matlab za izračun in analizo iz optičnega bralnika.

Izvedba meritve: Vsak pripravljen vzorec se postavi na steklo skenerja. Pazimo, da med steklom in folijo ni zračnih mehurčkov.

Skener se pred skeniranjem nastavi na ustrezno ločljivost. Vsak vzorec sem skenirala 3x. Program je prikazal rezultate gelov v določenih razmerjih, ki so prikazani v tabeli 11 in 12.

Tabela 11: Izmerjene vrednosti števila in velikosti gelov za preizkušane PCR 30 35.

Vzorec	Skupno št. gelov	150-300 Åµm	300-500 Åµm	>500 Åµm
PCR 30 35	210	199	11	0
PCR 30 35	166	159	6	1
PCR 30 35	172	160	11	1
$\bar{x}$	183	173	9	1

Tabela 12: Izmerjene vrednosti števila in velikosti gelov za preizkušane PCR 60 35.

Vzorec	Skupno št. gelov	150-300 Åµm	300-500 Åµm	>500 Åµm
PCR 60 35	447	421	26	0
PCR 60 35	286	267	19	0
PCR 60 35	268	259	9	0
$\bar{x}$	334	316	18	0

4. REZULTATI IN RAZPRAVA

Rezultati in ugotovitve mehanskih lastnosti (nateznega preizkusa in trgalne trdnosti preizkušancev Original 0 35 in PCR 30 35)

Za primerjavo mehanskih lastnosti folij sem izvedla preizkuse natezne trdnosti, raztezka ob pretrgu in trgalne trdnosti. Preizkušanci so bili izdelani iz mešanice primarnega granulata LDPE in 30% PCR materiala. Preizkusi so bili opravljeni v vzdolžni in prečni smeri.

Rezultati nateznega preizkusa **raztezka ob pretrgu so zbrani v tabeli 2**. Meritve so pokazale, da je raztezek ob pretrgu v MD (vzdolžni) in CD (prečni) smeri pri preizkušancih z dodanim 30% PCR materiala manjši v primerjavi z originalno folijo (LDPE). To kaže na poslabšanje mehanskih lastnosti folije ob dodatku PCR materiala. V vzdolžni smeri se zmanjša tudi raztezek preizkušancev original 0 35, vendar bistveno manj kot raztezek pri preizkušancu 30% (PCR).

Meritve **natezne trdnosti so zbrane v tabeli 4**. Rezultati nateznih preizkusov kažejo na bistveno zmanjšanje natezne trdnosti pri foliji z dodanimi 30% PCR materiala v primerjavi z originalno folijo (LDPE), tako v vzdolžni kot prečni smeri. Vzorec z 30% deležem PCR je pokazal nižjo vrednost natezne trdnosti (20,2) v vzdolžni smeri, kar pomeni, da se je material bolj raztezal in slabše prenašal obremenitve po dolžini.

Rezultati **trgalne trdnosti so zbrani v tabeli 6**. Rezultati meritev pokažejo, da je trgalna trdnost preizkušanca iz čistega LDPE boljša, saj so trgalne vrednosti višje. Zato so se folije preizkušancev iz čistega LDPE pokazale kot močnejše v primerjavi z recikliranimi preizkušanci, ne glede na smer.

Sklep

Primerjava rezultatov mehanskih lastnosti preizkušancev iz mešanice čistega LDPE in dodanega 30% PCR nakazuje, da količina dodanega reciklata lahko zmanjšuje mehanske lastnosti materiala. Sklepam, da je delni razlog za zmanjšanje mehanskih lastnosti folij z dodanim PCR materialom lahko tudi neenakomerna porazdelitev PCR materiala v sami mešanici, v slabši adheziji (sili, ki privlači molekule različnih snovi) med materiali ter neustrezna stopnja mešanja med primarnim in recikliranim materialom med proizvodnim procesom. Ker teh parametrov nismo raziskovali, bom **hipotezo 1**: Mehanske lastnosti folije, izdelane iz primarnega LDPE, in večkrat reciklirane folije, izdelane iz 30% PCR, so primerljive, ZAVRGLA.

Ugotovitve mehanskih lastnosti nateznega preizkusa in trgalne trdnosti preizkušancev Original 0 35 in PCR 60 35

Iz rezultatov povprečnega **raztezka ob pretrgu**, **podanih v tabeli 3**, razberemo večje zmanjšanje raztezka ob pretrgu v obeh smereh (MD in CD) pri preizkušancih z dodanim 60% PCR v primerjavi z originalno folijo LDPE. V vzdolžni smeri (MD) je povprečni raztezek ob pretrgu zmanjšan z 771% pri originalni foliji na 349% pri foliji z dodanim PCR materialom, medtem ko je v prečni smeri (CD) zmanjšan z 1332% na 1238%. To kaže na pomembno poslabšanje elastičnih lastnosti folije ob dodatku PCR materiala.

Meritve **natezne trdnosti** preizkušancev original 0 35 in PCR 60 35 so prikazane v **tabeli 5**. Opazimo izrazito zmanjšanje povprečne natezne trdnosti v obeh smereh (MD in CD) pri foliji z dodanim 60% PCR materiala v primerjavi z originalno folijo LDPE. V vzdolžni smeri (MD) je povprečna natezna trdnost zmanjšana z 32,55 N/mm² (pri originalni foliji) na 17,5 N/mm² (pri foliji z dodanim PCR), medtem ko je v prečni smeri (CD) zmanjšana z 28,00 N/mm² na 22,3 N/mm².

Poslabšanje v mehanskih lastnosti natezne trdnosti ob dodatku PCR materiala kaže večje odstopanje, ki lahko predstavlja izziv pri uporabi folij z dodanim PCR materialom, ker vpliva na njihovo uporabnost pri različnih aplikacijah, zlasti v primerih, ko je potrebna visoka trdnost in odpornost materiala.

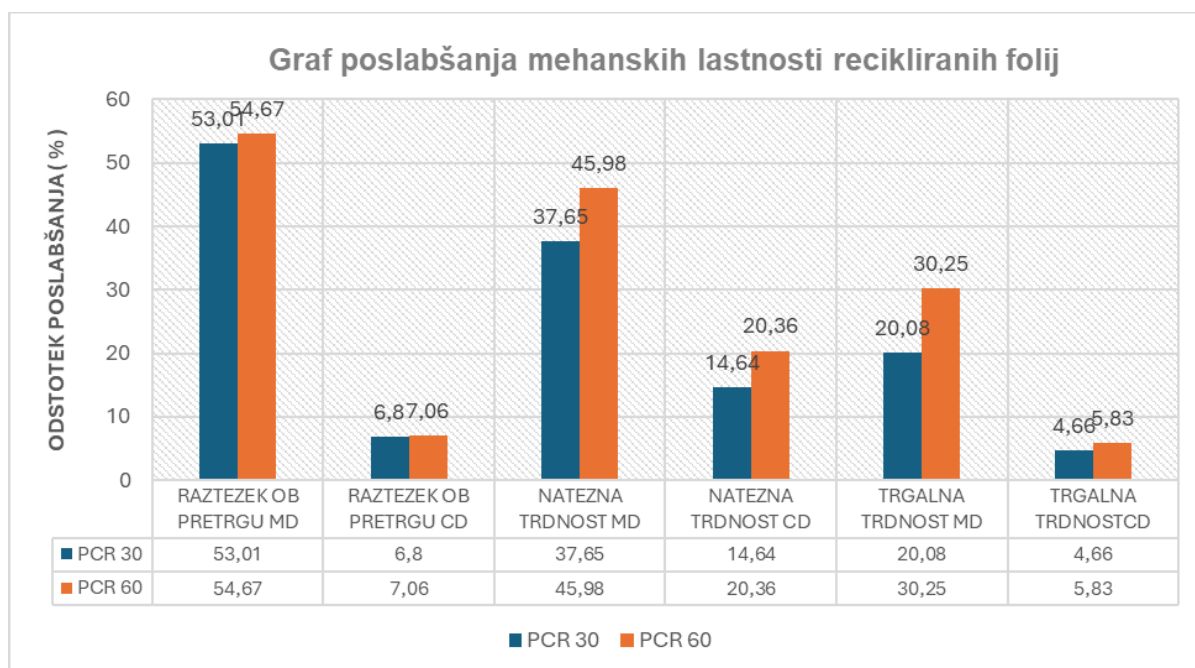
Rezultati **trgalne trdnosti materiala** so prikazni v **tabeli 7**. Meritve so pokazale pomembno zmanjšanje povprečne trgalne trdnosti pri folijah z dodanim 60% PCR v primerjavi z originalno folijo LDPE, tako v vzdolžni smeri (MD) kot v prečni smeri (CD). V vzdolžni smeri (MD) je povprečna trgalna trdnost zmanjšana z 72,7% (original 0 35) na 50,7% (PCR 60 35), medtem ko je v prečni smeri (CD) zmanjšana z 42,9% na 40,4%. V prečni smeri (CD) kaže trgalna trdnost manjše odstopanje, saj je razlika v povprečnih vrednostih čistega LDPE in mešanice manjša (42,9 - 40,4 = 2,5) od standardnega odklona (3,3), v vzdolžni smeri pa je opaziti večje odstopanje (razlika: 72,7 - 50,7 = 22, standardni odklon = 7,7).

Meritve mehanskih lastnosti so pokazale pomembno poslabšanje mehanskih lastnosti preizkušancev iz recikliranega materiala v primerjavi s preizkušanci iz primarnega materila. Poslabšanje materiala v odstotkih izračunamo po postopku:

$$(\text{Poslabšanje } \%) = \bar{x} (0\ 35) - \bar{x} (\text{PCR } 60\ 35) / \bar{x} (0\ 35) \times 100$$

Izračun poslabšanja mehanskih lastnosti glede na dodan delež PCR v odstotkih je prikazan v tabeli/grafu 13.

Tabela 13: Poslabšanje mehanskih lastnosti recikliranih folij v odstotkih (%)



Iz grafa je razviden visok odstotek poslabšanja mehanskih lastnosti v vzdolžni smeri (MD), najbolj se je zmanjšal raztezek ob pretrgu v MD smeri (53,01 in 54,67%), kar je precej visoka stopnja poslabšanja. Zabeležen je bil tudi visok procent poslabšanja natezne trdnosti obeh mešanic v MD smeri. V prečni smeri (CD) so odstopanja manjša, a niso nepomembna.

Primerjava rezultatov je pokazala večje poslabšanje mehanskih lastnosti folij z dodanim 60% PCR, zato bom **hipotezo 2**, ki trdi, da mehanske lastnosti folije izdelane iz primarnega LDPE in večkrat reciklirane folije izdelane iz 60% PCR kažejo velika odstopanja, **POTRDILA**.

Sklep: V mešanicah primarnega granulata LDPE in sekundarnih surovin PCR lahko pride do neenakomerne porazdelitve PCR materiala, sprememb v strukturi materiala zaradi dodatka reciklata in degradacije med postopkom ekstrudiranja. Te spremembe lahko pomembno vplivajo na mehanske lastnosti folij, kar lahko otežuje uporabo PCR materiala v določenih aplikacijah. Ker materialu niso bili dodani stabilizatorji, je večje poslabšanje mehanskih lastnosti bilo pričakovano. Stabilizatorji lahko zmanjšajo razgradnjo polimernih verig med postopkom recikliranja, ohranjajo mehanske in

optične lastnosti izdelkov in podaljšujejo življenjsko dobo končnega izdelka. Večkratno recikliranje zahteva razvijanje tehnologije za bolj trajnostne materiale.

Ugotovitve optičnih lastnosti preizkušancev

Izvedla sem 10 meritev za posamezen vzorec na različnih mestih vzorca. Za primerjavo sem uporabila povprečno vrednost zbranih meritev, ker povprečna vrednost zagotavlja zanesljivejši rezultat.

Ugotovitve meritev sijaja preizkušancev

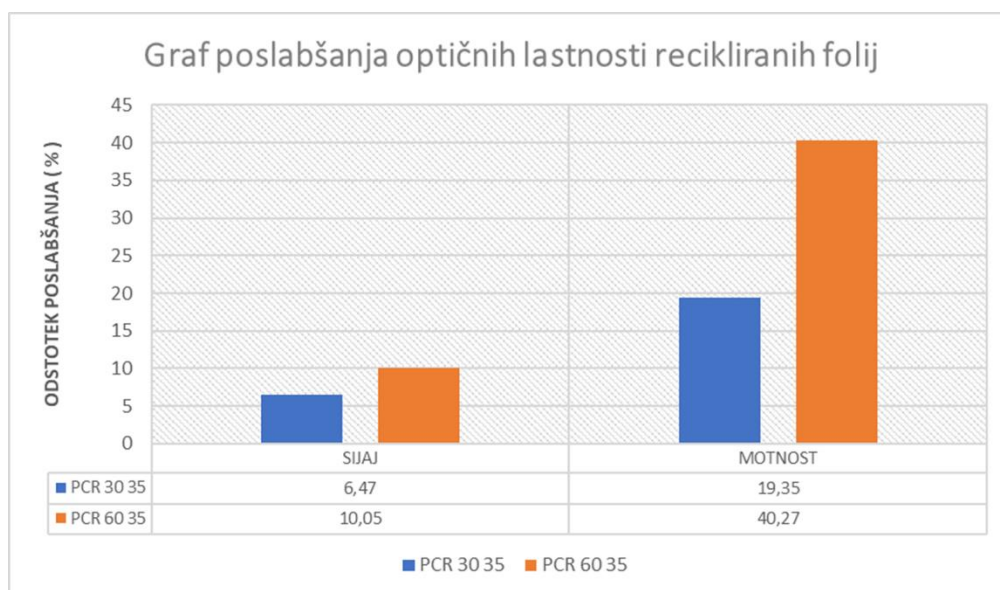
Izmerjene višje vrednosti pomenijo večji sijaj, nižje vrednosti pa manjši sijaj folij. Meritve izmerjenih povprečnih, minimalnih in maksimalnih vrednosti sijaja v tabeli 8 in 9 kažejo, da je preizkušanelec folije iz čistega LDPE - Original 0 35 je pokazal največjo stopnjo sijaja, PCR 60 35 pa najmanjšo stopnjo sijaja. PCR 30 35 je pokazal nekoliko manjšo vrednost od originala, kar pomeni manjši sijaj, ki pa je še vedno zadovoljiv. Odsevnost se zmanjšuje z dodajanjem deleža PCR, kar je opazno v manjši odsevnosti tudi na pogled.

Ugotovitve meritve motnosti

Izmerjene nižje vrednosti kažejo, da je folija manj motna. Naprava je zabeležila 10 meritev za posamezen vzorec na različnih mestih vzorca. Za primerjavo sem uporabila povprečno vrednost motnosti za posamezen vzorec, ker povprečna vrednost zagotavlja zanesljivejši rezultat.

Iz tabele 10 je razvidno, da je folija iz čistega LDPE najmanj motna. Najvišja izmerjena vrednost motnosti je bila pri preizkušancu PCR 60 35, v kateri je reciklat kot surovina prevladoval. Razlike v motnosti so bile tudi vizualno opazne. Graf 2 prikazuje poslabšanje sijaja in motnosti v (%) glede na primarni material.

Tabela 14: Poslabšanje sijaja in motnosti recikliranih folij v odstotkih (%)



Ugotovitve velikosti in števila gelov

Iz zbranih rezultatov meritev v tabeli 11 in 12 opazam, da so v obeh vzorcih prevladovali geli manjše velikosti v razponu od 150 do 300 μm . Število manjših gelov v vzorcu z 60% PCR se skoraj podvoji. Skleпам, da večji delež dodanega PCR vpliva na strukturo materiala, na optične lastnosti (motnost in sijajnost) in mehanske lastnosti (trdnost, natežno napetost). Povprečno je bil zaznan 1 večji gel pri vzorcu PCR 30 35; to pomeni možnost za deformacijo in nevarnost, da folija počí, zaradi napake v materialu (razpoke). Velikosti gelov so večje pri PCR 60 35. Tudi na otip ima preizkušanec bolj grobo površino v primerjavi s PCR 30 35. Večji geli lahko vplivajo na sijaj in motnost materiala.

Sklep: Skleпам, da delež recikliranega materiala PCR ali (rLDPE) vpliva na optične lastnosti folij. Preizkušanec folije iz primarnega LDPE ima najvišji sijaj in najnižjo motnost. Folija PCR 60 35 kaže nekoliko nižji sijaj in višjo motnost. Velikosti gelov kažejo na bolj grobo površino pri PCR 60 35. Razlike sicer niso velike, a lahko vplivajo na optični izgled in na zahtevane lastnosti materiala pri določenih izdelkih, zato bom **hipotezo 3:** Optične lastnosti folij izdelanih iz 30% in 60% dodanega deleža PCR se spremenijo, **POTRDILA.**

Zaključki eksperimentalnega dela raziskovalne naloge so naslednji:

- Na podlagi virov iz pregledane literature in pridobljenih rezultatov sklepam, da višji delež PCR materiala (60%) negativno vpliva na mehanske lastnosti recikliranih embalažnih (LDPE) folij v primerjavi s folijami iz primarne surovine. Meritve preizkušancev so zaznale zmanjšanje trgalne trdnosti, raztezka ob pretrgu in natezne trdnosti, kar lahko omeji ponovno uporabo recikliranega materiala za nekatere aplikacije. Dodatne sprotne analize pokažejo, do katerega cikla uporaba PCR materiala še lahko nadomešča primarni vir surovine, da izdelki še izpolnjujejo zahtevane standarde. Če recikliran material kaže slabše mehanske lastnosti, obstaja tveganje za hitrejšo obrabo ali razpad izdelka, kar lahko poveča količino odpadkov.
- Preizkušanci iz recikliranih folij so pokazali tudi slabše optične lastnosti, in sicer večjo motnost, manjši sijaj, hrapavo površino in prisotnost gelov/nečistoč. To vpliva na uporabo recikliranega materiala v izdelkih, kjer je pomemben estetski izgled. Slabši videz izdelkov lahko zmanjša željo po uporabi ali recikliranju.

5. ZAKLJUČEK

Glede na pridobljene rezultate meritev in znanstvena spoznanja ugotovim, da je mehansko recikliranje plastike eden od korakov v smeri trajnostnega razvoja. Razvijanje tehnologij in izboljševanje procesov mehanskega recikliranja LDPE folij omogoča ohranjanje mehanskih in optičnih lastnosti recikliranega materiala. Z inovativno tehnologijo mehanskega recikliranja vplivamo na kakovost recikliranih materialov, katerih tehnične in predelovalne lastnosti postajajo primerljive z materiali iz primarnih virov. V tehnologiji reciklaže in uporabe reciklatov je pomembna sprotna analiza kakovosti, da dosežemo trajnostno uporabo krožnega vira PCR in prispevamo k zmanjšanju obremenitve okolja ter zmanjšanju količine odpadkov. Recikliranje se začne v fazi zasnove izdelka, saj trajnostna zasnova in dobro načrtovanje izdelkov prispevata k večji krožnosti materiala. Pomembno je tudi ozaveščanje potrošnikov glede ločevanja odpadkov in trajnostnega ravnanja z viri v krožnem gospodarstvu. Čisti in ustrezno ločeni polimerni odpadni materiali olajšajo proces recikliranja in povečajo kakovost recikliranega materiala.

Recikliranje lahko prispeva k lažšanju težav plastične krize, ne more pa jih rešiti. Proizvajalci in potrošniki smo tisti, ki lahko prispevamo k zmanjšanju proizvodnje in uporabe plastičnih izdelkov, saj manj proizvedene plastike pomeni manj plastičnih odpadkov in s tem manj porabe neobnovljivih virov in manjše onesnaževanje okolja.

6. VIRI IN LITERATURA

- Bernau Jr, A. (2024). *The 7 Types of Plastics You Should Avoid*. Dostopno na spletu: <https://alansfactoryoutlet.com/7-types-of-plastics-their-toxicity-and-most-commonly-used-for/> [pridobljeno, 24. 1. 2024]
- Cecon, Victor S., Da Silva, Paulo F., Keith L., Keith L. in Curtzwiler Greg W. (2021). *The effect of post-consumer recycled polyethylene (PCRPE) on the properties of polyethylene blends of different densities*. Elsevier Inc. *Data in Brief*, Volume 38, October 2021, str. 4. Dostopno na spletu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141391021001476> [pridobljeno, 20. 12. 2023]
- *Ekološke oznake s področja ravnanja z odpadno embalažo*. Dostopno na spletu: <https://www.vokasnaga.si/ekoloske-oznake-s-podrocja-ravnanja-z-odpadno-embalazo> [pridobljeno, 24. 12. 2023]
- *Hierarhija ravnanja z odpadno embalažo*. Dostopno na spletu: <https://www.embakom.si/novice> [pridobljeno, 16. 12. 2023]
- Kassab A. idr. (2023). *Advancing Plastic Recycling: Challenges and Opportunities in the Integration of 3D Printing and Distributed Recycling for a Circular Economy* *Polimers*. 2023, 15 (19), 3881; Dostopno na spletu: <https://doi.org/10.3390/polym15193881> [pridobljeno, 1. 2. 2024]
- Kržan A. (2013). *Trajnostna plastična embalaža*. *Kemijski inštitut, Ljubljana*. (pridobljeno december 2023). Dostopno na spletu: <https://www.gzs.si/pripone/Andrej%20Kr%C5%BEan.pdf> [pridobljeno, 11. 12. 2023]
- *Laboratorijske vaje iz fizikalne kemije polimerov (2015)*, interno študijsko gradivo, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, str.: 62-63. Dostopno na spletu: https://www2.arnes.si/~surjcera/skripta_FiKePo_vaje.pdf [pridobljeno, 30. 11. 2023]
- Lamtai A. idr (2023). *Mechanical Recycling of Thermoplastics: A Review of Key Issues*. *Waste* 2023, 1(4), 860-883. Dostopno na: <https://doi.org/10.3390/waste1040050> [pridobljeno, 30. 1. 2024]

- *Lastnosti polimernih materialov* (2018). Dostopno na spletu:
https://studentski.net/gradivo/ulj_fkt_ki1_pol_sno_lastnosti_polimernih_materialov_01 [pridobljeno, 26. 12. 2023]
- *LDPE (Low-Density Polyethylene)*. Dostopno na spletu:
<https://www.recycledplastic.com/ldpe-low-density-polyethylene/> [pridobljeno, 4. 11. 2023]
- *Low Density Polyethylene (LDPE)* (2022). Dostopno na spletu:
<https://www.xometry.com/resources/materials/low-density-polyethylene-ldpe/> [pridobljeno, 4. 12. 2023]
- Ministrstvo za gospodarski razvoj in tehnologijo (2020), Slovenska industrijska strategija 2021-2030, str. 23. Dostopno na spletu: <https://srip-krožno-gospodarstvo.si/wp-content/uploads/2020/09/SIS-2021-2030-osnutek-16.9.2020.pdf> [pridobljeno, 5. 1. 2024]
- Morgani, M. S. (2020). *Enhancing the visual and mechanical properties of.* *Affiliée à l'Université de Montréal*, str.17. Dostopno na spletu:
<https://core.ac.uk/download/422960374.pdf> [pridobljeno, 1. 2. 2024]
- *Plastični odpadki*: evropska strategija za varstvo planeta, obrambo naših državljanov in krepitev položaja naše industrije. Dostopno na spletu:
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/sl/IP_18_5 [pridobljeno, 16. 12. 2023]
- *Plastika*. Dostopno na spletu: <https://sl.wikipedia.org/wiki/Plastika> [pridobljeno, 16. 12. 2023]
- *Ravnanje z odpadki*. Dostopno na spletu: <https://www.gov.si teme/ravnanje-z-odpadki/> [pridobljeno, 17. 12. 2023]
- *Verižni polimeri* (2018). Dostopno na spletu:
https://studentski.net/gradivo/ulj_fkt_ki1_pol_sno_lastnosti_polimernih_materialov_01 [pridobljeno, 17. 12. 2023]
- Vlada Republike Slovenije (2021). *Program ravnanja z odpadki in program preprečevanja odpadkov*, str. 124 – 127. Dostopno na spletu:
<https://vodici.pef.uni-lj.si/subjects/guide.php?subject=apa7#box-undefined> [pridobljeno, 18. 12. 2023]
- Post Consumer vs. Post Industrial Recycled Materials (2023). Dostopno na spletu: <https://www.granitol.cz/doc/2023-04-04-granitol-pcr-vs-pir-en.pdf> [pridobljeno, 6. 2. 2024]

- Xometry (2022). *Low Density Polyethylene (LDPE)*. Dostopno na spletu: <https://www.xometry.com/resources/materials/low-density-polyethylene-ldpe/> [pridobljeno, 4. 11. 2023]
- Zoé O. G. Schyns, Michael P. Shaver (2020). Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review, Dostopno na spletu: <https://doi.org/10.1002/marc.202000415> [pridobljeno, 15. 1. 2024]

Viri slik:

SLIKA 1: Dostopno na: <https://osmiklavz.splet.arnes.si/files/2019/09/9.-teden-sreda-20.-5.-2020.pdf>

SLIKA 2: Dostopno na: <https://www.xometry.com/resources/materials/low-density-polyethylene-ldpe/>

SLIKA 3: Dostopno na: <https://www.quora.com/Which-is-more-transparent-among-Polyethylenes-LLDPE-or-LDPE-and-why>

SLIKA 4: Dostopno na: <https://makoter.si/>

SLIKA 5: Dostopno na: <https://www.pinterest.com/pin/994240055208896163/>

SLIKA 6: Dostopno na: https://sl.wikipedia.org/wiki/Zelena_pika

SLIKA 7: Dostopno na : https://www.embakom.si/default.asp?mid=sl&pid=novice_podrobno&katid=24&novica_id=76

SLIKA 8: Dostopno na: <https://www.teachmint.com/tfile/studymaterial/dpt-vsemester/ppt-i/mechanicalrecyclingpl/d7180bbd-8ad8-4eb8-b043-116198c206fc>

SLIKA 9: Dostopno na: <https://www.eco-world.com.pl/regranulaty.html>

SLIKA 10: Vir: Asja Hozjan

SLIKA 11: Vir: Asja Hozjan

SLIKA 12: Vir: Asja Hozjan

SLIKA 13: Vir: Asja Hozjan

SLIKA 14: Vir: Asja Hozjan

SLIKA 15: Vir: Asja Hozjan

SLIKA 16: Vir: Asja Hozjan

SLIKA 17: Vir: Asja Hozjan

Viri tabel:

TABELA 1 : Dostopno na: <https://alansfactoryoutlet.com/7-types-of-plastics-their-toxicity-and-most-commonly-used-for/>

TABELA 2: Vir: Asja Hozjan

TABELA 3: Vir: Asja Hozjan

TABELA 4: Vir: Asja Hozjan

TABELA 5: Vir: Asja Hozjan

TABELA 6: Vir: Asja Hozjan

TABELA 7: Vir: Asja Hozjan

TABELA 8: Vir: Asja Hozjan

TABELA 9: Vir: Asja Hozjan

TABELA 10: Vir: Asja Hozjan

TABELA 11: Vir: Asja Hozjan

TABELA 12: Vir: Asja Hozjan

TABELA 13: Vir: Asja Hozjan

TABELA 14: Vir: Asja Hozjan

