Usporedba mehaničkih svojstava biorazgradljivih vrećica za kućanstvo

Juroš, Ljerka

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:733150

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ljerka Juroš

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
doc. dr. sc. Ana Pilipović, dipl. ing.

Student:
Ljerka Juroš

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno, koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem svojoj mentorici, doc. dr. sc. Ani Pilipović na ideji, savjetima i velikoj pomoći pri provedbi eksperimentalnog dijela.

Zahvaljujem mr. sc. Maji Rujnić Havstad za savjete i pomoć pri pisanju rada.

Zahvaljujem svojim prijateljima, dečku i kolegama na savjetima, potpori i podršci koju su mi pružili kroz studij.

Zahvaljujem svojoj obitelji na podršci i potpori te svemu što su učinili za mene tijekom studiranja i pisanja ovog rada.

Ljerka Juroš

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LJERKA JUROŠ** Mat. br.: 0035205321

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba mehaničkih svojstava biorazgradljivih vrećica za kućanstvo**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparison of mechanical properties of biodegradable household bags**

Opis zadatka:

U Republici Hrvatskoj se već godinama provodi odvojeno sakupljanje otpada nastalog u kućanstvima. Odvaja se papir, staklo, metal i plastika, a od jeseni 2019. godine i biološki otpad. Za odvojeno sakupljanje biološkog otpada potrebne su i vrećice koje će se s vremenom u odgovarajućim uvjetima razgraditi.

U sklopu rada potrebno je objasniti pojmove biorazgradnja i kompostiranje, navesti biorazgradljive polimerne materijale, te opisati postupke prerade vrećica. S obzirom da su na tržištu dostupne razne biorazgradljive vrećice, u eksperimentalnom dijelu rada potrebno je na različitim biorazgradljivim vrećicama ispitati mehanička svojstva nakon određenih perioda izlaganja tih vrećica biološkom otpadu nastalom u kućanstvu, te usporediti njihova svojstva.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
30. travnja 2020.	2. srpnja 2020.	6. srpnja do 10. srpnja 2020.

Zadatak zadao: Predsjednica Povjerenstva:

doc. dr. sc. Ana Pilipović prof. dr. sc. Biserka Runje

Sadržaj

1 UVOD ... 1
2 POLIMERI ... 3
2.1 Uporabna i fizikalna svojstva polimernih materijala ... 6
2.1.1 Modul elastičnosti E ... 7
2.1.2 Žilavost ... 8
2.1.3 Čvrstoća ... 10
3 BIORAZGRADNJA I KOMPOSTIRANJE ... 11
3.1 Norme ... 13
3.2 Proces kompostiranja ... 13
3.3 Parametri kompostiranja ... 14
3.4 Čimbenici koji utječu na biorazgradnju biorazgradljivih polimernih materijala ... 15
3.4.1 Struktura polimera ... 15
3.4.2 Morfologija polimera ... 16
3.4.3 Zračenje i kemijsko tretiranje ... 16
3.4.4 Molekulna masa ... 16
4 BIORAZGRADLJIVI PLASTIČNI MATERIJALI ... 18
4.1 Biorazgradljivi plastični materijali izdvojeni iz biomase ... 19
4.1.1 Škrob ... 19
4.1.2 Celuloza ... 21
4.1.3 Sojin protein ... 23
4.2 Biorazgradljivi plastični materijali sintetizirani iz prirodnih osnova ... 24
4.2.1 Polilaktid (PLA) ... 24
4.2.2 Poli(hidroksi-alkanoat) (PHA) ... 26
4.3 Biorazgradljivi plastični materijali sintetizirani iz naftnih derivata ... 27
4.3.1 Polikaprolakton (PCL) ... 27
5 PROIZVODNJA BIORAZGRADLJIVIH PLASTIČNIH MATERIJALA ... 31
5.1 Ekstrudiranje crijevnog filma ... 33
5.2 Kalandriranje savitljivih folija ... 35
5.3 Proizvodnja biorazgradljivih vrećica ... 37
5.4 Analiza životnog ciklusa (e. *Life Cycle Analysis (LCA)*) ... 38
6 BIORAZGRADLJIVE VREĆICE ... 43
6.1 Tržište biorazgradljivih vrećica ... 44
6.2 Biorazgradljiva vrećica od škroba naspram polietilenske ... 44
6.3 Uvođenje biorazgradljivih vrećica u kućanstvima Republike Hrvatske ... 45
7 EKSPERIMENTALNI DIO ... 47
7.1 Atmosferski uvjeti tijekom ispitivanja ... 48
7.1.1 Prosječne vrijednosti temperature u gradu Zagrebu od veljače do kraja svibnja 2020. godine ... 49
7.1.2 Prosječne vrijednosti relativne vlažnosti u gradu Zagrebu od veljače do kraja svibnja 2020. godine ... 50
7.2 Ispitivane folije ... 51

7.2.1 Vrećica za prikupljanje biootpada zagrebačke Čistoće 51
7.2.2 Biorazgradljiva vrećica za voće i povrće iz Spara 52
7.2.3 Swirl kompostabilna vrećica za otpad 53
7.2.4 Biorazgradljive Bipa vrećice 54
7.2.5 Ecovio F23B1 55
7.2.6 Biorazgradljiva škrobna folija 56
7.3 Norme za ispitivanje biorazgradljivih folija 56
7.3.1 Rastezna čvrstoća, HRN EN ISO 527-3 57
7.3.2 Rastezna žilavost, ISO 8526:2004 59
7.4 Biorazgradnja folija 62
7.5 Provedena ispitivanja 65
7.5.1 Ispitivanje rasteznih svojstava 65
7.5.2 Ispitivanje rastezne žilavosti 81
7.6 Rasprava rezultata 94
8 ZAKLJUČAK 96
9 LITERATURA 97
10 PRILOZI 100

POPIS SLIKA

Slika 1.1 Potražnja plastičnih materijala po segmentima u 2018. godini u EU 1
Slika 1.2 Polimerni proizvodi na kraju svog životnog vijeka u EU u 2018. godini 2
Slika 2.1 Proces polimerizacije 3
Slika 2.2 Raspored makromolekula 4
Slika 2.3 Dijagram „naprezanje – istezanje“ za razne skupine polimera: a) duromeri i amorfni plastomeri, b) kristalasti plastomeri, c) elastoplastomeri, d) elastomeri 8
Slika 2.4 Mjera za žilavost materijala kao površina ispod „σ – ε“ dijagrama 9
Slika 4.1 Klasifikacija plastičnih materijala s obzirom na razgradljivost i izvor sirovina 18
Slika 4.2. Proces geliranja škroba 20
Slika 4.3 Formiranje vlakanaca od molekula celuloze 22
Slika 4.4 Sinteza polilaktidne kiseline iz mliječne kiseline 25
Slika 4.5 Polimerizacija kaprolaktona u PCL 28
Slika 4.6 Esterifikacija jantarne kiseline i diola 29
Slika 4.7 Polimerizacija PBS oligomera 29
Slika 5.1 Jednopužni ekstruder s dijelovima 31
Slika 5.2 Zone pužnog vijka 32
Slika 5.3. Postupak ekstrudiranja crijevnog filma 34
Slika 5.4. Postupak kalandriranja 36
Slika 5.5. Podjela kalandara po broju i rasporedu valjaka 36
Slika 5.6. Fleksotisak 37
Slika 5.7. Usporedba biorazgradljivih i konvencionalnih plastičnih materijala po raznim faktorima LCA-a 41
Slika 6.1 Koraci do potpune biorazgradnje plastičnog materijala 43
Slika 6.2. Usporedba PE-a i škroba po parametrima potrošnje vode i otisku CO_2 pri primarnoj proizvodnji 45
Slika 7.1. Indeks topline 48
Slika 7.2. Temperature u gradu Zagrebu od veljače do kraja svibnja 2020. godine 49
Slika 7.3. Relativne vlažnosti zraka u gradu Zagrebu od veljače do kraja svibnja 2020. godine 50
Slika 7.4. Vrećica za sakupljanje biootpada u gradu Zagrebu 51
Slika 7.5. Biorazgradljiva vrećica za voće i povrće iz *Spara* 52
Slika 7.6. Biorazgradljiva vrećica za otpad tvrtke *Swirl* 53
Slika 7.7. Biorazgradljive Bipa vrećice 54
Slika 7.8. Certifikati Bipa biorazgradljivih vrećica 55
Slika 7.9. *Ecovio F23B1 biorazgradljiva plastična folija* 56
Slika 7.10. Biorazgradljiva škrobna folija 56
Slika 7.11. Preporučena forma ispitka tipa 2 plastične folije za ispitivanje rastezne čvrstoće 57
Slika 7.12. Preporučena forma ispitka tipa 1 plastične folije za ispitivanje rastezne žilavosti 60
Slika 7.13. Biorazgradljive folije u vrtnom kompostištu 63
Slika 7.14. Početak biorazgradnje 63
Slika 7.15. Folija u procesu biorazgradnje 64
Slika 7.16. Biorazgrađeni ispitci nakon 4 mjeseca u vrtnom komposteru 64
Slika 7.17. Ispitivanje rasteznih svojstava 66
Slika 7.18. Ispitani i neispitani ispitak 66
Slika 7.19. Usporedba vrijednosti rastezne čvrstoće vrećice oznake BO 68
Slika 7.20. Usporedba vrijednosti prekidnog istezanja vrećice oznake BO 68

Slika 7.21. Dijagram rastezno naprezanje - istezanje vrećice oznake BO 68
Slika 7.22. Usporedba vrijednosti rastezne čvrstoće vrećice oznake SP 70
Slika 7.23. Usporedba vrijednosti prekidnog istezanja vrećice oznake SP 70
Slika 7.24. Dijagram rastezno naprezanje - istezanje vrećice oznake SP 70
Slika 7.25. Usporedba vrijednosti rastezne čvrstoće vrećice oznake SW 72
Slika 7.26. Usporedba vrijednosti prekidnog istezanja vrećice oznake SW 72
Slika 7.27. Dijagram rastezno naprezanje – istezanje vrećice oznake SW 72
Slika 7.28. Usporedba vrijednosti rastezne čvrstoće folije oznake K 74
Slika 7.29. Usporedba vrijednosti prekidnog istezanja folije oznake K 74
Slika 7.30. Dijagram rastezno naprezanje - istezanje folije oznake K 74
Slika 7.31. Usporedba vrijednosti rastezne čvrstoće folije oznake ECO 76
Slika 7.32. Usporedba vrijednosti prekidnog istezanja folije oznake ECO 76
Slika 7.33. Dijagram rastezno naprezanje – istezanje folije oznake ECO 76
Slika 7.34. Usporedba vrijednosti rastezne čvrstoće vrećice oznake B1 78
Slika 7.35. Usporedba vrijednosti prekidnog istezanja vrećice oznake B1 78
Slika 7.36. Dijagram rastezno naprezanje - istezanje vrećice oznake B1 78
Slika 7.37. Usporedba vrijednosti rastezne čvrstoće vrećice oznake B2 80
Slika 7.38. Usporedba vrijednosti prekidnog istezanja vrećice oznake B2 80
Slika 7.39. Dijagram rastezno naprezanje - istezanje vrećice oznake B2 80
Slika 7.40. Usporedba vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake BO 83
Slika 7.41. Usporedba vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake SP 84
Slika 7.42. Usporedba vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake SW 86
Slika 7.43. Usporedba vrijednosti rastezne žilavosti folije oznake K 87
Slika 7.44. Usporedba vrijednosti rastezne žilavosti folije oznake ECO 89
Slika 7.45. Usporedba vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake B1 91
Slika 7.46. Usporedba vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake B2 93

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Glavna svojstva polimernih materijala 7
Tablica 4.1 Ovisnost mehaničkih svojstava o molekulnoj masi PCL-a 28
Tablica 4.2 Usporedba svojstva PBS-a sa svojstvima PE-LD-a i PP-a 30
Tablica 5.1 Usporedba utjecaja na globalno zatopljenje plastičnih materijala iz obnovljivih i neobnovljivih izvora 39
Tablica 5.2 Usporedba epoksidne smole sintetizirane iz nafte i sintetizirane iz bioizvora po raznim parametrima LCA-a 40
Tablica 7.1. Preporučene dimenzije ispitka tipa 2 plastične folija za ispitivanje rastezne čvrstoće 57
Tablica 7.2. Metoda A i metoda B ispitivanja rastezne žilavosti po normi *ISO 8526:2004* 60
Tablica 7.3. Preporučene dimenzije ispitnog tijela tipa 1 plastične folija za ispitivanje rastezne žilavosti 61
Tablica 7.4. Popis kratica biorazgradljivih folija i vrećica korištenih u daljnjem tekstu 65
Tablica 7.5. Vrijednosti rasteznih svojstava vrećice oznake BO 67
Tablica 7.6. Vrijednosti rasteznih svojstava vrećice oznake SP 69
Tablica 7.7. Vrijednosti rasteznih svojstava vrećice oznake SW 71
Tablica 7.8. Vrijednosti rasteznih svojstava folije oznake K 73
Tablica 7.9. Vrijednosti rasteznih svojstava folije oznake ECO 75
Tablica 7.10. Vrijednosti rasteznih svojstava vrećice oznake B1 77
Tablica 7.11. Vrijednosti rasteznih svojstava vrećice oznake B2 79
Tablica 7.12. Izračunavanje rastezne žilavosti s pomoću korekcijskih faktora 81
Tablica 7.13. Vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake BO 82
Tablica 7.14. Vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake SP 84
Tablica 7.15. Vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake SW 85
Tablica 7.16. Vrijednosti rastezne žilavosti folije oznake K 87
Tablica 7.17. Vrijednosti rastezne žilavosti folije oznake ECO 88
Tablica 7.18. Vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake B1 90
Tablica 7.19. Vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake B2 92
Tablica 10.1. Dimenzije ispitaka za ispitivanje rasteznih svojstava vrećice oznake BO 101
Tablica 10.2. Dimenzije ispitaka za ispitivanje rasteznih svojstava vrećice oznake SP 102
Tablica 10.3. Dimenzije ispitaka za ispitivanje rasteznih svojstava vrećice oznake SW 103
Tablica 10.4. Dimenzije ispitaka za ispitivanje rasteznih svojstava folije oznake K 104
Tablica 10.5. Dimenzije ispitaka za ispitivanje rasteznih svojstava folije oznake ECO 105
Tablica 10.6. Dimenzije ispitaka za ispitivanje rasteznih svojstava vrećice oznake B1 106
Tablica 10.7. Dimenzije ispitaka za ispitivanje rasteznih svojstava vrećice oznake B2 107
Tablica 10.8. Dimenzije ispitaka za ispitivanje savojne žilavosti vrećice oznake BO 108
Tablica 10.9. Dimenzije ispitaka za ispitivanje savojne žilavosti vrećice oznake SP 108
Tablica 10.10. Dimenzije ispitaka za ispitivanje savojne žilavosti vrećice oznake SW 109
Tablica 10.11. Dimenzije ispitaka za ispitivanje savojne žilavosti folije oznake K 109
Tablica 10.12. Dimenzije ispitaka za ispitivanje savojne žilavosti folije oznake ECO 110
Tablica 10.13. Dimenzije ispitaka za ispitivanje savojne žilavosti vrećice oznake B1 110
Tablica 10.14. Dimenzije ispitaka za ispitivanje savojne žilavosti vrećice oznake B2 111

POPIS KRATICA

kratica	**opis**
3HV	3-hidroksi-valerat
ASTM	e. *American Society for Testing and Materials*
CEC	e. *cation exchange capacity*
ISO	e. *International Organization for Standardization*
LCA	e. *Life Cycle Analysis*
PA 6	e. *poliamid 6*
TPS	*plastomerni škrob*
DIN	nj. *Deutsches Institut für Normung*
PHB	poli(3-hidroksti-butirat)
PBS	poli(butilen-sukcinat)
PEO	poli(etilen-oksid)
PET	poli(etilen-teraftalat)
PVOH	poli(vinil-alkohol)
PHA	poli(hidroksti-alkanoat)
P(HB-HV)	poli(hidroksti-butirat-hidroksi-valerat)
PVA	poli(vinil-amid)
PVC	poli(vinil-klorid)
PA	poliamid
PE	polietilen
PGA	poliglikolna kiselina
PCL	polikaprolakton
PLA	polimer mliječne kiseline
PP	polipropilen
PS	polistiren
PU	poliuretan

RH	Republika Hrvatska
UV	ultraljubičasto zračenje

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\bar{h}$	mm	prosječna vrijednost debljine folije
$\bar{x}$	mm	prosječna vrijednost dimenzija folije
A	mm^2	početni poprečni presjek ispitka
A_0	m^2	površina crijevnog filma
A'_0	m^2	površina crijevnog filma nakon prolaska kroz rashladni zrak
a_e	m^2/s	toplinska difuznost
a_{TN}	kJ/m^2	mjera rastezne žilavosti
b	m	debljina
b	$Ws^{1/2}/m^2K$	toplinska prodornost
c	J/kgK	specifični toplinski kapacitet
d	m	promjer
E	N/mm^2	modul elastičnosti
E	MJ/kg	potrebna energija za proizvodnju plastičnog materijala
E	N/mm^2	modul rasteznosti
E_c	J	ispravljena vrijednost energije udarca rastezne žilavosti
E_{max}	J	maksimalna energije udarca klatna
E_q	J	korekcija energije uslijed plastične deformacije i kinetičke energije pomičnog prihvata
E_s	J	energija udara klatna, apsorbirana energija
F	N	sila
F_{Max}	N	maksimalna sila
F_P	N	prekidna sila
G	Ω^{-1}	električna vodljivost
g	m/s^2	ubrzanje uslijed sile teže
H	J	entalpija
h	mm	debljina
HDT	°C	postojanost oblika plastičnog materijala pri povišenim temperaturama
HI	°C	indeks topline
HV		tvrdoća
L	mm	početna duljina između mjernih oznaka
L_0	mm	duljina mjerne oznake
l_0	mm	širina ravnog dijela zareza
l_3	mm	ukupna duljina
l_e	mm	ukupna širina zareza
L_p	m	duljina klatna

L_t	mm	povećanje duljine između mjernih oznaka uslijed nominalnog istezanja
m	kg	masa
MFR	g/10 min	maseni protok taljevine
m_p	kg	reducirana masa klatna
M_r		molekulna masa
n		indeks loma
p	Pa	tlak zraka
R	Ω	električni otpor
r	mm	radijus zakrivljenosti
R		raspon
R_m	N/mm^2	rastezna čvrstoća
R_P	N/mm^2	prekidna čvrstoća
s		standardna devijacija
S_0	mm	debljina crijevnog filma
S'_0	mm	debljina crijevnog filma nakon prolaska kroz rashladni zrak
ϑ	°C	temperatura
ϑ_g	°C	temperatura stakliša
ϑ_m	°C	temperatura taljenja
ϑ_{om}	°C	temperatura omekšavanja
T_z	°C	temperatura rashladnog zraka
v	okr/m	brzina rotacije pužnog vijka
V	L	volumen
v	mm/min	brzina ispitivanja ki
v_1	okr/m	brzina namotavanja kalandrata
v_2	m/s	brzina dotoka taljevine
v_3	m/s	brzina izvlačenja filma
v_z	m/s	brzina rashladnog zraka
x	mm	debljina na najtanjem dijelu zareza
α	°	kut
α_1	K^{-1}	toplinska rastezljivost
ΔL_0	mm	povećanje duljine između mjernih oznaka uslijed istezanja
ε	mm/mm	istezanje
ε_p	%	prekidno istezanje
ε_t	%	nominalno istezanje
η	Pa·s	prividna smična viskoznost taljevine
λ	W/mK	toplinska provodnost
μ		faktor mase pomičnog prihvata podijeljene sa reduciranom masom klatna
ρ	kg/m^3	gustoća

σ	N/mm^2	naprezanje
σ	MPa	naprezanje
Φ	%	relativna vlažnost

SAŽETAK

U ovom radu nakon kratkog pregleda konvencionalnih plastičnih materijala, njihove podjele i svojstava, objašnjeni su mehanizmi kompostiranja i biorazgradnje biorazgradljivih plastičnih materijala. Zatim, opisani su najčešći predstavnici svake od skupina biorazgradljivih plastičnih materijala, kao i njihova svojstva i sirovine. Nadalje, opisani su načini proizvodnje biorazgradljivih plastičnih folija i vrećica, procesni parametri i analiza ciklusa života biorazgradljivih plastičnih materijala s konvencionalnim plastičnim materijalima. Eksperimentalni dio bavi se proučavanjem rastezne čvrstoće i rastezne žilavosti na sedam različitih, komercijalno dostupnih biorazgradljivih folija, kroz 120 dana provedenih u kućnom kompostištu u gradu Zagrebu.

Ključne riječi: biorazgradljivi plastičan materijal, biorazgradnja, kompostiranje, biorazgradljiva folija, biorazgradljiva vrećica, kućno kompostište, rastezna čvrstoća, rastezna žilavost

SUMMARY

This paper sums up conventional polymers and their properties, processes of biodegradation and the composting of biodegradable polymers. Most common representatives of every group of biodegradable polymers are described, such as their properties and raw materials. Furthermore, manufacturing processes and *Life cycle analysis* are described. In experimental part of this paper, tensile properties are investegated, such as tensile strength and tensile impact strength on seven different, comercially available biodegradable foils, throughout 120 days in the garden composting site in city of Zagreb.

Key words: biodegradable polymer, biodegrading, composting, biodegradable foil, biodegradable bag, garden composting site, tensile strength, tensile impact strength

1 UVOD

Jedan od vodećih problema današnjice je količina otpada koji se gomila na odlagalištima i nepropisno odlaže u prirodu. U ukupnom otpadu, plastični otpad ima svoj značajan udio zbog velike rasprostranjenosti plastičnih materijala. Plastični materijali se odlikuju vrlo dobrim mehaničkim svojstvima, malom masom i niskom cijenom što ih čini vrlo iskoristivim materijalom. Sveprisutni su i ključni materijali u raznim industrijama. Na slici 1.1 prikazana je rasprostranjenost plastičnih materijala u različitim granama industrije Europske unije u 2018. godini. Ukupno je potrošeno 51,2 milijuna tona plastičnih materijala, od čega najviše u industriji ambalaže. Slijede građevinarstvo, automobilska industrija te električni i elektronički uređaji u nekim značajnijim postocima [1].

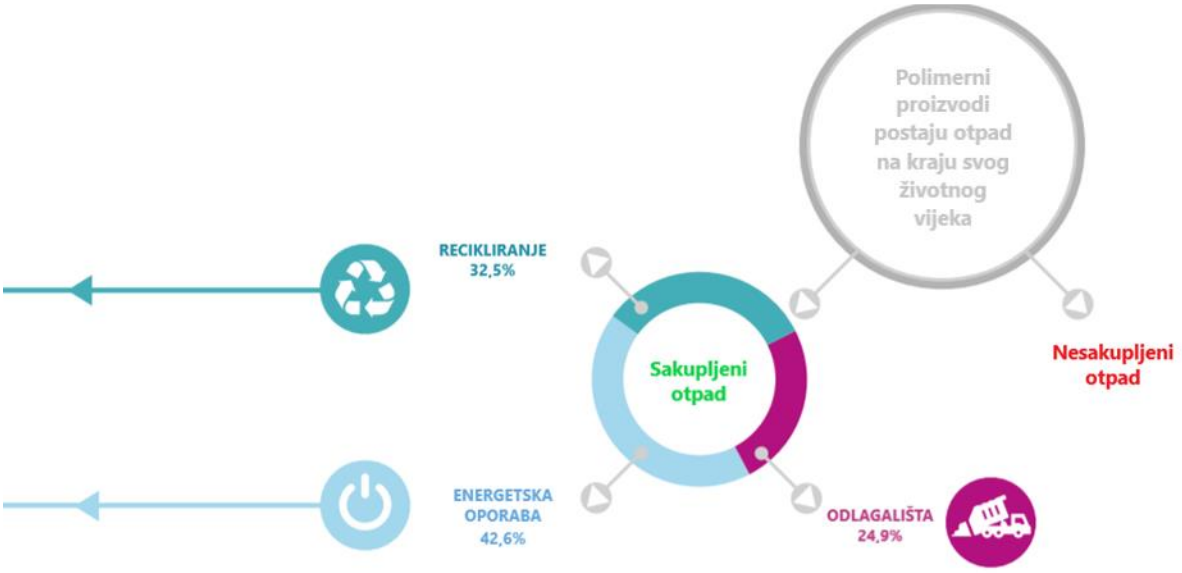


Slika 1.1 Potražnja plastičnih materijala po segmentima u 2018. godini u EU [1]

Životni vijek plastičnih proizvoda uvelike ovisi o materijalu i namjeni, no u pravilu je uvelike kraći nego kod proizvoda od ostalih materijala, kao što su metali ili keramika. Danas se sve više teži recikliranju svih materijala, a posebno plastičnih. Plastični materijali nisu razgradljivi u prirodi i uslijed atmosferskih uvjeta dolazi do fragmentacije plastičnih materijala na sitne dijelove koji onda odlaze dalje u prirodu i onečišćuju kako biljni tako i životinjski svijet, a

posljedično i ljudski organizam. Trend recikliranja materijala raste, no i dalje ogromne količine plastičnog otpada završavaju na odlagalištima, kako uređenim tako i divljim. Problem divljih odlagališta je taj što otpad na njima nikako nije osiguran da se ne rasprostrani dalje po prirodi i ne onečisti okoliš.

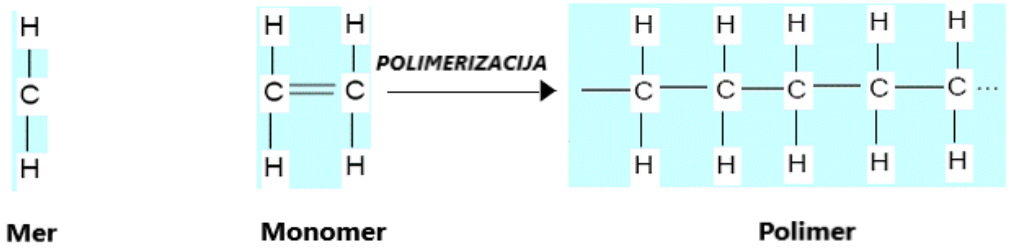
Ne zna se koliko točno otpada onečisti okoliš, ali postoje podaci za ostale načine zbrinjavanja otpada. Na odlagalištu je 2018. godine u EU završilo 24,9 % svog sakupljenog plastičnog otpada. Najviše je otišlo na energijsku oporabu, čak 42,6 %, gdje se onda plastični materijali zbog svoje visoke energijske vrijednosti upotrebljavaju kao alternativni izvori energije, a 32,5 % plastičnog i gumenog otpada otišlo je u pogone za recikliranje (slika 1.2). Ishod recikliranja je sekundarna sirovina u obliku polimernog granulata, koja se onda miješanjem s primarnom sirovinom može primijeniti za ponovnu izradu plastičnih proizvoda [1].



Slika 1.2 Polimerni proizvodi na kraju svog životnog vijeka u EU u 2018. godini [1]

2 POLIMERI

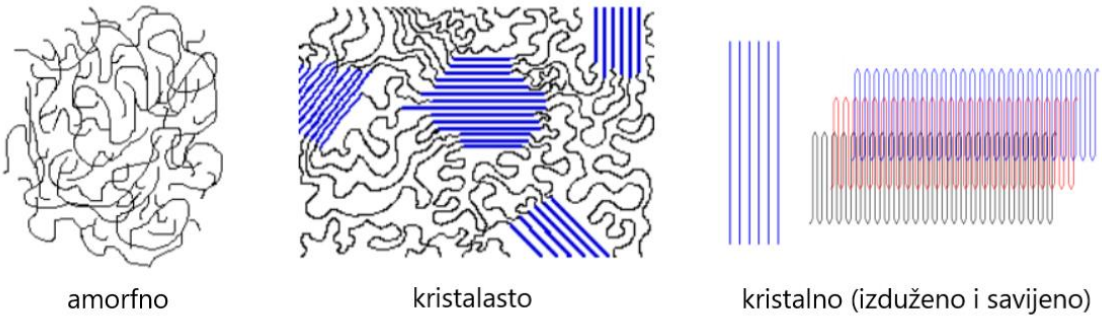
Polimer je materijal građen od lanaca makromolekula, a strukturna jedinica makromolekule se naziva mer. Mer se ponavlja te tvori jednostavni spoj – monomer. Broj monomera u lančanoj strukturi polimera naziva se stupanj polimerizacije te o njemu ovisi molekulna masa polimera. U makromolekulama su strukturne jedinice meri povezane kovalentnim vezama i tvore temeljni lanac. Polimeri su tvari velike molekulne mase, u prosjeku veće od 10 000. Polimeri koji imaju malu molekulnu masu nazivaju se oligomerima. Oligomeri se sastoje od malog broja (od 2 do 50) monomera, dok kod polimera broj monomera praktički nije ograničen [2]. Na slici 2.1 prikazan je odnos između mera, monomera i polimera. Polimerizacijom monomera na slici 2.1 nastaje najjednostavniji i najčešće korišten plastičan materijal, polietilen (PE).



Slika 2.1 Proces polimerizacije [3]

O vrsti monomera ovise i sva svojstva budućeg polimera. Monomer je najčešće građen od atoma kisika, ugljika i vodika, a rjeđe i od fluora, dušika i klora.

Novonastale makromolekule s obzirom na oblik mogu biti: linearne, razgranate i umrežene. Treba promotriti polimere i na višoj, nadmolekulskoj strukturnoj razini, radi boljeg razumijevanja samih polimera i od kuda dolaze njihova uporabna svojstva. Nadmolekulska razina rezultat je spajanja makromolekula raznim sekundarnim vezama. Veze između makromolekula su elektromagnetske prirode, a mogu biti Van der Waalsove, dipol – dipol i vodikove veze [4] [5]. O rasporedu makromolekula ovise daljnja uporabna svojstva, a makromolekule mogu biti raspoređene amorfno, kristalasto i kristalno, što je prikazano na slici 2.2.



Slika 2.2 Raspored makromolekula [5]

Amorfna struktura je nepravilna te se posljedično od takve strukture ne mogu očekivati mehanička svojstva kao od kristalne strukture. Kod kristalastog rasporeda postoji određeni udio amorfne i određeni udio kristalne faze što se naziva stupanj kristalnosti. Stupanj kristalnosti predstavlja udio kristalne faze u kristalastoj strukturi koji ovisi o [5]:

- duljini osnovnog lanca
- grananju osnovnog lanca
- inter- i intramolekulskim vezama.

Ako postoji i orijentacija polimernih lanaca, to za posljedicu ima i viši stupanj uređenosti strukture polimera. Kod polimera kristalaste strukture postoji visok stupanj uređenosti lanaca i velika gustoća veza između lanaca što za posljedicu ima visoku čvrstoću, toplinsku i kemijsku postojanost na djelovanje raznih kiselina i lužina [5].

U pogledu materijala u strojarstvu i dalje su najznačajniji sintetski polimeri, koji se dobivaju procesom polimerizacije iz naftnih izvora. O prirodnim polimerima bit će više riječi u daljnjim poglavljima. Sintetski polimeri se prema ponašanju pri povišenoj temperaturi i svojstvima mogu podijeliti u četiri skupine:

1. Plastomeri
2. Elastomeri
3. Elastoplastomeri
4. Duromeri

Plastomeri su skupina polimera koji se odlikuju visokom oblikovljivosti. Odlična oblikovljivost plastomera je posljedica toga što su veze između makromolekula fizikalne, što omogućuje opetovano zagrijavanje i hlađenje, što nije moguće kod elastomera i duromera. Izgrađeni su od linearnih ili granatih makromolekula velikih relativnih molekulnih masa. Plastomeri mogu biti amorfni ili kristalasti, ali kristalni ne. O stupnju kristalnosti ovise mehanička svojstva polimera, tako veći udjel amorfne faze doprinosi povećavanju fleksibilnosti i obradivosti, a veći udjel kristalne faze gustoći, čvrstoći, tvrdoći i postojanosti prema kemikalijama [2]. Neki od najčešćih primjera plastomera su: polietilen (PE), poli(etilen-teraftalat) (PET), polipropilen (PP), polistiren (PS), poli(vinil-klorid) (PVC).

Elastomeri su skupina polimera koje povezuje iznimna elastičnost radi njihove strukture, koju čine rahlo povezane makromolekule. Elastomerima pripadaju svi materijali na bazi prirodnoga i sintetskoga kaučuka. Elastomeri su građeni od dugih, linearnih makromolekulskih lanaca koji su umreženi procesom vulkanizacije [2]. Vulkanizacija je kemijsko–toplinski proces umreživanja kaučuka uz dodatak sredstva za umreživanje, najčešće sumpora, a rjeđe selenija ili telurija. Vulkanizacija se može odvijati pod tlakom ili bez tlaka, ali u oba slučaja je prisutna povišena temperatura u procesu. Vulkanizacija pod tlakom se odvija pri 150 °C u kalupima koji se nalaze u hidrauličkoj preši. Vulkanizacija bez pritiska se primjenjuje kada prva navedena nije moguća zbog zahtjeva na proizvod u smislu ekstrudiranja i duljine proizvoda te se tada kao medij upotrebljava vodena para ili vrući zrak. Elastomeri se procesom vulkanizacije uz dodatak sredstva za umreživanje prevode u gumene proizvode. Radi tih kemijskih veza ostvarenih vulkanizacijom, elastomeri gube mogućnost plastičnog oblikovanja, ali ostaje sačuvana pokretljivost dijelova lanaca, od kuda dolaze njihova iznimna elastična svojstva. Radi svojih elastičnih svojstava elastomeri se i nakon djelovanja vanjske sile i deformacije oblika vraćaju u svoj definirani oblik koji posjeduju u neopterećenom stanju [5].

Elastoplastomeri su skupina polimera koji su preuzeli ponešto od ključnih svojstava i od plastomera i elastomera. Pri sobnoj temperaturi imaju elastičnost kao elastomeri, a pri promjeni temperature do izražaja dolazi svojstvo ključno za plastomere, a to je da pri porastu temperature omekšavaju, a pri opadanju temperature skrućuju. Za razliku od procesa vulkanizacije koji je spor i ireverzibilan, proces kojim elastoplastomeri umrežuju je brz i reverzibilan što im omogućava oblikovljivost kao kod plastomera. Nedostatak elastoplastomera naspram

elastomera je što ne podnose toliko visoke temperature kao elastomeri, tako da se primjenjuju za namjene gdje se ne zahtijeva visoka radna temperatura [6].

Posljednja od glavnih skupina polimernih materijala su duromeri. Duromeri su građeni od gusto prostorno umreženih makromolekula koje procesom polikondenzacije tvore smolu, viskozni i lakotaljivi pretpolimer. Polikondenzacija je međusobna reakcija molekula jednostavnih spojeva kojom nastaju spojevi većih relativnih molekulnih masa. Dodatkom umreživala smole otvrdnu, stvarajući netaljive materijale koji više nisu pogodni za nikakvo daljnje oblikovanje. Duromeri se naspram ostalih polimera odlikuju visokom tvrdoćom, čvrstoćom i toplinskom postojanošću. Svoju primjenu su našli u proizvodnji kompozita, u formi ljepila te kao kućišta za kućne aparate [2].

2.1 Uporabna i fizikalna svojstva polimernih materijala

Fizikalna, kao i sva ostala svojstva materijala proizlaze iz njegove mikrostrukture. Kod polimernih materijala njihova svojstva ovise o nizu parametara, kao što su [7]:

- kemijski sastav
- raspored i vrsta makromolekulnih lanaca
- molekulna masa
- prisutnost vodikovih veza
- uređenost strukture, tj. stupanj kristalnosti

U tablici 2.1 nabrojane su neke od skupina uporabnih svojstava i za svaku skupinu najbitnija i najčešća svojstva. Svaka od četiri osnovne skupine polimera, opisane u poglavlju prije, imaju različita svojstva karakteristična za svoje parametre mikrostrukture.

Tablica 2.1 Glavna svojstva polimernih materijala [7]

Uporabna svojstva	**Naziv svojstva**
MEHANIČKA	čvrstoća, istezljivost, modul elastičnosti, tvrdoća, žilavost
TOPLINSKA	toplinska provodnost, toplinska rastezljivost, temperatura omekšavanja, postojanost oblika pri povišenim temperaturama, specifični toplinski kapacitet, toplinska difuznost, entalpija, toplinska prodornost
ELEKTRIČNA	električna vodljivost, električni otpor, dielektrična svojstva
POSTOJANOST	kemijska postojanost, UV postojanost
OSTALA SVOJSTVA	gustoća, propusnost svjetla, indeks loma, udio dodataka, optička svojstva

U smislu konstrukcijske namjene polimernih materijala, najzanimljivija su mehanička svojstva polimera, koja se definiraju kao reakcije i promjene stanja ili neke druge pojave u materijalu, a izazvane su djelovanjem raznih unutarnjih i vanjskih čimbenika. Polimer u smislu konstrukcijskog materijala nikada neće moći zamijeniti metale i keramiku jer nikad neće moći postići dovoljne vrijednosti modula elastičnosti, tvrdoće i ostalih bitnih mehaničkih svojstava, što sve potječe od mikrostrukture i kemijskog sastava.

U nastavku teksta bit će opisana samo glavna mehanička svojstva koja će ujedno biti ispitana na uzorcima biorazgradljivih plastičnih materijala koji su tema ovog rada.

2.1.1 Modul elastičnosti E

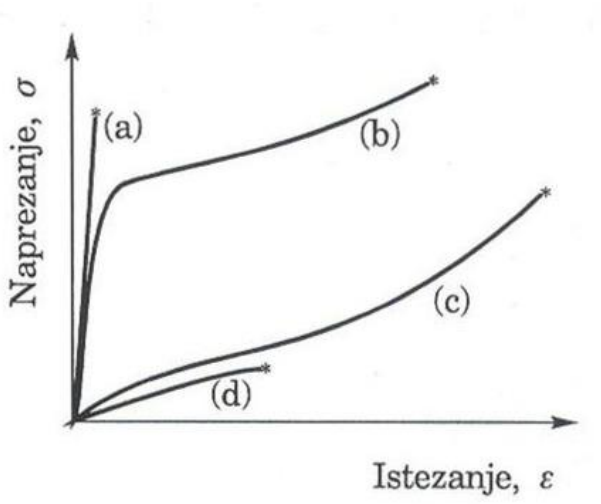
Modul elastičnosti *E* predstavlja mjeru za krutost materijala i zato je u svijetu konstruiranja jedno od najbitnijih svojstava, koje se za svaki poznati materijal proračunava. Na slici 2.3 prikazan je dijagram „naprezanje – istezanje“ za svaku od skupina polimernih materijala. Modul elastičnosti se računa kao omjer zadanog naprezanja i linijske deformacije [8]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{1.1}$$

Eksperimentalno, modul elastičnosti *E* se računa preko nagiba pravca u odnosu na os apscise. Kada je kod krivulje jasno izražen taj početni pravac, vrijedi jednadžba [8]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = tg\alpha \qquad (1.2)$$

Iz jednadžbe 1.2 očito je kako s porastom tangensa kuta raste i modul elastičnosti, tj. s porastom kuta raste i modul elastičnosti. Prema slici 2.3 može se zaključiti da duromeri i amorfni plastomeri imaju najviši modul elastičnosti zbog najvećeg kuta između pravca i osi apscise. Najniži modul elastičnosti imaju elastomeri.



Slika 2.3 Dijagram „naprezanje – istezanje“ za razne skupine polimera: a) duromeri i amorfni plastomeri, b) kristalasti plastomeri, c) elastoplastomeri, d) elastomeri [9]

Iznosi modula elastičnosti *E* se za polimerne materijale kreće od 50 do 150 N/mm^2 za elastomere, od 2100 do 3500 N/mm^2 za amorfne plastomere, od 150 do 3200 N/mm^2 za kristalaste polimere te od 5000 do 12 000 N/mm^2 za duromere. Za usporedbu, modul elastičnosti za običan ugljičan čelik iznosi oko 210 000 N/mm^2. Iz ovih podataka očito je zašto polimerni materijali nikada neće moći biti zamijeniti metalne materijale u konstrukcijama gdje su potrebne visoke vrijednosti mehaničkih svojstava [10].

2.1.2 Žilavost

Žilavost je sposobnost materijala da apsorbira mehaničku energiju uzrokovanu vanjskim opterećenjem putem plastične deformacije materijala. Količina energije koja je potrebna da bi se materijal plastično deformirao i da bi došlo do loma predstavlja mjeru žilavosti materijala [11]. Poveznica između modula elastičnosti i žilavosti nekog materijala se očituje preko „σ – ε“

dijagrama. Površina ispod krivulje na spomenutom grafu predstavlja količinu energije koji je materijal sposoban primiti prije nastanka loma, što je prikazano na slici 2.4.



Slika 2.4 Mjera za žilavost materijala kao površina ispod „σ – ε“ dijagrama [11]

Na dijagramu na slici 2.4 prikazana su dva materijala koji prije loma mogu podnijeti jednak iznos naprezanja, ali je razlika u tome što materijal čija je krivulja označena na dijagramu plavom bojom može podnijeti puno višu plastičnu deformaciju prije nego što dođe do loma. Takvi materijali se nazivaju žilavima i njihov lom žilavim lomom. Skica ispitnog tijela materijala označenim plavom bojom pokazuje i kako izgleda žilavi lom. Vidljivo se kako je ta plastična deformacija trajala i kako lom nije nastao trenutačno, dok kod crvenog ispitnog tijela plastična deformacija skoro pa uopće nije bila prisutna i došlo je do trenutnog, krhkog loma. Materijal na slici, čija je krivulja označena crvenom bojom nema sposobnost da akumulira mehaničku energiju nastalu vanjskim opterećenjem, što znači da djelovanje naprezanja ne uzrokuje plastičnu deformaciju nego samo elastičnu gdje mikropukotina odmah kreće propagirati kroz materijal. Primjer krhkih polimera bi bili polimeri iz skupine duromera i amorfnih plastomera, a žilavih polimera kristalasti plastomeri i elastoplastomeri.

2.1.3 Čvrstoća

Čvrstoća je mehaničko svojstvo materijala koje se izražava kao otpor materijala djelovanju neke vanjske sile. Računa se kao omjer opterećenja (koje može biti rastezno, savojno, pritisno, torzijsko i smično) koje materijal može podnijeti u odnosu na poprečni presjek ispitnog tijela ili predmeta na kojem se ispituje čvrstoća. Kao što je objašnjeno u prethodnim poglavljima, polimerna struktrura može biti amorfna, kristalasta ili kristalna što uvelike utječe na njegovu čvrstoću.

Za polimerne materijale amorfne strukture vrijedi da su oni izotropni, što znači da su im svojstva u svim smjerovima jednaka. Kod amorfnih polimera čvrstoća se promatra preko naprezanja potrebnog da razori veze između makromolekula, rastezanjem ili posmakom [2].

3 BIORAZGRADNJA I KOMPOSTIRANJE

Biorazgradnja je kemijska reakcija degradacije materijala, u ovom slučaju biorazgradljivih plastičnih materijala, izazvana djelovanjem mikroorganizama kao što su gljivice, bakterije i alge. Biorazgradnjom se smatra svaki proces razgradnje koji je uzrokovan biološkim čimbenicima. Biorazgradnja i kompostiranje su srodni pojmovi, ali postoji razlika među njima. Pojam biorazgradljivosti se odnosi na svaki materijal koji se u relativno kratkom vremenu razgradi pod utjecajem mikroorganizama te se vrati u prirodu, dok kompostabilni materijali razgradnjom proizvode humus, prirodnu tvar bogatu hranjivim tvarima koja zadržava vodu i služi kao hrana biljkama. Iz ove razlike se može zaključiti kako su svi kompostabilni materijali biorazgradljivi, ali nisu svi biorazgradljivi materijali kompostabilni [12].

U kontekstu plastičnih materijala, biorazgradljivim plastičnim materijalom se smatra svaki razgradljivi plastičan materijal kojem je primarni mehanizam razgradnje uzrokovan metaboličkim procesima mikroorganizama. Prirodni polimeri, kao što su proteini, polisaharidi i nukleinske kiseline razgrađuju se procesom oksidacije ili hidrolize, dok je kod sintetskih polimera njihova ugljična osnova temelj za ugljik kao hranu mikroorganizmima [13]. Sintetski polimeri u svom kemijskom sastavu uvijek imaju prisutan ugljik i vodik, a često i kisik, flour, dušik i klor. Za proces kompostiranja ključan je odnos sadržaja ugljika i dušika u kompostnoj masi. Ugljik služi kao izvor energije mikroorganizmima, a dušik je ključan za sintezu proteina. Optimalan omjer je 25:1 u korist ugljika. Ako omjer naraste iznad 25:1 dolazi do usporenja procesa kompostiranja radi nedostatka dušika za mikrobiološki rast, a ako padne ispod 25:1, raspoloživi ugljik nije dostatan za razgradnju svog dušika, što uzrokuje da dušik stvara spojeve kao što je amonijak koji uzrokuje neugodne mirise [14].

Biorazgradnja biorazgradljive plastike se može odvijati na dva načina s obzirom na prisustvo kisika, u aerobnim i anaerobnim uvjetima. Kada su uvjeti aerobni to podrazumijeva prisustvo kisika u procesu kompostiranja, a kada su anaerobni, kisik nije biti prisutan. Ovisno o tome jesu li prisutni aerobni ili anaerobni uvjeti, različiti su produkti na kraju procesa.

Aerobna biorazgradnja [13]:

$$\boldsymbol{Polimer + O_2 \rightarrow CO_2 + biomasa + ostatak} \qquad (3.1.)$$

Anaerobna biorazgradnja [13]:

$$\boldsymbol{Polimer \rightarrow CO_2 + CH_4 + H_2O + biomasa + ostatak} \quad (3.2.)$$

U aerobnim uvjetima, produkti reakcije su CO_2 (ugljikov dioksid), biomasa i prirodni ostaci, a u anaerobnim uvjetima radi nemogućnosti stvaranja ugljikovog dioksida, ugljik se spaja s vodikom u metan, CH_4. Novonastali metan se upotrebljava za proizvodnju električne energije ili se pušta u gradsku mrežu gdje služi za grijanje kućanstava. Kod procesa prevođenja biorazgradljivih materijala ili biomase u plinove kao što su ugljikov dioksid, metan i dušikovi spojevi, kao produkti nastaju voda, soli, minerali i ostala biomasa, a taj proces se naziva mineralizacija. Mineralizacija je potpuna kada se sav biorazgradljivi materijal ili sva biomasa razgrade i sav ugljik pretvori u ugljikov dioksid [13]. Radi procesa mineralizacije izgubi se oko 60 % početne mase [14]. U pogledu biorazgradljivih plastičnih materijala češće se govori kao o kompostabilnom materijalu nego biorazgradljivom materijalu, jer njihova namjena nije da nakon uporabe završe u prirodi u nekontroliranim uvjetima i tako se razgrade, nego da završe u kompostištu gdje se u kontroliranim uvjetima razgrade i kao produkt daju humus koji se dalje može iskoristiti kao gnojivo. Kompostiranje je egzoterman proces, što znači da se oslobađa toplina tijekom cijelog procesa [13].

Kako bi neki plastičan materijal bio klasificiran kao kompostabilan mora zadovoljiti sljedeće uvjete [15]:

1. Biorazgradnja – plastičan materijal se mora razgraditi u aerobnim ili anaerobnim uvjetima na navedene komponente istom brzinom kao i celuloza
2. Dezintegracija – plastičan materijal nakon proces biorazgradnje ne smije se razlikovati od ostatka biomase
3. Netoksičnost – procesom biorazgradnje ne smije nastati nikakav toksičan ostatak i biomasa se mora moći iskoristiti u poljoprivredi kao gnojivo.

3.1 Norme

Najčešći način kompostiranja razgradljivih plastičnih materijala je u industrijskim kompostanama, a još je moguće kompostiranje u kućnom kompostištu i postrojenjima za proizvodnju bioplina. Za kompostiranje u industrijskim kompostanama postoje norme koje zahtijevaju određeni postotak razgrađenog materijala u nekom zadanom vremenu. Norme ASTM (e. *American Society for Testing and Materials*), ISO 14855 i DIN V49000 zahtijevaju u 180 dana 60 % biorazgradnje, a norma *HRN EN 13432: 2003* Ambalaža - *Zahtjevi za oporabivost ambalaže kompostiranjem i biorazgradnjom - Sheme ispitivanja i kriteriji prihvatljivosti ambalaže (EN 13432 Packaging - Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation - Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging*) zahtijeva u vremenskom roku od 90 dana 90 % biorazgradnje [15].

Svaki biorazgradljivi materijal bi se trebao moći razgraditi u okolišu u netoksičnu masu, vodu ili ugljikov dioksid unutar godine dana uz pomoć prirodnih procesa [16].

3.2 Proces kompostiranja

Kompostiranje se odvija u 2 faze [16]:

- razlaganje, koje se odvija u 3 stadija (mezofilni, termofilni i stadij rashlađivanja), gdje dolazi do raspada organskih tvari
- humifikacija, koja odgovara stadiju sazrijevanja karakterizirana reorganizacijom organske tvari u stabilne molekule

Tijekom mezofilnog stadija, temperatura biootpada polako raste do 40 ºC, prosječne temperature za ovaj stadij, dok pH vrijednost pada jer se oslobađaju organske kiseline iz ugljikohidrata i lipida uslijed razgradnje mikroorganizama. Pri temperaturi od 40 ºC, mezofilne bakterije počinju zamjenjivati termofilne bakterije čime počinje termofilni stadij. Temperatura i dalje raste do 50 – 60 ºC jer termofilni stadij uključuje mnogo termofilnih gljivica koje razlažu proteine i stvaraju amonijak, radi čega raste i pH vrijednost kompostne mase [16].

Kada kompostna masa dosegne temperaturu od 60 ºC, brzina kompostiranja pada, a nakon 70 ºC samo enzimi iz prethodne faze još pridonose razgradnji te nakon toga nastupa stadij

rashlađivanja. Tijekom stadija rashlađivanja kompostna masa se stabilizira i ponovno se pojavljuju mezofilni mikroorganizmi [16].

Finalni stadij, humifikacija, odvija se pri sobnoj temperaturi pod utjecajem mezofilnih organizama koji su se ponovno pojavili u prethodnom stadiju. Proces prestaje biti egzoterman i gubitak mase se sve više smanjuje. Smatra se da je proces kompostiranja završio kada [16]:

- nema više zagrijavanja nakon miješanja kompostne mase
- kompostna masa ne postane anaerobna tijekom skladištenja
- nema izmjene dušika s tlom.

U literaturi postoji mnogo parametara po kojima se može zaključiti da je proces kompostiranja završio, ali niti jedan sam za sebe ne govori dovoljno, nego je potrebno uzeti njihovu kombinaciju. Neki od navedenih parametara su: odnos C i N, aktivnost mikroorganizama, indeks klijanja (e. *germination index*), kapacitet izmjene kationa (e. *cation exchange capacity, CEC*), sadržaj humusnih tvari (e. *humic substances content*) i mnogi drugi. [16]

3.3 Parametri kompostiranja

U literaturi se pojavljuje sve više parametara kompostiranja. Parametri se mogu podijeliti u tri osnovne skupine, a to su [17]:

- prije procesa
- tijekom procesa
- nakon procesa

Kako bi se omogućilo pravilno vođenje procesa kompostiranja, ključno je da su parametri pravilno uravnoteženi. Prije početka samog procesa potrebno je razmišljati o već spomenutom odnosu C i N u kompostnoj masi, vlažnosti, poroznosti, gustoći mase i količini kisika. Vlažnost je vrlo bitna zbog mikroorganizama. Oni, kao i sva ostala živa bića, trebaju vodu za funkcioniranje. Optimalna vlažnost kompostne mase je oko 45 – 50 %, a regulira se s pomoću temperature kompostne mase, koja je najbolji pokazatelj kada je potrebno otvoriti ventil za vodu. Ukoliko je vlažnost ispod donje granice, dolazi do dehidriranja kompostne mase što zaustavlja biološki proces i daje biološki nestabilan kompost na kraju procesa, a ako je vlažnost iznad dozvoljene granice, proces postaje anaeroban [17].

Jedan od najbitnijih parametara koje je potrebno pratiti tijekom procesa je temperatura. Temperatura se mijenja po stadijima, a trebala bi omogućiti sanaciju, brzu razgradnju, isparavanje vlage i humifikaciju. PH vrijednost se također mijenja po stadijima, a ključna je za pravilno vođenje procesa [17].

3.4 Čimbenici koji utječu na biorazgradnju biorazgradljivih polimernih materijala

Osim procesa kompostiranja i parametara koje je potrebno zadovoljiti kako bi se kompostiranje pravilno odvijalo, potrebno je promotriti i čimbenike koji utječu na biorazgradljivost polimera sa stajališta polimernih materijala i njihovih svojstava.

Glavni čimbenici koji utječu na biorazgradnju biorazgradljivih polimernih materijala su: struktura polimera, morfologija polimera, molekulna masa, zračenje i kemijsko tretiranje [17].

3.4.1 Struktura polimera

Makromolekule prirodnog podrijetla, kao što su proteini, celuloza i škrob se uobičajeno razgrađuju u prirodi procesom hidrolize i oksidacije. Proizvodnjom biorazgradljivih plastičnih materijala se pokušava oponašati struktura navedenih makromolekula prirodnog podrijetla, radi čega većina biorazgradljivih plastičnih materijala sadrži međumolekulne veze koje se razgrađuju procesom hidrolize s pomoću mikroorganizama hidrolitičkih enzima. Neke od tih veza su enamin, urea i uretanske veze. S obzirom na to da se većina katalitičkih reakcija potaknutih enzimima odvija u vodenom mediju, kombinacija hidrofilnih i hidrofobnih veza u polimerima doprinosi njihovoj biorazgradljivosti. Kombinacija tih dviju veza je u pogledu biorazgradljivosti puno povoljnija nego kada su makromolekule povezane samo hidrofilnim ili samo hidrofobnim vezama. [17]

Svaki enzim na sebi ima aktivno mjesto na koje veže supstrat i ključan je za katalizu reakcije. Da bi sintetski plastičan materijal bio razgradljiv procesom enzimske katalize, njegov makromolekulni lanac mora biti fleksibilan kako bi ušao na gore spomenuto aktivno mjesto [17].

3.4.2 Morfologija polimera

Dok se struktura polimera bavi kemijskim sastavom, morfologija se bavi oblikom i građom. Pod morfologiju polimera spadaju uređenost lanca, ponovljivost mera u makromolekuli i raspored makromolekula. Jedna od ključnih morfoloških razlika između proteina, prirodnih polimera i sintetskih polimera je u ponovljivosti jedinica u lancu. Proteini su puno nepravilnije građe radi čega i teže kristaliziraju što vjerojatno doprinosi biorazgradljivosti. Sintetski polimeri se sastoje od malih, ponavljajućih jedinica (mera) zbog čega rastu šanse da kristaliziraju, što onemogućuje pristup hidrolitičkih skupina enzimima, a posljedično i biorazgradnju [17].

3.4.3 Zračenje i kemijsko tretiranje

Fotoliza je kemijska reakcija razgradnje tvari djelovanjem elektromagnetskog, u ovom slučaju UV i γ zračenja. Fotolizom polimera nastaju slobodni radikali, vrsta međuspoja koja je vrlo reaktivna i vrlo brzo tvori neki novi spoj ili se raspadnu na neki novi radikal i stabilnu molekulu i/ili ioni, električki nabijeni atomi ili molekule. U slučaju fotolize, makromolekulni lanci se cijepaju i ponovno umrežuju u neke nove spojeve. Uz proces fotolize često se pojavljuje i proces oksidacije, koji dodatno pridonosi cijepanju polimernih lanaca. Na početku procesa očekuje se viša brzina razgradnje, do trenutka dok se većina fragmentiranog polimera razgradi, a zatim se brzina smanjuje i počinje umreživanje slobodnih radikala i iona [17].

3.4.4 Molekulna masa

Polimeri su radi svoje građe, koja se temelji na makromolekulnim lancima, u prosjeku velikih molekulnih masa što otežava proces njihove razgradnje. Danas su brojna istraživanja posvećena razgradnji polimera, pogotovo kako molekulna masa utječe na razgradnju, no mnoge razlike u istraživanju mogu se pripisati razlikama u morfologiji i hidrofilnom i hidrofobnom karakteru polimera. Mikroorganizmi zaduženi za razgradnju proizvode dvije vrste enzima; egzoenzime, koji razgrađuju polimerne lance od krajeva prema sredini i endoenzime koji razgrađuju polimere nasumično uzduž lanca. U slučaju prisutnosti egzoenzima očekuje se veći utjecaj molekulne mase na brzinu razgradnje, što nije slučaj kod endoenzima. Ipak, polimeri ostaju relativno postojani na utjecaj mikroorganizama sve dok imaju veliku molekulnu masu. Brojni

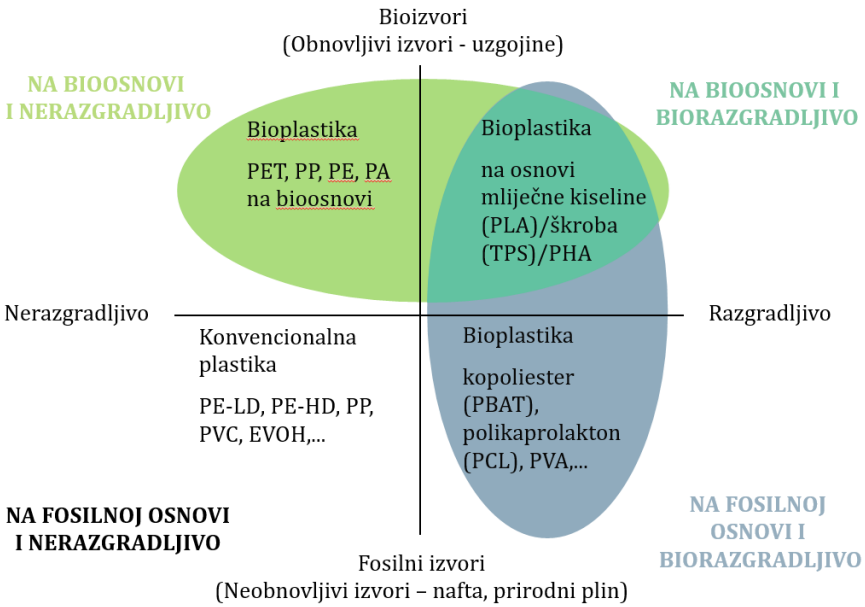
konvencionalni plastični materijali, kao što su polietilen, polipropilen i polistiren su imuni na djelovanje mikroorganizama. Fotorazgradnjom i kemijskom razgradnjom moguće je plastične materijale male molekulne mase fragmentirati do točke kada mikroorganizmi mogu početi djelovati [17].

4 BIORAZGRADLJIVI PLASTIČNI MATERIJALI

Biorazgradljivi plastični materijali mogu se klasificirati na mnogo načina, npr. po kemijskom sastavu, metodi sintetiziranja, ekonomskom značenju, primjeni, itd. Najčešće se klasificiraju po načinu nastanka, a po načinu nastanka bioplastika se može podijeliti na [15]:

- plastiku na bioosnovi
- biorazgradljivu plastiku na bioosnovi
- biorazgradljivu plastiku na fosilnoj osnovi

Plastikom na bioosnovi se smatra svaki plastični materijal čija je sirovina potekla iz prirodnih, obnovljivih izvora, ali nije razgradljiv. Biorazgradljiva plastika na bioosnovi kao izvor sirovina ima bioosnovu i razgradljiva je. Biorazgradljiva plastika na fosilnoj osnovi je razgradljiva, iako je proizvedena od fosilnih goriva [15]. Vrsta sirovine ne određuje hoće li se plastičan materijal smatrati bioplastikom ili ne, što je prikazano i na slici 4.1.



Slika 4.1 Klasifikacija plastičnih materijala s obzirom na razgradljivost i izvor sirovina [1]

Prva skupina prikazuje plastične materijale koji su sintetizirani od bioosnove, ali nisu razgradljivi. U ovu skupinu pripadaju celulozni derivati, npr. celulozni esteri i eteri, polimeri na bazi šećerne trske i ricinusova ulja. Drugu skupinu čine biorazgradljivi plastični materijali, tj. bioplastika na bioosnovi. Oni su najčešće po kemijskom sastavu škrobne mješavine, odnosno polimeri sintetizirani iz polisaharida kao što su kukuruz, pšenica ili krumpir te poliesteri, od

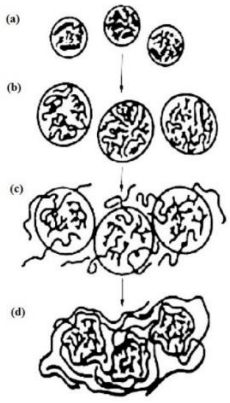
kojih su najčešći polimeri mliječne kiseline (polilaktid (PLA)) i polimeri načinjeni od mikroorganizama i biljaka (poli(hidroksi-alkanoat)) (PHA). Treća skupina se odnosi na biorazgradljive plastične materijale, ali koji potječu od fosilne osnove, uglavnom nafte. U ovu skupinu spadaju aromatski i alifatski poliesteri te poli(vinil-alkoholi) (PVOH). Zadnja skupina, nerazgradljivi plastični materijali na fosilnoj osnovi su klasični plastični materijali o kojima je bilo riječi u prijašnjim poglavljima.

4.1 Biorazgradljivi plastični materijali izdvojeni iz biomase

U ovu skupinu spadaju svi polimeri koji se bez ljudske intervencije pojavljuju u prirodi. Čovjek eksploatira prirodne polimere za različite svrhe od svog postojanja. U početku su to bili koža i kosti životinja, biljke, škrob, svila, itd. U zadnjih sto godina, razvoj prirodnih polimernih materijala je dobio na značaju te se sve više istražuju njihova struktura, svojstva i postupci sintetiziranja. Razvojem tehnologije i znanosti dolazi i do razvitka biorazgradljive plastike na bioosnovi, što joj omogućuje sve širu primjenu [18].

4.1.1 Škrob

Škrob je mješavina linearne (amiloza) i razgranate (amilopektin) poli-(1,4)-α glukoze. Na navedenim molekulama postoje hidrofobne skupine koje čine i sam škrob hidrofobnom tvari. Škrob je biorazgradljiv u skoro svim okolišnim uvjetima, najčešće hidrolizom gdje kao produkt djelovanja mikroorganizama i enzima nastaje glukoza, koja se zatim metabolizira u ugljikov dioksid i vodu. Škrob je sam po sebi teško obradljiv, ima lošu dimenzijsku stabilnost i u konačnici proizvod napravljen od škroba ima loša mehanička svojstva. Škrob sam po sebi nije topljiv te ga je nemoguće obraditi kao plastomere. Međutim, može se podvrgnuti procesu geliranja (slika 4.2) gdje dolazi do poremećaja u strukturi pod utjecajem vode i ostalih omekšavala te topline. Produkt procesa geliranja je taljivi škrob koji je zbog svoje modifikacije nazvan plastomerni škrob (e. *Thermoplastic starch*, *TPS*) koji se može obrađivati kao plastomer. TPS se zbog svojih loših svojstava skoro pa nikad ne upotrebljava kao zaseban materijal već se miješa s drugim potpuno razgradljivim plastičnim materijalima. Prednosti TPS-a su njegova niska cijena i proizvodnja iz obnovljivog izvora, dok ostali plastični materijali s kojima se miješa doprinose u pogledu mehaničkih svojstava. Škrob se najčešće miješa s polilaktidom (PLA) i poli(vinil-alkoholom) (PVA) [18].



Slika 4.2. Proces geliranja škroba [17]

Problem kod škroba je njegova nemješljivost s ostalim plastičnim materijalima, radi čega je potrebno kemijski ga modificirati, što se najčešće odvija zamjenom hidroksilnih grupa u molekuli škroba. Novonastali derivati zadržavaju biorazgradljivost kao i kod škroba, ali se mehanička svojstva drastično mijenjaju, čineći škrob pogodnijim materijalom za masovnu uporabu.

Jedan od predstavnika skupine polisaharida, osim škroba, je i hitozan. Kao i škrob, i hitozan je ekonomski isplativ, netoksičan, biorazgradljiv i proizveden iz obnovljivog izvora. Mješavina ta dva polisaharida pokazala se vrlo dobrom u proizvodnji filmova i folija sa zadovoljavajućim svojstvima, što je posljedica inter- i intramolekularnih vodikovih veza između amino i hidroksilnih skupina kod komponenata. O omjeru hitozina i celuloze u mješavini ovise mehanička i vodonepropusna svojstva, mješljivost i biorazgradljivost [18].

TPS i mješavine sa škrobom našle su svoju primjenu u mnogim granama industrije. U prehrambenoj industriji upotrebljavaju se kao zaštitne folije za očuvanje hrane i kao jestivi filmovi. Povećanjem upotrebe folija na bazi škroba u svrhu očuvanja svježine hrane uvelike se doprinosi očuvanju okoliša i smanjenju onečišćenja klasičnim polietilenskim folijama. U poljoprivredi, primjenjuju se kao pokrivke za staklenike, folije koje štite korijene biljaka i kao alati za kontrolirano oslobađanje gnojiva. U poljoprivredi klasični plastični materijali rade dosta problema radi svoje fragmentacije u tlo direktno pored buduće hrane, što je kod plastike na bazi škroba izbjegnuto. Dapače, kada se razgrade, ostaci škrobnih materijala služe kao humus koji hrani biljke i tlo [18].

Plastika na bazi škroba se u razvitku medicine i medicinskog inženjeringa može primjenjivati u mnogobrojne svrhe. Jedna od njih je u razvijanju koštanog tkiva koje mora zadovoljavati stroge uvjete i imati određena svojstva koja posjeduju i spomenuti materijali [18]:

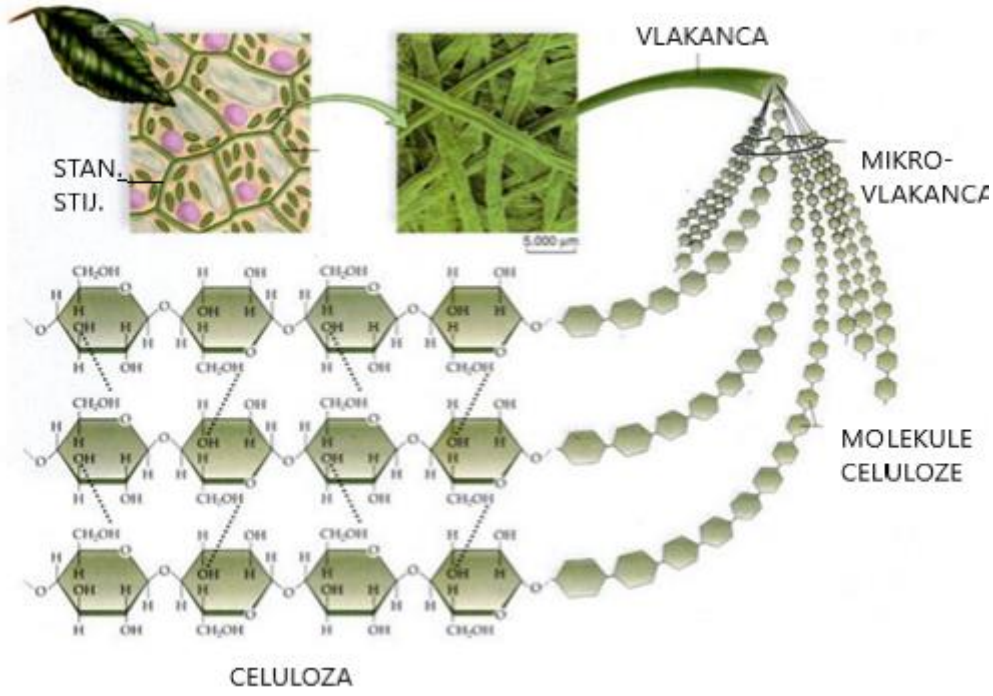
- dobra biokompatibilnost
- biorazgradljivost i pritom netoksičnost
- zadovoljavajuća mehanička svojstva
- razgradnja prema potrebi.

U formi hidrogela i mikrosfera primjenjuju se i za dobavu lijekova koje je potrebno ugraditi u tijelo radi zakašnjele dobave u organizam. Spomenuti plastični materijali, kada se razgrade u tijelu ne štete te nema potrebe za daljnjim procedurama. Jedinstvena svojstva koja posjeduju kao što su hidrofilnost, permeabilnost, biokompatibilnost i sličnost s mekim tkivom otvaraju vrata za mnoge druge primjene u svijetu medicine i biologije [18].

4.1.2 Celuloza

Celuloza je trenutno najkorišteniji polimer na svijetu, s procijenjenom prirodnom godišnjom proizvodnjom od 10^6 tona te se smatra gotovo nepresušnim izvorom sirovina. Razlog tomu je što je prisutna u svim biljkama čineći njihov kostur i gotovo sve biljke proizvode celulozu [19].

Celuloza je polisaharid sastavljen od nerazgranatih β-(1→4) polimernih lanaca koji su međusobno povezani D-glukopiranozilnim jedinicama. Duljina polimernih lanaca ovisi o izvoru iz kojeg celuloza dolazi. Molekule celuloze $(C_6H_{10}O_5)_n$ građene su od najčešćih elemenata u prirodi, a *n* broj molekula spojenih vodikovim vezama tvore mikrovlakanca, koja ovisno o kristalnosti strukture formiraju celulozna vlakanca, stanične stijenke svih lignoceluloznih biljaka [17]. Prikaz molekule celuloze do stanične stijenke vidljiv je na slici 4.3.



Slika 4.3 Formiranje vlakanaca od molekula celuloze [20]

Posljedica slabe razgranosti celuloznog lanca u izvornom, kristalnom stanju su krutost i dimenzijska stabilnost vlakana. Izolirana i pročišćena celulozna vlakna imaju visok stupanj kristalnosti, preko 70 %. Međutim, u drvnoj biomasi im je kristalnost tek oko 35 % radi prisutstva drugih lignoceluloznih komponenata. Celuloza se odlikuje postojanošću na jake lužine, relativnom postojanošću na oksidirajuća sredstva i mogućnošću hidrolize djelovanjem kiselina. Spomenuta krutost i dimenzijska stabilnost čini celulozu netopljivom u većini otapala [17].

Celulozna vlakna već se dugo primjenjuju kao ojačavalo u polimernoj matrici u proizvodnji kompozita. Prednosti celuloznih vlakana naspram konvencionalnih, kao što su staklena, ugljikova i aramidna, su niska cijena, mali utjecaj na okoliš i zadovoljavajuća čvrstoća. Celulozna vlakna su sigurnija za rukovanje od konvencionalnih i manje oštećuju proizvodnu opremu što dovodi i do nižih proizvodnih troškova [21].

Svaki materijal ima i svoje nedostatke pa tako i celulozna vlakna. Najvećim nedostatkom smatra se svojstvo hidrofilnosti, radi čega se prilikom miješanja s polimernom matricom koja je hidrofobna pojavljuje visok stupanj disperzije što uzrokuje probleme pri vezivanju vlakana i

matrice. Loša prionljivost vlakana i matrice ima za posljedicu lošija mehanička svojstva. Celulozna vlakna također imaju nisku temperaturu obrade (do 200 ºC), neujednačene dimenzije i svojstva i nisku postojanost na djelovanje mikroba, što ih i čini tako pogodnim biorazgradljivim materijalom. Ipak, problem se pojavljuje kada proizvod krene u proces razgradnje prije kraja ispunjenja svoje funkcije. Mnoge od ovih nedostataka moguće je smanjiti, čak i ukloniti ako se primijeni odgovarajuća obrada, prvo vlakana, a onda i gotovog kompozita. Uz dodatak drugih materijala u kristalite celuloze, kao što su ugljične nanocijevčice i uz homogenu disperziju dolazi do ojačanja kompozita [22].

Celuloza se s pomoću odgovarajuće kemijske obrade može transformirati u celulozne otopine koje naknadnim otapanjem postaju visoko viskozne celulozne derivatne otopine. Prolaskom otopine kroz kupku za zgušnjavanje celuloza se regenerira. Ovakva kemijska obrada omogućuje proizvodnju celuloznih tvorevina primjenjujući opremu za preradu konvencionalnih plastičnih materijala. Najpoznatiji materijali dobiveni ovim postupkom su celofan te *rayon*, u hrvatskom jeziku poznat kao viskozna svila. Celuloza dobivena ovim postupkom, regenerirana celuloza, se ne može oblikovati te se primjenjuje samo u proizvodnji filmova, folija i vlakana [22].

4.1.3 Sojin protein

Sojin protein, slično kao i škrob i celuloza, je bioazgradljiv plastičan materijal koji se u prirodi može pronaći u velikim količinama, niske je cijene i pokazao se kao bioplastičan materijal s velikim potencijalom da bude zamjena konvencionalnim plastičnim materijalima u mnogim primjenama, najčešće u prehrambenoj industriji. Sojin protein je na tržištu dostupan u tri verzije, ovisno o koncetraciji sojinog proteina [22]:

- sojino brašno
- sojin koncentrat
- sojin izolat.

Sojino brašno posjeduje najmanju koncentraciju sojinog proteina (~ 54 %), sojin koncentrat nešto veću (65 – 72 %), a sojin izolat najveću (~ 90 %). Sojin protein je ekstrahiran iz oljuštenih, nemasnih mahunarki soje. Koncentracija sojinog proteina se postiže uklanjanjem većine topljivih neproteinskih spojeva, kao što su ugljikohidrati, neki dušični spojevi i minerali. Postupak uklanjanja se odvija u vodenom, kiselom ili alkoholnom mediju, taloženjem ili

postupkom centrifuge. Molekula sojinog proteina sastoji se od 20 različitih aminokiselina s jakim inter- i intramolekularnim interakcijama. Te interakcije čine sojin protein netopljivim radi čega ga je nemoguće obrađivati kao plastomere, osim ako se ne doda dovoljna količina omekšavala. Problemi koji se pojavljuju kod dodavanja omekšavala je značajan pad mehaničkih svojstava i pojava hidrofilnosti sojinog proteina i omekšavala koji dovode do slabe postojanosti na vlagu plastičnog materijala na bazi sojinog proteina. Međutim, kada omekšavala ishlape tijekom skladištenja ili uporabe, materijal postaje vrlo krhak [22].

Kako bi se nadišli spomenuti nedostaci, plastičan materijal na bazi sojinog proteina se miješa s nekim drugim biorazgradljivim plastičnim materijalom koji ne smije biti hidrofoban jer se neće uspostaviti čvrste veze među plastičnim materijalima. Kao kompatibilan plastičan materijal za miješanje pokazao se poli(hidroksi-ester-eter). Plastični materijali na bazi sojinog proteina nemaju visoku čvrstoću, što se može ispraviti dodatkom celuloznih vlakana i nano ojačavalima. Također, vlakna trave mogu poboljšati razna mehanička i toplinska svojstva. Alkalijski tretman travnatih vlakana uklanjaju hemicelulozu i lignin iz strukture što rezultira većim omjerom duljine i promjera i boljom disperzijom vlakana u plastičnom materijalu [22].

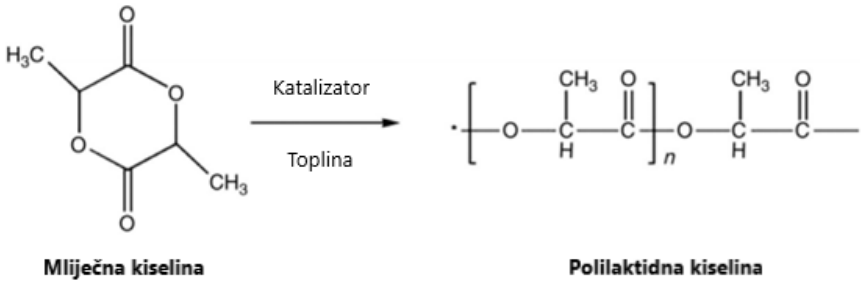
4.2 Biorazgradljivi plastični materijali sintetizirani iz prirodnih osnova

Biorazgradljivi plastični materijali koji se pojavljuju u prirodi opisani u prošlom poglavlju ne mogu uvijek zadovoljiti potrebe tržišta u pogledu mehaničkih i uporabnih svojstava. U ovoj skupini najviše se ističu polilaktidna kiselina (PLA) i poli(hidroksi-alkanoat) (PHA). Njihova primjena i razvitak su u konstantnom porastu i u budućnosti bi mogli sve više zamjenjivati plastične materijale dobivene iz fosilnih goriva u raznim područjima.

4.2.1 Polilaktid (PLA)

PLA je jedan od najvažnijih biorazgradljivih plastičnih materijala s mnogim odličnim svojstvima, primjenjiv u mnogo polja, posebno na području biomedicine. PLA se odlikuje dobrom biokompatibilnosti, biorazgradljivosti i oblikovljivosti te odličnim mehaničkim svojstvima, kao što su čvrstoća i modul elastičnosti. Međutim, PLA se pokazao vrlo krhkim uslijed naprezanja savijanjem i tijekom primjene dolazi do brzog zamora materijala. Također, nedostatak mu je visoka cijena naspram konvencionalnih plastičnih materijala. [22]

PLA je sintetski biorazgradljivi poliester kojem je monomer mliječna kiselina sintetizirana iz prirodnih izvora. Mliječna kiselina se dobiva procesom fermentacije ugljikohidrata kao što su kukuruz, šećerna trska i krumpir, a proces se odvija djelovanjem bakterija. Za odvijanje procesa polimerizacije prikazanog na slici 4.4 potrebni su katalizator i toplina [22].



Slika 4.4 Sinteza polilaktidne kiseline iz mliječne kiseline [22]

PLA visoke molekulne mase može se iz mliječne kiseline sintetizirati na tri različita načina [22]:

- direktnom kondenzacijskom polimerizacijom,
- azeotropnom dehidrativnom kondenzacijom,
- polimerizacijom otvaranjem prstena.

Posljednja od navedenih metoda je i najčešće korištena. Direktna kondenzacijska polimerizacija je najekonomičniji postupak, ali može se sintetizirati samo PLA niske molekularne mase jer je teško eliminirati vodu iz procesa [22].

PLA se razgrađuje primarno hidrolizom kroz dva stadija. U prvom stadiju dolazi do slučajnog prekida unutar lanca esterske grupe što za posljedicu ima smanjenje molekulne mase. Učestalost prekida u lancu ovisi o pH vrijednosti, temperaturi i vlazi atmosfere. Krhkost se pojavljuje sa smanjenjem molekulske mase. U drugom stadiju, preostali, nisko molekulni PLA razgrade mikroorganizimi proizvodeći pritom ugljikov dioksid, vodu i humus [22].

Jedna od velikih prednosti PLA je što se za preradu mogu primijeniti konvencionalni postupci i strojevi za preradu plastičnih materijala te u tom pogledu nisu potrebni nikakvi dodatni

troškovi. PLA se može preraditi u vlakna, filmove, folije i razne oblike postupcima puhanja, ekstrudiranja i injekcijskog prešanja. Prozirnost PLA mu omogućuje da se upotrebljava kao biorazgradljivo pakovanje, kao što su boce, pakovanja za hranu i omoti. Svoju primjenu je našao i u vrećama za biootpad, premazima za papir i karton, vlaknima za odjeću, tepihe, plahte i ručnike. U biomedicini se upotrebljava za šavove, stentove, kao materijal za proteze, medij za dijalizu i kao sustav za dobavu lijekova. PLA se također pokazao kao materijal pogodan za primjenu u aditivnoj proizvodnji [22].

Prisutnost metilnih skupina na ugljikovim atomima u strukturi PLA može narušiti njegovu žilavost. Jedan od načina povišenja žilavosti je kopolimeriziranjem mliječne kiseline s drugim monomerima, ali češće se primjenjuje metoda miješanja PLA s duktilnim polimerima. Kako bi se osigurala biorazgradljivost konačnog materijala, PLA se najčešće miješa s drugim biorazgradljivim plastičnim materijalom više žilavosti. Polikaprolakton (PCL) se istaknuo kao optimalan materijal za mješavinu. PCL je biorazgradljiv plastičan materijal, rastezljiv pri sobnoj temperaturi. Miješanje PLA s PCL rezultira značajnim povišenjem duktilnosti i žilavosti [22].

4.2.2 Poli(hidroksi-alkanoat) (PHA)

PHA se, za razliku od PLA, čija proizvodnja uključuje posebne kemijske reakcije, proizvodi izravno iz metabolizma bakterija. PHA se sintetizira i nakuplja u bakterijama kao ugljik i spremište energije pod uvjetima ograničenih hranjivih tvari u prisustvu viška ugljika. Otkriveno je da čak preko 250 vrsta bakterija ima sposobnost proizvoditi PHA. Novonastali plastičan materijal skladišten je u stanicama kao granule čija se veličina kreće između 0,2 i 0,5 μm. Skladišteni PHA se razgrađuje depolimerizacijom i metabolizira natrag u ugljik i izvor energije čim se nadomjesti količina hranjivih tvari. PHA uključuje obitelj poliestera s različitim bočnim skupinama i različitim brojem ugljikovih atoma u ponavljajućoj jedinici meru. Najviše proučavani polimer iz obitelji PHA su poli(3-hidroksi-butirat) (PHB) i njegov kopolimer poli(hidroksi-butirat-hidroksi-valerat) P(HB-HV). PHB je relativno krut i krhak plastomer visokog stupnja kristalnosti, a dobiva se iz kukuruza, šećerne trske i repe te biljnog ulja. Osim žilavosti, sva njegova ostala mehanička svojstva su usporediva s polipropilenom. Dodatkom 3-hidroksi-valeratne (3HV) bočne skupine na osnovni lanac PHB-a, njegova kristalnost je poremećena. U konačnici, PHBV pokazuje bolju žilavost, ovisno o količini dodanih 3HV bočnih skupina [22].

PHB, P(HB-HV) i ostale PHA polimere mikroorganizmi shvaćaju kao izvor energije. P(HB-HV) se biorazgrađuje u mikrobiološki aktivnom okruženju. Mikroorganizmi se nastanjuju na površinu polimera i luče enzime koji razgrađuju P(HB-HV) u HB i HV jedinice koje zatim služe stanicama kao izvor ugljika za rast biomase. Brzina procesa biorazgradnje ovisi o mnogo faktora, uključujući stanje površine, aktivnost mikroba, pH, temperaturu i vlagu. P(HB-HV) je hidrofoban plastičan materijal, netopljiv u vodi i inertan na prisustvo vlage te se ne razgrađuje u normalnim uvjetima skladištenja. Krajnji produkti razgradnje PHA u aerobnom okruženju su ugljikov dioksid i voda, a u aerobnom još i metan. Po dosadašnjim istraživanjima zaključeno je da se razgradnja PHB-a i P(HB-HV)-a najbrže odvija u anaerobnoj atmosferi, a najsporije u slanoj vodi [22].

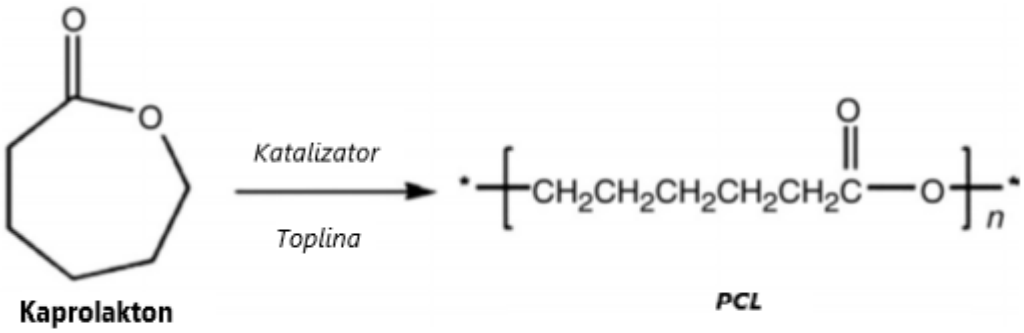
PHA polimeri su se pokazali kao konkurentan materijal na području biorazgradljivih plastičnih materijala za širok raspon primjene. Glavna primjena je u proizvodnji ambalaže. P(HB-HV) se može primijeniti za folije i boce. U medicini se primjenjuje na području rekonstruktivne kirugije, a može se primijeniti i za jednokratne medicinske potrepštine [23].

4.3 Biorazgradljivi plastični materijali sintetizirani iz naftnih derivata

Kao sirovina za proizvodnju biorazgradljivih plastičnih materijala, osim obnovljivih izvora energije mogu se primijeniti i naftni derivati. Neki sintetski alifatski poliesteri su već desetljećima poznati kao biorazgradljivi. Bioplastični materijali na bazi nafte sintetiziraju se postupkom polikondenzacijske reakcije između alifatskih diacida i alifatskih diola ili polimerizacijom otvaranja prstena laktona, cikličkih estera koji nastaju izdvajanjem vode i ciklizacijom iz hidrokarboksilnih kiselina [2]. Također, mogu se primijeniti alifatske i tereftalne kiseline u reakciji s alifatskim diolima kako bi nastao alifatski aromatski kopolimer. Tipični sintetski alifatski poliesteri su polikaprolakton (PCL), poli(butilen-sukcinat) (PBS) i njihovi kopolimeri [22].

4.3.1 Polikaprolakton (PCL)

PCL je semikristalni alifatski poliester sintetiziran polimerizacijom otvaranja prstena molekule kaprolaktona i u potpunosti je razgradljiv aktivnošću enzima. Slika 4.5 prikazuje proces polimerizacije kaprolaktona [22].



Slika 4.5 Polimerizacija kaprolaktona u PCL [22]

Uz dodatak katalizatora i topline, molekula kaprolaktona se otvaranjem prstena polimerizira u PCL. Ovisno o molekulnoj masi, PCL može biti voštano krut ili krut. Voštano kruti PCL ima molekulnu masu do nekoliko tisuća, a kruti iznad 20 000. Voštano kruti PCL se upotrebljava samo kao kopolimer ili aditiv jer sam po sebi nema zadovoljavajuća mehanička svojstva za samostalnu uporabu, dok kruti PCL ima mehanička svojstva usporediva s polietilenom. Mehanička svojstva PCL-a uvelike ovise o njegovoj molekulnoj masi što je prikazano u tablici 4.1. Iz tablice 4.1 vidljivo je kako molekulna masa ima najviše utjecaja na rasteznu čvrstoću i prekidno istezanje. Talište je vrlo slično kod svih verzija PCL-a [22].

Tablica 4.1 Ovisnost mehaničkih svojstava o molekulnoj masi PCL-a [22]

	PCL 1	**PCL 2**	**PCL 3**
Molekulna masa	37 000	50 000	80 000
Talište (°C)	58 - 60	58 - 60	60 - 62
Rastezna čvrstoća (N/mm^2)	14	35	57
Prekidno istezanje (%)	660	800	900

PCL ima visoku fleksibilnost molekulnih lanaca zbog čega i odličnu obradljivost. Kako bi se spriječila toplinska degradacija prerađuje se do 200 °C u vlakna ili filmove. Veliki nedostatak PCL-a je njegovo nisko talište koje se kreće oko 60 °C radi čega se ne može primjenjivati pri povišenim radnim temperaturama. Baš radi toga, PCL se često miješa s ostalim plastičnim

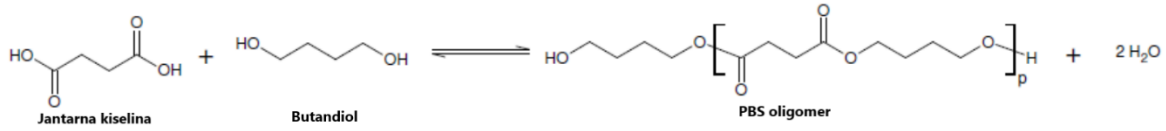
materijalima kao što su PP, PC, poli(etilen-oksid) (PEO) i škrob kako bi se proizveo plastičan materijal željenih vrijednosti svojstava [22].

PCL je svoju primjenu našao u mnogim granama industrije. Glavna primjena mu je u medicini gdje se upotrebljava za proizvodnju konaca za šavove, umjetno proizvedene krvne žile, živce, uređaje za dobavu lijekova i u biomedicinskom inženjeringu. Unatoč višoj cijeni nego kod konvencionalnih plastičnih materijala, PCL je svoju primjenu našao kao zamjenski materijal u proizvodnji ambalaže, a pogotovo prehrambene [24].

4.3.1. Poli(butilen-sukcinat) (PBS)

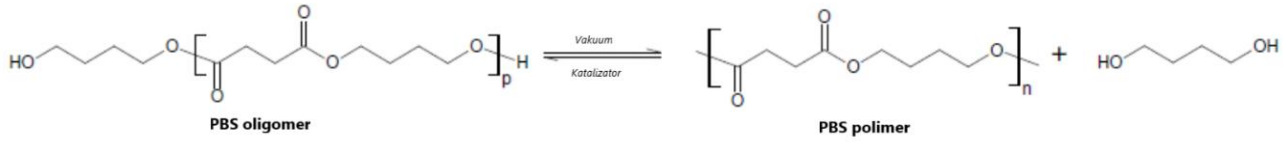
PBS je jedan od najbitnijih biorazgradljivih plastičnih materijala, sintetiziran postupkom polikondenzacije jantarne kiseline i butandiola, a postupak se odvija u dva koraka [22]:

- esterifikacija jantarne kiseline i diola gdje kao krajnji produkt nastaje oligomer PBS-a i voda, prikazano na slici 4.6



Slika 4.6 Esterifikacija jantarne kiseline i diola [25]

- polikondenzacija, koja se odvija pri visokoj temperaturi i u atmosferi podtlaka u svrhu formiranja PBS-a visoke molekulne mase, prikazano na slici 4.8.



Slika 4.7 Polimerizacija PBS oligomera [25]

PBS se i dalje, iz ekonomskih razloga, uglavnom proizvodi iz fosilnih goriva, no Europska udruga bioplastičara ga klasificira kao biorazgradljivu plastiku na bioosnovi jer ga je moguće sintetizirati i iz bioosnove. PBS glavnu primjenu ima u proizvodnji ambalaže, a proizvode se filmovi, vrećice i ambalaža za hranu. Vrijednosti mehaničkih svojstava PBS-a su između vrijednosti PP-a i polietilena niske gustoće (PE-LD-a), a mogu se poboljšati kopolimerizacijom s ostalim dikarboskilnim kiselinama i diolima. Kopolimerizacijom rastu rastezna čvrstoća i

savojna žilavost, a postižu se dodatkom adipinske kiseline u postupak polimerizacije [26]. Mehanička svojstva komercijalnih verzija PBS-a, *Bionolle (#1001)* i *Bionolle (#3001)* u usporedbi s PP i PE-LD su prikazani u tablici 4.2.

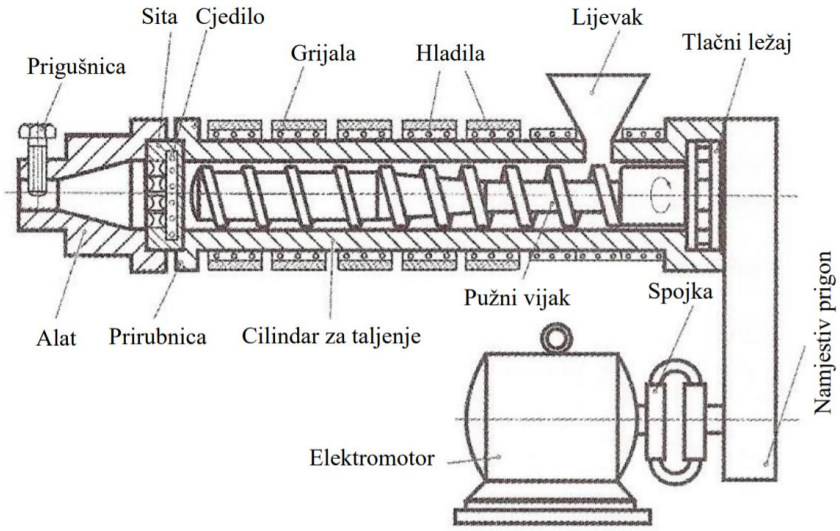
Tablica 4.2 Usporedba svojstva PBS-a sa svojstvima PE-LD-a i PP-a [22]

Svojstva	***Bionolle (#1001)***	***Bionolle (#3001)***	**PE-LD**	**PP**
Staklište, ϑ_g [°C]	-32	-45	-120	5
Talište ϑ_m, [°C]	114	94	110	163
Temperatura postojanosti oblika, ϑ_{po} [°C]	97	69	88	145
Rastezna čvrstoća R_m, [MPa]	57	47	35	44
Modul elastičnosti E, [MPa]	32	19	12	31
Istezanje ε, %	700	900	400	800
Maseni protok taljevine pri 190 °C MFR, [g/10 min]	1,5	1,4	2	4

5 PROIZVODNJA BIORAZGRADLJIVIH PLASTIČNIH MATERIJALA

Plastični proizvodi, kako nerazgradljivi tako i biorazgradljivi, najčešće se proizvode postupkom ekstrudiranja radi svoje kontinuiranosti, fleksibilnosti procesa i visoke produktivnosti. Postupak ekstrudiranja se zasniva na taljenju polimera kako bi se omogućilo oblikovanje u željene oblike, koji mogu biti film, folija, cijev, itd. Dok je polimer u rastaljenom stanju, dodaju mu se razni aditivi u svrhu boljeg sjedinjavanja i poboljšavanja mehaničkih i uporabnih svojstava [24].

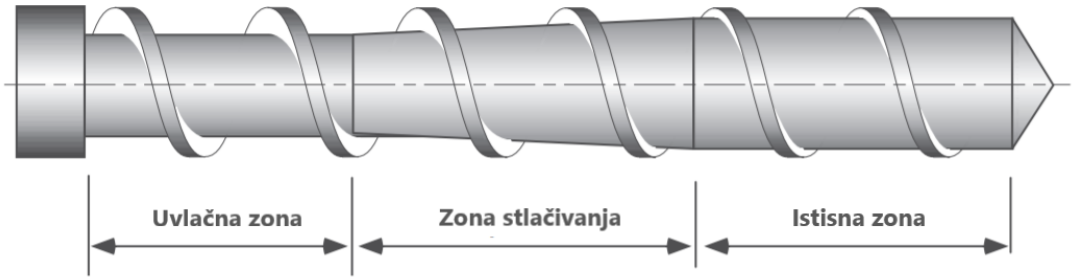
Ekstrudiranje je postupak kontinuiranog protiskivanja polimerne taljevine kroz alat i njenog skrućivanja u određeni oblik proizvoda ili ekstrudata. Glavni dijelovi ekstrudera su prikazani na slici 5.1.



Slika 5.1 Jednopužni ekstruder s dijelovima [27]

Ekstruderi uobičajeno imaju jedan ili dva pužna vijka kojima su glavne uloge: uvlačenje, dobava, plastificiranje, miješanje i homogeniziranje prerađivanog plastičnog materijala kako bi taljevina bila potrebne viskoznosti i smičnosti. Pužni vijci su u većini slučajeva trozonski, što znači da je vijak podijeljen u tri zone, od kojih svaka obavlja svoju specifičnu zadaću. Prva, uvlačna zona ima zadaću uvlačenja polimernog materijala (granulata, praha, itd.) i daljnjeg transporta polurastaljenog materijala prema idućoj zoni, zoni stlačivanja. U zoni stlačivanja pužni vijak radi povećanja jezgre stlačuje polimer, pretvarajući ga u taljevinu. U posljednjoj, istisnoj zoni zadaća pužnog vijka je da jednoliko izmješa te toplinski i mehanički homogenizira

polimernu taljevinu [27]. Skica takvog pužnog vijka s označenim zonama prikazana je na slici 5.2.



Slika 5.2 Zone pužnog vijka [28]

Pužni vijak igra veliku ulogu u procesu konstruiranja. Postoji mnogo parametara pužnog vijka, a jedan od glavnih je broj pužnih vijaka. Općenito, jednopužni ekstruderi prevladavaju nad dvopužnim radi njihove niže cijene i jednostavnijeg održavanja. U preradi biorazgradljivih plastičnih materijala se također preferira jednopužni ekstruder jer je potreban niži intenzitet miješanja koji uzrokuje niže smično naprezanje kojim se opterećuje taljevina i posljedično smanjenu kemijsku razgradnju. Prednosti dvopužnih ekstrudera su: veća protočnost, veća učinkovitost miješanja (na uštrb viših naprezanja na taljevinu), veći stupanj disperzije dodanih aditiva, lakše upravljanje temperaturom i veći stupanj homogenizacije. Za preradu bioplastičnih pjena, najčešće sintetiziranih iz škroba, primjenjuje se dvopužni ekstruder radi većeg stupnja disperzije pjenila koje daje poroznost plastičnom materijalu [24].

Za proizvodnju biorazgradljivih plastičnih materijala kao što je PCL, primjenjuju se i jednopužni i dvopužni ekstruderi, ovisno o postavljenim zahtjevima na krajnji proizvod. U slučaju biorazgradljivih plastičnih materijala, faze rastaljivanja, stlačivanja i oblikovanja moraju biti izvedene u kratkom vremenskom roku kako bi se izbjegla razgradnja plastičnog materijala ili aditiva, što utječe na mnogo parametara u postupku ekstrudiranja kao što su izbor tipa i geometrije pužnog vijka i uvjeti procesa. Kako bi se snizilo naprezanje na taljevinu i u isto vrijeme osigurala pravilna disperzija svih komponenata mogu se primjeniti dodatni elementi kao što su statična miješalica i mrežni elementi. Potonji pridonose jednolikom raporedu naprezanja i boljem prijenosu topline s nižim utroškom energije. Jednolika temperatura po presjeku ekstrudata pri izlasku iz ekstrudera je ključna jer o tome ovise

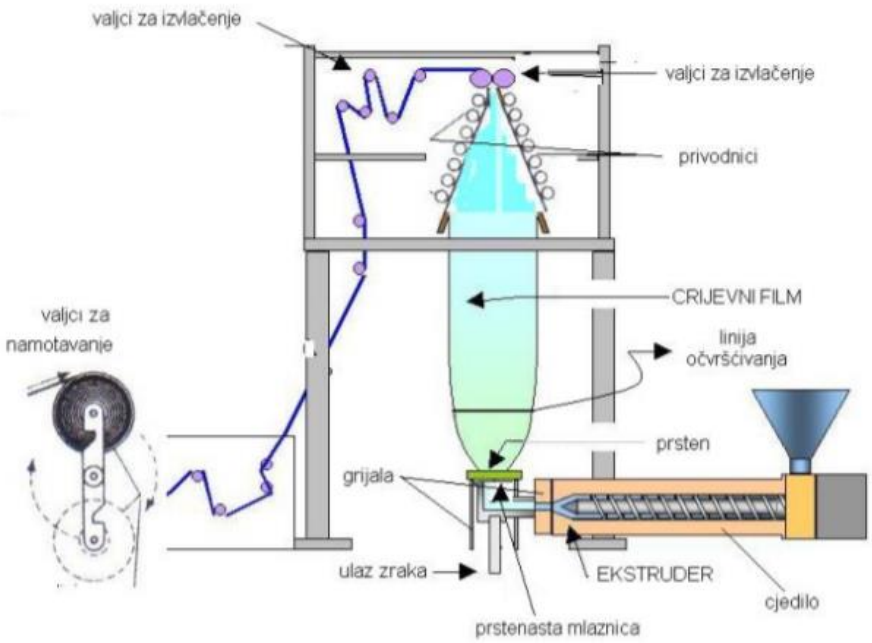
elastičnost i viskoznost ekstrudata. Kada je potrebno samo taljenje i umjereno miješanje za proizvodnju ekstrudata jednopužni vijak zadovoljava kriterije [24].

Međutim, kada se miješaju dva plastična materijala, komponente više kopolimera i aditiva se moraju jednoliko disperzirati u taljevini i nikako ne smije doći do nakupljanja te je potreban dvopužni ekstruder. Ekstruder se može primijeniti kao samostalan alat u preradi biorazgradljivih plastičnih materijala ili kao dio složenijeg postrojenja za preradu plastičnih materijala, koje još može sadržavati injekcijsko prešanje, prešanje polimernih pjena ili višestruki broj ekstrudera [24].

5.1 Ekstrudiranje crijevnog filma

Postupak kojim se najčešće proizvode folije od kojih se kasnije rade vrećice je postupak ekstrudiranja crijevnog filma. Postupak započinje sipanjem polimernih granula preko lijevka u ekstruder gdje se granule prevode u taljevinu i zatim pužnim vijkom transportiraju do mlaznice preko cilindra. Iz mlaznice taljevina se odvodi kroz rashladni prsten određenog promjera iz kojeg ekstrudat izlazi u obliku crijeva i nastaje crijevni film. S donje strane upuhuje se zrak pod određenim tlakom i nastaje tubus koji se zatim ulovi na vodilice koje ga određenom silom preko konstrukcije valjaka vuku dok se on istovremeno hladi. Hlađenje crijevnog filma iznutra omogućeno je upuhivanjem zraka, a izvana samim zrakom u atmosferi. Uslijed procesa hlađenja crijevnog filma prelazi iz gumastog u staklasto stanje. Crijevni film se spljošti u ravni film i preko valjaka namotava na namotavalicu, a kasnije se taj film reže i zavaruje jedna strana kako bi se dobila vrećica [29].

Shema postupka ekstrudiranja crijevnog filma prikazana je na slici 5.3.



Slika 5.3. Postupak ekstrudiranja crijevnog filma [29]

Parametri kod postupka izrade crijevnog filma su [29]:

- brzina dotoka taljevine (v_2)
- tlak zraka koji se upuhuje (p)
- temperatura (ϑ)
- brzina izvlačenja filma (v_3)
- sila izvlačenja filma

Namještavanjem parametara utječe se na mnoge karakteristike završnog proizvoda, kao što su [29]:

- promjer crijevnog filma
- debljina crijevnog filma
- linija očvršćivanja
- brzina izrade crijevnog filma

Namještavanjem parametara postupka izravno se utječe na očvrsnuće crijevnog filma, to jest granicu gdje plastičan materijal prelazi iz gumastog stanja u staklasto, nakon čega više ne postoji gibljivost makromolekula. Ovisno o namještenim parametrima, granica očvršćivanja može se pomicati po dužini crijevnog filma, čime se direktno utječe na stupanj usmjerenosti

makromolekula u samom filmu. Pomak same linije očvrsnuća je sporiji, ako je brzina izvlačenja filma manja, brzina dotoka taljevine veća i temperatura na prstenu veća. Orijentacija makromolekula neposredno utječe na na čvrstoću samog filma i radi toga je poželjna što viša linija očvrsnuća [29].

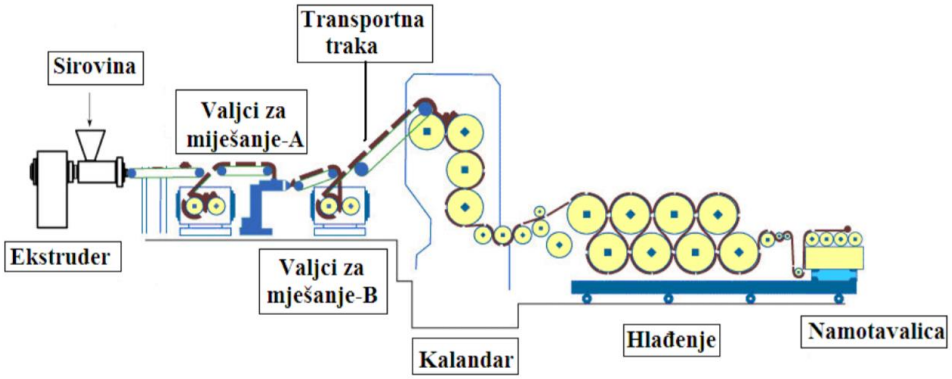
Značajke samog procesa su T_z, temperatura rashladnog zraka i v_z, brzina rashladnog zraka. Značajke filma su debljina crijevnog filma, S_0 i površina crijevnog filma A_0. T_g je očvrsnuće, koje je ključno jer određuje granicu očvršćivanja plastičnog filma. Ispod granice očvršćivanja temperatura crijevnog filma je ispod T_g, a iznad granice očvršćivanja T_g, to jest, iznad granice očvršćivanja crijevni film više nije elastičan. Značajke kao što su: područje poprečne, uzdužne i ukupne orijentacije su vezane uz izmjenu strukture samog materijala, koja ovisi o staklištu. Uzdužna orijentacija makromolekula određuje čvrstoću crijevnog filma na njegovom početku dok je poprečna orijentacija od važnosti iznad granice očvršćivanja. Orijentacija crijevnog filma ovisi o njegovom promjeru, kod manjih promjera prevladava uzdužna orijentacija, a kod većih poprečna [29].

5.2 Kalandriranje savitljivih folija

Kalandriranje je postupak proizvodnje beskonačnih traka s pomoću parova valjaka kalandra između kojih se propušta omekšani plastičan materijal. Postupak je prikazan na slici 5.4. Kod postupka kalandriranja taljevina dobivena od polimernih granula prenosi se na valjke za miješanje, a zatim se transportnom trakom transportira na sustav kalandara koji se okreću u različitim smjerovima što omogućuje oblikovanje novonastale tvorevina, kalandrata, po cijeloj širini kalandra. Prolaskom polimerne taljevine kroz kalandre stvara se kalandrat, a njegova debljina ovisi o razmaku između prva dva valjka [29]. Prema debljini kalandrat se može podijeliti u 3 skupine [30]:

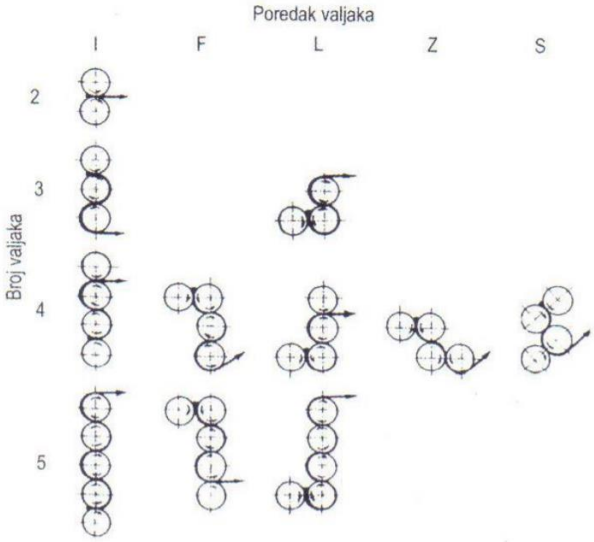
- filmovi (< 0,2 mm)
- folije (0,2 – 2 mm)
- ploče (> 2 mm).

Kalandrat se zatim hladi i u slučaju filmova i folija namotava na namotavalicu, a kod ploča reže i slaže jedna na drugu [29].



Slika 5.4. Postupak kalandriranja [29]

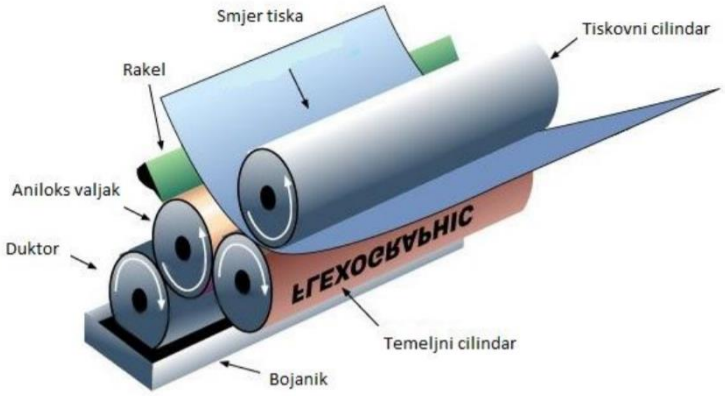
Ovisno o broju valjaka kalandra i njihovom rasporedu, podjela samih kalandara prikazana je na slici 5.6.



Slika 5.5. Podjela kalandara po broju i rasporedu valjaka [29]

5.3 Proizvodnja biorazgradljivih vrećica

Nakon postupka ekstrudiranja ili kalandriranja biorazgradljive folije, ako je ta folija namijenjena za proizvodnju vrećica slijedi postupak kojim se folije lijepe i režu kako bi se dobio zadani oblik i veličina vrećice. Mnoge biorazgradljive vrećice na tržištu na sebi imaju tisak, što se radi prije samog oblikovanja u vrećice. Proces tiska za osjetljive i lagane materijale kao što su bioplastični materijali zahtjeva postupak fleksotiska, gdje niz fleksografskih valjaka malom silom prenose tisak na podlogu, a jedan takav sustav prikazan je na slici 5.6 [31].



Slika 5.6. Fleksotisak [31]

Proces fleksotiska zahtijeva boje i aditive koji mogu biti štetni za okoliš jednom kada se vrećica postane otpad, no postoje i sigurnije tinte bazirane na alkoholu koje se sve više uvode u industriju. Jednom kada je proces fleksotiska završen, folija je spremna za završni stadij proizvodnje – pretvorbu u vrećicu [32].

Dvije otisnute folije odgovarajuće veličine poravnavaju se po rubovima koji se zatim zavare uslijed djelovanja topline. Nakon toga, vrećica se može rezati u željene oblike i veličine, ovisno o komercijalnoj upotrebi [32].

5.4 Analiza životnog ciklusa (e. *Life Cycle Analysis (LCA))*

S jedne strane, stvarna biorazgradnja plastičnog materijala predstavlja izuzetno delikatan problem te je svakako ključni aspekt u procjeni primjenjivosti ili neprimjenjivosti bioplastičnih materijala, utjecaj na okoliš koji proizlazi iz njihove uporabe tijekom čitavog životnog ciklusa od proizvodnje do njihovog odlaganja. Ovaj tip analiza se naziva analiza životnog ciklusa proizvoda (LCA) i temelji se na pronalasku ključnih utjecajnih faktora koji neki određeni proizvod ima na okoliš. Neki od najvažnijih faktora su [33]:

- abiotsko iscrpljivanje – karakterističan faktor je potencijal abiotskog iscrpljivanja (iscrpljivanja nežive prirode) određenih minerala i fosilnih goriva, a jedinica faktora karakterizacije je kg antimona (Sb) ekvivalentno po kg ekstrahiranog materijala
- globalno zatopljenje – karakterističan faktor je potencijal globalnog zatopljenja svakog stakleničkog plina koji se emitira u atmosferu, a jedinica faktora karakterizacije je kg ugljikovog dioksida (CO_2) ekvivalentno po kg emisijskih plinova
- toksičnost za čovjeka – karakterističan faktor je potencijal otrovnosti za čovjeka otrovnih tvari koje se emitiraju u zrak, vodu i/ili tlo, a jedinica faktora karakterizacije je kg 1,4 – diklorbenzena ekvivalentno po kg emisije
- ekotoksičnost za slatku vodu – karakterističan faktor je potencijal toksičnosti za slatku vodu svake tvari koja se emitira u zrak, vodu i/ili tlo, a jedinica faktora karakterizacije je kg 1,4 – diklorbenzena ekvivalentno po kg emisije
- ekotoksičnost za morsku vodu – karakterističan faktor je potencijal toksičnosti za morsku vodu svake tvari koja se emitira u zrak, vodu i/ili tlo, a jedinica faktora karakterizacije je kg 1,4 – diklorbenzena ekvivalentno po kg emisije
- ekotoksičnost za tlo – karakterističan faktor je potencijal toksičnosti za tlo svake tvari koja se emitira u zrak, vodu i/ili tlo, a jedinica faktora karakterizacije je kg 1,4 - diklorbenzena ekvivalentno po kg emisije
- fotokemijska oksidacija – karakterističan faktor je potencijal stvaranja fotokemijskog ozona svake čestice koja se emitira u zrak, a jedinica faktora karakterizacije je kg etilena (C_2H_4) ekvivalentno po kg emisije
- acidifikacija/zakiseljavanje – karakterističan faktor je potencijal acidifikacije za svaku kiselu emisiju koja odlazi u zrak, a jedinica faktora je kg sumpornog dioskida (SO_2) ekvivalentno po kg emisije

- eutrofikacija – karakterističan faktor je potencijal eutrofikacije (starenja vodenih ekosustava) za svaku eutrofikacijsku česticu emitiranu u zrak, vodu ili tlo, a jedinica faktora je kg fosfatnog iona (PO_4^-) ekvivalentno po kg emisije
- razgradnja ozonskog omotača – karakterističan faktor je potencijal iscrpljivanja ozonskog omotača za svaku emisiju, a jedinica faktora je kg triklorflourmetana – 11 ekvivalentno po kg emisije.

U tablici 5.1 prikazani su pojedini plastični materijali i njihov utjecaj na globalno zatopljenje.

Tablica 5.1 Usporedba utjecaja na globalno zatopljenje plastičnih materijala iz obnovljivih i neobnovljivih izvora [33]

	Vrsta plastičnog materijala	**Potrebna energija za proizvodnju [MJ/kg]**	**Globalno zatopljenje; kg CO_2 eq/kg**
Iz neobnovljivih izvora	PE-HD	80,0	4,84
	PE-LD	80,6	5,04
	PA 6	120,0	7,64
	PET	77,0	4,93
	PS	87,0	5,98
	PVOH	102,0	2,70
	PCL	83,0	3,10
Iz obnovljivih izv.	TPS	25,4	1,14
	TPS + 15 % PVOH	24,9	1,73
	TPS + 60 % PCL	52,3	3,60
	PLA	5,70	3,84
	PHA	57,0	podatak nije dostupan

Iz tablice 5.1 vidljivo je kako u prosjeku plastični materijali iz neobnovljivih izvora imaju veći utjecaj na globalno zatopljenje i zahtijevaju više energije za proizvodnju tijekom svog životnog ciklusa nego plastični materijali iz obnovljivih izvora. Najmanje vrijednosti utjecaja na globalno zatopljenje od plastičnih materijala iz neobnovljivih izvora imaju biorazgradljivi plastični materijali, PVOH, što je zapravo PVA i PCL.

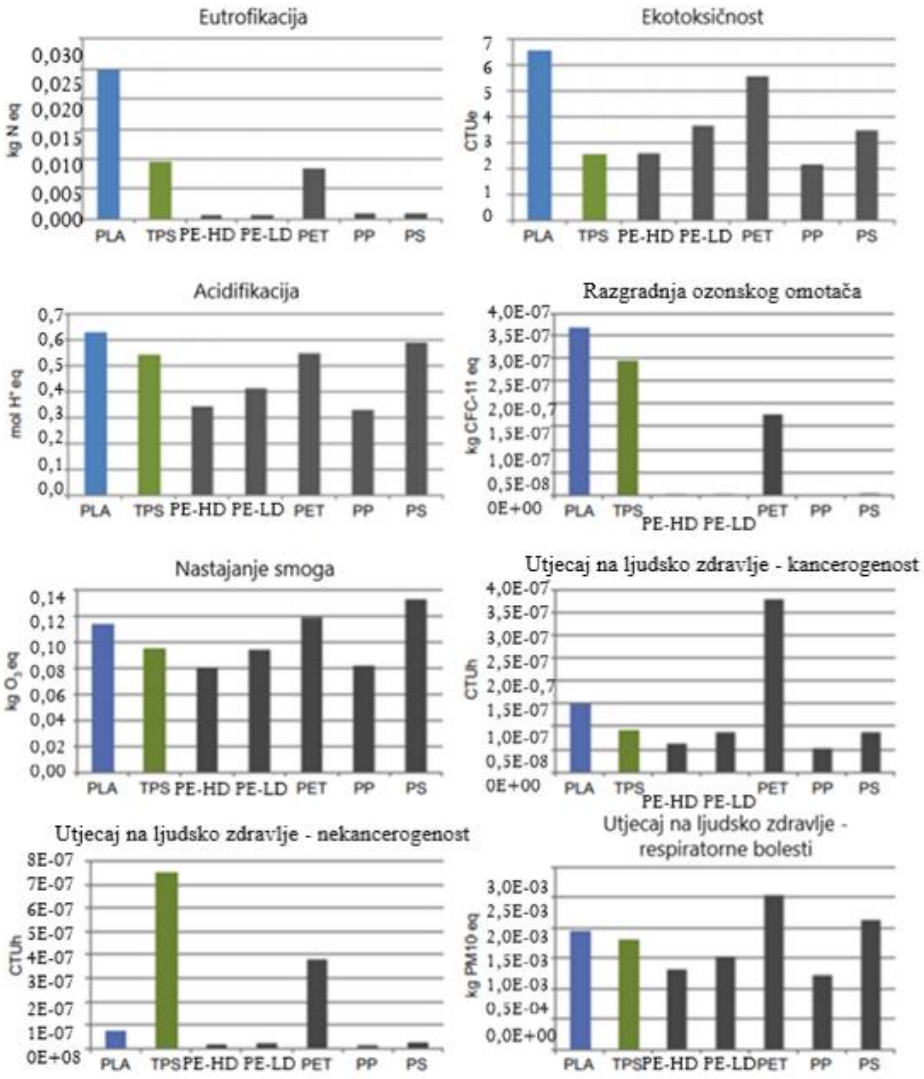
U tablici 5.2 prikazani su faktori analize životnog ciklusa za epoksidnu smolu.

Tablica 5.2 Usporedba epoksidne smole sintetizirane iz nafte i sintetizirane iz bioizvora po raznim parametrima LCA-a [34]

Utjecajni faktor	Jedinica karakterizacije	Epoksidna smola sintetizirana iz nafte	Epoksidna smola sintetizirana iz bioizvora
Abiotsko iscrpljivanje	kg Sb eq	59,4	0,01
Acidifikacija	kg SO_2 eq	40,3	25,44
Eutrofikacija	kg PO_4^- eq	6,6	6,9
Potencijal globalnog zatopljenja	kg CO_2 eq	6663	4079
Toksičnost za čovjeka	kg 1,4-DB eq	490,44	545,17
Ekotoksičnost za slatku vodu	kg 1,4-DB eq	29,1	228,63
Kumulativna potrošnja energije	MJ eq	2,16	1,90

U tablici 5.2 prikazane su dvije epoksidne smole, samo što je jedna sintetizirana iz fosilnih goriva, a druga iz bio izvora. Mehanička i uporabna svojstva su im vrlo slična, što znači da se pri odabiru epoksidne smole tablica 4.4 može uzeti kao onaj faktor koji će odlučiti. Po većini parametara, kao što su abiotsko iscrpljivanje, acidifikacija, potencijal globalnog zatopljenja i potrošnja energije, epoksidna smola iz bio izvora je bolji izbor. Kod parametra eutrofikacije, epoksidna smola iz nafte kotira nešto bolje, no razlika je svega 4 %. Kao veliki problem nameće se što bio epoksidna smola ima veći utjecaj toksičnosti na čovjeka, a pogotovo na slatku vodu.

Na slici 5.7 prikazani su razni dijagrami biorazgradljivih i konvencionalnih plastičnih materijala prema faktorima LCA.



Slika 5.7. Usporedba biorazgradljivih i konvencionalnih plastičnih materijala po raznim faktorima LCA-a [34]

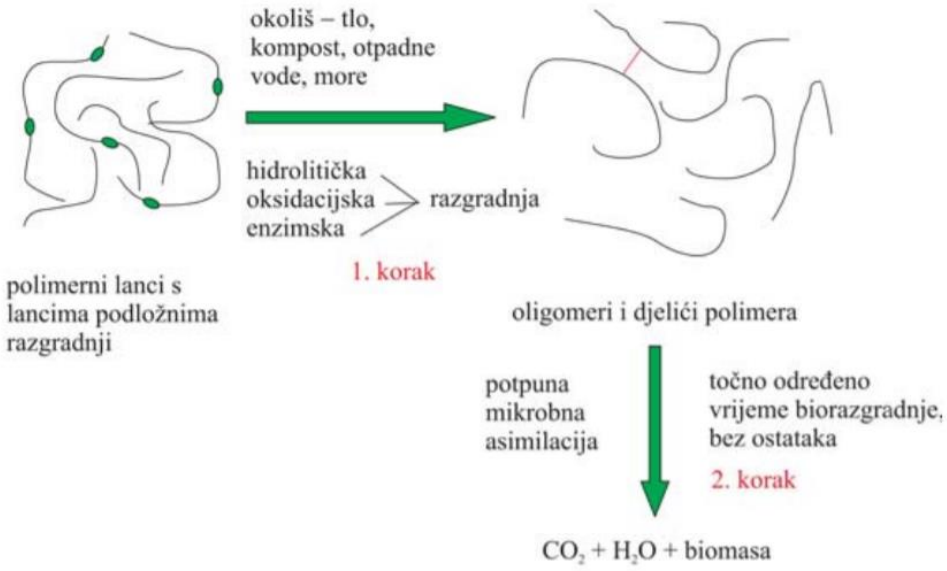
Slika 5.7 prikazuje neke od najčešćih biorazgradljivih plastičnih materijala, PLA i TPS i najčešće konvencionalne plastične materijale, PE-HD, PE-LD, PET, PP i PS prikazane s vrijednostima raznih utjecajnih faktora LCA-a. Eutrofikaciji, starenju vodenih ekosustava, značajno više doprinose razgradljivi plastični materijali od konvencionalnih. Vrijednosti za sve konvencionalne plastične materijale, osim za PET, u usporedbi s razgradljivima su zanemarive. Što se tiče faktora ekotoksičnosti, najveću vrijednost ima PLA, ali su i konvencionalni plastični materijali blizu i ne može se razaznati neka značajna razlika. Acidifikaciju uzrokuju približno

jednako plastični materijali obje skupine. Degradaciju ozonskog omotača značajno više uzrokuju biorazgradljivi plastični materijali, opet jedino PET od svih konvencionalnih ima približnu vrijednost kao i biorazgradljivi. Na nastajanje smoga podjednako utječu obje skupine. Zadnja tri dijagrama prikazuju utjecaj biorazgradljivih i konvencionalnih plastičnih materijala na ljudsko zdravlje u 3 različite skupine. Kancerogenost uzrokuju kancerogene tvari kao što su sulfonati, epoksidi, dioksini, furani i još mnogo njih. Kancerogenost najviše potiče PET, ali i ostali konvencionalni plastični i bioplastični materijali. Druga skupina su tvari koje imaju negativan utjecaj na ljudsko zdravlje, ali i svojstvo nekancerogenosti, što znači da ih se ne smatra odgovornim za nastajanje karcinoma. U ovoj skupini TPS se najviše ističe, iza njega PET, a zatim svi ostali materijali. Treću skupinu predstavljaju tvari koji imaju negativan utjecaj na respiratorni sustav i tu su po nekoj srednjoj vrijednosti ponovno jednaki bio- i konvencionalni plastični materijali.

Iz tablice 5.1 i 5.2 i sa slike 5.7 može se zaključiti kako biorazgradljivi plastični materijali, unatoč tome što se predstavljaju kao iznimno pogodni za okoliš i odličnom alternativom konvencionalnim plastičnim materijalima, imaju i svoje nedostatke. LCA pokazuje kako po nekim faktorima ipak prednjače pred konvenionalnim plastičnim materijalima, kao što su faktor globalnog zatopljenja, kumulativne utrošene energije i abiotsko iscrpljivanje. Međutim, vrijednosti faktora razgradnje ozonskog omotača i ekotoksičnosti su veće kod biorazgradljivih plastičnih materijala. Zanimljivo je to što iako se biorazgradljivi plastični materijali smatraju razgradljivim u prirodi, na kraju svog životnog vijeka ipak imaju veći utjecaj na ekotoksičnost od konvencionalnih plastičnih materijala.

6 BIORAZGRADLJIVE VREĆICE

Zabrana i naplaćivanje polietilenskih vrećica u zadnjih par godina sve više dobiva na popularnosti. Najboljom zamjenom za polietilenske vrećice smatraju se biorazgradljive vrećice, a industrija biorazgradljivih folija i vrećica u zadnjih par godina je u eksponencijalnom rastu. Problem kod biorazgradljivih vrećica koji se vrlo često ne uzima u obzir pri njihovoj kupnji i kasnijem odlaganju su zahtjevani uvjeti (kao što su temperatura, vlaga, prisutnost mikroorganizama, ...) da bi se ta vrećica zbilja razgradila na bezopasne tvari. U prijašnjim poglavljima navedene su norme i uvjeti kompostiranja i biorazgradnje samih biorazgradljivih materijala. Da bi se neki proizvod smatrao biorazgradljivim on se mora u određenom vremenskom periodu potpuno razgraditi na vodu, CO_2 i u slučaju kompostiranja biomasu (slika 6.1) [35].



Slika 6.1 Koraci do potpune biorazgradnje plastičnog materijala [35]

Mnogi proizvođači svoje proizvode plasiraju na tržište kao biorazgradljive ili kompostabilne, ali oni to u stvarnosti nisu. Takvi proizvodi na kraju životnog vijeka se usitne na komadiće, ponekad čak i razgrade u ostatke nevidljive ljudskom oku, ali ipak ostanu prisutni u okolišu. Ostaci plastike su hidrofobni te mogu migrirati u vodu i ekosustav, gdje se ti isti ostaci sve više usitnjavaju i zatim akumuliraju u morima i oceanima što dovodi do konzumacije tih djelića od strane morskih životinja. Plastični djelići dovode do ozbiljnih problema probavnog sustava kod

morskih životinja, koje na kraju i ljudi konzumiraju unoseći i u svoj organizam iste te djeliće. Radi toga i još mnoštva drugih razloga vrlo je važno da mikroorganizmi potpuno razgrade biorazgradljiv plastičan materijal u vremenu koje je određeno normom jer u protivnom ti djelići okolišu mogu nanijeti podjednaku štetu nego djelići konvencionalnih plastičnih materijala, npr. polietilena [35].

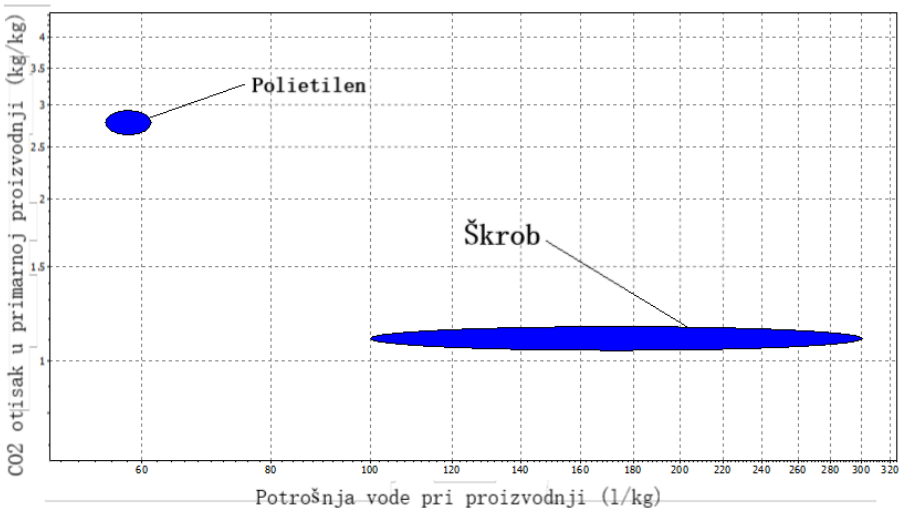
6.1 Tržište biorazgradljivih vrećica

Spar Hrvatska je nedavno objavio kako je prodao preko milijun biorazgradljivih vrećica diljem cijele Hrvatske. Sredinom prošle godine proširili su ponudu biorazgradljivih vrećica čime su uvelike potaknuli njihovu kupnju. Trenutno imaju 10 vrsta različitih biorazgradljivih vrećica, od kojih je skoro pola napravljeno od plastičnih materijala [36]. Mnogi lanci, kao što su *Kaufland* i *dm*, potpuno su ukinuli prodaju jednokratnih polietilenskih vrećica nudeći alternative kao što su papirnate, platnene i višekratne polietilenske vrećice [37]. Danas se sve više tvrtki koje se bave proizvodnjom plastičnih vrećica, folija, crijeva i ostalih srodnih proizvoda okreće i biorazgradljivom programu, uključujući i biorazgradljive plastične vrećice i folije u svoj asortiman.

6.2 Biorazgradljiva vrećica od škroba naspram polietilenske

Podijeljena su mišljenja oko biorazgradljivih vrećica i njihove dobrobiti za okoliš. Istina je da su takve vrećice zbilja biorazgradljive samo u određenim uvjetima, koji su omogućeni samo u industrijskim kompostanama, a odbačene u okoliš su štetne kao i bilo koje druge. Biorazgradljivom vrećicom se nikako ne smije poticati neodgovorno ponašanje prema okolišu i odbacivanje otpada bilo gdje [35].

Slika 6.2 prikazuje dijagram gdje su prikazani polietilen i škrob na početku životnog ciklusa, u ovisnosti o potrošnji vode pri proizvodnji i CO_2 otisku pri primarnoj proizvodnji. Vidljivo je kako škrobna (biorazgradljiva) vrećica zahtijeva veće količine vode pri proizvodnji dok PE istovremeno ima veći CO_2 otisak.



Slika 6.2. Usporedba PE-a i škroba po parametrima potrošnje vode i otisku CO_2 pri primarnoj proizvodnji

U poglavlju 5.5 Analiza životnog ciklusa opisano je puno više parametara kojima PE i škrob utječu na okoliš, ljude i životinje.

Treba uzeti u obzir i utjecaj na okoliš koji ima proizvodnja samih sirovina za proizvodnju biorazgradljive plastične vrećice na bioosnovi, što uključuje velike količine gnojiva, pesticida, vode i energije kao i gospodarenje istom tom vrećicom, što na kraju i dalje dovodi do superiornosti polietilenske vrećice. Daljnji razvitak tehnologije možda će preokrenuti situaciju. Zamjenom polietilenskih vrećica biorazgradljivima neće se riješiti glavni problem, što je nesavjesnost ljudi i onečišćenje okoliša. Tu činjenicu podupire i zakon u Republici Irskoj koji izjednačava jednokratne nerazgradljive i biorazgradljive vrećice [38].

6.3 Uvođenje biorazgradljivih vrećica u kućanstvima Republike Hrvatske

U Republici Hrvatskoj sve više mjesta, gradova, općina i županija uvodi odvojeno sakupljanje otpada, kako papira, plastike, metala i stakla, tako i biootpada.

Važnost gospodarenja otpadom i recikliranja postaje sve očitija, pogotovo u zadnjem desetljeću. Biorazgradljive vrećice tu imaju ulogu povećanja prikupljanja biootpada, što dovodi do boljeg gospodarenja otpadom i veće učinkovitosti pri recikliranju. Međutim, većina

komunalnih poduzeća za sakupljenje biootpada rabi polietilenske kante, a ne biorazgradljive vrećice [35].

Pod biootpad koji treba odlagati u za to predviđenu vrećicu ili kantu spadaju [39]:

- kuhinjski otpad (ostaci voća i povrća, ljuske jaja, talog kave, vrećice čaja, ostaci kruha, ...)
- vrtni otpad (uvenulo cvijeće, granje, otpalo lišće, ostaci košnje trave, zemlja, ...)
- male količine ostalog biootpada (kora drveta, dlake, piljevina, papirnati ubrusi, borove iglice, male količine papira u koje su bili zamotani kuhinjski otpaci)

U spremnike ili vrećice za biootpad nije dopušteno odlagati [39]:

- ostatke termički obrađene hrane
- meso, ribu, kosti, kožu
- mliječne proizvode, ulja, masti
- pepeo, cigarete
- ambalažu (papirnata, staklena, plastična), gumu
- opasni otpad
- obojeni i lakirani drveni otpad
- odjeću

U Republici Hrvatskoj vrlo malo lokalnih komunalnih poduzeća rabi biorazgradljive vrećice za sakupljanje biootpada, više ih se orijentiralo na plastične smeđe kante napravljene od HD-PE s posebnim dodatkom koji sprječava razvoj bakterija, gljivica i plijesni. Takav okoliš, bez prisustva mikroba, onemogućava proces razgradnje biootpada sve dok se on nalazi u kanti [35]. Biorazgradljive vrećice, s druge strane, razgrađuju se sa samim biootpadom, ne zaustavljajući proces. U gradu Zagrebu kućanstvima su podijeljene vrećice za biootpad i to njih 24 svakih 6 mjeseci, dakle 4 mjesečno. Međutim, vrećice su podijeljene samo stambenim zgradama gdje prebivaju fizičke osobe, a kante obiteljskim kućama. U ostalim većim hrvatskim gradovima, kao što su Split, Rijeka, Osijek, Zadar i Dubrovnik, biootpad se prikuplja u spomenutim kantama, ukoliko se prikuplja. Rijetki gradovi i mjesta u RH koja rabe biorazgradljive vrećice za prikupljanje biootpada su Sisak i Rab, iako su informacije o samim vrećicama nedostupne.

7 EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj ovoga istraživanja bilo je utvrditi tijek biorazgradnje biorazgradljivih plastičnih folija u kućnom kompostištu u atmosferskim uvjetima. Uobičajeno, biorazgradnja spomenutih folija odvija se u industrijskim kompostanama gdje se proces biorazgradnje odvija u kontroliranim uvjetima, što ovdje nije bio slučaj. Međutim, često se biorazgradljive folije odlažu u kućna, tj. vrtna kompostišta što usporava, ponekad i onemogućava sam proces biorazgradnje. Ovo istraživanje provedeno je kako bi se proučila biorazgradnja u nekontroliranim uvjetima i koliko su biorazgradljive folije dostupne na tržištu zapravo superiorne nad konvencionalnim plastičnim folijama. Sedam različitih komercijalno dostupnih biorazgradljivih folija postavljeno je u vrtno kompostište u gradu Zagrebu od početka veljače do početka lipnja, uz ispitivanje svakih 30 dana. Ispitivanja koja su se odvijala su ispitivanje rastezne čvrstoće i rastezne žilavosti na 5 ispitaka svakih 30 dana.

7.1 Atmosferski uvjeti tijekom ispitivanja

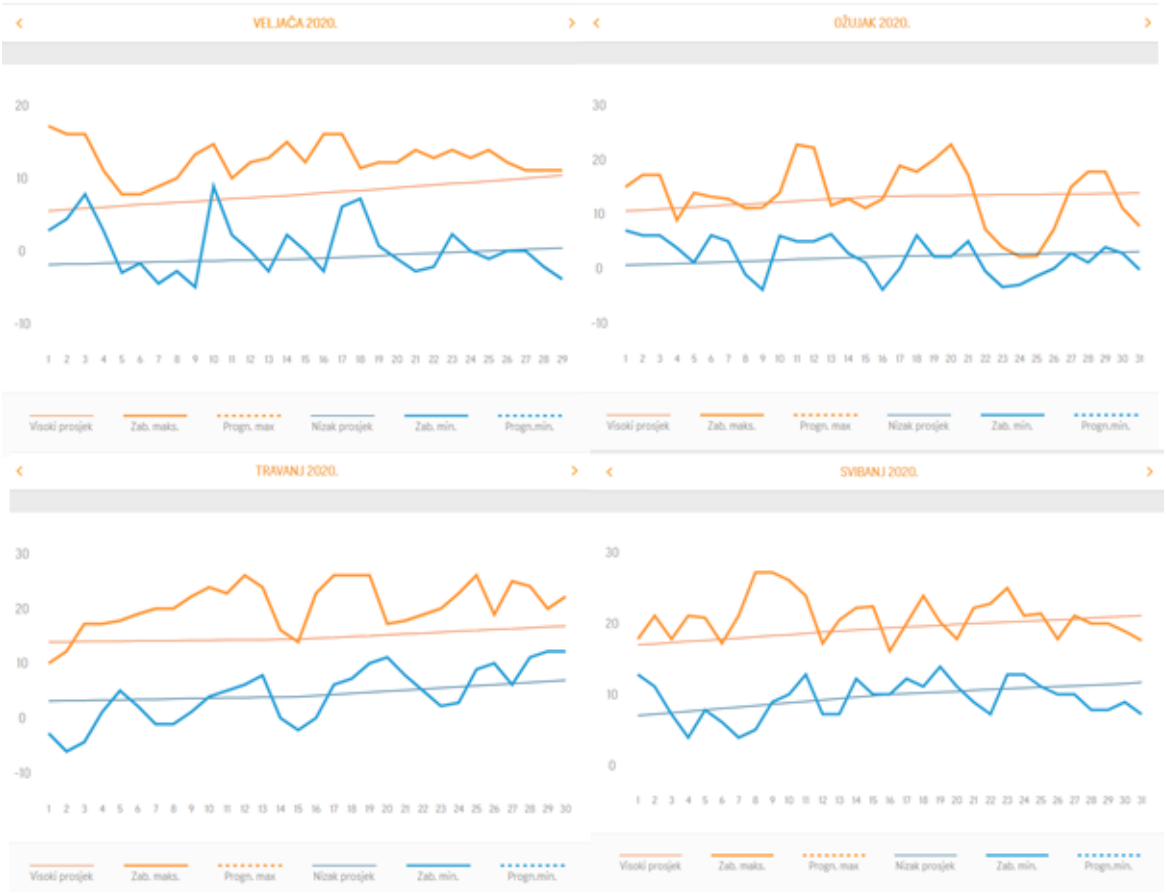
Svojstvo biorazgradljivosti biorazgradljivih folija definirano je raznim normama, ali u strogo kontroliranom okolišu industrijskih kompostana, gdje se temperatura kreće između 50 i 70 °C, a vlažnost između 45 i 50 % [17]. Međutim, u vrtnom kompostištu su uvjeti bitno drugačiji, pogotovo u zimskim mjesecima. Iako je prosječna vlažnost u zimskim i proljetnim mjesecima u prosjeku viša od 45 – 50 %, radi vrijednosti temperature to se ne može izjednačiti s uvjetima u komposteru. Kako bi se pobliže objasnilo zašto, spomenut će se indeks topline. Indeks topline, poznat i kao prividna temperatura, je mjera osjećaja ljudskog organizma u ovisnosti o temperaturi i vlažnosti zraka [40]. S povećanjem temperature, vlažnost zraka sve više dobiva na značaju, tj. predstavlja opasnost za čovjeka. Na slici 7.1 prikazana je tablica odnosa temperature i relativne vlažnosti, gdje crvena boja predstavlja neposrednu opasnost za čovjeka, a žuta oprez. Vrijednost relativne vlažnosti u komposteru iznosi 50 %, što na 26 °C ne predstavlja visoku vrijednost indeksa topline, dok na 42 °C vrijednost indeksa topline već predstavlja izuzetnu opasnost za ljudsko tijelo.

Wikipedija Hrvatska	Relativna vlažnost												
Temperatura (° Celzija)	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
42°	55	57	59	61	64	66	68	70	73	75	77	80	82
41°	53	55	57	59	61	63	66	68	70	72	74	76	79
40°	51	53	55	57	59	61	63	65	67	69	71	73	75
39°	49	51	53	55	57	59	61	62	64	66	68	70	72
38°	47	49	51	53	54	56	58	60	62	64	65	67	69
37°	45	47	49	51	52	54	56	58	59	61	63	64	66
36°	44	45	47	49	50	52	53	55	57	58	60	62	63
35°	42	43	45	47	48	50	51	53	54	56	57	59	61
34°	40	42	43	45	46	48	49	51	52	53	55	56	58
33°	39	40	41	43	44	46	47	48	50	51	53	54	55
32°	37	38	40	41	42	44	45	46	48	49	50	51	53
31°	35	37	38	39	40	42	43	44	45	47	48	49	50
30°	34	35	36	37	39	40	41	42	43	44	46	47	48
29°	32	33	35	36	37	38	39	40	41	42	43	45	46
28°	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
27°	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
26°	28	29	30	31	32	33	33	34	35	36	37	38	39

Slika 7.1. Indeks topline [41]

7.1.1 Prosječne vrijednosti temperature u gradu Zagrebu od veljače do kraja svibnja 2020. godine

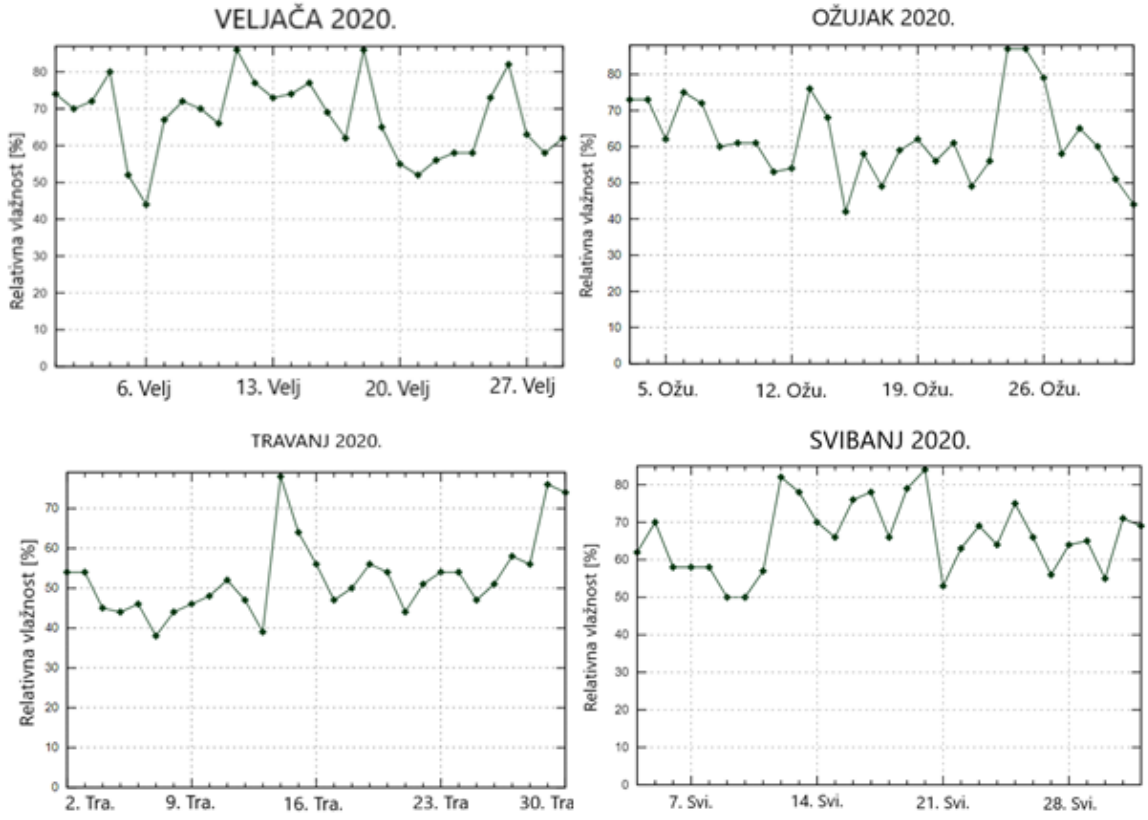
Temperature pogodne za kompostiranje se kreću između 50 i 70 °C, a u ovom ispitivanju one su bile puno niže. Veljača je, očekivano, bila najhladniji mjesec, s dnevnom prosječnom temperaturom između 6 i 10 °C, a noćnom oko -1 °C. Ožujak je bio nešto topliji, s prosječnom dnevnom temperaturom između 10 i 12 °C, a noćnom oko 0 °C. U travnju dnevne temperature su bile više nego u ožujku, između 13 i 16 °C, a prosjek noćnih temperatura kretao se između 2 i 6 °C. Svibanj, najtopliji od ova četiri mjeseca, imao je prosjek dnevnih temperatura između 18 i 22 °C, a noćnih između 8 i 11 °C.



Slika 7.2. Temperature u gradu Zagrebu od veljače do kraja svibnja 2020. godine [42]

7.1.2 Prosječne vrijednosti relativne vlažnosti u gradu Zagrebu od veljače do kraja svibnja 2020. godine

Vrijednosti relativne vlažnosti zraka u gradu Zagrebu nisu konstantne, nego variraju iz dana u dan, što je prikazano na slici 7.3.



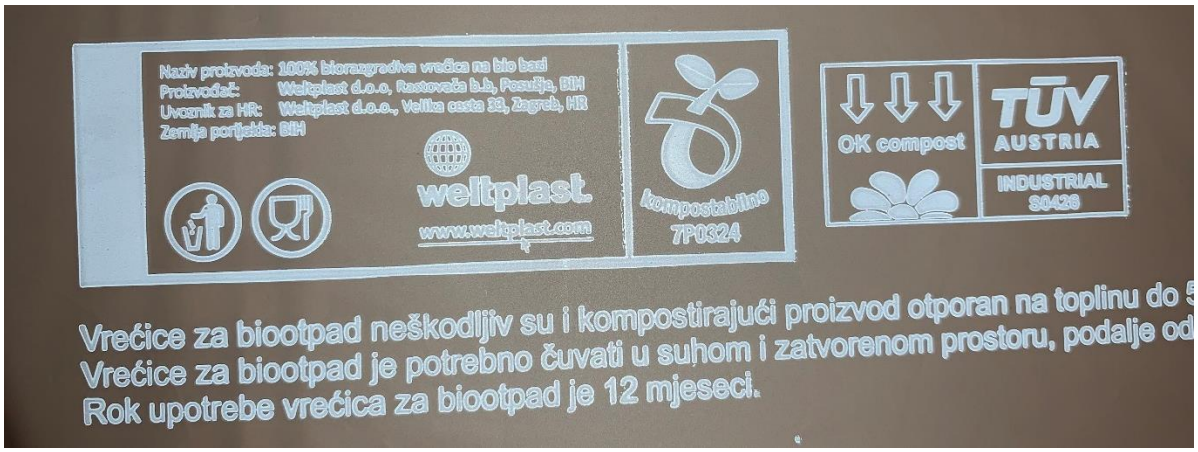
Slika 7.3. Relativne vlažnosti zraka u gradu Zagrebu od veljače do kraja svibnja 2020. godine [43]

7.2 Ispitivane folije

Za provedbu ispitivanja upotrijebilo se sedam različitih biorazgradljivih vrećica i folija, različitih debljina i prikupljene iz različitih izvora.

7.2.1 Vrećica za prikupljanje biootpada zagrebačke Čistoće

Vrećice za prikupljanje biootpada podijeljene u gradu Zagrebu proizvodi tvrtka *Weltplast* s dugogodišnjom poviješću proizvodnje plastične, a u zadnjih par godina i biorazgradljive plastične ambalaže i vrećica. Garantiraju kako su njihovi proizvodi iz linije biorazgradljivih plastičnih materijala, *Ecowelt*, u potpunosti biorazgradljivi i kompostabilni. Sirovina za proizvodnju je sintetski 100 % biorazgradljivi i kompostabilni plastičan materijal BASF-a, vodećeg proizvođača navedenog plastičnog materijala. Na web stranici tvrtke *Weltplast* navedeno je kako su svi proizvodi certificirani od strane DIN CERTCO broj 7W0011 i 7W0085, dok je na samom proizvodu naveden certifikat DIN CERTCO broj 7P0324 (slika 7.4) [44].



Slika 7.4. Vrećica za sakupljanje biootpada u gradu Zagrebu

Oznaka DIN CERTCO 7P0324 daje informaciju jedino o maksimalnoj debljini kompostabilnog plastičnog materijala od 55 μm [37]. Nigdje nije naveden kemijski sastav ove vrećice niti se spominje materijal koji se koristi za njenu proizvodnju, jedino da je 100 % biorazgradljiv i kompostabilan.

Druga europska organizacija ovlaštena za certificiranje biorazgradljivih proizvoda je TÜV AUSTRIA, čiju oznaku ova vrećica također posjeduje. Radi se o oznaci S0426 koja certificira tri vrste biorazgradljivih vrećica, a proizvođač je u sva 3 slučaja *Weltplast* [44]:

- vrećice za odvajanje biootpada debljine do 24 μm prikladne za kućnu kompostanu
- vrećice za odvajanje biootpada debljine do 116 μm prikladne za industrijsku kompostanu
- vrećice za kupovinu debljine do 116 μm prikladne za industrijsku kompostanu.

7.2.2 Biorazgradljiva vrećica za voće i povrće iz Spara

Iduća ispitivana vrećica je biorazgradljiva vrećica za voće i povrće koja se prodaje u trgovačkom lancu *Spar*. Proizvođač ovih vrećica je također *Welplast* te je certificirana jednako kao i prva spomenuta, biorazgradljiva vrećica za odvajanje otpada. Jedina razlika je namjena vrećice po mjestu kompostiranja. Dok na biorazgradljivoj vrećici za odvajanje otpada piše kako je namijenjena za industrijske kompostane, na *Spar* – ovoj vrećici piše kako je namijenjena za kućnu kompostanu (slika 7.5).



Slika 7.5. Biorazgradljiva vrećica za voće i povrće iz *Spara*

7.2.3 Swirl kompostabilna vrećica za otpad

Tvrtka *Swirl* proizvodi, kako oni garantiraju, 100 % biorazgradljive vrećice za otpad u više dimenzija, a u ovom radu ispitivat će se najmanje, zapremnine 10 L. Tvrde kako su njihove biorazgradljive vrećice, prikazane na slici 7.6, nepropusne, vodootporne i otporne na kidanje [46]. *Swirl* – ove biorazgradljive vrećice certificirane su od strane TÜV AUSTRIA oznakom 7P0002, koja govori kako se radi o biorazgradljivim vrećicama debljine manje od 22 μm [45]. Također, posjeduju DIN oznaku broj 9G0087 i oznaku namjene za industrijsku kompostanu.



Slika 7.6. Biorazgradljiva vrećica za otpad tvrtke *Swirl*

7.2.4 Biorazgradljive Bipa vrećice

Kako se u ovom radu razmatraju dvije različite biorazgradljive vrećice, a obje su dostupne u dućanima Bipa, označavat će se s brojem 1 i brojem 2. Oznaka broj 1 pripada vrećici bez ručki, a broj 2 vrećici s ručkama (slika 7.7).



Slika 7.7. Biorazgradljive Bipa vrećice

Obje vrećice, kao i biorazgradljiva vrećica za prikupljanje biootpada u gradu Zagrebu su certificirane od strane DIN CERTCO broj 7P0324 i od strane TÜV AUSTRIA broj S0426 [44]. Kako je već ranije spomenuto, oznaka S0426 pripada proizvodima tvrtke *Weltplast* i dijeli se na 3 skupine. Vrećica br. 1 pripada skupini vrećica za kupovinu debljine do 116 μm i prikladna je za industrijsku kompostanu, dok vrećica br. 2 pripada skupini vrećica debljina do 24 μm po dimenzijama, ali po svrsi ne, jer je namjena tih vrećica razdvajanje biootpada, a ovo je vrećica za kupovinu. Međutim, vrećica br. 1 je razgradljiva u kućnoj kompostani što odgovara kriterijima samo prve skupine, vrećica za razdvajanje biootpada debljine do 24 μm (slika 7.8) [45].



Slika 7.8. Certifikati Bipa biorazgradljivih vrećica

7.2.5 Ecovio F23B1

Ecovio F23B1 je biorazgradljiva plastična folija, kojem su komponente alifatski kopoliester komercijalnog imena *ecoflex* uz dodatak PLA. Radi svoje iznimne čvrstoće, *Ecovio F23B1* ima mnogo primjena, od filmova i folija do proizvodnje vrećica za kupovinu i biorazgradljivih vrećica za razdvajanje otpada. *Ecovio F23B1* tvrtke *BASF* proizvodi se na ekstruzijskoj liniji tvrtke *ALEKO BIO*, namijenjene baš za proizvodnju biorazgradljivih plastičnih materijala, većinom od PLA [46][47].

Svojstva *Ecovio F23B1* kopolimera koja garantira proizvođač su [46]:

- visoka čvrstoća taljevine
- odlična obradljivost na konvencionalnoj opremi za proizvodnju PE-LD
- dobra mehanička svojstva
- mogućnost proizvodnje tankih folija, do 10 μm
- dobra obradljivost na strojevima za proizvodnju vrećica
- odlična svojstva spajanja.

Kopolimer *Ecovio F23B1* certificiran je od strane DIN CERTCO, normom EN 13432 *„Zahtjevi na ambalažu obnovljivu kompostiranjem i biorazgradnjom – Shema ispitivanja i kriterij procjene za krajnje odobrenje ambalaže“*, oznakom 7W0188 koja certificira *ecovio*

biorazgradljivu foliju određenog kemijskog sastava debljine do 130 μm [44] [46]. Folija za ispitivanje prikazana na slici 7.9 debljine je 10 μm.



Slika 7.9. ***Ecovio F23B1 biorazgradljiva plastična folija***

7.2.6 Biorazgradljiva škrobna folija

Biorazgradljiva folija proizvedena od 100 % - tnog kukuruznog škroba debljine 11 μm (slika 7.10) proizvedena je, kao i prijašnja, na ekstruzijskoj liniji *ALEKO BIO* tvrtke *ALEKO*.



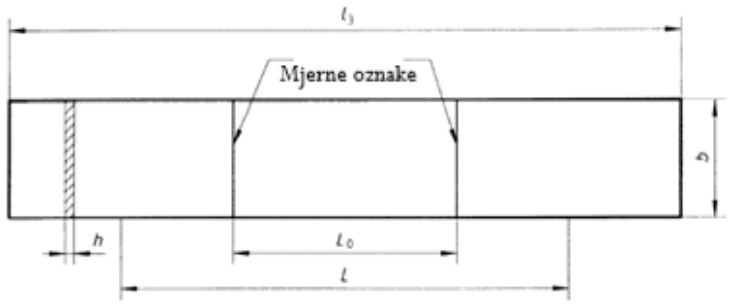
Slika 7.10. Biorazgradljiva škrobna folija

7.3 Norme za ispitivanje biorazgradljivih folija

Osim vizualnih pregleda folija, kojim je bila vidljiva sve intenzivnija razgradnja, u svrhu određivanja biorazgradnje folija provođena su i ispitivanja mjerenja rastezne čvrstoće po normi *HRN EN ISO 527-3* i rastezne žilavosti po normi *ISO 8256:2004*

7.3.1 Rastezna čvrstoća, HRN EN ISO 527-3

Rastezna čvrstoća definirana je kao omjer najveće rastezne sile i početne ploštine ispitivanog predmeta [49]. Ispitivanje rastezne čvrstoće plastičnog materijala definirano je *HRN EN ISO 527* normom. Treći dio navedene norme odnosi se na ispitivanje plastičnih filmova i folija debljine manje od 1 mm. Ispitivanje rastezne čvrstoće se vrši na ispitku koji je prikazan na slici 7.11.



Slika 7.11. Preporučena forma ispitka tipa 2 plastične folije za ispitivanje rastezne čvrstoće [50]

Preporučene dimenzije ispitka prikazane su u tablici 7.1.

Tablica 7.1. Preporučene dimenzije ispitka tipa 2 plastične folije za ispitivanje rastezne čvrstoće [50]

Oznaka	Opis	Dimenzije
L	početna duljina između oznaka	100 ± 5 mm
L_0	mjerne oznake	50 ± 0,5 mm
l_3	ukupna duljina	≥ 150 mm
b	širina	10 – 25 mm
h	debljina	≤ 1 mm

Kao što je vidljivo iz tablice 7.1, preporučeno je da ispitak bude širine između 10 i 25 mm, a dužine minimalno 150 mm te dvije centrirane paralelne mjerne oznake na udaljenosti od 50 mm. Kod nekih plastičnih folija se pri rasteznoj čvrstoći javlja veće istezanje što uzrokuje izlazak iz ograničenog područja rastezanja stroja. U tom slučaju, potrebno je smanjiti udaljenosti između mjernih oznaka [50].

Vrlo je bitno da ispitna tijela budu pravilno izrezana, glatkih rubova bez zareza, kako ti zarezi ne bi djelovali kao koncentratori naprezanja. Takvi ispitci postižu se uporabom žileta, rezača papira, skalpela i ostalih reznih alata primjernih za ovu namjenu. Nakon izrezivanja preporučeno je pregledati rubove ispitka s povećalom kako bi se osigurali glatki rubovi ispitaka koji idu na ispitivanje, a oni koji ne odgovaraju kriteriju moraju biti odbačeni. Uređaj za označavanje mjernih oznaka mora imati 2 paralelna ruba, a širina rubova se mora kretati između 0,05 mm i 0,10 mm s kutom nagiba manjim od 15 ° [50].

U slučaju anzitropnosti, razlike u svojstvima u smjerovima, filmova ili folija, potrebno je pripremiti dvije skupine ispitaka. Skupine se moraju razlikovati po orijentaciji, tj. jedna skupina ispitaka mora imati vertikalnu os koja se poklapa s vertikalnom osi folije, a druga skupine horizontalnu os ispitaka koja se poklapa s vertikalnom osi folije [50].

Računanje vrijednosti naprezanja računa se kao:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{7.1.}$$

gdje je,

σ [MPa] – vrijednost naprezanja

F [N] – izmjerena vrijednost sile

A [mm^2] – poprečni presjek ispitka

Za materijale i ispitivanja gdje vrijedi homogena raspodjela naprezanja paralelno po presjeku ispitka, za računanje istezanja rabi se iduća jednadžba:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \tag{7.2.}$$

gdje je:

ε [%] – vrijednost istezanja

L_0 [mm] – duljina između mjernih oznaka

ΔL_0 [mm] – povećanje duljine između mjernih oznaka uslijed istezanja

Nominalno istezanje izražava se kao:

$$\varepsilon_t = \frac{L_t}{L} \tag{7.3.}$$

gdje je:

ε_t [%] – nominalno istezanje

L [mm] – početna duljina između oznaka

L_t [mm] – povećanje duljine između oznaka uslijed istezanja

Modul elastičnosti računa se kao:

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \tag{7.4.}$$

gdje je:

E_t [MPa] – modul elastičnosti

σ_1 [MPa] – naprezanje mjereno pri vrijednosti istezanja ε_1

σ_2 [MPa] – naprezanje mjereno pri vrijednosti istezanja ε_2

7.3.2 Rastezna žilavost, ISO 8526:2004

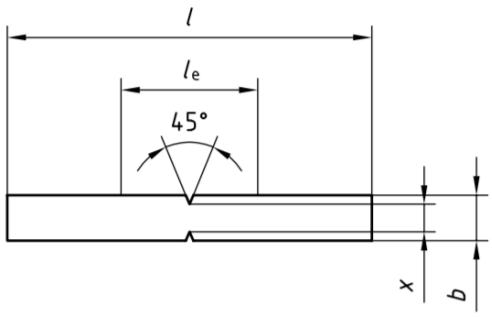
Norma ISO *8562:2004* definira postupak određivanja rastezne žilavosti tankih ispitaka, visoke elastičnosti, koji nisu prikladni za ispitivanje klasičnim postupkom prekidne žilavosti. Norma ISO *8562:2004* definira dvije metode za određivanje rastezne žilavosti, metodu A i metodu B, prikazane u tablici 7.2. Bitno je napomenuti kako ove metode nisu prikladne kao izvor podataka za proračunavanje komponenata konstrukcija, već služe kao pokazatelj tipičnog ponašanja materijala te kao provjera kontrole kvalitete [51].

Tablica 7.2. Metoda A i metoda B ispitivanja rastezne žilavosti po normi *ISO 8526:2004* [51]

Potencijalna energija [J]	**Masa pomičnog prihvata ispitnog tijela [g]**	
	Metoda A	Metoda B
2,0	15 ± 1 ili 30 ± 1	15 ± 1
4,0	15 ± 1 ili 30 ± 1	15 ± 1
7,5	30 ± 1 ili 60 ± 1	30 ± 1
15,0	30 ± 1 ili 60 ± 1	30 ± 1
25,0	60 ± 1 ili 120 ± 1	120 ± 1
50,0	60 ± 1 ili 120 ± 1	120 ± 1

Ispitak je tijekom ispitivanja postavljen horizontalno u odnosu na klatno te se uslijed otpuštanja klatna i njegovog udarca o ispitak, ispitak prelomi. Jedan kraj ispitka je tijekom ispitivanja pričvršćen za okvir, a drugi kraj pomičnim prihvatom ispitnog tijela. Metoda A i metoda B razlikuju se po načinu pozicioniranja ispitka. Pri korištenju metode A, ispitak je montiran na okvir, a kod metode B pri udarcu njihala i sam ispitak prati klatno, dakle ispitak nije pričvršćen. Energija prijeloma određena je količinom kinetičke energije klatno u toku procesa loma ispitka [51].

Slika 7.12 prikazuje shemu ispitnog tijela tipa 1 koji će se rabiti u ovim ispitivanjima. Za mjerenje dimenzija ispitaka potrebno je rabiti mjerne alate s točnošću od 0,01 mm [51].



Slika 7.12. Preporučena forma ispitka tipa 1 plastične folije za ispitivanje rastezne žilavosti [51]

Za ispitak tipa 1 preporučuje se korištenje metode A. Preporučene dimenzije ispitnog tijela tipa 1 nalaze se u tablici 7.3.

Tablica 7.3. Preporučene dimenzije ispitnog tijela tipa 1 plastične folije za ispitivanje rastezne žilavosti [51]

Oznaka	Opis	Dimenzije [mm]
$\boldsymbol{l}$	duljina	80 ± 2
$\boldsymbol{b}$	širina	10 ± 0,2
$\boldsymbol{x}$	debljina na najtanjem dijelu zareza	6 ± 0,2
$\boldsymbol{l_0}$	širina ravnog dijela zareza	-
$\boldsymbol{l_e}$	ukupna širina zareza	30 ± 2
$\boldsymbol{r}$	radijus zakrivljenosti	-

Kada su ispitna tijela pripremljena, bitno je provesti ispitivanja na sobnoj temperaturi, ako nije drugačije specificirano. Ispitnim tijelima treba izmjeriti dimenziju *x* i dimenziju *h*, debljinu folije, s točnošću od 0,02 mm. Za mjerenje dimenzije *x* rabi se mikrometar, a za mjerenje debljine folije rabi se uređaj za mjerenje debljina filmova i folija.

Kod korištenja metode A, klatno je potrebno podići na propisanu visinu, ispitak stegnuti u čeljust za jedan kraj i za pomični prihvat za drugi kraj. Nakon otpuštanja klatna potrebno je zabilježiti energiju udarca E_S koju je ispitak apsorbirao. Nakon provedenog ispitivanja svakog ispitka potrebno je provjeriti je li ispitak bio pravilno stegnut i da li je do pucanja ispitka došlo na sredini samog ispitka. U slučaju da ta dva uvjeta nisu ispunjena, potrebno je ponoviti ispitivanje na dodatnom ispitku.

Kako bi se izračunala vrijednost rastezne žilavosti folija nakon ispitivanja metodom A, potrebno je prvo od apsorbirane energije oduzeti vrijednost energije korekcije uslijed plastične deformacije i kintetičke energije pomičnog prihvata, koju prvo treba izračunati.

$$E_q = \frac{E_{max} \cdot \mu \cdot (3 + \mu)}{2 \cdot (1 + \mu)} \approx \frac{3}{2} E_{max} \cdot \mu \qquad (7.5.)$$

gdje je,

E_q – korekcija energije uslijed plastične deformacije i kinetičke energije pomičnog prihvata [J]

E_{max} – maksimalna energija udarca klatna [J]

μ – faktor mase pomičnog prihvata podijeljene s reduciranom masom klatna.

Reducirana masa klatna m_p računa se:

$$m_p = \frac{E_{max}}{g \cdot L_p \cdot (1 - \cos\alpha)} \tag{7.6.}$$

gdje je,

g – ubrzanje uslijed sile teže [m/s^2]

L_p – duljina klatna [m]

α – kut između pozicije klatna u njegovoj najvišoj i najnižoj poziciji

Energija udarca rastezne žilavosti računa se:

$$E_c = E_s - E_q \tag{7.7.}$$

gdje je,

E_c – ispravljena vrijednost energije udarca rastezne žilavosti [J]

E_s – energija udara klatna, apsorbirana energija [J]

Mjera za rasteznu žilavost je a_{TN}, izražava se u kJ/m^2 i računa se:

$$a_{TN} = \frac{E_C}{x \cdot h} \cdot 10^3 \tag{7.8.}$$

7.4 Biorazgradnja folija

Sedam prije spomenutih biorazgradljivih folija, postavljeno je u komposter na samom početku veljače 2020. godine. U komposteru se većinom nalazio vrtni otpad, a vanjske temperature su bile vrlo niske te se tijekom prvog mjeseca provedenog u komposteru nije pojavila nikakva značajnija biorazgradnja ni kod jedne folije. Slika 7.13 prikazuje situaciju u komposteru na početku veljače i na početku ožujka.



Slika 7.13. Biorazgradljive folije u vrtnom kompostištu

Nakon 2 mjeseca (60 ± 2 dana) pojavljuju se prvi vidljivi znakovi biorazgradnje, prikazani na slici 7.14.



Slika 7.14. Početak biorazgradnje

Nakon 3 mjeseca u komposteru, neke folije su velikim dijelom prošle kroz proces biorazgradnje. Razlog naglom porastu brzine biorazgradnje može biti porast vanjske temperature i više dodavanog vlažnog biootpada u komposter. Slika vrećice Bipa nakon 3 mjeseca u komposteru prikazana je na slici 7.15.



Slika 7.15. Folija u procesu biorazgradnje

Ispitci za ispitivanja zadnji puta su se rezali iz folija nakon 4 mjeseca u komposteru. Neke folije su bile toliko razgrađene da se ispitci nisu mogli ni izrezati (slika 7.16), a iz preostalih 3 folija izrezani su uzorci iz dijelova koji su bili najmanje razgrađeni.



Slika 7.16. Biorazgrađeni ispitci nakon 4 mjeseca u vrtnom komposteru

7.5 Provedena ispitivanja

Biorazgradljive folije i vrećice su se u komposteru nalazile u razdoblju od 4 mjeseca, a svakih 30 ± 1 dan uzimali su se uzorci za ispitivanja. To daje 4 skupine ispitaka za ispitivanje, uz dodatak 0. ispitivanja, u kojem su se ispitivale vrećice i folije koje nisu stavljane u komposter radi usporedbe mehaničkih svojstava nakon procesa biorazgradnje. Dimenzije ispitaka prikazane su u prilozima. Kratice ispitaka koje će se upotrebljavati u daljnjem tekstu dane su u tablici 7.4. Prvi broj nakon kratice ispitka označava seriju, tj. broj mjeseci provedenih u komposteru, a drugi broj nakon kratice označava broj ispitka iz te serije.

Tablica 7.4. Popis kratica biorazgradljivih folija i vrećica korištenih u daljnjem tekstu

Kratica	Biorazgradljiva folija/vrećica
BO	vrećica za prikupljanje biootpada zagrebačke Čistoće
SP	biorazgradljiva vrećica za voće i povrće iz *Spara*
SW	*Swirl* kompostabilna vrećica za biootpad
K	biorazgradljiva škrobna folija
ECO	*Ecovio F23B1* biorazgradljiva folija
B1	deblja biorazgradljiva vrećica Bipa za kupovinu
B2	tanja biorazgradljiva vrećica Bipa za kupovinu

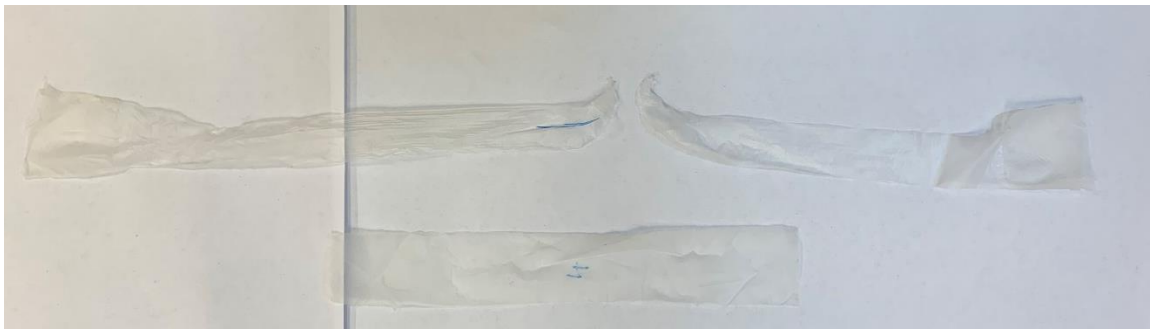
7.5.1 Ispitivanje rasteznih svojstava

Rastezna svojstva folija ispitivala su se na sobnoj temperaturi, točnije na 22 °C na kidalici *Shimadzu AGS – X*, maksimalne sile 10 kN, 1. klase. Razmak između oslonaca je 100 mm, a brzina ispitivanja 50 mm/min. Slika ispitka na kidalici prikazana je na slici 7.16. Radi se o ispitku folije BO, iz 4. serije. Na ispitku su vidljivi tragovi biorazgradnje u pogledu rupa i pukotina, koje postaju koncentratori naprezanja tijekom ispitivanja.



Slika 7.17. Ispitivanje rasteznih svojstava

Radi usporedbe, na slici 7.18 prikazane su dvije folije iz iste serije. Gornji ispitak je već ispitan na kidalici te je vidljiva usporedba s još neispitanim, donjim ispitkom. Primjetljivo je koliko je gornji, ispitani ispitak duži od donjeg te kako je puknuo na svojoj sredini, što je i poželjno.



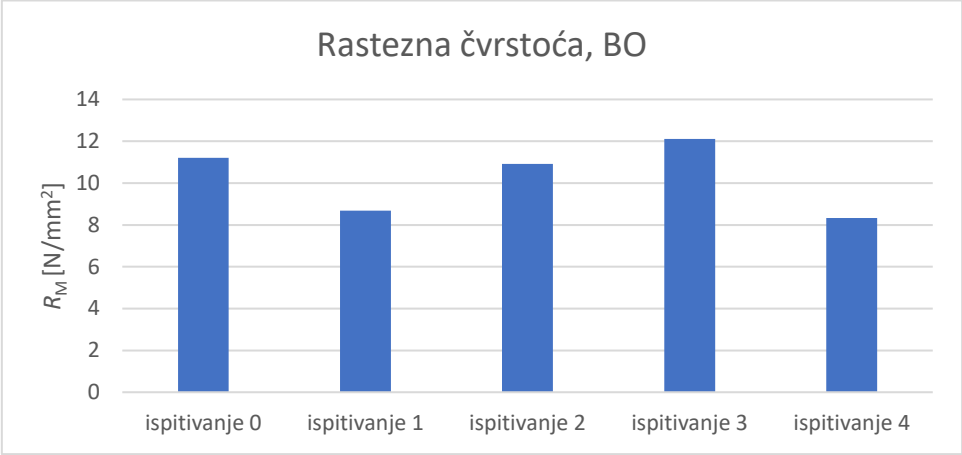
Slika 7.18. Ispitani i neispitani ispitak

Podaci dobiveni na kidalici obrađeni su u softverskom programu *TrapeziumX*. Rezultati ispitivanja dani su tablično i grafički u nastavku. Modul rastezljivosti *E* izračunat je za vrijednosti naprezanja 1 i 3 N/mm^2.

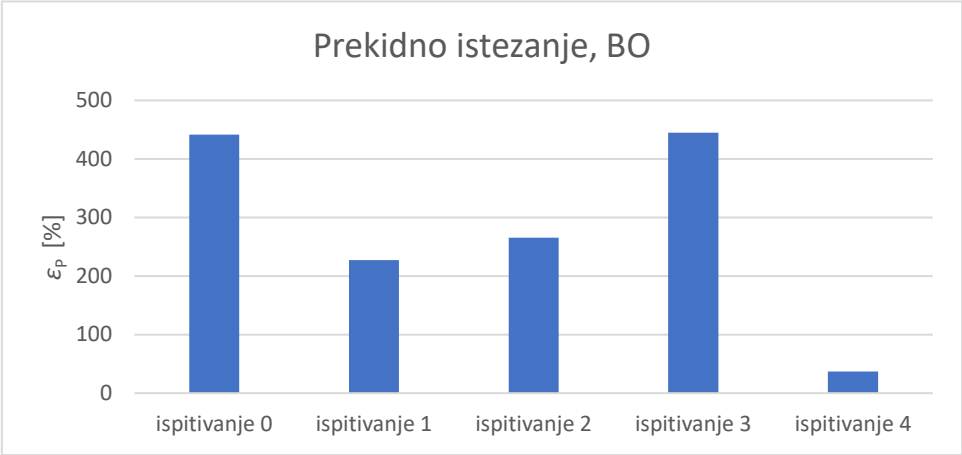
Tablica 7.5. Vrijednosti rasteznih svojstava vrećice oznake BO

Broj ispitka	F_{max} [N]	R_m [N/mm^2]	F_P [N]	R_P [N/mm^2]	ε_P [%]	E [N/mm^2]
BO0_1	8,14915	11,665	8,11577	11,6172	453,084	78,9252
BO0_2	7,70728	11,2719	7,62622	11,1534	431,484	121,41
BO0_3	7,73589	10,7003	7,53085	10,4167	439,45	93,918
$\bar{x}$	**7,86411**	**11,2124**	**7,75761**	**11,0624**	**441,339**	**98,0844**
s	**0,24727**	**0,48509**	**0,31382**	**0,6054**	**10,9232**	**21,5467**
R	**0,44187**	**0,9647**	**0,58492**	**1,2005**	**21,6**	**42,4848**
BO1_1	5,7141	8,40816	3,99272	5,87518	302,875	106,944
BO1_2	6,62168	9,64697	5,53767	8,0677	316,133	85,0369
BO1_3	6,00815	8,00734	1,6133	2,15012	62,9357	119,153
$\bar{x}$	**6,11464**	**8,68749**	**3,71456**	**5,36433**	**227,315**	**103,711**
s	**0,46307**	**0,85476**	**1,97692**	**2,99168**	**142,511**	**17,2863**
R	**0,90758**	**1,63963**	**3,92437**	**5,91758**	**253,197**	**34,1161**
BO2_1	7,86622	10,957	1,98364	2,76304	269,508	110,004
BO2_2	8,09034	9,90686	7,01586	8,59113	206,675	78,8049
BO2_3	9,0758	11,8778	8,47499	11,0915	320,366	86,6694
$\bar{x}$	**8,34412**	**10,9139**	**5,82483**	**7,48189**	**265,516**	**91,8261**
s	**0,64349**	**0,98618**	**3,40563**	**4,2736**	**56,9505**	**16,2262**
R	**1,20958**	**1,97094**	**6,49135**	**8,32846**	**113,691**	**31,1991**
BO3_1	8,82149	12,1088	5,91914	8,12488	457,226	95,5124
BO3_2	9,82761	14,0698	9,12031	13,0572	521,608	129,858
BO3_3	6,95864	10,1761	5,03063	7,35666	356,1	132,949
$\bar{x}$	**8,53591**	**12,1182**	**6,69003**	**9,51291**	**444,978**	**119,44**
s	**1,45565**	**1,94687**	**2,15106**	**3,09338**	**83,431**	**20,7793**
R	**2,86897**	**3,8937**	**4,08968**	**5,70054**	**165,508**	**37,4366**
BO4_1	5,0958	8,34761	3,89735	6,38439	40,3578	108,653
BO4_2	5,2913	8,45081	2,83718	4,5313	42,0245	97,1554
BO4_3	4,75725	8,18366	2,05517	3,53541	27,9496	104,436
$\bar{x}$	**5,04812**	**8,32736**	**2,9299**	**4,81703**	**36,7773**	**103,415**
s	**0,2702**	**0,13472**	**0,92458**	**1,44582**	**7,6903**	**5,81643**
R	**0,53405**	**0,26715**	**1,84218**	**2,84898**	**14,0749**	**11,4976**

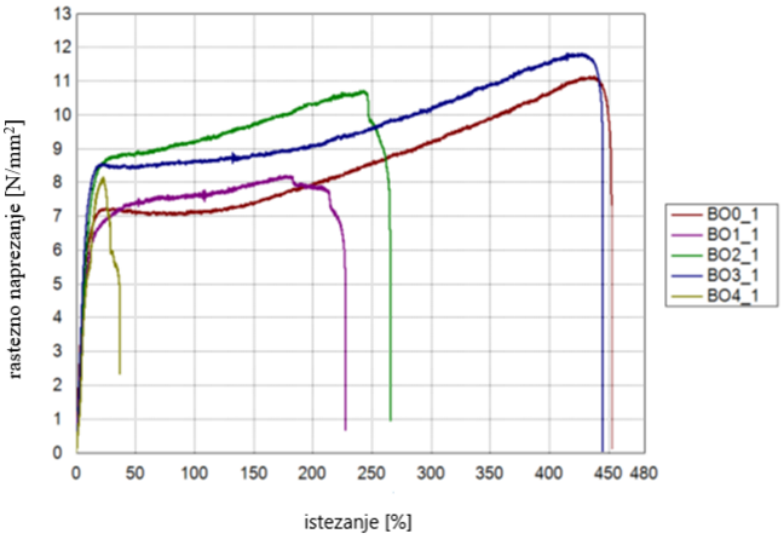
Tablica 7.5 prikazuje vrijednosti rasteznih svojstava za vrećicu BO. Slike 7.19 i .7.20 prikazuju grafički prikaz vrijednosti iz tablice 7.5, gdje nisu vidiljvi nikakavi konstantni padovi vrijednosti rastezne čvrstoće i prekidnog istezanja, već nakon prvog pada nagli porast i tek u zadnjem ispitivanju pad vrijednosti, što potkrijepljuje i dijagram prikazan na slici 7.21.



Slika 7.19. Usporedba vrijednosti rastezne čvrstoće vrećice oznake BO



Slika 7.20. Usporedba vrijednosti prekidnog istezanja vrećice oznake BO

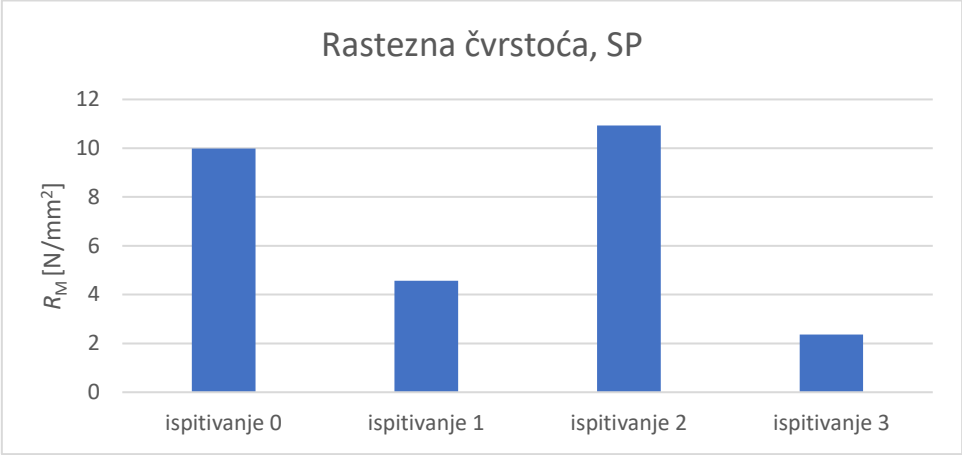


Slika 7.21. Dijagram rastezno naprezanje - istezanje vrećice oznake BO

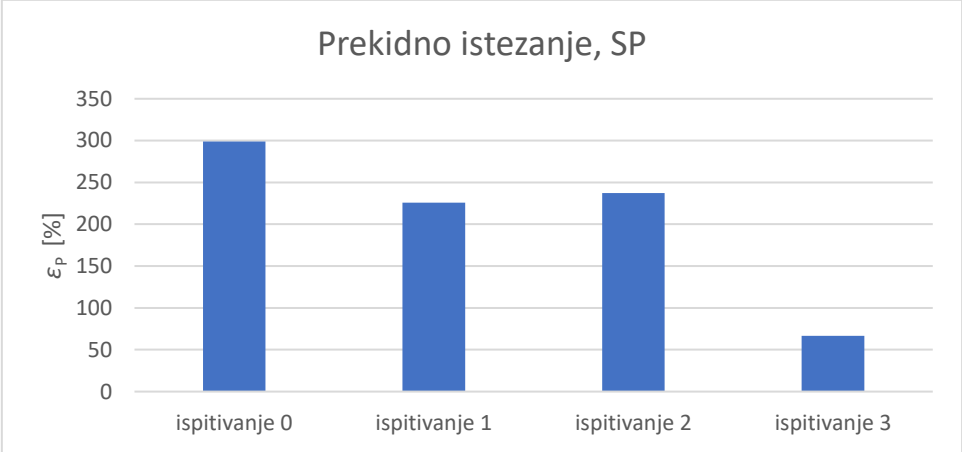
Tablica 7.6. Vrijednosti rasteznih svojstava vrećice oznake SP

Broj ispitka	F_{max} [N]	R_m [N/mm^2]	F_P [N]	R_P [N/mm^2]	ε_P [%]	E [N/mm^2]
SP0_1	3,40462	13,3149	2,11716	8,27985	242,425	72,7142
SP0_2	4,20411	11,7901	2,97546	8,34445	283,783	62,6493
SP0_3	4,282	16,1189	3,54608	13,3487	370,892	86,2589
$\bar{x}$	**3,96358**	**13,7413**	**2,87957**	**9,991**	**299,033**	**73,8741**
s	**0,48563**	**2,19568**	**0,71927**	**2,90803**	**65,5772**	**11,8475**
R	**0,87738**	**4,3288**	**1,42892**	**5,06885**	**128,467**	**23,6096**
SP1_1	3,91007	10,2756	1,94709	5,11691	306	104,936
SP1_2	3,20276	10,3579	1,69754	5,48993	291,909	100,587
SP1_3	2,26657	9,01219	0,78201	3,1094	79,9581	101,483
$\bar{x}$	**3,12647**	**9,8819**	**1,47555**	**4,57208**	**225,956**	**102,335**
s	**0,8244**	**0,75431**	**0,61344**	**1,28038**	**126,634**	**2,29637**
R	**1,6435**	**1,34571**	**1,16508**	**2,38053**	**226,042**	**4,349**
SP2_1	2,96911	9,70296	1,39237	4,55021	147,116	112,022
SP2_2	4,2661	15,5448	3,3013	12,0292	264,508	89,0973
SP2_3	4,77473	18,0779	4,27882	16,2003	300,467	115,232
$\bar{x}$	**4,00331**	**14,4419**	**2,99083**	**10,9266**	**237,364**	**105,45**
s	**0,93105**	**4,29502**	**1,46806**	**5,9028**	**80,1982**	**14,2529**
R	**1,80562**	**8,37494**	**2,88645**	**11,6501**	**153,351**	**26,1347**
SP3_1	2,02974	8,71506	0,53406	2,29308	92,6995	107,474
SP3_2	2,19822	7,74266	0,39101	1,37722	70,142	88,3889
SP3_3	2,34763	8,69814	0,9203	3,40977	37,3087	143,432
$\bar{x}$	**2,19186**	**8,38529**	**0,61512**	**2,36002**	**66,7167**	**113,098**
s	**0,15904**	**0,5566**	**0,2738**	**1,01793**	**27,8538**	**27,9493**
R	**0,31789**	**0,9724**	**0,52929**	**2,03255**	**55,3908**	**55,0431**

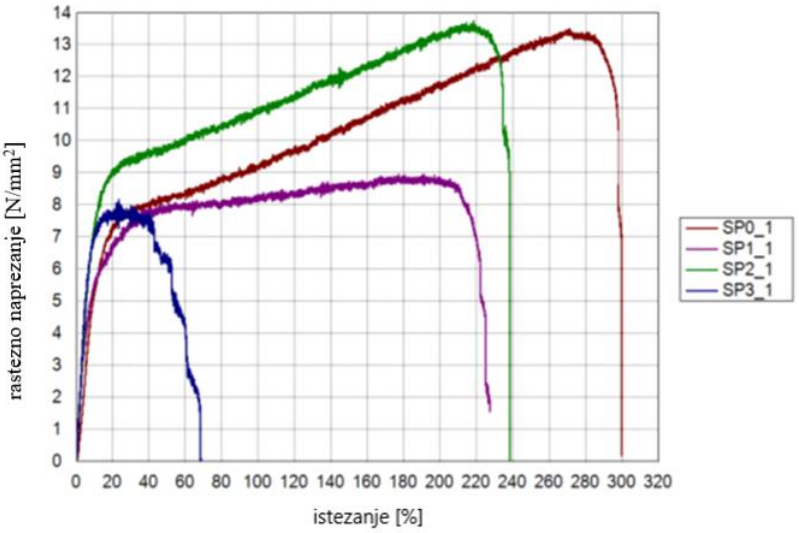
Tablica 7.6 prikazuje vrijednosti rasteznih svojstava vrećice SP. U ovom slučaju, nije rađeno ispitivanje 4, radi prevelikog stupnja biorazgradnje vrećice da bi se iz nje izrezali ispitci. Slika 7.22 prikazuje vrijednosti rastezne čvrstoće vrećice SP gdje također nije vidljiv pad, nego naizmjeničan rast i pad tijekom mjeseci. Slika 7.23 prikazuje vrijednosti prekidnog istezanja, gdje su vrijednosti ispitivanja 1 i ispitivanja 2 relativno blizu, no i dalje je vidljiv porast u ispitivanju 2. Slika 7.24 prikazuje dijagram rastezno naprezanje – istezanje za spomenutu vrećicu, na kojem su jasno vidljivi spomenuti padovi i porasti rastezne čvrstoće i prekidnog istezanja.



Slika 7.22. Usporedba vrijednosti rastezne čvrstoće vrećice oznake SP



Slika 7.23. Usporedba vrijednosti prekidnog istezanja vrećice oznake SP

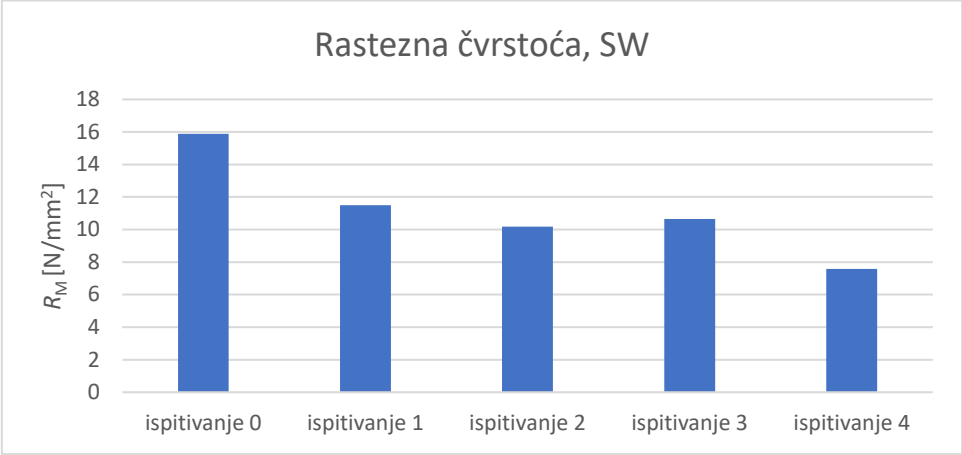


Slika 7.24. Dijagram rastezno naprezanje - istezanje vrećice oznake SP

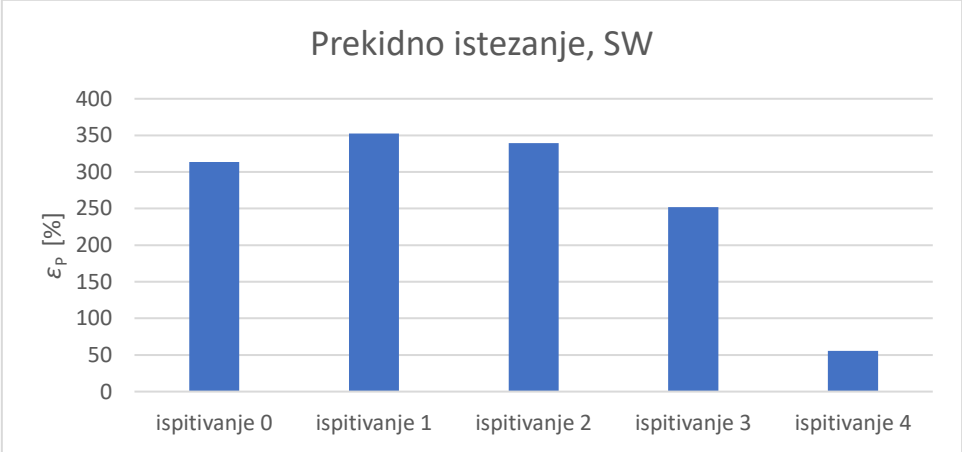
Tablica 7.7. Vrijednosti rasteznih svojstava vrećice oznake SW

Broj ispitka	F_{max} [N]	R_m [N/mm^2]	F_P [N]	R_P [N/mm^2]	ε_P [%]	E [N/mm^2]
SW0_1	7,81377	16,5095	6,54539	13,8295	307,85	130,437
SW0_2	7,3417	17,5471	7,21614	17,247	389,375	184,165
SW0_3	6,97295	13,5973	3,7241	7,262	243,441	139,432
$\bar{x}$	**7,37614**	**15,8846**	**5,82854**	**12,7795**	**313,555**	**151,345**
s	**0,42147**	**2,0477**	**1,8531**	**5,07464**	**73,1341**	**28,7769**
R	**0,84082**	**3,9498**	**3,49204**	**9,985**	**145,934**	**53,728**
SW1_1	5,09739	12,8527	4,0261	10,1515	448,516	98,3073
SW1_2	3,80993	9,5775	1,92006	4,82671	165,071	151,22
SW1_3	4,11034	12,0326	3,40462	9,96668	443,533	121,631
$\bar{x}$	**4,33922**	**11,4876**	**3,11693**	**8,31496**	**352,373**	**123,719**
s	**0,67356**	**1,70426**	**1,08209**	**3,02233**	**162,228**	**26,5181**
R	**1,28746**	**3,2752**	**2,10604**	**5,32479**	**283,445**	**52,9127**
SW2_1	6,0908	11,2178	4,76678	8,77925	367,326	155,647
SW2_2	5,45661	9,72311	4,33286	7,72071	313,417	102,287
SW2_3	5,56628	9,59985	3,1058	5,3564	336,901	142,852
$\bar{x}$	**5,70456**	**10,1803**	**4,06848**	**7,28545**	**339,215**	**133,595**
s	**0,33896**	**0,90065**	**0,86147**	**1,75245**	**27,0289**	**27,8583**
R	**0,63419**	**1,61795**	**1,66098**	**3,42285**	**53,909**	**53,36**
SW3_1	5,77609	9,75295	3,1964	5,39713	250,25	152,172
SW3_2	6,85533	11,0734	6,44525	10,411	364,642	133,074
SW3_3	7,26859	11,155	2,88487	4,42736	141,175	148,195
$\bar{x}$	**6,63334**	**10,6605**	**4,17551**	**6,74516**	**252,022**	**144,48**
s	**0,77062**	**0,78698**	**1,97182**	**3,21152**	**111,744**	**10,0763**
R	**1,4925**	**1,40205**	**3,56038**	**5,98364**	**223,467**	**19,098**
SW4_1	5,06719	8,55222	3,63032	6,12712	93,2502	104,32
SW4_2	3,16461	5,6374	0,01272	0,02265	30,9468	108,667
SW4_3	4,94321	8,52866	1,99318	3,43889	42,4197	135,791
$\bar{x}$	**4,39167**	**7,57276**	**1,87874**	**3,19622**	**55,5389**	**116,259**
s	**1,06447**	**1,67611**	**1,81151**	**3,05946**	**33,1589**	**17,054**
R	**1,90258**	**2,91482**	**3,6176**	**6,10447**	**62,3034**	**31,471**

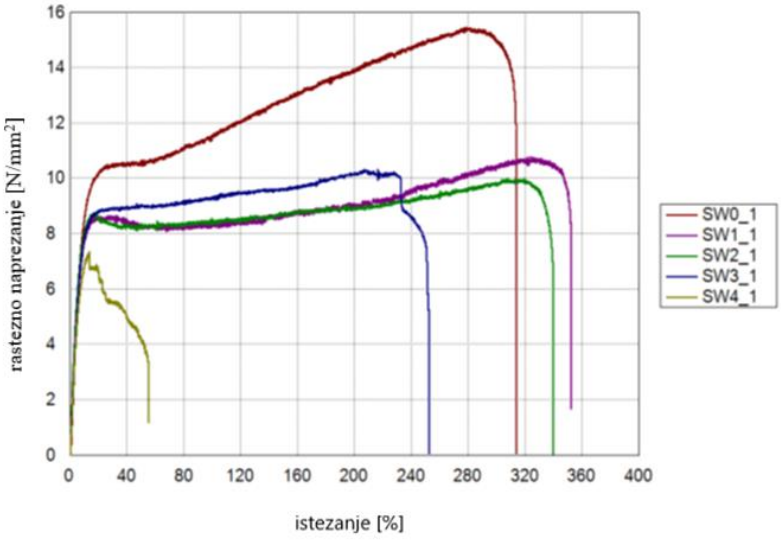
Vrijednosti rasteznih svojstava za vrećicu oznake SW prikazane u tablici 7.7 grafički su obrađene na slici 7.25 i 7.26, gdje je na slici 7.25 vidljiv gotovo pa linearni pad rastezne čvrstoće, osim malog porasta u ispitivanju 3, dok su vrijednosti prekidnog istezanja nakon ispitivanja 0 u porastu, no onda slijedi linearan pad. Na slici 7.27, gdje je prikazan dijagram rastezno naprezanje – istezanje vrećice oznake SW, vidljivo je kako su ispitivanja 1, 2 i 3 relativno slična po dobivenim vrijednostima, dok su ispitivanja 0 i 4 ekstremi.



Slika 7.25. Usporedba vrijednosti rastezne čvrstoće vrećice oznake SW



Slika 7.26. Usporedba vrijednosti prekidnog istezanja vrećice oznake SW

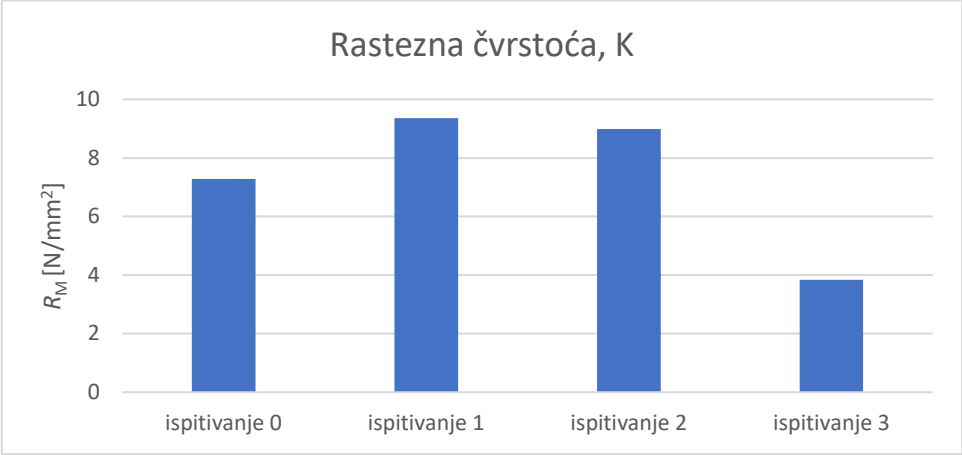


Slika 7.27. Dijagram rastezno naprezanje – istezanje vrećice oznake SW

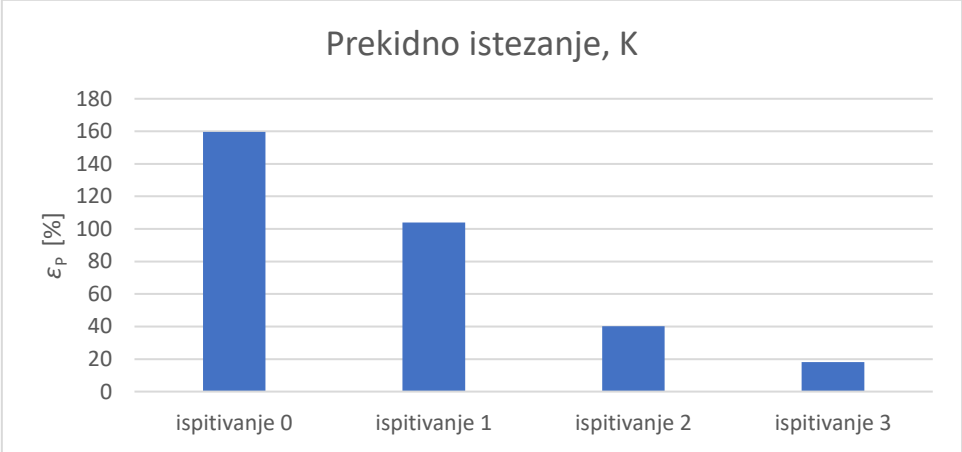
Tablica 7.8. Vrijednosti rasteznih svojstava folije oznake K

Broj ispitka	F_{max} [N]	R_m [N/mm^2]	F_P [N]	R_P [N/mm^2]	ε_P [%]	E [N/mm^2]
K0_1	3,47455	7,52263	2,0361	4,40828	100,525	154,403
K0_2	3,03427	7,02086	1,45912	3,37619	113,925	153,482
K0_3	3,40462	7,30197	2,12828	4,56459	264,191	153,264
$\bar{x}$	**3,30448**	**7,28182**	**1,8745**	**4,11635**	**159,547**	**153,716**
s	**0,23661**	**0,25149**	**0,36267**	**0,64575**	**90,8717**	**0,60458**
R	**0,44028**	**0,50177**	**0,66916**	**1,1884**	**163,666**	**1,13899**
K1_1	3,4825	10,2096	3,00249	8,80236	128,726	154,839
K1_2	2,88328	8,72636	2,26657	6,85986	89,0243	141,963
K1_3	2,95321	9,13515	2,46684	7,63065	94,3001	158,537
$\bar{x}$	**3,10633**	**9,35704**	**2,57863**	**7,76429**	**104,017**	**151,78**
s	**0,32764**	**0,76611**	**0,38048**	**0,97812**	**21,5608**	**8,70023**
R	**0,59922**	**1,48324**	**0,73592**	**1,9425**	**39,7017**	**16,574**
K2_1	4,0706	9,33324	2,56062	5,87109	33,8087	202,58
K2_2	4,28836	9,09359	1,96775	4,17267	56,0176	156,275
K2_3	4,04676	8,54341	1,90417	4,02004	30,5082	169,857
$\bar{x}$	**4,13524**	**8,99008**	**2,14418**	**4,68793**	**40,1115**	**176,237**
s	**0,13314**	**0,40496**	**0,36205**	**1,02748**	**13,8736**	**23,8027**
R	**0,2416**	**0,78983**	**0,65645**	**1,85105**	**25,5094**	**46,305**
K3_1	1,76271	3,2794	0,23524	0,43765	32,7828	88,4571
K3_2	2,98341	5,34451	0,19868	0,35592	15,2742	117,515
K3_3	1,94868	2,88864	0,30041	0,44531	6,12467	113,905
$\bar{x}$	**2,2316**	**3,83752**	**0,24478**	**0,41296**	**18,0606**	**106,626**
s	**0,65769**	**1,31964**	**0,05153**	**0,04955**	**13,5457**	**15,8377**
R	**1,2207**	**2,45587**	**0,10173**	**0,08939**	**26,6581**	**29,0579**

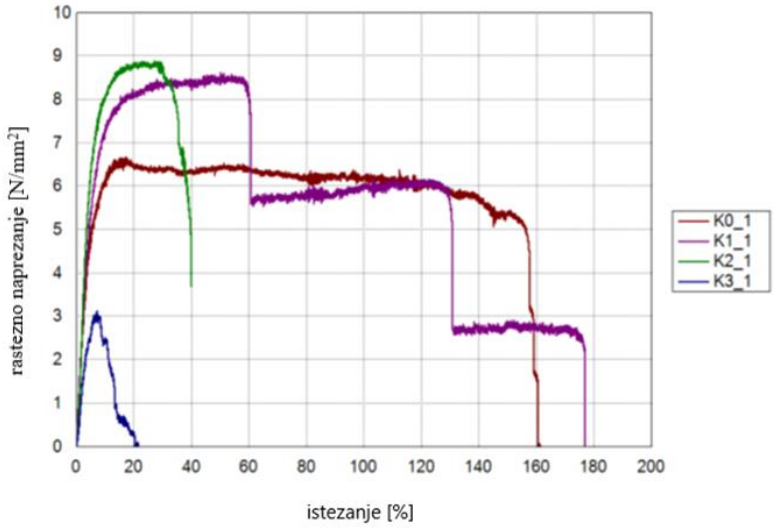
Rastezna svojstva folije oznake K, prikazana u tablici 7.8, grafički su prikazana na slikama 7.28 i 7.29. Vrijednosti rastezne čvrstoće su nakon ispitivanja 0 na svojoj najvišoj vrijednosti, a nakon toga dolazi do blagog pada. Najveći pad rastezne čvrstoće vidljiv je u ispitivanju 3. Prekidno istezanje folije K može se opisati kao eksponencijalna krivulja u pad. Dijagrami rastezno naprezanje – istezanje na slici 7.30, nepravilnog su oblika i s puno šumova. Krivulje rastezno naprezanje – istezanje za ispitivanja 0 i 1 atipičnog su oblika, dok je krivulja ispitivanja 2 najsličnija tipičnima.



Slika 7.28. Usporedba vrijednosti rastezne čvrstoće folije oznake K



Slika 7.29. Usporedba vrijednosti prekidnog istezanja folije oznake K

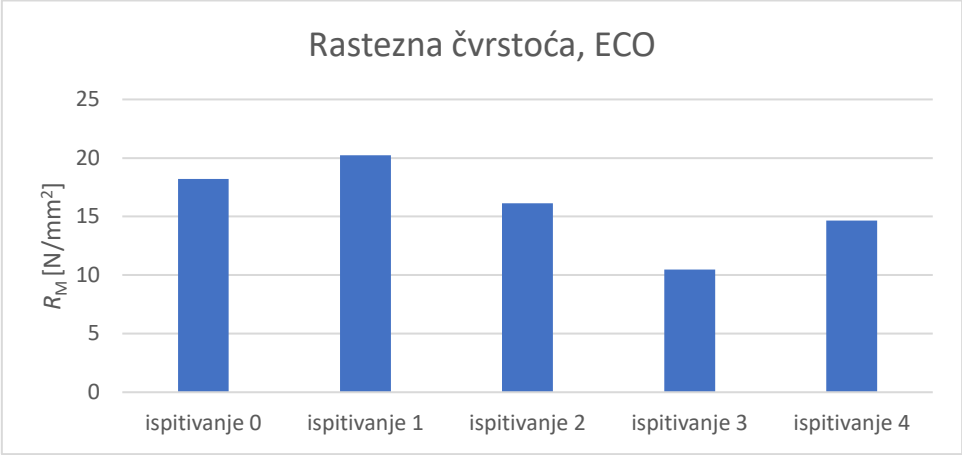


Slika 7.30. Dijagram rastezno naprezanje - istezanje folije oznake K

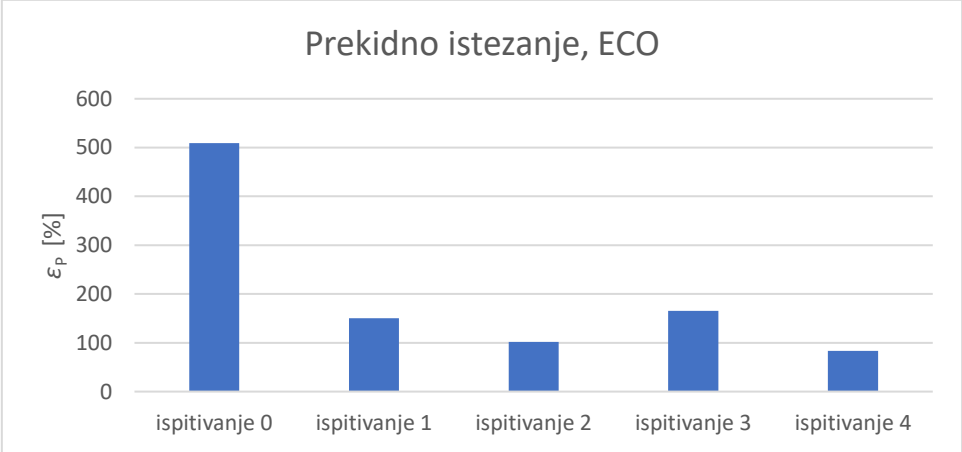
Tablica 7.9. Vrijednosti rasteznih svojstava folije oznake ECO

Broj ispitka	F_{max} [N]	R_m [N/mm^2]	F_P [N]	R_P [N/mm^2]	ε_P [%]	E [N/mm^2]
ECO0_1	6,65983	14,094	5,92232	12,5332	504,217	157,398
ECO0_2	7,34329	19,6971	6,89666	18,4991	487,484	229,684
ECO0_3	7,32581	20,8279	7,0111	19,9332	534,817	159,894
$\bar{x}$	**7,10964**	**18,2063**	**6,61003**	**16,9885**	**508,839**	**182,325**
s	**0,38965**	**3,60599**	**0,59831**	**3,92447**	**24,0027**	**41,0328**
R	**0,68346**	**6,7339**	**1,08878**	**7,4**	**47,333**	**72,286**
ECO1_1	8,26677	22,781	7,51019	20,6961	165,476	167,354
ECO1_2	6,80606	15,1593	4,19299	9,33913	117,592	167,235
ECO1_3	9,71476	22,7438	8,24928	19,3128	168,6	262,997
$\bar{x}$	**8,26253**	**20,228**	**6,65082**	**16,4493**	**150,556**	**199,195**
s	**1,45436**	**4,38969**	**2,16038**	**6,19635**	**28,5904**	**55,2539**
R	**2,9087**	**7,6217**	**4,05629**	**11,357**	**51,008**	**95,762**
ECO2_1	6,76155	16,0056	2,11239	5,00033	117,742	284,674
ECO2_2	4,131	9,93793	3,47773	8,36637	49,2661	216,028
ECO2_3	7,92344	22,4181	6,80924	19,2656	138,059	230,445
$\bar{x}$	**6,272**	**16,1205**	**4,13312**	**10,8774**	**101,689**	**243,716**
s	**1,94304**	**6,24088**	**2,41604**	**7,45678**	**46,5222**	**36,196**
R	**3,79244**	**12,4802**	**4,69685**	**14,2653**	**88,7929**	**68,646**
ECO3_1	5,47409	11,8221	3,99272	8,62283	308,266	128,242
ECO3_2	4,42505	9,88794	1,99795	4,46449	78,6053	200,001
ECO3_3	4,45048	9,7502	3,33786	7,31265	109,508	130,87
$\bar{x}$	**4,78321**	**10,4868**	**3,10951**	**6,79999**	**165,46**	**153,038**
s	**0,59846**	**1,1585**	**1,0168**	**2,12604**	**124,635**	**40,6927**
R	**1,04904**	**2,0719**	**1,99477**	**4,15834**	**229,661**	**71,759**
ECO4_1	5,07832	13,1539	3,30448	8,55928	54,9249	235,32
ECO4_2	6,86328	18,6649	4,10239	11,1566	132,667	283,194
ECO4_3	5,01792	12,1788	4,27405	10,3734	61,8578	171,611
$\bar{x}$	**5,65317**	**14,6659**	**3,89364**	**10,0298**	**83,1499**	**230,042**
s	**104,842**	**349,741**	**0,5174**	**133,232**	**43,023**	**55,9785**
R	**184,536**	**648,61**	**0,96957**	**259,732**	**77,7421**	**111,583**

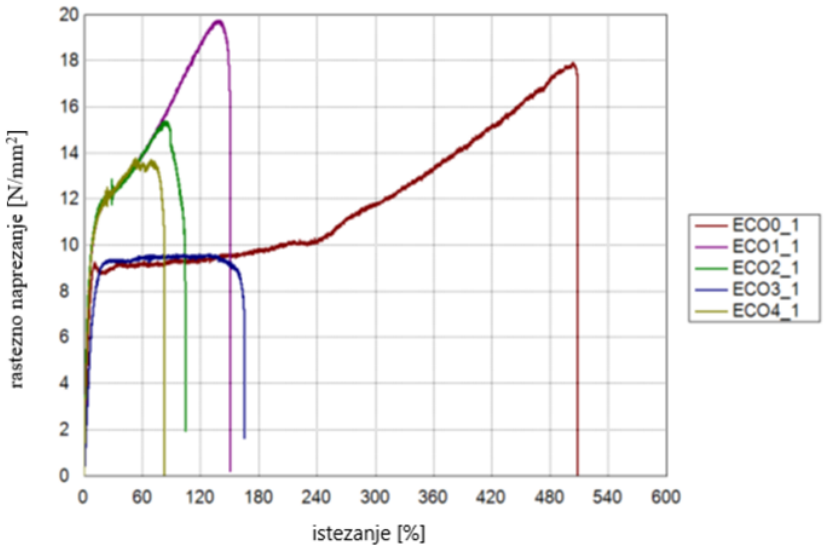
Rezultati ispitivanja rasteznih svojstava folije oznake ECO, prikazani su u tablici 7.9, a grafički prikazi rastezne čvrstoće i prekidnog istezanja na slikama 7.31 i 7.32. Vrijednosti rastezne čvrstoće, kao i prekidnog istezanja, osciliraju i nije uočen nikakav ispitak ponašanja. Oscilacije vrijednosti rasteznih svojstava vidljive su i na slici 7.33 u dijagramu rastezno naprezanja – istezanja.



Slika 7.31. Usporedba vrijednosti rastezne čvrstoće folije oznake ECO



Slika 7.32. Usporedba vrijednosti prekidnog istezanja folije oznake ECO

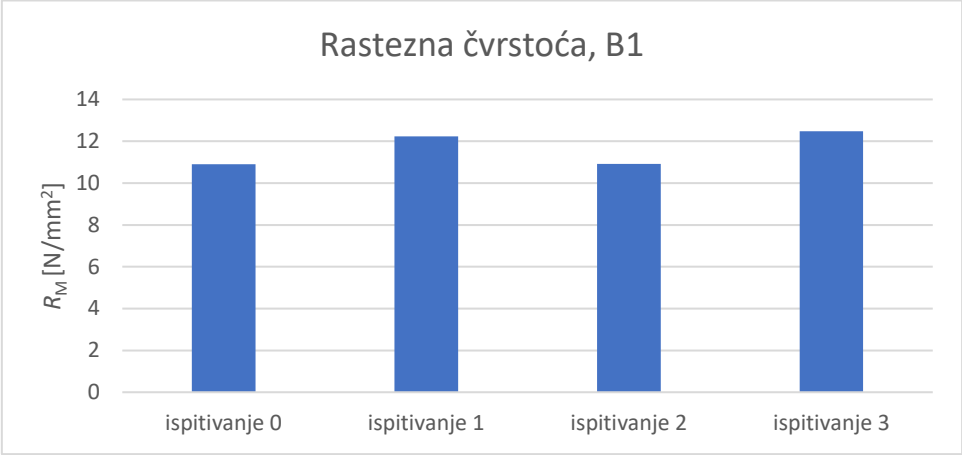


Slika 7.33. Dijagram rastezno naprezanje – istezanje folije oznake ECO

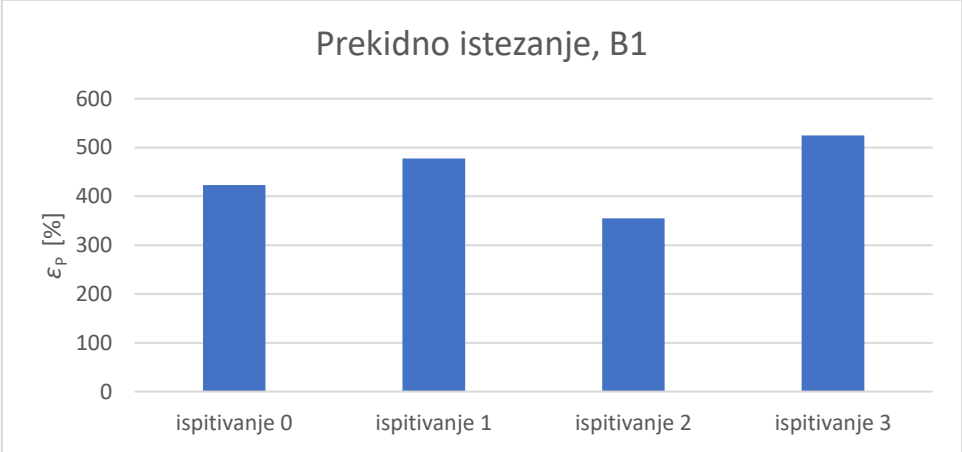
Tablica 7.10. Vrijednosti rasteznih svojstava vrećice oznake B1

Broj ispitka	F_{max} [N]	R_m [N/mm^2]	F_P [N]	R_P [N/mm^2]	ε_P [%]	E [N/mm^2]
B10_1	9,07262	8,95425	8,07126	7,96595	252,783	115,641
B10_2	12,0656	11,8943	10,9975	10,8413	457,616	88,6414
B10_3	11,1818	11,8351	10,3935	11,0007	559,516	111,378
$\bar{x}$	**10,7733**	**10,8946**	**9,82075**	**9,93598**	**423,305**	**105,22**
s	**1,53773**	**1,68061**	**1,54491**	**1,70796**	**156,219**	**14,515**
R	**2,99298**	**2,94005**	**2,92624**	**3,03475**	**306,733**	**26,9996**
B11_1	9,79106	10,7329	9,0917	9,96623	425,191	149,918
B11_2	8,70387	12,1089	7,28925	10,1409	443,5	121,484
B11_3	9,28561	13,8426	8,14279	12,1389	564,584	113,44
$\bar{x}$	**9,26018**	**12,2281**	**8,17458**	**10,7487**	**477,758**	**128,281**
s	**0,54404**	**1,55828**	**0,90165**	**1,20713**	**75,7484**	**19,1653**
R	**1,08719**	**3,1097**	**1,80245**	**2,17267**	**139,393**	**36,478**
B12_1	9,51767	10,5191	7,34647	8,11944	375,726	145,237
B12_2	10,9116	10,4126	6,32286	6,03367	294,108	113,082
B12_3	11,2263	11,8361	8,4432	8,90182	395,3	108,75
$\bar{x}$	**10,5519**	**10,9226**	**7,37084**	**7,68498**	**355,045**	**122,356**
s	**0,90935**	**0,7929**	**1,06038**	**1,48261**	**53,6726**	**19,9333**
R	**1,70863**	**1,4235**	**2,12034**	**2,86815**	**101,192**	**36,487**
B13_1	14,0174	12,8412	10,0279	9,18641	544,151	122,659
B13_2	11,2772	10,5869	6,62168	6,21637	416,476	127,178
B13_3	14,933	14,0242	13,9554	13,1062	614,933	141,841
$\bar{x}$	**13,4092**	**12,4841**	**10,2017**	**9,50299**	**525,187**	**130,559**
s	**1,90228**	**1,74625**	**3,66995**	**3,45581**	**100,579**	**10,0281**
R	**3,6558**	**3,4373**	**7,33372**	**6,88983**	**198,457**	**19,182**

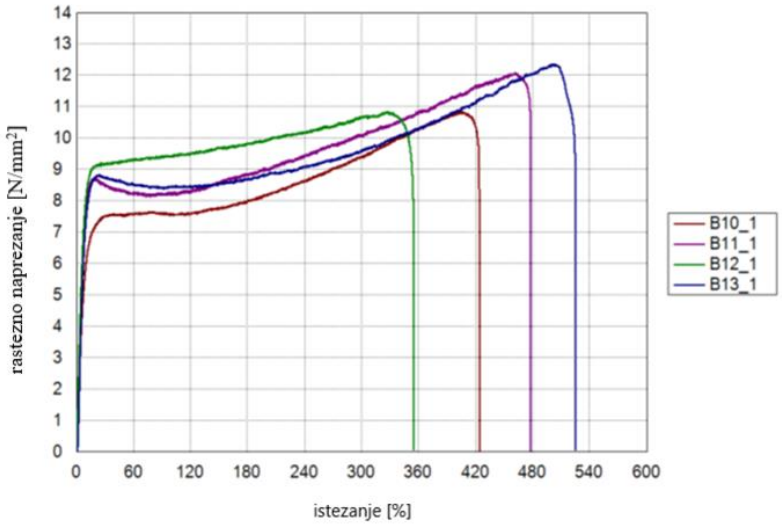
Vrijednosti rasteznih svojstava vrećice oznake B1 prikazane u tablici 7.10, grafički su predočeni u dijagramima na slikama 7.34 i 7.35. Vrijednosti rastezne čvrstoće i prekidnog istezanja kreću se vrlo slično, s oscilacijama. Na dijagramu rastezno naprezanje – istezanje, prikazan na slici 7.36 vidljiva je podudarnost oblika krivulja te njihova paralelnost.



Slika 7.34. Usporedba vrijednosti rastezne čvrstoće vrećice oznake B1



Slika 7.35. Usporedba vrijednosti prekidnog istezanja vrećice oznake B1

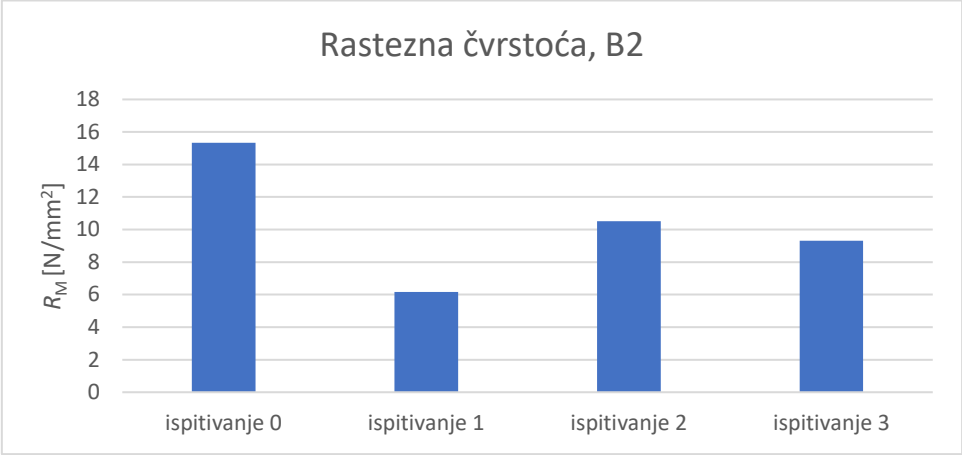


Slika 7.36. Dijagram rastezno naprezanje - istezanje vrećice oznake B1

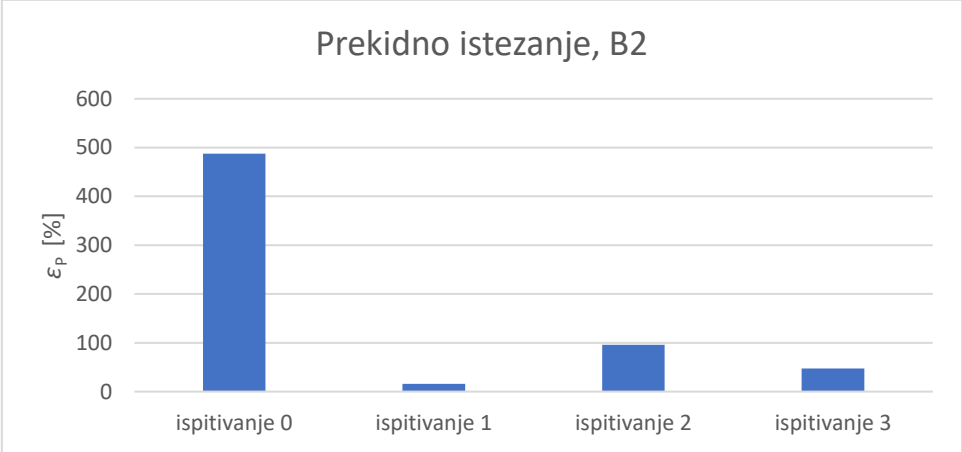
Tablica 7.11. Vrijednosti rasteznih svojstava vrećice oznake B2

Broj ispitka	F_{max} [N]	R_m [N/mm^2]	F_P [N]	R_P [N/mm^2]	ε_P [%]	E [N/mm^2]
B20_1	5,81265	15,2451	5,67754	14,8907	496,975	113,208
B20_2	6,47545	16,313	6,06537	15,2799	527,383	93,2254
B20_3	5,23567	14,4472	4,59512	12,6797	438,809	95,0391
$\bar{x}$	**5,84126**	**15,3351**	**5,44601**	**14,2834**	**487,722**	**100,491**
s	**0,62038**	**0,93615**	**0,76198**	**1,40244**	**45,0061**	**11,0507**
R	**1,23978**	**1,8658**	**1,47025**	**2,6002**	**88,574**	**19,9826**
B21_1	2,28246	6,51462	0,54836	1,56514	19,5995	116,185
B21_2	3,0152	8,39655	2,21411	6,16573	19,7169	141,965
B21_3	1,30494	3,58275	0,91235	2,50487	7,9923	99,3075
$\bar{x}$	**2,20087**	**6,16464**	**1,22494**	**3,41191**	**15,7696**	**119,153**
s	**0,85804**	**2,42591**	**0,87577**	**2,43072**	**6,73557**	**21,483**
R	**1,71026**	**4,8138**	**1,66575**	**4,60059**	**11,7246**	**42,6575**
B22_1	4,09921	9,5888	1,93596	4,52856	49,0101	103,447
B22_2	4,72546	10,5491	4,45048	9,93522	117,242	147,502
B22_3	4,38849	11,4224	3,9196	10,202	121,901	103,46
$\bar{x}$	**4,40439**	**10,5201**	**3,43535**	**8,22193**	**96,051**	**118,136**
s	**0,31343**	**0,91714**	**1,32536**	**3,20133**	**40,8052**	**25,4314**
R	**0,62625**	**1,8336**	**2,51452**	**5,67344**	**72,8909**	**44,055**
B23_1	4,71751	9,63898	1,98523	4,0563	47,958	142,764
B23_2	5,4725	10,4889	4,25498	8,15536	61,4495	155,222
B23_3	3,50952	7,83935	1,97729	4,41674	31,5991	65,3963
$\bar{x}$	**4,56651**	**9,32241**	**2,73917**	**5,5428**	**47,0022**	**121,127**
s	**0,99016**	**1,35285**	**1,31274**	**2,26971**	**14,9481**	**48,6649**
R	**1,96298**	**2,64955**	**2,27769**	**4,09906**	**29,8504**	**89,8257**

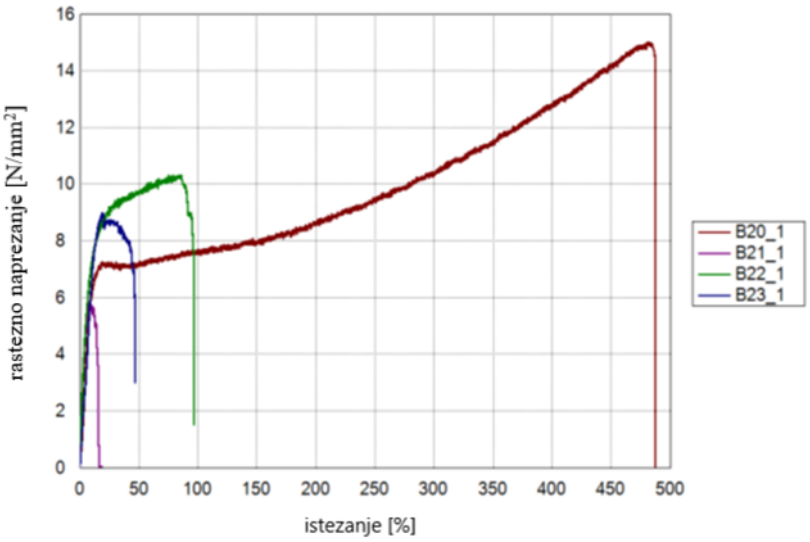
Vrijednosti rasteznih svojstava vrećice oznake B2 prikazane su u tablici 7.11. Grafički prikazi rastezne čvrstoće i prekidnog istezanja, prikazani na slikama 7.37 i 7.38, podudaraju se po obliku krivulje kojom bi se aproksimirali rezultati. Najveća vrijednost je u ispitivanju 0, a najmanja u ispitivanju 1. U ispitivanju 2 ponovno dolazi do porasta, a u ispitivanju 3 do padanja rasteznih svojstava. Na dijagramu rastezno naprezanje – istezanje na slici 7.39, vidljivo je koliko su vrijednosti ispitivanja 0 veće u odnosu na nadolazeća ispitivanja.



Slika 7.37. Usporedba vrijednosti rastezne čvrstoće vrećice oznake B2



Slika 7.38. Usporedba vrijednosti prekidnog istezanja vrećice oznake B2



Slika 7.39. Dijagram rastezno naprezanje - istezanje vrećice oznake B2

7.5.2 Ispitivanje rastezne žilavosti

Ispitivanja rastezne žilavosti provodila su se na temperaturi od 24 °C, na uređaju za ispitivanje žilavosti *Karl Frank*, maksimalne energije 4 J. Detalji uređaja i postupak računanja rastezne žilavosti prikazani su u tablici 7.12.

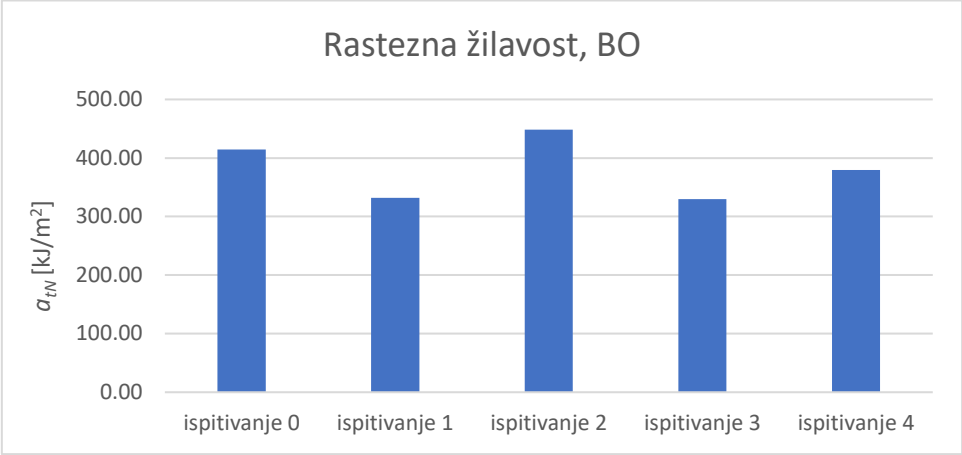
Tablica 7.12. Izračunavanje rastezne žilavosti s pomoću korekcijskih faktora

Korekcijske energije		
Zadane vrijednosti:		
Duljina bata, L_p [m]	0,2	
Gravitacija, g [m/s^2]	9,80655	
Kut između pozicije bata na maksimalnoj i minimalnoj visini (Charpy 160 stupnjeva), α, radijani	2,792526803	160
Maksimalna energija bata, E_{max} [J]	0,5	
Masa jarma, m_{cr} [kg]	0,0277	
Izvedene vrijednosti:		
Reducirana masa bata, m_p [kg] ; E_{max} /(g* L_p)(1-cosα))	0,131428892	
Masa, m [kg]; m_{cr} / m_p	0,210760355	

Tablica 7.13. Vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake BO

BO		x [mm]	$\bar{h}$ [mm]	E_S [kpcm]	E_S [J]	E_q [J]	E_C [J]	a_{tN} [kJ/m^2]
ispitivanje 0	1	6,22	0,04	2,45	0,245	0,1581	0,0869	349,28
	2	5,76	0,029	2,5	0,25	0,1581	0,0919	550,17
	3	6,28	0,031	2,25	0,225	0,1581	0,0669	343,64
	$\bar{x}$	6,09	0,033	2,40	0,24	0,158	0,082	**414,36**
	s	0,284	0,006	0,132	0,013	0,000	0,013	**117,645**
ispitivanje 1	1	6,68	0,026	2,4	0,24	0,1581	0,0819	471,56
	2	6,8	0,026	2,05	0,205	0,1581	0,0469	265,27
	3	6,24	0,026	2	0,2	0,1581	0,0419	258,26
	$\bar{x}$	6,57	0,026	2,15	0,22	0,158	0,057	**331,70**
	s	0,295	0,000	0,218	0,022	0,000	0,022	**121,174**
ispitivanje 2	1	5,94	0,028	2,4	0,24	0,1581	0,0819	492,42
	2	6,3	0,028	2,4	0,24	0,1581	0,0819	464,29
	3	6,16	0,03	2,3	0,23	0,1581	0,0719	389,07
	$\bar{x}$	6,13	0,029	2,37	0,24	0,158	0,079	**448,59**
	s	0,181	0,001	0,058	0,006	0,000	0,006	**53,435**
ispitivanje 3	1	5,96	0,029	2,05	0,205	0,1581	0,0469	271,35
	2	5,98	0,029	2,25	0,225	0,1581	0,0669	385,77
	3	6,44	0,029	2,2	0,22	0,1581	0,0619	331,44
	$\bar{x}$	6,13	0,029	2,17	0,22	0,16	0,06	**329,52**
	s	0,272	0,000	0,104	0,010	0,000	0,010	**57,234**
ispitivanje 4	1	5,8	0,03	2,15	0,215	0,1581	0,0569	327,01
	2	6,48	0,03	2,35	0,235	0,1581	0,0769	395,58
	3	5,78	0,032	2,35	0,235	0,1581	0,0769	415,77
	$\bar{x}$	6,02	0,031	2,28	0,23	0,16	0,07	**379,45**
	s	0,398	0,001	0,115	0,012	0,000	0,012	**46,522**

Tablica 7.13 prikazuje vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake BO te je dijagram rastezne žilavosti prikazan na slici 7.40 vrlo sličan dijagramima rastezne čvrstoće i prekidnog istezanja za istu vrećicu. Vrijednosti rastezne žilavosti nisu u konstantnom padu, nego osciliraju.

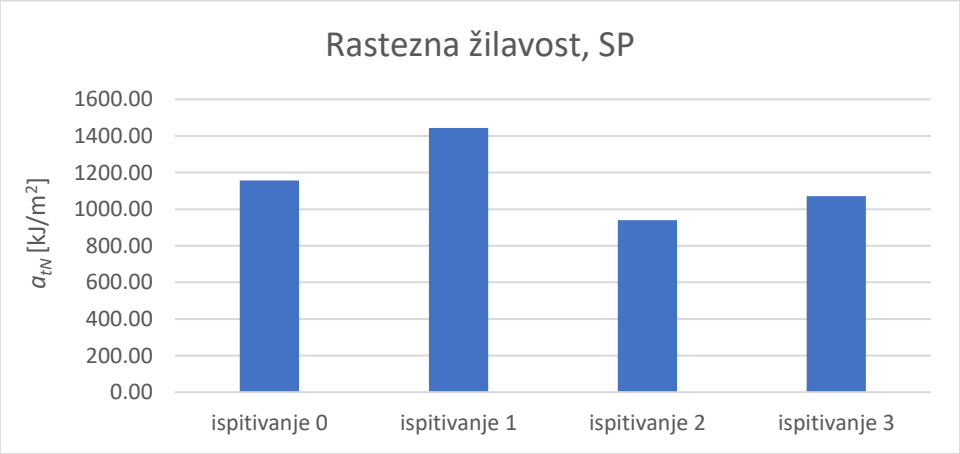


Slika 7.40. Usporedba vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake BO

Tablica 7.14. Vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake SP

SP		x [mm]	$\bar{h}$ [mm]	E_S [kpcm]	E_S [J]	E_q [J]	E_C [J]	a_{tN} [kJ/m^2]
ispitivanje 0	1	6,44	0,009	2,4	0,24	0,1581	0,0819	1413,04
	2	6,28	0,01	2,2	0,22	0,1581	0,0619	985,67
	3	5,98	0,012	2,35	0,235	0,1581	0,0769	1071,63
	$\bar{x}$	6,23	0,010	2,32	0,23	0,158	0,074	**1156,78**
	s	0,234	0,002	0,104	0,010	0,000	0,010	**226,054**
ispitivanje 1	1	5,62	0,01	2,4	0,24	0,1581	0,0819	1457,30
	2	6,34	0,01	2,5	0,25	0,1581	0,0919	1449,53
	3	5,86	0,011	2,5	0,25	0,1581	0,0919	1425,69
	$\bar{x}$	5,94	0,010	2,47	0,25	0,158	0,089	**1444,17**
	s	0,367	0,001	0,058	0,006	0,000	0,006	**16,469**
ispitivanje 2	1	6,38	0,013	2,4	0,24	0,1581	0,0819	987,46
	2	5,72	0,014	2,2	0,22	0,1581	0,0619	772,98
	3	6,16	0,011	2,3	0,23	0,1581	0,0719	1061,10
	$\bar{x}$	6,09	0,013	2,30	0,23	0,158	0,072	**940,51**
	s	0,336	0,002	0,100	0,010	0,000	0,010	**149,688**
ispitivanje 3	1	6,18	0,012	2,3	0,23	0,1581	0,0719	969,53
	2	5,74	0,011	2,3	0,23	0,1581	0,0719	1138,74
	3	5,92	0,011	2,3	0,23	0,1581	0,0719	1104,12
	$\bar{x}$	5,95	0,011	2,30	0,23	0,16	0,07	**1070,79**
	s	0,221	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	**89,393**

Tablica 7.14. prikazuje vrijednosti rastezne žilavosti folije oznake BO, čiji je grafički prikaz vrijednosti prikazan na slici 7.41. Vrijednosti rastezne žilavosti imaju isti uzorak kao i vrijednosti rastezne čvrstoće i prekidnog istezanje, tj. konstantna je izmjena pada i porasta svojstava.

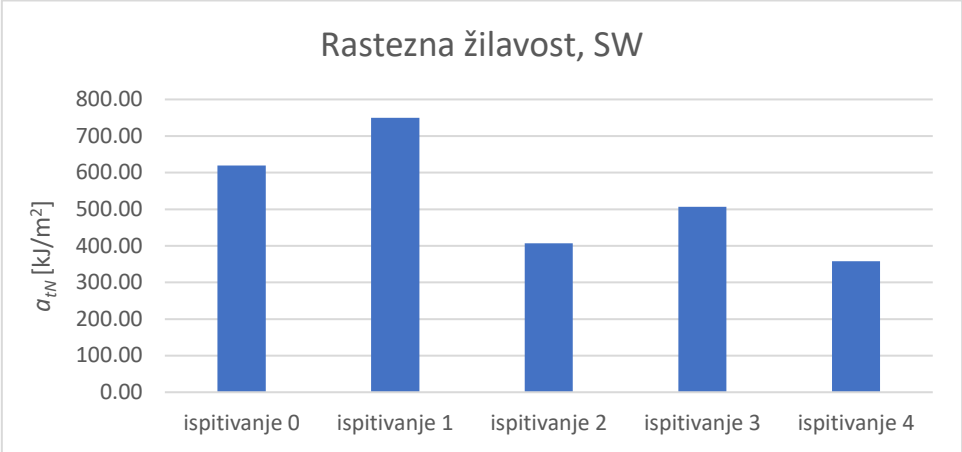


Slika 7.41. Usporedba vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake SP

Tablica 7.15. Vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake SW

SW		x [mm]	$\bar{h}$ [mm]	E_S [kpcm]	E_S [J]	E_q [J]	E_C [J]	a_{tN} **[kJ/m²]**
ispitivanje 0	1	6	0,021	2,25	0,225	0,1581	0,0669	530,95
	2	6,1	0,02	2,35	0,235	0,1581	0,0769	630,33
	3	5,74	0,018	2,3	0,23	0,1581	0,0719	695,90
	$\bar{x}$	5,95	0,020	2,30	0,23	0,158	0,072	**619,06**
	s	0,186	0,002	0,050	0,005	0,000	0,005	**83,047**
ispitivanje 1	1	5,86	0,022	2,6	0,26	0,1581	0,1019	790,41
	2	5,34	0,022	2,5	0,25	0,1581	0,0919	782,26
	3	5,76	0,021	2,4	0,24	0,1581	0,0819	677,08
	$\bar{x}$	5,65	0,022	2,50	0,25	0,158	0,092	**749,92**
	s	0,276	0,001	0,100	0,010	0,000	0,010	**63,209**
ispitivanje 2	1	6,28	0,022	2	0,2	0,1581	0,0419	303,27
	2	6,7	0,022	2,25	0,225	0,1581	0,0669	453,87
	3	6,08	0,022	2,2	0,22	0,1581	0,0619	462,77
	$\bar{x}$	6,35	0,022	2,15	0,22	0,158	0,057	**406,64**
	s	0,316	0,000	0,132	0,013	0,000	0,013	**89,627**
ispitivanje 3	1	6,18	0,024	2,4	0,24	0,1581	0,0819	552,18
	2	6,38	0,024	2,35	0,235	0,1581	0,0769	502,22
	3	6,26	0,023	2,25	0,225	0,1581	0,0669	464,65
	$\bar{x}$	6,27	0,024	2,33	0,23	0,158	0,075	**506,35**
	s	0,101	0,001	0,076	0,008	0,000	0,008	**43,914**
ispitivanje 4	1	6,68	0,028	2,1	0,21	0,1581	0,0519	277,48
	2	5,66	0,025	2,25	0,225	0,1581	0,0669	472,79
	3	6,28	0,028	2,15	0,215	0,1581	0,0569	323,59
	$\bar{x}$	6,21	0,027	2,17	0,22	0,158	0,059	**357,95**
	s	0,514	0,002	0,076	0,008	0,000	0,008	**102,089**

Tablica 7.15 prikazuje vrijednosti rastezne žilavosti za vrećicu oznake SW, a slika 7.42 dijagramski prikaz tih vrijednosti. Kod vrećice SW, sve vrijednosti za koje je rađen dijagram se drugačije kreću i ne može se uspostaviti niti predvidjeti uzorak ponašanja. Vrijednosti rastezne žilavosti konstantno se izmjenjuju u padu i rastu.

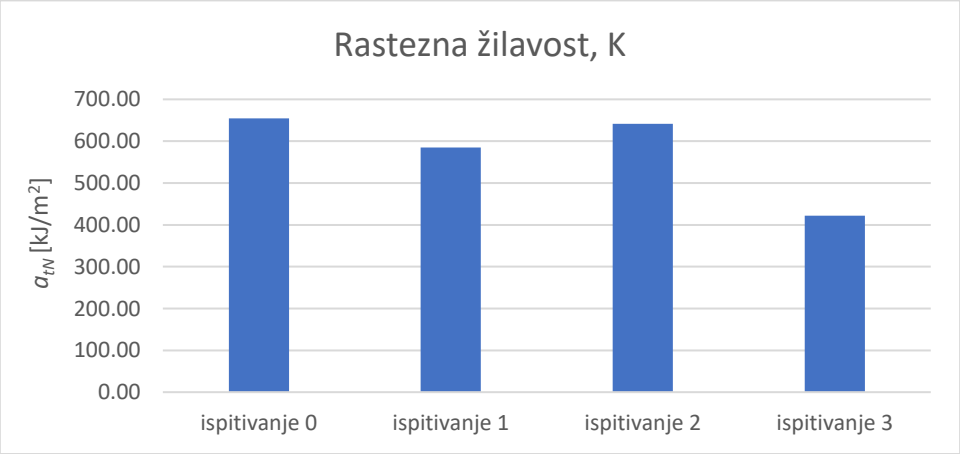


Slika 7.42. Usporedba vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake SW

Tablica 7.16. Vrijednosti rastezne žilavosti folije oznake K

K		x [mm]	$\bar{h}$ [mm]	E_S [kpcm]	E_S [J]	E_q [J]	E_C [J]	a_{tN} [kJ/m²]
ispitivanje 0	1	6,22	0,018	2,3	0,23	0,1581	0,0719	642,19
	2	5,68	0,018	2,25	0,225	0,1581	0,0669	654,34
	3	5,98	0,018	2,3	0,23	0,1581	0,0719	667,97
	$\bar{x}$	5,96	0,018	2,28	0,23	0,158	0,070	**654,83**
	s	0,271	0,000	0,029	0,003	0,000	0,003	**12,894**
ispitivanje 1	1	6,64	0,018	2,3	0,23	0,1581	0,0719	601,57
	2	6,28	0,018	2,3	0,23	0,1581	0,0719	636,06
	3	6,48	0,017	2,15	0,215	0,1581	0,0569	516,52
	$\bar{x}$	6,47	0,018	2,25	0,23	0,158	0,067	**584,72**
	s	0,180	0,001	0,087	0,009	0,000	0,009	**61,525**
ispitivanje 2	1	5,66	0,018	2,3	0,23	0,1581	0,0719	705,73
	2	5,28	0,019	2,3	0,23	0,1581	0,0719	716,71
	3	6,22	0,023	2,3	0,23	0,1581	0,0719	502,59
	$\bar{x}$	5,72	0,020	2,30	0,23	0,158	0,072	**641,68**
	s	0,473	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	**120,579**
ispitivanje 3	1	6,28	0,019	2	0,2	0,1581	0,0419	351,16
	2	5,48	0,018	1,85	0,185	0,1581	0,0269	272,71
	3	5,9	0,019	2,3	0,23	0,1581	0,0719	641,39
	$\bar{x}$	5,89	0,019	2,05	0,21	0,158	0,047	**421,75**
	s	0,400	0,001	0,229	0,023	0,000	0,023	**194,215**

Vrijednosti rastezne žilavosti folije oznake K, tablično prikazane u tablici 7.16, a grafički na slici 7.43 također ne pokazuju neki ustaljeni obrazac ponašanja kod svih mjerenih svojstava. Vrijednosti rastezne žilavosti u ispitivanju 0, 1 i 2 su relativno blizu i na visokoj vrijednosti, a do većeg pada dolazi tek u ispitivanju 3.

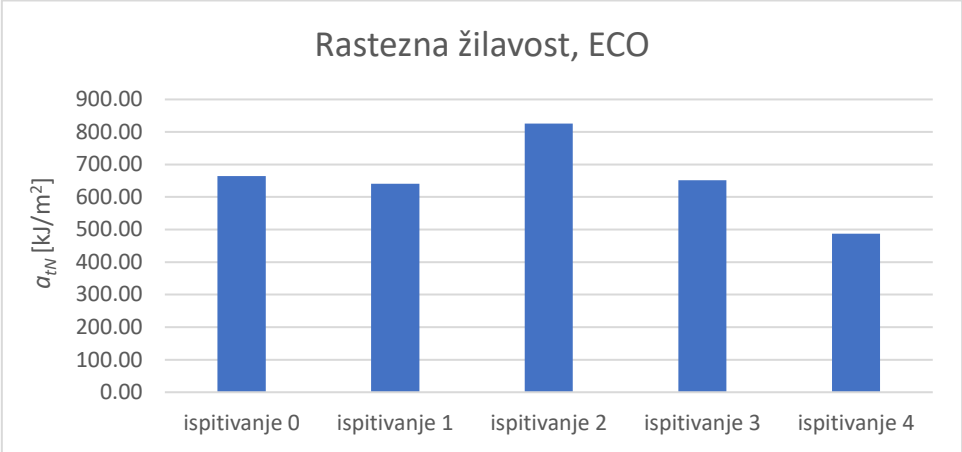


Slika 7.43. Usporedba vrijednosti rastezne žilavosti folije oznake K

Tablica 7.17. Vrijednosti rastezne žilavosti folije oznake ECO

ECO		x [mm]	$\bar{h}$ [mm]	E_S [kpcm]	E_S [J]	E_q [J]	E_C [J]	a_{tN} [kJ/m^2]
ispitivanje 0	1	5,9	0,018	2,4	0,24	0,1581	0,0819	771,19
	2	5,98	0,019	2,15	0,215	0,1581	0,0569	500,79
	3	6,32	0,018	2,4	0,24	0,1581	0,0819	719,94
	$\bar{x}$	6,07	0,018	2,32	0,23	0,158	0,074	**663,97**
	s	0,223	0,001	0,144	0,014	0,000	0,014	**143,622**
ispitivanje 1	1	5,76	0,017	1,9	0,19	0,1581	0,0319	325,78
	2	6,2	0,018	2,45	0,245	0,1581	0,0869	778,67
	3	5,9	0,018	2,45	0,245	0,1581	0,0869	818,27
	$\bar{x}$	5,95	0,018	2,27	0,23	0,158	0,069	**640,91**
	s	0,225	0,001	0,318	0,032	0,000	0,032	**273,627**
ispitivanje 2	1	5,88	0,017	2,4	0,24	0,1581	0,0819	819,33
	2	5,9	0,017	2,4	0,24	0,1581	0,0819	816,55
	3	5,72	0,017	2,4	0,24	0,1581	0,0819	842,25
	$\bar{x}$	5,83	0,017	2,40	0,24	0,158	0,082	**826,04**
	s	0,099	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	**14,102**
ispitivanje 3	1	6,38	0,018	2,35	0,235	0,1581	0,0769	669,63
	2	5,84	0,019	2,35	0,235	0,1581	0,0769	693,04
	3	6,28	0,018	2,25	0,225	0,1581	0,0669	591,83
	$\bar{x}$	6,17	0,018	2,32	0,23	0,158	0,074	**651,50**
	s	0,287	0,001	0,058	0,006	0,000	0,006	**52,988**
ispitivanje 4	1	6,02	0,019	2,25	0,225	0,1581	0,0669	584,89
	2	6	0,019	2,05	0,205	0,1581	0,0469	411,40
	3	5,88	0,019	2,1	0,21	0,1581	0,0519	464,55
	$\bar{x}$	5,97	0,019	2,13	0,21	0,158	0,055	**486,95**
	s	0,076	0,000	0,104	0,010	0,000	0,010	**88,886**

Folija oznake ECO, čije su vrijednosti rastezne žilavosti tablično prikazane u tablici 7.17, a grafički na slici 7.44, tijekom ispitivanja 2 pokazuje najviše vrijednosti rastezne žilavosti. Prije ispitivanja 2 su vrijednosti u padu i nakon ispitivanja 2, također.

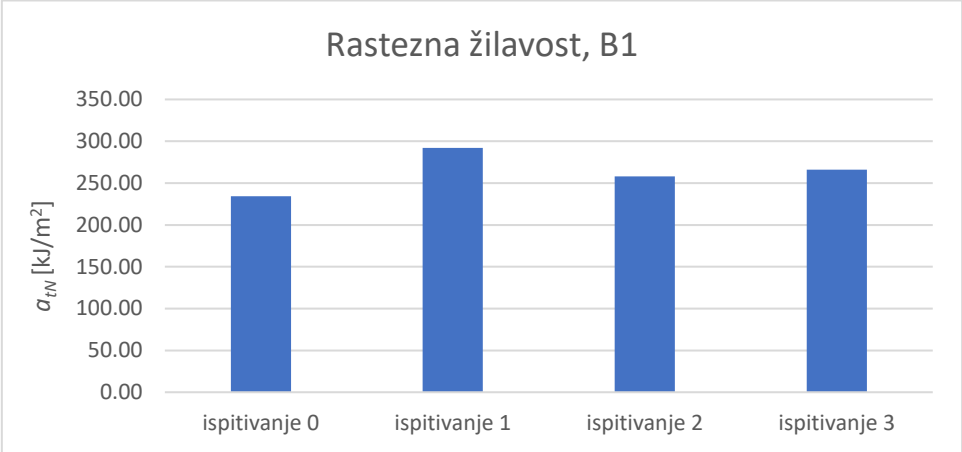


Slika 7.44. Usporedba vrijednosti rastezne žilavosti folije oznake ECO

Tablica 7.18. Vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake B1

B1		x [mm]	$\bar{h}$ [mm]	E_S [kpcm]	E_S [J]	E_q [J]	E_C [J]	a_{tN} [kJ/m^2]
ispitivanje 0	1	6,3	0,04	2,15	0,215	0,1581	0,0569	225,79
	2	6,28	0,042	2,2	0,22	0,1581	0,0619	234,68
	3	5,88	0,04	2,15	0,215	0,1581	0,0569	241,92
	$\bar{x}$	6,15	0,041	2,17	0,22	0,158	0,059	**234,13**
	s	0,237	0,001	0,029	0,003	0,000	0,003	**8,078**
ispitivanje 1	1	6,24	0,042	2,2	0,22	0,1581	0,0619	236,19
	2	5,8	0,042	2,35	0,235	0,1581	0,0769	315,68
	3	6,16	0,041	2,4	0,24	0,1581	0,0819	324,28
	$\bar{x}$	6,07	0,042	2,32	0,23	0,158	0,074	**292,05**
	s	0,234	0,001	0,104	0,010	0,000	0,010	**48,569**
ispitivanje 2	1	6,48	0,041	2,4	0,24	0,1581	0,0819	308,27
	2	6,38	0,042	2,15	0,215	0,1581	0,0569	212,35
	3	6,3	0,042	2,25	0,225	0,1581	0,0669	252,83
	$\bar{x}$	6,39	0,042	2,27	0,23	0,158	0,069	**257,82**
	s	0,090	0,001	0,126	0,013	0,000	0,013	**48,154**
ispitivanje 3	1	6,28	0,043	2,35	0,235	0,1581	0,0769	284,77
	2	6,26	0,043	2,4	0,24	0,1581	0,0819	304,26
	3	6,58	0,045	2,2	0,22	0,1581	0,0619	209,05
	$\bar{x}$	6,37	0,044	2,32	0,23	0,158	0,074	**266,03**
	s	0,179	0,001	0,104	0,010	0,000	0,010	**50,295**

Vrijednosti rastezne žilavosti za vrećicu oznake B1 prikazane su u tablici 7.18, a grafički na slici 7.45. Za vrećicu B1 sva ispitivanja rastezne žilavosti su po vrijednostima vrlo blizu, a neobičan je skoro konstantan porast vrijednosti. Po ovim vrijednostima bilo je neočekivano da će se ta vrećica razgraditi do 4. ispitivanja, pogotovo jer su vrijednosti ispitivanja 3 više od onih iz ispitivanja 0.

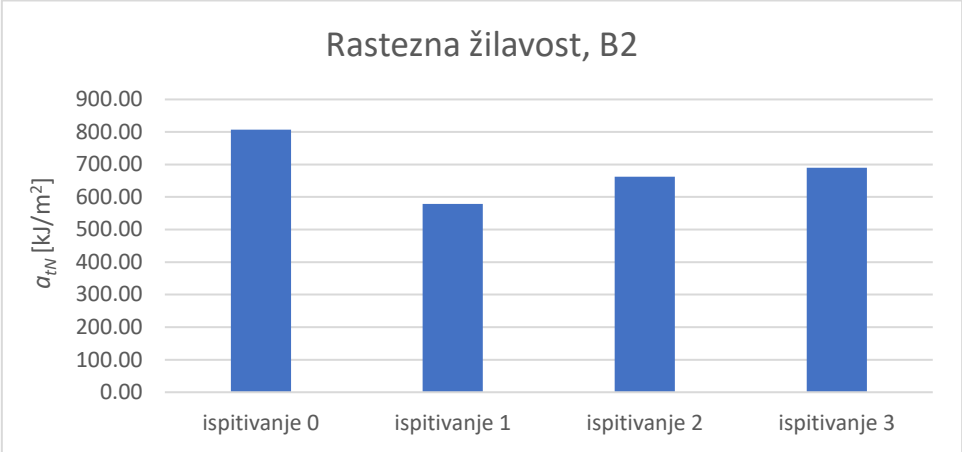


Slika 7.45. Usporedba vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake B1

Tablica 7.19. Vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake B2

B2		x [mm]	$\bar{h}$ [mm]	E_S [kpcm]	E_S [J]	E_q [J]	E_C [J]	a_{tN} [kJ/m^2]
ispitivanje 0	1	5,72	0,017	2,5	0,25	0,1581	0,0919	945,08
	2	5,94	0,016	2,3	0,23	0,1581	0,0719	756,52
	3	5,88	0,017	2,3	0,23	0,1581	0,0719	719,29
	$\bar{x}$	5,85	0,017	2,37	0,24	0,158	0,079	**806,97**
	s	0,114	0,001	0,115	0,012	0,000	0,012	**121,055**
ispitivanje 1	1	6,48	0,02	2,3	0,23	0,1581	0,0719	554,78
	2	6,6	0,02	2,3	0,23	0,1581	0,0719	544,70
	3	5,94	0,019	2,3	0,23	0,1581	0,0719	637,07
	$\bar{x}$	6,34	0,020	2,30	0,23	0,158	0,072	**578,85**
	s	0,352	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	**50,673**
ispitivanje 2	1	6,08	0,019	2,35	0,235	0,1581	0,0769	665,69
	2	6,2	0,019	2,4	0,24	0,1581	0,0819	695,25
	3	5,8	0,017	2,2	0,22	0,1581	0,0619	627,79
	$\bar{x}$	6,03	0,018	2,32	0,23	0,158	0,074	**662,91**
	s	0,205	0,001	0,104	0,010	0,000	0,010	**33,814**
ispitivanje 3	1	5,88	0,018	2,35	0,235	0,1581	0,0769	726,57
	2	6,14	0,018	2,3	0,23	0,1581	0,0719	650,56
	3	5,76	0,018	2,3	0,23	0,1581	0,0719	693,48
	$\bar{x}$	5,93	0,018	2,32	0,23	0,158	0,074	**690,20**
	s	0,194	0,000	0,029	0,003	0,000	0,003	**38,110**

Tablični prikaz vrijednosti rastezne žilavosti za vrećicu oznake B2 prikazan je u tablici 7.19, a grafički na slici 7.46. Kod vrećice oznake B2, vrijednost ispitivanja 0 je najviša te u ispitivanju 1 dolazi do pada vrijednosti rastezne žilavosti, no onda počinje rast. Za ovu vrećicu je također neobična biorazgradnja nakon ispitivanja 3, jer su prije toga vrijednosti rastezne žilavosti bile u porastu.



Slika 7.46. Usporedba vrijednosti rastezne žilavosti vrećice oznake B2

7.6 Rasprava rezultata

Folijama označenima s BO, SP, SW, K i B2 zajedničko je to da su zadnja mjerenja, negdje ispitivanje 3, a negdje ispitivanje 4, najnižih vrijednosti od svih, što je i očekivano. Ono što nije bilo očekivano je porast vrijednosti prekidnog istezanja i rastezne čvrstoće nakon ispitivanja 0. Kod folija ECO i B1 zadnji rezultati prekidnog istezanja i rastezne čvrstoće nisu najniži od svih, kod folije B1 je čak ispitivanje 3 dalo najveće vrijednosti. Neobično je to što se folija B1 biorazgradila i nije ispitana u ispitivanju 4, a samo 30 dana prije su vrijednosti navedenih vrijednosti bile najviše.

Rezultati rastezne žilavosti su potkrijepili rezultate rasteznih svojstava. Kod svih folija vrijednosti rastezne žilavosti nisu u konstantnom padu, nego osciliraju. Kod vrećica i folija označenih sa SW, K i ECO je zadnja vrijednost žilavosti ujedno i najniža, dok kod ostalih to nije slučaj. Kod nekih folija je vrijednost ispitivanja 2 najviša, dok je kod drugih najniža te nije moguće utvrditi neki obrazac ponašanja koji bi se odnosio na sve folije i vrećice.

Folije označene oznakama SP i B2 jedine imaju oznaku da su prikladne za kućno kompostiranje, što se pokazalo točnim, jer ni jedna ni druga vrećica zbog prevelike biorazgradnje nisu mogle biti ispitane u ispitivanju 4. Folije koje su se razgradile previše za ispitivanje 4, a nisu pogodne za kućno kompostiranje su folije SW, K i B2. Razlog neočekivanim rezultatima ispitivanja vjerojatno su vremenske prilike. Folije su postavljene u komposter u veljači, kada su vanjske temperature niske i očekivano je da se biorazgradnja u tom periodu odvija sporije, nego npr. u svibnju, kada je najviše promjena i bilo vidljivo.

Razlog porasta vrijednosti rasteznih svojstava i žilavosti mogao bi biti taj što su folije i vrećice bile u konstantnom doticaju s pokošenom travom, kuhinjskim biootpadom i slično što je uzrokovalo lijepljenje samih folija za biotvari. Uslijed izlaganja bioplastičnog materijala UV svjetlosti, također dolazi do povećanja vrijednosti rastezne žilavosti radi ljepljivosti folija uslijed zračenja same UV svjetlosti [52]. Moguće tumačenje dobivenih rezultata je dakle lijepljenje, ali ne uslijed UV zračenja, nego uslijed djelovanja biotvari na same folije i vrećice.

Uočeno je kako debljina folije ne diktira nužno i brzinu razgradnje folije. Vrećica oznake B2, debljine preko 40 μm se razgradila u puno većoj mjeri od folije oznake ECO, čija je debljina ispod 20 μm.

U ovom radu provedena su ispitivanja mehaničkih svojstava, no zbog porasta vrijednosti žilavosti i rasteznih svojstava u prvom, odnosno drugom i trećem ispitivanju kod većine folija i vrećica, potrebno je provesti detaljniju analizu i druga ispitivanja, npr. fizikalnih svojstava.

8 ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena su ispitivanja mehaničkih svojstava na sedam različitih komercijalno dostupnih biorazgradljivih folija i vrećica u vrtnom kompostištu od veljače pa do svibnja. Ispitivanja rasteznih svojstava, kao što su rastezna čvrstoća i prekidno istezanje, pokazala su neočekivane rezultate u smislu porasta tijekom prvog, drugog i trećeg ispitivanja kod nekih vrećica i folija. Ispitivanja rastezne žilavosti također su pokazala rezultate koji nisu bili predviđani, a to su porasti i padovi tijekom mjeseci po nepredviđenom uzorku. Svaka vrećica i folija pokazuje nekakvo specifično ponašanje u pogledu mehaničkih svojstava te nije moguće generalizirati i donijeti konačne zaključke. Također, ispitivane vrećice i folije su različitih debljina i namjene po vrsti kompostiranja pa ih je teško uspoređivati. Jedan od utjecajnijih faktora, visoka temperatura, je izostajao većinu vremena te bi rezultati zasigurno bili drugačiji da se isti eksperiment provodio u ljetnim mjesecima.

Vrećice i folije koje na sebi imaju oznaku kompostabilnosti u kućnom kompostištu se zaista i jesu većinski razgradile, ali ne u potpunosti. Čak i neke vrećice koje nose oznaku da kompostabilnosti samo u industrijskim kompostanama su se većinski fragmentirale. Također, uočeno je kako biorazgradnja folija u slučaju kada su debljine svih vrećica u rasponu veličina par desetaka mikrometara nije diktirana njenom debljinom. U svrhu jasnijeg uvida u ponašanje različitih vrećica i folija tijekom razdoblja u komposteru, potrebno je provesti daljnju analizu i ispitivanja.

9 LITERATURA

[1] https://www.plasticseurope.org/, Pristupljeno 3.3.2020.

[2] https://www.enciklopedija.hr/, Pristupljeno 3.3.2020.

[3] https://www.seminarski-diplomski.co.rs/, Pristupljeno 3.3.2020.

[4] Kratofil Krehulja, Lj.: Postupci polimerizacije, repozitorij FKIT-a, Zagreb

[5] Andrišić, B.: Polimerni materijali – materijali za nastavu, Split, 2010.

[6] Holden, G., Applied Plastics Engineering Handbook, Plastic Design Library, 2011.

[7] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2013.

[8] Mahenić, L.: Metode određivanja Youngovog modula elastičnosti metalnih materijala, Završni rad, FSB, Zagreb, 2018.

[9] Lovoriša, I.: Optimiranje procesa pripreme punjenih polimernih sustava, Diplomski rad, FKIT, 2016

[10] Kladarić, I.: Materijali I – Polimeri, podloge za predavanje, SFSB, Slavonski Brod

[11] Perković, M.: Diplomski rad, FSB, 2013.

[12] https://ceres.co.nz/blog/degradable-versus-biodegradable-versus-compostable-what-it-all-means/, Pristupljeno 15.03.2020.

[13] Leja, K., Lewandowicz, G.: Polymer biodegradation and biodegradable polymers – a review, Polish Journal of Environmental Studies, 19 (2), 255 – 266, 2010.

[14] Dobrović, S.: Gospodarenje otpadom – podloge za predavanje, FSB, Zagreb, 2019.

[15] Rujnić Havstad, M.: Istine i zablude o bioplastici, FSB, Zagreb, 2007.

[16] Azim, K., Soudi, B., Boukhari, C., Perissol, S., Roussos, S., Thami Alami, I.: Composting parameters and compost quality: a literature review, Organic agriculture, 8 (2), str. 141 – 158, 2017.

[17] Ghanbarzadeh B., Almasi H.; Biodegradable Polymersu "Biodegradation - Life of Science"; ed. Chamy R., Rosenkranz F.; lipanj 2013.

[18] Lu, D. R., Xiao, C. M., Xu, S. J.: Starch-based completely biodegradable polymer materials, College of Material Science and Engineering of Huaqiao University, Quanzhou, 362021, P. R. China, 2009.

[19] You, C., Zhang, Y. H. P.: Ex vivo enzymatic conversion of non – food cellulose biomass to starch, Quality living throgh chemurgy and green chemistry, str. 129 – 142, 2016.

[20] Restović, I.: Biološki važni spojevi, podloge za predavanja, FFST, Split, 2011.

[21] Bledzki A. K., Gassan J.: Composites reinforced with cellulose based fibres, Progress in polymer sceince, str. 221 – 274; 1999.

[22] Jiang L., Zhang J.: Biodegradable and biobased polymers, Applied plastics engineering handbook, str. 127-143; 2017.

[23] Ojumu, T. V., Yu, J., Solomon B. O.: Production of Polyhydroxyalkanoates, a bacterial biodegradable polymer, African Journal of Biotechnology Vol. 3, 2004.

[24] Guarino, V., Gentile, G., Sorrentino, L., Ambrosio, L.: Polycaprolactone: Synthesis, Properties, and Applications. Encyclopedia of Polymer Science and Technology, 1–36., 2017.

[25] https://en.wikipedia.org/wiki/Polybutylene_succinate, Pristupljeno 05.04.2020.

[26] Verbeek, C. J. R., Uitto, J. M.: Bioplastics - Encyclopedia of Polymer Science and Technology, 1–37, 2017.

[27] Čatić, I.: Proizvodnja polimernih tvorevina, Biblioteka polimerstvo – serija zelena, Zagreb, 2006.

[28] Rauwendaal, C.: Polymer Extrusion 5E, Hanser Publishers, Munich, 2014.

[29] Bajsić Govorčin, E.: Prerada polimera, Podloge za predavanja, FKIT, Zagreb, 2017.

[30] Ivanišević, M.: Trendovi razvoja industrije polimera u Republici Hrvatskoj, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2011.

[31] Car, T.: Cirkularnost i deformacija rasterskih elemenata u fleksotisku, Diplomski rad, Grafički fakultet, Zagreb, 2013.

[32] https://greentumble.com/how-are-plastic-bags-made/, Pristupljeno 12.05.2020.

[33] Gironi, F., Piemonte, V.: Bioplastics and Petroleum-based Plastics: Strengths and Weaknesses, Department of Chemical Engineering, Materials & Environment, University of Rome, Rome, Italy, 2011.

[34] La Rosa, A. D.: Life cycle assessment of biopolymers, University of Catania, Italy, 2016.

[35] Rujnić Havstad, M.: Hoće li biorazgradljive vrećice spasiti okoliš?, FSB, Zagreb, 2011.

[36] https://lider.media/lider-plus/ukratko/spar-hrvatska-prodao-vise-od-milijun-biorazgradljivih-vrecica-129952, Pristupljeno 20.05.2020.

[37] Rujnić Havstad, M.: Plastofobija je zahvatila i hrvatske trgovačke lance, Mišljenja i komentari, Kem. Ind. 69, str. 195 – 199, 2020.

[38] Rujnić Havstad, M.: Polietilenska vrećica još je i najzelenija vrećica, Polimeri, 2011.

[39] https://www.cistoca.hr/usluge/odvojeno-skupljanje-otpada/biootpad/1350, Pristupljeno 21.05.2020.

[40] https://www.ambientweather.com/heind.html, Pristupljeno 24.05.2020.

[41] https://hr.wikipedia.org/wiki/Indeks_topline, Pristupljeno 24.05.2020.

[42] https://www.accuweather.com/hr/hr/zagreb/117910/may-weather/117910?year=2020, Pristupljeno 02.06.2020.

[43] https://www.weatheronline.co.uk/weather/maps/city, Pristupljeno 02.06.2020.

[44] https://www.weltplast.com/ecowelt-biorazgradljivi-proizvodi.html, Pristupljeno 29.05.2020.

[45] https://www.tuv-at.be/green-marks/certified-products/, Pristupljeno 29.05.2020.

[46] https://www.swirl.de/en/Eco-film-organic-waste-bags-with-handles-291.html, Pristupljeno 29.05.2020.

[47] *Ecovio F23B1*, Biorazgradljiva komponenta za proizvodnju kompostabilnog filma, *BASF*, web katalog, Pristupljeno: 29.05.2020.

[48] https://en.polimerexpert.ru/katalog/my-proizvodim/vyduvnye_ekstruzionnye_linii/high-speed-blown-film-line-working-with-biodegradable-raw-material-aleko-bio/?sphrase_id=108, Pristupljeno: 30.05.2020.

[49] http://struna.ihjj.hr/naziv/rastezna-cvrstoca/7251/, Pristupljeno: 05.06.2020.

[50] Plastika – određivanje rasteznih svojstava – 3. dio – Ispitni uvjeti za filmove i folije (HRN EN ISO 527 – 3)

[51] Plastika – Određivanje rastezne žilavosti (ISO 8256:2004, EN ISO 8256: 2004)

[52] Pavlica, N.: UV degradacija biorazgradljivih polimernih folija, Diplomski rad, Zagreb, 2016.

10 PRILOZI

I. CD-R disk

II. Rezultati mjerenja

Tablica 10.1. Dimenzije ispitaka za ispitivanje rasteznih svojstava vrećice oznake BO

BO		**ISPITAK 1**			**ISPITAK 2**			**ISPITAK 3**			***Prosječne vrijednosti ispitaka***		
		h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	$\bar{h}$ [mm]	$\bar{b}$ [mm]	$\bar{A}$ [mm^2]
ispitivanje 0	1	0,027	24,48	0,66	0,027	23,85	0,64	0,027	25,98	0,70			
	2	0,028	25,02	0,70	0,028	25,02	0,70	0,028	25,66	0,72			
	3	0,029	25,36	0,74	0,028	24,38	0,68	0,028	25,82	0,72			
	$\bar{x}$	**0,028**	**24,95**	**0,70**	**0,028**	**24,42**	**0,68**	**0,028**	**25,82**	**0,71**	**0,028**	**25,063**	**0,696**
	s	**0,001**	**0,444**	**0,037**	**0,001**	**0,586**	**0,029**	**0,001**	**0,160**	**0,011**	**0,000**	**0,217**	**0,013**
ispitivanje 1	1	0,027	24,92	0,673	0,027	26,92	0,73	0,027	29,8	0,80			
	2	0,026	27,1	0,705	0,025	26,48	0,66	0,026	27,86	0,72			
	3	0,027	23,48	0,634	0,026	25,8	0,67	0,028	25,7	0,72			
	$\bar{x}$	**0,027**	**25,17**	**0,67**	**0,026**	**26,40**	**0,69**	**0,027**	**27,79**	**0,75**	**0,027**	**26,451**	**0,702**
	s	**0,001**	**1,823**	**0,035**	**0,001**	**0,564**	**0,035**	**0,001**	**2,051**	**0,048**	**0,000**	**0,801**	**0,007**
ispitivanje 2	1	0,027	26,22	0,71	0,031	25,32	0,78	0,028	25,38	0,71			
	2	0,03	26,28	0,79	0,033	25,2	0,83	0,029	25	0,73			
	3	0,028	24,42	0,68	0,031	26,04	0,81	0,033	26,04	0,86			
	$\bar{x}$	**0,028**	**25,64**	**0,73**	**0,032**	**25,52**	**0,81**	**0,030**	**25,47**	**0,76**	**0,030**	**25,544**	**0,767**
	s	**0,002**	**1,057**	**0,055**	**0,001**	**0,454**	**0,023**	**0,003**	**0,526**	**0,082**	**0,001**	**0,329**	**0,029**
ispitivanje 3	1	0,026	28,96	0,75	0,026	26,62	0,69	0,031	24,12	0,75			
	2	0,025	27,89	0,70	0,026	24,42	0,63	0,025	23,3	0,58			
	3	0,027	27,22	0,73	0,029	26,56	0,77	0,03	23,32	0,70			
	$\bar{x}$	**0,026**	**28,02**	**0,73**	**0,027**	**25,87**	**0,70**	**0,029**	**23,58**	**0,68**	**0,027**	**25,823**	**0,701**
	s	**0,001**	**0,878**	**0,028**	**0,002**	**1,253**	**0,068**	**0,003**	**0,468**	**0,085**	**0,001**	**0,393**	**0,029**
ispitivanje 4	1	0,029	21,18	0,61	0,027	22,96	0,62	0,028	20,86	0,58			
	2	0,029	21,1	0,61	0,026	22,98	0,60	0,028	20,2	0,57			
	3	0,028	20,88	0,58	0,029	23,64	0,69	0,026	23,52	0,61			
	$\bar{x}$	**0,029**	**21,05**	**0,60**	**0,027**	**23,19**	**0,63**	**0,027**	**21,53**	**0,59**	**0,028**	**21,924**	**0,608**
	s	**0,001**	**0,155**	**0,016**	**0,002**	**0,387**	**0,046**	**0,001**	**1,758**	**0,023**	**0,000**	**0,866**	**0,015**

Tablica 10.2. Dimenzije ispitaka za ispitivanje rasteznih svojstava vrećice oznake SP

SP		**ISPITAK 1**			**ISPITAK 2**			**ISPITAK 3**			***Prosječne vrijednosti ispitaka***		
		h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	$\bar{h}$ [mm]	$\bar{b}$ [mm]	$\bar{A}$ [mm^2]
ispitivanje 0	1	0,01	26,3	0,26	0,012	25,5	0,31	0,011	23,9	0,26			
	2	0,01	24,42	0,24	0,02	24,72	0,49	0,01	23,94	0,24			
	3	0,01	26	0,26	0,011	26,2	0,29	0,011	24,6	0,27			
	$\bar{x}$	**0,010**	**25,57**	**0,26**	**0,014**	**25,47**	**0,36**	**0,011**	**24,15**	**0,26**	**0,012**	**25,064**	**0,292**
	s	**0,000**	**1,010**	**0,010**	**0,005**	**0,740**	**0,114**	**0,001**	**0,393**	**0,016**	**0,003**	**0,309**	**0,058**
ispitivanje 1	1	0,012	30,68	0,368	0,011	25,48	0,28	0,01	24,92	0,25			
	2	0,011	32,08	0,353	0,011	29,12	0,32	0,01	24,42	0,24			
	3	0,012	32,36	0,388	0,011	29,72	0,33	0,011	26,1	0,29			
	$\bar{x}$	**0,012**	**31,71**	**0,37**	**0,011**	**28,11**	**0,31**	**0,010**	**25,15**	**0,26**	**0,011**	**28,320**	**0,313**
	s	**0,001**	**0,900**	**0,018**	**0,000**	**2,294**	**0,025**	**0,001**	**0,863**	**0,023**	**0,000**	**0,816**	**0,004**
ispitivanje 2	1	0,011	26,38	0,29	0,011	24,62	0,27	0,011	21,78	0,24			
	2	0,013	26,12	0,34	0,013	22,38	0,29	0,012	20,7	0,25			
	3	0,012	24	0,29	0,012	21,6	0,26	0,012	23,56	0,28			
	$\bar{x}$	**0,012**	**25,50**	**0,31**	**0,012**	**22,87**	**0,27**	**0,012**	**22,01**	**0,26**	**0,012**	**23,460**	**0,279**
	s	**0,001**	**1,306**	**0,029**	**0,001**	**1,568**	**0,016**	**0,001**	**1,444**	**0,023**	**0,000**	**0,131**	**0,007**
ispitivanje 3	1	0,009	21,9	0,20	0,01	26,48	0,26	0,011	26,8	0,29			
	2	0,009	21,54	0,19	0,012	24,42	0,29	0,01	27,18	0,27			
	3	0,011	26,44	0,29	0,011	26,52	0,29	0,009	26,98	0,24			
	$\bar{x}$	**0,010**	**23,29**	**0,23**	**0,011**	**25,81**	**0,28**	**0,010**	**26,99**	**0,27**	**0,010**	**25,362**	**0,260**
	s	**0,001**	**2,731**	**0,055**	**0,001**	**1,201**	**0,016**	**0,001**	**0,190**	**0,026**	**0,000**	**1,279**	**0,020**

Tablica 10.3. Dimenzije ispitaka za ispitivanje rasteznih svojstava vrećice oznake SW

SW		**ISPITAK 1**			**ISPITAK 2**			**ISPITAK 3**			***Prosječne vrijednosti ispitaka***		
		h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	$\bar{h}$ [mm]	$\bar{b}$ [mm]	$\bar{A}$ [mm^2]
ispitivanje 0	1	0,019	25,23	0,48	0,02	22,12	0,44	0,02	23,74	0,47			
	2	0,019	25,06	0,48	0,02	21,33	0,43	0,021	24,44	0,51			
	3	0,019	24,44	0,46	0,02	19,34	0,39	0,021	25,08	0,53			
	$\bar{x}$	**0,019**	**24,91**	**0,47**	**0,020**	**20,93**	**0,42**	**0,021**	**24,42**	**0,50**	**0,020**	**23,420**	**0,466**
	s	**0,000**	**0,416**	**0,008**	**0,000**	**1,433**	**0,029**	**0,001**	**0,670**	**0,027**	**0,000**	**0,529**	**0,012**
ispitivanje 1	1	0,021	18,68	0,392	0,02	19,18	0,38	0,02	17,56	0,35			
	2	0,02	20,4	0,408	0,021	20,4	0,43	0,02	17,8	0,36			
	3	0,02	20,42	0,408	0,02	20,1	0,40	0,019	15,88	0,30			
	$\bar{x}$	**0,020**	**19,83**	**0,40**	**0,020**	**19,89**	**0,40**	**0,020**	**17,08**	**0,34**	**0,020**	**18,936**	**0,381**
	s	**0,001**	**0,999**	**0,009**	**0,001**	**0,636**	**0,023**	**0,001**	**1,046**	**0,030**	**0,000**	**0,225**	**0,011**
ispitivanje 2	1	0,021	25,32	0,53	0,021	26,6	0,56	0,024	25,68	0,62			
	2	0,023	23,34	0,54	0,024	22,56	0,54	0,022	24,88	0,55			
	3	0,023	25,38	0,58	0,024	24,04	0,58	0,023	25,06	0,58			
	$\bar{x}$	**0,022**	**24,68**	**0,55**	**0,023**	**24,40**	**0,56**	**0,023**	**25,21**	**0,58**	**0,023**	**24,762**	**0,563**
	s	**0,001**	**1,161**	**0,029**	**0,002**	**2,044**	**0,018**	**0,001**	**0,420**	**0,035**	**0,000**	**0,813**	**0,009**
ispitivanje 3	1	0,021	25,78	0,54	0,02	28,92	0,58	0,024	26,68	0,64			
	2	0,021	26,86	0,56	0,024	27,1	0,65	0,024	26,78	0,64			
	3	0,025	28,12	0,70	0,022	28,4	0,62	0,023	28	0,64			
	$\bar{x}$	**0,022**	**26,92**	**0,60**	**0,022**	**28,14**	**0,62**	**0,024**	**27,15**	**0,64**	**0,023**	**27,404**	**0,621**
	s	**0,002**	**1,171**	**0,088**	**0,002**	**0,937**	**0,036**	**0,001**	**0,735**	**0,002**	**0,001**	**0,218**	**0,043**
ispitivanje 4	1	0,024	24,72	0,59	0,027	23,8	0,64	0,025	24,28	0,61			
	2	0,026	23,74	0,62	0,021	23,12	0,49	0,025	24,02	0,60			
	3	0,024	22,64	0,54	0,023	23,26	0,53	0,023	24,16	0,56			
	$\bar{x}$	**0,025**	**23,70**	**0,58**	**0,024**	**23,39**	**0,55**	**0,024**	**24,15**	**0,59**	**0,024**	**23,749**	**0,576**
	s	**0,001**	**1,041**	**0,038**	**0,003**	**0,359**	**0,080**	**0,001**	**0,130**	**0,028**	**0,001**	**0,474**	**0,028**

Tablica 10.4. Dimenzije ispitaka za ispitivanje rasteznih svojstava folije oznake K

K		**ISPITAK 1**			**ISPITAK 2**			**ISPITAK 3**			***Prosječne vrijednosti ispitaka***		
		h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	$\bar{h}$ [mm]	$\bar{b}$ [mm]	$\bar{A}$ [mm^2]
ispitivanje 0	1	0,018	25,4	0,46	0,019	23,54	0,45	0,017	24,56	0,42			
	2	0,018	26,08	0,47	0,018	22,94	0,41	0,019	24,13	0,46			
	3	0,018	25,5	0,46	0,018	25,56	0,46	0,02	24,92	0,50			
	$\bar{x}$	**0,018**	**25,66**	**0,46**	**0,018**	**24,01**	**0,44**	**0,019**	**24,54**	**0,46**	**0,018**	**24,737**	**0,453**
	s	**0,000**	**0,367**	**0,007**	**0,001**	**1,373**	**0,024**	**0,002**	**0,396**	**0,040**	**0,001**	**0,573**	**0,017**
ispitivanje 1	1	0,018	18,78	0,338	0,019	17,96	0,34	0,019	16,78	0,32			
	2	0,017	19,08	0,324	0,02	17,32	0,35	0,018	17,88	0,32			
	3	0,018	18,98	0,342	0,017	16,88	0,29	0,017	19,22	0,33			
	$\bar{x}$	**0,018**	**18,95**	**0,33**	**0,019**	**17,39**	**0,32**	**0,018**	**17,96**	**0,32**	**0,018**	**18,098**	**0,327**
	s	**0,001**	**0,153**	**0,009**	**0,002**	**0,543**	**0,033**	**0,001**	**1,222**	**0,004**	**0,000**	**0,541**	**0,015**
ispitivanje 2	1	0,016	23,84	0,38	0,018	24,62	0,44	0,019	24,68	0,47			
	2	0,019	24,52	0,47	0,02	24,68	0,49	0,02	24,52	0,49			
	3	0,018	24,34	0,44	0,018	25,16	0,45	0,019	25,6	0,49			
	$\bar{x}$	**0,018**	**24,23**	**0,43**	**0,019**	**24,82**	**0,46**	**0,019**	**24,93**	**0,48**	**0,019**	**24,662**	**0,458**
	s	**0,002**	**0,352**	**0,043**	**0,001**	**0,296**	**0,027**	**0,001**	**0,583**	**0,011**	**0,000**	**0,152**	**0,016**
ispitivanje 3	1	0,018	29,62	0,53	0,021	29,08	0,61	0,022	34,16	0,75			
	2	0,019	27,3	0,52	0,019	29,9	0,57	0,02	33,78	0,68			
	3	0,019	27,94	0,53	0,018	29,16	0,52	0,019	33,24	0,63			
	$\bar{x}$	**0,019**	**28,29**	**0,53**	**0,019**	**29,38**	**0,57**	**0,020**	**33,73**	**0,69**	**0,019**	**30,464**	**0,594**
	s	**0,001**	**1,198**	**0,008**	**0,002**	**0,452**	**0,043**	**0,002**	**0,462**	**0,061**	**0,001**	**0,428**	**0,027**

Tablica 10.5. Dimenzije ispitaka za ispitivanje rasteznih svojstava folije oznake ECO

ECO		**ISPITAK 1**			**ISPITAK 2**			**ISPITAK 3**			***Prosječne vrijednosti ispitaka***		
		h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	$\bar{h}$ [mm]	$\bar{b}$ [mm]	$\bar{A}$ [mm^2]
ispitivanje 0	1	0,019	24,9	0,47	0,017	22,54	0,38	0,017	20,3	0,35			
	2	0,019	25,1	0,48	0,017	22	0,37	0,018	20,7	0,37			
	3	0,018	24,62	0,44	0,018	21,26	0,38	0,017	21,06	0,36			
	$\bar{x}$	**0,019**	**24,87**	**0,46**	**0,017**	**21,93**	**0,38**	**0,017**	**20,69**	**0,36**	**0,018**	**22,498**	**0,401**
	s	**0,001**	**0,241**	**0,018**	**0,001**	**0,643**	**0,005**	**0,001**	**0,380**	**0,014**	**0,000**	**0,204**	**0,007**
ispitivanje 1	1	0,018	20	0,360	0,018	23,16	0,42	0,019	24,72	0,47			
	2	0,019	20,08	0,382	0,019	23,42	0,44	0,018	23,06	0,42			
	3	0,018	20,4	0,367	0,02	24,32	0,49	0,017	23,4	0,40			
	$\bar{x}$	**0,018**	**20,16**	**0,37**	**0,019**	**23,63**	**0,45**	**0,018**	**23,73**	**0,43**	**0,018**	**22,507**	**0,416**
	s	**0,001**	**0,212**	**0,011**	**0,001**	**0,609**	**0,035**	**0,001**	**0,877**	**0,038**	**0,000**	**0,335**	**0,015**
ispitivanje 2	1	0,016	25,12	0,40	0,015	26,48	0,40	0,016	22,36	0,36			
	2	0,016	25,44	0,41	0,017	25,26	0,43	0,016	22,6	0,36			
	3	0,019	24	0,46	0,016	26,2	0,42	0,017	21,32	0,36			
	$\bar{x}$	**0,017**	**24,85**	**0,42**	**0,016**	**25,98**	**0,42**	**0,016**	**22,09**	**0,36**	**0,016**	**24,309**	**0,399**
	s	**0,002**	**0,756**	**0,030**	**0,001**	**0,639**	**0,016**	**0,001**	**0,680**	**0,002**	**0,001**	**0,059**	**0,014**
ispitivanje 3	1	0,015	28,82	0,43	0,015	28,3	0,42	0,017	27,8	0,47			
	2	0,017	29,16	0,50	0,017	27,8	0,47	0,017	26,54	0,45			
	3	0,015	28,84	0,43	0,017	27,8	0,47	0,017	26,2	0,45			
	$\bar{x}$	**0,016**	**28,94**	**0,45**	**0,016**	**27,97**	**0,46**	**0,017**	**26,85**	**0,46**	**0,016**	**27,918**	**0,456**
	s	**0,001**	**0,191**	**0,037**	**0,001**	**0,289**	**0,028**	**0,000**	**0,843**	**0,014**	**0,001**	**0,352**	**0,011**
ispitivanje 4	1	0,017	21,3	0,36	0,016	21,68	0,35	0,018	23,52	0,42			
	2	0,018	22,9	0,41	0,018	21,54	0,39	0,018	22,44	0,40			
	3	0,017	23,92	0,41	0,018	21,66	0,39	0,018	22,7	0,41			
	$\bar{x}$	**0,017**	**22,71**	**0,39**	**0,017**	**21,63**	**0,37**	**0,018**	**22,89**	**0,41**	**0,018**	**22,407**	**0,393**
	s	**0,001**	**1,321**	**0,027**	**0,001**	**0,076**	**0,024**	**0,000**	**0,564**	**0,010**	**0,001**	**0,627**	**0,009**

Tablica 10.6. Dimenzije ispitaka za ispitivanje rasteznih svojstava vrećice oznake B1

B1		**ISPITAK 1**			**ISPITAK 2**			**ISPITAK 3**			***Prosječne vrijednosti ispitaka***		
		h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	$\bar{h}$ [mm]	$\bar{b}$ [mm]	$\bar{A}$ [mm^2]
ispitivanje 0	1	0,037	25,56	0,95	0,04	25,1	1,00	0,038	22,22	0,84			
	2	0,039	27,2	1,06	0,04	25,56	1,02	0,04	23,92	0,96			
	3	0,04	25,18	1,01	0,039	25,42	0,99	0,041	24,72	1,01			
	$\bar{x}$	**0,039**	**25,98**	**1,00**	**0,040**	**25,36**	**1,01**	**0,040**	**23,62**	**0,94**	**0,039**	**24,987**	**0,983**
	s	**0,002**	**1,073**	**0,058**	**0,001**	**0,236**	**0,016**	**0,002**	**1,277**	**0,086**	**0,001**	**0,552**	**0,035**
ispitivanje 1	1	0,041	22,2	0,910	0,041	16,86	0,69	0,04	16,22	0,65			
	2	0,04	22,56	0,902	0,04	18,62	0,74	0,04	16,88	0,68			
	3	0,043	22	0,946	0,039	18,44	0,72	0,041	17,2	0,71			
	$\bar{x}$	**0,041**	**22,25**	**0,92**	**0,040**	**17,97**	**0,72**	**0,040**	**16,77**	**0,68**	**0,041**	**18,998**	**0,771**
	s	**0,002**	**0,284**	**0,023**	**0,001**	**0,968**	**0,027**	**0,001**	**0,500**	**0,028**	**0,000**	**0,350**	**0,003**
ispitivanje 2	1	0,041	20,9	0,86	0,04	26,64	1,07	0,04	24,68	0,99			
	2	0,039	23,16	0,90	0,039	26,66	1,04	0,036	24,62	0,89			
	3	0,041	23,8	0,98	0,038	27,32	1,04	0,037	25,58	0,95			
	$\bar{x}$	**0,040**	**22,62**	**0,91**	**0,039**	**26,87**	**1,05**	**0,038**	**24,96**	**0,94**	**0,039**	**24,818**	**0,967**
	s	**0,001**	**1,524**	**0,060**	**0,001**	**0,387**	**0,015**	**0,002**	**0,538**	**0,051**	**0,001**	**0,617**	**0,024**
ispitivanje 3	1	0,039	27	1,05	0,041	26,64	1,09	0,039	26,38	1,03			
	2	0,042	27,92	1,17	0,039	26,68	1,04	0,042	26,7	1,12			
	3	0,04	26,96	1,08	0,041	26,58	1,09	0,04	26,78	1,07			
	$\bar{x}$	**0,040**	**27,29**	**1,10**	**0,040**	**26,63**	**1,07**	**0,040**	**26,62**	**1,07**	**0,040**	**26,849**	**1,083**
	s	**0,002**	**0,543**	**0,063**	**0,001**	**0,050**	**0,029**	**0,002**	**0,212**	**0,046**	**0,000**	**0,251**	**0,017**

Tablica 10.7. Dimenzije ispitaka za ispitivanje rasteznih svojstava vrećice oznake B2

B2		**ISPITAK 1**			**ISPITAK 2**			**ISPITAK 3**			***Prosječne vrijednosti ispitaka***		
		h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	h [mm]	b [mm]	A [mm^2]	$\bar{h}$ [mm]	$\bar{b}$ [mm]	$\bar{A}$ [mm^2]
ispitivanje 0	1	0,017	24,48	0,42	0,017	22,84	0,39	0,017	21,78	0,37			
	2	0,016	23,32	0,37	0,016	23,72	0,38	0,017	23,6	0,40			
	3	0,015	23,7	0,36	0,018	23,5	0,42	0,015	22,58	0,34			
	$\bar{x}$	**0,016**	**23,83**	**0,38**	**0,017**	**23,35**	**0,40**	**0,016**	**22,65**	**0,37**	**0,016**	**23,280**	**0,383**
	s	**0,001**	**0,591**	**0,031**	**0,001**	**0,458**	**0,023**	**0,001**	**0,912**	**0,031**	**0,000**	**0,233**	**0,005**
ispitivanje 1	1	0,018	18,48	0,333	0,019	18,44	0,35	0,017	20,08	0,34			
	2	0,02	16,74	0,335	0,02	19,3	0,39	0,021	18,52	0,39			
	3	0,019	20,1	0,382	0,019	18,96	0,36	0,02	18,9	0,38			
	$\bar{x}$	**0,019**	**18,44**	**0,35**	**0,019**	**18,90**	**0,37**	**0,019**	**19,17**	**0,37**	**0,019**	**18,836**	**0,362**
	s	**0,001**	**1,680**	**0,028**	**0,001**	**0,433**	**0,018**	**0,002**	**0,813**	**0,025**	**0,001**	**0,639**	**0,005**
ispitivanje 2	1	0,018	24,38	0,44	0,019	28,52	0,54	0,024	20,42	0,49			
	2	0,016	23,02	0,37	0,016	5,32	0,09	0,019	19,3	0,37			
	3	0,019	23,86	0,45	0,017	25,2	0,43	0,018	17,9	0,32			
	$\bar{x}$	**0,018**	**23,75**	**0,42**	**0,017**	**19,68**	**0,35**	**0,020**	**19,21**	**0,39**	**0,018**	**20,880**	**0,388**
	s	**0,002**	**0,686**	**0,045**	**0,002**	**12,546**	**0,238**	**0,003**	**1,263**	**0,087**	**0,001**	**6,687**	**0,101**
ispitivanje 3	1	0,017	26,6	0,45	0,019	27,58	0,52	0,015	28,9	0,43			
	2	0,018	28	0,50	0,019	27,8	0,53	0,016	27,32	0,44			
	3	0,019	26,96	0,51	0,02	27	0,54	0,018	27,72	0,50			
	$\bar{x}$	**0,018**	**27,19**	**0,49**	**0,019**	**27,46**	**0,53**	**0,016**	**27,98**	**0,46**	**0,018**	**27,542**	**0,492**
	s	**0,001**	**0,727**	**0,033**	**0,001**	**0,413**	**0,008**	**0,002**	**0,821**	**0,037**	**0,000**	**0,214**	**0,015**

Tablica 10.8. Dimenzije ispitaka za ispitivanje savojne žilavosti vrećice oznake BO

BO		*ispitivanje 0*	*ispitivanje 1*	*ispitivanje 2*	*ispitivanje 3*	*ispitivanje 4*
		h [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]
ISPITAK 1	1	0,037	0,028	0,028	0,03	0,03
	2	0,031	0,025	0,028	0,029	0,031
	3	0,052	0,026	0,029	0,029	0,03
	$\bar{x}$	**0,040**	**0,026**	**0,028**	**0,029**	**0,030**
	s	**0,011**	**0,002**	**0,001**	**0,001**	**0,001**
ISPITAK 2	1	0,029	0,025	0,028	0,03	0,03
	2	0,029	0,026	0,029	0,028	0,03
	3	0,028	0,028	0,028	0,029	0,031
	$\bar{x}$	**0,029**	**0,026**	**0,028**	**0,029**	**0,030**
	s	**0,001**	**0,002**	**0,001**	**0,001**	**0,001**
ISPITAK 3	1	0,031	0,025	0,029	0,029	0,033
	2	0,031	0,025	0,032	0,029	0,032
	3	0,031	0,027	0,03	0,03	0,031
	$\bar{x}$	**0,031**	**0,026**	**0,030**	**0,029**	**0,032**
	s	**0,000**	**0,001**	**0,002**	**0,001**	**0,001**
	$\bar{x}_{uk}$	**0,033**	**0,026**	**0,029**	**0,029**	**0,031**
	s_{uk}	**0,006**	**0,000**	**0,001**	**0,000**	**0,000**

Tablica 10.9. Dimenzije ispitaka za ispitivanje savojne žilavosti vrećice oznake SP

SP		*ispitivanje 0*	*ispitivanje 1*	*ispitivanje 2*	*ispitivanje 3*
		h [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]
ISPITAK 1	1	0,009	0,01	0,013	0,011
	2	0,009	0,011	0,014	0,012
	3	0,01	0,01	0,013	0,013
	$\bar{x}$	**0,009**	**0,010**	**0,013**	**0,012**
	s	**0,001**	**0,001**	**0,001**	**0,001**
ISPITAK 2	1	0,009	0,01	0,014	0,012
	2	0,01	0,01	0,014	0,01
	3	0,01	0,011	0,013	0,01
	$\bar{x}$	**0,010**	**0,010**	**0,014**	**0,011**
	s	**0,001**	**0,001**	**0,001**	**0,001**
ISPITAK 3	1	0,012	0,012	0,011	0,011
	2	0,012	0,011	0,011	0,011
	3	0,013	0,011	0,012	0,012
	$\bar{x}$	**0,012**	**0,011**	**0,011**	**0,011**
	s	**0,001**	**0,001**	**0,001**	**0,001**
	$\bar{x}_{uk}$	**0,010**	**0,011**	**0,013**	**0,011**
	s_{uk}	**0,000**	**0,000**	**0,000**	**0,000**

Tablica 10.10. Dimenzije ispitaka za ispitivanje savojne žilavosti vrećice oznake SW

SW		*ispitivanje 0*	*ispitivanje 1*	*ispitivanje 2*	*ispitivanje 3*	*ispitivanje 4*
		h [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]
ISPITAK 1	1	0,021	0,022	0,022	0,024	0,029
	2	0,02	0,022	0,022	0,025	0,029
	3	0,021	0,022	0,022	0,023	0,025
	$\bar{x}$	**0,021**	**0,022**	**0,022**	**0,024**	**0,028**
	s	**0,001**	**0,000**	**0,000**	**0,001**	**0,002**
ISPITAK 2	1	0,02	0,022	0,023	0,022	0,025
	2	0,021	0,022	0,022	0,025	0,025
	3	0,02	0,021	0,021	0,024	0,026
	$\bar{x}$	**0,020**	**0,022**	**0,022**	**0,024**	**0,025**
	s	**0,001**	**0,001**	**0,001**	**0,002**	**0,001**
ISPITAK 3	1	0,017	0,021	0,022	0,022	0,03
	2	0,018	0,021	0,023	0,024	0,03
	3	0,02	0,021	0,022	0,024	0,025
	$\bar{x}$	**0,018**	**0,021**	**0,022**	**0,023**	**0,028**
	s	**0,002**	**0,000**	**0,001**	**0,001**	**0,003**
	$\bar{x}_{uk}$	**0,020**	**0,022**	**0,022**	**0,024**	**0,027**
	s_{uk}	**0,001**	**0,000**	**0,001**	**0,000**	**0,001**

Tablica 10.11. Dimenzije ispitaka za ispitivanje savojne žilavosti folije oznake K

K		*ispitivanje 0*	*ispitivanje 1*	*ispitivanje 2*	*ispitivanje 3*
		h [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]
ISPITAK 1	1	0,017	0,017	0,018	0,019
	2	0,018	0,018	0,018	0,019
	3	0,019	0,019	0,018	0,019
	$\bar{x}$	**0,018**	**0,018**	**0,018**	**0,019**
	s	**0,001**	**0,001**	**0,000**	**0,000**
ISPITAK 2	1	0,017	0,017	0,017	0,019
	2	0,018	0,018	0,019	0,019
	3	0,02	0,02	0,02	0,017
	$\bar{x}$	**0,018**	**0,018**	**0,019**	**0,018**
	s	**0,002**	**0,002**	**0,002**	**0,001**
ISPITAK 3	1	0,017	0,017	0,021	0,019
	2	0,018	0,017	0,026	0,02
	3	0,02	0,018	0,021	0,019
	$\bar{x}$	**0,018**	**0,017**	**0,023**	**0,019**
	s	**0,002**	**0,001**	**0,003**	**0,001**
	$\bar{x}_{uk}$	**0,018**	**0,018**	**0,020**	**0,019**
	s_{uk}	**0,000**	**0,000**	**0,001**	**0,001**

Tablica 10.12. Dimenzije ispitaka za ispitivanje savojne žilavosti folije oznake ECO

ECO		*ispitivanje 0*	*ispitivanje 1*	*ispitivanje 2*	*ispitivanje 3*	*ispitivanje 4*
		h [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]
ISPITAK 1	1	0,018	0,017	0,017	0,017	0,019
	2	0,018	0,017	0,017	0,019	0,018
	3	0,018	0,017	0,017	0,019	0,019
	$\bar{x}$	**0,018**	**0,017**	**0,017**	**0,018**	**0,019**
	s	**0,000**	**0,000**	**0,000**	**0,001**	**0,001**
ISPITAK 2	1	0,019	0,017	0,017	0,018	0,02
	2	0,018	0,018	0,017	0,019	0,018
	3	0,019	0,018	0,018	0,019	0,018
	$\bar{x}$	**0,019**	**0,018**	**0,017**	**0,019**	**0,019**
	s	**0,001**	**0,001**	**0,001**	**0,001**	**0,001**
ISPITAK 3	1	0,018	0,018	0,017	0,019	0,019
	2	0,019	0,018	0,018	0,018	0,019
	3	0,02	0,018	0,016	0,018	0,02
	$\bar{x}$	**0,019**	**0,018**	**0,017**	**0,018**	**0,019**
	s	**0,001**	**0,000**	**0,001**	**0,001**	**0,001**
	$\bar{x}_{uk}$	**0,019**	**0,018**	**0,017**	**0,018**	**0,019**
	s_{uk}	**0,001**	**0,000**	**0,001**	**0,000**	**0,000**

Tablica 10.13. Dimenzije ispitaka za ispitivanje savojne žilavosti vrećice oznake B1

B1		*ispitivanje 0*	*ispitivanje 1*	*ispitivanje 2*	*ispitivanje 3*
		h [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]
ISPITAK 1	1	0,041	0,042	0,043	0,043
	2	0,04	0,041	0,041	0,042
	3	0,04	0,044	0,039	0,043
	$\bar{x}$	**0,040**	**0,042**	**0,041**	**0,043**
	s	**0,001**	**0,002**	**0,002**	**0,001**
ISPITAK 2	1	0,041	0,041	0,042	0,042
	2	0,041	0,041	0,04	0,045
	3	0,043	0,043	0,043	0,043
	$\bar{x}$	**0,042**	**0,042**	**0,042**	**0,043**
	s	**0,001**	**0,001**	**0,002**	**0,002**
ISPITAK 3	1	0,04	0,041	0,043	0,046
	2	0,042	0,04	0,041	0,047
	3	0,043	0,043	0,042	0,043
	$\bar{x}$	**0,042**	**0,041**	**0,042**	**0,045**
	s	**0,002**	**0,002**	**0,001**	**0,002**
	$\bar{x}_{uk}$	**0,041**	**0,042**	**0,042**	**0,044**
	s_{uk}	**0,000**	**0,000**	**0,001**	**0,001**

Tablica 10.14. Dimenzije ispitaka za ispitivanje savojne žilavosti vrećice oznake B2

B2		*ispitivanje 0*	*ispitivanje 1*	*ispitivanje 2*	*ispitivanje 3*
		h [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]	*h* [mm]
ISPITAK 1	1	0,018	0,022	0,019	0,018
	2	0,017	0,02	0,02	0,019
	3	0,016	0,019	0,019	0,018
	$\bar{x}$	**0,017**	**0,020**	**0,019**	**0,018**
	s	**0,001**	**0,002**	**0,001**	**0,001**
ISPITAK 2	1	0,015	0,019	0,019	0,018
	2	0,016	0,021	0,018	0,018
	3	0,018	0,019	0,019	0,019
	$\bar{x}$	**0,016**	**0,020**	**0,019**	**0,018**
	s	**0,002**	**0,001**	**0,001**	**0,001**
ISPITAK 3	1	0,015	0,013	0,016	0,018
	2	0,017	0,022	0,017	0,019
	3	0,018	0,022	0,018	0,018
	$\bar{x}$	**0,017**	**0,019**	**0,017**	**0,018**
	s	**0,002**	**0,005**	**0,001**	**0,001**
	$\bar{x}_{uk}$	**0,017**	**0,020**	**0,018**	**0,018**
	s_{uk}	**0,000**	**0,002**	**0,000**	**0,000**