

# Ispitivanje deformacija kod polimernih tvorevina

---

Jagunić, Zvonimir

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:145895>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-26**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Zvonimir Jagunić**

Zagreb, 2022. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentorica:

Izv. prof. dr. sc. Ana Pilipović, dipl. ing

Student:

Zvonimir Jagunić

Zagreb, 2022. godina.

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

Zahvaljujem mentorici, izv. prof. dr. sc. Ani Pilipović na pomoći, trudu, angažmanu i stručnosti te savjetima koje sam dobio prilikom izrade diplomskog rada.

Velika hvala mojim roditeljima što su mi omogućili školovanje, te na strpljenju i podršci tijekom trajanja studija.

Posebno se zahvaljujem svojoj djevojci na neprestanoj podršci i razumijevanju, prijateljima, kolegama i svima ostalima koji su bili podrška tijekom studija.

Zvonimir Jagunić



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:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ZVONIMIR JAGUNIĆ** Mat. br.: 0035207401

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje deformacija kod polimernih tvorevina**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Deformation testing in the polymer product**

Opis zadatka:

Kad se proučava znanstvena literatura, a i informacijske liste materijala od proizvođača vezane uz ispitivanje mehaničkih (posebno rasteznih) svojstava polimernih materijala često se nailazi isključivo na rezultate vezane uz sile, odnosno pojedine čvrstoće. Često se zanemaruju produljenja odnosno deformacije. Ukupna deformacija čvrstog polimernog tijela sastoji se od elastične i plastične deformacije.

Stoga je u sklopu ovog diplomskog rada potrebno u Laboratoriju za preradbu polimera i drva na kidalici Shimadzu AGS-X s maksimalnim opterećenjem od 10 kN osposobiti novi postav za ispitivanje deformacija, te nakon toga provesti ispitivanje deformacija različitih polimernih materijala i usporediti ih s literaturom.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu.

Zadatak zadan:  
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:  
1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:  
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao: *Ana Pilipović*  
prof. dr. sc. Ana Pilipović

Predsjednica Povjerenstva:  
*Biserka Runje*  
prof. dr. sc. Biserka Runje

**SADRŽAJ**

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA .....	IX
SAŽETAK.....	X
SUMMARY .....	XI
1. UVOD.....	1
2. POLIMERNI MATERIJALI.....	2
2.1. Klasifikacija polimera.....	3
2.2. Tehnički uporabljivi polimerni materijali.....	3
2.3. Struktura i svojstva polimera .....	5
2.3.1. Plastomeri.....	6
2.3.2. Elastomeri .....	7
2.3.3. Duromeri .....	7
2.3.4. Elastoplastomeri.....	8
2.3.5. Obilježja temeljnih skupina polimernih materijala.....	8
2.3.6. Svojstva polimernih materijala .....	8
2.3.6.1. Prednosti i nedostaci polimernih materijala .....	11
3. MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA.....	13
3.1. Mehanička svojstva polimernih materijala .....	15
3.1.1. Granica razvlačenja (tečenja).....	17
3.1.2. Modul elastičnosti .....	18
3.1.3. Statička izdržljivost.....	19
3.1.3.1. Puzanje i relaksacija polimernih materijala .....	21
3.1.4. Dinamička izdržljivost .....	22
3.1.5. Utjecaji na mehanička svojstva.....	24
3.1.5.1. Utjecaj temperature.....	24
3.1.5.2. Utjecaj vlage .....	25
3.1.5.3. Utjecaj brzine deformiranja .....	25
3.1.5.4. Utjecaj trajanja opterećenja .....	26
3.1.5.5. Utjecaj dugotrajnog djelovanja topline.....	27
3.1.5.6. Utjecaj dinamičkog opterećenja.....	28

4. POISSONOV FAKTOR.....	30
4.1. Međusobna ovisnost naprezanja i deformacija .....	31
4.1.1. Konstante elastičnosti .....	33
4.2. Poissonov faktor polimernih materijala .....	36
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	37
5.1. Materijali u ispitivanju.....	37
5.1.1. Polietilen (PE).....	37
5.1.2. Polistiren (PS) .....	39
5.1.3. Poliamid (PA) .....	40
5.1.4. Polipropilen (PP).....	42
5.1.5. Elastoplastomer (TPE).....	43
5.1.6. Poliuretanski elastomer (TPU).....	44
5.2. Određivanje poissonovog faktora .....	46
5.2.1. Rezultati ispitivanja.....	51
5.2.1.1. Polietilen (PE).....	53
5.2.1.2. Polistiren (PS).....	54
5.2.1.3. Poliamid (PA 66) - ojačan s 30 % staklenih vlakna .....	55
5.2.1.4. Poliamid (PA 66) - ojačan s 30 % ugljičnih vlakna.....	56
5.2.1.5. Poliamid (PA) – čisti .....	57
5.2.1.6. Polipropilen (PP) .....	58
5.2.1.7. Elastoplastomer (TPE).....	59
5.2.1.8. Poliuretanski elastomer (TPU) .....	60
6. USPOREDBA REZULTATA S LITERATUROM .....	61
7. ZAKLJUČAK.....	62
8. LITERATURA .....	63
9. PRILOZI.....	66

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Prikaz tipova različitih polimernih molekula [3] .....	3
Slika 2.2. Strukture polimera [5] .....	6
Slika 2.3. Linearne makromolekule [5] .....	7
Slika 2.4. Rahlo umrežene makromolekule [5] .....	7
Slika 2.5. Potpuno umrežene makromolekule [5] .....	8
Slika 3.1. Karakteristični dijagrami “naprezanje – istezanje” glavnih skupina polimernih materijala [6] .....	16
Slika 3.2. Utvrđivanje modula elastičnosti polimernih materijala [9] .....	18
Slika 3.3. Ponašanje polimernih materijala pri dugotrajnom statičkom opterećenju [6] .....	20
Slika 3.4. a) Krivulja puzanja $\varepsilon = f(t)$ s parametrom naprezanja $\sigma$ , b) dijagram $\sigma = f(t)$ s parametrom istezanje $\varepsilon$ i s linijom loma, c) dijagram <i>naprezanje – istezanje</i> $\sigma = f(\varepsilon)$ s parametrom vrijeme $t$ [9] .....	21
Slika 3.5. Različiti tipovi sinusoidnog promjenjivog opterećenja [5] .....	22
Slika 3.6. Wöhlerov dijagram [5] .....	23
Slika 3.7. Ponašanje polimernih materijala pri dinamičkom opterećenju [4] .....	24
Slika 3.8. Ovisnost oblika $\sigma - \varepsilon$ dijagrama suhog poliamida (PA 66) o temperaturi okoline prilikom ispitivanja [6] .....	24
Slika 3.9. Utjecaj udjela vlage u poliamidu (PA 66) na oblik $\sigma - \varepsilon$ dijagrama [6] .....	25
Slika 3.10. Utjecaj brzine deformiranja suhog poliamida (PA 66) na oblik $\sigma - \varepsilon$ dijagrama [6] .....	26
Slika 3.11. Ovisnost modula puzanja $E_C$ o trajanju naprezanja $t$ za materijal PBT [6] .....	27
Slika 3.12. Primjer dijagrama promjene nekog svojstva tijekom vremena pri određenoj temperaturi okoline [6] .....	28
Slika 3.13. Wöhlerove krivulje za izmjenično savijanje za poliamide (PA 6) i (PA 66) [6] ..	29
Slika 4.1. Ovisnost sile $F$ o produljenju $\Delta l$ [12] .....	32
Slika 4.2. Ilustracija Hookeova zakona [12] .....	33
Slika 4.3. Element pod hidrostatičkim tlakom [12] .....	35
Slika 5.1. Razgranatost polietilenskih makromolekula. $a$ – polietilen niske gustoće, $b$ – linearni polietilen niske gustoće, $c$ – polietilen visoke gustoće; $l$ – glavni lanac makromolekule $2$ – bočni lanci [15] .....	38
Slika 5.2. Ovisnost modula rastezljivosti o udjelu tvrdog segmenta [21] .....	44



Slika 5.3 Ovisnost rastezne čvrstoće o udjelu tvrdog segmenta [21].....	45
Slika 5.4. Ovisnost vrijednosti prekidnog istezanja o udjelu tvrdog segmenta [21].....	45
Slika 5.5. Oblik i dimenzije ispitnog tijela [22] .....	46
Slika 5.6. Kidalica <i>Shimadzu AGS - x</i> na kojoj su provedena ispitivanja .....	48
Slika 5.7. Uređaj za mjerenje poissonovog faktora marke <i>Epsilon</i> postavljen na poziciju prije početka mjerenja.....	49
Slika 5.8. Kontakt uređaja za mjerenje sa ispitnim tijelom.....	50
Slika 5.9. Dijagram sila-deformacija rasteznog ispitivanja za polipropilen (PP) .....	51
Slika 5.10. Dijagram sila-deformacija rasteznog ispitivanja za elastoplastomer TPE.....	52
Slika 5.11. Dijagram sila-deformacija rasteznog ispitivanja za poliuretanski elastomer TPU	52
Slika 5.12. Ispitna tijela polietilena (PE).....	53
Slika 5.13. Ispitna tijela polistirena (PS).....	54
Slika 5.14. Ispitna tijela poliamida (PA) ojačanog s 30 % staklenih vlakana.....	55
Slika 5.15. Ispitna tijela od poliamida (PA 66) ojačanog s 30 % ugljičnih vlakana .....	56
Slika 5.16. Ispitna tijela od čistog poliamida (PA 66) .....	57
Slika 5.17. Ispitna tijela od polipropilena (PP).....	58
Slika 5.18. Ispitna tijela od elastoplastomernog materijala (TPE).....	59
Slika 5.19. Ispitna tijela od poliuretanskog elastomera (TPU) .....	60
Slika 6.1. Dijagram srednjih vrijednosti poissonovih faktora u usporedbi s literaturom.....	61

**POPIS TABLICA**

Tablica 2.1. Dodaci čistim polimerima [4] .....	4
Tablica 2.2. Primjeri dodataka i svrha primjene [4].....	5
Tablica 2.3. Obilježja osnovnih skupina polimernih materijala [4].....	8
Tablica 2.4. Važnija utjecajna svojstva koje treba uzeti u obzir pri odabiru polimernih materijala [6] .....	9
Tablica 2.5. Važnija utjecajna svojstva koje treba uzeti u obzir pri odabiru polimernih materijala – nastavak [6] .....	10
Tablica 2.6. Prednosti i nedostaci polimernih materijala [4] .....	11
Tablica 3.1. Pregled mehaničkih svojstava s obzirom na trajanje opterećenja [4] .....	15
Tablica 3.2. Vrijednosti modula rasteznosti osnovnih skupina polimernih materijala [4] .....	19
Tablica 4.1. Poissonov faktor različitih materijala [11] .....	30
Tablica 4.2. Poissonov faktor određenih polimernih materijala [14].....	36
Tablica 5.1. Fizikalna i mehanička svojstva polietilena [15].....	38
Tablica 5.2. Fizikalna i mehanička svojstva polistirena (PS) [15].....	40
Tablica 5.3. Fizikalna i mehanička svojstva poliamida PA 6 i PA 66 uz relativnu vlažnost od 50 % [15].....	41
Tablica 5.4. Fizikalna i mehanička svojstva polipropilena (PP) [15] .....	42
Tablica 5.5. Dimenzije ispitnog tijela prema zadanoj normi sa dimenzijama u mm. [22] .....	47
Tablica 5.6. Vrijednosti poissonovog faktora za polietilen (PE) .....	53
Tablica 5.7. Vrijednosti poissonovog faktora za polistiren (PS).....	54
Tablica 5.8. Vrijednosti poissonovog faktora za poliamid (PA 66) ojačanog s 30 % staklenih vlakana.....	55
Tablica 5.9. Vrijednosti poissonovog faktora za poliamid (PA 66) s 30 % ugljičnih vlakana	56
Tablica 5.10. Vrijednosti poissonovog faktora za čisti poliamid (PA 66).....	57
Tablica 5.11. Vrijednosti poissonovog faktora za polipropilen (PP).....	58
Tablica 5.12. Vrijednosti poissonovog faktora za elastoplastomer (TPE).....	59
Tablica 5.13. Vrijednosti poissonovog faktora za poliuretanski elastomer (TPU) .....	60
Tablica 6.1. Usporedba dobivenih rezultata poissonovog faktora sa literaturom [11, 14, 24, 25, 26, 27, 28].....	61
Tablica 9.1. Rezultati mjerenja širine i debljine polietilena (PE) .....	67
Tablica 9.2. Rezultati mjerenja širine i debljine polistirena (PS).....	67

Tablica 9.3. Rezultati mjerenja širine i debljine poliamida (PA 66) ojačanog staklenim vlaknima .....	68
Tablica 9.4. Rezultati mjerenja širine i debljine poliamida (PA 66) ojačanog ugljičnim vlaknima .....	68
Tablica 9.5. Rezultati mjerenja širine i debljine čistog poliamida (PA 66) .....	69
Tablica 9.6. Rezultati mjerenja širine i debljine polipropilena (PP) .....	69
Tablica 9.7. Rezultati mjerenja širine i debljine elastoplastomera (TPE) .....	70
Tablica 9.8. Rezultati mjerenja širine i debljine poliuretanskog elastomera (TPU) .....	70

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
$a$	mm	debljina ispitnog tijela
$A_0$	mm <sup>2</sup>	površina poprečnog presjeka ispitnog tijela
$b$	mm	širina na uskom dijelu ispitnog tijela
$b_1$	mm	širina na uskom dijelu ispitnog tijela
$b_2$	mm	širina na krajevima
$d$	mm	početna širina ispitnog tijela
$E$	N/mm <sup>2</sup>	modul elastičnosti
$E_C$	N/mm <sup>2</sup>	modul puzanja
$F$	N	rastezna sila
$Fr$	N	sila tečenja
$G$	N/mm <sup>2</sup>	modul smicanja
$h$	mm	poželjna debljina
$K$	N/mm <sup>2</sup>	obujamni modul elastičnosti
$l$	mm	početna duljina ispitnog tijela
$L$	mm	inicijalna duljina između prihвата
$l_0$	mm	početna duljina ispitnog tijela na uskom dijelu
$l_1$	mm	duljina uskog dijela ispitnog tijela
$l_2$	mm	udaljenost između širokih dijelova s paralelnim stranicama
$l_3$	mm	ukupna duljina
$L_0$	mm	mjerna duljina
$n$		broj ciklusa
$N_g$		granični broj ciklusa
$p$	Pa	hidrostatski pritisak
$R_d$	N/mm <sup>2</sup>	dinamička izdržljivost
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	rastezna čvrstoća
$R_{m/t}$	N/mm <sup>2</sup>	statička izdržljivost materijala
$R_{m/t/1000}$	N/mm <sup>2</sup>	statička izdržljivost materijala određena nakon 1000 sati
$R_p$	N/mm <sup>2</sup>	prekidna čvrstoća
$R_r$	N/mm <sup>2</sup>	granica razvlačenja
$R_x$	N/mm <sup>2</sup>	vrijednost naprezanja u ovisnosti o $x$ % istezanja
$t$	s	vrijeme
$T_g$	°C	temperatura staklastog prijelaza
$\Delta d$	mm	suženje poprečnog presjeka
$\Delta F$	N	promjena vrijednosti sile
$\Delta l$	mm	produljenje ispitnog tijela

---

$\Delta x$	mm	produljenje
$\varepsilon_{\text{axial}}$	%	uzdužno suženje
$\varepsilon_e$	%	istezanje pri granici razvlačenja
$\varepsilon_{\text{et}}$	%	entropijska deformacija
$\varepsilon_{ij}$	%	vrijednost istezanja iz matrice istezanja
$\varepsilon_m$	%	istezanje pri rasteznoj čvrstoći
$\varepsilon_p$	%	prekidno istezanje
$\varepsilon_{\text{tp}}$	%	nazivno prekidno istezanje
$\varepsilon_{\text{trans}}$	%	poprečno suženje
$\varepsilon_{\text{uk}}$	%	ukupna deformacija
$\varepsilon_v$	%	viskozna deformacija
$\varepsilon_x$	%	uzdužno suženje
$\varepsilon_y$	%	poprečno suženje
$\varepsilon_z$	%	poprečno suženje
$\Theta$	%	obujamna deformacija
$\mu$		poissonov faktor
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	vrijednost naprezanja
$\sigma_{ij}$	N/mm <sup>2</sup>	vrijednost naprezanja iz matrice naprezanja
$\sigma_x$	N/mm <sup>2</sup>	vrijednost naprezanja u smjeru osi x
$\sigma_y$	N/mm <sup>2</sup>	vrijednost naprezanja u smjeru osi y
$\sigma_z$	N/mm <sup>2</sup>	vrijednost naprezanja u smjeru osi z
$\sigma_0$	N/mm <sup>2</sup>	početno naprezanje

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
ABS	akrilonitril-butadien-stiren terpolimer
HI-PS	Polistiren visoke žilavosti
HRN	Hrvatske norme
HVAC	engl. <i>heating, ventilation and air conditioning</i>
ISO	engl. <i>international organization for standardization</i> – Međunarodna organizacija za normizaciju
IEC	engl. <i>international electrical commission</i>
PA	poliamid
PA 6	Poliamid 6
PA 66	Poliamid 66
PA 11	Poliamid 11
PA 12	Poliamid 12
PA 6, 12	Poliamid 6, 12
PBT	Poli(buteilen-tereftalat)
PC	Polikarbonat
PE-HD	Polietilen visoke gustoće
PE-LD	Polietilen niske gustoće
PE-LLD	Linearni polietilen niske gustoće
PET	Poli(etile-tereftalat)
PE-UHMW	Polietilen ultra visoke molekulne mase
PMMA	Poli(metil-metakrilat)
PP	polipropilen
PS	polistiren
PS-E	ljenasti polistiren
PTFE	Poli(tetrafluoretilen)
PVC	Poli(vinil-klorid)
SAN	stiren-akrilonitrilni kopolimer
TPE	Elastoplastomerni polimer
TPU	Poliuretanski elastomer

## **SAŽETAK**

U ovom radu, nakon opisa polimernih materijala, definicije i klasifikacije, dani su opis i značajke tehnički uporabljivih polimernih materijala. Zatim su opisana svojstva i obilježja temeljnih skupina polimernih materijala te je nakon toga dan pregled najvažnijih mehaničkih svojstava te utjecaji na mehanička svojstva. Budući da se eksperimentalni dio ovog rada svodi na mjerenje poissonovog faktora, u sljedećim koracima dana je definicija poissonovog faktora, međusobna ovisnost naprezanja i deformacija te pregled vrijednosti poissonovog faktora za neke određene polimerne materijale. U eksperimentalnom dijelu dani su opisi, definicije, mehanička i uporabna svojstva mjerenih polimernih materijala te je provedeno mjerenje poissonovog faktora. Izmjerene vrijednosti naposljetku su uspoređene s literaturom te je dan zaključak.

Ključne riječi: deformacija, mehanička svojstva, poissonov faktor, polimeri

## **SUMMARY**

In this thesis, after given description of polymer materials, definition and classification, the description and features of technically usable polymer materials are given. Further, the properties and characteristics of fundamental groups of polymer materials are described, followed by an overview of the most important mechanical properties and effects on them. Since the experimental part of this thesis is based on measurement of poisson's factor, the definition of poisson's factor, the mutual dependence of stress and strain, an overview of the values of poisson's factor for some specific polymer materials are given in the following steps. In the experimental part, descriptions, definitions, mechanical and functional properties of measured polymer materials are given and the poisson's factor was measured. The measured values were finally compared with literature values given in conclusion.

Key words: deformation, mechanical properties, poisson's factor polymers



## 1. UVOD

Polimerni materijali ubrajaju se u jedne od najvažnijih tehničkih materijala danas. Najviše se primjenjuju kao konstrukcijski materijali te se upotrebljavaju gdje i uobičajeni materijali poput metala, keramika, drva, stakla, tekstilnih vlakana i drugih. Međutim, zbog svojih jedinstvenih svojstava našli su svoju specifičnu primjenu i omogućili napredak u brojnim djelatnostima. Prirodni polimerni materijali poput drva, papira, biljnih i životinjskih vlakana, prirodne smole i kaučuka samo su neki od materijala koje je čovjek upotrebljavao od svoga postanka. No, sintetski polimerni materijali dobiveni kemijskim reakcijama polimerizacije otvaraju nove mogućnosti u konstrukcijskim primjenama polimernih materijala. Želja za superiornijim materijalima poticala je ljude na izradu sve složenijih materijala, čije se nove funkcije i svojstva jednostavno ne mogu ostvariti konvencionalnim materijalima. S druge strane, istraživanjem i proizvodnjom novih vrsta materijala potakla je izradu raznovrsnih uređaja, strojeva, pomagala te razvoj novih proizvodnih procesa i tehnika.

Polimerni materijali nalaze široku primjenu u gotovo svim granama industrije zbog svojih mehaničkih, fizikalnih, kemijskih i toplinskih svojstava koja ih karakteriziraju i međusobno razlikuju. Mehanička svojstva predstavljaju vrlo važan čimbenik u proizvodnji polimernih proizvoda budući da se temeljem tih svojstava dimenzioniraju dijelovi strojeva i elementi konstrukcija. Najvažniji čimbenici koji ukazuju na mehanička svojstva polimernih materijala su stupanj kristalnosti, stupanj reda kod amorfni polimera, fizičko i fazno stanje polimera, struktura, prosječna molekularna masa, raspodjela molekularnih masa i drugo. Dakle, mehanička svojstva predstavljaju mehaničku otpornost materijala za određene uvjete eksploatacije polimernog materijala i upravo se iz tih razloga dijelovi konstrukcija dimenzioniraju prema osnovi mehaničkih svojstava. Da bi se utvrdila mehanička svojstva potrebno je provesti dogovorena normirana laboratorijska ispitivanja ispitnih tijela koja mogu biti iz poluproizvoda ili gotovih dijelova.

Tako je jedan od važnijih mehaničkih svojstava i mjera poissonovog faktora. Cilj ovog rada je prikazati osnovna mehanička svojstva polimernih materijala te u eksperimentalnom dijelu prikazati vrijednosti poissonovog faktora za određene polimerne materijale različitih mehaničkih svojstava i naknadna usporedba dobivenih rezultata s literaturom.

## 2. POLIMERNI MATERIJALI

Najšira definicija polimera s gledišta strukture tvari je da su to prirodne i sintetičke, organske i anorganske tvari građene od makromolekula gdje ona predstavlja osnovnu strukturnu jedinicu polimera. Primjerice, kod metala osnovna strukturna jedinica je atom [1].

Makromolekula je molekula sastavljena od velikog broja organiziranih atoma koji tvore ponavljajuće jedinice odnosno mere. Polimer potječe od grčkog jezika gdje “poli” (grč. *poly*) označava mnogo, dok “mer” (grč. *meros*) označava česticu [1].

Polimeri su kondenzirani sustavi makromolekula što znači da oni postoje samo u čvrstom i kapljevitom stanju, a ne i u plinovitom stanju. Budući da su polimeri međusobno čvrstim vezama povezane makromolekule, jednostavno je nemoguće postojanje polimera u plinovitom stanju [1].

Polimerizati su sintetske polimerne tvari koji se proizvode od odgovarajućih monomera dobivenih od različitih sirovina poput nafte, zemnog plina ili ugljena preko procesa polimerizacije. Tijekom procesa polimerizacije vezivanjem jednostavnijih niskomolekulnih spojeva (monomera) nastaje polimerna molekula kao složenija struktura [2].

Polimeri se sastoje od linearnih, granatih ili umreženih makromolekula kojima su gradivne ponavljajuće jedinice meri. Polimerizacija je u suštini stvaranje strukture polimera lančanjem uz umrežavanje ili bez njega. Stupanj polimerizacije je promjenjiva veličina koja ovisi o uvjetima polimerizacije te predstavlja broj mera u polimernoj makromolekuli. Ona ima veliki utjecaj na svojstva polimernih materijala, što je stupanj polimerizacije veći to su uporabna svojstva nekog polimera bolja. [2]

U građi polimera značajne su organske molekule koje mogu dovesti do makromolekularnih struktura. To su molekule nezasićenih ugljikovodika, odnosno molekule koje u strukturi imaju dvostruke ili trostruke veze. [2].

Slika 2.1 prikazuje tip lančanih, granatih i umreženih makromolekula u polimerima.



Slika 2.1. Prikaz tipova različitih polimernih molekula [3]

## 2.1. Klasifikacija polimera

Polimere možemo klasificirati prema sljedećim načelima [1]:

- I. Prema porijeklu nastajanja:
  - prirodni polimeri (celuloza, kaučuk)
  - sintetski polimeri
- II. Prema reakciji polimerizacije:
  - adicijski (lančani)
  - kondenzacijski (stupnjeviti)
- III. Prema vrsti veza između makromolekula i kako se one ponašaju pri zagrijavanju:
  - plastomeri
  - elastomeri
  - duromeri
  - elastoplastomeri
- IV. Prema vrsti ponavljanih jedinica
  - homopolimeri (jedna vrsta ponavljanih jedinica)
  - kopolimeri (dviije ili više vrsta ponavljanih jedinica)

## 2.2. Tehnički uporabljivi polimerni materijali

Polimerizati, odnosno čisti polimeri rijetko su primjenjivi u tehničke svrhe, posebice kada se radi o popriličnim mehaničkim opterećenjima (konstrukcijska primjena). Iz tog se razloga polimernim

materijalima smatraju oni materijali koji su dobiveni nakon što je polimeru dodan neki dodatak te se primjenjuju i posebni postupci toplog oblikovanja [4].

Tablica 2.1 prikazuje pregled dodataka čistim polimerima te primjer i opis njihovih djelovanja.

**Tablica 2.1. Dodaci čistim polimerima [4]**

Naziv skupine dodataka	Primjer i opis djelovanja
REAKCIJSKE TVARI	Pjenila, dodaci za smanjenje gorivosti, umreživala
MODIFIKATORI MEHANIČKIH SVOJSTAVA	Omekšala, dodaci za povišenje žilavosti, punila, prijanjala, ojačavala (vlakna, viskeri, organska i anorganska ojačavala, celuloza, čađa)
MODIFIKATORI POVRŠINSKIH SVOJSTAVA	Vanjska maziva, regulatori adhezivnosti, antistatici, dodaci za smanjenje sljubljanja (blokiranja), dodaci za smanjenje neravnina na površini
MODIFIKATORI OPTIČKIH SVOJSTAVA	Bojila, pigmenti
DODACI ZA PRODULJENJE TRAJNOSTI (POSTOJANOSTI) PROIZVODA	Svjetlosni stabilizatori, antioksidansi, antistatici, biocidi (tvari za sprječavanje rasta mikroorganizama i sličnih razgrađivača)
DODACI ZA POBOLJŠANJE PRERADLJIVOSTI	Maziva, odvajala, punila, toplinski stabilizatori, regulatori viskoznosti, tiksotropni dodaci
OSTALO	Mirisi, dezodoransi

Tablica 2.1 može se nadopuniti objašnjenjem svrhe dodavanja važnijih dodataka uz navođenje nekih primjera

**Tablica 2.2. Primjeri dodataka i svrha primjene [4]**

Naziv dodatka	Svrha dodavanja	Primjeri dodatka
PUNILO	Smanjenje cijene materijala, modificiranje preradbenih i toplinskih svojstava	Drvo i kameno brašno
OMEKŠAVALO	Postizanje savitljivosti	Teško hlapiva organska otapala
OJAČAVALO	Povišenje rastezne čvrstoće i rasteznog modula elastičnosti (krutosti)	Vlakna (staklena, ugljična, aramidna), metalne žice
STABILIZATOR	Smanjenje utjecaja UV-zraka i usporavanje starenja	
ANTISTATIK	Smanjenje elektrostatičkog nabijanja	
DODATAK ZA SAMOGASIVOST	Postizanje samogasivosti	
BOJILO, PIGMENT	Postizanje željenog obojenja	

### 2.3. Struktura i svojstva polimera

Polimeri se razlikuju međusobno te ujedno i od ostalih materijala po svojim strukturnim karakteristikama u koje spadaju veličina makromolekula i neograničena mogućnost strukturnih varijacija. Struktura polimera podrazumijeva dvije razine: struktura pojedinih makromolekula (mikrostruktura) i struktura ukupnog polimera (nadmolekulna struktura-morfologija) [1].

Struktura ukupnog polimera ovisi o [1]:








- Vrsti veza između makromolekula
- Slaganju makromolekula

Vrste veza kod polimernih materijala mogu biti [1]:

- Primarne (međuatomske, kemijske) – kovalentne veze kojima se uglavnom povezuju atomi koji tvore temeljni lanac makromolekula
- Sekundarne (međumolekulne, fizikalne) – Van der Waalsove i vodikove koje su prisutne uglavnom između molekula

Kemijski sastav, veličina i vrsta supstituenata, pravilnost u rasporedu lanaca makromolekula, vrsta i učestalost polarnih grupa, pojava umreživanja, vrsta i broj ogranaka (grana), prisutnost vodikovih veza, fleksibilnost lanaca itd. samo su neki od parametara o kojima ovise fizikalna svojstva polimera. Utjecanjem na granatost molekula, veličinu molekulne mase i na uređenost strukture (stupanj kristalnosti) može se znatno utjecati na svojstva polimera koja su od velikog značaja za tehničku primjenu. [4]

Klasifikacija polimera zavisi o strukturi koja utječe na mehanička svojstva, pa se tako polimeri mogu podijeliti u tri skupine s obzirom na njihovo ponašanje pri zagrijavanju. Prema tome razlikujemo plastomere, elastomere i duromere i elastoplastomere. Na slici 2.2 prikazane su strukture polimera prema vrlo često primjenjivanom pristupu klasifikaciji polimera. [4]

Vrste polimera Struktura	PLASTOMERI				ELASTOMERI		DUROMERI
	amorfni		kristalasti		elasto-plastomeri	umreženi	
	linearna	granata	linearna		rahlo umrežena		
shematski prikaz strukture							
strukturna sredenost	amorfna		djelomice kristalna, izotropna	djelomice kristalna, anizotropna	amorfna do slabo sredena		amorfna

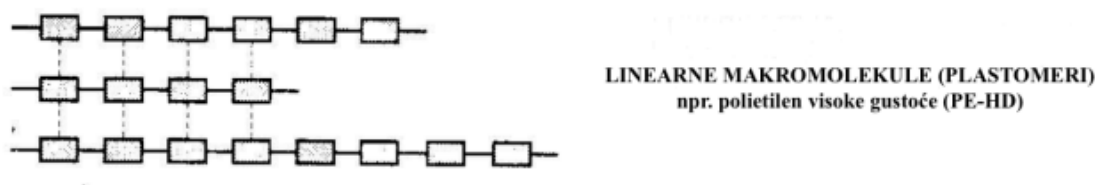
Slika 2.2. Strukture polimera [5]

### 2.3.1. *Plastomeri*

Kod zagrijavanja omekšavaju, a pri ponovnom snižavanju temperature se vraćaju u čvrsto stanje. Pri povećanju temperature dolazi do nepravilnog gibanja atoma oko ravnotežnog položaja, te

naposljetku dolazi do prekida veza između atoma. Povezani su isključivo sekundarnim vezama koje kod zagrijavanja slabe i otpuštaju. Ukoliko dođe do prekoračenja određene temperature dolazi do razlaganja sekundarnih veza i polimer prelazi u taljevinu. S obzirom na svojstva sekundarnih veza, ciklus se može teoretski stalno ponavljati (pogodno za reciklažu). [5]

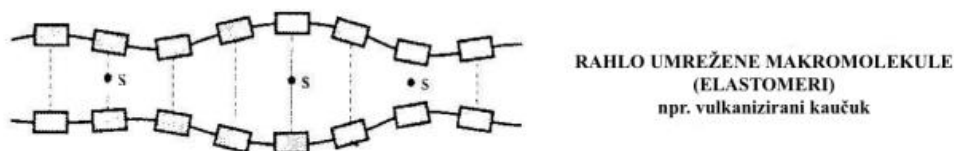
Slika 2.3 prikazuje linearne makromolekule plastomera.



Slika 2.3. Linearne makromolekule [5]

### 2.3.2. *Elastomeri*

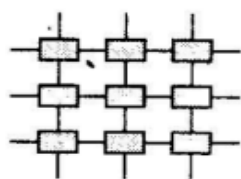
Imaju izraženo svojstvo elastičnosti zbog rahlo umrežene strukture te su makromolekule povezane primarnim i sekundarnim vezama. Oblikuju se (prije postupka vulkanizacije) u omekšanom stanju. Podložni su velikim rastezanjima (preko nekoliko stotina % pri sobnoj temperaturi), dok se kod rasterećenja vraćaju u prvobitni oblik. Slika 2.4 prikazuje rahlo umrežene makromolekule elastomera. [5]



Slika 2.4. Rahlo umrežene makromolekule [5]

### 2.3.3. *Duromeri*

Ne mogu omekšati pri zagrijavanju (u stanju nakon prerade kada je struktura potpuno umrežena, odnosno kada u materijalu postoje samo primarne veze). U određenim fazama prerade i dobivanja omekšavaju ako ih se podvrgne visokim temperaturama. Slika 2.5 prikazuje potpuno umrežene makromolekule duromera. [5]



POTPUNO (PROSTORNO) UMREŽENE  
MAKROMOLEKULE (DUROMERI)  
npr. fenol-formaldehidna smola

Slika 2.5. Potpuno umrežene makromolekule [5]

#### 2.3.4. *Elastoplastomeri*

Ova skupina polimernih materijala kombinira svojstva plastomera i elastomera u jednom, dok pritom zadržavaju strukturu rahlo prostorno umreženih makromolekula. Oni su sastavljeni od nekih polimernih materijala u kombinaciji sa nekim elastomernim materijalom. Njihova prednost je što se mogu oblikovati procesima koji se koriste u preradi plastomera, dok u isto vrijeme zadržavaju svojstvo elastičnosti poput elastomera. [5]

#### 2.3.5. *Obilježja temeljnih skupina polimernih materijala*

Tablica 2.3 prikazuje obilježja navedenih skupina polimernih materijala na temelju kojih je moguće prikazati njihovu sistematizaciju.

Tablica 2.3. Obilježja osnovnih skupina polimernih materijala [4]

Naziv	Obilježja obzirom na:			Makromolekule
	Taljenje	Topljenje	Bubrenje	
DUROMERI	Netaljivi	Netopljivi	Ne bubre	Gusto prostorno umrežene
PLASTOMERI	Taljivi	Topljivi	Bubre	Linearne i razgranate
ELASTOMERI	Netaljivi	Netopljivi	Bubre	Rahlo prostorno umrežene
ELASTOPLASTOMERI	Taljivi	Topljivi	Ne bubre	Rahlo prostorno umrežene

#### 2.3.6. *Svojstva polimernih materijala*

Iz ranije navedenih klasifikacija polimernih materijala može se zaključiti kako je za praktičnu primjenu polimerne materijale smisleno klasificirati na temelju [4]:

- Načina dobivanja
- Ponašanja pri zagrijavanju i



- Svojstava i primjene

Nadalje će biti opisana neka od svojstava polimernih materijala te njihove specifičnosti. Svojstva se mogu definirati kao promjene stanja, reakcije ili bilo kakve druge promjene izazvane djelovanjem vanjskih ili unutarnjih čimbenika. [4]

Uporabna svojstva u zavisnosti su s proizvodnim postupcima budući da kod istog kemijskog sastava materijala, on može pokazivati razlike s obzirom na restrukturiranost polimernog lanca, stupanj i obilježja orijentiranosti i kristalnosti. [4]

Tablice 2.4 i 2.5 prikazuju pregled svojstava i utjecajne čimbenike o kojima bi trebalo razmišljati prilikom konstruiranja s polimernim materijalima i njihovoj primjeni. [6]

**Tablica 2.4. Važnija svojstva koje treba uzeti u obzir pri odabiru polimernih materijala [6]**

Skupina svojstava	Čimbenici i svojstva
MEHANIČKA	Vrsta i veličina naprezanja u normalnom radu Vrsta dinamičkog opterećenja i vrijeme pod opterećenjem Otpornost na zamor Dozvoljene deformacije Otpornost na udarce Razni tipovi opterećenja
TOPLINSKA	Uobičajeno temperaturno radno područje Minimalne i maksimalne temperature kod primjene
KEMIJSKA	Mogući kontakti s otapalima i agresivnim parama Reaktivnost s kiselinama, bazama, vodom... Intenzitet upijanja vode Izloženost UV-zrakama i atmosferski utjecajima; starenje Erozija zbog djelovanja pijeska, kiše i slično Izloženost napadima gljivica, bakterija, kukaca...
ELEKTRIČNA	Otpornost Gubitak dielektričnosti Pojava statičkog elektriciteta
TRIBOLOŠKA	Otpornost na trošenje Faktor trenja

**Tablica 2.5. Važnija utjecajna svojstva koje treba uzeti u obzir pri odabiru polimernih materijala – nastavak [6]**

SIGURNOSNA	Zapaljivost Otrovnost dodataka ili produkata raspadanja polimerizata
ESTETSKA	Prozirnost Kvaliteta i izgled površine Slaganje boja, postojanost boja
OPĆA	Tolerancije i dimenzijska stabilnost Masa Veličina – prostorna ograničenja Očekivani životni vijek Kompatibilnost s normama i specifikacijama Ekološka prihvatljivost Izlučivanje dodataka Propusnost prema parama i plinovima
PROIZVODNA	Izbor proizvodnog procesa Metode montaže Završna obrada Kontrola kvalitete i provjera
EKONOMSKA	Materijalni troškovi Kapitalni troškovi: kalupi i razni strojevi Brzina proizvodnje Predviđeni broj odljevaka (proizvoda) Operativni troškovi proizvoda (održavanje, potrošnja energije...)

Kod odabira materijala za konstrukcijsku primjenu govori se zapravo o usklađivanju mnogobrojnih mehaničkih, fizikalnih, kemijskih i drugih svojstava koja materijali posjeduju, a ujedno treba voditi računa i o ekonomskoj opravdanosti izbora. Odabiru materijala treba pristupiti pažljivo imajući u vidu svojstva polimera i njihovih specifičnosti koje odstupaju od ostalih konstrukcijskih materijala. [6]

Kod konstruiranja s polimernim materijalima, potencijalne greške mogu se dogoditi s obzirom na činjenicu da postoje mnogi tipovi polimera vrlo različitih svojstava od kojih neka nisu na prvu očita. [6]

Treba imati na umu da kod polimernih materijala svojstva velikim dijelom ovise o proizvodnom postupku. Prilikom konstruiranja s polimerima važno je [6]:

- Pravilan odabir materijala s obzirom na njegova svojstva i ograničenja
- Uzeti u obzir razlike u ponašanju između polimera i ostalih skupina materijala
- Uzeti u obzir utjecaj proizvodnog postupka i oblika kalupa prilikom konstruiranja proizvoda
- Primijeniti nova konstrukcijska pravila i koncepte primijenjene polimerima

Pri odabiru materijala vrlo je važno ponajprije odrediti svojstva koja su ključna za funkciju konstrukcijskog elementa. Već u toj fazi ograničavamo mogućnosti izbora materijala. Često se radi o više svojstava koje neki materijal mora imati i poželjne su kombinacije tih svojstava u određenim primjenama, a ujedno ih mogu dijeliti s većim brojem materijala. Preliminarni izbor materijala svodi se na odbacivanje onih koji ne zadovoljavaju čak ni osnovne zahtjeve i kriterije koje im postavlja funkcija proizvoda. [6]

#### 2.3.6.1. Prednosti i nedostaci polimernih materijala

Potrebno je i istaknuti prednosti i nedostatke polimernih materijala s obzirom na druge materijale koji se upotrebljavaju u sličnim konstrukcijskim primjenama prema tablici 2.6.

**Tablica 2.6. Prednosti i nedostaci polimernih materijala [4]**

<b>Prednost</b>	<b>Nedostatak</b>
mala gustoća	ovisnost svojstva o raznim faktorima
dobra kemijska postojanost	veća toplinska rastezljivost
dobra otpornost na trošenje	nizak modul elastičnosti
mali faktor trenja	mala površinska tvrdoća
dobra toplinska i elektroizolacijska svojstva	mala toplinska provodnost
preradljivost deformiranjem pri niskim temp.	utjecaj prerade na svojstva
ekonomična serijska izrada dijelova	neekonomična proizvodnja malih serija

Polimerni materijali upotrebljavaju se za izradu dijelova koji nisu visoko mehanički opterećeni, a ujedno da radna temperatura nije previsoka. Izabiru se prema načelima: manje gustoće, dobrih izolacijskih svojstava, izrazito lake oblikovljivosti, recikličnosti, mogućnosti modificiranja boje površine i modificiranja izgleda i drugih spomenutih svojstava u odnosu na druge materijale. [4]

### 3. MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA

Osnovni i ujedno najvažniji zahtjevi za konstruiranje vezani su za funkcioniranje sklopa ili cijele konstrukcije s naglaskom na cijelo životni vijek materijala, odnosno eksploataбилnost. Eksploataбилnost predočuje ponašanje materijala pri njegovoj uporabi, a pri tome treba voditi računa o [4]:

- Postojanosti dimenzija i oblika konstrukcije - mehanička svojstva materijala
- Održavanju cjelovitosti konstrukcije - otpornost na lom za koju su bitna mehanička svojstva materijala
- Sprječavanju oštećenja površine zbog korozije i trošenja materijala te sličnih procesa dotrajanja materijala
- Zadržavanju svih fizikalnih svojstva koja su bitna za održavanje funkcija proizvodu za vrijeme trajanja njegove uporabe.

Mehanička svojstva povezana su s ponašanjem materijala pod opterećenjem kod rasteznih, tlačnih, savojnih te smičnih naprezanja. Mehaničko ponašanje materijala opisuje reakciju materijala na mehanička opterećenja ili deformacije. [7]

Mehanička svojstva vrlo su važna jer se temeljem njih, uz fizikalna i kemijska svojstva, dimenzioniraju dijelovi sklopova i elementi konstrukcija. Prilikom dimenzioniranja neophodno je uzeti u obzir intenzitet, vrstu i trajanje svih mehaničkih opterećenja koja se mogu javiti tijekom eksploatacije strojnog dijela. Upravo se iz tih razloga, za određene eksploatacijske uvjete, dijelovi konstrukcija dimenzioniraju prema osnovi mehaničkih svojstava koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala za određene uvjete eksploatacije. Svrha toga je kako se tijekom eksploatacije ne bi pojavila plastična deformacija ili lom materijala što bi na posljeticu onemogućilo funkcionalni rad nekog manjeg dijela ili pak čitave konstrukcije. [7]

Mehanička svojstva su produkt strukturnog stanja materijala. Tehnološkim postupkom obrađujemo materijal određenog kemijskog sastava što nam govori o strukturnom stanju materijala. Dakle, primjenom odgovarajućeg tehnološkog postupka postizemo ciljano strukturno stanje koje nam daje željena mehanička svojstva materijala. [7]

Najdostupnija, a ujedno i najpotpunija baza podataka o svojstvima materijala proizlazi iz dogovorenih normiranih laboratorijskih ispitivanja ispitnih tijela koja mogu biti iz poluproizvoda

ili gotovih dijelova. Time dobivamo usporedive podatke koji imaju primarnu važnost u proračunu konstrukcija, odnosno izboru materijala. [4]

Pa se tako mehanička svojstva utvrđuju tehničkim ispitivanjima u laboratorijskim uvjetima. Pri ispitivanju se nastoje imitirati uvjeti u kojima će strojni dio izrađen od određenog materijala biti eksploatiran. [7]

Sistematizacija mehaničkih svojstava i uvjeta ispitivanja [7]:

- |                                 |  |
|---------------------------------|--|
| Način djelovanja opterećenja    | <ul style="list-style-type: none"><li>• Rastezanje</li><li>• Pritisak</li><li>• Uvijanje ili torzija</li><li>• Smicanje ili odrez</li><li>• Savijanje</li></ul>  |
| Brzina djelovanja opterećenja   | <ul style="list-style-type: none"><li>• Statičko</li><li>• Dinamičko</li><li>• Promjenjivo</li><li>• Udarno</li></ul>  |
| Trajanje djelovanja opterećenja | <ul style="list-style-type: none"><li>• Kratkotrajno</li><li>• Dugotrajno</li></ul>  |
| Vanjski uvjeti ispitivanja      | <ul style="list-style-type: none"><li>• Temperatura ispitivanja<ul style="list-style-type: none"><li>- normalna (okolna)</li><li>- snižena</li><li>- povišena</li></ul></li><li>• Okolni medij</li></ul> |

Uobičajena mehanička svojstva koja susrećemo su: granica tečenja, konvencionalna granica tečenja, čvrstoća, modul elastičnosti, deformabilnost (uzdužna i poprečna), statička i dinamička izdržljivost i druga. [7]

### 3.1. Mehanička svojstva polimernih materijala

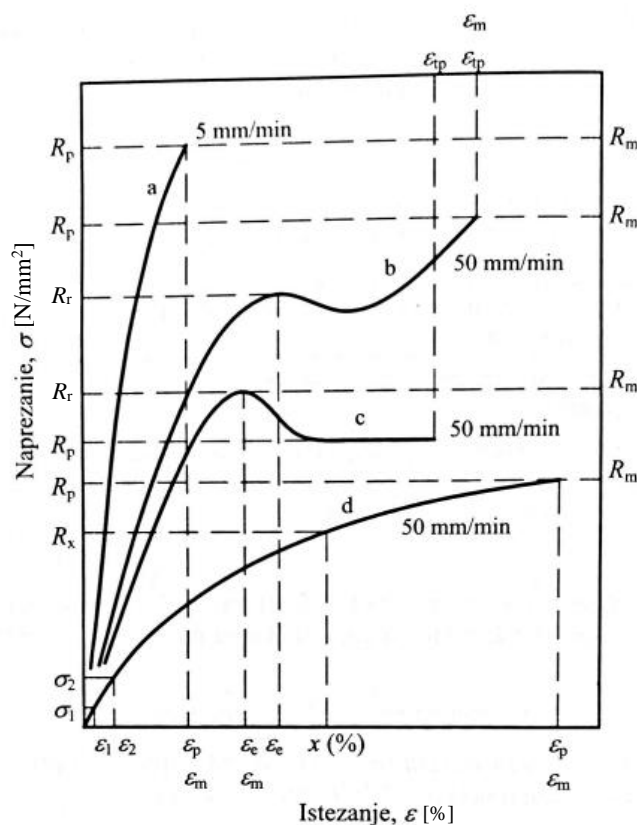
U nastavku je predstavljen jedan od postojećih načina podjele mehaničkih svojstava kod polimernih materijala s naglaskom na utjecaj trajanja opterećenja na ispitno tijelo. Dan je pregled mehaničkih svojstava u tablici 3.1. [4]

**Tablica 3.1. Pregled mehaničkih svojstava s obzirom na trajanje opterećenja [4]**

MEHANIČKA SVOJSTVA			
KRATKOTRAJNO OPTEREĆENJE		DUGOTRAJNO OPTEREĆENJE	
Udarno opterećenje	Statičko opterećenje	Statičko opterećenje	Dinamičko opterećenje
-Žilavost	- čvrstoća - modul elastičnosti - tvrdoća	- Statička izdržljivost (puzanje)	Dinamička izdržljivost (umor materijala)

Kratkotrajno opterećenje je ono opterećenje ispitnog tijela koje traje oko jedne minute od početka ispitivanja (opterećivanja), pa sve do kraja ispitivanja (opterećivanja). Prirast proizvedenog naprezanja mora biti  $\leq 10 \text{ N/mm}^2$  da bi test bio u području statičkog ispitivanja, koje se primjenjuje za utvrđivanje osnovnih mehaničkih svojstava materijala. [8]

Slika 3.1 prikazuje izgled  $\sigma - \varepsilon$  (naprezanje - istežanje) dijagrama za tipična ponašanja polimernih materijala uslijed rasteznog opterećenja s označenim karakterističnim točkama na krivuljama.



Slika 3.1. Karakteristični dijagrami “naprezanje – istezanje” glavnih skupina polimernih materijala [6]

Parametri naprezanja i istezanja sa slike iznad su sljedeći [6]:

- Granica razvlačenja (tečenja)  $R_r$ : vrijednost naprezanja pri kojem nagib krivulje u dijagramu prvi put postigne vrijednost nula.
- Rastezna čvrstoća  $R_m$ : rastezno naprezanje uzrokuje najveća sila na početnu površinu presjeka
- Prekidna čvrstoća  $R_p$ : naprezanje prilikom loma, uzrokuje prekidna sila na početnu površinu presjeka
- Naprezanje  $R_x$  povezano s  $x$  % istezanja: kod materijala bez izražene granice razvlačenja kod kojih do loma dolazi nakon velikih deformacija (izrazito nelinearno ponašanje materijala)
- Istezanje pri rasteznoj čvrstoći  $\varepsilon_m$ : istezanje kod rastezne čvrstoće  $R_m$
- Istezanje razvlačenja (tečenja)  $\varepsilon_e$ : istezanje na granici razvlačenja



- Prekidno istezanje  $\varepsilon_p$ : istezanje u trenutku prekida materijala koji nema izraženu granicu razvlačenja.
- Nazivno prekidno istezanje  $\varepsilon_{tp}$ : istezanje u trenutku prekida materijala  $R_p$  koji ima izraženu granicu razvlačenja

Na dijagramu (prema slici 6.) slovom “a” označeni su krhki polimerni materijali, odnosno duromeri i amorfni plastomeri. slovom “b” i “c” označeni su žilavi polimerni materijali, odnosno kristalasti plastomeri, dok su slovom “d” označeni polimerni materijali bez izražene granice tečenja to jest elastomeri. [6]

### 3.1.1. Granica razvlačenja (tečenja)

Granica razvlačenja ( $R_r$ ) predstavlja jedan od osnovnih pokazatelja mehaničke opteretivosti materijala. Dostizanje vrijednosti granice razvlačenja u materijalu se počinje javljati plastična deformacija. [9]

Granica razvlačenja utvrđuje se statičkim kratkotrajnim ispitivanjem. Prilikom testa opterećenje može biti rastezno, pritisno, savojno i uvojno (torzijsko). [9]

Granica razvlačenja je ono najniže naprezanje pri rasteznom opterećenju kod kojeg nastaje značajnija deformacija bez daljnjeg povišenja sile djelovanja na ispitno tijelo. Utvrđuje se na temelju podataka iz  $\sigma - \varepsilon$  dijagrama, a jednaka je omjeru rastezne sile i poprečnog presjeka ispitnog tijela prema [9]:

$$R_r = \frac{F_r}{A_0} \quad (1)$$

Gdje je:

$R_r$  – granica razvlačenja,  $N/mm^2$

$F_r$  - sila tečenja, N

$A_0$  - površina poprečnog presjeka ispitnog tijela,  $mm^2$

Kod polimernih materijala granica razvlačenja rijetko služi kao računaska vrijednost. Dijagrami puzanja ili *naprezanja - istezanja* daju podatke o dopuštenom naprezanju i istezanju pri rasteznom opterećenju, budući da neki polimerni materijali nemaju jasno definiranu granicu razvlačenja ili ona nije vidljiva iz dijagrama kako je prikazano na slici 3.1. [9]

### 3.1.2. Modul elastičnosti

Modul elastičnosti (Youngov modul elastičnosti) omjer je naprezanja i istežanja izazvanog tim naprežanjem u području elastičnih deformacija i dan je izrazom [9]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

Gdje je:

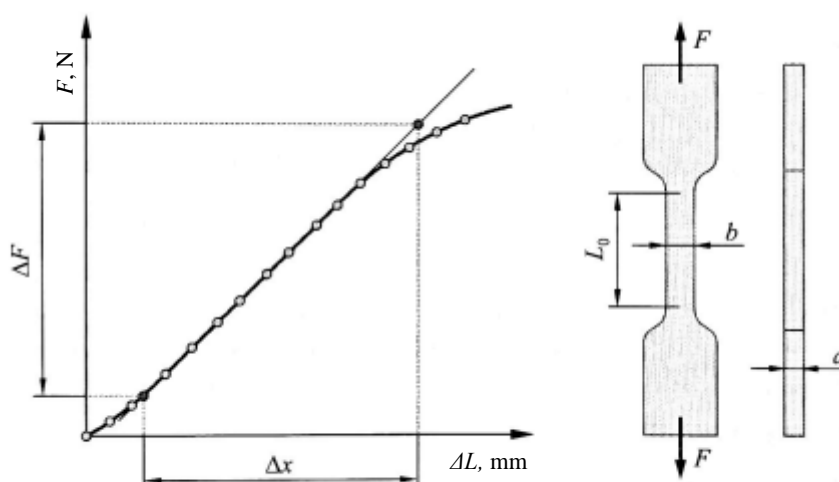
$E$  - modul elastičnosti, N/mm<sup>2</sup>

$\sigma$  - naprežanje, N/mm<sup>2</sup>

$\varepsilon$  - istežanje, %

U dijagramima *naprežanja-istežanja* (kod rasteznog opterećenja), modul rastezljivosti predstavlja koeficijent (nagib) Hookeovog pravca deformacija. [9]

Kod polimernih materijala važno je utvrđivanje tangentnog ili sekantnog modula elastičnosti budući da polimerni materijali imaju slabo izraženo područje Hookeovog zakona, ili uopće ne možemo uočiti linearno ponašanje polimernog materijala kod opterećivanja. Na slici 3.2 je prikazano utvrđivanje modula rastezljivosti. [9]



Slika 3.2. Utvrđivanje modula elastičnosti polimernih materijala [9]

Izraz preko kojeg se utvrđuje modul rastezljivosti glasi [9]:

$$E = \frac{l_0}{a \cdot b} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta x} \quad (3)$$

gdje je:

$l_0$  - mjerna duljina, mm

$a$  - debljina ispitnog tijela, mm

$b$  - širina na uskom dijelu ispitnog tijela, mm

$\Delta F$  - promjena vrijednosti sile, N

$\Delta x$  - produljenje, mm

Modul elastičnosti služi kao usporedna vrijednost, te nije prikladna za dimenzioniranje dijelova konstrukcija. S modulom elastičnosti također ne možemo imati uvid u ponašanje materijala pri dugotrajnom opterećenju. [9]

U tablici 3.2 prikazane su orijentacijske vrijednosti modula rasteznosti osnovnih skupina polimernih materijala. [4]

**Tablica 3.2. Vrijednosti modula rasteznosti osnovnih skupina polimernih materijala [4]**

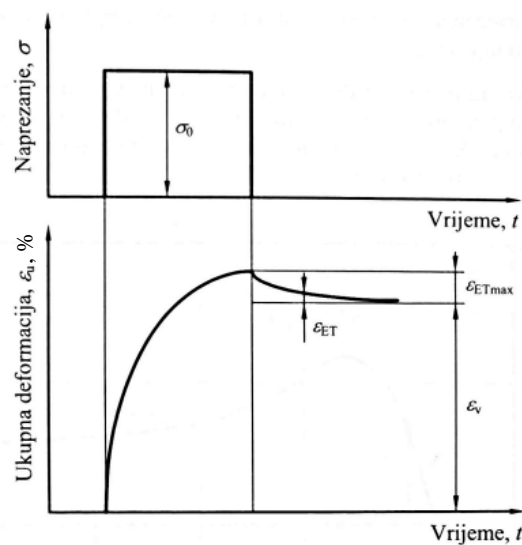
Skupina polimernih materijala		Modul rasteznosti, N/mm <sup>2</sup>
PLASTOMERI	amorfni, neojačani	2100...3500
	amorfni, ojačani	Okolo 7000
PLASTOMERI	kristalasti, neojačani	150...3200
	kristalasti, ojačani	5000...11000
ELASTOMERI		50...150
DUROMERI	neojačani	5000...12000
	ojačani	9000...15000 i više

### 3.1.3. Statička izdržljivost

Za polimerne materijale u konstrukcijskoj primjeni potrebno je poznavati njihova svojstva u uvjetima dugotrajnog opterećenja. Prema Tablici 3.1 gdje je navedeno statičko (dugotrajno

nepromjenjivo) i dinamičko (dugotrajno promjenjivo) opterećenje, može se doći do odgovarajućih svojstava polimernih materijala. [4]

Prilikom dugotrajnog statičkog opterećenja materijala dolazi do pojave puzanja materijala, dok se kod dinamičkog opterećenja javlja zamor materijala. Navedene pojave mogu se okarakterizirati preko “statičke izdržljivosti” i “dinamičke izdržljivosti” materijala gdje je statička izdržljivost najveće dugotrajno statičko naprezanje koje materijal može izdržati beskonačno dugo bez pojave loma ili postizanja granične deformacije. [4]



**Slika 3.3. Ponašanje polimernih materijala pri dugotrajnom statičkom opterećenju [6]**

Na slici 3.3 prikazan je dijagram i djelovanje dugotrajnog opterećenja na polimerni materijal te je vidljiva pojava puzanja pri opterećenju i relaksacije nakon završetka opterećenja. [4]

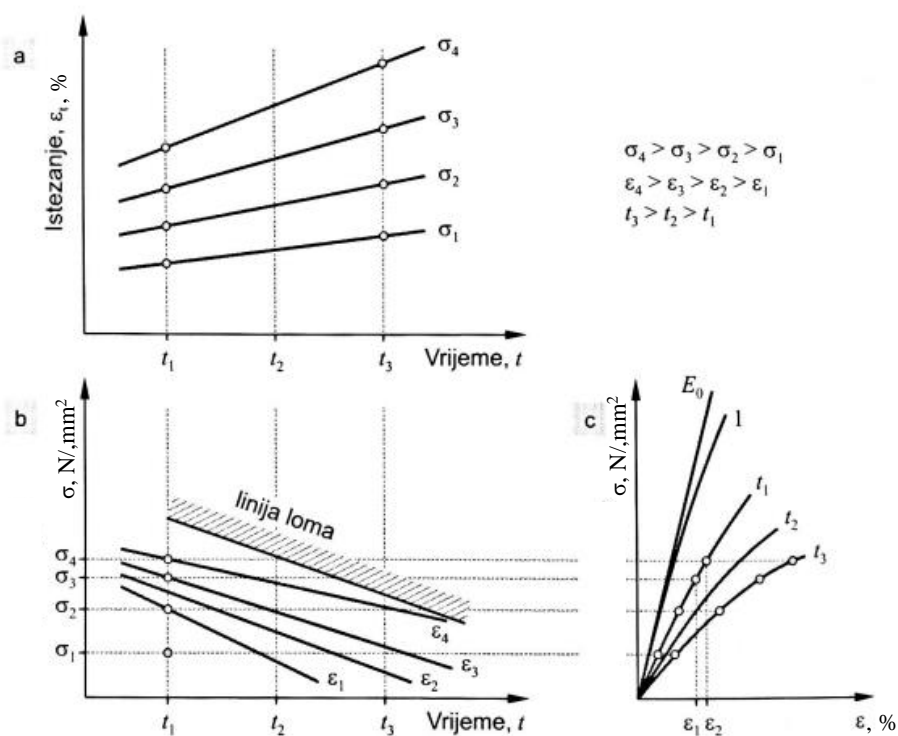
Sa dijagrama na slici 3.3 vidljivo je kako ukupna deformacija (istezanje)  $\epsilon_{uk}$  ponajviše ovisi o trajanju djelovanja sile. Deformacija se sastoji od viskozne deformacije  $\epsilon_v$  i entropijske elastične deformacije  $\epsilon_{et}$ . [6]

Viskozna deformacija nepovratna je deformacija ovisna o temperaturi i vremenu. Posljedica je promjene položaja molekula i dugog vremena koje im je potrebno za zauzimanje novog dugoročnije položaja. Entropijska deformacija je reverzibilna, odnosno povratna deformacija. Nakon trenutka prestanka djelovanja naprezanja elastična entropijska deformacija se smanjuje, a to je povezano s istezanjem i izravnivanjem polimernih lanaca molekula pri djelovanju rasteznog

naprezanja koji se nakon prestanka djelovanja opterećenja nastoje vratiti u početni položaj. Takvo ponašanje polimernih materijala znatno odstupa od ponašanja metalnih materijala, gdje se deformacije smatraju linearno elastičnima. Takvo ponašanje polimera posljedica je njihova sastava te molekulne i nadmolekulne strukture. [6]

### 3.1.3.1. Puzanje i relaksacija polimernih materijala

Za razliku od metala, polimeri (posebice plastomeri) skloni su puzanju već pri sobnoj temperaturi, odnosno rastu deformacije uz konstantno naprežanje tijekom vremena. Na slici 3.4. prikazano je rastezno opterećenje gdje je na osnovi vremenske linije istezanja pri konstantnoj temperaturi moguće prikazati dijagram *naprežanje – istezanje* s kritičnim naprežanjem. [9]



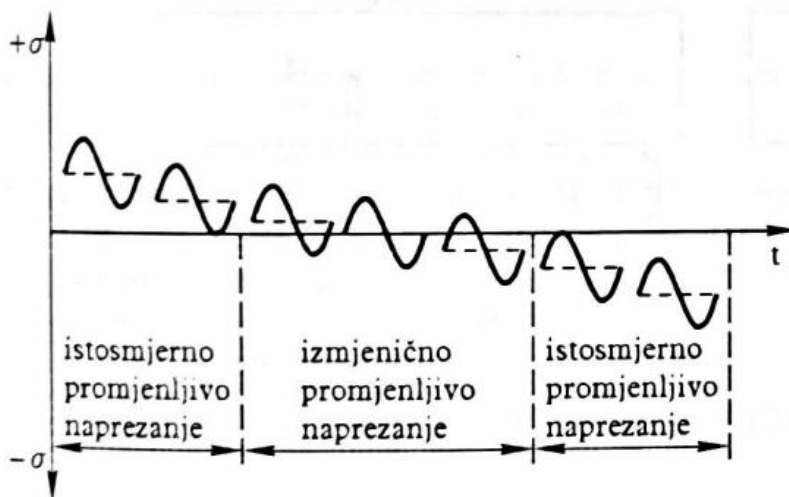
Slika 3.4. a) Krivulja puzanja  $\epsilon = f(t)$  s parametrom naprežanja  $\sigma$ , b) dijagram  $\sigma = f(t)$  s parametrom istezanje  $\epsilon$  i s linijom loma, c) dijagram *naprežanje – istezanje*  $\sigma = f(\epsilon)$  s parametrom vrijeme  $t$  [9]

Za većinu polimera već se prije loma mogu uočiti napukline ili smanjenje mehaničkih svojstava, posebice kod ispitivanja u različitim medijima. Kod ovakvih ispitivanja moguće je odrediti statičku izdržljivost materijala  $R_{m/t} = f(t)$ , npr.  $R_{m/t/1000}$  znači da je statička izdržljivost određena nakon 1000 sati. Ako temperatura nije navedena znači da je vrijednost dobivena pri sobnoj temperaturi. [9]

#### 3.1.4. Dinamička izdržljivost

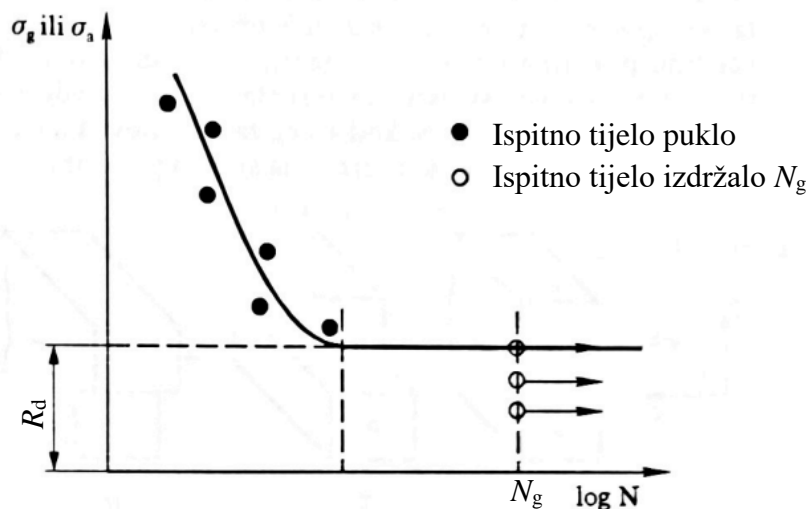
Dinamička izdržljivost ( $R_d$ ) je ono najviše dinamičko naprezanje koje materijal može podnijeti bez pojave loma beskonačno veliki broj ciklusa. Granični broj ciklusa ( $N_g$ ) određuje se iz razloga što nije moguće ispitno tijelo ispitivati beskonačno dugo. Smatra se ako ispitnici izdrže granični broj ciklusa da su oni dinamički izdržljivi. Vrijednost broja iznosi  $N_g = n \cdot 10^6$  ciklusa gdje je  $n$  1-10(20) ovisno o materijalu te svrsi uporabe materijala. [9]

Ispitivanja se provode promjenjivim u vlačnim, tlačnim, savojnim ili torzijskim opterećenjima. Ciklusi opterećenja kod standardnih ispitivanja najčešće su čisti izmjenični ili početni istosmjerni rastezni ciklusi prema slici 3.5. [9]



Slika 3.5. Različiti tipovi sinusoidnog promjenjivog opterećenja [5]

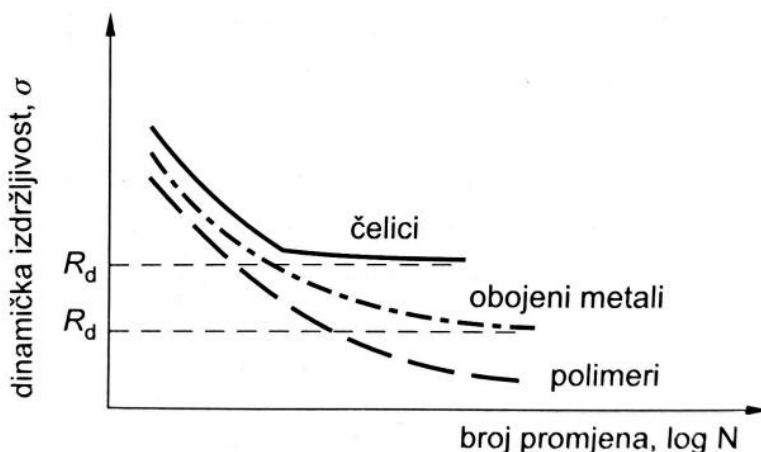
Za utvrđivanje dinamičke izdržljivosti odabire se jedan od tipova promjenjivog opterećenja, te se provodi tzv. Wöhlerov pokus, a rezultati ispitivanja prikazuju se u obliku Wöhlerove krivulje prema slici 3.6. [5]



Slika 3.6. Wöhlerov dijagram [5]

Najviše dinamičko (promjenljivo) naprezanje koje ispitna tijela izdrže bez pojave loma nakon gotovo beskonačnog broja ciklusa – predloženo graničnim brojem ciklusa  $N_g$  – naziva se dinamička izdržljivost  $R_d$ . Kod metalnih materijala krivulja se asimptotski približava vrijednosti dinamičke izdržljivosti, dok se kod polimernih materijala krivulja približava apscisi tako da se ne može pouzdano utvrditi dinamička izdržljivost. [5]

Polimerni materijali više nego drugi materijali prigušuju vibracije, a to dovodi do generiranja topline, što zbog slabe toplinske provodnosti dovodi do povišenja temperature materijala. Mehanička svojstva materijala znatno ovise o temperaturi pa se s time ponašanje polimernih materijala pri dinamičkom opterećenju razlikuje od ostalih konstrukcijskih materijala. Slika 3.7 prikazuje kako se kod polimernih materijala treba uzeti u obzir vremenski faktor i iz tog se razloga treba govoriti o “vremenskoj dinamičkoj izdržljivosti”. [4]

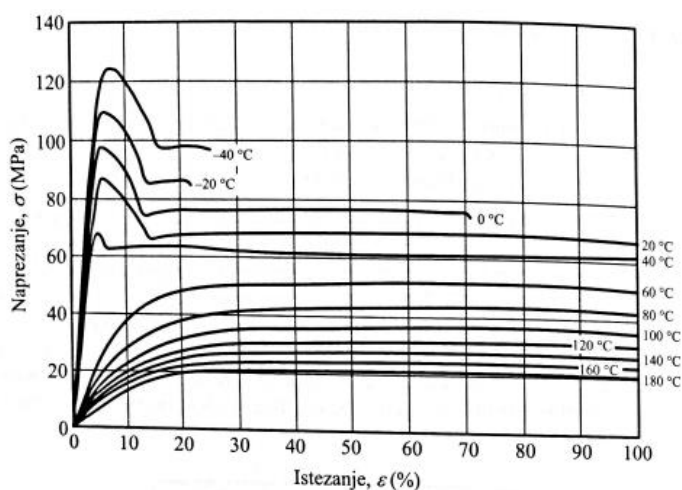


Slika 3.7. Ponašanje polimernih materijala pri dinamičkom opterećenju [4]

### 3.1.5. Utjecaji na mehanička svojstva

#### 3.1.5.1. Utjecaj temperature

Veliki utjecaj na mehanička svojstva ima temperatura što je jasno vidljivo iz  $\sigma - \epsilon$  dijagrama. Slika 3.8 prikazuje ovisnost mehaničkih svojstava suhog poliamida PA 66 o temperaturi okoline. Također se može primijetiti kako se s porastom temperature okoline na 40 °C događa znatnija promjena ukupnog ponašanja materijala, odnosno počinje se gubiti granica razvlačenja  $R_r$  koja je kod nižih temperatura jasno izražena. Također se može primijetiti kako je ukupno produljenje znatno povećano. [6]

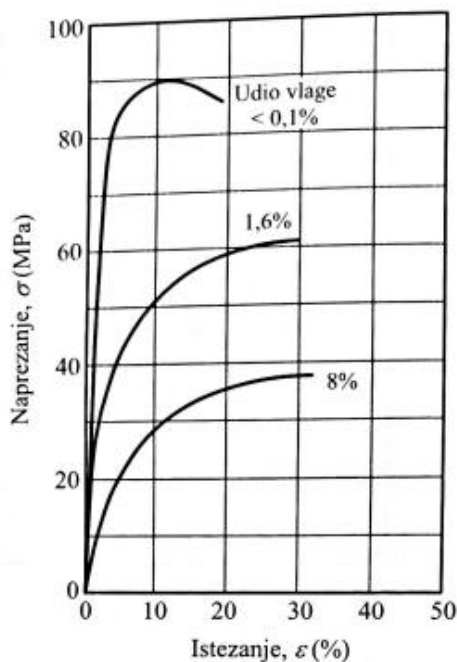


Slika 3.8. Ovisnost oblika  $\sigma - \epsilon$  dijagrama suhog poliamida (PA 66) o temperaturi okoline prilikom ispitivanja [6]



### 3.1.5.2. Utjecaj vlage

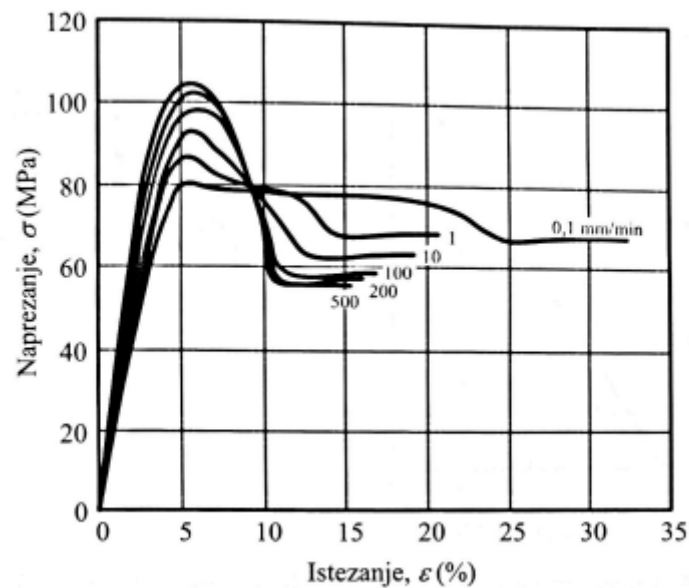
Povišeni udio vlage u polimernim materijalima može uzrokovati sniženje temperature staklastog prijelaza  $T_g$ , a s time dolazi do promjene mehanička svojstva. Tipični predstavnici polimernih materijala koji su skloni upijanju vlage je skupina poliamida, pa tako slika 3.9 prikazuje  $\sigma - \epsilon$  dijagram sa različitim udjelima vlage u strukturi poliamidnog polimernog materijala. [6]



Slika 3.9. Utjecaj udjela vlage u poliamidu (PA 66) na oblik  $\sigma - \epsilon$  dijagrama [6]

### 3.1.5.3. Utjecaj brzine deformiranja

Brzina deformiranja utječe na sposobnost relaksiranja novonastale deformacije polimernog materijala u njegovoj strukturi. Sposobnost relaksacije smanjuje se s povećanjem brzine deformiranja, a posljedica toga je povećanje vrijednosti granice razvlačenja  $R_T$  i sniženje prekidne čvrstoće  $R_p$ . Te promjene vidljive su na  $\sigma - \epsilon$  dijagramu (slika 3.10). [6]



Slika 3.10. Utjecaj brzine deformiranja suhog poliamida (PA 66) na oblik  $\sigma$  -  $\varepsilon$  dijagrama [6]

#### 3.1.5.4. Utjecaj trajanja opterećenja

Veliki utjecaj na mehanička svojstva kod polimernih materijala ima trajanje opterećenja kojem su izloženi. Deformacija materijala izloženog konstantnom naprezanju s vremenom raste. Taj efekt opisan je ranije pod nazivom puzanje materijala. Također, uz vrijeme, veliki utjecaj ima i veličina naprezanja. Ako je element izložen konstantnoj deformaciji, s vremenom će naprezanje opadati – relaksacija materijala. [6]

Kod modula puzanja  $E_C$  za određenu temperaturu i konstantno naprezanje  $\sigma$  koje vlada u materijalu određeno vrijeme  $t$ , npr. 1000 sati vrijedi [6]:

$$E_C = \frac{\sigma(= \text{konst.})}{\varepsilon(t)} \quad (4)$$

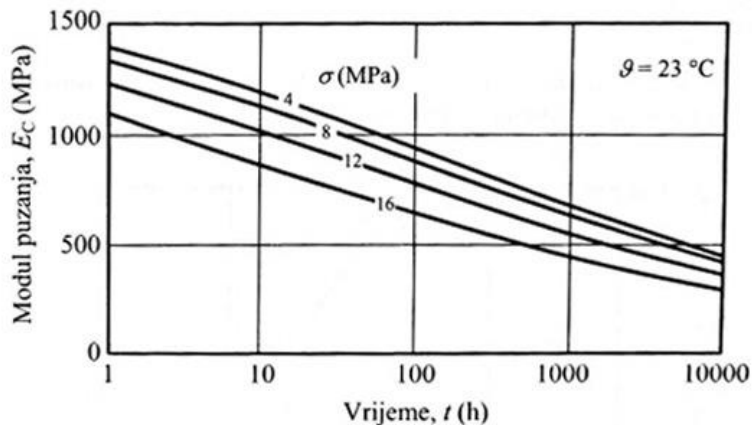
Gdje je:

$E_C$  – modul puzanja,  $\text{N/mm}^2$

$\sigma$  - naprezanje,  $\text{N/mm}^2$

$\varepsilon$  - istezanje, %

Na slici 3.11 prikazana je ovisnost modula puzanja o trajanju konstantnog naprezanja, odnosno opterećenja za poli(butilen-tereftalat) (PBT).



**Slika 3.11. Ovisnost modula puzanja  $E_c$  o trajanju naprezanja  $t$  za materijal PBT [6]**

Uvođenjem modula puzanja u proračune omogućuje se da se na jednostavan način uzme u obzir ovisnost deformacije o trajanju opterećenja.

Koristan je podatak i o djelovanju temperature i trajanja opterećenja na svojstva materijala. Povišena temperatura kojoj polimerni materijal može biti izložen djeluje na njega kao i produljeno vrijeme djelovanja opterećenja. Približno vrijedi da povišenje temperature okoline za  $10\text{ °C}$  jednako povećava deformaciju kao i 10 puta dulje trajanje opterećenja. [6]

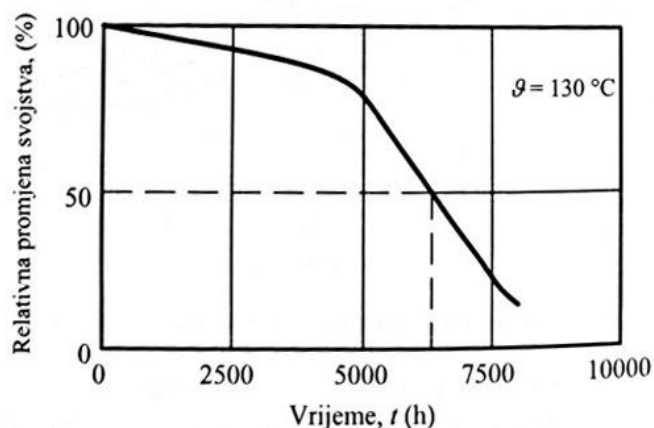
#### 3.1.5.5. Utjecaj dugotrajnog djelovanja topline

Kod dugotrajne izloženosti polimernih materijala djelovanju topline, odnosno povišenoj temperaturi javlja se posljedica nepovratne promjene u strukturi materijala nadmolekulnoj i molekularnoj razini. Promjene u strukturi povezane su i s promjenama makroskopskih svojstava od kojih su najbitnije one vezane za njegovu konstrukcijsku primjenu. Takve promjene se svakako moraju uzeti u obzir kod eksploatacije materijala u takvim uvjetima rada. [6]

Najčešće se ispituje utjecaj dugotrajnog djelovanja topline na: [6]

- Rasteznu čvrstoću
- Žilavost
- Električni probojni napon

U normi IEC 216 opisani su uvjeti i načini ispitivanja utjecaja dugotrajnog djelovanja topline na svojstva polimernih materijala. Rezultati ispitivanja su dijagrami koji pokazuju promjene vrijednosti pojedinog svojstva kao funkcije vremena uz konstantnu temperaturu okoline prema slici 3.12. [6]



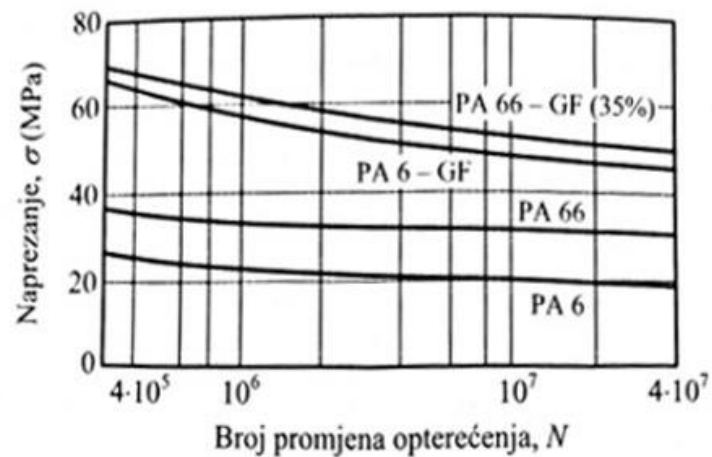
**Slika 6** Primjer dijagrama promjene nekog svojstva tijekom vremena pri određenoj temperaturi okoline [6]

S tim dijagramima moguće je dobiti informaciju o vremenu koje je potrebno da pri nekoj temperaturi vrijednost svojstva padne na zadanu vrijednost. Uobičajeni iznos je 50 % od vrijednosti na početku ispitivanja. Uvrštavanjem tih vrijednosti u dijagram *temperatura okoline – vrijeme* dobivaju se *Arrheniusovi pravci*, tj. dijagrami. [6]

U proračunima čvrstoće i dimenzioniranju elemenata od polimernih materijala primjenjuju se i faktori kojima se uzima u obzir djelovanje različitih vanjskih utjecaja. Dugotrajna izloženost povišenoj temperaturi jedan je od primjera takva utjecaja, a vrijednost tih faktora moguće je odrediti pomoću navedenih dijagrama. [6]

#### 3.1.5.6. Utjecaj dinamičkog opterećenja

Djelovanje izmjeničnih i pulsirajućih opterećenja na ponašanje polimernih materijala ispituje se dinamičkim rastezno - pritisnim ispitivanjima i ispitivanjima savijanjem. Rezultat tih ispitivanja su Wöhlerove krivulje u kojima se prikazuje pad čvrstoće materijala u ovisnosti o broju promjena opterećenja. Primjer takvog dijagrama dan je na slici 3.13. [6]



Slika 7 Wöhlerove krivulje za izmjenično savijanje za poliamide (PA 6) i (PA 66) [6]

Nedostatak tih podataka je što oni ne daju informaciju o povezanosti zamora polimernih materijala i promjena u njegovoj strukturi (nastajanje mehaničkog opterećenja). S toga je potrebno biti na oprezu kod uporabe i primjene podataka iz dijagrama za dimenzioniranje dinamički opterećenog konstrukcijskog elementa. [6]

#### 4. POISSONOV FAKTOR

Poissonov faktor  $\mu$  je mjera poissonovog efekta, deformacija (kontrakcije ili proširenja) poprečnog presjeka materijala u smjeru okomitom na djelovanje opterećenja. U slučaju da je materijal pod djelovanjem rasteznog opterećenja dolazi do kontrakcije poprečnog presjeka, dok u suprotnom dolazi do njegovog proširenja. Dakle, poissonov faktor je omjer relativne promjene dimenzija poprečnog presjeka i relativne promjene dimenzija ispitnog tijela u smjeru djelovanja opterećenja i dan je izrazom: [10]

$$\mu = -\frac{d\varepsilon_{trans}}{d\varepsilon_{axial}} = -\frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_x} = -\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_x} \quad (5)$$

Gdje je:

$\mu$  – poissonov faktor,

$\varepsilon_{trans}, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  – poprečno (transverzalno) suženje, %

$\varepsilon_{axial}, \varepsilon_x$  – uzdužno (aksijalno) produljenje, %

Za većinu materijala poissonov faktor ima vrijednost 0 – 0,5. U tablici 4.1 dan je prikaz poissonovog faktora za neke od materijala:

**Tablica 4.1. Poissonov faktor različitih materijala [11]**

MATERIJAL	POISSONOV FAKTOR
Guma	0,48-0,5
Olovo	0,431
Magnezij	0,35
Polistiren	0,34
Bakar	0,335
Aluminij	0,334
Mramor	0,2 - 0,3
Beton	0,1 - 0,2
Pluto	0

Iz tablice 4.1 je vidljivo kako neki materijali, poput pluta, mogu imati poissonov faktor jednak 0. To znači da ne dolazi do promjene dimenzija u poprečnom (transverzalnom) smjeru uslijed produljenja u aksijalnom smjeru. [11]

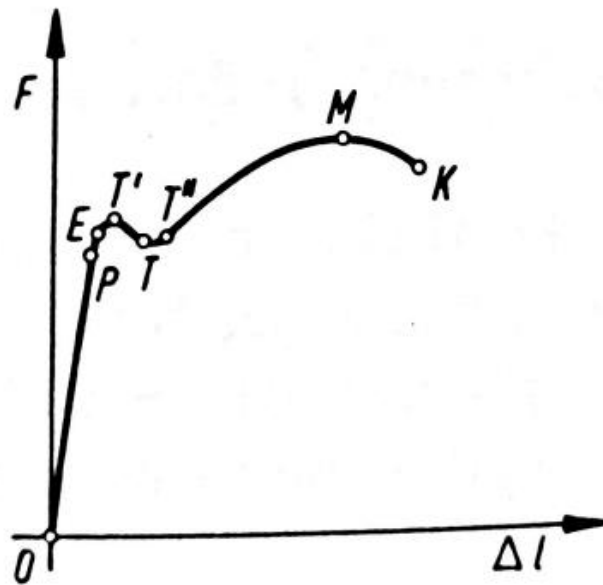
#### 4.1. Međusobna ovisnost naprezanja i deformacija

Ukoliko neko tijelo opteretimo, kao posljedica tog opterećenja dolazi do pojave naprezanja i deformacije. Što je to opterećenje više, to su više deformacije ali i naprezanja. Kod sniženja naprezanja smanjit će se i deformacije te zaključujemo kako su naprezanja i deformacije međusobno ovisni, odnosno: [12]

$$\sigma_{ij} = f(\varepsilon_{ij}), \varepsilon_{ij} = f_1(\sigma_{ij}) \quad (6)$$

Deformacije, naravno, ovise i o deformabilnosti tijela a ne samo o naprezanjima. Prema tome funkcija u izrazu 6 ima različiti oblik za različite materijale. Ovisnost naprezanja o deformacijama određuje se eksperimentalno, te kako je već spomenuto, najčešće se koriste pokusi rastezanja, sabijanja, i smicanja. Dijagrami ovisnosti sile  $F$  o promjeni duljine  $\Delta l$  prikazuju rezultate pokusa rastezanja i sabijanja. [12]

Na dijagramu sa slike 4.1 prikazano je nekoliko karakterističnih točaka. U prvom dijelu pokusa, od točke  $O$  do  $P$  javlja se linearna ovisnost naprezanja i deformacija. Nakon točke  $E$  materijal ulazi u trajnu, plastičnu deformaciju. Nakon dosizanja vrijednosti sile u točki  $T'$  dolazi do pada opterećenja, gdje je nakon točke  $T''$  potreban značajan rast opterećenja kako bi došlo do daljnjeg produljenja ispitnog tijela. opterećenje raste sve do točke  $M$  kada ono ponovno počinje opadati do pojave loma epruvete u točki  $K$  uz konstantni rast produljenja. [12]



Slika 4.1. Ovisnost sile  $F$  o produljenju  $\Delta l$  [12]

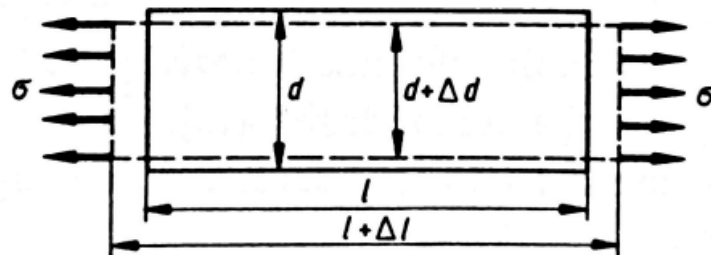
Putem mjerenja je ustanovljeno kako se ispitno tijelo nije samo produljilo za iznos  $\Delta l$  već dolazi i do suženja poprečnog presjeka za iznos  $\Delta d$ . Do točke  $T'$  poprečna kontrakcija jednaka je po duljini čitavog ispitnog tijela. Nakon točke  $T'$  dolazi do pojave suženja u nekom od presjeka koje sve više raste do pojave loma ispitnog tijela. To suženje naziva se vrat ispitnog tijela. [12]



#### 4.1.1. *Konstante elastičnosti*

Veličine  $E$  (modul elastičnosti),  $G$  (modul smicanja),  $\mu$  (Poissonov faktor),  $K$  (obujamni modul elastičnosti) predstavljaju elastična svojstva materijala i nazivaju se skupnim imenom konstante elastičnosti. Za elastično tijelo potrebno je poznavati svega dvije konstante elastičnosti dok se druge mogu iz njih izračunati. [12]

Na slici 4.2 prikazan je dio ispitnog tijela okruglog presjeka koja je jednoliko opterećena na rastezanje. Punom crtom prikazano je ispitno tijelo prije opterećenja, dok je isprekidanom crtom prikazano ispitno tijelo u deformiranom stanju nakon opterećenja. Početna duljina ispitnog tijela  $l$  povećala se za iznos  $\Delta l$ , a promjer se smanjio za  $\Delta d$ . Prema tome je pri rastezanju ispitnog tijela  $\Delta l > 0$ , a  $\Delta d < 0$ . [12]



Slika 4.2. Ilustracija Hookeova zakona [12]

S druge strane, kod pritiska imamo obrnutu situaciju: duljina  $l$  se smanjuje, a promjer  $d$  se povećava, tj.  $\Delta l < 0$ , a  $\Delta d > 0$ . prema tome vrijede sljedeći izrazi: [12]

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad \varepsilon_q = \frac{\Delta d}{d} \quad (7)$$

Gdje je:

$\varepsilon$  - prosječna uzdužna deformacija, %

$\varepsilon_q$  - prosječna poprečna deformacija, %

Kako se pri relativno malim deformacijama javlja svojstvo proporcionalnosti između opterećenja i produljenja, odnosno između naprezanja  $\sigma$  i uzdužne deformacije  $\varepsilon$ , pokusima je također pokazano kako postoji proporcionalnost između poprečne i uzdužne deformacije. Prema tome matematički izraz glasi ovako: [12]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (8)$$

$$\varepsilon_q = -\mu \cdot \varepsilon \quad (9)$$

Gdje su faktori proporcionalnosti:

$E$  – Youngov modul elastičnosti, N/mm<sup>2</sup>

$\mu$  – Poissonov faktor

Navedeni izrazi predstavljaju Hookeov zakon jednoosnog stanja naprezanja. Budući da su  $\varepsilon$  i  $\varepsilon_q$  uvijek suprotnog predznaka, Poissonov koeficijent je pozitivan broj. Kod izotropnih materijala iznosi  $0 \leq \mu \leq 0,5$ , dok je za većinu metala i metalnih legura  $\mu \approx 0,3$ . [12]

Na slici 4.3 prikazan je element na koji djeluje hidrostatički pritisak  $p$ . Prema Hookevom zakonu možemo napisati: [12]

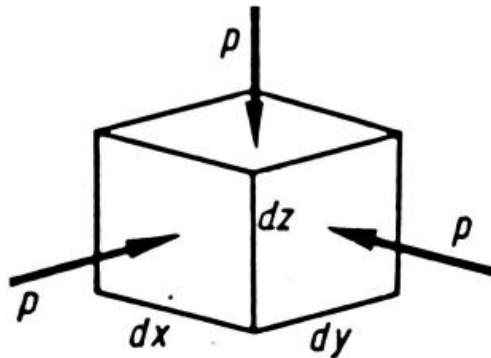
$$p = -K \cdot \theta \quad (10)$$

$$\theta = \varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z \quad (11)$$

Gdje je:

$K$  – prostorni modul elastičnosti, N/mm<sup>2</sup>

$\theta$  – obujamna deformacija



Slika 4.3. Element pod hidrostatičkim tlakom [12]

Također vrijedi: [12]

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = -p \quad (12)$$

Što uvršteno u Hookeov zakon za prostorno (troosno) naprezanje: [12]

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (13)$$

daje:

$$\varepsilon_x = -\frac{p}{E} (1 - 2\mu) = \varepsilon_y = \varepsilon_z \quad (14)$$

iz kombinacije prethodnih izraza možemo dobiti: [12]

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (15)$$

Ukoliko je vrijednost  $\mu = 0,5$  obujamni modul elastičnosti  $K$  poprima beskonačnu vrijednost, a to znači da za materijale s vrijednosti Poissonovog faktora od 0,5 ne dolazi do promjene volumena bez obzira na veličinu naprezanja. U situaciji da je  $\mu > 0,5$ , vrijednost  $K$  bi postala negativna, što znači da bi kod tlačnog naprezanja obujam rastao, dok bi se pri rasteznom naprezanju obujam smanjivao. Kako je to fizikalno neprihvatljivo, zaključujemo kako vrijednost poissonovog faktora mora biti  $\mu < 0,5$ , a to potvrđuju i brojna mjerenja. [12]

## 4.2. Poissonov faktor polimernih materijala

Za izotropne materijale, iznos poissonovog faktora je između -1 i 0,5. u slučaju kada imamo nekompresibilne materijale poput taljevina ili gume, naprezanje primarno uzrokuje promjenu oblika ali ne i promjenu volumena te je poissonov koeficijent tada jednak 0,5. [13]

Za većinu polimernih materijala pretpostavlja se da je poissonov faktor konstantan. Međutim, poissonov faktor je viskoelastično svojstvo i stoga ovisi o mnogim čimbenicima kao što su temperatura, vrijeme, deformacija, brzina deformacije i slično, baš kao i ostala mehanička svojstva polimernih materijala. [13]

U tablici 4.2 navedeni su iznosi poissonovog faktora za neke od najčešćih polimernih materijala.

**Tablica 4.2. Poissonov faktor određenih polimernih materijala [14]**

POLIMERNI MATERIJAL	POISSONOV FAKTOR
Poli(butilen-tereftalat) (PBT)	0,42
Polikarbonat (PC)	0,41
Polietilen visoke gustoće (PE-HD)	0,46
Poli(metil-metakrilat) (PMMA)	0,36
Polistiren (PS)	0,35
Poli(vinil-klorid) (PVC)	0,40
Poli(tetrafluoretilen) (PTFE)	0,42
Poli(etilen-tereftalat) (PET)	0,43

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

U okviru ovog diplomskog rada provedena su ispitivanja poissonovog faktora za različite polimerne materijale. Cilj eksperimentalnog dijela je upogoniti uređaj za mjerenje poissonovog faktora te naknadna usporedba dobivenih rezultata s literaturom.

Ispitivanje je provedeno na polimernim materijalima različitih mehaničkih svojstava kako bi se provjerila robusnost uređaja za mjerenje, točnost rezultata mjerenja u usporedbi sa literaturom.

### 5.1. Materijali u ispitivanju

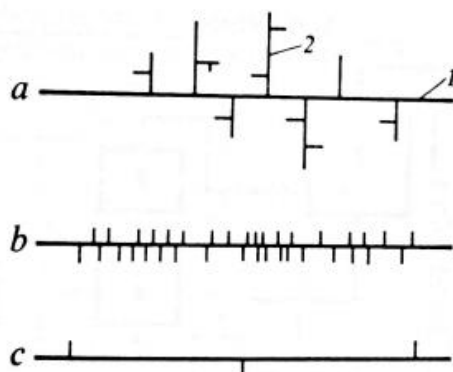
Kako je već navedeno, u ispitivanju su upotrebljeni polimerni materijali različitih mehaničkih svojstava. U nastavku će biti navedena neka od obilježja polimernih materijala ispitanih u eksperimentalnom dijelu, njihova definicija, mehanička i fizikalna svojstva, uporaba i slično.

#### 5.1.1. Polietilen (PE)

Polietilen (PE) je najjednostavniji poliugljikovodik, te je jedan od najvažnijih polimernih materijala današnjice. Dobiva se polimerizacijom etilena, dok se laboratorijski može dobiti i od diazometana. [15]

Polietilen je plastomerni materijal sastavljen od međusobno povezanih jedinica koje tvore lančane makromolekule velikih molekulnih masa opće formule  $[-(-\text{CH}_2-\text{CH}_2)-]_n$ . Sa svojom jednostavnom linearnom strukturom u izduženim konformacijama omogućuje laku kristalizaciju, tako da se polietilen morfološki sastoji od amornih i kristalnih područja o čemu ovise i mehanička svojstva. [16]

Svojstva polietilena ovise o njegovoj strukturi i o dodacima koji se dodaju tijekom njegove proizvodnje. Izravan utjecaj na svojstva polietilena imaju stupanj kristalnosti, prosječna molekulna masa te razdioba molekulnih masa. Stupanj kristalnosti predstavlja omjer kristalne i amorfne, te prvenstveno ovisi o granatosti makromolekule. Polietilenske makromolekule nisu samo ravnolančane, nego neki od vodikovih atoma mogu biti zamijenjeni ugljikovodičnim supstytutentima. To dovodi do nemogućnosti gustog slaganja lančanih segmenata i potpunije kristalizacije, pa se s povećanjem granatosti smanjuje stupanj kristalizacije kako je prikazano na slici 5.1. [15]



**Slika 5.1. Razgranatost polietilenskih makromolekula. a – polietilen niske gustoće, b – linearni polietilen niske gustoće, c – polietilen visoke gustoće; 1 – glavni lanac makromolekule 2 – bočni lanci [15]**

Gustoća polietilena je izravno povezana sa stupnjem kristalnosti, te se njegova svojstva ocjenjuju upravo prema gustoći. Uz povećanje gustoće poboljšavaju se brojna mehanička svojstva poput tvrdoće, rastezne čvrstoće, maksimalnog produljenja prilikom loma, otpor puzanju, krutost i kemijska otpornost. S druge strane, u isto vrijeme dolazi do smanjenja prozirnosti, savitljivosti i žilavosti. [15]

Polietilen se kao tehnički materijal, na temelju razlika u molekuloj masi, donosno gustoći, svrstava u sljedeće skupine: polietilen niske gustoće (eng. *low density polyethylene*, PE-LD), linearni polietilen niske gustoće (eng. *linear low density polyethylene*, PE-LLD), polietilen visoke gustoće (eng. *high density polyethylene*, PE-HD), polietilen ultra visoke molekularne mase (eng. *ultra high molecular weight polyethylene*, PE-UHMWP). [15]

U tablici 5.1 dan je prikaz nekih fizikalnih i mehaničkih svojstava polietilena niske i visoke gustoće (PE-LD i PE-HD).

**Tablica 5.1. Fizikalna i mehanička svojstva polietilena [15]**

SVOJSTVO	PE-LD	PE-HD
Gustoća, g/cm <sup>3</sup>	0,915...0,935	0,94...0,97
Rastezna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>	4,15...14,8	18,7...33
Prekidno istezanje, %	90...800	20...130
Modul rasteznosti, N/mm <sup>2</sup>	100...265	415...1250
Temperatura taljenja, °C	110...120	130...140

Zbog dobrih mehaničkih svojstava, kemijskoj postojanosti, postojanosti na vodu i relativno niske cijene, polietilen je danas vrlo cijenjen tehnički materijal raznolike primjene. Polietilen niske gustoće upotrebljava se za izradu folija i filmova koji izravno služe kao ambalažni materijal u prehrambenoj, farmaceutskoj, tekstilnoj i sličnim industrijama. Polietilen visoke gustoće nalazi svoju primjenu u izradi posuda većeg volumena za upotrebu u industriji te kućanstvu. Pogodan je za izradu boca i posuda za izradu ambalaže prehrambenih, farmaceutskih i kemijskih proizvoda. Staklenim vlaknima ojačan polietilen upotrebljava se u brodogradnji kao unutrašnja obloga teretnih brodova. Također se upotrebljava u izradi vodovodnih cijevi, kao izolator električnih kabela i drugo. [16]

### 5.1.2. *Polistiren (PS)*

Polistiren je materijal koji zbog svoje raznolikosti u primjeni, niske cijene i lake preradljivosti spada u sam vrh u ukupnoj svjetskoj potrošnji plastomera. Postoji više tipova polistirena a najvažniji su: obični polistiren (PS), polistiren visoke žilavosti (HIPS), pjenasti polistiren (PS-E), stiren/akrilonitrilni kopolimer (SAN) i akrilonitril/butadien/stiren terpolimer (ABS). [17]

Običan polistiren (homopolimer), poznat samo kao polistiren, proziran je materijal, sličan staklu, lake oblikovljivosti, tvrd i krhak s niskom žilavosti, velikog indeksa loma te velike svjetlosne propusnosti. Sastavljen od linearnih makromolekula opće formule  $[-\text{H}_2\text{C}-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-]_n$ . [17]

Staklište polistirena je pri temperaturi od 80-100 °C, tako da se može primjenjivati samo pri temperaturama nižim od toga. Pri temperaturi višoj od 300 °C dolazi do depolimerizacije i nagle razgradnje polistirena. Podložan je fotokemijskoj razgradnji prilikom izlaganja sunčevom zračenju. Postojanost toplinskoj i fotokemijskoj razgradnji može se povećati dodavanjem antioksidansa (do 0,5 %). Zbog nepolarosti makromolekula, hidrofoban je materijal, pri sobnoj temperaturi postojan na djelovanje kiselina, uz izuzetak dušične i octene koje ga razgrađuju. [15]

U tablici 5.2 dan je prikaz nekih fizikalnih i mehaničkih svojstava polistirena (PS).

**Tablica 5.2. Fizikalna i mehanička svojstva polistirena (PS) [15]**

SVOJSTVO	PS
Gustoća, g/cm <sup>3</sup>	1,05...1,06
Rastezna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>	35...55
Prekidno istezanje, %	1...2
Modul rasteznosti, N/mm <sup>2</sup>	2400...3300
Temperatura taljenja, °C	100...105

Polistiren je lagane preradljivosti, taljevina je male viskoznosti u velikom temperaturnom području, pa je zato vrlo pogodan za proizvodnju u kalupima. Moguće ga je preraditi u svim postupcima prerade plastomera u temperaturnom području od 180 °C do 250 °C, posebice injekcijskim prešanjem, ekstrudiranjem u ploče i filmove i puhanjem u proizvode različitih oblika. [15]

Polistiren i modificirani polistiren upotrebljavaju se za izradu proizvoda za ambalažu, odnosno pakiranje prehrambenih, farmaceutskih i kemijskih proizvoda. Primjenjuje se za izradu dijelova aparata i uređaja, proizvoda elektrotehničke i elektroničke industrije. Primjenjuje se za izradu izolatora mjernih instrumenata, kućišta televizora, telefona i drugo. [15]

### 5.1.3. *Poliamid (PA)*

Poliamidi (PA) su kristalasti, plastomerni polimerni materijali kod kojih ponavljane jedinice sadrže alifatske ili aromatske segmente povezane amidnim vezama (-CO-NH-). Alifatski poliamidi su visokog tališta, visoke rastezne čvrstoće, žilavosti i dobre postojanosti prema otapalima, otpornosti zamoru i abraziji. Oni su ujedno i prvi sintetski polimeri koji su se počeli primjenjivati kao sintetska vlakna, a važni su i danas pod nazivom *poliamidna vlakna*. Od prirodnih materijala koji pripadaju ovoj skupini, najznačajniji su: vuna, prirodna svila i kazein te mnogi drugi koji po svojoj građi pripadaju poliamidima. [18]

Označavaju se prema broju ugljikovih atoma u reagirajućim monomerima, te su najznačajniji PA 66 i PA 6. Poli(heksametilenadipamid) (PA 66), počeo se proizvoditi pod komercijalnim nazivom *Nylon*, što je kasnije vezano uz pojam povezan s počecima uporabe tako zvane sintetike u



odijevanju. Nastaje polikondenzacijom heksametilendiamina i edipinske kiseline, tako da oba monomera imaju po 6 ugljikovih atoma i od tuda oznaka 66 (u nekim literaturama moguće je naći oznaku 6,6) opće formule  $[-HN-(CH_2)_6-NH-CO-(CH_2)_4-CO-]_n + 2nH_2O$ . Razlikuju se još PA 11; PA 12 i PA 6,12 tipovi poliamida. [18]

Alifatski poliamidi s nerazgranatim lancima uglavnom su tehnički važniji poliamidi. Posjeduju većinom kristalnu strukturu u čvrstom stanju sa stupnjem kristalnosti od 30-50 %. Većina alifatskih poliamida dijeli slična fizikalna svojstva. Ističu se vrlo dobrim mehaničkim svojstvima kao što su visoka rastezna čvrstoća i žilavost, nizak faktor trenja, otporni su prema zamoru materijala i abraziji u radnim uvjetima do 120 °C. Mehanička svojstva poliamida znatno ovise o udjelima vlage što ovisi o omjeru amidnih skupina CONH/CH<sub>2</sub> u makromolekuli. Što je taj omjer veći to poliamid može primiti više vlage (od 1 do 4 %), pa stoga postaje mekši, smanjuje se žilavost i postojanost oblika. S druge strane, neka mehanička svojstva dolaze u potpunosti do izražaja tek kada poliamid sadrži malo vlage. [15]

U tablici 5.3. prikazana su neka fizikalna i mehanička svojstva poliamida PA 6 i PA 66 određene uz prosječnu vlažnost od 50 %.

**Tablica 5.3. Fizikalna i mehanička svojstva poliamida PA 6 i PA 66 uz relativnu vlažnost od 50 % [15]**

SVOJSTVO	Poliamid	
	PA 6	PA 66
Gustoća, g/cm <sup>3</sup>	1,14	1,14
Rastezna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>	55	60
Prekidno istezanje, %	300	300
Modul rasteznosti, N/mm <sup>2</sup>	1000	1400
Temperatura taljenja, °C	220	220

Najčešća uporaba poliamida je u tekstilnoj industriji. Sa svojim povoljnim fizikalnim i kemijskim svojstvima, poliamidi služe i kao široko primjenjivani konstrukcijski materijali za izradu dijelova industrijskih uređaja, a koriste se i u automobilskoj industriji, elektroindustriji i elektronici. Poliamidi PA 6 i PA 66 služe za izradu čvrstih dijelova otpornih na habanje, zupčanika, ležišta,

kliznih elemenata, prijenosnika, ventila, brtvenica, spojnice, cjevovoda u benzinskim motorima, električnih sklopki, kućanskih aparata i drugo. [15]

#### 5.1.4. **Polipropilen (PP)**

Polipropilen (PP) je plastomerni materijal koji se sastoji od linearnih makromolekula opće formule  $[-CH(CH_3)-CH_2-]_n$ . Ima pravilan raspored metilnih skupina u lancu. Makromolekule polipropilena mogu se razlikovati po steričkoj orijentaciji metilnih skupina. Kod jednake orijentacije, polipropilen je izotaktičan te je poželjno da polipropilen sadrži što veći udio izotaktične strukture. Lanci makromolekula tvore spiralnu strukturu, zahvaljujući steričkoj pravilnosti. Takva struktura pridonosi boljoj kristalizaciji, što je preduvjet dobrim mehaničkim svojstvima polipropilena. Komercijalni polipropilen sadrži oko 90 % izotaktičkih sekvenca sa stupnjem kristalnosti od 60 do 70 %. [15]

Polipropilen zbog svoje male gustoće spada u jedan od najlakših polimernih materijala, a njegovo visoko talište pruža upotrebu u širokom temperaturnom rasponu. Posjeduje poprilično uravnotežena mehanička, toplinska i električna svojstva. Svojstva polipropilena slična su onima polietilena visoke gustoće (PE-HD). Međutim, polipropilen ima višu tvrdoću i rasteznu čvrstoću, elastičniji je, prozirniji i sjajniji uz podjednaku propusnost za plinove i pare. Nedostatak polipropilena je niska žilavost, posebice pri temperaturama nižim od sobne temperature. No, taj se nedostatak može ublažiti kopolimerizacijom (npr. etilenom) koji se dodaje u količini od 5 do 20 %. [15]

U tablici 5.4 prikazana su fizikalna i kemijska svojstva polipropilena (PP).

**Tablica 5.4. Fizikalna i mehanička svojstva polipropilena (PP) [15]**

SVOJSTVO	PP
Gustoća, g/cm <sup>3</sup>	0,90...0,91
Rastezna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>	31...41
Prekidno istezanje, %	100...600
Modul rasteznosti, N/mm <sup>2</sup>	1100...1500
Temperatura taljenja, °C	160...170

Zbog svojih uravnoteženih svojstava, polipropilen nudi široke mogućnosti primjene. Polipropilen lagano tvori kompozitne materijale s drugim anorganskim punilima. U praksi se primjenjuje puno komercijalnih vrsta polipropilena koje se međusobno razlikuju prema molekularnoj masi, tipu i količini punila i dodataka i slično. [15]

Polipropilen se može prerađivati injekcijskim prešanjem ili ekstrudiranjem. Injekcijskim prešanjem mogu se dobivati vrlo mali i precizno izrađeni proizvodi te veliki proizvodi poput trupa čamca i slično. Izrađuje se čitav niz gotovih proizvoda i poluproizvoda u automobilskoj industriji, tekstilnoj i elektroindustriji, u proizvodnji namještaja, medicinskoj industriji, avio industriji, koristi se u proizvodnji predmeta za kućanstvo i slično. Ekstrudiranjem se polipropilen prerađuje u tehnički materijal kao što su folije, ploče, umjetna vlakna, cijevi i drugo. Folije se mogu primjenjivati za ambalažu u prehrambenoj industriji. Ekstrudiranjem se direktno izrađuju gotovi proizvodi poput boca, posuda i spremnika. [15]

#### 5.1.5. *Elastoplastomer (TPE)*

Elastoplastomeri spadaju u kopolimerne materijale koji kombiniraju svojstva plastomera i elastomera u jednom. Dakle, oni pokazuju prednosti plastomernih i elastomernih materijala. TPE je materijal koji se može prerađivati tehnologijama za prerađivanje plastomera poput injekcijskog prešanja ili ekstrudiranja. Elastoplastomeri su sastavljeni od tvrdih plastomernih materijala poput PP, PBT ili PA u kombinaciji sa nekim elastomernim materijalom koji često sadrži i aditive poput ulja i punila. TPE materijali razlikuju se po temperaturnoj postojanosti, kemijskoj postojanosti, fleksibilnosti oporavku nakon izlaganja opterećenju (elastična deformacija). [19]

Glavna prednost TPE materijala je ta što se oni mogu prerađivati konvencionalnim postupcima za plastomerne materijale poput puhanja, injekcijskog prešanja, ekstrudiranja i drugo. Mogu se lako bojiti i posjeduju široku temperaturnu primjenu od -40 do 120 °C. Posjeduju visoku postojanost na atmosferske utjecaje, postojani su na vodu i UV zračenje. [19]

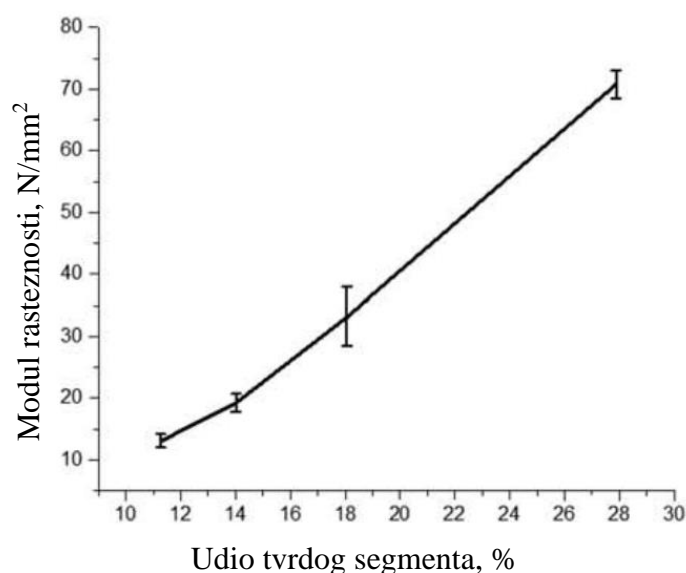
TPE pronalazi svoju primjenu u područjima gdje konvencionalni elastomeri nemaju zadovoljavajuća svojstva. Veliku primjenu nalaze u automobilskoj industriji te u proizvodnji kućanskih potrepština. Upotrebljavaju se u HVAC industriji zahvaljujući svojoj funkcionalnosti, niskoj cijeni i preradljivosti. Primjenjuju se kod izrade medicinskih uređaja, unutarnje i vanjske izolacije električnih kabela i drugo. [20]

### 5.1.6. Poliuretanski elastomer (TPU)

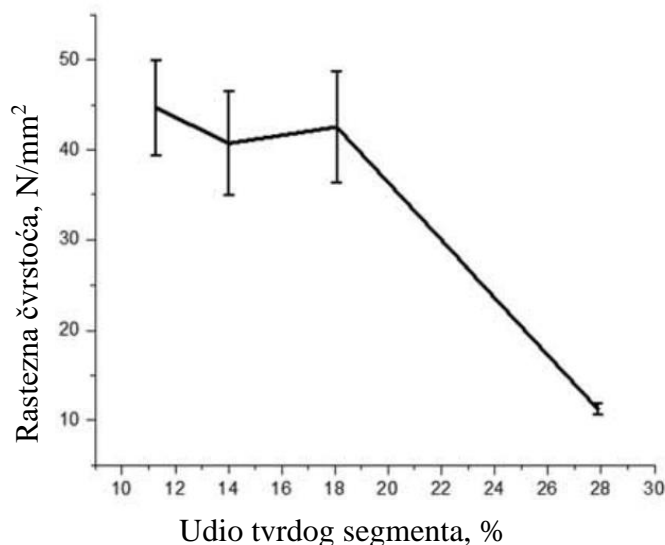
Poliuretanski elastomer (TPU) spada među najsvestranije tehničke elastomerne materijale zbog svoje specifične morfološke strukture. Zbog prisutnosti tvrdih i mekih segmenata i specifične interakcije vodikovih veza između tvrdih segmenata, TPU materijali imaju izvanredna inženjerska svojstva. [21]

Tvrđi i meki segmenti najvažnija su obilježja poliuretanskog elastomera budući da oni imaju različitu krutost. Obje vrste segmenata međusobno su povezane kovalentnim vezama, tako da zapravo tvore blok-polimere. Dolazi do formiranja tvrdih domena u matrici mekog segmenta zbog jakih vodikovih veza. Kod linearnih poliuretana, tvrde domene djeluju kao fizičke poprečne veze. Kao rezultat toga linearni poliuretani pokazuju elastomerna svojstva pri niskim temperaturama, a istovremeno se mogu prerađivati pri povišenim temperaturama (iznad tališta). [21]

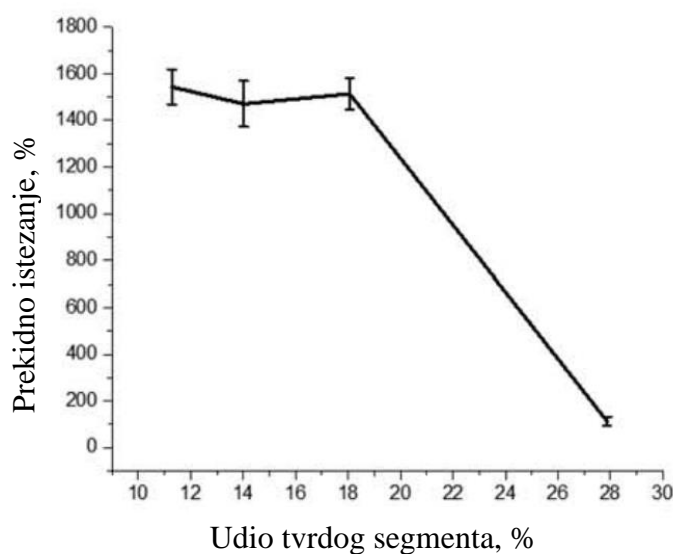
Mehanička svojstva poliuretanskog elastomera strogo ovise o udjelu tvrdih segmenata. Na slikama 5.2, 5.3 i 5.4 prikazana je ovisnost mehaničkih svojstava o udjelu tvrdih segmenata kod rasteznih ispitivanja. Može se uočiti povećanje modula elastičnosti, sniženje rastezne čvrstoće i sniženje vrijednosti prekidnog istezanja. [21]



Slika 5.2. Ovisnost modula rasteznosti o udjelu tvrdog segmenta [21]



Slika 5.3. Ovisnost rastezne čvrstoće o udjelu tvrdog segmenta [21]



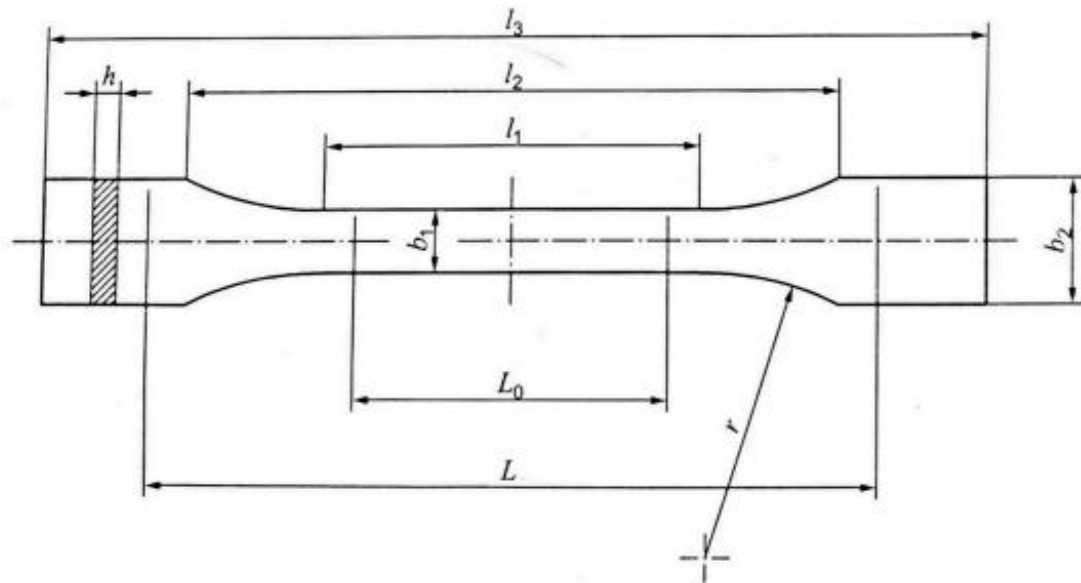
Slika 5.4. Ovisnost vrijednosti prekidnog istezanja o udjelu tvrdog segmenta [21]

Poliuretanski elastomer odlikuje dobra otpornost na abraziju, odlična mehanička svojstva, kemijska postojanost, uporabljivost pri niskim temperaturama, dobra elastična svojstva, postojanost na ulja i maziva. Prema tome TPU pronalazi svoju upotrebu u automobilskoj industriji, proizvodnji električnih alata. Primjenjuje se u izradi sportske opreme, medicinske opreme i uređaja, obloga žica i kabela, izradi cijevi i crijeva. Također, zbog svojih plastomernih svojstava, upotrebljava se kao materijal u raznim aditivnim tehnologijama. [21]

## 5.2. Određivanje poissonovog faktora

Ispitivanje se provodi na univerzalnoj kidalici prema normi HRN ISO 527-2:2012. Norma propisuje uvjete ispitivanja za određivanje rasteznih svojstava prešanih i ekstrudiranih polimernih materijala na temelju općih načela danih u normi HRN ISO 527-1:2012. [22]

Oblik ispitnog tijela dan je normom HRN ISO 527-2:2012. te je ono prikazano na slici 5.5.



Slika 5.5. Oblik i dimenzije ispitnog tijela [22]

U tablici 5.5 dane su dimenzije ispitnog tijela prema zadanoj normi sa dimenzijama u mm. U provedenim ispitivanjima upotrijebljena su ispitna tijela prema dimenzijama iz stupca 1A [22]

**Tablica 5.5. Dimenzije ispitnog tijela prema zadanoj normi sa dimenzijama u mm. [22]**

	<b>TIP ISPITNOG TIJELA</b>	<b>1A</b>	<b>1B</b>
$l_3$	Ukupna duljina	170	$\geq 150$
$l_1$	Duljina uskog dijela ispitnog tijela	$80 \pm 2$	$60,0 \pm 0,5$
$r$	Polumjer	$24 \pm 1$	$60,0 \pm 0,5$
$l_2$	Udaljenost između širokih dijelova s paralelnim stranicama	$109,3 \pm 3,2$	$180 \pm 1,6$
$b_2$	Širina na krajevima	$20,0 \pm 0,2$	
$b_1$	Širina na uskom dijelu ispitnog tijela	$10,0 \pm 0,2$	
$h$	Poželjna debljina	$4,0 \pm 0,2$	
$L_0$	Mjerna duljina	$75,0 \pm 0,5$ $50,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
$L$	Inicijalna duljina između prihvata	$115 \pm 1$	$115 \pm 1$

Na slici 5.6 prikazana je univerzalna kidalica *Shimadzu AGS-x* maksimalne sile 10 kN koja je korištena za provedbu ispitivanja. Kidalica je spojena s računalom i kontrolirana je putem programskog paketa *Trapezium* u koji su uneseni potrebni parametri o ispitnim tijelima poput: širine i debljine ispitka, brzine ispitivanja, razmaka čeljusti i drugo.



**Slika 5.6.** Kidalica *Shimadzu AGS - x* na kojoj su provedena ispitivanja



Na slici 5.7 prikazan je uređaj za mjerenje poissonovog faktora marke *Epsilon* montiran na ispitnom tijelu prije početka mjerenja. Prije postavljanja uređaja za mjerenje poissonovog faktora, ispitak se postavlja u dvije čeljusti koje su na propisanom razmaku prema normi. Potrebno je ispitak postaviti u što ravniji položaj kako bi osigurali pouzdane rezultate. To se ostvaruje preko graničnika na čeljustima.

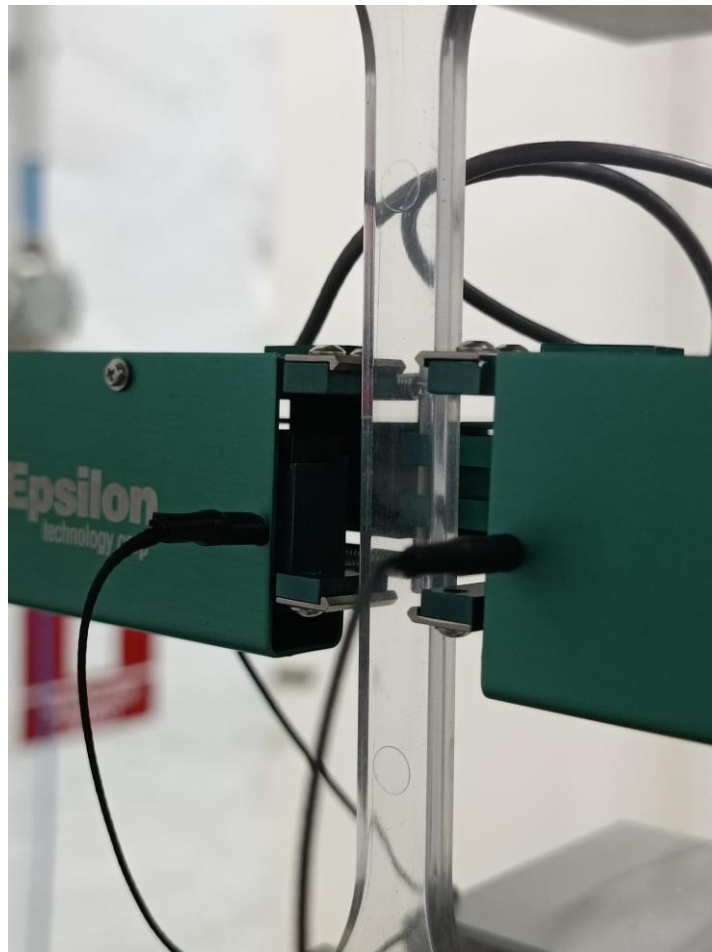


**Slika 5.7. Uređaj za mjerenje poissonovog faktora marke *Epsilon* postavljen na poziciju prije početka mjerenja**

Podlašeni parametri ispitivanja:

- razmak između čeljusti: 115 mm
- brzina ispitivanja: 5 mm/min
- temperatura ispitivanja: sobna, 22 °C

Biaksialni ekstenzometar marke *Epsilon* je jedinstvena jedinica koja omogućuje istovremeno mjerenje bočne deformacije i prosječne aksijalne deformacije. Ekstenzometar je jednostavan za montažu na ispitno tijelo. Opruge drže uređaj u kontaktu s ispitnim tijelom i omogućuju očitavanje deformacija s ispitnog tijela. Na slici 5.8 prikazan je ostvareni kontakt između uređaja i ispitnog tijela sa stražnje strane kidalice. [23]



**Slika 5.8. Kontakt uređaja za mjerenje s ispitnim tijelom**

Tehnički podaci o ekstenzometru [23]:

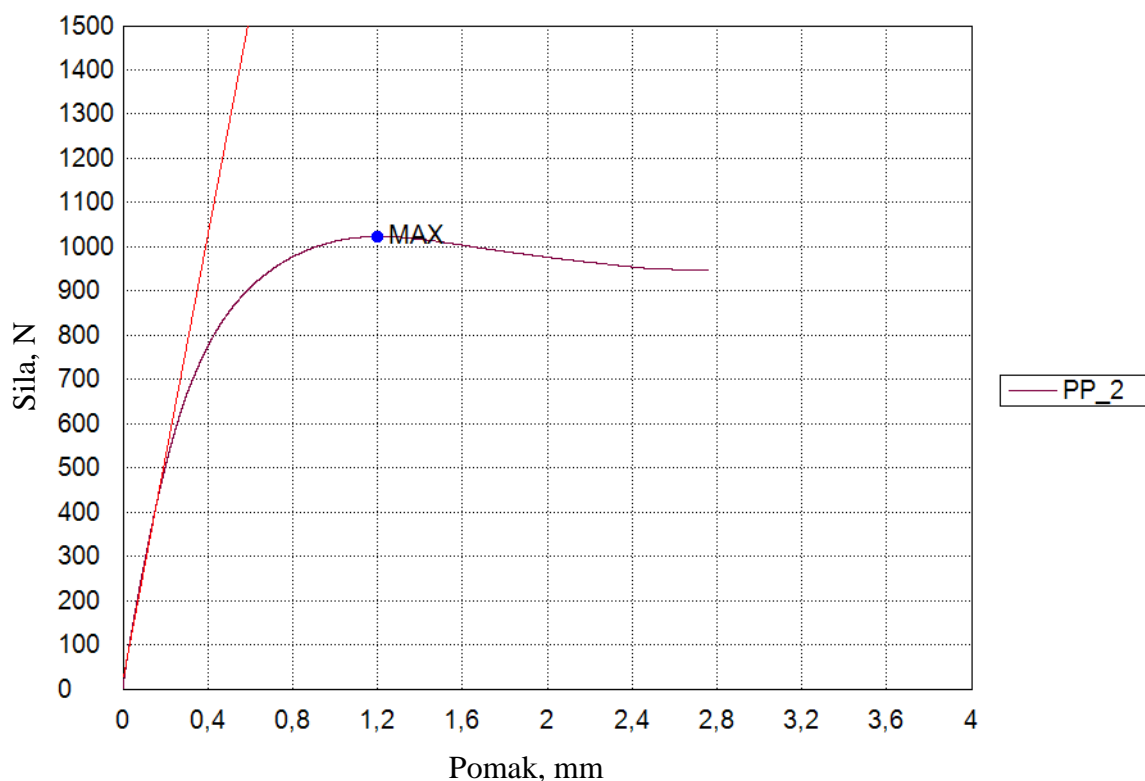
- mjerna duljina: 25 mm
- aksijalni pomak:  $\pm 10\%$
- poprečni pomak:  $\pm 1$  mm
- radna temperatura:  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

### 5.2.1. Rezultati ispitivanja

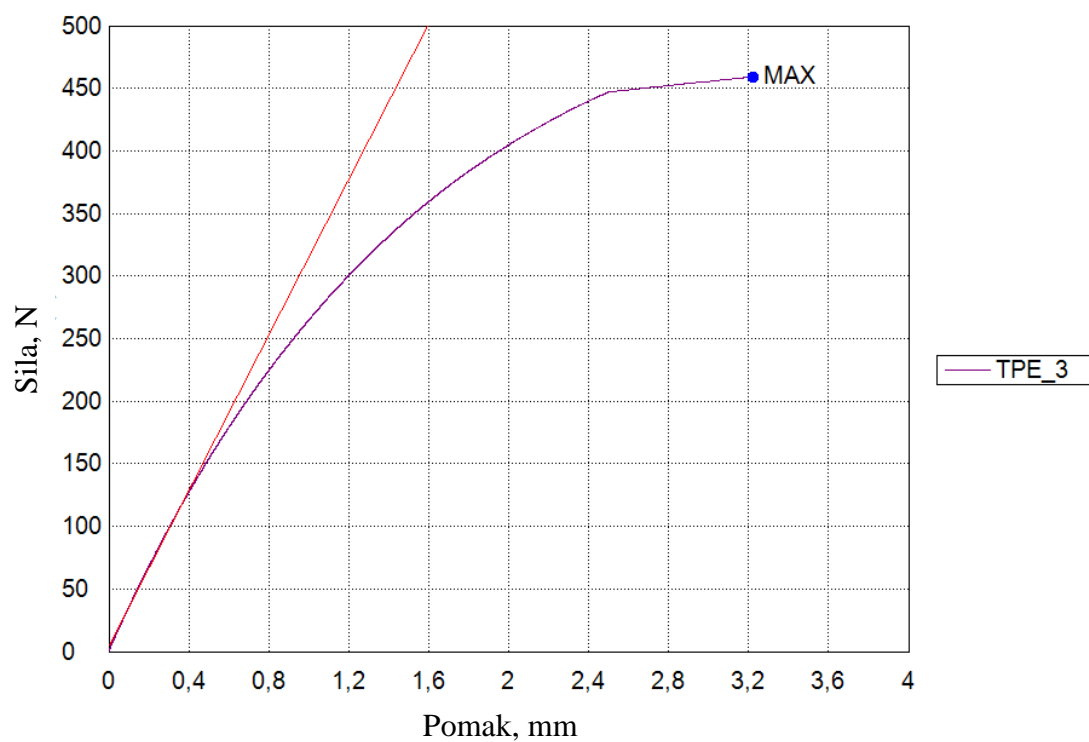
Ispitivanja su provedena na 3 različita ispitna tijela za svaki od materijala. Mjerenja dimenzija ispitnih tijela rađena su 3 puta (na sredini, pri dnu i pri vrhu ispitnog tijela), te je izračunata srednja vrijednost koja je uvrštena u programski paket zajedno s ostalim parametrima ispitivanja. Vrijednosti dimenzija, srednje vrijednosti i standardna devijacija dana je u prilogima

U nastavku su dani rezultati mjerenja za svakog ispitno tijelo te srednja vrijednost rezultata i standardna devijacija.

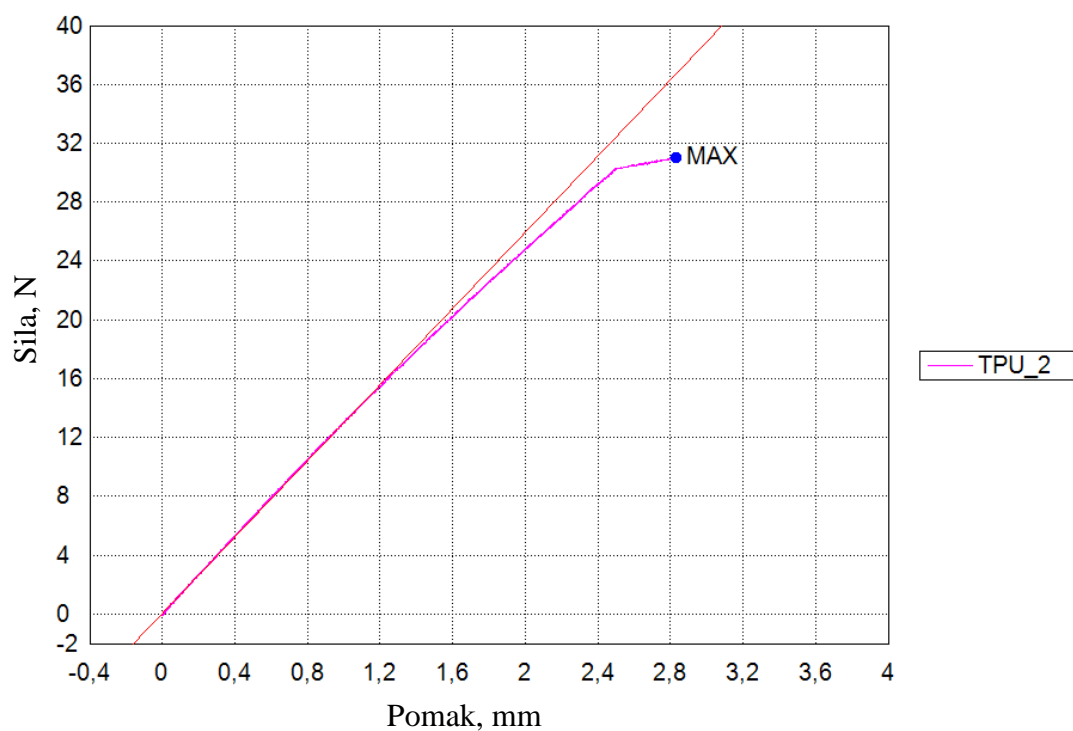
Poissonov faktor određuje se u elastičnom području deformacija. Samim time potrebno je odrediti područje u kojem će se određivati poissonov faktor. Pa je tako za materijale PE, PS, PA i PP određeno područje sile od 100 - 400 N budući da je u tom dijelu dijagrama procijenjena odgovarajuća linearnost nakon ispitivanja. Dijagram na slici 5.9 prikazuje tijek ispitivanja za polipropilen PP koji je isti kao i kod PE, PS i PA, te ucrtanu tangentu/sekantu koja prati linearno ponašanje materijala iz koje je uzeto područje sile za određivanje poissonovog faktora. Za elastoplastomer (TPE) to područje je 50 - 100 N i dano je na slici 5.10, te za materijal poliuretanski elastomer (TPU) to područje je 4 - 12 N i dano je na slici 5.11.



Slika 5.9. Dijagram sila-deformacija rasteznog ispitivanja za polipropilen (PP)



Slika 5.10. Dijagram sila-deformacija rasteznog ispitivanja za elastoplastomer TPE



Slika 5.11. Dijagram sila-deformacija rasteznog ispitivanja za poliuretanski elastomer TPU

## 5.2.1.1. Polietilen (PE)

Slika 5.12 prikazuje ispitna tijela polietilena prije ispitivanja.



Slika 5.12. Ispitna tijela polietilena (PE)

Tablica 5.6 prikazuje izmjerene vrijednosti poissonovog faktora polietilena (PE)

Tablica 5.6. Vrijednosti poissonovog faktora za polietilen (PE)

NAZIV	poissonov faktor, $\mu$
PE_1	0,43341
PE_2	0,44761
PE_3	0,42199
Srednja vrijednost	0,43477
Standardna devijacija	0,01051

## 5.2.1.2. Polistiren (PS)

Slika 5.13 prikazuje ispitna tijela polistirena prije ispitivanja.



Slika 5.13. Ispitna tijela polistirena (PS)

Tablica 5.7 prikazuje izmjerene vrijednosti poissonovog faktora polistirena (PS)

Tablica 5.7. Vrijednosti poissonovog faktora za polistiren (PS)

NAZIV	poissonov faktor, $\mu$
PS_1	0,34165
PS_2	0,30901
PS_3	0,31463
Srednja vrijednost	0,32176
Standardna devijacija	0,01745

## 5.2.1.3. Poliamid (PA 66) - ojačan s 30 % staklenih vlakna

Slika 5.14 prikazuje ispitna tijela poliamida (PA 66) ojačanog s 30 % staklenih vlakana prije ispitivanja.



**Slika 5.14. Ispitna tijela poliamida (PA) ojačanog s 33% staklenih vlakana**

Tablica 5.8 prikazuje vrijednosti poissonovog faktora za poliamid (PA 66) ojačanog s 30 % staklenih vlakana

**Tablica 5.8. Vrijednosti poissonovog faktora za poliamid (PA 66) ojačanog s 30 % staklenih vlakana**

NAZIV	poissonov faktor, $\mu$
PA_S_1	0,34540
PA_S_2	0,35759
PA_S_3	0,48302
Srednja vrijednost	0,39534
Standardna devijacija	0,07618



## 5.2.1.4. Poliamid (PA 66) - ojačan s 30 % ugljičnih vlakna

Slika 5.15. prikazuje ispitna tijela od poliamida (PA 66) ojačanog s 30 % ugljičnih vlakana prije ispitivanja.



**Slika 5.15. Ispitna tijela od poliamida (PA 66) ojačanog s 30 % ugljičnih vlakana**

Tablica 5.9 prikazuje vrijednosti poissonovog faktora za poliamid (PA 66) ojačanog s 30% ugljičnih vlakana

**Tablica 5.9. Vrijednosti poissonovog faktora za poliamid (PA 66) s 30 % ugljičnih vlakana**

NAZIV	poissonov faktor, $\mu$
PA_U_1	0,50035
PA_U_2	0,50166
PA_U_3	0,45546
Srednja vrijednost	0,48582
Standardna devijacija	0,02630



## 5.2.1.5. Poliamid (PA) – čisti

Slika 5.16 prikazuje ispitna tijela od čistog poliamida (PA 66) prije ispitivanja.



Slika 5.16. Ispitna tijela od čistog poliamida (PA 66)

Tablica 5.10 prikazuje vrijednosti poissonovog faktora za čisti poliamid (PA 66)

Tablica 5.10. Vrijednosti poissonovog faktora za čisti poliamid (PA 66)

NAZIV	poissonov faktor, $\mu$
PA_1	0,42386
PA_2	0,42589
PA_3	0,42173
Srednja vrijednost	0,42383
Standardna devijacija	0,00208

## 5.2.1.6. Polipropilen (PP)

Slika 5.17 prikazuje ispitna tijela od polipropilena (PP) prije ispitivanja.



Slika 5.17. ispitna tijela od polipropilena (PP)

Tablica 5.11 prikazuje vrijednosti poissonovog faktora za polipropilen (PP)

**Tablica 5.11. Vrijednosti poissonovog faktora za polipropilen (PP)**

NAZIV	poissonov faktor, $\mu$
PP_1	0,40726
PP_2	0,39916
PP_3	0,43076
Srednja vrijednost	0,41239
Standardna devijacija	0,01641

## 5.2.1.7. Elastoplastomer (TPE)

Slika 5.18 prikazuje ispitna tijela od elastoplastomernog materijala (TPE) prije ispitivanja.



**Slika 5.18. Ispitna tijela od elastoplastomernog materijala (TPE)**

Tablica 5.12 prikazuje vrijednosti poissonovog faktora za elastoplastomerni materijal (TPE).

**Tablica 5.12. Vrijednosti poissonovog faktora za elastoplastomer (TPE)**

NAZIV	poissonov faktor, $\mu$
TPE_1	0,48128
TPE_2	0,49036
TPE_3	0,49954
Srednja vrijednost	0,49039
Standardna devijacija	0,00913

## 5.2.1.8. Poliuretanski elastomer (TPU)

Slika 5.19 prikazuje ispitna tijela od poliuretanskog elastomera (TPU) prije ispitivanja.



**Slika 5.19. Ispitna tijela od poliuretanskog elastomera (TPU)**

Tablica 5.13 prikazuje vrijednosti poissonovog faktora za poliuretanski elastomer (TPU).

**Tablica 5.13. Vrijednosti poissonovog faktora za poliuretanski elastomer (TPU)**

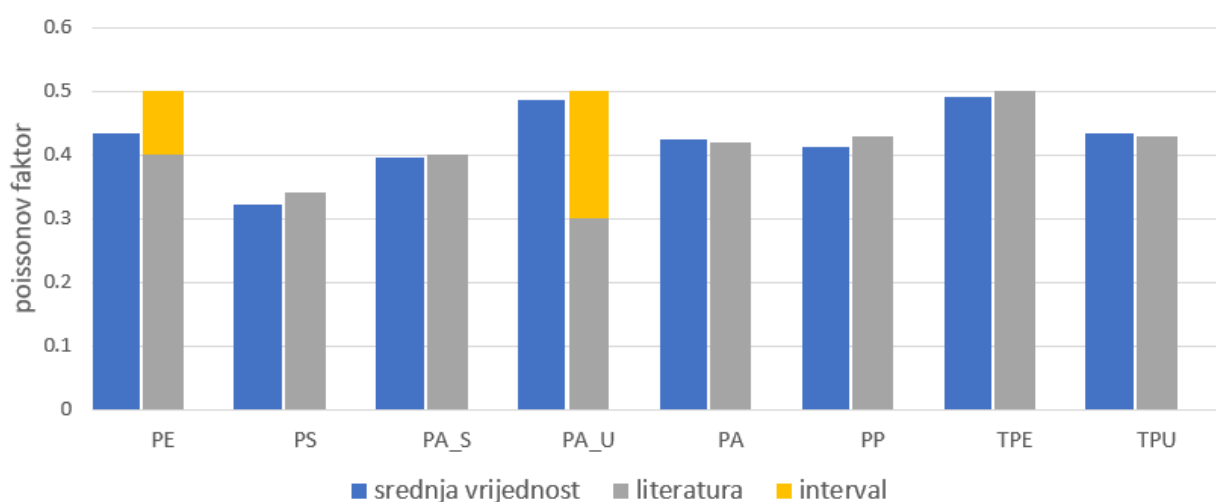
NAZIV	poissonov faktor, $\mu$
TPU_1	0,42273
TPU_2	0,43079
TPU_3	0,44591
Srednja vrijednost	0,43315
Standardna devijacija	0,01176

## 6. USPOREDBA REZULTATA S LITERATUROM

U ovom dijelu dan je prikaz srednjih vrijednosti izmjerenog poissonovog faktora iz prethodnog poglavlja, te je dana usporedba rezultata s literaturom kako je prikazano u tablici 6.1 i na slici 6.1. Iznosi poissonovih faktora kao literatura preuzimani su sa stranica proizvođača polimernih materijala, stranica koje sadrže pregled svojstava materijala, znanstvenih radova i slično.

**Tablica 6.1. Usporedba dobivenih rezultata poissonovog faktora sa literaturom [11, 14, 24, 25, 26, 27, 28]**

MATERIJAL	Srednja vrijednost	literatura
Polietilen (PE)	0,43477	0,40 - 0,45
Polistiren (PS)	0,32176	0,34
Poliamid (PA 66) - ojačan s 30 % staklenih vlakana	0,39534	0,40
Poliamid (PA 66) - ojačan s 30 % ugljičnih vlakana	0,48582	0,31- ~ 0,5
Poliamid (PA 66) - čisti	0,42383	0,42
Polipropilen (PP)	0,41239	0,43
Elastoplastomer (TPE)	0,49039	~ 0,5
Poliuretanski elastomer (TPU)	0,43315	0,43



**Slika 6.1. Dijagram srednjih vrijednosti poissonovih faktora u usporedbi s literaturom**

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu naglasak se stavlja na mehanička svojstva polimernih materijala koja znatno ovise o strukturi polimernih materijala, stupnju kristalnosti, dodacima i drugim obilježjima materijala spomenutim u radu. Upravo iz tih razloga polimerni materijali pokazuju svoje razlike u mehaničkim svojstvima koja ih karakteriziraju i razlikuju. Tako su ispitivanja poissonovog faktora provedena na materijalima PE, PS, PA, PA ojačanog staklenim i ugljičnim vlaknima PP, TPE i TPU.

Poissonov faktor definiran je kao omjer uzdužne i poprečne deformacije i kao takav predstavlja mehaničko svojstvo materijala u predviđanju i razumijevanju elastičnih deformacija. Svakim danom razvijaju se novi materijali i određivanje poissonovog faktora ključno je za njihove konstrukcijske primjene, simulacije naprezanja i deformacije pomoću metode konačnih elemenata. Iz rezultata ispitivanja može se zaključiti kako se određeni polimerni materijali ponašaju u skladu sa svojom morfologijom. Pravi primjer toga je polistiren (PS) koji svojom amorfnom strukturom i izmjerenim poissonovim faktorom odudara od ostalih polimernih materijala, te mu je poissonov faktor niži baš kako bi i očekivali prije mjerenja. S druge strane polimer s pretežito kristalnom strukturom poliamid (PA) pokazuje značajne razlike u vrijednostima poissonovog faktora s obzirom na dodatke koji su mu pridodani što potvrđuje činjenicu da dodaci polimerima značajno mijenjaju njihova mehanička svojstva. Tako mu dodatak staklenih vlakana snižava poissonov faktor, dok ga dodatak ugljičnih vlakana znatno povisuje.

Zanimljivo je primjetiti kako je poissonov faktor polimernih materijala dosta visok u usporedbi s nekim drugim materijalima poput metala, kompozita ili keramika što nam da naslutiti o njihovim mehaničkim svojstvima. Kako je poissonov faktor izravno povezan s deformacijama, a posredno s modulom elastičnosti lako je zaključiti kako će polimerni materijali generalno imati visok poissonov faktor u rasponu vrijednosti od 0,3 do 0,5 pa su to i ova mjerenja pokazala.

Kako je cilj ovog diplomskog rada bio uspostava uređaja na kidalicu za mjerenje poissonovog faktora te usporedba rezultata s literaturom, može se zaključiti sljedeće:

- uređajem je moguće precizno mjeriti poissonov faktor različitih polimernih materijala
- usporedba rezultata s literaturom pokazala je kako je proces mjerenja adekvatno proveden budući da nema znatnijih odstupanja mjernih rezultata od vrijednosti poissonovih faktora pronađenih u literaturi.

## 8. LITERATURA

1. Ivušić V, Franz M, Španiček Đ, Čurković L. *Materijali I.*, Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2011.
2. Raos P, Šercer M. *Teorijske osnove proizvodnje polimernih tvorevina*, Fakultet strojarstva i brodogradnje; Slavonski Brod/Zagreb, 2010.
3. Pustak A. *Svojstva i primjena polimera u oblikovanju lijekova*. Medicinski vjesnik. 2010;213–29.
4. Filetin T, Kovačićek F, Indof J. *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2013.
5. Indof J, Čatić I. *Inženjerski priručnik*, Školska knjiga; Zagreb, 1998.
6. Šercer M, Križan B, Basan R. *Konstruiranje polimernih proizvoda*, Sveučilište u Zagrebu; Zagreb, 2009.
7. Ćorić D, Alar Ž. *Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2016.
8. *Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala razorne metode - postupci s razaranjem*  
[https://ag2019-2020.e-ucenje.unipu.hr/pluginfile.php/106117/mod\\_folder/content/0/Predavanja/4%20Stati%C4%8Dki%20vla%C4%8Dni%20pokus.pdf?forcedownload=1](https://ag2019-2020.e-ucenje.unipu.hr/pluginfile.php/106117/mod_folder/content/0/Predavanja/4%20Stati%C4%8Dki%20vla%C4%8Dni%20pokus.pdf?forcedownload=1), [22.10.2022.]
9. Filetin T, Franz M, Španiček Đ, Ivušić V. *Svojstva i karakteristike materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2012.
10. *Wikipedia Contributors. Poisson's ratio* Wikipedia. Wikimedia Foundation; 2019  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Poisson%27s\\_ratio](https://en.wikipedia.org/wiki/Poisson%27s_ratio), [25.10.2022.]
11. *Poisson's ratio*. Engineeringtoolbox.com. 2019.  
[https://www.engineeringtoolbox.com/poissons-ratio-d\\_1224.html](https://www.engineeringtoolbox.com/poissons-ratio-d_1224.html), [25.10.2022.]
12. Alfirević I. *Nauka o čvrstoći I*, Izdavačko trgovačko poduzeće; Zagreb, 1995.

13. *Poisson's Ratio* Polymerdatabase.com. 2011.  
<https://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Poisson.html> [7.11.2022.]
14. *Poisson's Ratio* . Polymerdatabase.com. 2015.  
<https://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Poisson%20Table.html> [7.11.2022.]
15. Požar H, urednik, *Tehnička enciklopedija*, Jugoslavenski Leksikografski zavod Miroslav Krleža; Zagreb, 1986.
16. *polietilen* / *Hrvatska enciklopedija*, enciklopedija.hr,  
<https://enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=49145>, [23.11.2022.]
17. *polistiren* / *Hrvatska enciklopedija*, enciklopedija.hr,  
<https://enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=49224>, [23.11.2022.]
18. *poliamidi* / *Hrvatska enciklopedija*, enciklopedija.hr,  
<https://enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=49115>, [23.11.2022.]
19. *TPE - tablica karakteristika materijala*. Gasket; [http://gasket.hr/documents/TPE\\_tablica.pdf](http://gasket.hr/documents/TPE_tablica.pdf), [23.11.2022.]
20. Wikipedia Contributors, *Thermoplastic elastomer*, Wikipedia. Wikimedia Foundation; 2019.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoplastic\\_elastomer](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoplastic_elastomer), [23.11.2022.]
21. Solouki Bonab V, Manas-Zloczower I. *Revisiting thermoplastic polyurethane, from composition to morphology and properties*. Polymer Science Part B: Polymer Physics. 2017 Aug 11;55(20):1553–64.
22. *Plastika -- Određivanje rasteznih svojstava -- 2. dio: Uvjeti ispitivanja za prešanu i ekstrudiranu plastiku (ISO 527-2:2012; EN ISO 527-2:2012)*
23. *3560 Extensometer Instruction Manual*, USA: Epsilon Tehnologz Corp; 2020.
24. *HDPE & Propylene Materials*. Plastics Pipe Institute; 2019.
25. *Ascend Performance Materials*. Vydyne® R530H polyamide 66. Ascend Performance Materials Operations LLC; 2016.



26. Persson A-MMR, Hinrichsen EL, Andreassen E. *On the temperature dependence of the cyclic compression behaviour of a thermoplastic vulcanizate elastomer*. *Polymer Testing*. 2022 Aug;112:107650.
27. Xu Y-X, Juang J-Y. *Measurement of Nonlinear Poisson's Ratio of Thermoplastic Polyurethanes under Cyclic Softening Using 2D Digital Image Correlation*. *Polymers*. 2021;
28. Kurkin E, Spirina M, Espinosa Barcenas OU, Kurkina E. *Calibration of the PA6 Short-Fiber Reinforced Material Model for 10% to 30% Carbon Mass Fraction Mechanical Characteristic Prediction*. *Polymers*. 2022 Apr 27;14(9):1781.

## **9. PRILOCI**

### **I. Mjerenje širine i debljine ispitnih tijela**

## Prilog I. Mjerenje širine i debljine ispitnih tijela

**Tablica 9.1. Rezultati mjerenja širine i debljine polietilena (PE)**

ISPITAK		Mjerenje, mm			srednja	devijacija
		1	2	3		
PE_1	širina	10,28	10,30	10,38	10,32	0,052915
	debljina	4,32	4,34	4,32	4,327	0,011547
PE_2	širina	10,14	10,12	10,12	10,127	0,011547
	debljina	4,24	4,28	4,26	4,26	0,02
PE_3	širina	10,28	10,30	10,20	10,26	0,052915
	debljina	4,30	4,30	4,32	4,307	0,011547

**Tablica 9.2. Rezultati mjerenja širine i debljine polistirena (PS)**

ISPITAK		Mjerenje, mm			srednja	devijacija
		1	2	3		
PS_1	širina	10,08	10,10	10,10	10,093	0,011547
	debljina	4,02	4,04	4,06	4,04	0,02
PS_2	širina	10,10	10,12	10,12	10,113	0,011547
	debljina	4,12	4,12	4,12	4,12	0
PS_3	širina	10,10	10,12	10,12	10,113	0,011547
	debljina	4,10	4,12	4,10	4,107	0,011547

**Tablica 9.3. Rezultati mjerenja širine i debljine poliamida (PA 66) ojačanog staklenim vlaknima**

		Mjerenje, mm				
ISPITAK		1	2	3	srednja	devijacija
PA_S_1	širina	10,40	10,32	10,30	10,34	0,052915
	debljina	4,52	4,52	4,48	4,507	0,023094
PA_S_2	širina	10,46	10,50	10,50	10,487	0,023094
	debljina	4,54	4,56	4,56	4,553	0,011547
PA_S_3	širina	10,48	10,32	10,36	10,386	0,083267
	debljina	4,46	4,46	4,50	4,473	0,023094

**Tablica 9.4. Rezultati mjerenja širine i debljine poliamida (PA 66) ojačanog ugljičnim vlaknima**

		Mjerenje, mm				
ISPITAK		1	2	3	srednja	devijacija
PA_U_1	širina	9,92	10,00	10,00	9,973	0,046188
	debljina	4,00	4,00	4,02	4,007	0,011547
PA_U_2	širina	9,98	10,00	10,00	9,993	0,011547
	debljina	4,02	4,02	4,02	4,02	0
PA_U_3	širina	9,96	10,00	9,94	9,967	0,030551
	debljina	4,02	4,02	4,02	4,02	0

**Tablica 9.5. Rezultati mjerenja širine i debljine čistog poliamida (PA 66)**

		Mjerenje, mm				
ISPITAK		1	2	3	srednja	devijacija
PA_1	širina	9,90	9,90	9,86	9,887	0,023094
	debljina	4,00	4,00	4,00	4,00	0
PA_2	širina	9,82	9,90	9,80	9,84	0,052915
	debljina	4,00	3,98	4,00	3,993	0,011547
PA_3	širina	9,84	9,90	9,90	9,88	0,034641
	debljina	4,00	4,00	4,00	4,00	0

**Tablica 9.6. Rezultati mjerenja širine i debljine polipropilena (PP)**

		Mjerenje, mm				
ISPITAK		1	2	3	srednja	devijacija
PP_1	širina	9,98	10,00	10,00	9,993	0,011547
	debljina	4,04	4,08	4,08	4,053	0,023094
PP_2	širina	10,00	10,10	10,10	10,10	0,057735
	debljina	4,10	4,08	4,08	4,087	0,011547
PP_3	širina	10,00	9,98	9,98	9,987	0,011547
	debljina	4,04	4,06	4,04	4,047	0,011547

**Tablica 9.7. Rezultati mjerenja širine i debljine elastoplastomera (TPE)**

		Mjerenje, mm				
ISPITAK		1	2	3	srednja	devijacija
TPE_1	širina	9,94	9,92	9,96	9,94	0,02
	debljina	4,00	4,00	4,02	4,007	0,011547
TPE_2	širina	9,92	9,96	9,94	9,94	0,02
	debljina	4,02	4,02	4,00	4,013	0,011547
TPE_3	širina	9,92	10,00	9,92	9,947	0,046188
	debljina	4,00	4,00	4,00	4,00	0

**Tablica 9.8. Rezultati mjerenja širine i debljine poliuretanskog elastomera (TPU)**

		Mjerenje, mm				
ISPITAK		1	2	3	srednja	devijacija
TPU_1	širina	9,94	9,92	9,90	9,92	0,02
	debljina	4,06	4,08	4,04	4,06	0,02
TPU_2	širina	9,86	9,82	9,90	9,86	0,04
	debljina	4,02	4,10	4,02	4,047	0,046188
TPU_3	širina	9,94	9,92	10,10	9,953	0,098658
	debljina	4,06	4,08	4,08	4,073	0,011547