

**Studij:**  
**Kemija i inženjerstvo materijala**

Dr. Mirela Leskovic, red. prof.

# Karakterizacija materijala

## MEHANIČKA SVOJSTVA

# UVOD

Kriteriji koje moraju zadovoljiti gotovi materijali u primjeni:

- ▶ mehanička
  - ▶ toplinska
  - ▶ električna
  - ▶ optička svojstva
  - ▶ kemijska otpornost i dr.
- predstavljaju važan kriterij ocjene kvalitete i primjenskih svojstava materijala

# Mehanička svojstva polimera

---

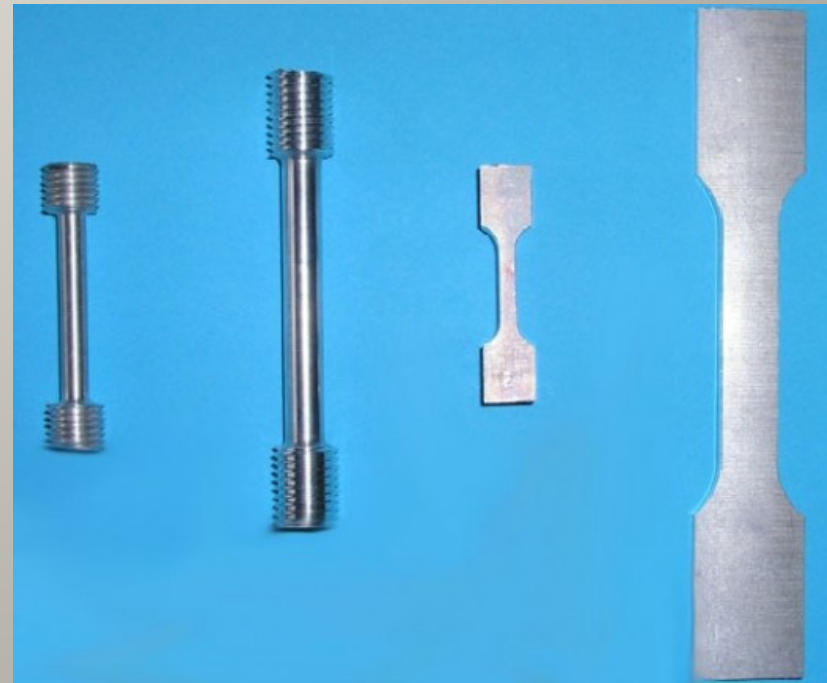
Mehanička svojstva označuju ponašanje materijala pod utjecajem nekog od oblika naprežanja.

Ovise o raznim utjecajnim čimbenicima

- strukturi polimera
  - molekulna struktura
  - nadmolekulna struktura
- vanjski čimbenici
  - temperatura
  - trajanje opterećenja
  - način opterećenja (vlak, tlak, ..)
  - vrsta opterećenja (statičko, dinamičko, promjenljivo, udarno)
  - vlažnost i utjecaj okoline

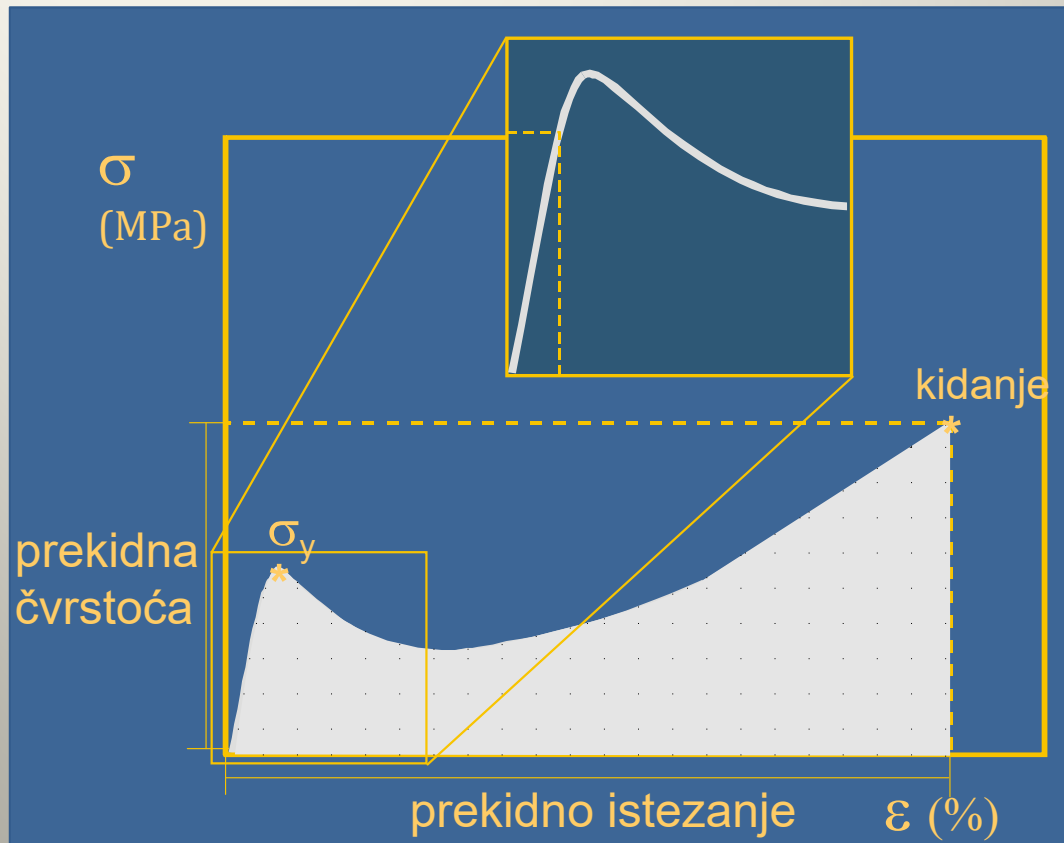
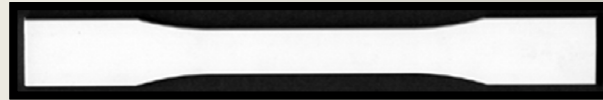
# Krivulja naprezanje-istezanje ( $\sigma$ - $\varepsilon$ )

- najčešće primjenjivana metoda određivanja mehaničkih svojstava je utvrđivanje ponašanja u uvjetima naprezanje – deformacija
- najvažnija metoda utjecaja **sile naprezanja na deformaciju i sklonost materijala prema kidanju**, jest njihovo djelovanje na produljenje epruvete, koje se naziva i rasteznim ispitivanjem
- ta metoda daje uvid u cjelovito ponašanje materijala od početnog elastičnog istezanja do konačnog kidanja



# Krivulja naprezanje-istezanje ( $\sigma$ - $\epsilon$ )

- mehanička kidalica
- rastezno ispitivanje



- oblik krivulje ovisi o vrsti materijala, temperaturi i brzini deformacije

Naprezanje,  $\sigma$

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad [\text{N mm}^{-2}]$$

Istezanje,  $\epsilon$

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad [\%]$$

Modul rastezljivosti,  $E$

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad [\text{N mm}^{-2}]$$

Rad

$$w \propto \int F(L) dL \quad [\text{N m}]$$

# Krivulja naprezanje-istezanje ( $\sigma$ - $\epsilon$ )

## područje malih istezanja

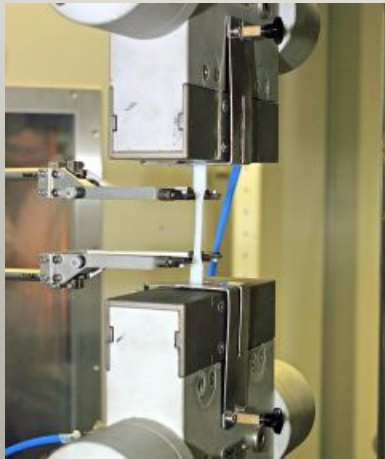
- rastezni (Youngov) modul
- Poissonov omjer

**elastičnih deformacija  
(područje linearnosti)**

## područje velikih istezanja

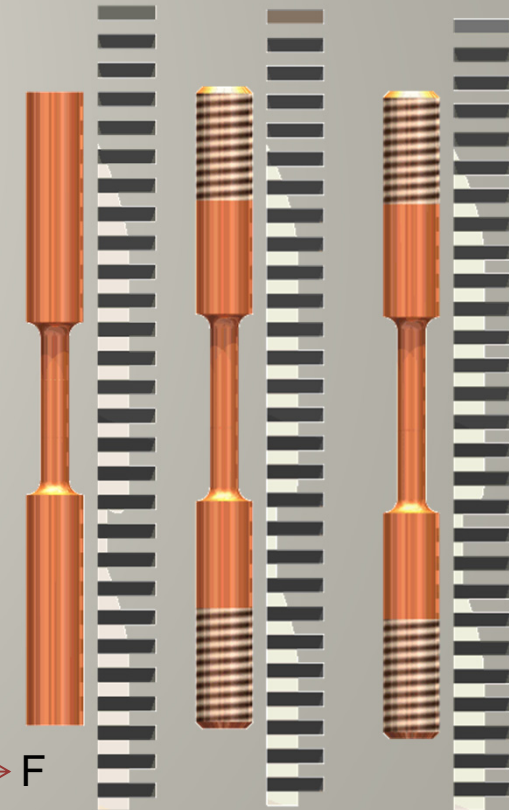
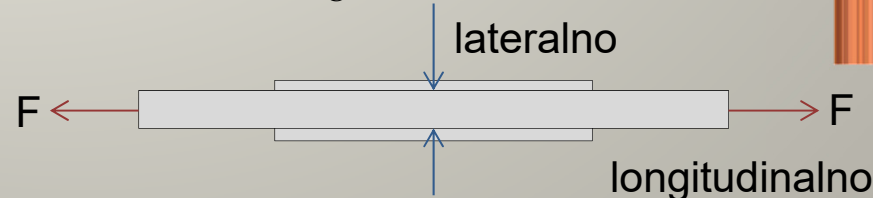
- granica razvlačenja
- prekidna čvrstoća
- prekidno istezanje

**plastičnih deformacija  
(trajna deformacija)**



Poissonov omjer

$$\nu = -\frac{\epsilon_{lateralno}}{\epsilon_{longitudinalno}}$$



- opisuje relativnu promjenu dimenzije epruvete (objekta) kada se primjeni opterećenje u longitudinalnom smjeru

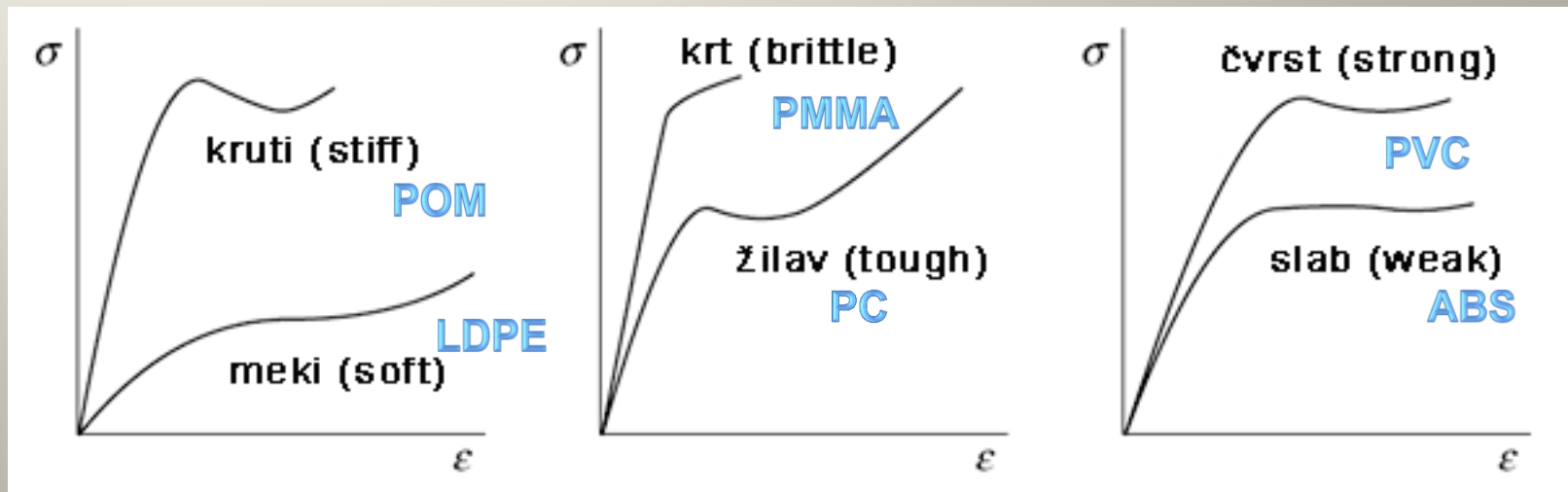
# Krivulja naprežanje-istezanje ( $\sigma$ - $\epsilon$ )

- Ovisno o svojstvima, polimere možemo razvrstati na:

krute (tvrde-stiff) ili meke (soft)

žilave (tough) ili krte (brittle)

čvrste (strong) ili slabe (weak)



# Vremenski ovisne deformacije

---

*Polimeri pokazuju vremenski i temperaturno ovisna svojstva (viskoelastični materijali)*

## Viskoelastičnost

Izraz „visko-elastičan“ označava dvojaku prirodu materijala; koji se s jedne strane ponaša kao viskozna kapljevina, i s druge strane kao elastična krutina.

**viskoelastično ponašanje odražava različito ponašanje ovisno o brzini i temperaturi**  
**pri visokim temperaturama ili malim brzinama istežanja** ⇒ žilaviji (veća deformacija)  
**pri niskim temperaturama ili velikim brzinama istežanja** ⇒ manje žilav

- Razlozi su u specifičnoj strukturi polimera
- makromolekula se s obzirom na susjedne makromolekule ne može pomaknuti odjednom kao cjelina, već se deformacija polimera ostvaruje serijom promjena konformacija makromolekule
- te se promjene ostvaruju toplinskim gibanjem pojedinih segmenata makromolekule

### relaksacijski proces

– proces uspostavljanja ravnotežnog stanja, prethodno narušenog vanjskim uzrokom (mehaničkom silom ili temperaturnim gradijentom) koji se uspostavlja toplinskim gibanjem kinetičkih jedinica u strukturi polimera

- vremenski ovisan – kinetičke jedinice različite veličine – potrebno različito vrijeme za postizanje ravnoteže

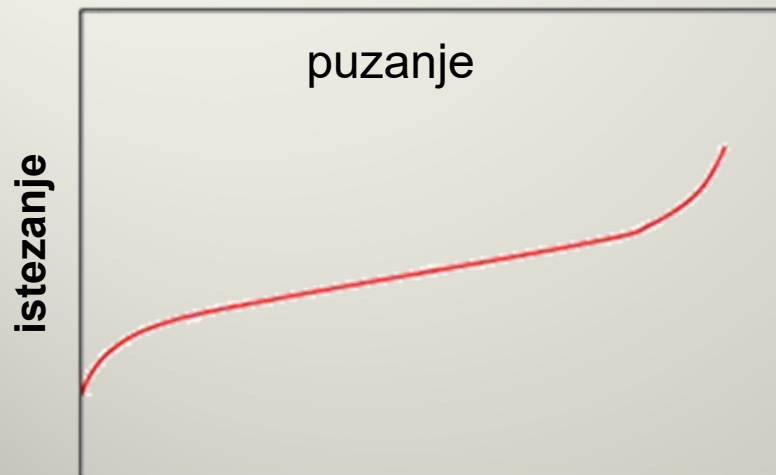
# Vremenski ovisne deformacije

Vremenski ovisni fenomeni su:

**PUZANJE** i **RELAKSACIJA NAPREZANJA**

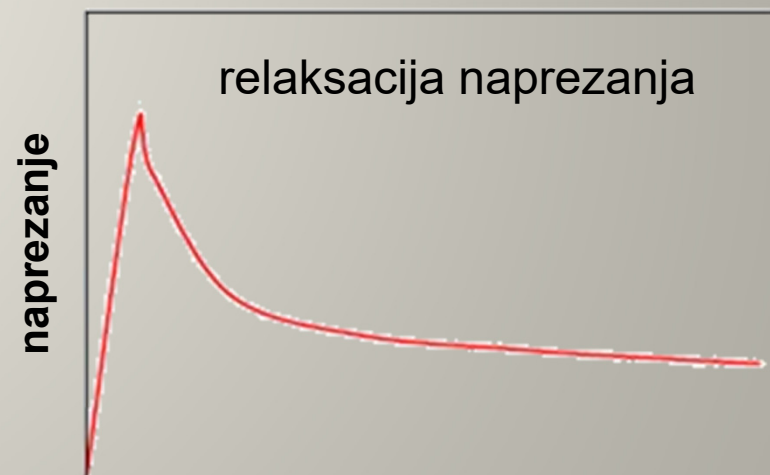
*važno za polimere koji moraju podnijeti opterećenje tijekom duljeg vremena*

## PUZANJE



**promjena istežanja  
(duljine epruvete)  
pri konstantnom opterećenju  
 $\sigma = \text{konst.}$**

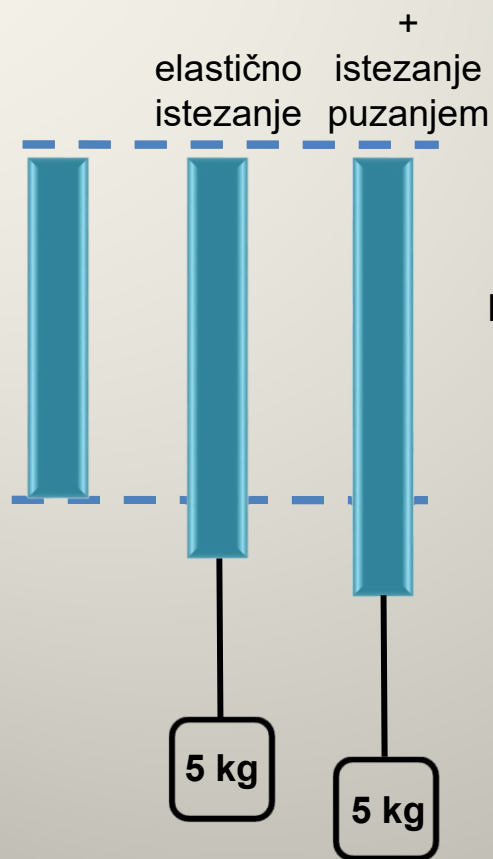
## RELAKSACIJA NAPREZANJA



**promjena naprezanja  
(opterećenja)  
pri konstantnom istežanju  
 $\varepsilon = \text{konst.}$**

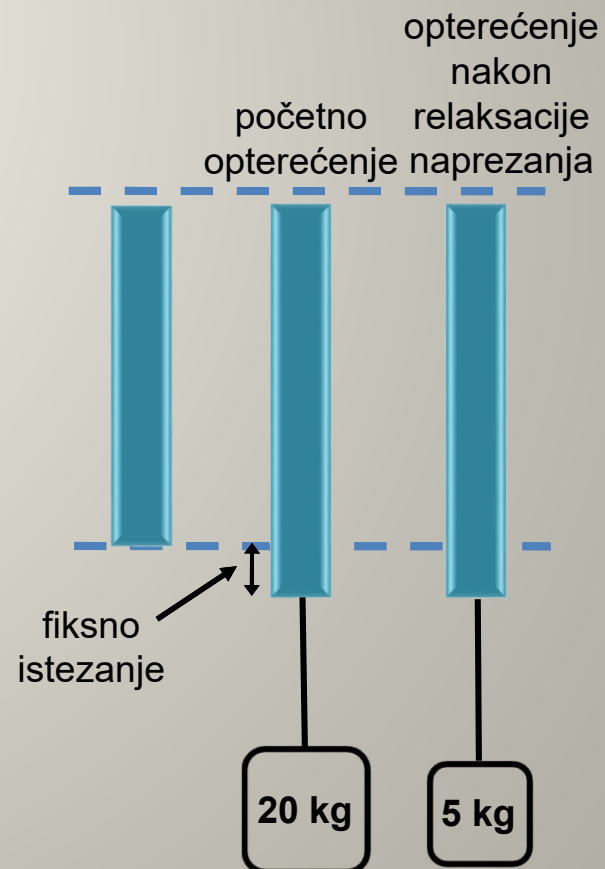
# Vremenski ovisne deformacije

## PUZANJE



$$\sigma = \text{konst.}$$

## RELAKSACIJA NAPREZANJA

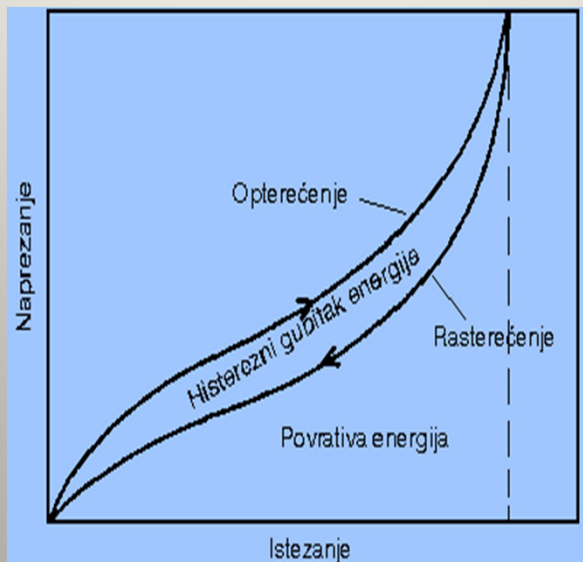


$$\varepsilon = \text{konst.}$$

# Vremenski ovisne deformacije

- krivulja histereze zapaža se pri snimanju deformacijskih krivulja u ciklusu opterećenje-rasterećenje
- fenomen histereze očituje se nepodudaranjem krivulja naprežanje-istežanje dobivenih postepenim istežanjem materijala i zatim postepenim smanjivanjem istežanja

## HISTEREZA



- površina ograničena krivuljom opterećenja i osi apscise predstavlja rad utrošen na deformiranje polimera  $A_o$

$$A_o = \int \sigma d\varepsilon$$

- površina ograničena krivuljom rasterećenja uzorka odgovara radu koji se oslobađa pri povratku uzorka u početni položaj  $A_R$

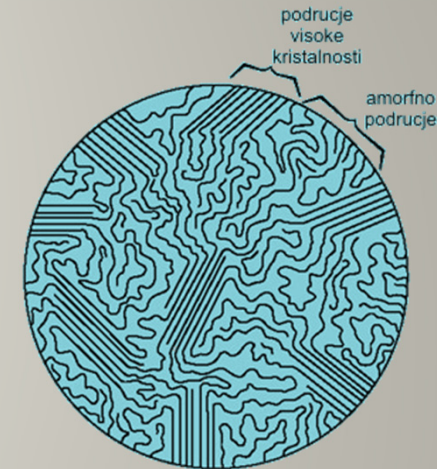
$$A_R = -\int \sigma d\varepsilon$$

- zbroj ovih integrala predstavlja površinu histerezne petlje, tj. razliku između rada utrošenog na deformiranje i njegovog oslobađanja poslije rasterećenja, odgovara energiji koja nastaje u ciklusu opterećenja-rasterećenja

# Deformacija polimera

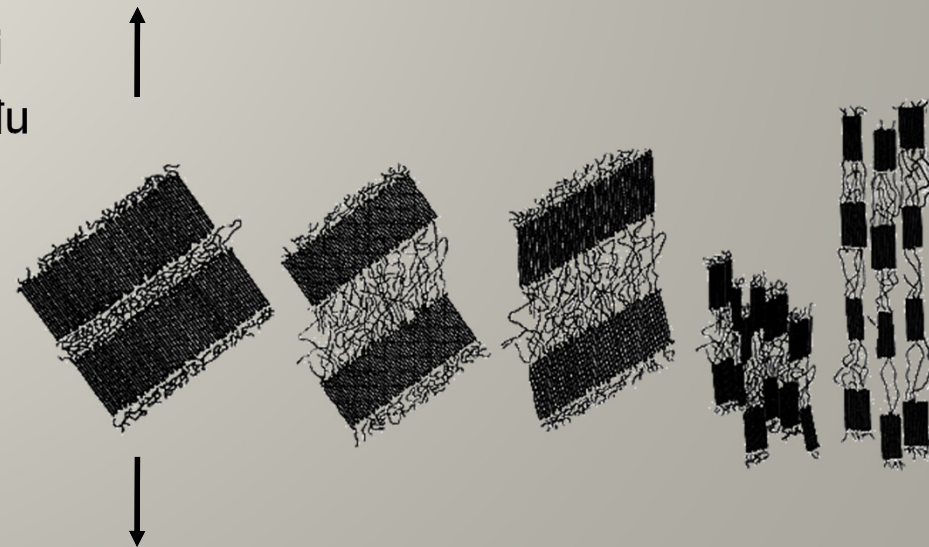
## ● amorfni polimeri

- fleksibilniji
- lanci nisu gusto pakirani
- slabije međumolekulne sile
- nastajanje vrata – manji poprečni presjek  
ojačanje usmjeravanjem lanaca (sređenost)
- posljedica istezanja



## ● semi-kristalasti i kristalasti polimeri

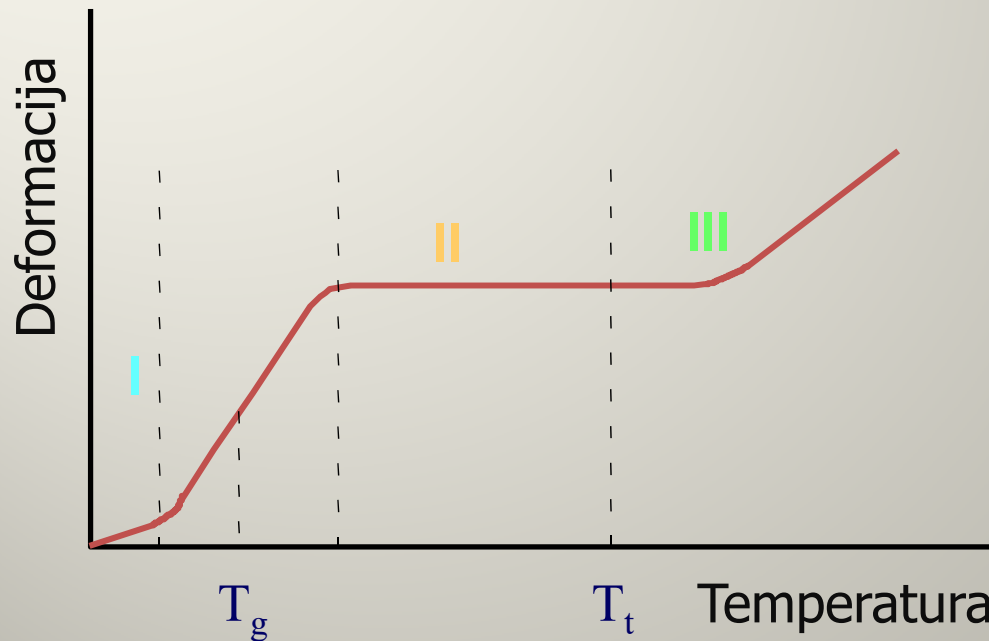
- prvo se istežu amorfna područja između kristalnih lamela
- kristalne lamele se istežu u smjeru djelovanja sile i tada se kidaju u manje segmente
- žilaviji od amornih polimera



# Ovisnost o temperaturi

## TERMOMEHANIČKA KRIVULJA

- kondenzirani sustavi makromolekula
- polidisperzni sustavi



- I – staklasto stanje
- II – viskoelastično (gumasto) stanje
- III – viskofluidno (kapljevito) stanje

**Viskoelastična tijela** – istovremeno imaju svojstva i elastičnih tijela i viskoznih kapljevina

# Ovisnost o temperaturi

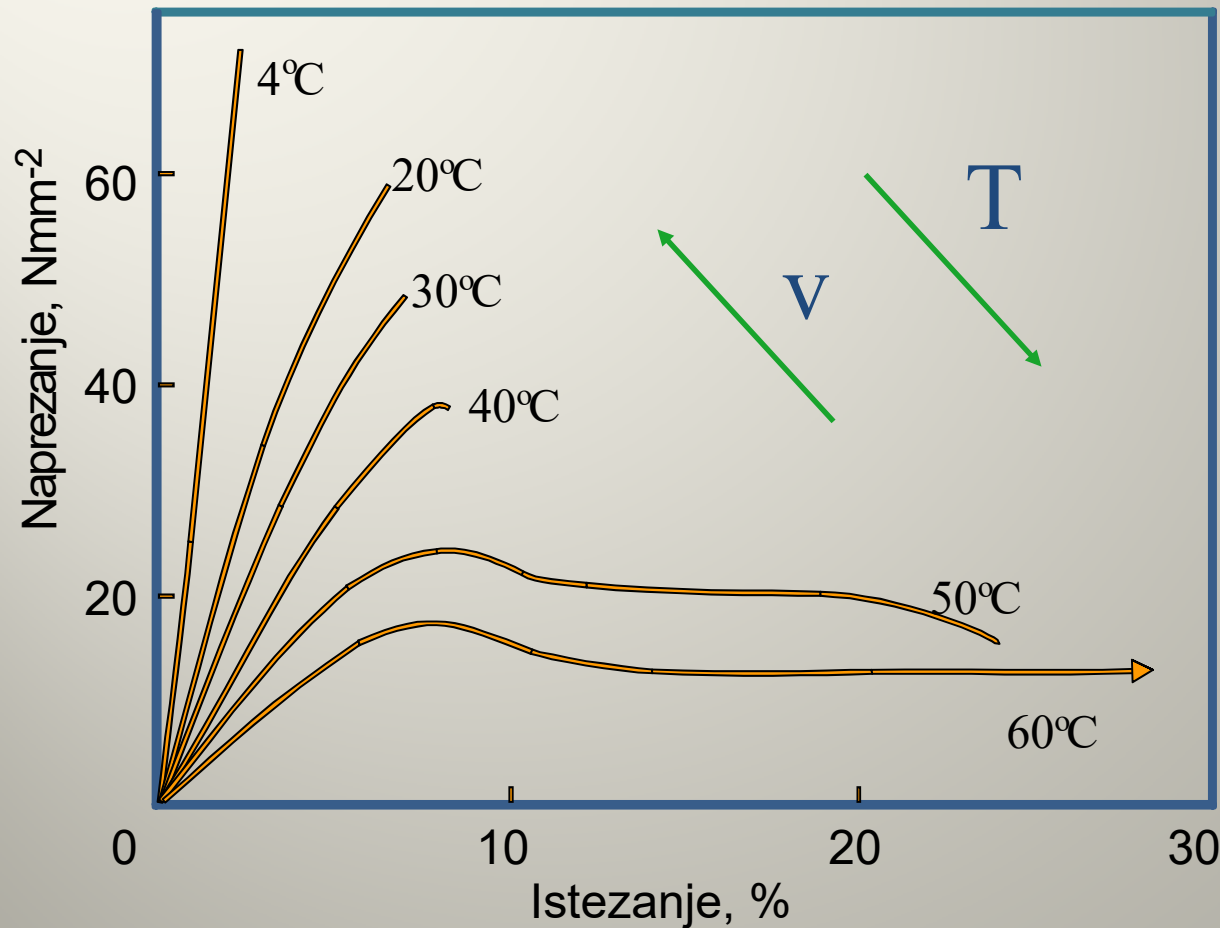
---

- Mehanička svojstva amorfnih i semi-kristalastih polimera značajno ovise o temperaturi staklastog prijelaza,  $T_g$
- Općenito
  - Polimeri koji imaju  $T_g$  iznad temperature primjene su čvrsti, kruti i ponekada kruti
    - npr. polistiren, poli(metilmetakrilat)
  - Polimeri kojima je  $T_g$  ispod temperature primjene su slabiji, manje kruti, i više žilavi
    - npr. polietilen, polipropilen
- Promjena temperature značajno utječe na svojstva polimera

# Ovisnost o temperaturi

Mehanička svojstva polimera značajno ovise o temperaturi i brzini deformacije

## Primjer: PMMA



$T_g$  (PMMA) = 101°C

*Niske temperature*  
– krt (visoki modul, malo istezanje)

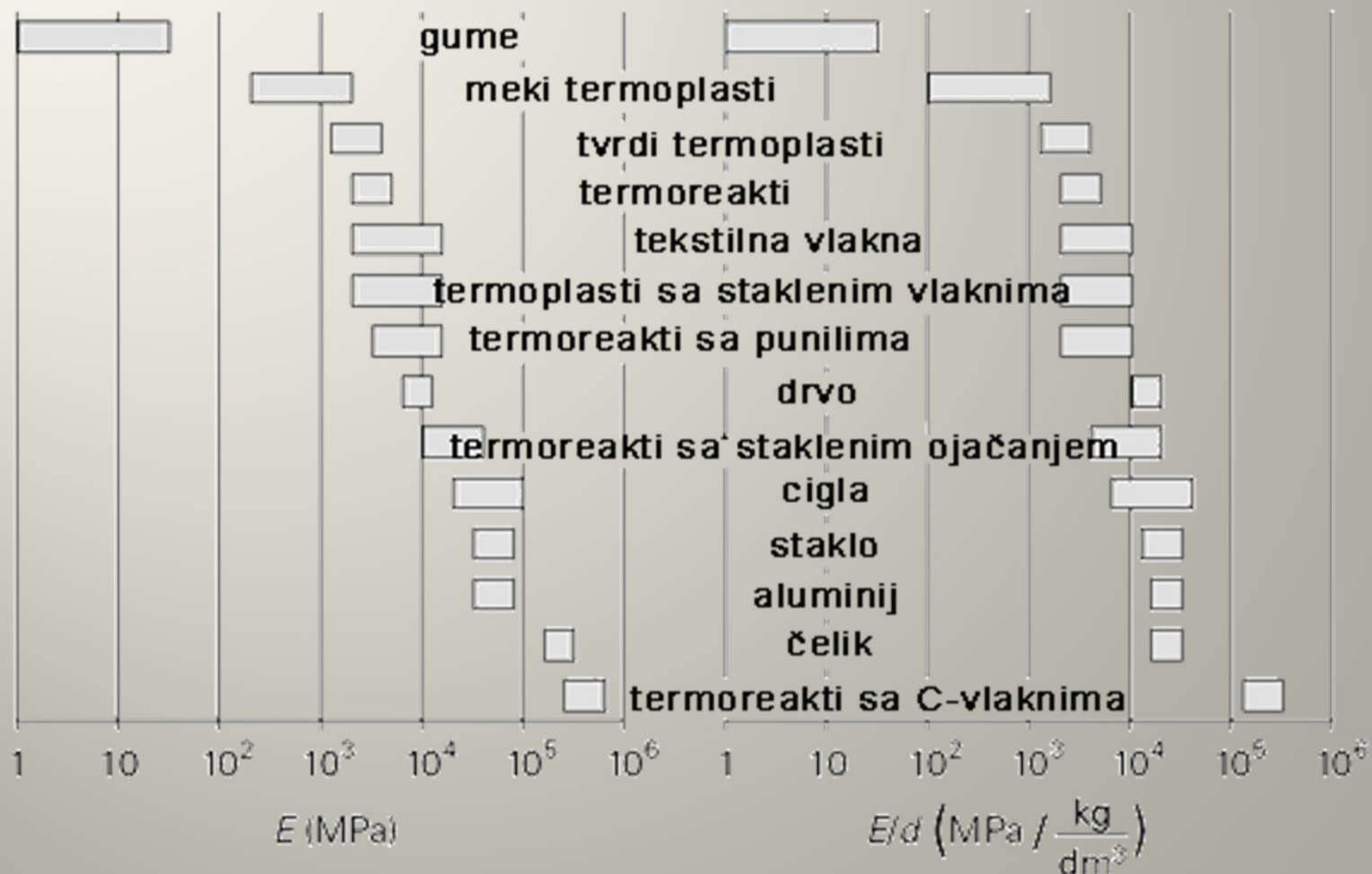
*Visoke temperature*  
– elastičan poput gume (niski modul, veliko istezanje)

*Velike brzine deformacije*  
– krt

*Male brzine deformacije*  
– elastičan poput gume

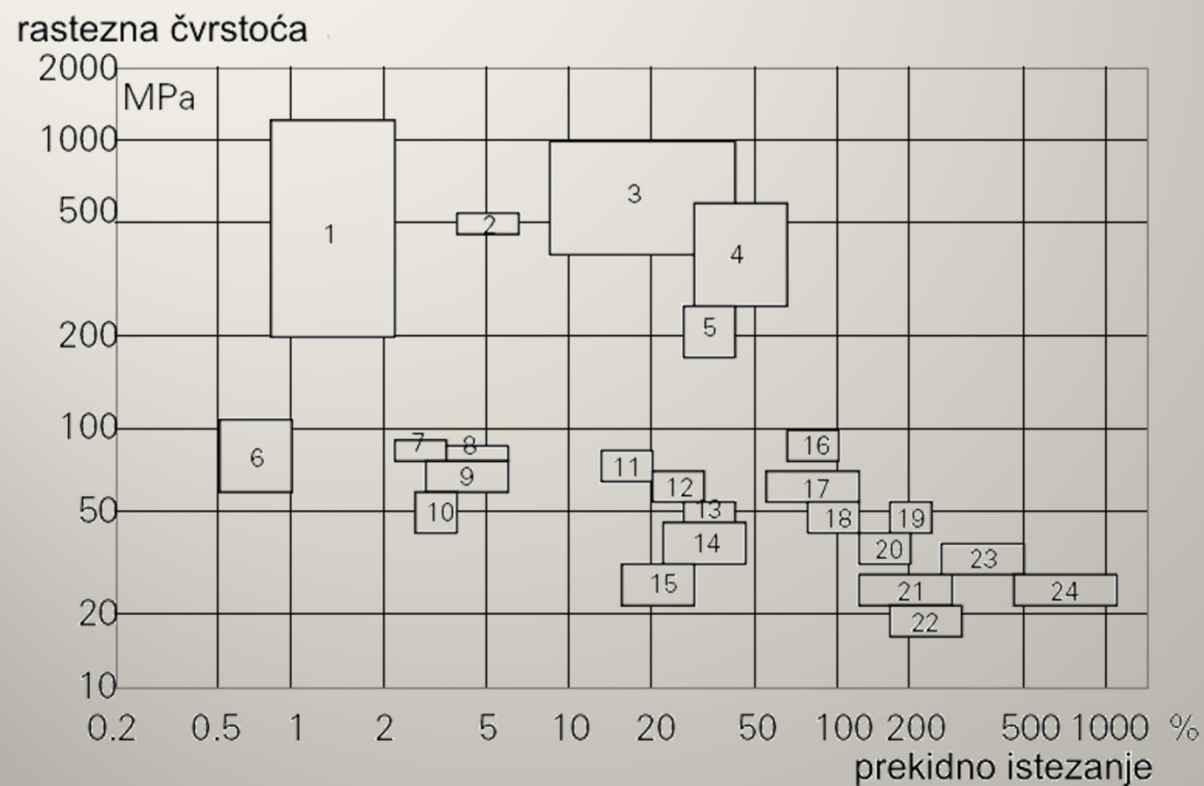
# Krivulja naprezanje-istezanje ( $\sigma$ - $\epsilon$ )

## Apsolutni i reducirani rastezni modul različitih materijala



# Mehanička svojstva polimera

## Rastezna čvrstoća i prekidno istežanje različitih materijala



1. ojačani termoreakt. polim.
2. pamuk
3. konstrukcijski metali
4. sintetička vlakna
5. vuna
6. termoreaktivne smole
7. PPS
8. SAN
9. PMMA
10. PS
11. PVC
12. POM
13. CA
14. TPS
15. ABS
16. PSU
17. PPO, PC
18. PETP
19. PA
20. PP
21. HDPE
22. LDPE
23. PTFE
24. guma

# VJEŽBE

---

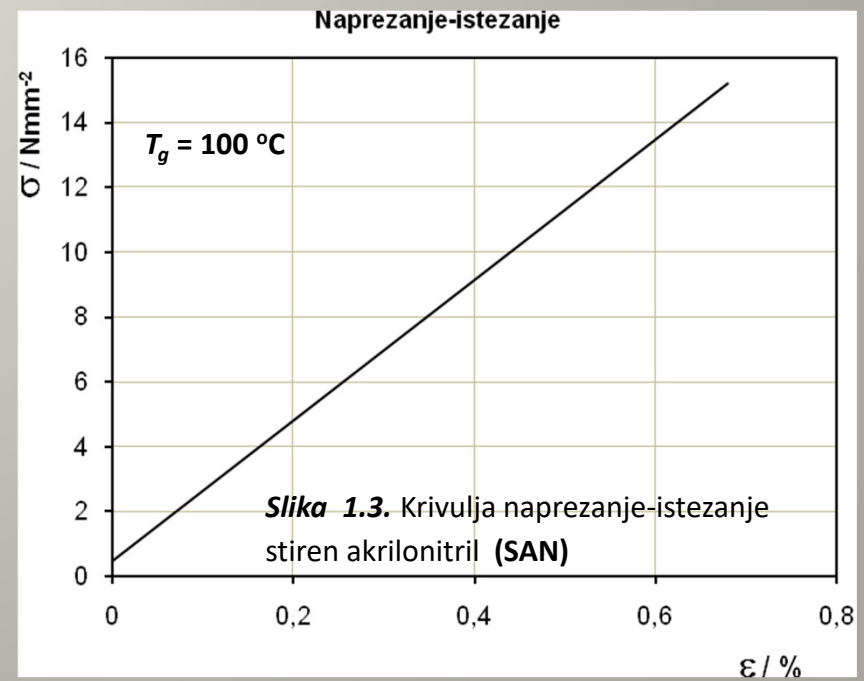
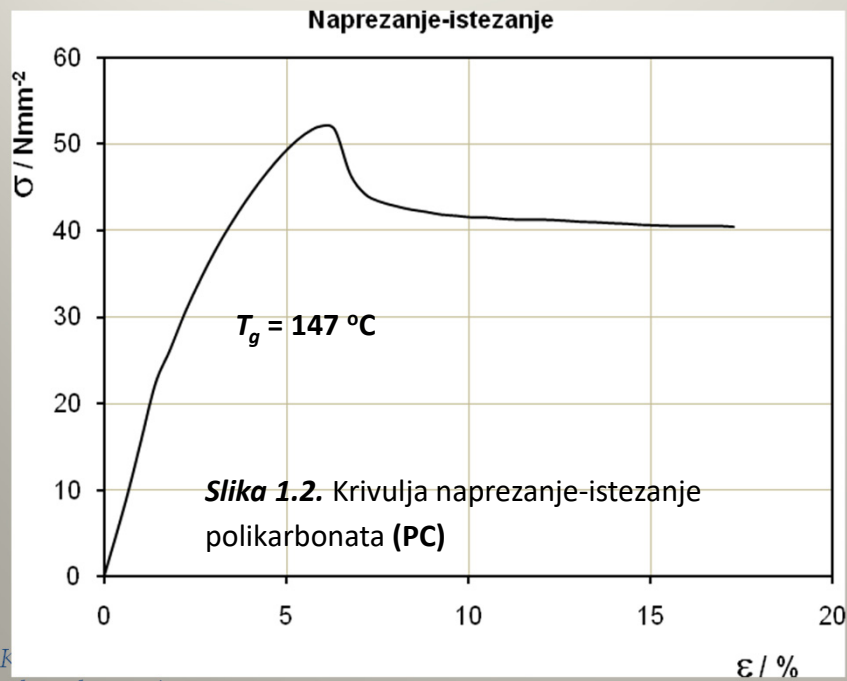
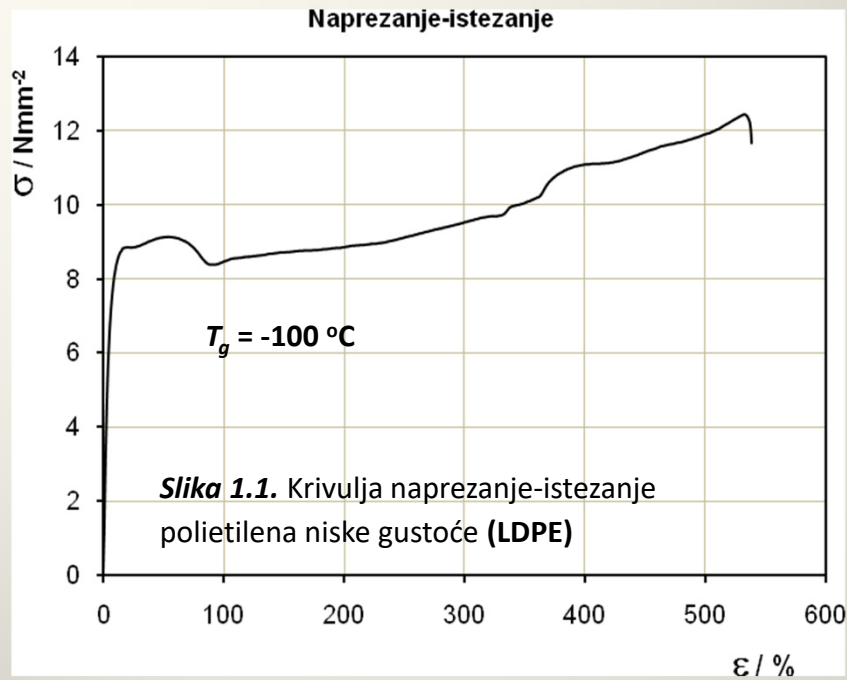
## PRIMJER 1: POLIMERNI MATERIJALI

### PRILOG A

#### Rezultati rasteznog ispitivanja polimera

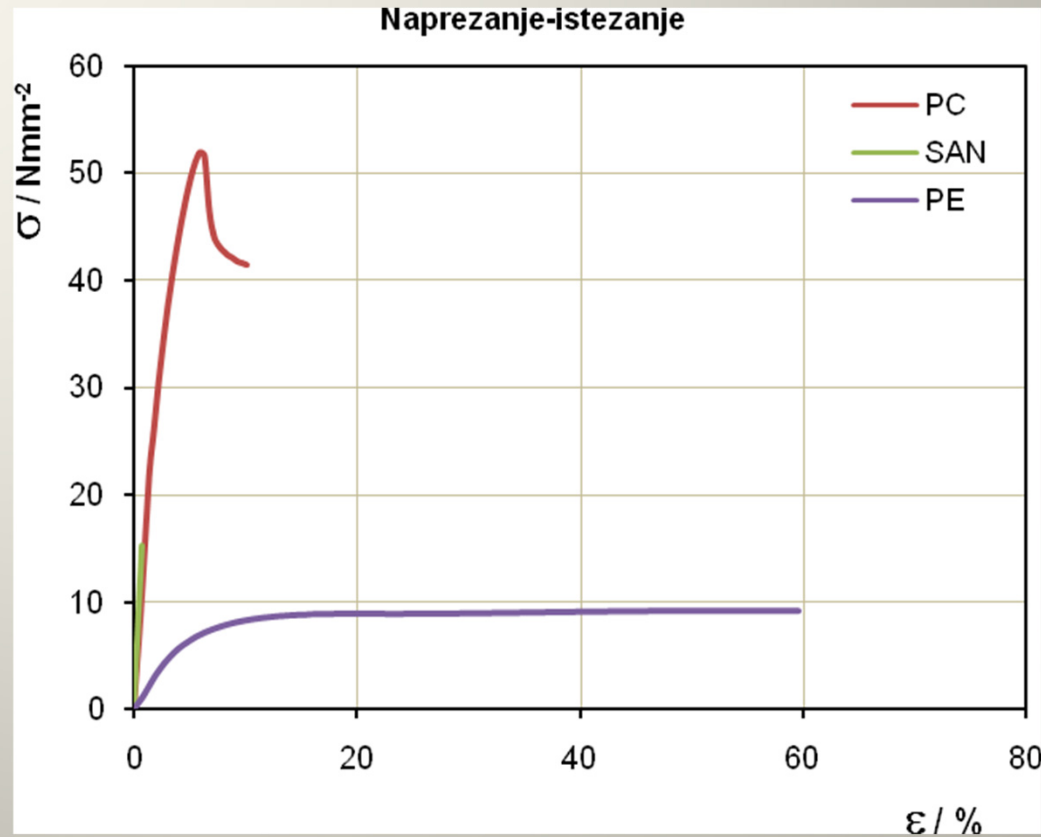
Tablica 1. Karakteristične značajke očitane iz krivulja naprezanje-istezanje

Polimer	granica razvlačenja $\sigma_y / \text{Nmm}^{-2}$	rastezni modul $E / \text{Nmm}^{-2}$	prekidna čvrstoća $\sigma_R / \text{Nmm}^{-2}$	prekidno istezanje $\epsilon_R / \%$	rad $W / \text{Nm}$
LDPE	8,86	142,55	11,70	538,00	30,90
PC	52,09	1463,98	26,80	38,00	10,70
SAN	-	1733,16	15,22	0,68	0,10



PRILOG A

Rezultati rasteznog ispitivanja polimera

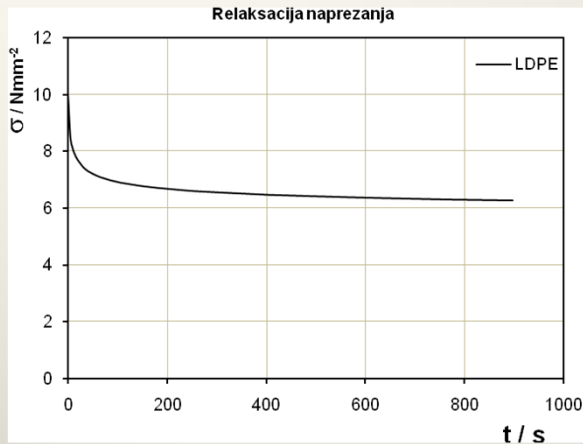


**Slika 1.4.** Krivulje naprezanje-istezanje polietilena niske gustoće (LDPE), polikarbonata (PC) i stiren akrilonitrila (SAN)

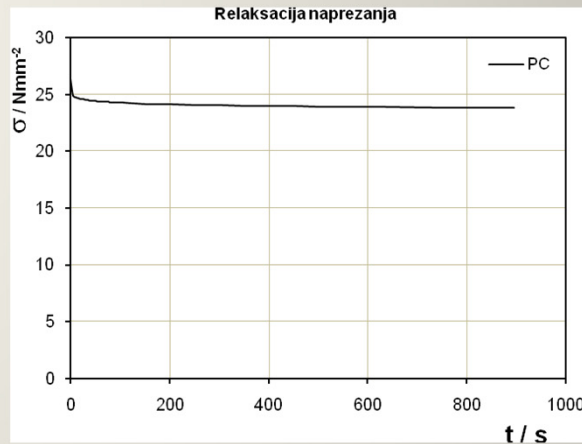
# PRILOG B

## Rezultati relaksacije napreznja polimera

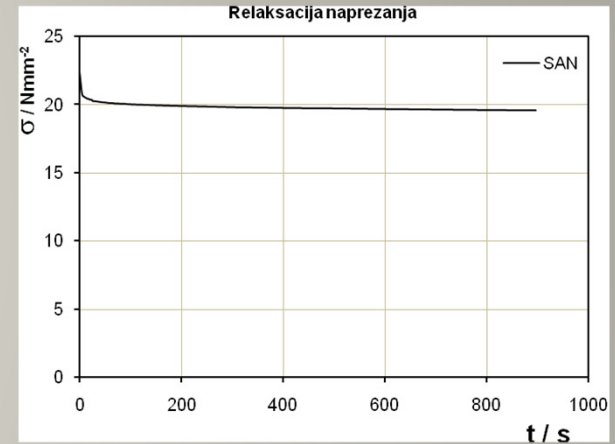
### PRIMJER 1: POLIMERNI MATERIJALI



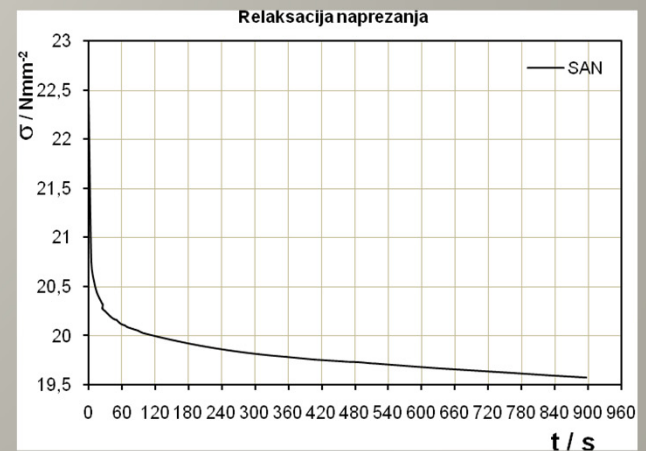
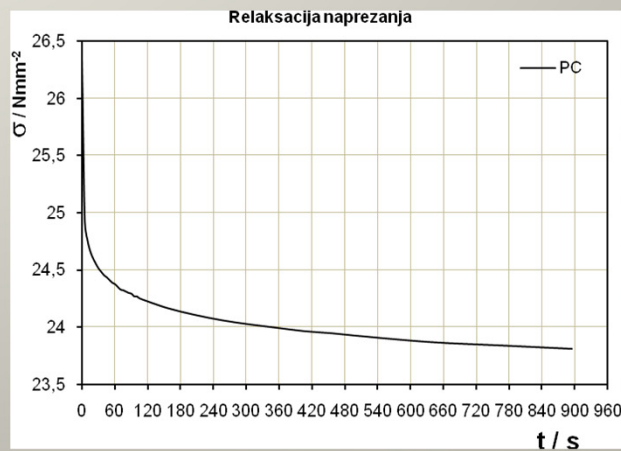
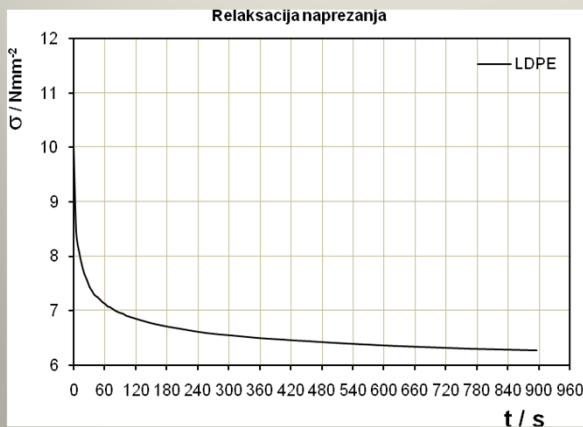
**Slika 1.1.** Krivulja relaksacije napreznja polietilena niske gustoće (LDPE) maksimalna sila (F/s - high): 3 %



**Slika 1.2.** Krivulja relaksacije napreznja polikarbonata (PC) maksimalna sila (F/s - high): 20 %

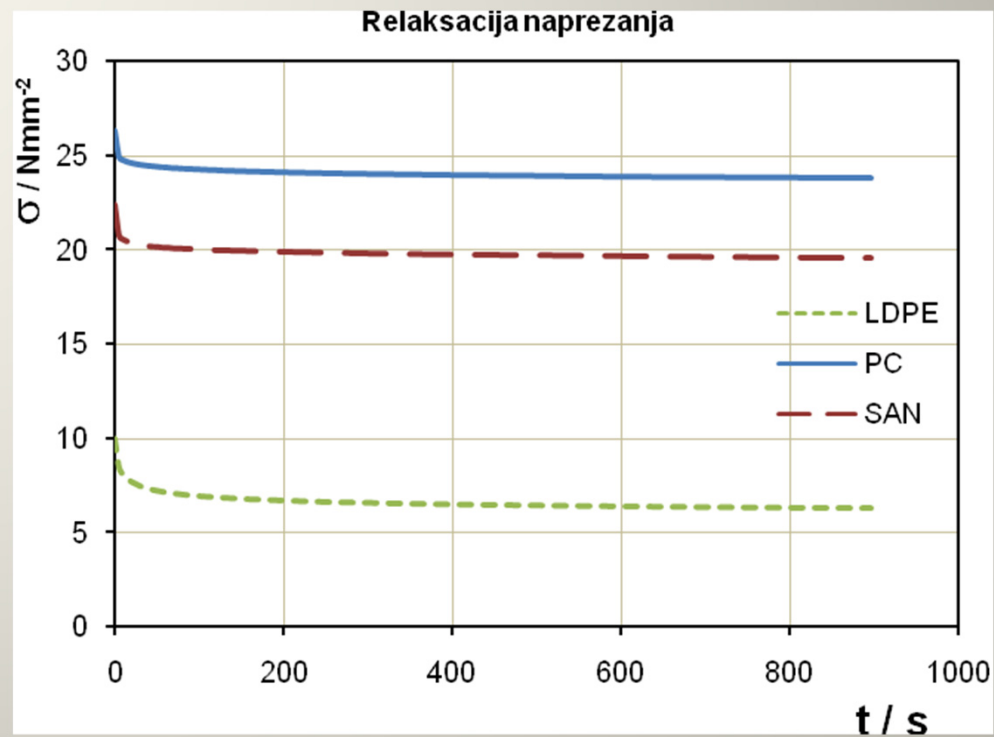


**Slika 1.3.** Krivulja relaksacije napreznja stiren akrilonitrila (SAN) maksimalna sila (F/s - high): 2 %



PRILOG B

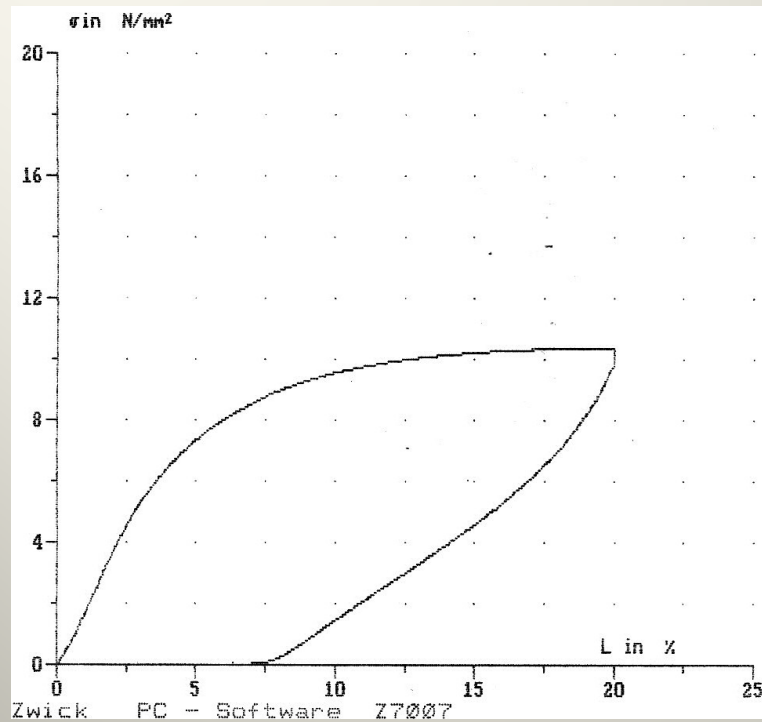
Rezultati relaksacije napreznja polimera



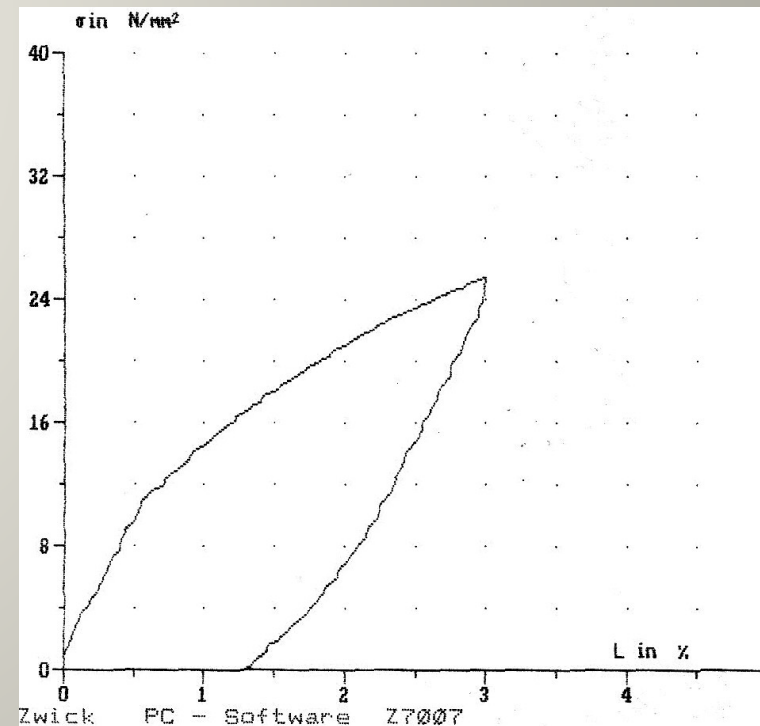
**Slika 1.4.** Krivulje relaksacije napreznja polietilena niske gustoće (LDPE), polikarbonata (PC) i stiren akrilonitrila (SAN)

PRILOG C

Rezultati ispitivanja cikličkog opterećenja - rasterećenja (histereze) polimera



**Slika 1.1.** Krivulja histereze 1. ciklusa polietilena niske gustoće (**LDPE**) maksimalna sila (F/s - high): 3 %



**Slika 1.2.** Krivulja histereze 1. ciklusa polikarbonata (**PC**) maksimalna sila (F/s - high): 5 %