

# Utjecaj smjera opterećivanja na mehanička svojstva plastomernih kompozita jednoosno ojačanih ugljičnim vlaknima

---

Perić, Vanja

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:818507>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-17**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Vanja Perić**

Zagreb, 2019. godine

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Tatjana Haramina, dipl. ing.

Student:

Vanja Perić

Zagreb, 2019. godine

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

Zahvaljujem se mentorici izv. prof. dr. sc. Tatjani Haramini na strpljenju i savjetima koji su bili od nemjerljive pomoći.

Također se želim zahvaliti asistentu Danielu Pugaru, mag. ing. mech. na susretljivosti i danome vremenu, kao i tehničkim suradnicima Mireli Petranović i Božidaru Bušetinčanu na pomoći oko izrade eksperimentalnog dijela rada.

Posebna zahvala ide mojoj obitelji koji su mi bili podrška tijekom cijelog studija.

Vanja Perić



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<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |         |
| Datum:                                                       | Prilog: |
| Klasa:                                                       |         |
| Ur. broj:                                                    |         |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **VANJA PERIĆ** Mat. br.: **0035195924**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj smjera opterećivanja na mehanička svojstva plastomernih kompozita jednoosno ojačanih ugljičnim vlaknima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Effect of load direction on the mechanical properties of uniaxially reinforced thermoplastic based composites**

Opis zadatka:

Polimerni kompoziti pretežno se izrađuju na bazi duromera i plastomera. Dok je tržište duromernih kompozita zasićeno, tržište plastomera je zadnjih godina u porastu i čini približno trećinu svih polimernih kompozita. Plastomerni kompoziti izrađuju se pri povišenim temperaturama, a poseban izazov čini viskoznost taline i impregniranje vlakana. Neke od prednosti plastomernih matrica su kratki ciklusi izrade, bolja žilavost, naknadna deformabilnost i recikličnost.

U radu će biti analizirana mehanička svojstva kompozita s matricom od samoobnavljajućeg kopolimera etilena i metakrilatne kiseline (E/MAA) ojačanog jednoosno ugljičnim vlaknima.

U radu je potrebno:

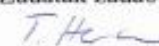
- napraviti pregled materijala i metoda izrade kompozita s plastomernom matricom
- izraditi jednoosno ojačan kompozit s dva sloja vlakana
- ispitati materijal matrice pod jednoosnim cikličkim opterećenjem na kidalici
- ispitati čvrstoću i modul pri rasteznom i savojnom opterećenju za različite smjerove vlakana u odnosu na smjer rezanja ispitnih tijela ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$ )
- analizirati rezultate.

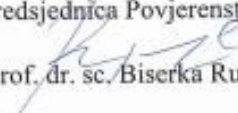
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
26. rujna 2019.

Rok predaje rada:  
28. studenog 2019.

Predviđeni datum obrane:  
4. prosinca do 6. prosinca 2019.

Zadatak zadao:  
  
prof. dr. sc. Tatjana Haramina

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## Sadržaj

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Sadržaj.....                                                                       | I   |
| Popis slika .....                                                                  | II  |
| Popis tablica .....                                                                | III |
| Popis oznaka.....                                                                  | IV  |
| Sažetak .....                                                                      | V   |
| Summary .....                                                                      | VI  |
| 1. Uvod.....                                                                       | 1   |
| 1. Kompozitni materijali .....                                                     | 3   |
| 1.1. Vlaknima ojačani kompoziti .....                                              | 3   |
| 1.2. Usmjerenost i vrsta tkanja .....                                              | 4   |
| 2. Polimerni kompoziti.....                                                        | 7   |
| 2.1. Prednosti korištenja plastomerne matrice u odnosu na duromernu .....          | 7   |
| 2.2. Nedostatci korištenja plastomerne matrice u odnosu na duromernu .....         | 7   |
| 3. Postupci proizvodnje plastomernih kompozita .....                               | 9   |
| 2.1. Slaganje folija (eng. film stacking) .....                                    | 9   |
| 2.2. Membransko oblikovanje (eng. diaphragm forming).....                          | 9   |
| 2.3. Izmiješanim vlaknima (eng. commingled fibres).....                            | 10  |
| 2.4. Izravno prešanje (eng. compression molding) .....                             | 10  |
| 2.5. Injekcijsko prešanje .....                                                    | 10  |
| 3. Ojačala .....                                                                   | 12  |
| 3.1. Staklena vlakna .....                                                         | 12  |
| 3.2. Borova vlakna .....                                                           | 14  |
| 3.3. Aramidna vlakna .....                                                         | 15  |
| 3.4. Keramička vlakna.....                                                         | 16  |
| 3.5. Ugljična vlakna .....                                                         | 16  |
| 3.5.1. Proizvodnja ugljičnih vlakana .....                                         | 17  |
| 3.5.1.1. Ex PAN ugljična vlakna.....                                               | 18  |
| 3.5.1.2. Ugljična vlakna na bazi umjetne svile (Ex celulozna ugljična vlakna)..... | 21  |
| 3.5.1.3. Ugljična vlakna na bazi smola (eng. Ex pitch carbon fibers) .....         | 21  |
| 3.5.1.4. Ostali oblici prekusora .....                                             | 22  |
| 4. Ionomeri .....                                                                  | 23  |
| 4.1. Surllyn .....                                                                 | 23  |
| 5. Eksperimentalni dio .....                                                       | 25  |

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1. Izrada matrice i kompozita .....                            | 25 |
| 5.2. Oprema .....                                                | 28 |
| 5.3. Rezultati.....                                              | 29 |
| 5.3.1. Savojna čvrstoća i modul .....                            | 29 |
| 5.3.1.1. Savojna čvrstoća i modul za smjer vlakana od 90° .....  | 30 |
| 5.3.1.2. Savojna čvrstoća i modul za smjer vlakana od 45° .....  | 33 |
| 5.3.1.3. Savojna čvrstoća i modul za smjer vlakana od 0° .....   | 36 |
| 5.3.1.4. Savojna čvrstoća i modul za neojačani Surlyn .....      | 40 |
| 5.3.2. Rastezna čvrstoća i modul.....                            | 42 |
| 5.3.2.1. Rastezna čvrstoća i modul za smjer vlakana od 90° ..... | 44 |
| 5.3.2.2. Rastezna čvrstoća i modul za smjer vlakana od 45° ..... | 48 |
| 5.3.2.3. Rastezna čvrstoća i modul za smjer vlakana od 0° .....  | 53 |
| 5.3.2.4. Jednoosno cikličko opterećenje neojačanog Surlyna ..... | 58 |
| 5.4. Analiza rezultata .....                                     | 64 |
| 6. Zaključak .....                                               | 66 |
| 7. Literatura .....                                              | 67 |

## Popis slika

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačala [4].....                                           | 3  |
| Slika 2. Utjecaj usmjerenja vlakana obzirom na naprezanje za Ti-leguru ojačanu borovim vlaknima [4] ..... | 5  |
| Slika 3. Stilovi tkanja: a) kvadratno tkanje; b) keper; c) atlas.....                                     | 5  |
| Slika 4. RRIM postupak [10].....                                                                          | 11 |
| Slika 5. Različiti oblici staklenih vlakana [1] .....                                                     | 13 |
| Slika 6. Shematski prikaz mera i lančaste strukture aramida [4] .....                                     | 15 |
| Slika 7. Heksagonalna ugljikova struktura [1] .....                                                       | 17 |
| Slika 8. Proces proizvodnje ugljičnih vlakana iz PAN prekursorskih vlakana [1] .....                      | 19 |
| Slika 9. Ovisnost mehaničkih svojstava o temperaturi grafitizacije [1] .....                              | 20 |
| Slika 10. Shematski prikaz proizvodnje ugljičnih vlakana na bazi umjetne svile .....                      | 21 |
| Slika 11. Struktura Surlyna®8940.....                                                                     | 24 |
| Slika 12. Slaganje granulata u kalup.....                                                                 | 27 |
| Slika 13. Vakuumiranje granulata .....                                                                    | 27 |
| Slika 14. Univerzalna kidalica.....                                                                       | 28 |
| Slika 15. Shematski prikaz ispitivanja u tri točke [17] .....                                             | 29 |
| Slika 16. Grafički prikaz savojnog ispitivanja za vlakna pod kutem od 90° .....                           | 32 |
| Slika 17. Savojni moduli .....                                                                            | 32 |
| Slika 18. Grafički prikaz savojnog ispitivanja za vlakna pod kutem od 45° .....                           | 35 |
| Slika 19. Savojni moduli .....                                                                            | 35 |
| Slika 20. Grafički prikaz savojnog ispitivanja za vlakna pod kutem od 0° .....                            | 38 |
| Slika 21. Savojni moduli .....                                                                            | 39 |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 22. Grafički prikaz savojnog ispitivanja za neojačani Surlyn.....          | 41 |
| Slika 23. Savojni modul .....                                                    | 42 |
| Slika 24. Komparator .....                                                       | 43 |
| Slika 25. Grafički prikaz rasteznog ispitivanja za vlakna pod kutem od 90° ..... | 47 |
| Slika 26. Rastezni modul.....                                                    | 47 |
| Slika 27. Grafički prikaz rasteznog ispitivanja za vlakna pod kutem od 45° ..... | 52 |
| Slika 28. Rastezni modul.....                                                    | 52 |
| Slika 29. Grafički prikaz rasteznog ispitivanja za vlakna pod kutem od 0° .....  | 57 |
| Slika 30. Rastezni modul.....                                                    | 57 |
| Slika 31. Grafički prikaz jednoosnog cikličkog opterećenja uzorka 1 .....        | 60 |
| Slika 32. Grafički prikaz jednoosnog cikličkog opterećenja uzorka 2.....         | 62 |
| Slika 33. Rastezni modul za neojačan Surlyn.....                                 | 63 |

## Popis tablica

|                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 1. Sastav najčešće korištenih staklenih vlakana [1] .....                                                                                              | 12 |
| Tablica 2. Najčešća mehanička svojstva E stakla [1] .....                                                                                                      | 13 |
| Tablica 3. Sažetak karakteristika borovih vlakana [1] .....                                                                                                    | 14 |
| Tablica 4. Svojstva kontinuiranih jednosmernih staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima ojačanih epoksidnih kompozita u uzdužnom i poprečnom smjeru [4] ..... | 16 |
| Tablica 5. Fizička svojstva Surlyna® 8940 [16] .....                                                                                                           | 25 |
| Tablica 6. Mehanička svojstva Surlyna® 8940 [16] .....                                                                                                         | 25 |
| Tablica 7. Toplinska svojstva Surlyna® 8940 [16] .....                                                                                                         | 26 |
| Tablica 8. Karakteristike ugljičnog vlakna.....                                                                                                                | 26 |
| Tablica 9. Oznake uzoraka za savijanje .....                                                                                                                   | 30 |
| Tablica 10. Dimenzije ispitnih tijela .....                                                                                                                    | 30 |
| Tablica 11. Očitani progibi i maskimalna sila .....                                                                                                            | 31 |
| Tablica 12. Naprezanja i istezanja za savijanje epruvete s vlakinima pod kutem od 90° .....                                                                    | 31 |
| Tablica 13. Dimenzije ispitnih tijela .....                                                                                                                    | 33 |
| Tablica 14. Očitani progibi.....                                                                                                                               | 34 |
| Tablica 15. Naprezanja i istezanja za savijanje epruvete s vlakinima pod kutem od 45° .....                                                                    | 34 |
| Tablica 16. Dimenzije ispitnih tijela .....                                                                                                                    | 36 |
| Tablica 17. Očitani progibi i maksimalne sile .....                                                                                                            | 37 |
| Tablica 18. Naprezanja i istezanja za savijanje epruvete s vlakinima pod kutem od 0° .....                                                                     | 37 |
| Tablica 19. Dimenzije ispitnih tijela .....                                                                                                                    | 40 |
| Tablica 20. Očitani progibi.....                                                                                                                               | 40 |
| Tablica 21. Naprezanja i istezanja za savijanje epruvete od neojačanog Surlyna .....                                                                           | 41 |
| Tablica 22. Oznake uzoraka za savijanje .....                                                                                                                  | 44 |
| Tablica 23. Dimenzija ispitnih tijela .....                                                                                                                    | 44 |
| Tablica 24. Rezultati rasteznog ispitivanja ispitnog tijela 1.1v (90°) .....                                                                                   | 44 |
| Tablica 25. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 1.2v.....                                                                                                   | 45 |
| Tablica 26. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 1.3v.....                                                                                                   | 45 |
| Tablica 27. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 1.4v.....                                                                                                   | 46 |
| Tablica 28. Dimenzije ispitnih tijela .....                                                                                                                    | 48 |
| Tablica 29. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 2.1v (45°).....                                                                                             | 48 |
| Tablica 30. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 2.2v.....                                                                                                   | 50 |
| Tablica 31. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 2.3v.....                                                                                                   | 51 |
| Tablica 32. Dimenzije ispitnih tijela .....                                                                                                                    | 53 |



|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 33. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 3.1v (0°)..... | 53 |
| Tablica 34. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 3.2v.....      | 54 |
| Tablica 35. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 3.3v.....      | 55 |
| Tablica 36. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 3.4v.....      | 55 |
| Tablica 37. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 3.5v.....      | 56 |
| Tablica 38. Dimenzije ispitnih tijela .....                       | 58 |
| Tablica 39. Rezultati prvog ciklusa ispitivanja uzorka 1 .....    | 59 |
| Tablica 40. Rezultati drugog ciklusa ispitivanja uzorka 1 .....   | 59 |
| Tablica 41. Rezultati prvog ciklusa ispitivanja epruvete 1.....   | 60 |
| Tablica 42. Rezultati drugog ciklusa ispitivanja uzorka 2 .....   | 61 |
| Tablica 43. Pregled rezultata savojnog ispitivanja .....          | 64 |
| Tablica 44. Pregled rezultata rasteznog ispitivanja.....          | 64 |

## Popis oznaka

| Oznaka          | Jedinica          | Opis                                     |
|-----------------|-------------------|------------------------------------------|
| $\sigma_f$      | N/mm <sup>2</sup> | Naprezanje uslijed savojnog opterećenja  |
| $\varepsilon_f$ | N/mm <sup>2</sup> | Istezanje uslijed savojnog opterećenja   |
| $F$             | N                 | Sila                                     |
| $b$             | mm                | Širina ispitnog tijela                   |
| $L$             | mm                | Razmak između oslonaca                   |
| $h$             | mm                | Debljina ispitnog tijela                 |
| $f$             | mm                | Progib                                   |
| $h_{sr}$        | mm                | Srednja debljina ispitnog tijela         |
| $E_{srns}$      | N/mm <sup>2</sup> | Srednja vrijednost savojnog modula       |
| $\sigma$        | N/mm <sup>2</sup> | Naprezanje uslijed rasteznog opterećenja |
| $A$             | mm <sup>2</sup>   | Površina poprečnog presjeka uzorka       |
| $\varepsilon$   | mm/ mm            | Istezanje uslijed rasteznog opterećenja  |
| $\Delta l$      | mm                | Promjena produljenja uzorka              |
| $l_o$           | mm                | Početna duljina uzorka                   |
| $E_{srnv}$      | N/mm <sup>2</sup> | Srednja vrijednost rasteznog modula      |
| $R_{ms}$        | N/mm <sup>2</sup> | Savojna čvrstoća                         |
| $R_{mv}$        | N/mm <sup>2</sup> | Rastezna čvrstoća                        |

## Sažetak

Zbog mogućnosti krojenja svojstava, ubrzavanja proizvodnje i male gustoće, kompoziti s plastomernom matricom su sve zastupljeniji na tržištu. Neki plastomeri imaju sposobnost samoobnavljanja. Samoobnavljanje lakih kompozitnih konstrukcija posebno je atraktivno u zrakoplovnoj tehnici. Numerički modeli koji opisuju ponašanje materijala ponekad su dobra alternativa eksperimentu, a kvaliteta modela provjerava se uz pomoć eksperimentalnih ispitivanja realnih sustava.

Za potrebe modela, napravljeni su kompoziti od samoobnovljive plastomerne matrice Surlyna 8940 ojačane jednousmjerenim ugljičnim vlaknima te su istražena savojna i rastezna svojstva epruveta izrezanih pod  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$  u odnosu na smjer vlakana.

Rezultati ispitivanja pokazuju da ugljična vlakna značajno poboljšavaju mehanička svojstva matrice u svim smjerovima opterećivanja, pri čemu je najbolji učinak vidljiv pri rasteznom opterećenju u smjeru vlakana, gdje je modul porastao 16,5 puta, a rastezna čvrstoća 6 puta.

Osim savojnog i rasteznog ispitivanja, provedeno je i jednoosno cikličko opterećenje na kidalici s ciljem provjere primjenjivosti u literaturi dostupnih modela za samoobnovljive materijale na Surlyn 8940. Dobivena histereza potvrđuje primjenjivost modela.

Ključne riječi: plastomerni kompoziti, E/MAA, ugljična vlakna, jednosmjerno ojačanje, rastezna svojstva, savojna svojstva, cikličko opterećenje

## Summary

The ability to tailor properties, faster production cycles and low density, make composites with thermoplastic matrix increasingly present on the market. Some thermoplastic materials have the capability of self-healing. Self-healing of lightweight composite designs is particularly attractive in aeronautical engineering. Numerical models describing the behavior of materials are sometimes a good alternative to experiment. The quality of a numerical model must be verified by means of experimental testing of real systems.

In order to develop a numerical model for composites based on a self-healing thermoplastic matrix that is reinforced with unidirectional carbon fibers bending and tensile properties of samples cut at  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $90^\circ$ , with respect to the fiber direction, were investigated.

The test results show that carbon fibres significantly improve the mechanical properties of the matrix in all stress directions. The best effect is observed under tension in the fiber direction ( $0^\circ$ ), where the modulus increased 16,5 times, and the tensile strength 6 times.

In addition to flexural and tensile testing, a uniaxial cyclic experiment was carried out in order to test the applicability of the models for self-healing materials available in the literature to the matrix material. The hysteresis obtained confirms the applicability of the model.

Key words: thermoplastic composites, E/MAA, carbon fibers, unidirectional reinforcement, tensile properties, bending properties, cyclic load

## 1. Uvod

Strogo gledano, kompoziti nisu novi koncept, pa čak ni nedavno otkriće jer su kompozitni materijali prisutni svugdje u prirodi. Dovoljno je pogledati ljudsku kost, palmin list, pa čak i deblo stabla i dolazi se do zaključka da kompozitni materijali postoje koliko postoji i priroda. Iako je priroda puna kompozitnih materijala, povećanje istraživanja i ulaganja u kompozite počelo je 1965. Od ranih godina 1960, postoji povećana potražnja za materijale koji su čvršći i lakši u raznovrsnim poljima kao što su zrakoplovstvo, energetika, građevinarstvo, itd. Zahtjevi za materijalima s boljim svojstvima postali su toliko visoki da ih ni jedan materijal sam ne može zadovoljiti. Ovakav način razmišljanja doveo je do pojave kompozita. Kompoziti ojačani vlaknima istaknutiji su od ostalih zbog toga što je većina materijala čvršća i kruća u obliku vlakana [1].

Polimerne kompozitne tvorevine (polimerni kompoziti) su proizvodi sa definiranim geometrijskim oblikom, načinjeni od najmanje dvije bitno različite komponente, polimerne matrice i tvari koja (u pravilu) povisuje čvrstoću i krutost konačnog proizvoda. Od ojačanih polimera izrađuje se mnoštvo različitih proizvoda različitih dimenzija, npr. trupovi čamaca, jahti, cisterne, kade, itd [2].

Uobičajeni materijali matrice polimernih kompozita su iz skupine duromera. Duromeri su krhki i prilikom održavanja, povremeno dolazi do mikrooštećenja koja nisu lako uočljiva. Kako bi se spriječilo širenje pukotina u eksploataciji, što može dovesti do katastrofalnih posljedica, razvijaju se samoobnovljivi materijali. Jedan takav polimer je i plastomer trgovačkog naziva Surlyn 8940. Ovaj ionomer je kopolimer etilena i metakrilne kiseline, E/MAA.

Zbog veće fleksibilnosti u krojenju svojstava, niže gustoće i kraćeg vremena proizvodnje, tržište plastomernih kompozita je u porastu. U zrakoplovnoj i automobilske industriji postoji sve više zahtjeva za smanjenom potrošnjom goriva, a proizvođači se okreću plastomernim kompozitima koji služe kao zamjena za čelične i aluminijske dijelove [3].

Ovaj rad napravljen je u okviru šireg istraživanja numeričkih modela za kompozite sa samoobnovljivom matricom. Uz pomoć dobrih modela može se skratiti, a nekada i potpuno zamijeniti dugotrajan, skup i zahtjevan proces izrade i ispitivanja kompozita. Upotrebljivost modela provjerava se podacima dobivenim eksperimentom. Kako su kompoziti kompleksni anizotropni materijali, za početna testiranja potrebno je imati podatke dobivene na što

jednostavnijim ispitnim tijelima. Iz tog razloga su u ovom radu pripremljeni ugljičnim vlaknima jednoosno ojačani kompoziti s matricom od samoobnovljivog plastomera.

## 1. Kompozitni materijali

Kompozitni materijali ili ukratko kompoziti proizvedeni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Tim putem mogu se postići neobične, odnosno kod drugih materijala neuobičajene kombinacije svojstava, kao što su krutost, čvrstoća, masa, ponašanje pri visokim temperaturama, kemijska postojanost (antikorozivnost), tvrdoća ili vodljivost (električna i toplinska) [4].

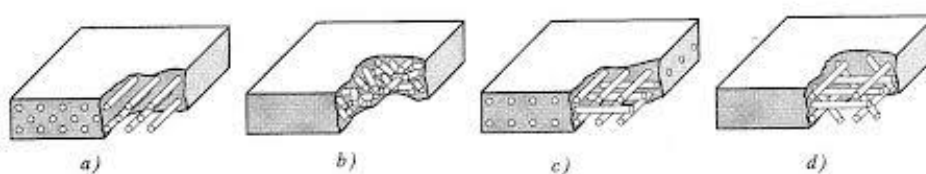
Kompoziti se dijele na metalne, keramičke i polimerne. Kod toga se pretpostavlja da su osnova (u daljnjem tekstu matrica): metali, keramika, odnosno polimeri, kojoj se pridodaju najrazličitiji dodaci u cilju modificiranja svojstva matrice, odnosno postizanja cilja koji je naveden u definiciji – da se dobije materijal svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe.

Ukupno ponašanje kompozita ovisi o [4]:

- Svojstvima matrice i ojačala
- Veličini i rasporedu (raspodjeli) konstituenata
- Volumnom udjelu konstituenata
- Obliku konstituenata
- Prirodi i jakosti veze među konstituentima

### 1.1. Vlaknima ojačani kompoziti

Kod vlaknima ojačanih kompozita dolazi do izražaja poboljšane čvrstoće, žilavosti, krutosti, te povećanja omjera „čvrstoća/gustoća“ uslijed ugradnje čvrstih, krutih i krhkih vlakana u mekaniju, duktilniju matricu. Materijal matrice prenosi opterećenje na vlakna te osigurava duktilnost i žilavost, budući da vlakna nose veći dio opterećenja. Vlakna u kompozitu mogu biti raspoređena na različite načine što najbolje prikazuje slika 1 [4].



Slika 1. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačala [4]

Sa slike 1 primjećuju se 4 načina rasporeda vlaknastih ojačala: (a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, (b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, (c) ortogonalno raspoređena vlakna i (d) višesmjerno usmjerena vlakna [4].

Kod vlaknima ojačanih kompozita opterećenje se najčešće prenosi i distribuira među vlaknima i to putem matrice koja je u većini slučajeva duktilna. Vlaknasta ojačala prema promjeru dijele se na viskore, vlakna i žice [4]. Vlakna prema dužini se dijele na duga kontinuirana, kratka vlakna dužine do 50 mm i mljevena vlakna dužine do 0,5 mm. Duga kontinuirana vlakna mogu se lako orijentirati, dok se kod kratkih vlakana orijentacija ne može u potpunosti kontrolirati. Duga vlakna imaju brojne prednosti kao što su veća otpornost na udarna opterećenja, bolji površinski sloj, bolja dimenzijska stabilnost. Prednosti kratkih vlakana su niža cijena, lakše i brže procesiranje, manje grešaka a time i veća čvrstoća [5]. Kontinuirana vlakna se teško ugrađuju u matricu i teško se proizvode, dok se diskontinuirana vlakna lakše ugrađuju u matricu, no kod primjene diskontinuiranih vlakana teže je predvidjeti svojstva kompozita zbog toga što krajevi svakog vlakna nose manje opterećenja nego srednji dio vlakna [4].

## 1.2. Usmjerenost i vrsta tkanja

Osim vrsta vlakana, na svojstva kompozita također utječu usmjerenost vlakana i vrsta tkanja. Jednosmjerna vlakna pokazuju optimalnu krutost i čvrstoću u slučaju kada je opterećenje paralelno s vlaknima, međutim ako do opterećenja dođe u smjeru okomitom na vlakna, mehanička svojstva drastično padaju. Zbog toga se može reći da su svojstva ovakvih kompozita anizotropna. Da bi se postigla jednoličnija čvrstoća kompozita potrebno je žrtvovati maksimalnu čvrstoću potrebno je polagati vlakna ortogonalno, ili pod nekim drugim kutem (slika 2) [4].





Sve navedene vrste tkanja koje prolaze pod kutem od  $90^\circ$ , ali je moguće i proizvesti tkanine kod kojih je taj kut  $45^\circ$  ili  $60^\circ$ . Postavljanje vlakana u polimernoj matrici označava se oznakama  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $90^\circ$  [5].

## 2. Polimerni kompoziti

U usporedbi s metalom i keramikom, polimeri su jeftiniji, lakše se proizvode i prerađuju. S druge strane, polimerni materijali imaju manju čvrstoću i manju otpornost na visoke temperature u odnosu na metale i keramiku, te izloženost ultraljubičastom zračenju može dovesti do razgradnje nekih vrsta polimera. Zbog prevladavajućih kovalentnih veza polimerni materijali su u pravilu loši vodiči topline i električne energije. S druge strane, u usporedbi s metalom i keramikom, polimeri su jeftiniji i lakše se proizvode, te su u pravilu otporniji na kemikalije od metala [1].

### 2.1. Prednosti korištenja plastomerne matrice u odnosu na duromernu

Neke od prednosti korištenja plastomerne matrice u odnosu na duromernu su [1], [6], [7]:

- Recikliranje - škart se može reciklirati i ponovno koristiti
- Dijelovi se mogu stvarati i spajati grijanjem, tj. moguće je zavarivanje
- Veća žilavost i udarni rad loma
- Veća otpornost na umor materijala
- Manja zaostala naprezanja - plastomeri očvršćuju hlađenjem, dok kod duromera prilikom zagrijavanja dolazi do umrežavanja i očvršćavanja
- Kraće vrijeme ciklusa izrade – kod plastomerne matrice nije potrebno vrijeme za reakcije umrežavanja kao kod duromerne
- Skladištenje – duromeri imaju ograničen rok trajanja jer se nakon nekog vremena počinju gelirati. Duromerni preprezi u pravilu se mogu skladištiti do šest mjeseci, te se moraju hladiti u zamrzivaču. Plastomerni preprezi ne zahtijevaju skladištenje u zamrzivaču što rezultira manjim troškovima opreme, manjim utroškom energije i smanjenom kontrolom procesa
- Alternativa za izradu dijelova bez upotrebe autoklava
- Vatrootpornost kod nekih

### 2.2. Nedostatci korištenja plastomerne matrice u odnosu na duromernu

Neki od nedostataka korištenja plastomerne matrice u odnosu na duromernu su [1], [6], [8],:

- Temperature prerade plastomera viša je nego kod duromera

- Viša viskoznost plastomernih smola od duromernih što dovodi do teže impregnacije snopova vlakana
- Potrebno korištenje posebnih tehnika i alata
- Proizvođači još uvijek nisu upoznati s mogućnostima proizvodnje plastomernih kompozita
- Kod izrade kompozita s plastomernom matricom potrebno je zagrijati plastomer do temperature tečenja, potreban je tlak da bi se plastomer impregnirao u vlakna, te je tada potrebno ohladiti kompozit pod tlakom. Ovakav postupak je složeniji i kompliciraniji od tradicionalnog postupka izrade duromernih kompozita
- Viša cijena alata

### 3. Postupci proizvodnje plastomernih kompozita

Dobar kompozit mora biti bez uključaka zraka, tj. bez praznina u matrici. Da bi se to postiglo potrebno je postići povoljno tečenje plastomernog materijala oko ojačala. Povoljno tečenje materijala postići ćemo pravilnim odabirom parametara kao što su temperatura, tlak i vrijeme držanja [1].

Neki od postupaka izrade kompozita s plastomernom matricom dani su u sljedećim poglavljima.

#### 2.1. Slaganje folija (eng. film stacking)

U ovoj metodi naizmjenično se slažu tanke folije polimerne matrice i ojačala. Sloj ojačala može biti umetnut kao ploče vlakana s malim udjelom matrice (oko 15% mase). Matrica i ojačalo su nakon pripreme spojeni istovremenom primjenom temperature i tlaka, što dovodi do impregnacije ojačala. Temperatura i tlak moraju biti dovoljni da plastomerna matrica može prožeti ojačala. Pošto je razina tečenja plastomera proporcionalna tlaku, a obrnuto proporcionalna viskoznosti, povećanje temperature i povećanje tlaka pomaže procesu impregnacije [1].

#### 2.2. Membransko oblikovanje (eng. diaphragm forming)

Proces se sastoji od slaganja plastomernih preprega u obliku kompozitnih ploča između dviju fleksibilnih membrana. Zrak između membrana se evakuira i materijal se grije iznad točke taljenja matrice. S jedne strane se primjenjuje sila ili tlak, što uzrokuje deformaciju membrane, koja uslijed djelovanja sile ili tlaka dobiva oblik kalupa. Pošto se preprezi mogu slobodno savijati između membrana, i oni poprimaju oblik kalupa. Nakon poprimanja oblika, kalup se hladi i membrane se odvajaju od gotovog kompozita. Jedna od prednosti ovog postupka je mogućnost dobivanja kompleksnijih oblika kompozita. Bitan parametar ovog procesa su same membrane. Mekše membrane koriste se za jednostavnije proizvode, dok se za kompleksne oblike koji zahtijevaju visoke tlakove koriste kruće membrane. Pri visokom tlaku može doći do pojave tečenja materijala u različitim smjerovima

što rezultira nejednakom debljinom konačnog kompozita. Bitno je naglasiti da kod primjene visokog tlaka može doći do istiskivanja plastomerne matrice što rezultira nejednakom debljinom kompozita [1].

### 2.3. Izmiješanim vlaknima (eng. commingled fibres)

Plastomerna matrica može biti u obliku vlakana. Vlakna matrice i ojačala se izmiješaju (eng. commingle) te se dobije predivo. Takvo predivo (sastavljeno od matrice i ojačala) može biti tkano, pleteno ili filamentirano. Oblikovano predivo se zatim podvrgava temperaturi i tlaku što rezultira taljenjem matrice, koja penetrira u ojačala, i dobivanjem kompozita [1].

### 2.4. Izravno prešanje (eng. compression molding)

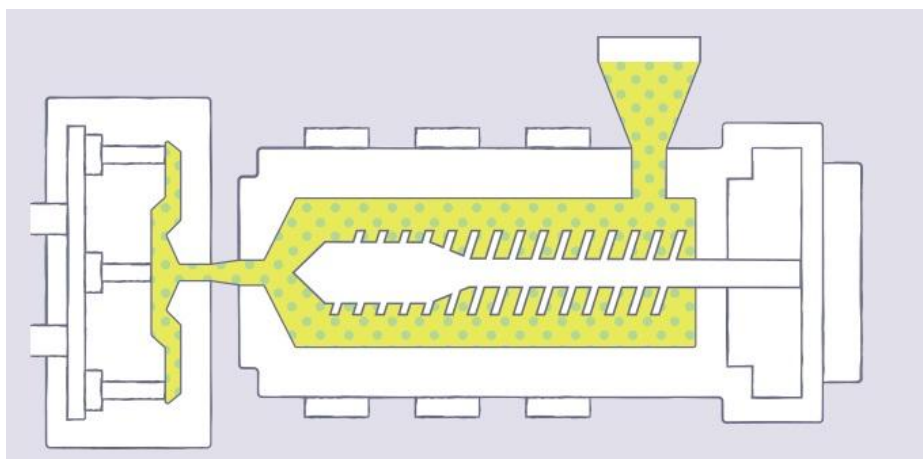
Postoji više vrsta izravnog prešanja ovisi o materijalu kojeg oblikujemo. Izravno prešanje dijelimo na: izravno prešanje pločastog osmoljenog mata (eng. sheet molding compund, SMC), izravno prešanje vlakana osmoljenih u masi (eng. bulk molding compound, BMC), izravno prešanje debelopločastog osmoljenog mata (TMC) i izravno prešanje mokrog laminata (eng. wet lay-up compression molding). Alati za izravno prešanje sastoje se od grijanih metalnih kalupa pričvršćenih na prešu. Proces može biti automatiziran. Moguće je nakon obrade dobiti dobru kvalitetu površine, što pridonosi smanjenju troškova daljnje obrade. Sam postupak je relativno jeftin, a daljnje obrade za skidanje srha s rubova su također minimirane.

Proces izrade sastoji se od zagrijavanja ploča kalupa na temperaturu od 120 do 200 °C, nakon čega se umeće materijal u kalup i kalup se zatvara i primjenjuje se određeni pritisak. Vrijeme držanja materijala u kalupu ovisi o debljini stijenke, veličini i obliku materijala. Nakon isteka vremena potrebnog za umrežavanje materijala, kalup se otvara i kompozit se uklanja [9].

### 2.5. Injekcijsko prešanje

U pravilu se kod injekcijskog prešanja plastomernih kompozita koriste diskontinuirana vlakna (najčešće staklena). Jedna od metoda izrade kompozita s plastomernom matricom pomoću injekcijskog prešanja naziva se reakcijsko injekcijsko prešanje (eng. reaction

injection molding, RRIM). Kod RRIM postupka (slika 4.) dva ili više polimerna materijala miješaju se pod visokim tlakom, te se u jedan od njih (ili u sve) dodavaju diskontinuirana vlakna. Nakon toga, taljevina se ubrizgava u kalup u kojemu se hladi. Oprema za RRIM postupak mora biti sposobna podnijeti abrazivnu prirodu taline [1].



**Slika 4. RRIM postupak [10]**

Ako se želi izbjeći dodavanje ojačala u polimernu smjesu, moguće je dodati diskontinuirana vlakna, ili preprege u kalup. Kalup se zatim zatvara i polimerna smjesa se ubrizgava u kalupnu šupljinu. Polimerna taljevina ostaje dovoljno dugo da bi se ostvarila željena penetracija polimera u materijal, te se zatim kompozit hladi i vadi iz kalupne šupljine [10].

### 3. Ojačala

#### 3.1. Staklena vlakna

Stakleno vlakno je općeniti naziv, kao čelik ili aluminij. Kao što postoje i različiti oblici čelika, tako postoje i različiti oblici staklenih vlakana koji se mogu naći na tržištu. Uobičajeno je da su staklena vlakna na bazi silicija (50-60%  $\text{SiO}_2$ ), te sadrže niz drugih oksida (npr. kalcija, natrija, aluminija). U tablici 1 prikazan je sastav najčešće korištenih staklenih vlakana [1].

**Tablica 1. Sastav najčešće korištenih staklenih vlakana [1]**

| Sastav                  | E staklo | C staklo | S staklo |
|-------------------------|----------|----------|----------|
| $\text{SiO}_2$          | 55,2     | 65,0     | 65,0     |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 8,0      | 4,0      | 25,0     |
| $\text{CaO}$            | 18,7     | 14,0     | -        |
| $\text{MgO}$            | 4,6      | 3,0      | 10,0     |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 0,3      | 8,5      | 0,3      |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 0,2      | -        | -        |
| $\text{B}_2\text{O}_3$  | 7,3      | 5,0      | -        |

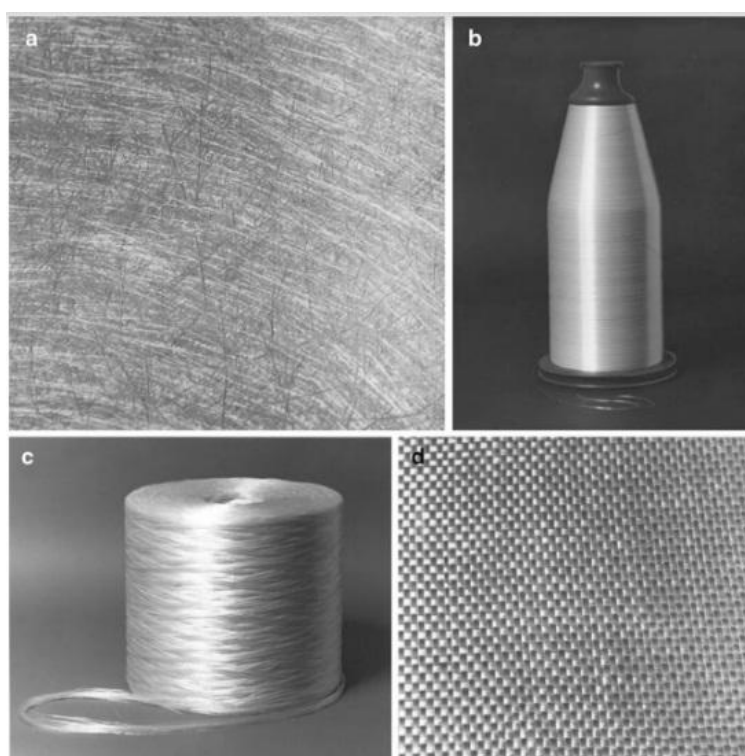
Slovo E označava električnost (eng. electrical), zato što su E stakla dobri električni izolatori uz to što imaju dobru čvrstoću i dobar modul elastičnosti. Slovo C označava koroziju (eng. corrosion) i C stakla imaju bolju otpornost na kemijsku koroziju od ostalih stakala. S označava visok udio silicija što čini ova stakla otpornija na visoke temperature. Ova vlakna imaju poboljšana mehanička svojstva, u prvom redu krutost i čvrstoću, pa se nazivaju i vlakna visoke čvrstoće, odakle dolazi i prefiks S (eng. high strength). Najveći dio na tržištu zauzimaju E stakla. Iako je njihovo glavno obilježje dobra izolacija električne energije, rijetko se koriste u tu svrhu [1].

Najčešća mehanička svojstva E stakla dana su u tablici 2.

**Tablica 2. Najčešća mehanička svojstva E stakla [1]**

| Gustoća ( $\text{g/cm}^3$ ) | Rastezna čvrstoća (MPa) | Youngov modul (GPa) | Koeficijent temperaturnog širenja ( $\text{K}^{-1}$ ) |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------|
| 2,55                        | 1,75                    | 70                  | $4,7 \cdot 10^{-6}$                                   |

Iz tablice 2 se može primijetiti da je gustoća niska i čvrstoća jako visoka, dok modul elastičnosti nije veoma visok. Dok je omjer mase i čvrstoće staklenih vlakana visok, omjer modula i mase je srednje vrijednosti. Ovakav omjer modula i mase bio je motiv prelaska zrakoplovne industrije na takozvana naprednija vlakna (npr. borova vlakna, ugljična vlakna). Staklena vlakna najčešće se koriste kao ojačala za poliesterske, epoksidne i fenolne smole [1]. Staklena vlakna su jeftina i kako se vidi sa slike 5 mogu doći u obliku (a) rezanih vlakana, (b) kontinuiranog namota, (c) rovinga ili (d) tkanja. Smole ojačane staklenim vlaknima najčešće se koriste u građevinskoj industriji. Takvi materijali najčešće imaju kraticu GRP (eng. glass reinforced plastics) [1].

**Slika 5. Različiti oblici staklenih vlakana [1]**

Dva bitna nedostatka staklenih vlakana su osjetljivost na vlagu, koja smanjuje čvrstoću vlakana, i statički umor. Do statičkog umora dolazi nakon kontinuiranog opterećenja koje



traje duži period vremena. Ovo može dovesti do pojave pukotina koje mogu uzrokovati pucanje materijala pod naprezanjem koje se smatra sigurnim [1].

### 3.2. Borova vlakna

Bor je inherentno krhak materijal. Komercijalno se proizvodi CVD postupkom (eng. chemical vapor deposition) u kojem se bor taloži na podlogu, što znači da su borova vlakna u stvari kompozitna vlakna. Pošto se postupak taloženja bora odvija pri visokim temperaturama, izbor materijala podloge koji će činiti jezgru borovih vlakana je ograničen. Najčešće se za jezgru koristi tanka žica od volframa, a može se koristiti i ugljična podloga.

Zbog same kompozitne prirode borovih vlakana, zaostalih naprezanja i defekata kao što su praznine i diskontinuiteti koji nastaju kao rezultat procesa i prisutnosti jezgre provedena su mnoga ispitivanja za utvrđivanje čvrstoće vlakana. Prosječna vrijednost rastezne čvrstoće borovih vlakana iznosi 3–4 GPa, dok je Youngov modul između 380 i 400 GPa. Jedna od ideja za utvrđivanje unutarnje čvrstoće bora je savojno ispitivanje. Prilikom savijanja, ako pretpostavimo da su jezgra i sučelje blizu neutralne osi, kritično rastezno naprezanje neće se javiti niti na sučelju niti u jezgri već u boru. Savojna ispitivanja tretiranih s ciljem odstranjivanja površinskih nepravilnosti daju rezultat od 14 GPa. Netretirana vlakna pokazuju upola manju vrijednost. Tablica 3 prikazuje sažetak karakteristika borovih vlakana [1].

**Tablica 3. Sažetak karakteristika borovih vlakana [1]**

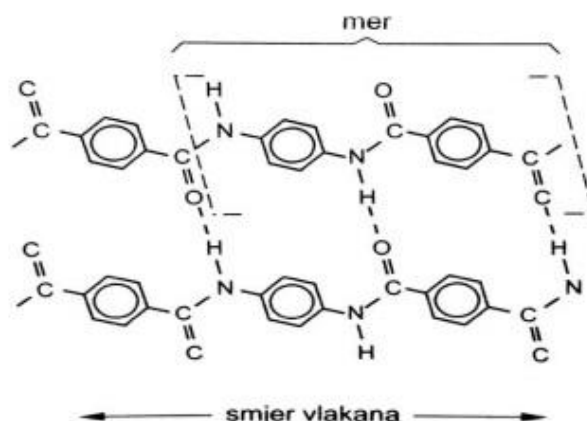
| Promjer ( $\mu\text{m}$ ) | Tretman                        | Prosječna čvrstoća |
|---------------------------|--------------------------------|--------------------|
| 142                       | -                              | 3,8                |
| 406                       | -                              | 2,1                |
| 382                       | Kemijski polirano              | 4,6                |
| 382                       | Toplinski tretirano i polirano | 5,7                |

Iz tablice se može vidjeti da tretirana vlakna pokazuju veću čvrstoću zbog eliminacije površinskih utjecaja.

Gustoća bora iznosi  $2.34 \text{ g/cm}^3$ , dok gustoća borovog vlakna iznosi  $2,6 \text{ g/cm}^3$  (za vlakno od 100 mm u promjeru). Talište bora je na  $2040 \text{ }^\circ\text{C}$ , a koeficijent toplinskog istezanja iznosi  $8,3 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  [1].

### 3.3. Aramidna vlakna

Aramidna vlakna su visokočvrsti i visokomodulni materijali koji su u primjenu uvedeni ranih 1970-ih. Ona su posebno poželjna radi izuzetnog omjera čvrstoća-gustoća koja je iznad one kod metala. Kemijski, ova skupina materijala poznata je kao „poli-parafenilen-tereftalamid.“ Radi se o nizu aramida: komercijalna imena dvaju najuobičajenijih su „Kevlar“ i „Nomex.“ Mehanički gledano aramidna vlakna imaju uzdužnu rasteznu čvrstoću i rastezni modul elastičnosti viši od ostalih polimernih vlaknastih materijala, no relativno su slaba pri pritiskivanju. Osim toga, ovi materijali poznati su po svojoj krutosti i žilavosti, otpornosti na udar, otpornosti na puzanje te otpornosti umoru materijala. Bez obzira na to što su aramidi plastomeri, oni su otporni zapaljenju te stabilni pri relativno visokim temperaturama; raspon temperatura kod kojih zadržavaju visoka mehanička svojstva kreće se od  $-200$  do  $200^{\circ}\text{C}$ . Kemijski gledano oni su podložni degradaciji uslijed djelovanja jakih kiselina i lužina, ali su relativno inertni prema drugim otapalima i kemikalijama. Tijekom sinteze krute molekule svrstavaju se u smjeru osi vlakna kao područja „tekućih kristala“, kao što prikazuje slika 6 [4].



Slika 6. Shematski prikaz mera i lančaste strukture aramida [4]

Svojstva kontinuiranih i jednosmjernih staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima ojačanih epoksidnih kompozita navedena su u tablici 4. Podaci također omogućuju uspoređivanje mehaničkih karakteristika ova tri materijala u uzdužnom i poprečnom smjeru [4].

**Tablica 4. Svojstva kontinuiranih jednosmernih staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima ojačanih epoksidnih kompozita u uzdužnom i poprečnom smjeru [4]**

| Svojstvo                                        | Staklo (E-staklo) | Ugljik (visokočvrsti) | Aramid (Kevlar 49) |
|-------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|
| Gustoća, kg/m <sup>3</sup>                      | 2100              | 1600                  | 1400               |
| Rastezni modul elastičnosti, kN/mm <sup>2</sup> |                   |                       |                    |
| Uzdužno                                         | 45                | 145                   | 76                 |
| Poprečno                                        | 12                | 10                    | 5,5                |
| Rastezna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>            |                   |                       |                    |
| Uzdužno                                         | 1020              | 1240                  | 1380               |
| Poprečno                                        | 40                | 41                    | 30                 |
| Istezljivost (prekidno rastezanje), %           |                   |                       |                    |
| Uzdužno                                         | 2,3               | 0,9                   | 1,8                |
| Poprečno                                        | 0,4               | 0,4                   | 0,5                |

### 3.4. Keramička vlakna

Kontinuirana keramička vlakna predstavljaju privlačan skup svojstava. Poželjnim ih čine kombinacije svojstava kao što su visoka čvrstoća, visok modul elastičnosti, otpornost na visoke temperature i općenit otpor prema utjecaju okoliša. Ove karakteristike čine ih privlačnima kao ojačala za materijale u visokotemperaturnom okolišu. Keramička vlakna dijele se na oksidna i neoksidna, a glavni predstavnici su keramička vlakna bazirana na silicijevom karbidu (SiC), silicijevom nitridu (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), borovom karbidu (B<sub>4</sub>C) i borovom nitridu (BN) [1].

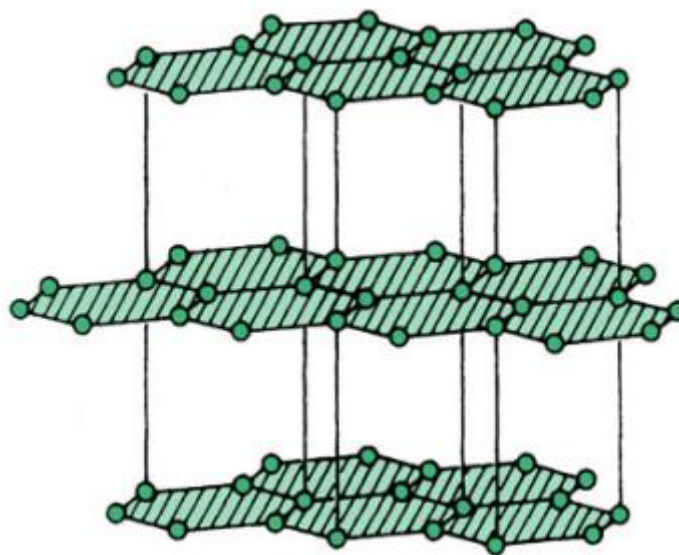
### 3.5. Ugljična vlakna

Ugljično vlakno je visokoučinkovit (eng. high-performance) vlaknasti materijal koji se najčešće primjenjuje za ojačanje suvremenih kompozita s polimernom matricom. Razlozi za to su sljedeći [4]:

1. Ugljična vlakna imaju, od svih vlaknastih materijala za ojačanje, najviši specifični modul i najvišu specifičnu čvrstoću

2. Visok rastezni modul i visoku čvrstoću zadržavaju i pri povišenim temperaturama, osim što može biti problema zbog oksidacije pri visokim temperaturama
3. Pri sobnoj temperaturi, vlaga i niz otapala, kiselina i lužina ne razaraju ugljična vlakna. Ova vlakna karakterizira niz posebnih fizičkih odnosno mehaničkih svojstava koja omogućuju da kompoziti s tim vlaknima postižu specifična inženjerska svojstva
4. Razvijeni su postupci proizvodnje vlakana i kompozita koji su relativno jeftini

Ugljik postoji u različitim kristalnim oblicima. U slučaju ugljičnih vlakana atomi su strukturirani u obliku heksagonalnih slojeva (slika 7) [1].



**Slika 7. Heksagonalna ugljikova struktura [1]**

U heksagonalnoj ravnini grafitna struktura je veoma gusta. Pošto čvrstoća materijala ovisi o čvrstoći veza, visoko-čvrsta veza između atoma ugljika u heksagonalnoj ravnini rezultira visokom čvrstoćom u tome smjeru, dok slabe Van der Waalsove sile između slojeva rezultiraju slabijom čvrstoćom u tome smjeru. Zbog toga je proces proizvodnje vlakana koncentriran na dobivanje heksagonalnih ravnina orijentiranih duž osi vlakna [1].

### **3.5.1. Proizvodnja ugljičnih vlakana**

Sirovina za proizvodnju ugljičnih vlakana zove se prekusor. 90 % ugljičnih vlakana proizvodi se iz poliakrilonitrila (PAN). Ostalih 10 % proizvodi se iz vlakana na osnovi prirodnih smola (eng. pitch) ili iz vlakana na bazi umjetne svile (eng. rayon). Sva tri

materijala spadaju u skupinu organskih polimera koje karakteriziraju dugački lanci molekula [11].

Većina procesa za proizvodnju vlakana uključuje sljedeća četiri koraka [1]:

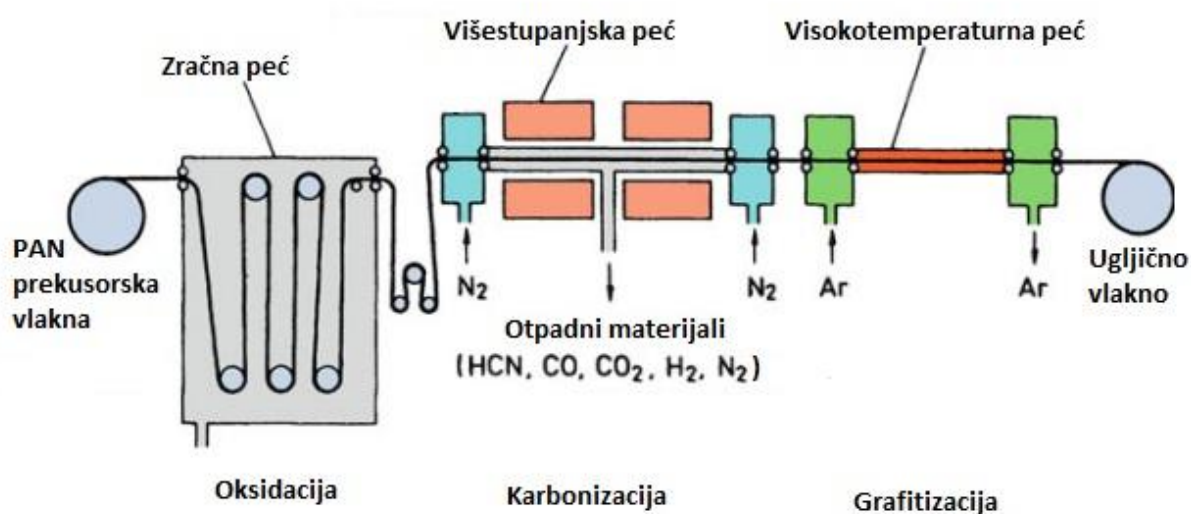
1. Proizvodnja perkusorskih vlakana (eng. fiberization). Ovaj proces uključuje mokro pletenje, suho pletenje ili pletenje iz taljevine (eng. melt spinning); nakon čega slijedi izvlačenje ili rastezanje
2. Proces stabilizacije koji sprječava otapanje vlakana prilikom visokotemperaturne obrade koja slijedi
3. Karbonizacija (eng. carbonization). Toplinska obrada koja uklanja sve elemente bez ugljika
4. Grafitizacija. Neobavezna toplinska obrada koja služi za poboljšavanje svojstava ugljičnog vlakna dobivenog nakon koraka 3.

Kao što je navedeno u poglavlju 3.5., za postizanje visokog modula vlakana potrebno je poboljšati orijentaciju lamela. Ovakvo stanje postiže se različitim toplinskim i rasteznim obradama koji moraju biti pod visokim stupnjem kontrole. Ako bi konstantno naprezanje u fazi proizvodnje trajalo duže nego što je potrebno rezultiralo bi pretjeranim istezanjem vlakna koje kasnije može dovesti do pojave pukotina pri nižim opterećenjima [1].

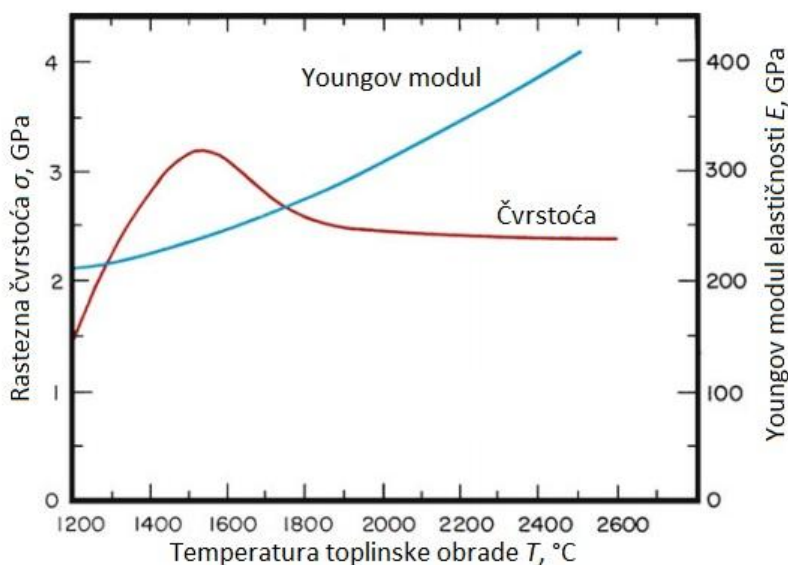
#### **3.5.1.1. Ex PAN ugljična vlakna**

Ugljična vlakna napravljena od PAN-a nazivaju se ex-PAN ugljična vlakna. PAN vlakna stabiliziraju se na zraku (par sati pri temperaturi od 250 °C) da bi se spriječilo otapanje prilikom toplinske obrade. Prilikom procesa stabilizacije, vlakna se drže napeta da bi se spriječio proces relaksacije koji bi rezultirao dezorijentiranom strukturom u odnosu na os vlakna [1]. Proces stabilizacije može potrajati i nekoliko sati, ovisno o temperaturi, promjeru perkusora i svojstvima perkusora [12]. Nakon procesa oksidacije bijela PAN vlakna postaju crna. Dobivena crna vlakna se zatim polagano zagrijevaju u inertnoj atmosferi ( $N_2$  ili Ar) pri temperaturi od 1000 do 1500 °C. Polagano zagrijavanje omogućava visok stupanj urednosti molekula unutar vlakana [1]. Kao plin za inertnu atmosferu najčešće se koristi dušik ( $N_2$ ), no argon se također može pronaći u primjeni (iako je skuplji). Razlog korištenja argona je poboljšanje čvrstoće ugljičnog vlakna. Temperatura karbonizacije ovisi o željenoj primjeni

ugljičnog vlakna. Za slučajeve gdje je potrebna visoka čvrstoća preporučuje se raspon temperatura od 1500 do 1600 °C, jer iznad 1600 °C dolazi do pada rastezne čvrstoće vlakana [12]. Pošto je nakon procesa stabilizacije dobivena struktura s visokim staklištem, prilikom ove toplinske obrade nije potrebno naprezati vlakna. Zadnja neobavezna toplinska obrada (za poboljšanje usmjerenosti heksagonalnih ravnina što rezultira postizanjem većeg modula elastičnosti vlakna) sastoji se od veoma kratkog držanja vlakna pri temperaturi do 3000 °C. Mehanička svojstva dobivena nakon posljednje toplinske obrade uvelike ovisi o temperaturi obrade (slika 9). Slika 8 pokazuje proces proizvodnje vlakana iz poliakrilonitrila [1].



Slika 8. Proces proizvodnje ugljičnih vlakana iz PAN prekursorskih vlakana [1]



**Slika 9. Ovisnost mehaničkih svojstava o temperaturi grafitizacije [1]**

Nakon gore opisane i prikazane proizvodnje vlakna prolaze kroz postupak obrade površine, prevlačenje, sušenje i namotavanje [12].

Površinska obrada vlakana provodi se radi poboljšanja mehaničkih svojstava kompozita.

Najčešće korištena metoda površinske obrade može se kategorizirati kao kapljevita ili plinska oksidacija. Kapljevita oksidacija (eng. liquid oxidation treatment) može udvostručiti vrijednosti smične čvrstoće kompozita, no dolazi do malog pada rastezne čvrstoće vlakana (4 – 6 %) [12].

Zbog svoje krhkosti, ugljična vlakna zahtijevaju zaštitu (ili podmazivanje) koje će olakšati rukovanje. Prije prevlačenja, vlakna se suše, a materijal za prevlačenje mora biti takav da zaštiti ugljična vlakna, omogući lakše rukovanje i ne smije se taložiti na proizvodnoj opremi. Materijal za prevlačenje ne smije promijeniti fizička niti kemijska svojstva vlakna prilikom skladištenja. Neke prevlake se mogu otopiti u vodi nakon pletenja ili namatanja [12].

Nakon procesa prevlačenja, vlakna se namataju. Strojevi za namatanje su automatizirani, a kalemi s vlaknima mogu težiti i do 12 kg [12].

Postoje tri osnovne kategorije PAN ugljičnih vlakana [12]:

1. Debeli roving (eng. large tow) – roving velikog broja vlakana (48 000 do 320 000); jeftina proizvodnja i mogućnost rezanja na manje dijelove
2. Kvaliteta za opću primjenu
3. Kvaliteta za zrakoplovnu industriju – najveća kvaliteta

### 3.5.1.2. Ugljična vlakna na bazi umjetne svile (Ex celulozna ugljična vlakna)

U fazi proizvodnje perkusorskih vlakana u ovoj grupi dolazi do stvaranja  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  i katrana. Proces stabilizacije je zbog toga potrebno izvoditi u reaktivnoj atmosferi da bi se inhibiralo formiranje katrana i da bi se poboljšala čvrstoća. Prilikom procesa stabilizacije dolazi do fragmentacije lanaca ili depolimerizacije. Zbog depolimerizacije koja nastaje, nije moguće naprezati vlakna kod procesa stabilizacije, kao što se radi s PAN prekursorima. Proces karbonizacije sastoji se od zagrijavanja vlakana na  $1000\text{ }^{\circ}C$  u dušiku. Proces grafitizacije odvija se na temperaturi od  $2800\text{ }^{\circ}C$  pod naprežanjem. Ovakvo naprežanje na visokoj temperaturi rezultira plastičnom deformacijom i željenom konačnom orijentacijom. Slika 10 shematski prikazuje postupak proizvodnje ugljičnih vlakana na bazi prirodnih smola [1].



Slika 10. Shematski prikaz proizvodnje ugljičnih vlakana na bazi umjetne svile

### 3.5.1.3. Ugljična vlakna na bazi smola (eng. Ex pitch carbon fibers)

Postoje raznovrsni izvori umjetnih smola ali tri najčešće korištena su polivinilklorid (PVC), bitumen i katran. Ugljična vlakna na bazi smola iz prirodnih izvora (eng. pitch, njem pech) su privlačna zbog jeftine sirovine, visokog modula elastičnosti i visoke orijentiranosti ugljičnog vlakna. Komercijalni *pitch* je smjesa različitih organskih spojeva molekulske mase



400 do 400, a dobiva se pretežno od nafte, katrana i biljaka. Isti raspored oksidacije, karbonizacije i grafitizacije je potreban za dobivanje ugljičnih vlakna iz pitch prekusora. Orijentacija se u ovom slučaju dobiva pređenjem. Izotropan ali aromatski materijal podvrgava se pletenju u tekućoj fazi pri visokim vrijednostima naprezanja, nakon čega dolazi do gašenja. Ovaj postupak za rezultat daje visokoorijentirana *pitch* prekusorska vlakna. Ovakvo plastomerno vlakno se zatim podvrgava oksidaciji da bi se dobila umrežena struktura. Nakon toga slijede procesi karbonizacije i grafitizacije. Iako ova vlakna pokazuju jako visok modul elastičnosti, u usporedbi s ex PAN ugljičnim vlaknima imaju manju tlačnu čvrstoću i lošija poprečna svojstva [1].

#### 3.5.1.4. Ostali oblici prekusora

Osim navedenih prekusora, razmatraju se drugi materijali koji bi mogli biti podobni za izradu ugljičnih vlakana. Osim celuloze (poglavlje 3.5.1.2.), druga prirodna vlakna razmatraju se za uporabu, kao što su svila, hitozan i eukaliptus, čija bi uporaba mogla smanjiti troškove proizvodnje. Iako bi troškovi proizvodnje bili manji, mehanička svojstva ovih vlakana nisu zadovoljavajuća. Mnogi linearni i ciklički polimeri se također razmatraju kao potencijalni prekusori. Neki od predstavnika ove grupe su fenolni polimeri, poliamidi, polipropilen, polivinil alkohol i polistiren. Linearni prekusori zahtijevaju toplinsko rastezanje (eng. heat stretching) da bi dobili ugljična vlakna poželjnih mehaničkih svojstava, a njihov udio ugljika je malen. Aromatski polimeri imaju velik udio ugljika i u nekim slučajevima je stabilizacija lagana, no cijena izrade ugljičnih vlakana željenih svojstava iz aromatskih polimera je veoma visoka [12].

## 4. Ionomeri

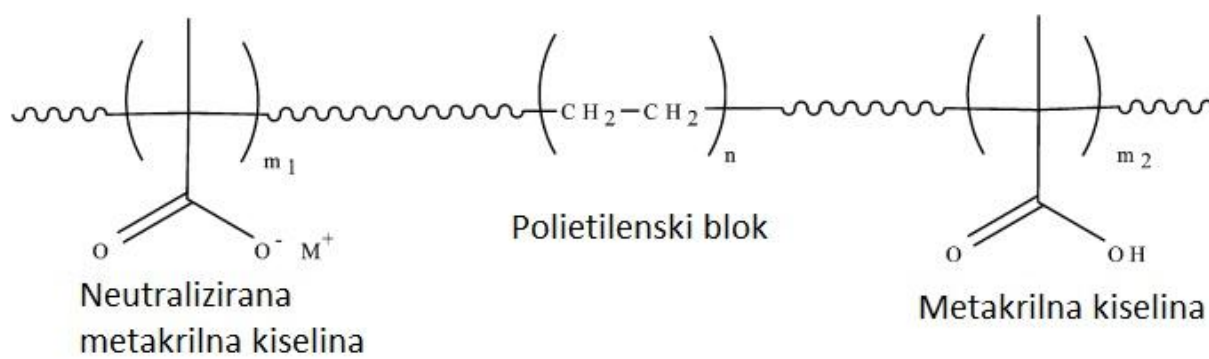
Polimeri koji sadrže do 15 % ionskog sadržaja nazivaju se ionomeri. Ovi materijali zanimljivi su zbog svoje sposobnosti obnavljanja unakrsnih veza nakon oštećenja, time i obnavljanja mehaničkih svojstava nakon oštećenja. Veći udio ionskog sadržaja dovodi do porasta rastezne čvrstoće materijala i veće otpornosti na lom. Prilikom udara, energija prelazi na ionomer i zagrijava ga do približno 98 °C i u stanje taljevine. U tom periodu materijal pokazuje viskoelastični oporavak da bi zatvorio rupu te se ionske interakcije ponovno oblikuju i vraćaju mehanička svojstva materijalu [13].

### 4.1. Surlyn

Surlyn<sup>®</sup> je ionomer na bazi etilena za kojeg je primijećeno da posjeduje samoobnavljajuća svojstva. Samoobnavljanje je definirano kao potpuno ili pasivno popravljjanje manjih oštećenja bez potrebe za detekcijom ili ljudskom intervencijom. Samoobnavljanje je klasificirano u dvije grupe: ekstrinzično i intrinzično samoobnavljanje. Ekstrinzično samoobnavljanje dobiva se ugrađivanjem samoobnavljajućeg agensa u matricu dok kod materijala sa sposobnošću intrinzičnog samoobnavljanja do reparacije oštećenja dolazi bez dodatnog agensa [14].

Surlyn<sup>®</sup> je materijal sa sposobnošću intrinzičnog samoobnavljanja. Do samoobnavljanja dolazi zbog toplinski reverzibilnih veza i međumolekularne interakcije koje pomažu u zatvaranju oštećenog područja [14].

Surlyn<sup>®</sup> 8940 je statistički kopolimer etilena i metakrilne kiseline (E/MAA) koji sadrži 5,4 mol % metakrilne kiseline od kojih je 30 % neutralizirano natrijem [15]. Struktura Surlyna<sup>®</sup> prikazana je na slici 11.

**Slika 11. Struktura Surlyna®8940**

## 5. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu rada izrađen je jednoosno ojačan kompozit s dva sloja vlakana. Materijal neojačane matrice ispitan je pod jednoosnim cikličkim opterećenjem na kidalici, a ispitani su čvrstoća i modul pri rasteznom i savojnom opterećenju za različite smjerove vlakana u odnosu na smjer rezanja ispitnih tijela, i to  $0^\circ$ , odnosno u smjeru vlakana  $45^\circ$ , i  $90^\circ$ , odnosno okomito na smjer vlakana, a potom analizirani rezultati.

### 5.1. Izrada matrice i kompozita

Materijal matrice je Surlyn<sup>®</sup> 8940 proizvođača DuPont<sup>™</sup>. Fizička, mehanička i toplinska svojstva Surlyna<sup>®</sup> 8940 navedena su u tablici 5, tablici 6 i tablici 7.

**Tablica 5. Fizička svojstva Surlyna<sup>®</sup> 8940 [16]**

| Fizička svojstva                                                           | Vrijednost             | Norma      |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------|
| Gustoća                                                                    | 0,95 g/cm <sup>3</sup> | ASTM D792  |
| Maseni protok taljevine<br>(Opterećenje – 2,16 kg<br>Temperatura – 190 °C) | 2,8 g/10 min           | ASTM D1238 |

**Tablica 6. Mehanička svojstva Surlyna<sup>®</sup> 8940 [16]**

| Mehanička svojstva                       | Vrijednost            | Norma      |
|------------------------------------------|-----------------------|------------|
| Tvrdoća (Shore D)                        | 65                    | ASTM D2240 |
| Rastezna čvrstoća ( $R_m$ )              | 33 N/mm <sup>2</sup>  | ASTM D638  |
| Granica tečenja ( $R_e$ )<br>(50 mm/min) | 15 N/mm <sup>2</sup>  | ASTM D638  |
| Ukupno istezanje                         | 470 %                 | ASTM D638  |
| Savojni modul elastičnosti               | 350 N/mm <sup>2</sup> | ASTM D790  |
| Izod žilavost (sa zarezom)               | 10,25 J/cm            | ASTM D256  |
| Zaderna čvrstoća                         | 148 kN/m              | ASTM D624  |
| Otpornost na abraziju                    | 370 NBS Index         | ASTM D1630 |

**Tablica 7. Toplinska svojstva Surlyna® 8940 [16]**

| Toplinska svojstva         | Vrijednost  | Norma         |
|----------------------------|-------------|---------------|
| Toplinska vodljivost       | 0,246 W/m·K |               |
| Talište                    | 94 °C       | DSC           |
| Vicat temperatura mekšanja | 63 °C       | ASTM D1525-70 |

Kao ojačala koriste se ugljična vlakna jednosmjernog tkanja od proizvođača „G. Angeloni srl“. Neke od karakteristika ugljičnih vlakana dane su u tablici 8.

**Tablica 8. Karakteristike ugljičnog vlakna**

| Karakteristike                              | Nominalno        | Tolerancija | Normativ |
|---------------------------------------------|------------------|-------------|----------|
| Masa po jedinici površine, g/m <sup>2</sup> | 100              | ± 5 %       | ISO 4605 |
| Tkanje                                      | Unidirekcionalno | -           | ISO 2113 |
| Standardna širina, mm                       | 1000             | ± 3,5 %     |          |
| Debljina laminata, mm                       | 0,095            | ± 3,5 %     |          |

Proces proizvodnja surlynskih ploča za ispitivanje i za kompozit sastoji se od vaganja 20 grama granulata Surlyna® 8940, te slaganja granulata u metalni kalup (slika 12.).



**Slika 12. Slaganje granulata u kalup**

Nakon slaganja granulata, kalup se zatvara te se vakuumira na tlak od -1 bar u trajanju od 60 minuta (slika 13.).



**Slika 13. Vakuumiranje granulata**

Nakon vakuumiranja pri sobnoj temperaturi kalup se zagrijava na 160°C te se preša tlakom od 40 bara uz konstantno vakuumiranje.

## 5.2. Oprema

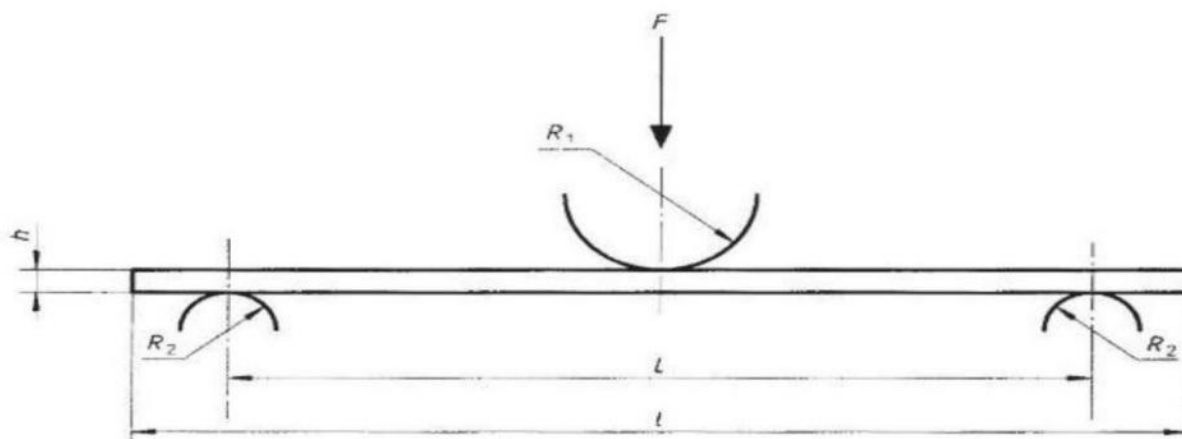
Savojno i rastezno ispitivanje provedeno je na univerzalnoj kidalici VEB Thüringer Industriewerk Rauenstein (slika 14.) iz 1961. godine u Laboratoriju za polimere i kompozite na fakultetu strojarstva i brodogradnje.



**Slika 14. Univerzalna kidalica**

Brzina rasteznog i savojnog ispitivanja iznosi 7 mm/min, dok je brzina cikličkog ispitivanja iznosila 20 mm/min. Rastezno ispitivanje odvijalo se u rasponu od 0 do 1500 N, dok se savojno ispitivanje odvijalo u rasponu od 0 do 60 N, ovisno o smjeru vlakana.

Savojna čvrstoća i modul određivali su se primjenom ispitivanja savijanjem u tri točke (slika 15.), pri kojem je ispitno tijelo oslonjeno na dva oslonca i opterećeno na sredini silom  $F$ .



**Slika 15. Shematski prikaz ispitivanja u tri točke [17]**

Zbog primjenjene sile javlja se progib, te se tijekom ispitivanja bilježi sila i progib koji ispitno tijelo ostvari uslijed djelovanja te sile. Raspon primjenjene sile varira između 0 i 60 N, ovisno o uzorku i smjeru vlakana.

### 5.3. Rezultati

#### 5.3.1. Savojna čvrstoća i modul

Za izračun vrijednosti naprezanja kod savojnog ispitivanja koristi se izraz:

$$\sigma_f = \frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (1)$$

Dok se za izračun istezanja koristi izraz:

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot f \cdot h}{L^2} \quad (2)$$

Gdje je:

$\sigma_f$  – naprezanje uslijed savojnog opterećenja, N/mm<sup>2</sup>

$F$  – sila, N

$L$  – razmak između oslonaca, mm

$b$  – širina ispitnog tijela, mm



$h$  – debljina ispitnog tijela, mm

$\varepsilon_f$  – istezanje nastalo uslijed savojnog opterećenja

$f$  – progib ispitnog tijela, mm

Razmak između oslonaca ( $L$ ) računao se prema sljedećem izrazu:

$$L = 16 \cdot h_{sr} \quad (3)$$

Gdje je:

$h_{sr}$  – debljina ispitnog tijela, mm

Iz formule 3 izračunato je da je potreban razmak između oslonaca između 38 i 40 mm.

Oznake uzoraka korištenih za savojno ispitivanje objašnjene su u tablici 9.

**Tablica 9. Oznake uzoraka za savijanje**

| Smjer vlakana   | Oznake uzoraka  |
|-----------------|-----------------|
| 90°             | od 1.1s do 1.4s |
| 45°             | od 2.1s do 2.4s |
| 0°              | od 3.1s do 3.4s |
| Neojačan Surlyn | od 4.1s do 4.4s |

#### 5.3.1.1. Savojna čvrstoća i modul za smjer vlakana od 90°

U tablici 10 prikazane su izmjerene dimenzije epruveta korištenih za ispitivanje te razmak između oslonaca.

**Tablica 10. Dimenzije ispitnih tijela**

| Uzorak | $b$ , mm | $h$ , mm | $L$ , mm |
|--------|----------|----------|----------|
| 1.1s   | 15,0     | 2,44     | 40       |
| 1.2s   | 15,54    | 2,14     | 40       |
| 1.3s   | 15,30    | 2,32     | 40       |
| 1.4s   | 15,72    | 2,22     | 40       |

U tablici 11 prikazani su progibi u ovisnosti o opterećenju i maksimalna sila za sva četiri uzorka ojačana s dva sloja ugljičnih vlakana postavljenim pod kutem od  $90^\circ$  na smjer rezanja.

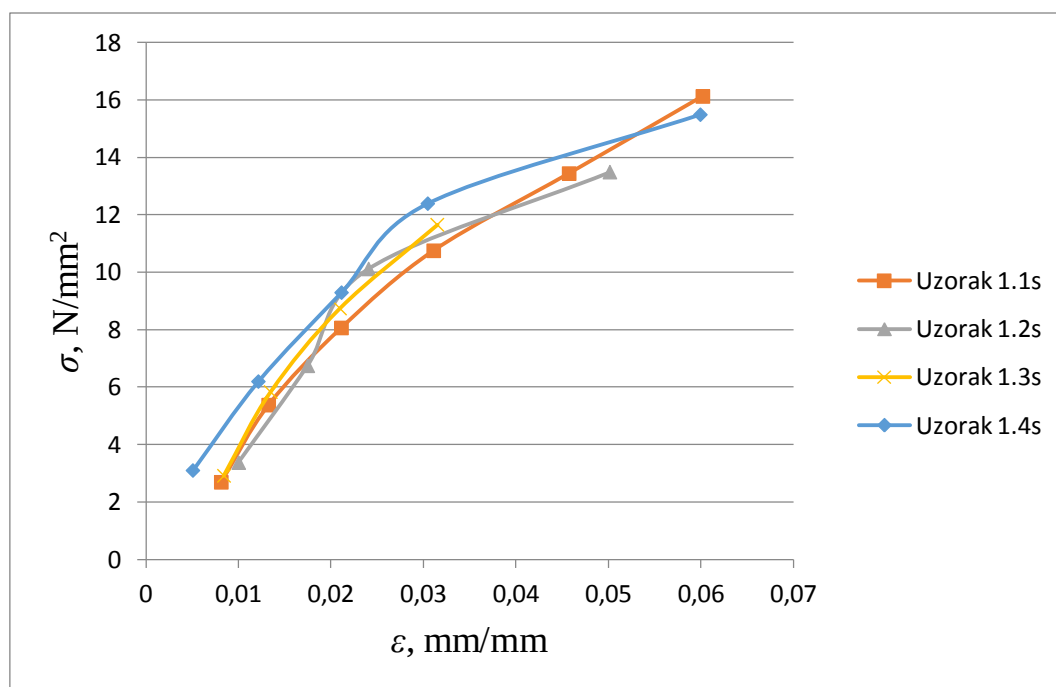
**Tablica 11. Očitani progibi i maskimalna sila**

| $F$        | $f_{1.1s}$ | $f_{2.2s}$ | $f_{2.3s}$ | $f_{2.4s}$ |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 4          | 0,89       | 1,25       | 0,97       | 0,61       |
| 8          | 1,45       | 2,18       | 1,55       | 1,46       |
| 12         | 2,31       | 3          | 2,41       | 2,54       |
| 16         | 3,4        | 6,25       | 3,62       | 3,66       |
| 20         | 5          | -          | -          | 7,2        |
| 24         | 6,58       | -          | -          | -          |
| $F_{\max}$ | 26         | 16         | 18         | 20         |

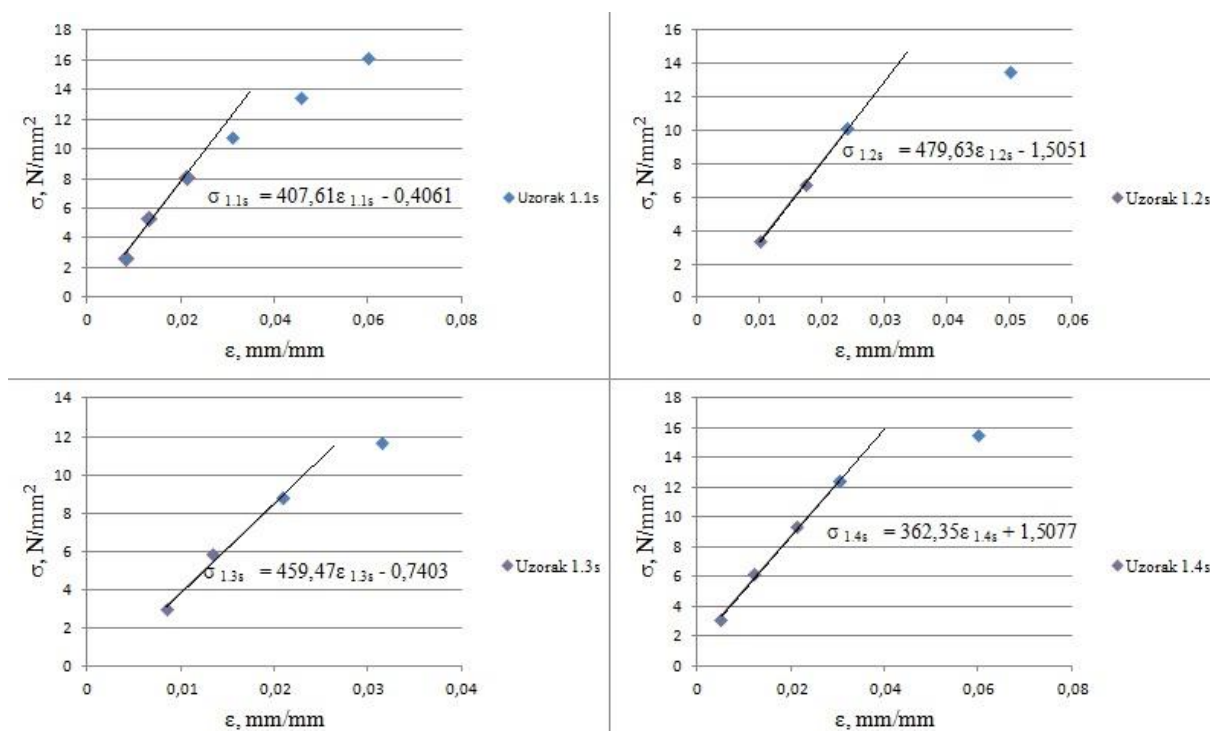
Koristeći jednadžbe 1 i 2 izračunata su naprezanja i istezanja koja su dana u tablici 12 te je konstruiran graf (slika 16).

**Tablica 12. Naprezanja i istezanja za savijanje epruvete s vlaknima pod kutem od  $90^\circ$**

| $F$ | $\sigma_{1.1s}$ | $\varepsilon_{1.1s}$ | $\sigma_{1.2s}$ | $\varepsilon_{2.2s}$ | $\sigma_{2.3s}$ | $\varepsilon_{2.3s}$ | $\sigma_{2.4s}$ | $\varepsilon_{2.4s}$ |
|-----|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| 0   | 0               | 0                    | 0               | 0                    | 0               | 0                    | 0               | 0                    |
| 4   | 2,6             | 0,0081               | 3,4             | 0,01                 | 2,9             | 0,0084               | 3,1             | 0,0051               |
| 8   | 5,3             | 0,0132               | 6,7             | 0,0174               | 5,8             | 0,0134               | 6,2             | 0,0121               |
| 12  | 8,1             | 0,0211               | 10,1            | 0,0240               | 8,7             | 0,0209               | 9,3             | 0,0211               |
| 16  | 10,7            | 0,0311               | 13,5            | 0,0501               | 11,7            | 0,0314               | 12,4            | 0,0304               |
| 20  | 13,4            | 0,0457               | -               | -                    | -               | -                    | 15,5            | 0,0599               |
| 24  | 16,1            | 0,0602               | -               | -                    | -               | -                    | -               | -                    |



Slika 16. Grafički prikaz savojnog ispitivanja za vlakna pod kutem od 90°



Slika 17. Savojni moduli

Iz jednadžbi pravca sa slike 17 određeni su savojni moduli:

$$E_{1.1s} = 407,61 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{1.2s} = 479,63 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{1,3s} = 459,47 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{1,4s} = 362,35 \text{ N/mm}^2$$

Srednja vrijednost savojnog modula elastičnosti računa se prema izrazu:

$$E = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n}{n} \quad (4)$$

Gdje je  $n$  broj uzoraka.

Koristeći izraz 4 dobivena je srednja vrijednost savojnog modula za epruvete sa smjerom vlakana od  $90^\circ$ ;  $E_{sr1s} = 427,27 \text{ N/mm}^2$ .

Pomoću izraza 1 izračunava se čvrstoća:

$$R_{m1,1s} = 17,5 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m1,2s} = 13,5 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m1,3s} = 13,1 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m1,4s} = 15,5 \text{ N/mm}^2$$

Srednja vrijednost savojne čvrstoće računa se prema izrazu:

$$R_m = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n}{n} \quad (5)$$

$$R_{msr1s} = 14,9 \text{ N/mm}^2$$

### 5.3.1.2. Savojna čvrstoća i modul za smjer vlakana od $45^\circ$

U tablici 13 prikazane su izmjerene dimenzije epruveta korištenih za ispitivanje te razmak između oslonaca.

**Tablica 13. Dimenzije ispitnih tijela**

| Uzorak | $b$ , mm | $h$ , mm | $L$ , mm |
|--------|----------|----------|----------|
| 2.1s   | 14,98    | 2,42     | 40       |
| 2.2s   | 15,40    | 2,28     |          |
| 2.3s   | 14,46    | 2,20     |          |

|      |       |      |  |
|------|-------|------|--|
| 2.4s | 14,50 | 1,94 |  |
|------|-------|------|--|

U tablici 14 prikazani su progibi u ovisnosti o opterećenju i maksimalna sila za sva četiri uzorka ojačanih s dva sloja ugljičnih vlakana postavljenim pod kutem od 45° na smjer rezanja.

**Tablica 14. Očitani progibi**

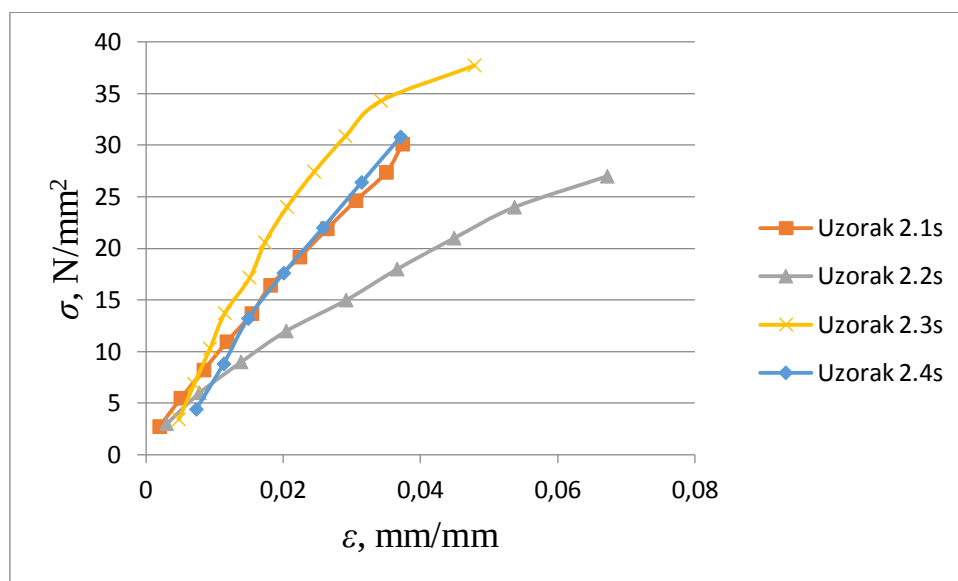
| $F$        | $f_{2.1s}$ | $f_{2.2s}$ | $f_{2.3s}$ | $f_{2.4s}$ |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 4          | 0,22       | 0,35       | 0,58       | 1,01       |
| 8          | 0,56       | 0,91       | 0,85       | 1,56       |
| 12         | 0,93       | 1,62       | 1,13       | 2,05       |
| 16         | 1,3        | 2,39       | 1,39       | 2,76       |
| 20         | 1,7        | 3,41       | 1,83       | 3,55       |
| 24         | 2          | 4,28       | 2,1        | 4,32       |
| 28         | 2,47       | 5,25       | 2,49       | 5,1        |
| 32         | 2,91       | 6,28       | 2,97       | -          |
| 36         | 3,37       | 7,86       | 3,52       | -          |
| 40         | 3,86       | -          | 4,15       | -          |
| 44         | 4,12       | -          | 5,8        | -          |
| $F_{\max}$ | 50         | 38         | 46         | 30         |

Koristeći jednadžbe 1 i 2 izračunata su naprezanja i istezanja koja su dana u tablici 15 te je konstruiran graf (slika 18).

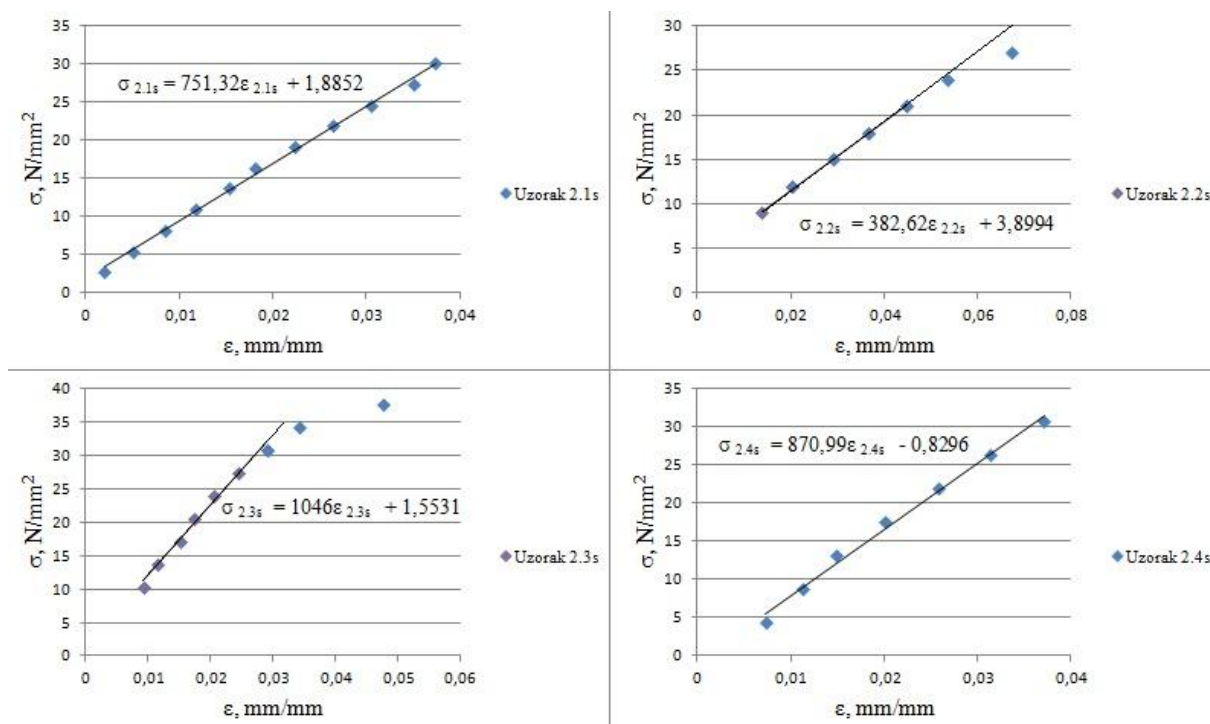
**Tablica 15. Naprezanja i istezanja za savijanje epruvete s vlaknima pod kutem od 45°**

| $F$ | $\sigma_{2.1s}$ | $\varepsilon_{2.1s}$ | $\sigma_{2.2s}$ | $\varepsilon_{2.2s}$ | $\sigma_{2.3s}$ | $\varepsilon_{2.3s}$ | $\sigma_{2.4s}$ | $\varepsilon_{2.4s}$ |
|-----|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| 0   | 0               | 0                    | 0               | 0                    | 0               | 0                    | 0               | 0                    |
| 4   | 2,7             | 0,002                | 3               | 0,003                | 3,4             | 0,0048               | 4,4             | 0,0073               |
| 8   | 5,5             | 0,0050               | 6               | 0,0077               | 6,9             | 0,007                | 8,8             | 0,0113               |
| 12  | 8,2             | 0,0084               | 9               | 0,0139               | 10,3            | 0,0093               | 13,2            | 0,0149               |
| 16  | 10,9            | 0,0117               | 12              | 0,0204               | 13,7            | 0,0115               | 17,6            | 0,02                 |
| 20  | 13,7            | 0,0154               | 15              | 0,0292               | 17,1            | 0,0151               | 22              | 0,0258               |

|    |      |        |    |        |      |        |      |        |
|----|------|--------|----|--------|------|--------|------|--------|
| 24 | 16,4 | 0,0182 | 18 | 0,0366 | 20,6 | 0,0173 | 26,4 | 0,0314 |
| 28 | 19,2 | 0,0224 | 21 | 0,0449 | 24   | 0,0205 | 30,8 | 0,0371 |
| 32 | 21,9 | 0,0264 | 24 | 0,0537 | 27,4 | 0,0245 | -    | -      |
| 36 | 24,6 | 0,0306 | 27 | 0,0672 | 30,9 | 0,029  | -    | -      |
| 40 | 27,4 | 0,035  | -  | -      | 34,3 | 0,0342 | -    | -      |
| 44 | 30,1 | 0,0374 | -  | -      | 37,7 | 0,0479 | -    | -      |



Slika 18. Grafički prikaz savojnog ispitivanja za vlakna pod kutem od 45°



Slika 19. Savojni moduli

Iz jednadžbi pravca sa slike 19 određeni su savojni moduli:

$$E_{2.1s} = 751,32 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{2.2s} = 382,62 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{2.3s} = 1046 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{2.4s} = 870,99 \text{ N/mm}^2$$

Koristeći izraz 4 dobivena je srednja vrijednost savojnog modula za epruvete sa smjerom vlakana od  $45^\circ$ ;  $E_{sr2s} = 762,73 \text{ N/mm}^2$ .

Pomoću izraza 1 izračunava se čvrstoća:

$$R_{m2.1s} = 34,2 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m2.2s} = 28,5 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m2.3s} = 39,4 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m2.4s} = 33 \text{ N/mm}^2$$

Srednja vrijednost savojne čvrstoće računa se prema izrazu 5 i iznosi:

$$R_{srm2s} = 33,8 \text{ N/mm}^2$$

### 5.3.1.3. Savojna čvrstoća i modul za smjer vlakana od $0^\circ$

U tablici 16 prikazane su izmjerene dimenzije epruveta korištenih za ispitivanje te razmak između oslonaca.

**Tablica 16. Dimenzije ispitnih tijela**

| Uzorak | $b$ , mm | $h$ , mm | $L$ , mm |
|--------|----------|----------|----------|
| 3.1s   | 15,32    | 2,38     | 38       |
| 3.2s   | 15,50    | 2,42     |          |
| 3.3s   | 15,42    | 2,44     |          |
| 3.4s   | 15,38    | 2,36     |          |

U tablici 17 prikazani su progibi u ovisnosti o opterećenju i maksimalna sila za sva četiri uzorka ojačanih s dva sloja ugljičnih vlakana postavljenim pod kutem od  $0^\circ$  na smjer rezanja.

**Tablica 17. Očitani progibi i maksimalne sile**

| $F$        | $f_{3.1s}$ | $f_{3.2s}$ | $f_{3.3s}$ | $f_{3.4s}$ |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| 4          | 0,25       | 0,22       | 0,44       | 0,26       |
| 8          | 0,4        | 0,44       | 0,62       | 0,51       |
| 12         | 0,5        | 0,55       | 0,74       | 0,6        |
| 16         | 0,62       | 0,63       | 0,84       | 0,67       |
| 20         | 0,72       | 0,79       | 0,96       | 0,78       |
| 24         | 0,82       | 0,88       | 1,06       | 0,85       |
| 28         | 0,94       | 1          | 1,18       | 0,96       |
| 32         | 1,02       | 1,09       | 1,32       | 1,06       |
| 36         | 1,13       | 1,18       | 1,41       | 1,16       |
| 40         | 1,24       | 1,28       | 1,53       | 1,27       |
| 44         | 1,38       | 1,4        | 1,67       | 1,39       |
| 48         | 1,5        | 1,51       | 1,81       | 1,51       |
| 52         | 1,65       | 1,59       | 1,94       | 1,61       |
| 54         | -          | 1,72       | -          | 1,72       |
| 60         | -          | 1,85       | -          | 1,83       |
| $F_{\max}$ | 58         | 64         | 54         | 72         |

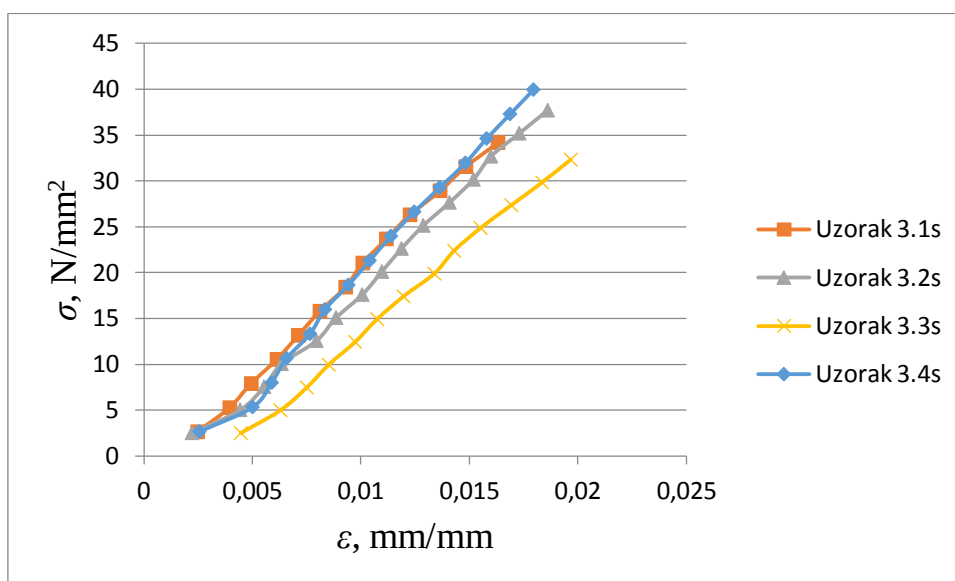
Koristeći jednadžbe 1 i 2 izračunata su naprezanja i istezanja koja su dana u tablici 18 te je konstruiran graf (slika 20).

**Tablica 18. Naprezanja i istezanja za savijanje epruvete s vlaknima pod kutem od 0°**

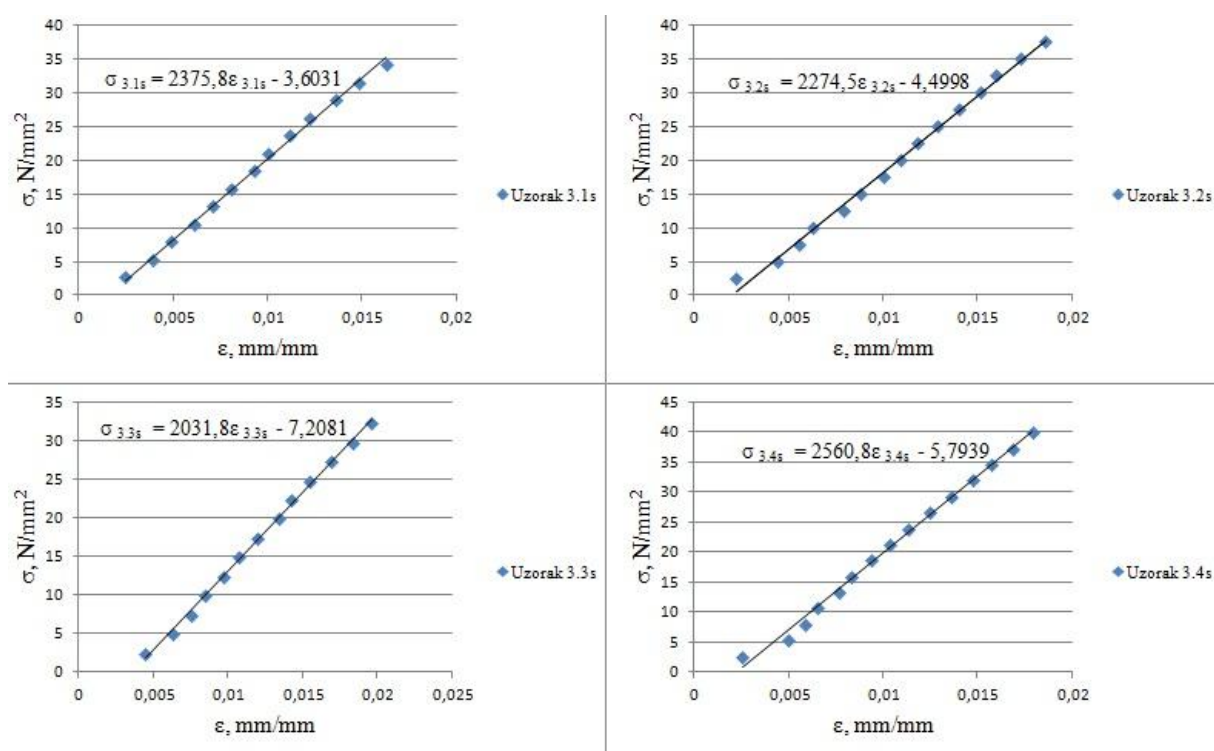
| $F$ | $\sigma_{3.1s}$ | $\varepsilon_{3.1s}$ | $\sigma_{3.2s}$ | $\varepsilon_{3.2s}$ | $\sigma_{3.3s}$ | $\varepsilon_{3.3s}$ | $\sigma_{3.4s}$ | $\varepsilon_{3.4s}$ |
|-----|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| 0   | 0               | 0                    | 0               | 0                    | 0               | 0                    | 0               | 0                    |
| 4   | 2,6             | 0,0025               | 2,5             | 0,0022               | 2,5             | 0,0045               | 2,7             | 0,0026               |
| 8   | 5,3             | 0,004                | 5               | 0,0044               | 5               | 0,0063               | 5,34            | 0,005                |
| 12  | 7,9             | 0,0049               | 7,5             | 0,0055               | 7,5             | 0,0075               | 8               | 0,0059               |
| 16  | 10,5            | 0,0061               | 10              | 0,0063               | 9,9             | 0,0085               | 10,6            | 0,0066               |
| 20  | 13,1            | 0,0071               | 12,6            | 0,0079               | 12,4            | 0,0097               | 13,3            | 0,0076               |
| 24  | 15,8            | 0,0081               | 15,1            | 0,0088               | 14,9            | 0,0107               | 16              | 0,0083               |
| 28  | 18,4            | 0,0093               | 17,6            | 0,0101               | 17,4            | 0,012                | 18,6            | 0,0094               |



|    |      |        |       |        |      |        |       |        |
|----|------|--------|-------|--------|------|--------|-------|--------|
| 32 | 21   | 0,0101 | 20,1  | 0,011  | 19,9 | 0,0134 | 21,3  | 0,0104 |
| 36 | 23,6 | 0,0112 | 22,64 | 0,0119 | 22,4 | 0,0143 | 24    | 0,0114 |
| 40 | 26,3 | 0,0123 | 25,1  | 0,0129 | 24,8 | 0,0155 | 26,6  | 0,0125 |
| 44 | 28,9 | 0,0136 | 27,6  | 0,0141 | 27,3 | 0,0169 | 29,3  | 0,0136 |
| 48 | 31,5 | 0,0148 | 30,1  | 0,0152 | 29,8 | 0,0184 | 32    | 0,0148 |
| 52 | 34,2 | 0,0163 | 32,7  | 0,016  | 32,3 | 0,0197 | 34,6  | 0,0158 |
| 56 | -    | -      | 35,2  | 0,0173 | -    | -      | 37,31 | 0,0169 |
| 60 | -    | -      | 37,7  | 0,0186 | -    | -      | 40    | 0,0179 |



Slika 20. Grafički prikaz savojnog ispitivanja za vlakna pod kutem od 0°



Slika 21. Savojni moduli

Iz jednadžbi pravca sa slike 21 određeni su savojni moduli:

$$E_{3.1s} = 2375,8 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{3.2s} = 2274,5 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{3.3s} = 2031,8 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{3.4s} = 2560,8 \text{ N/mm}^2$$

Koristeći izraz 4 dobivena je srednja vrijednost savojnog modula za epruvete sa smjerom vlakana od 0°;  $E_{sr3s} = 2310,73 \text{ N/mm}^2$ .

Pomoću izraza 1 izračunava se čvrstoća:

$$R_{m3.1s} = 38,1 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m3.2s} = 40,2 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m3.3s} = 33,5 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m3.4s} = 47,7 \text{ N/mm}^2$$

Srednja vrijednost savojne čvrstoće računa se prema izrazu 5 i iznosi:

$$R_{srm3s} = 39,9 \text{ N/mm}^2$$

### 5.3.1.4. Savojna čvrstoća i modul za neojačani Surlyn

U tablici 19 prikazane su izmjerene dimenzije epruveta korištenih za ispitivanje te razmak između oslonaca.

**Tablica 19. Dimenzije ispitnih tijela**

| Uzorak | $b$ , mm | $h$ , mm | $L$ , mm |
|--------|----------|----------|----------|
| 4.1s   | 10,38    | 1,96     | 33       |
| 4.2s   | 10,12    | 2,20     |          |
| 4.3s   | 10,42    | 2,02     |          |

U tablici 20 prikazani su progibi u ovisnosti o opterećenju za sva tri uzorka neojačanog Surlyna® 8940.

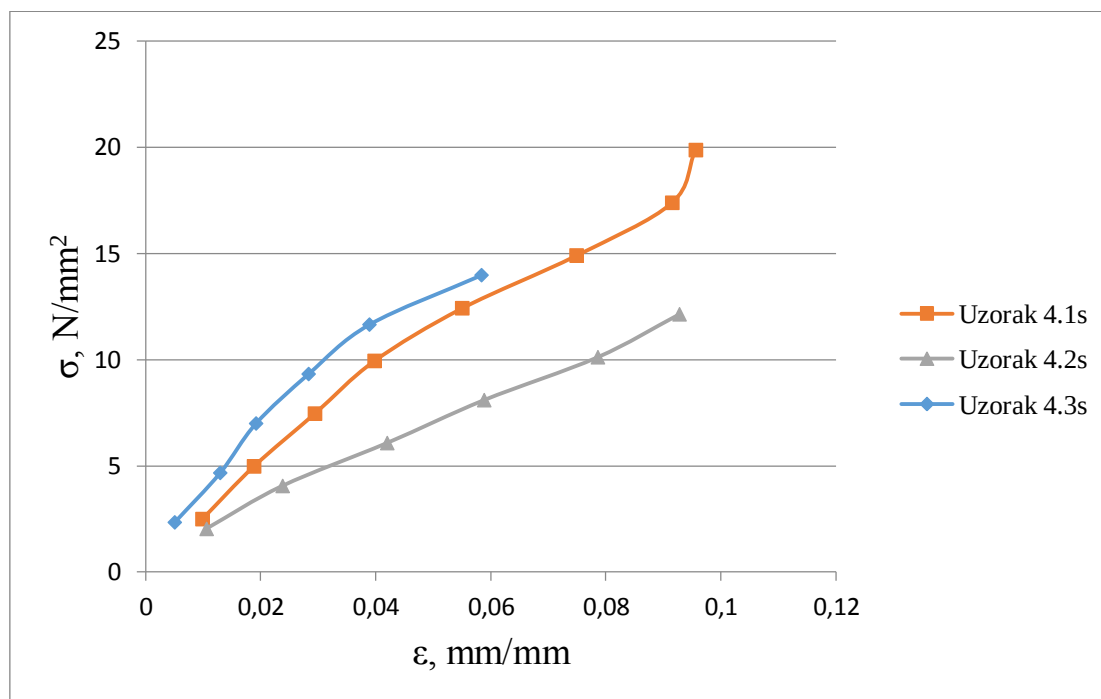
**Tablica 20. Očitani progibi**

| $F$ | $f_{4.1s}$ | $f_{4.2s}$ | $f_{4.3s}$ |
|-----|------------|------------|------------|
| 0   | 0          | 0          | 0          |
| 2   | 0,91       | 0,87       | 0,45       |
| 4   | 1,74       | 1,96       | 1,16       |
| 6   | 2,72       | 3,46       | 1,72       |
| 8   | 3,68       | 4,85       | 2,54       |
| 10  | 5,09       | 6,48       | 3,49       |
| 12  | 6,93       | 7,65       | 5,24       |
| 14  | 8,47       | -          | -          |
| 16  | 8,85       | -          | -          |

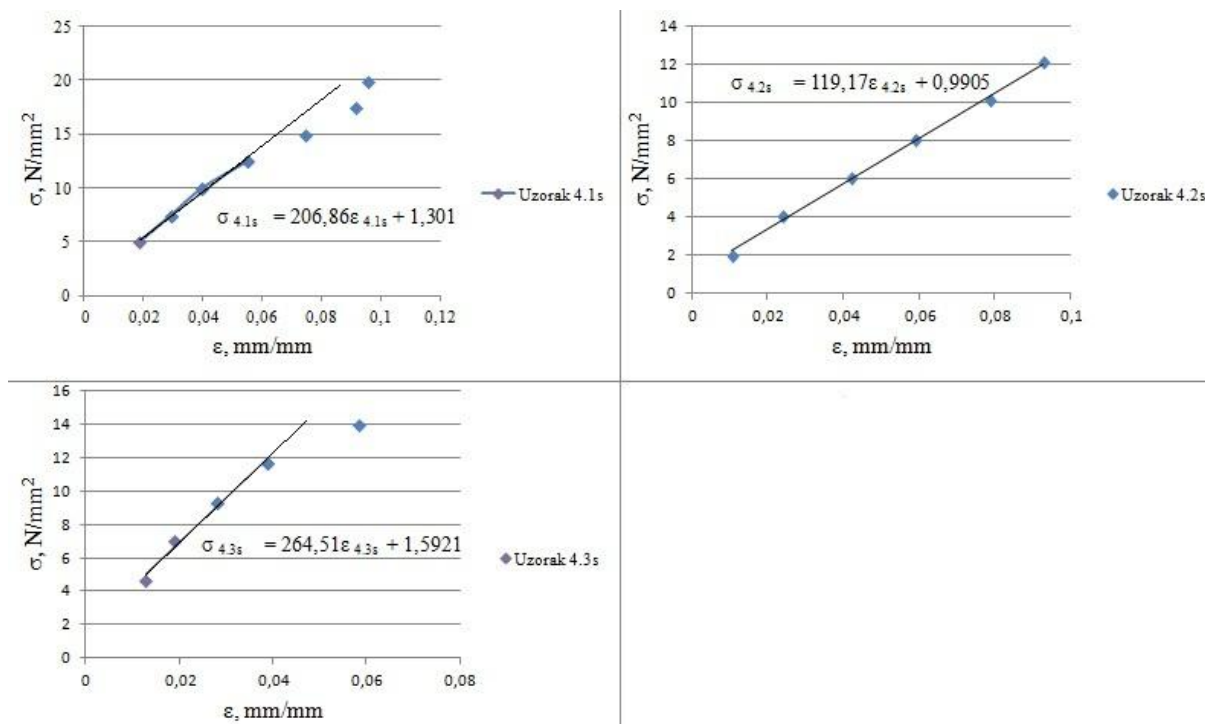
Koristeći jednadžbe 1 i 2 izračunata su naprezanja i istezanja koja su dana u tablici 21 te je konstruiran graf (slika 22).

Tablica 21. Naprezanja i istežanja za savijanje epruvete od neojačanog Surlyna

| $F$ | $\sigma_{4.1s}$ | $\varepsilon_{4.1s}$ | $\sigma_{4.2s}$ | $\varepsilon_{4.2s}$ | $\sigma_{4.3s}$ | $\varepsilon_{4.3s}$ |
|-----|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| 0   | 0               | 0                    | 0               | 0                    | 0               | 0                    |
| 2   | 2,5             | 0,0098               | 2               | 0,0106               | 2,3             | 0,005                |
| 4   | 5               | 0,0188               | 4               | 0,0236               | 4,7             | 0,0129               |
| 6   | 7,4             | 0,0294               | 6,1             | 0,042                | 7               | 0,0191               |
| 8   | 9,9             | 0,0397               | 8,1             | 0,0588               | 9,3             | 0,0283               |
| 10  | 12,4            | 0,055                | 10,1            | 0,0785               | 11,6            | 0,0388               |
| 12  | 14,9            | 0,0748               | 12,1            | 0,0927               | 14              | 0,0583               |
| 14  | 17,4            | 0,0915               | -               | -                    | -               | -                    |
| 16  | 19,9            | 0,0956               | -               | -                    | -               | -                    |



Slika 22. Grafički prikaz savojnog ispitivanja za neojačani Surlyn



Slika 23. Savojni modul

Iz jednadžbi pravca sa slike 23 određeni su savojni moduli:

$$E_{4.1s} = 206,86 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{4.2s} = 119,17 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{4.3s} = 264,51 \text{ N/mm}^2$$

Koristeći izraz 4 dobivena je srednja vrijednost savojnog modula za neojačani Surlyn;

$$E_{sr4s} = 196,85 \text{ N/mm}^2.$$

Kod neojačanog Surlyna progib je očitavan do sile od  $F = 18 \text{ N}$ . Nakon toga uzorci su rasterećeni jer došlo do pojave loma, a daljenjim opterećivanjem bi došlo do proklizavanja epruvete između oslonaca.

### 5.3.2. Rastezna čvrstoća i modul

Za izračun vrijednosti naprezanja kod savojnog ispitivanja koristi se izraz:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Dok se za izračun istezanja koristi izraz:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_o} \quad (7)$$

Gdje je:

$\sigma$  – naprezanje uslijed rastezanja,  $\text{N/mm}^2$

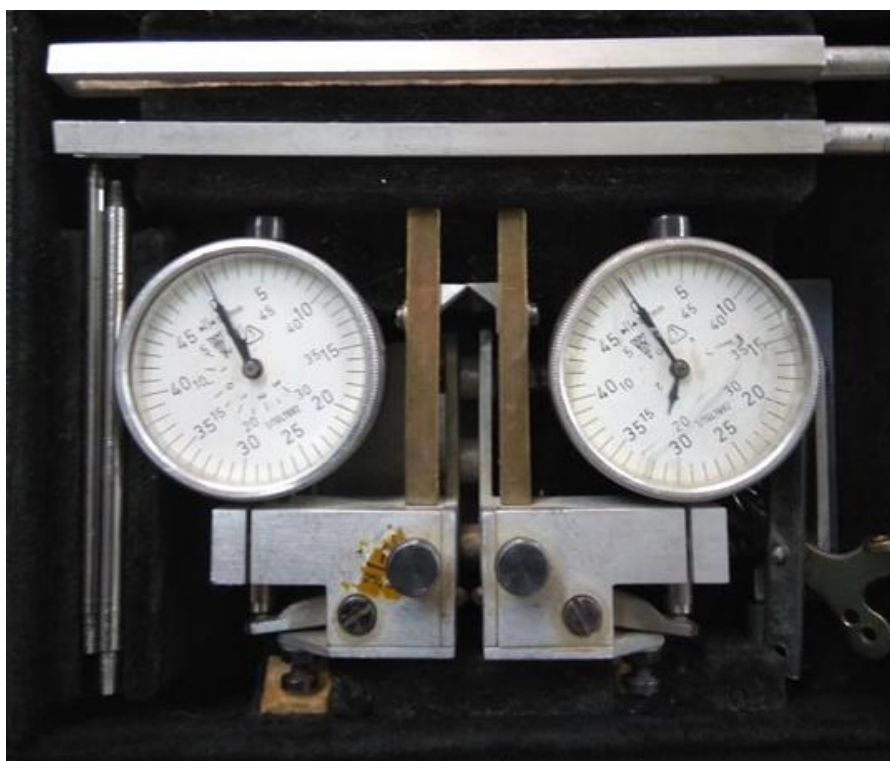
$A$  – površina poprečnog presjeka epruvete,  $\text{mm}^2$

$\varepsilon$  – istezanje nastalo kao posljedica djelovanja naprezanja, mm

$\Delta l$  – promjena produljenja epruvete, mm

$l_o$  – početna duljina epruvete, mm

Promjena duljine epruvete očitava se pomoću komparatora (slika 24) koji se sastoji od dvije mjerne ure. Prilikom rasteznog ispitivanja na određenim vrijednostima sile očitavaju se lijeva (u grafovima označeno slovom L) i desna (u grafovima označeno slovom D) mjerna ura, te se izračunava prosjek tih dviju vrijednosti (označeno kao Avg), i taj prosjek se gleda kao promjena produljenja epruvete. Početna duljina epruvete za sve uzorke iznosi 50 mm.



Slika 24. Komparator

Oznake uzoraka korištenih za savojno ispitivanje objašnjene su u tablici 22.

**Tablica 22. Oznake uzoraka za savijanje**

| Smjer vlakana | Oznake uzoraka |
|---------------|----------------|
| 90°           | 1.1v – 1.4v    |
| 45°           | 2.1v – 2.3v    |
| 0°            | 3.1v – 3.5v    |

### 5.3.2.1. Rastezna čvrstoća i modul za smjer vlakana od 90°

U tablici 23 prikazane su izmjerene dimenzije epruveta korištenih za rastezno ispitivanje te početna duljina epruvete ( $l_0$ ).

**Tablica 23. Dimenzija ispitnih tijela**

| Uzorak | $b$ , mm | $h$ , mm | $A$ , mm <sup>2</sup> | $l_0$ , mm |
|--------|----------|----------|-----------------------|------------|
| 1.1v   | 10,06    | 2,44     | 24,5464               | 50         |
| 1.2v   | 10,12    | 2,4      | 24,288                |            |
| 1.3v   | 10,38    | 2,36     | 24,4968               |            |
| 1.4v   | 9,8      | 2,42     | 23,716                |            |

Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 1.1v prikazani su u tablici 24.

**Tablica 24. Rezultati rasteznog ispitivanja ispitnog tijela 1.1v (90°)**

| $F$ | $L$  | $D$  | Avg <sub>1.1v</sub> | $\sigma_{1.1v}$ | $\varepsilon_{1.1v}$ |
|-----|------|------|---------------------|-----------------|----------------------|
| 0   | 0    | 0    | 0                   | 0               | 0                    |
| 20  | 0,01 | 0,15 | 0,08                | 0,8             | 0,0016               |
| 40  | 0,02 | 0,22 | 0,12                | 1,6             | 0,0024               |
| 60  | 0,09 | 0,30 | 0,195               | 2,4             | 0,0039               |
| 80  | 0,18 | 0,38 | 0,28                | 3,3             | 0,0056               |
| 100 | 0,27 | 0,48 | 0,375               | 4,1             | 0,0075               |
| 120 | 0,39 | 0,60 | 0,495               | 4,9             | 0,0099               |
| 140 | 0,52 | 0,74 | 0,63                | 5,7             | 0,0126               |
| 160 | 0,64 | 0,86 | 0,75                | 6,5             | 0,015                |
| 180 | 0,80 | 1,03 | 0,915               | 7,3             | 0,0183               |

|            |       |      |       |     |        |
|------------|-------|------|-------|-----|--------|
| 200        | 1,00  | 1,24 | 1,12  | 8,1 | 0,0224 |
| 220        | 1,27  | 1,50 | 1,385 | 9   | 0,0277 |
| $F_{\max}$ | 234 N |      |       |     |        |

Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 1.2v prikazani su u tablici 25.

**Tablica 25. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 1.2v**

| $F$        | L     | D    | Avg $_{1.2v}$ | $\sigma$ $_{1.2v}$ | $\varepsilon$ $_{1.2v}$ |
|------------|-------|------|---------------|--------------------|-------------------------|
| 0          | 0     | 0    | 0             | 0                  | 0                       |
| 20         | 0,01  | 0,03 | 0,02          | 0,8                | 0,0004                  |
| 40         | 0,05  | 0,11 | 0,08          | 1,6                | 0,0016                  |
| 60         | 0,13  | 0,19 | 0,16          | 2,5                | 0,0032                  |
| 80         | 0,23  | 0,29 | 0,26          | 3,3                | 0,0052                  |
| 100        | 0,35  | 0,40 | 0,375         | 4,1                | 0,0075                  |
| 120        | 0,46  | 0,52 | 0,49          | 4,9                | 0,0098                  |
| 140        | 0,59  | 0,66 | 0,625         | 5,8                | 0,0125                  |
| 160        | 0,74  | 0,80 | 0,77          | 6,6                | 0,0154                  |
| 180        | 0,90  | 0,96 | 0,93          | 7,4                | 0,0186                  |
| 200        | 1,11  | 1,16 | 1,135         | 8,2                | 0,0227                  |
| 220        | 1,33  | 137  | 1,35          | 9,1                | 0,027                   |
| $F_{\max}$ | 262 N |      |               |                    |                         |

Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 1.3v prikazani su u tablici 26.

**Tablica 26. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 1.3v**

| $F$ | L    | D    | Avg $_{1.3v}$ | $\sigma$ $_{1.3v}$ | $\varepsilon$ $_{1.3v}$ |
|-----|------|------|---------------|--------------------|-------------------------|
| 0   | 0    | 0    | 0             | 0                  | 0                       |
| 20  | 0,01 | 0,07 | 0,04          | 0,8                | 0,0008                  |
| 40  | 0,06 | 0,15 | 0,105         | 1,6                | 0,0021                  |
| 60  | 0,13 | 0,23 | 0,18          | 2,4                | 0,0036                  |
| 80  | 0,24 | 0,33 | 0,285         | 3,3                | 0,0057                  |
| 100 | 0,34 | 0,43 | 0,385         | 4,1                | 0,0077                  |
| 120 | 0,45 | 0,55 | 0,5           | 4,9                | 0,01                    |

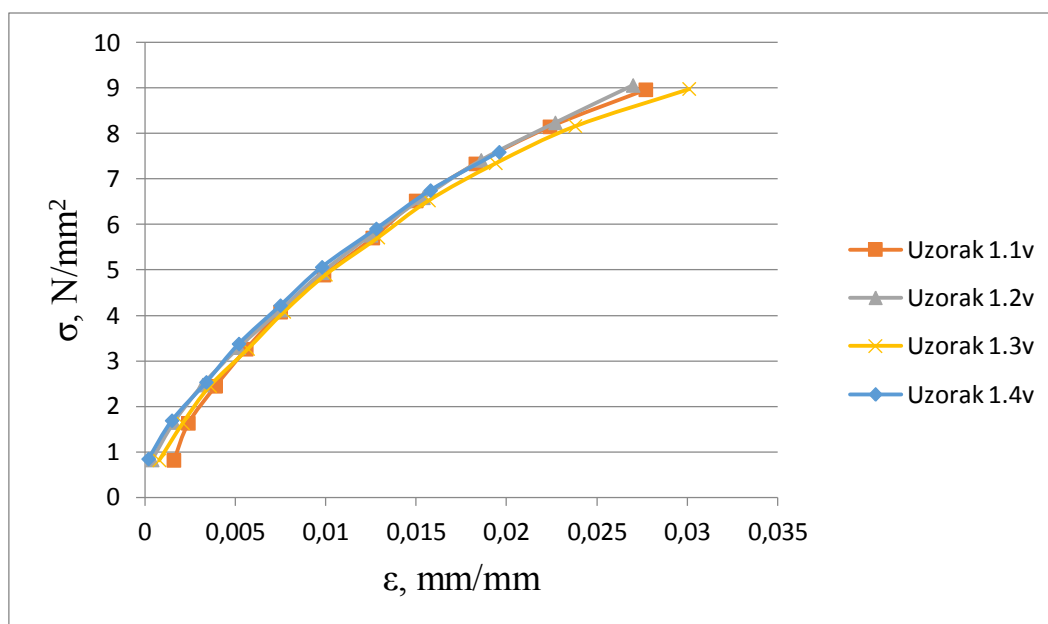


|            |       |      |       |     |        |
|------------|-------|------|-------|-----|--------|
| 140        | 0,59  | 0,70 | 0,645 | 5,7 | 0,0129 |
| 160        | 0,74  | 0,83 | 0,785 | 6,5 | 0,0157 |
| 180        | 0,92  | 1,02 | 0,97  | 7,3 | 0,0194 |
| 200        | 114   | 124  | 1,19  | 8,2 | 0,0238 |
| 220        | 146   | 155  | 1,505 | 9   | 0,0301 |
| $F_{\max}$ | 236 N |      |       |     |        |

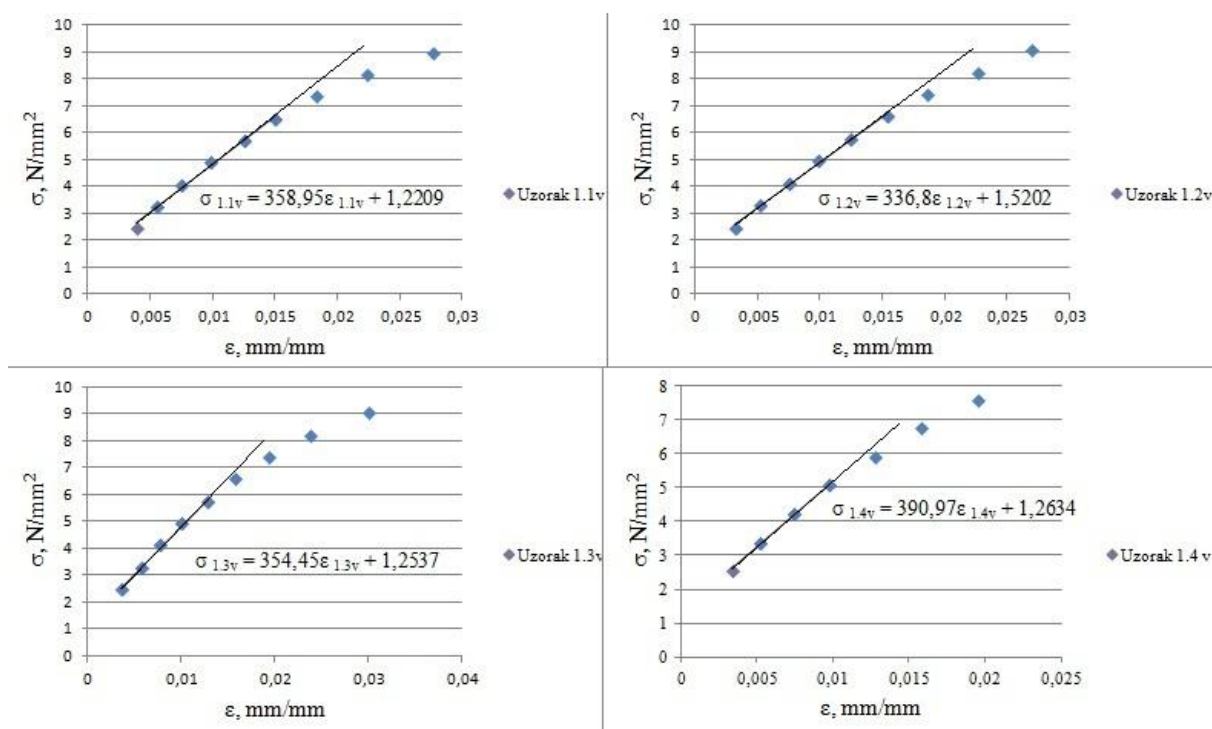
Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 1.4v prikazani su u tablici 27.

**Tablica 27. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 1.4v**

| $F$        | L     | D    | Avg <sub>1.4v</sub> | $\sigma_{1.4v}$ | $\varepsilon_{1.4v}$ |
|------------|-------|------|---------------------|-----------------|----------------------|
| 0          | 0     | 0    | 0                   | 0               | 0                    |
| 20         | 0,01  | 0,01 | 0,01                | 0,8             | 0,0002               |
| 40         | 0,08  | 0,07 | 0,075               | 1,7             | 0,0015               |
| 60         | 0,18  | 0,16 | 0,17                | 2,5             | 0,0034               |
| 80         | 0,27  | 0,25 | 0,26                | 3,4             | 0,0052               |
| 100        | 0,38  | 0,37 | 0,375               | 4,2             | 0,0075               |
| 120        | 0,50  | 0,48 | 0,49                | 5,1             | 0,0098               |
| 140        | 0,65  | 0,63 | 0,64                | 5,9             | 0,0128               |
| 160        | 0,80  | 0,78 | 0,79                | 6,7             | 0,0158               |
| 180        | 0,99  | 0,97 | 0,98                | 7,6             | 0,0196               |
| $F_{\max}$ | 196 N |      |                     |                 |                      |



Slika 25. Grafički prikaz rasteznog ispitivanja za vlakna pod kutem od 90°



Slika 26. Rastezni modul

Iz jednadžbi pravca sa slike 26 određeni su rastezni moduli:

$$E_{1.1v} = 358,95 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{1.2v} = 336,8 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{1.3v} = 354,45 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{1,4v} = 390,97 \text{ N/mm}^2$$

Koristeći izraz 4 dobivena je srednja vrijednost rasteznog modula za epruvete sa smjerom vlakana od  $90^\circ$ ;  $E_{sr1v} = 360,29 \text{ N/mm}^2$ .

Pomoću izraza 6 izračunava se rastezna čvrstoća:

$$R_{m1,1v} = 9,5 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m1,2v} = 10,8 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m1,3v} = 9,6 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m1,4v} = 8,3 \text{ N/mm}^2$$

Srednja vrijednost rastezne čvrstoće računa se prema izrazu 5 i iznosi:

$$R_{sr1v} = 9,6 \text{ N/mm}^2$$

### 5.3.2.2. Rastezna čvrstoća i modul za smjer vlakana od $45^\circ$

U tablici 28 prikazane su izmjerene dimenzije epruveta korištenih za rastezno ispitivanje te početna duljina epruvete ( $l_o$ ).

**Tablica 28. Dimenzije ispitnih tijela**

| Uzorak | $b$ , mm | $h$ , mm | $A$ , mm <sup>2</sup> | $l_o$ , mm |
|--------|----------|----------|-----------------------|------------|
| 2.1v   | 9,74     | 2,2      | 21,428                | 50         |
| 2.2v   | 10,44    | 2,14     | 22,3416               |            |
| 2.3v   | 10,02    | 2,22     | 22,2444               |            |

Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 2.1v prikazani su u tablici 29.

**Tablica 29. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 2.1v ( $45^\circ$ )**

| $F$ | $L$  | $D$  | $\text{Avg}_{2,1v}$ | $\sigma_{2,1v}$ | $\epsilon_{2,1v}$ |
|-----|------|------|---------------------|-----------------|-------------------|
| 0   | 0    | 0    | 0                   | 0               | 0                 |
| 10  | 0    | 0,08 | 0,04                | 0,5             | 0,0008            |
| 20  | 0,01 | 0,10 | 0,055               | 0,9             | 0,0011            |

|            |       |      |       |      |        |
|------------|-------|------|-------|------|--------|
| 30         | 0,03  | 0,13 | 0,08  | 1,4  | 0,0016 |
| 40         | 0,06  | 0,16 | 0,11  | 1,9  | 0,0022 |
| 50         | 0,08  | 0,19 | 0,135 | 2,3  | 0,0027 |
| 60         | 0,11  | 0,22 | 0,165 | 2,8  | 0,0033 |
| 70         | 0,14  | 0,25 | 0,195 | 3,3  | 0,0039 |
| 80         | 0,17  | 0,29 | 0,23  | 3,7  | 0,0046 |
| 90         | 0,20  | 0,31 | 0,255 | 4,2  | 0,0051 |
| 100        | 0,23  | 0,34 | 0,285 | 4,7  | 0,0057 |
| 110        | 0,27  | 0,38 | 0,325 | 5,1  | 0,0065 |
| 120        | 0,31  | 0,42 | 0,365 | 5,6  | 0,0073 |
| 130        | 0,35  | 0,46 | 0,405 | 6,1  | 0,0081 |
| 140        | 0,39  | 0,50 | 0,445 | 6,5  | 0,0089 |
| 150        | 0,43  | 0,53 | 0,48  | 7    | 0,0096 |
| 160        | 0,46  | 0,58 | 0,52  | 7,5  | 0,0104 |
| 170        | 0,52  | 0,63 | 0,575 | 8    | 0,0115 |
| 180        | 0,57  | 0,67 | 0,62  | 8,4  | 0,0124 |
| 190        | 0,61  | 0,72 | 0,665 | 8,9  | 0,0133 |
| 200        | 0,66  | 0,76 | 0,71  | 9,3  | 0,0142 |
| 210        | 0,71  | 0,81 | 0,76  | 9,8  | 0,0152 |
| 220        | 0,76  | 0,87 | 0,815 | 10,3 | 0,0163 |
| 230        | 0,83  | 0,93 | 0,88  | 10,7 | 0,0176 |
| 240        | 0,92  | 1,02 | 0,97  | 11,2 | 0,0194 |
| 250        | 0,96  | 1,06 | 1,01  | 11,7 | 0,0202 |
| 260        | 1,03  | 1,12 | 1,075 | 12,1 | 0,0215 |
| 270        | 1,11  | 1,19 | 1,15  | 12,6 | 0,023  |
| 280        | 1,19  | 1,25 | 1,22  | 13,1 | 0,0244 |
| 290        | 1,27  | 1,36 | 1,315 | 13,5 | 0,0263 |
| 300        | 1,36  | 1,43 | 1,395 | 14   | 0,0279 |
| $F_{\max}$ | 484 N |      |       |      |        |

Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 2.2v prikazani su u tablici 30.

Tablica 30. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 2.2v

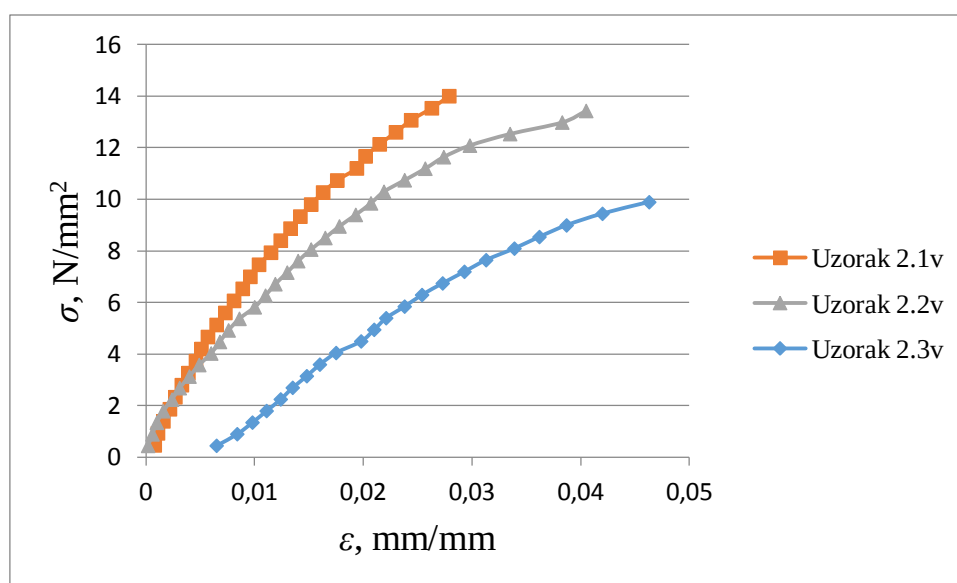
| $F$ | L    | D    | Avg <sub>2.2v</sub> | $\sigma_{2.2v}$ | $\varepsilon_{2.2v}$ |
|-----|------|------|---------------------|-----------------|----------------------|
| 0   | 0    | 0    | 0                   | 0               | 0                    |
| 10  | 0,02 | 0    | 0,01                | 0,4             | 0,0002               |
| 20  | 0,05 | 0,01 | 0,03                | 0,9             | 0,0006               |
| 30  | 0,09 | 0,01 | 0,05                | 1,3             | 0,001                |
| 40  | 0,12 | 0,04 | 0,08                | 1,8             | 0,0016               |
| 50  | 0,16 | 0,08 | 0,12                | 2,2             | 0,0024               |
| 60  | 0,20 | 0,11 | 0,155               | 2,7             | 0,0031               |
| 70  | 0,25 | 0,15 | 0,2                 | 3,1             | 0,004                |
| 80  | 0,29 | 0,20 | 0,245               | 3,6             | 0,0049               |
| 90  | 0,35 | 0,25 | 0,3                 | 4               | 0,006                |
| 100 | 0,39 | 0,29 | 0,34                | 4,5             | 0,0068               |
| 110 | 0,43 | 0,33 | 0,38                | 4,9             | 0,0076               |
| 120 | 0,48 | 0,38 | 0,43                | 5,4             | 0,0086               |
| 130 | 0,55 | 0,45 | 0,5                 | 5,8             | 0,01                 |
| 140 | 0,60 | 0,50 | 0,55                | 6,3             | 0,011                |
| 150 | 0,65 | 0,54 | 0,595               | 6,7             | 0,0119               |
| 160 | 0,70 | 0,60 | 0,65                | 7,2             | 0,013                |
| 170 | 0,75 | 0,65 | 0,7                 | 7,6             | 0,014                |
| 180 | 0,81 | 0,71 | 0,76                | 8               | 0,0152               |
| 190 | 0,88 | 0,77 | 0,825               | 8,5             | 0,0165               |
| 200 | 0,94 | 0,84 | 0,89                | 9               | 0,0178               |
| 210 | 1,02 | 0,91 | 0,965               | 9,4             | 0,0193               |
| 220 | 1,09 | 0,98 | 1,035               | 9,8             | 0,0207               |
| 230 | 1,15 | 1,04 | 1,095               | 10,3            | 0,0219               |
| 240 | 1,25 | 1,13 | 1,19                | 10,7            | 0,0238               |
| 250 | 1,34 | 1,23 | 1,285               | 11,2            | 0,0257               |
| 260 | 1,43 | 1,31 | 1,37                | 11,6            | 0,0274               |
| 270 | 1,53 | 1,45 | 1,49                | 12,1            | 0,0298               |
| 280 | 1,75 | 1,60 | 1,675               | 12,5            | 0,0335               |
| 290 | 1,98 | 1,85 | 1,915               | 13              | 0,0383               |

|            |       |      |       |      |        |
|------------|-------|------|-------|------|--------|
| 300        | 2,05  | 2,00 | 2,025 | 13,4 | 0,0405 |
| $F_{\max}$ | 470 N |      |       |      |        |

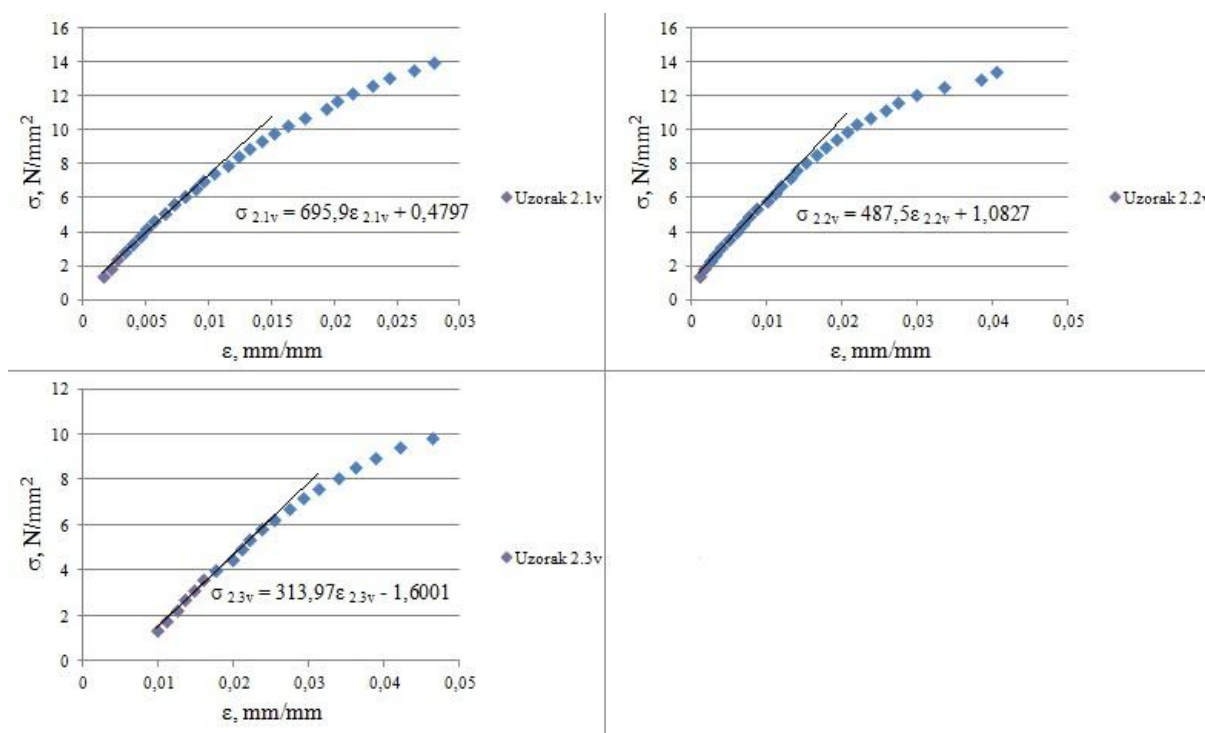
Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 2.3v prikazani su u tablici 31.

**Tablica 31. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 2.3v**

| $F$        | L     | D    | Avg <sub>2.3v</sub> | $\sigma_{2.3v}$ | $\varepsilon_{2.3v}$ |
|------------|-------|------|---------------------|-----------------|----------------------|
| 0          | 0     | 0    | 0                   | 0               | 0                    |
| 10         | 0,29  | 0,36 | 0,325               | 0,4             | 0,0065               |
| 20         | 0,38  | 0,46 | 0,42                | 0,9             | 0,0084               |
| 30         | 0,45  | 0,53 | 0,49                | 1,3             | 0,0098               |
| 40         | 0,51  | 0,60 | 0,555               | 1,8             | 0,0111               |
| 50         | 0,58  | 0,66 | 0,62                | 2,2             | 0,0124               |
| 60         | 0,63  | 0,72 | 0,675               | 2,7             | 0,0135               |
| 70         | 0,70  | 0,78 | 0,74                | 3,1             | 0,0148               |
| 80         | 0,76  | 0,84 | 0,8                 | 3,6             | 0,016                |
| 90         | 0,84  | 0,91 | 0,875               | 4               | 0,0175               |
| 100        | 0,95  | 1,03 | 0,99                | 4,5             | 0,0198               |
| 110        | 1,01  | 1,09 | 1,05                | 4,9             | 0,021                |
| 120        | 1,06  | 1,15 | 1,105               | 5,4             | 0,0221               |
| 130        | 1,15  | 1,23 | 1,19                | 5,8             | 0,0238               |
| 140        | 1,23  | 1,31 | 1,27                | 6,3             | 0,0254               |
| 150        | 1,33  | 1,40 | 1,365               | 6,7             | 0,0273               |
| 160        | 1,43  | 1,50 | 1,465               | 7,2             | 0,0293               |
| 170        | 1,53  | 1,60 | 1,565               | 7,6             | 0,0313               |
| 180        | 1,66  | 1,73 | 1,695               | 8,1             | 0,0339               |
| 190        | 1,77  | 1,85 | 1,81                | 8,5             | 0,0362               |
| 200        | 1,90  | 1,97 | 1,935               | 9               | 0,0387               |
| 210        | 2,06  | 2,14 | 2,1                 | 9,4             | 0,042                |
| 220        | 2,28  | 2,35 | 2,315               | 9,9             | 0,0463               |
| $F_{\max}$ | 335 N |      |                     |                 |                      |



Slika 27. Grafički prikaz rasteznog ispitivanja za vlakna pod kutem od 45°



Slika 28. Rastezni modul

Iz jednadžbi pravca sa slike 28 određeni su rastezni moduli:

$$E_{2.1v} = 695,9 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{2.2v} = 487,5 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{2.3v} = 313,97 \text{ N/mm}^2$$

Koristeći izraz 4 dobivena je srednja vrijednost rasteznog modula za epruvete sa smjerom vlakana od  $45^\circ$ ;  $E_{sr2v} = 499,12 \text{ N/mm}^2$ .

Pomoću izraza 6 izračunava se rastezna čvrstoća:

$$R_{m2.1v} = 22,6 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m2.2v} = 21 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m2.3v} = 15,1 \text{ N/mm}^2$$

Srednja vrijednost rastezne čvrstoće računa se prema izrazu 5 i iznosi:

$$R_{srm2v} = 19,6 \text{ N/mm}^2$$

### 5.3.2.3. Rastezna čvrstoća i modul za smjer vlakana od $0^\circ$

U tablici 32 prikazane su izmjerene dimenzije epruveta korištenih za rastezno ispitivanje te početna duljina epruvete ( $l_o$ ).

**Tablica 32. Dimenzije ispitnih tijela**

| Uzorak | $b$ , mm | $h$ , mm | $A$ , mm <sup>2</sup> | $l_o$ , mm |
|--------|----------|----------|-----------------------|------------|
| 3.1v   | 10,64    | 2,49     | 26,4936               | 50         |
| 3.2v   | 10,34    | 2,56     | 26,4704               |            |
| 3.3v   | 11,38    | 2,5      | 28,45                 |            |
| 3.4v   | 10,4     | 2,52     | 26,208                |            |
| 3.5v   | 10,64    | 2,5      | 26,6                  |            |

Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 3.1v prikazani su u tablici 33.

**Tablica 33. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 3.1v ( $0^\circ$ )**

| $F$ | $L$  | $D$  | Avg $_{3.1v}$ | $\sigma_{3.1v}$ | $\epsilon_{3.1v}$ |
|-----|------|------|---------------|-----------------|-------------------|
| 0   | 0    | 0    | 0             | 0               | 0                 |
| 100 | 0,01 | 0,01 | 0,01          | 3,8             | 0,0002            |
| 200 | 0,02 | 0,04 | 0,03          | 7,5             | 0,0006            |
| 300 | 0,05 | 0,07 | 0,06          | 11,3            | 0,0012            |



|            |       |      |       |      |        |
|------------|-------|------|-------|------|--------|
| 400        | 0,08  | 0,11 | 0,095 | 15,1 | 0,0019 |
| 500        | 0,12  | 0,15 | 0,135 | 18,9 | 0,0027 |
| 600        | 0,16  | 0,19 | 0,175 | 22,6 | 0,0035 |
| 700        | 0,20  | 0,23 | 0,215 | 26,4 | 0,0043 |
| 800        | 0,25  | 0,28 | 0,265 | 30,2 | 0,0053 |
| 900        | 0,32  | 0,36 | 0,34  | 34   | 0,0068 |
| $F_{\max}$ | 920 N |      |       |      |        |

Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 3.2v prikazani su u tablici 34.

**Tablica 34. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 3.2v**

| $F$        | L      | D    | Avg <sub>3.2v</sub> | $\sigma_{3.2v}$ | $\epsilon_{3.2v}$ |
|------------|--------|------|---------------------|-----------------|-------------------|
| 0          | 0      | 0    | 0                   | 0               | 0                 |
| 100        | 0      | 0    | 0                   | 3,8             | 0                 |
| 200        | 0,01   | 0,01 | 0,01                | 7,6             | 0,0002            |
| 300        | 0,02   | 0,01 | 0,015               | 11,3            | 0,0003            |
| 400        | 0,04   | 0,03 | 0,035               | 15,1            | 0,0007            |
| 500        | 0,07   | 0,05 | 0,06                | 18,9            | 0,0012            |
| 600        | 0,09   | 0,08 | 0,085               | 22,7            | 0,0017            |
| 700        | 0,12   | 0,10 | 0,11                | 26,4            | 0,0022            |
| 800        | 0,15   | 0,13 | 0,14                | 30,2            | 0,0028            |
| 900        | 0,18   | 0,15 | 0,165               | 34              | 0,0033            |
| 1000       | 0,21   | 0,18 | 0,195               | 37,8            | 0,0039            |
| 1100       | 0,24   | 0,21 | 0,225               | 41,6            | 0,0045            |
| 1200       | 0,26   | 0,23 | 0,245               | 45,3            | 0,0049            |
| 1300       | 0,29   | 0,25 | 0,27                | 49,1            | 0,0054            |
| 1400       | 0,32   | 0,28 | 0,3                 | 52,9            | 0,006             |
| 1500       | 0,35   | 0,31 | 0,33                | 56,7            | 0,0066            |
| $F_{\max}$ | 2080 N |      |                     |                 |                   |

Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 3.3v prikazani su u tablici 35.

**Tablica 35. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 3.3v**

| $F$        | L      | D    | Avg <sub>3.3v</sub> | $\sigma$ <sub>3.3v</sub> | $\varepsilon$ <sub>3.3v</sub> |
|------------|--------|------|---------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 0          | 0      | 0    | 0                   | 0                        | 0                             |
| 100        | 0,01   | 0    | 0,005               | 3,5                      | 0,0001                        |
| 200        | 0,04   | 0,01 | 0,025               | 7                        | 0,0005                        |
| 300        | 0,08   | 0,03 | 0,055               | 10,5                     | 0,0011                        |
| 400        | 12     | ,0,7 | 0,095               | 14,1                     | 0,0019                        |
| 500        | 0,16   | 0,10 | 0,13                | 17,6                     | 0,0026                        |
| 600        | 0,21   | 0,15 | 0,18                | 21,1                     | 0,0036                        |
| 700        | 0,25   | 0,19 | 0,22                | 24,6                     | 0,0044                        |
| 800        | 0,30   | 0,24 | 0,27                | 28,1                     | 0,0054                        |
| 900        | 0,36   | 0,29 | 0,325               | 31,6                     | 0,0065                        |
| 1000       | 0,43   | 0,36 | 0,395               | 35,1                     | 0,0079                        |
| $F_{\max}$ | 1080 N |      |                     |                          |                               |

Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 3.4v prikazani su u tablici 36.

**Tablica 36. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 3.4v**

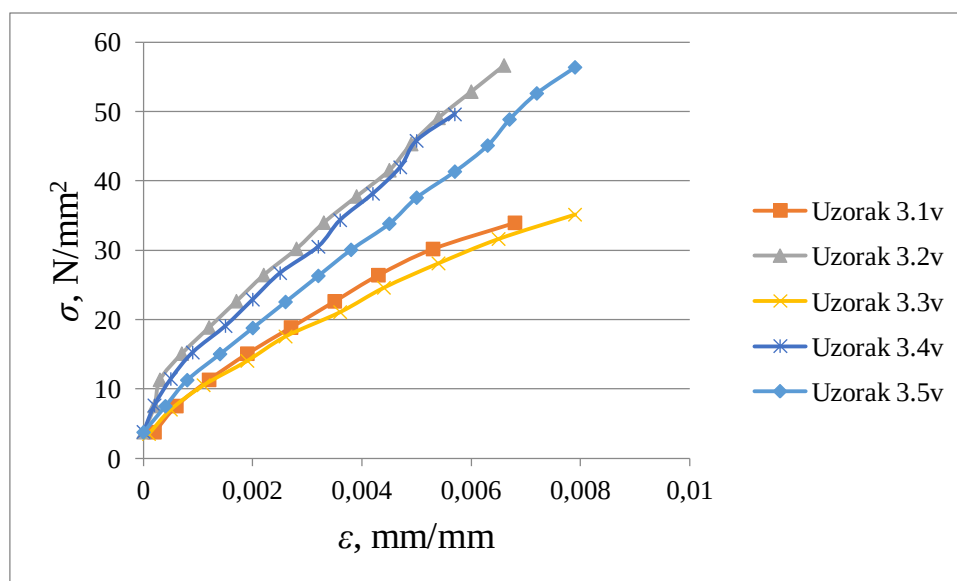
| $F$  | L    | D    | Avg <sub>3.4v</sub> | $\sigma$ <sub>3.4v</sub> | $\varepsilon$ <sub>3.4v</sub> |
|------|------|------|---------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 0    | 0    | 0    | 0                   | 0                        | 0                             |
| 100  | 0    | 0    | 0                   | 3,8                      | 0                             |
| 200  | 0,01 | 0,01 | 0,01                | 7,6                      | 0,0002                        |
| 300  | 0,02 | 0,03 | 0,025               | 11,4                     | 0,0005                        |
| 400  | 0,04 | 0,05 | 0,045               | 15,3                     | 0,0009                        |
| 500  | 0,07 | 0,08 | 0,075               | 19,1                     | 0,0015                        |
| 600  | 0,09 | 0,11 | 0,1                 | 22,9                     | 0,002                         |
| 700  | 0,12 | 0,13 | 0,125               | 26,7                     | 0,0025                        |
| 800  | 0,15 | 0,17 | 0,16                | 30,5                     | 0,0032                        |
| 900  | 0,17 | 0,19 | 0,18                | 34,3                     | 0,0036                        |
| 1000 | 0,20 | 0,22 | 0,21                | 38,2                     | 0,0042                        |
| 1100 | 0,22 | 0,25 | 0,235               | 42                       | 0,0047                        |
| 1200 | 0,24 | 0,26 | 0,25                | 45,8                     | 0,005                         |

|            |        |      |       |      |        |
|------------|--------|------|-------|------|--------|
| 1300       | 0,27   | 0,30 | 0,285 | 49,6 | 0,0057 |
| $F_{\max}$ | 1800 N |      |       |      |        |

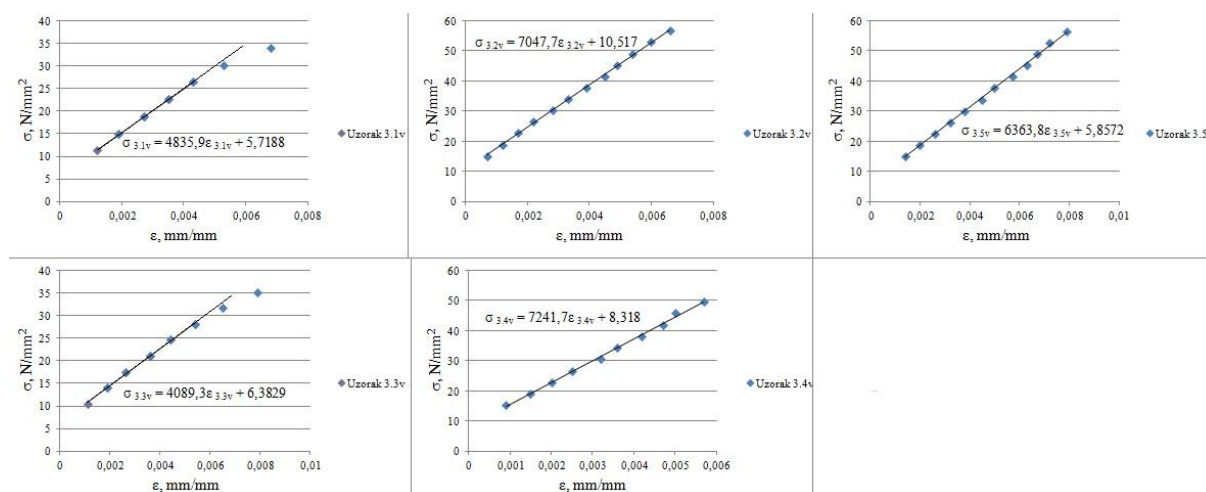
Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 3.5v prikazani su u tablici 37.

**Tablica 37. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka 3.5v**

| $F$        | L      | D    | Avg <sub>3.5v</sub> | $\sigma_{3.5v}$ | $\varepsilon_{3.5v}$ |
|------------|--------|------|---------------------|-----------------|----------------------|
| 0          | 0      | 0    | 0                   | 0               | 0                    |
| 100        | 0      | 0    | 0                   | 3,8             | 0                    |
| 200        | 0,03   | 0,01 | 0,02                | 7,5             | 0,0004               |
| 300        | 0,05   | 0,03 | 0,04                | 11,3            | 0,0008               |
| 400        | 0,08   | 0,06 | 0,07                | 15              | 0,0014               |
| 500        | 0,11   | 0,09 | 0,1                 | 18,8            | 0,002                |
| 600        | 0,14   | 0,12 | 0,13                | 22,6            | 0,0026               |
| 700        | 0,17   | 0,15 | 0,16                | 26,3            | 0,0032               |
| 800        | 0,20   | 0,18 | 0,19                | 30,1            | 0,0038               |
| 900        | 0,24   | 0,21 | 0,225               | 33,8            | 0,0045               |
| 1000       | 0,26   | 0,24 | 0,25                | 37,6            | 0,005                |
| 1100       | 0,30   | 0,27 | 0,285               | 41,4            | 0,0057               |
| 1200       | 0,33   | 0,30 | 0,315               | 45,1            | 0,0063               |
| 1300       | 0,35   | 0,32 | 0,335               | 48,9            | 0,0067               |
| 1400       | 0,37   | 0,35 | 0,36                | 52,6            | 0,0072               |
| 1500       | 0,41   | 0,38 | 0,395               | 56,4            | 0,0079               |
| $F_{\max}$ | 1920 N |      |                     |                 |                      |



Slika 29. Grafički prikaz rasteznog ispitivanja za vlakna pod kutem od 0°



Slika 30. Rastezni modul

Iz jednadžbi pravca sa slike 30 određeni su rastezni moduli:

$$E_{3.1v} = 4835,9 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{3.2v} = 7047,7 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{3.3v} = 4089,3 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{3.4v} = 7241,7 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{3.5v} = 6363,8 \text{ N/mm}^2$$

Koristeći izraz 4 dobivena je srednja vrijednost rasteznog modula za epruvete sa smjerom vlakana od 0°;  $E_{sr3v} = 5915,68 \text{ N/mm}^2$ .

Pomoću izraza 6 izračunava se rastezna čvrstoća:

$$R_{m3.1v} = 34,7 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m3.2v} = 78,6 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m3.3v} = 38 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m3.4v} = 68,7 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{m3.5v} = 72,2 \text{ N/mm}^2$$

Srednja vrijednost rastezne čvrstoće računa se prema izrazu 5 i iznosi:

$$R_{srm3v} = 58,4 \text{ N/mm}^2$$

#### 5.3.2.4. Jednoosno cikličko opterećenje neojačanog Surlyna

Rastezno ispitivanje je provedeno na kidalici, na isti način kao i klasično rastezno ispitivanje opisano u poglavlju 5.3.2., s razlikom da je ovdje provedeno rasterećenje, a potom ponovljen ciklus na istom ispitnom tijelu. Ovo ispitivanje provedeno je u cilju provjere primjenjivosti u literaturi dostupnih modela za samoobnovljive materijale i na ovaj kompozit.

Ispitno tijelo je rastezano do sile od 100 N, nakon čega je uslijedilo rasterećenje sve dok sila nije iščeznula. Nakon toga, postupak rasteznog opterećenja i rasterećenja ponovljen je još jednom. Brzina ispitivanja bila je 20 mm/min i ona ne odgovara brzini preporučenoj normom, već je optimirana s ciljem da bude što veća, a da je moguće manualno očitati rezultate mjerenja.

U tablici 38 prikazane su izmjerene dimenzije epruveta neojačanog Surlyna korištenih za jednoosno cikličko ispitivanje, te početna duljina uzorka.

**Tablica 38. Dimenzije ispitnih tijela**

| Uzorak | $b$ , mm | $h$ , mm | $l_0$ , mm |
|--------|----------|----------|------------|
| 1      | 10,64    | 1,98     | 105        |
| 2      | 10,48    | 1,94     | 105        |

Prvi ciklus ispitivanja uzorka 1 prikazan je u tablici 39 dok je drugi ciklus prikazan u tablici 40, te je pomoću njih konstruiran graf (slika 31).

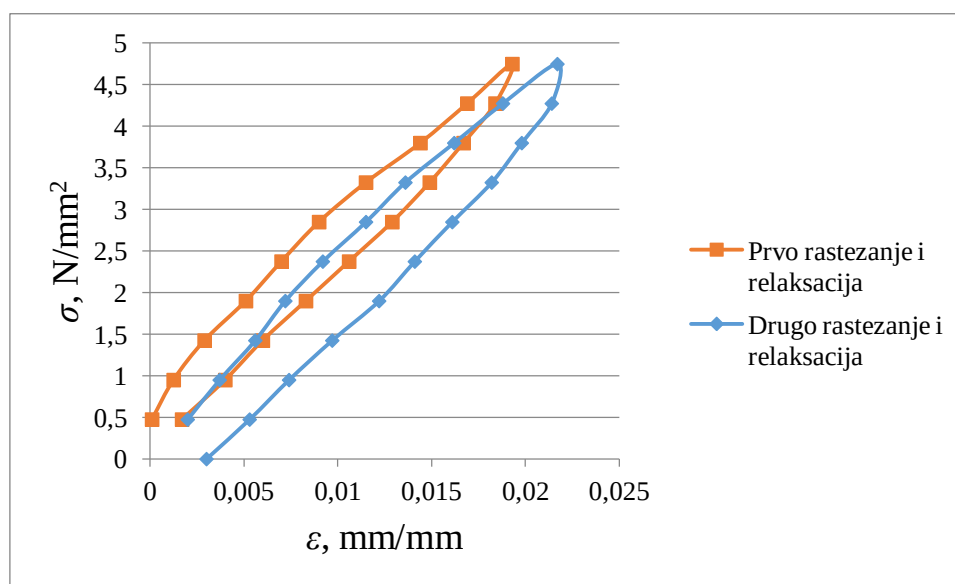
**Tablica 39. Rezultati prvog ciklusa ispitivanja uzorka 1**

| $F$ | L    | D     | $Avg_1$ | $\sigma_1$ | $\varepsilon_1$ |
|-----|------|-------|---------|------------|-----------------|
| 10  | 0    | 0,01  | 0,005   | 0,5        | 0,0001          |
| 20  | 0,07 | 0,055 | 0,0625  | 0,9        | 0,0013          |
| 30  | 0,16 | 0,13  | 0,145   | 1,4        | 0,0029          |
| 40  | 0,26 | 0,25  | 0,255   | 1,9        | 0,0051          |
| 50  | 0,36 | 0,34  | 0,35    | 2,4        | 0,007           |
| 60  | 0,46 | 0,44  | 0,45    | 2,8        | 0,009           |
| 70  | 0,58 | 0,57  | 0,575   | 3,3        | 0,0115          |
| 80  | 0,73 | 0,71  | 0,72    | 3,8        | 0,0144          |
| 90  | 0,85 | 0,84  | 0,845   | 4,3        | 0,0169          |
| 100 | 0,95 | 0,98  | 0,965   | 4,7        | 0,0193          |
| 90  | 0,93 | 0,91  | 0,92    | 4,3        | 0,0184          |
| 80  | 0,85 | 0,82  | 0,835   | 3,8        | 0,0167          |
| 70  | 0,76 | 0,73  | 0,745   | 3,3        | 0,0149          |
| 60  | 0,66 | 0,63  | 0,645   | 2,8        | 0,0129          |
| 50  | 0,55 | 0,51  | 0,53    | 2,4        | 0,0106          |
| 40  | 0,43 | 0,4   | 0,415   | 1,9        | 0,0083          |
| 30  | 0,32 | 0,28  | 0,3     | 1,4        | 0,006           |
| 20  | 0,22 | 0,18  | 0,2     | 0,9        | 0,004           |
| 10  | 0,13 | 0,04  | 0,085   | 0,5        | 0,0017          |

**Tablica 40. Rezultati drugog ciklusa ispitivanja uzorka 1**

| $F$ | L    | D    | $Avg_1$ | $\sigma_1$ | $\varepsilon_1$ |
|-----|------|------|---------|------------|-----------------|
| 10  | 0,11 | 0,09 | 0,1     | 0,5        | 0,002           |
| 20  | 0,2  | 0,17 | 0,185   | 0,9        | 0,0037          |
| 30  | 0,29 | 0,27 | 0,28    | 1,4        | 0,0056          |
| 40  | 0,37 | 0,35 | 0,36    | 1,9        | 0,0072          |
| 50  | 0,47 | 0,45 | 0,46    | 2,4        | 0,0092          |
| 60  | 0,58 | 0,57 | 0,575   | 2,8        | 0,0115          |

|     |      |      |       |     |        |
|-----|------|------|-------|-----|--------|
| 70  | 0,69 | 0,67 | 0,68  | 3,3 | 0,0136 |
| 80  | 0,82 | 0,8  | 0,81  | 3,8 | 0,0162 |
| 90  | 0,95 | 0,93 | 0,94  | 4,3 | 0,0188 |
| 100 | 1,09 | 1,08 | 1,085 | 4,7 | 0,0217 |
| 90  | 1,08 | 1,06 | 1,07  | 4,3 | 0,0214 |
| 80  | 1    | 0,98 | 0,99  | 3,8 | 0,0198 |
| 70  | 0,93 | 0,89 | 0,91  | 3,3 | 0,0182 |
| 60  | 0,82 | 0,79 | 0,805 | 2,8 | 0,0161 |
| 50  | 0,72 | 0,69 | 0,705 | 2,4 | 0,0141 |
| 40  | 0,63 | 0,59 | 0,61  | 1,9 | 0,0122 |
| 30  | 0,5  | 0,47 | 0,485 | 1,4 | 0,0097 |
| 20  | 0,39 | 0,35 | 0,37  | 0,9 | 0,0074 |
| 10  | 0,28 | 0,25 | 0,265 | 0,5 | 0,0053 |
| 0   | 0,2  | 0,1  | 0,15  | 0   | 0,003  |



Slika 31. Grafički prikaz jednoosnog cikličkog opterećenja uzorka 1

Prvi ciklus ispitivanja uzorka 2 prikazan je u tablici 41 dok je drugi ciklus prikazan u tablici 42, te je pomoću njih konstruiran graf (slika 32).

Tablica 41. Rezultati prvog ciklusa ispitivanja epruvete 1

| $F$ | $L$  | $D$  | $\text{Avg}_2$ | $\sigma_2$ | $\epsilon_2$ |
|-----|------|------|----------------|------------|--------------|
| 20  | 0,09 | 0,11 | 0,1            | 1          | 0,00095      |

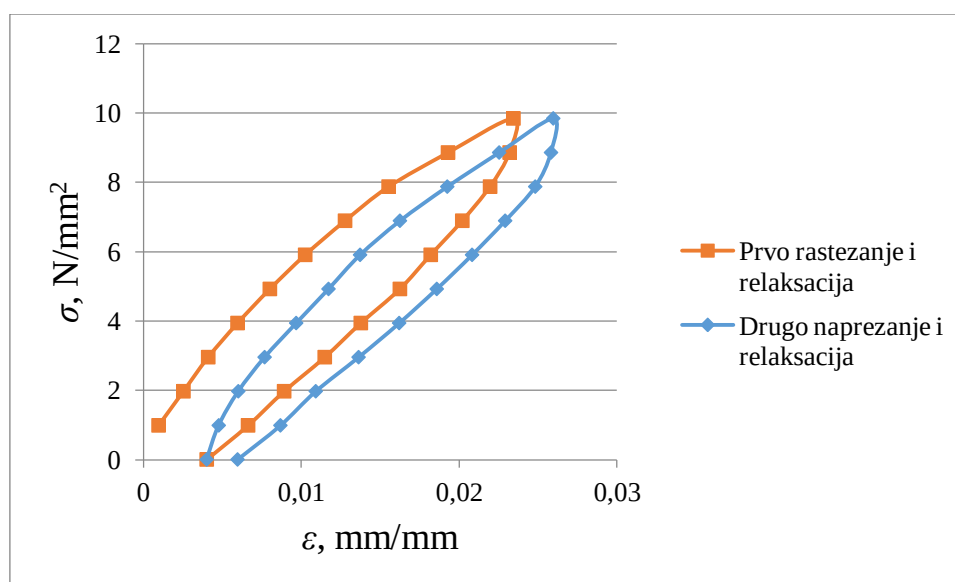
|     |      |      |       |     |         |
|-----|------|------|-------|-----|---------|
| 40  | 0,25 | 0,28 | 0,265 | 2   | 0,0025  |
| 60  | 0,41 | 0,45 | 0,43  | 3   | 0,0041  |
| 80  | 0,6  | 0,65 | 0,625 | 3,9 | 0,00595 |
| 100 | 0,82 | 0,86 | 0,84  | 4,9 | 0,008   |
| 120 | 1,05 | 1,1  | 1,075 | 5,9 | 0,0102  |
| 140 | 1,31 | 1,37 | 1,34  | 6,9 | 0,0128  |
| 160 | 1,52 | 1,74 | 1,63  | 7,9 | 0,0155  |
| 180 | 2    | 2,05 | 2,025 | 8,9 | 0,0193  |
| 200 | 2,45 | 2,47 | 2,46  | 9,8 | 0,0234  |
| 180 | 2,42 | 2,45 | 2,435 | 8,9 | 0,0232  |
| 160 | 2,3  | 2,31 | 2,305 | 7,9 | 0,022   |
| 140 | 2,11 | 2,13 | 2,12  | 6,9 | 0,0202  |
| 120 | 1,9  | 1,92 | 1,91  | 5,9 | 0,0182  |
| 100 | 1,7  | 1,71 | 1,705 | 4,9 | 0,0162  |
| 80  | 1,44 | 1,45 | 1,445 | 3,9 | 0,0138  |
| 60  | 1,2  | 1,21 | 1,205 | 3   | 0,0115  |
| 40  | 0,93 | 0,94 | 0,935 | 2   | 0,0089  |
| 20  | 0,69 | 0,7  | 0,695 | 1   | 0,0066  |
| 0   | 0,43 | 0,41 | 0,42  | 0   | 0,004   |

Tablica 42. Rezultati drugog ciklusa ispitivanja uzorka 2

| F   | L    | D    | Avg   | F/A | eps    |
|-----|------|------|-------|-----|--------|
| 0   | 0,43 | 0,41 | 0,42  | 0   | 0,004  |
| 20  | 0,49 | 0,51 | 0,5   | 1   | 0,0048 |
| 40  | 0,62 | 0,64 | 0,63  | 2   | 0,006  |
| 60  | 0,79 | 0,82 | 0,805 | 3   | 0,0077 |
| 80  | 0,99 | 1,04 | 1,015 | 3,9 | 0,0097 |
| 100 | 1,21 | 1,25 | 1,23  | 4,9 | 0,0117 |
| 120 | 1,42 | 1,46 | 1,44  | 5,9 | 0,0137 |
| 140 | 1,69 | 1,72 | 1,705 | 6,9 | 0,0162 |
| 160 | 1,99 | 2,05 | 2,02  | 7,9 | 0,0192 |
| 180 | 2,35 | 2,38 | 2,365 | 8,9 | 0,0225 |



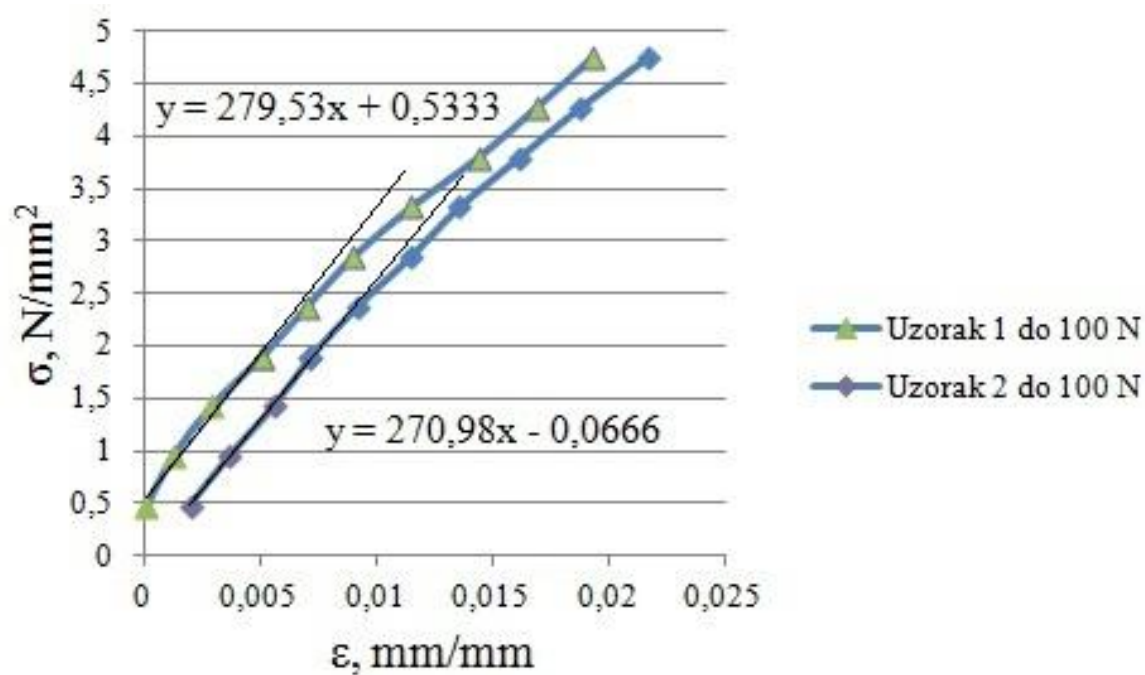
|     |      |      |       |     |          |
|-----|------|------|-------|-----|----------|
| 200 | 2,7  | 2,75 | 2,725 | 9,8 | 0,026    |
| 180 | 2,7  | 2,72 | 2,71  | 8,9 | 0,0258   |
| 160 | 2,6  | 2,61 | 2,605 | 7,9 | 0,0248   |
| 140 | 2,4  | 2,41 | 2,405 | 6,9 | 0,0229   |
| 120 | 2,18 | 2,19 | 2,185 | 5,9 | 0,0208   |
| 100 | 1,95 | 1,95 | 1,95  | 4,9 | 0,018571 |
| 80  | 1,7  | 1,7  | 1,7   | 3,9 | 0,01619  |
| 60  | 1,42 | 1,44 | 1,43  | 3   | 0,013619 |
| 40  | 1,14 | 1,15 | 1,145 | 2   | 0,010905 |
| 20  | 0,91 | 0,91 | 0,91  | 1   | 0,008667 |
| 0   | 0,64 | 0,61 | 0,625 | 0   | 0,005952 |



**Slika 32. Grafički prikaz jednoosnog cikličkog opterećenja uzorka 2**

Kao rezultat dobivena je histereza (slike 31 i 32) koja pokazuje da Surlyn 8940 ima svojstvo povrata krutosti u točki rasterećenje-opterećenje (spoj krivulja Relaksacija 1 i Rastezanje 2). Taj povrat krutosti je, prema (Darabi et al., 2012), to veći, što je kulje vrijeme mirovanja (vrijeme rijekom kojeg dolazi do samoobnavljanja), što je karakteristika samoobnavljajućih materijala, stoga je ovom histerezom potvrđeno da bi se konstitutivni model predložen u (Darabi et al., 2012), vrlo vjerojatno mogao iskoristiti za opisivanje ponašanja materijala Surlyn 8940.

Iz grafova na slici 31 i slici 32 može se odrediti rastezni modul za neojačani Surlyn.



Slika 33. Rastezni modul za neojačan Surlyn

Iz jednadžbi pravca sa slike 33 određeni su rastezni moduli:

$$E_{\text{uzorak 1}} = 279,53 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{\text{uzorak 2}} = 270,98 \text{ N/mm}^2$$

Koristeći izraz 4 dobivena je srednja vrijednost rasteznog modula za neojačan Surlyn;  $E_{sr \text{ uzoraka}} = 275,26 \text{ N/mm}^2$ .

## 5.4. Analiza rezultata

**Tablica 43. Pregled rezultata savojnog ispitivanja**

| Epruveta              | 90°                              |                                     | 45°                              |                                     | 0°                               |                                     |
|-----------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
|                       | Savojni modul, N/mm <sup>2</sup> | Savojna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup> | Savojni modul, N/mm <sup>2</sup> | Savojna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup> | Savojni modul, N/mm <sup>2</sup> | Savojna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup> |
| 1                     | 407,61                           | 17,5                                | 751,32                           | 34,2                                | 2375,8                           | 38,1                                |
| 2                     | 479,63                           | 13,5                                | 382,62                           | 28,5                                | 2274,5                           | 40,2                                |
| 3                     | 459,47                           | 13,1                                | 1046                             | 39,4                                | 2031,8                           | 33,5                                |
| 4                     | 362,35                           | 15,5                                | 870,99                           | 33                                  | 2560,8                           | 47,7                                |
| Srednja vrijednost    | 427,27                           | 14,9                                | 762,73                           | 33,8                                | 2310,73                          | 39,9                                |
| Standardna devijacija | 52,85052                         | 2,026491                            | 280,8178                         | 4,48135                             | 220,5173                         | 5,919671                            |

**Tablica 44. Pregled rezultata rasteznog ispitivanja**

| Epruveta              | 90°                               |                                      | 45°                               |                                      | 0°                                |                                      |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
|                       | Rastezni modul, N/mm <sup>2</sup> | Rastezna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup> | Rastezni modul, N/mm <sup>2</sup> | Rastezna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup> | Rastezni modul, N/mm <sup>2</sup> | Rastezna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup> |
| 1                     | 358,95                            | 9,5                                  | 695,9                             | 22,6                                 | 4835,9                            | 34,7                                 |
| 2                     | 336,8                             | 10,8                                 | 487,5                             | 21                                   | 7047,7                            | 78,6                                 |
| 3                     | 354,45                            | 9,6                                  | 313,97                            | 15,1                                 | 4089,3                            | 38                                   |
| 4                     | 390,97                            | 8,3                                  |                                   |                                      | 7241,7                            | 68,7                                 |
| 5                     |                                   |                                      |                                   |                                      | 6363,8                            | 72,2                                 |
| Srednja vrijednost    | 360,29                            | 9,6                                  | 499,12                            | 19,6                                 | 5915,68                           | 58,4                                 |
| Standardna devijacija | 22,57538                          | 1,021437                             | 191,2301                          | 3,950105                             | 1391,24                           | 20,50861                             |

Kao što je vidljivo iz tablica 43 i 44, smjer vlakana uvelike utječe na svojstvo kompozita. Neovisno o smjeru opterećenja (savojno ili rastezno), kompozit je značajno boljih svojstava kada su ispitna tijela rezana u smjeru vlakana. Učinak orijentacije vlakana najuočljiviji je u slučaju rasteznog opterećenja, gdje je modul uzorka opterećenog u smjeru vlakana gotovo 16,5 puta veći od modula pri opterećenju okomito na smjer vlakana, a razlika rastezne čvrstoće je preko 6 puta. Pri tome valja naglasiti da je kompozit ojačan sa samo dva sloja vlakana.

Pri savojnom opterećenju također je velika razlika, premda nešto manjeg obima. Savojni modul ispitanih tijela rezanih u smjeru vlakana veći je 5,4 puta od onog okomito na smjer vlakana, dok je čvrstoća veća oko 2,7 puta. Pri savojnom opterećenju kompozit je u gornjoj plohi opterećen tlačno, a u donjoj rastezno, dok je u blizini simetrale neutralna linija. Kompozitne ploče relativno su tanke, oko 2,5 mm, a vlakna su postavljena bliže sredini, te su pri savojnom opterećenju blizu neutralne linije. Stoga je za očekivati da bi za bolje izrađen kompozit, s ujednačenijom distribucijom slojeva vlakana po presjeku, ojačanje više došlo do izražaja.

Rezultati za oba tipa opterećenja za neke uzorke pokazali su rasipanje podataka, što je posljedica neujednačenosti materijala i grešaka.

Premda su očite manjkavosti u izradi kompozita, prilikom ispitivanja nije dolazilo do delaminacije, niti do izvlačenja vlakana, što ukazuje na dobru povezanost matrice i ojačala.

U odnosu na neojačan materijal, čak i u najnepovoljnijem slučaju ( $90^\circ$ ) mehanička svojstva kompozita su približno dvostruko bolja od svojstava same matrice.

## 6. Zaključak

U radu su izrađene kompozitne ploče od Surlyna 8940 s dva sloja ugljičnih vlakana postavljenih pod kutevima od  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$  na smjer rezanja. Uzorci su zatim izrezani iz tih ploča te se ispitala savojna i rastezna čvrstoća i modul. Ugljična vlakna značajno su popravila mehanička svojstva plastomerne matrice u svim smjerovima, pri čemu je najbolji učinak vidljiv pri rasteznom opterećenju u smjeru vlakana.

Ciklička ispitivanja pokazala su da se predloženi konstitutivni model vjerojatno može iskoristiti za opisivanje materijala matrice.

## 7. Literatura

- [1] K. K. Chawla, Composite materials: Science and Engineering, Third Edition, New York: Springer, 2012.
- [2] A. Rogić, I. Čatić i D. Godec, *Polimeri i polimerne tvorevine*, Zagreb: Društvo za plastiku i gumu, 2008.
- [3] [https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/thermoplastic-composite-market-111944669.html?gclid=EAIaIQobChMIy7ra9v-F5gIVio4YCh1btwAeEAAYASAAEgI\\_ofD\\_BwE](https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/thermoplastic-composite-market-111944669.html?gclid=EAIaIQobChMIy7ra9v-F5gIVio4YCh1btwAeEAAYASAAEgI_ofD_BwE). [Pristupljeno 25 11 2019].
- [4] T. Filetin, F. Kovačiček i J. Indorf, Svojstva i primjena materijala: čelici i željezni ljevovi, laki i obojeni metali, konstrukcijska keramika, polimerni materijali, kompozitni materijali i drvo, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013.
- [5] E. Garafulić, *Detekcija i procjena oštećenja kompozitnih struktura primjenom aktivne metode infracrvene termografije*, Doktorska disertacija, Split: Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, 2016.
- [6] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7983>. [Pristupljeno 27 09 2019].
- [7] M. Favaloro, *A Comparison of the Environmental Attributes of Thermoplastic vs. Thermoset Composites*, Amesbury: Ticona, 2012.
- [8] <https://www.thoughtco.com/thermoplastic-vs-thermoset-resins-820405>. [Pristupljeno 4 10 2019].
- [9] <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/closed-molding/compression-molding/>. [Pristupljeno 17 04 2019].
- [10] <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/closed-molding/reinforced-reaction-injection-molding-rrim/>. [Pristupljeno 8 10 2019].
- [11] <http://zoltek.com/carbon-fiber/how-is-carbon-fiber-made/>. [Pristupljeno 14 4 2019].

- [12] G.-Y. H. Soo-Jin Park, *Chapter 2: Precursors and Manufacturing of Carbon*, Springer, 2015.
- [13] E. B. Murphy i F. Wudl, *The world of smart healable materials*, Santa Barbara: Elsevier Ltd, 2009.
- [14] P. J. Reynolds, *A Surlyn® Ionomer as a Self-Healing*, Birmingham: University of Birmingham, 2011.
- [15] D. Y. Wu, S. Meure i D. Solomon, *Self-healing polymeric materials: A review of recent developments*, Elsevier Ltd, 2008.
- [16] <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=982683b85300430286ef993d1a0ca29e&ckck=1>. [Pristupljeno 28 10 2019].
- [17] M. Franz, F. Kovačiček, M. Novosel i J. Indof, *Inženjerski priručnik ip4, 1.svezak*, Zagreb: Školska knjiga, 1998.