

# Rastezna svojstva polimernih kompozita ojačanih lanenim vlaknima

---

**Dundović, Petar**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:958588>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-21**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Petar Dundović**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Petar Dundović

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem profesorici i mentorici, dr. sc. Tatjani Haramina, na pomoći, utrošenom vremenu i smjernicama danim tokom izrade ovoga završnog rada.

Zahvaljujem dr. sc. Danielu Pugaru na pomoći i savjetima tokom pisanja i tehničkom suradniku Božidaru Bušetinčanu na pomoći u svladavanju programa TrapeziumX i oko eksperimentalnog dijela.

Zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima koji su mi bili potpora tijekom studiranja.

Posebna hvala mom djedu Josipu Dundoviću kome posvećujem ovaj završni rad jer nije imao priliku vidjeti ga, a vjerujem da bi mu mnogo značio.

Petar Dundović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu               |        |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                               | Prilog |
| Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1        |        |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -           |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Petar Dundović** JMBAG: **0035214182**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Rastezna svojstva polimernih kompozita ojačanih lanenim vlaknima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Tensile properties of polymer composites reinforced with flax fibers**

Opis zadatka:

Prirodna vlakna posjeduju izvrsna vlačna svojstva, usporediva sa svojstvima staklenih vlakana. Međutim, postoje varijacije u njihovim svojstvima u ovisnosti o mnoštvu parametara poput uzgoja, postupka dobivanja vlakana iz biljke, tipa prediva.

Potrebno je istražiti razlike u smolama i lanenim vlaknima koje se koriste za izradu ovakvih kompozita. Analizirati normu za ispitivanje rasteznih svojstava kompozita ojačanih vlaknima.

Izmjeriti i usporediti rastezna svojstva kompozita:

1. poliestar/lanena vlakna
2. epoksid/lanena vlakna
3. poliestar/lanena/staklena vlakna (hibrid)
4. poliestar/staklena vlakna.

Provjeriti zadovoljavaju li takvi kompoziti zahtjeve propisane pravilnikom Hrvatskog registra brodova.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Tatjana Haramina

*T. Haramina*

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.  
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.  
3. rok: 22. 9. 2022.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.  
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.  
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

*Branko Bauer*

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

|   |     |
|---|-----|
| SADRŽAJ .....   | I   |
| POPIS SLIKA .....   | III |
| POPIS TABLICA .....   | IV  |
| POPIS OZNAKA .....  | V   |
| SAŽETAK .....   | VI  |
| SUMMARY .....   | VII |
| 1. UVOD .....   | 1   |
| 2. OPĆENITO O KOMPOZITIMA .....   | 2   |
| 2.1 Uloga matrice u kompozitu .....   | 3   |
| 2.1.1 Svojstva kompozita s polimernom matricom .....  | 4   |
| 2.2 Podjela prema vrsti ojačala .....   | 8   |
| 2.2.1 Kompoziti s vlaknima kao ojačalom.....  | 8   |
| 2.2.2 Vrste vlakana .....   | 11  |
| 2.2.3 Vlakna biljnog podrijetla.....  | 11  |
| 2.2.4 Staklena vlakna .....   | 12  |
| 2.3 Mehanička svojstva.....   | 14  |
| 2.3.1 Rastezna svojstva .....   | 14  |
| 3. EKSPERIMENTALNI DIO .....  | 16  |
| 3.1 Izrada uzoraka i sastav .....   | 16  |
| 3.2 Ispitivanje rastezne čvrstoće.....  | 17  |
| 4. Rezultati ispitivanja rasteznih svojstava .....  | 24  |
| 4.1 Kompozit poliesterske matrice s 4 sloja lanenih vlakana .....   | 24  |
| 4.2 Kompozit poliesterske matrice s 4 sloja staklenih vlakana .....   | 26  |
| 4.3 Kompozit epoksidne matrice sa 6 slojeva lanenih vlakana .....   | 28  |
| 4.4 Kompozit poliesterske matrice s 4 sloja lanenih vlakana, 2 sloja staklenih vlakana i 4 sloja lanenih vlakana..... | 30  |

---

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 4.5 | Kompozit poliesterska matrica sa slojem staklenih vlakana, lanenih vlakana i staklenih vlakana ..... | 32 |
| 4.6 | Usporedba rasteznih svojstava kompozita sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova<br>34               |    |
| 4.7 | Grafička usporedba rezultata.....  | 35 |
| 5.  | ZAKLJUČAK.....   | 37 |
|     | LITERATURA.....  | 38 |

**POPIS SLIKA**

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 1.  | Shema kompozita s različitim oblicama ojačala. ....  | 3  |
| Slika 2.  | Vrste tkanja[1].....   | 9  |
| Slika 3.  | Vrste tkanja[1].....   | 9  |
| Slika 4.  | Različiti rasporedi vlakana[1] .....   | 10 |
| Slika 5.  | Niti lanenih vlakana[13] .....   | 12 |
| Slika 6.  | Kidalice Shimadzu AGS – X .....  | 17 |
| Slika 7.  | Početno sučelje programa TrapeziumX.....   | 18 |
| Slika 8.  | Opće dimenzije ispitnih tijela .....   | 19 |
| Slika 9.  | Dimenzije ispitnih tijela prikazane u programu TrapeziumX .....  | 20 |
| Slika 10. | Dijagram naprezanje-istezanje za UP/4lan.....  | 25 |
| Slika 11. | Dijagram naprezanje-istezanje za UP/4staklo .....  | 27 |
| Slika 12. | Graf naprezanje-istezanje za EP/6lan.....  | 29 |
| Slika 13. | Graf naprezanje-istezanje UP/4lan/2staklo/4lan.....  | 31 |
| Slika 14. | Graf naprezanje-istezanje UP/staklo/lan/staklo .....   | 33 |
| Slika 15. | Vrijednosti rastezne čvrstoće ispitivanih kompozita uspoređenih s minimalnim zahtjevom HRB-a za staklena vlakna..... | 35 |
| Slika 16. | Vrijednosti rasteznog modula elastičnosti kompozita uspoređenih s minimalnim zahtjevom HRB-a.....                    | 36 |



**POPIS TABLICA**

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Svojstva vlakana korištenih kao ojačanje u kompozitima[6] .....  | 13 |
| Tablica 2. Maseni udio vlakana i vrsta vlakana .....  | 16 |
| Tablica 3. Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rastezne čvrstoće (lan – 4 sloja, poliesterska smola).....          | 21 |
| Tablica 4. Dimenzije ispitnog tijela za ispitivanje rastezne čvrstoće (staklo 4 sloja, poliesterska smola).....         | 21 |
| Tablica 5. Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rastezne čvrstoće (lan – 6 slojeva, epoksidna smola).....           | 22 |
| Tablica 6. Dimenzije ispitnog tijela za ispitivanje rastezne čvrstoće (lan/staklo 4+2+4 sloja, poliesterska smola)..... | 22 |
| Tablica 7. Dimenzije ispitnog tijela za ispitivanje rastezne čvrstoće (svijetli) .....                                  | 23 |
| Tablica 8. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće (lan – 4 sloja, poliesterska smola).....                             | 24 |
| Tablica 9. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće (staklo – 4 sloja, poliesterska smola) .....                         | 26 |
| Tablica 10. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće (lan – 6 slojeva, epoksidna smola) .....                            | 28 |
| Tablica 11. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće (kompozit 4lan/2staklo/4lan, poliesterska smola) .....              | 30 |
| Tablica 12. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće (kompozit staklo/lan/staklo, poliesterska smola) .....              | 32 |
| Tablica 13. Rezultati ispitivanja .....   | 34 |

---

**POPIS OZNAKA**

| <b>Oznaka</b> | <b>Jedinica</b> | <b>Opis</b>                 |
|---------------|-----------------|-----------------------------|
| $L$           | mm              | duljina                     |
| $D$           | mm              | promjer                     |
| $L_C$         | mm              | minimalna kritična duljina  |
| $R_e$         | MPa             | granica razvlačenja         |
| $F_e$         | N               | sila tečenja                |
| $R_m$         | MPa             | rastezna čvrstoća           |
| $F_m$         | N               | maksimalna sila             |
| $S_0$         | mm <sup>2</sup> | ploština poprečnog presjeka |
| $E_R$         | MPa             | rastezni modul elastičnosti |
| $\sigma$      | MPa             | rastezno naprezanje         |
| $\varepsilon$ | mm/mm           | istezanje                   |

## SAŽETAK

Lanena i staklena vlakna imaju usporediva mehanička svojstva, no povezivanje polarnih bioloških vlakana s apolarnom polimernom matricom predstavlja problem kod prenošenja opterećenja s matrice na ojačalo. U ovom radu istražen je utjecaj vrste smole i ojačala na rastezna svojstva kompozita. Epoksidna (EP) i poliesterska smola (UP) ojačane su lanenim i staklenim vlaknima. Načinjeni su kompoziti UP/lan, UP/staklo, EP/lan te dva kompozita EP/lan/staklo slagana na način da su staklena vlakna u jednom od njih u sredini, dok su kod drugog u blizini vanjskih ploha. Rezultati ispitivanja uspoređeni su s pravilima Hrvatskog registra brodova (HRB) za kompozite ojačane staklenim vlaknima. Rastezna svojstva istraženih kompozita bolja su od minimalnih propisanih vrijednosti s izuzetkom posljednjeg hibrida kod kojeg je došlo do grešaka pri izradi. Kompozit ojačan staklenim vlaknima superioran je kompozitima s lanenim vlaknima, što pokazuje važnost dobre povezanosti matrice i ojačala. Međutim rastezna svojstva kompozita s lanenim vlaknima također su u skladu s pravilima HRB-a.

**Ključne riječi:** polimerni kompoziti, lanena vlakna, staklena vlakna, rastezna čvrstoća, rastezni modul

## **SUMMARY**

Flax and glass fibers have comparable mechanical properties, but the adhesion of polar biological fibers with an apolar polymer matrix presents a problem in transferring the load from the matrix to the reinforcement. In this work, the influence of the type of resin and reinforcement on tensile properties of composites was investigated. Epoxy (EP) and polyester resin (UP) are reinforced with flax and glass fibers. Composites UP/flax, UP/glass, EP/flax and two composites EP/flax/glass were prepared in such a way that the glass fibers in one of them are in the middle plane, while in the other they are near the outer surfaces. The test results were compared with the rules of the Croatian Register of Shipping (CRS) for composites reinforced with glass fibers. The tensile properties of the investigated composites are better than the minimum prescribed values, with the exception of the last hybrid composite, where manufacturing errors occurred. Composites reinforced with glass fibers are superior to those with flax fibers, which shows the importance of a good bonding between the matrix and the reinforcement. However, the tensile properties of composites with flax fibers are also in accordance with the CRS rules.

**Keywords:** polymer based composites, flax fibers, glass fibers, hybrid composites, tensile strength, tensile modulus

## 1. UVOD

Gomilanje otpada koje vodi onečišćenju okoliša globalan je problem. Kako bi se količina otpada smanjila, sve češće se primjenjuju materijali iz obnovljivih izvora. Na češću primjenu takvih materijala utjecale su strože ekološke mjere i porast svijesti među građanstvom. Materijali iz obnovljivih izvora najviše se koriste u građevinarstvu, automobilskoj industriji i nautici.

U maloj brodogradnji za izradu trupa plovila i ostalih dijelova gdje ne postoje visoki zahtjevi na mehanička, toplinska i ostala svojstva još uvijek se najčešće koriste kompoziti s duromernom matricom i staklenim vlaknima. Kako bi se povećala održiva proizvodnja, staklena vlakana zamjenjuju se vlaknima iz obnovljivih izvora poput biljnih vlakana ili se primjenjuju njihovi hibridi. Novije vrste duromera za izradu matrica sve se češće dobivaju iz biljnih izvora, pri čemu se ugljik dobiva izravno iz biljaka. Ovakve matrice imaju manji utjecaj na okoliš od sintetskih. Osim toga, kompoziti ojačani biljnim vlaknima mogu imati i nižu cijenu proizvodnje. Biljna vlakna imaju manju gustoću, a time i manju masu što za posljedicu daje i manju potrošnju goriva. Kompoziti su karakterizirani i kao teško razgradivi i materijalno reciklični materijali, a staklena se vlakna ne mogu ni energijski reciklirati. Stoga je prednost biljnih vlakana što se ona mogu razgraditi i energijski reciklirati čime se smanjuje količina otpada. Istovremeno se za proizvodnju vlakana potiče razvoj poljoprivrede.

Kompoziti u ovom načinjeni su u tvrtki Marservis d.o.o. iz Kaštelira od epoksidne (EP) i poliesterske (UP) smole ojačane lanenim i staklenim vlaknima. Ovi materijali planirani su za izradu eko katamarana u okviru projekta ProEco te je potrebno istražiti na koji način različite kombinacije vlakana i smola utječu na rastezna svojstva cijelog kompozita te mogu li lanena vlakna zamijeniti staklena vlakna.

Rezultati su uspoređeni sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova (HRB) za staklena vlakna jer je rad dio istraživanja projekta razvoja ekološkog katamarana ProEco.

Potpunom zamjenom staklenih vlakana s lanenim ostvarilo bi se smanjeno gomilanje otpada koji nastaje po isteku primjene broda.

## 2. OPĆENITO O KOMPOZITIMA

Kompoziti ili kompozitni materijali su heterogeni materijali dobiveni kombinacijom dvaju ili više materijala s jasnom granicom između njih. Cilj kompozitnih materijala je dobivanje specifičnih karakteristika i svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe [1]. Matrica je kontinuirana komponenta u koju se ugrađuje punilo ili ojačalo kao dispergirana komponenta,

Kompoziti se mogu dobiti postupkom laminiranja, štrcanja, prešanja, namotavanja ili drugim. Različitim metodama se dobivaju različiti oblici kompozita te se poboljšavaju njihova mehanička svojstva. Neka od poboljšanih mehaničkih svojstava su čvrstoća, otpornost na visoke temperature, kemijska postojanost, vodljivost i elastičnost. Velika prednost kompozita je mogućnost izrade kompleksnih oblika te mali troškovi naknadne obrade.

Jedan od nedostataka kompozitnih materijala je njihovo teško obnavljanje. Jednom kada dođe do loma ili većeg trošenja cijeli kompozit se mora zamijeniti. Kompoziti i dalje nisu superiorniji u odnosu na metale, pa se ne mogu koristiti u otežanim radnim uvjetima (uglavnom nisu vatrootporni). Nadalje, postoji i konstrukcijski problem prilikom spajanja kompozita i izrade provrta.

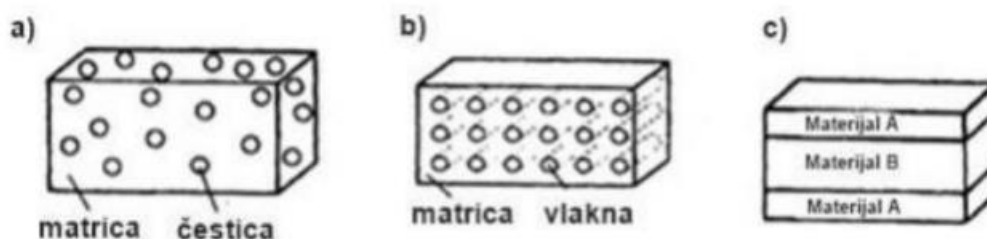
Podjela kompozita može se vršiti na više načina i to prema:

- materijalu matrice,
- materijalu ojačavala,
- obliku ojačavala,
- primjeni i sl.

Podjela kompozita prema materijalu matrice je ujedno i glavna podjela kompozita. Prema tome, matrica može biti:

- metalna (MMC),
- keramička (CMC) ili
- polimerna (PMC).

Prema materijalu ojačala kompoziti se dijele na :kompoziti sa staklenim vlaknima, kompoziti s prirodnim vlaknima, kompoziti s metalnim vlaknima i dr. Prema obliku ojačala, postoje kompoziti ojačani česticama, kompoziti ojačani vlaknima, slojeviti kompoziti (laminati) i sendvič konstrukcije kao što je prikazano na Slika 1.



**Slika 1. Shema kompozita s različitim oblicima ojačala.**

**a) kompoziti ojačani česticama, b) kompoziti ojačani vlaknima, c) strukturni kompoziti**

[2]

## 2.1 Uloga matrice u kompozitu

Glavne uloge matrice u kompozitu su:

- Matrica povezuje komponente kompozita i određuje njegovu toplinsko-mehaničku postojanost,
- štiti ojačalo od trošenja (abrazija) i okoliša,
- pomaže pri raspodjeli nametnutog opterećenja s obzirom da djeluje kao medij za prijenos naprezanja,
- pridonosi trajnosti, međuslojnoj žilavosti i smičnoj/tlačnoj/poprečnoj čvrstoći sustava te
- održava željenu orijentaciju i razmake vlakana u kompozitu[1].

Materijali matrice su obično duktilni i žilavi te prenose opterećenja i sprječavaju da napukline prekinutih vlakana napreduju kroz ostatak kompozit[2]. Iako je matrica kontinuirana faza koja obuhvaća odvojene čestice ili vlakna punila, ona ne mora ujedno biti i osnovni materijal, tj. ne mora imati većinski udio i davati osnovna svojstva kompozitnom materijalu. Primjerice, vlakna kompozita ojačanih vlaknima mogu činiti većinu volumena materijala, a daju mu dobra

mehanička svojstva, dok matrica prvenstveno povezuje vlakna te prenosi i raspodjeljuje opterećenje između njih. Vlakna su glavni nosivi dio materijala (nose 70 – 90 % opterećenja). Kompozitni materijali imaju poboljšanu čvrstoću i modul elastičnosti u usporedbi s materijalom same matrice pa se nerijetko kaže kako su da su ovi materijali čvršći od čelika što nije slučaj u pogledu vrijednosti modula elastičnosti ili čvrstoće. Kada se uspoređuju specifični modul  $E/\rho$  ili specifična čvrstoća  $\sigma/\rho$ , kompozitni materijali tu pokazuju prednost zbog svoje manje gustoće, odnosno mase da se podnese jednako opterećenje[3].

Orijentacija, volumni udio i usmjerenost vlakana imaju znatan utjecaj na svojstva kompozita. Prema tome, vlakna mogu biti poredana jednosmjerno i pritom biti kontinuirana ili diskontinuirana ili mogu biti slučajno orijentirana u matrici.

### **2.1.1 Svojstva kompozita s polimernom matricom**

Polimerni kompoziti su najraširenija vrsta kompozita. Polimerne matrice mogu biti iz skupine duromera (poliesterske, epoksidne, vinil-esterske, fenolne smole itd.), plastomera (PP, PA, PE, ABS, visokotemperaturni plastomeri (PEEK, poli(fenilin-sulifid) PPS, poli(eter-imid) PEI)) i elastomera.

Polimerni kompoziti mogu istovremeno postići:

- visoku čvrstoću,
- visoku krutost i malu masu,
- postojanost na različite medije,
- mogućnost izrade složenih oblika,
- smanjenje troškova naknadne obrade,
- mogućnost spajanja dijelova tijekom izrade ili
- dimenzijsku stabilnost pri ekstremnim radnim uvjetima[1].

#### **2.1.1.1 Duromerna matrica**

Duromeri pri zagrijavanju stvaraju ireverzibilne kemijske veze između polimernih lanaca koji su međusobno gusto umreženi. Pri ponovnom zagrijavanju oni ne mijenjaju svoje stanje, već



ostaju kruti sve dok se pod djelovanjem visoke temperature potpuno ne razgrade. Ovo ukazuje na danas sve važniji velik problem pri njihovoj primjeni, a to je da ih nije moguće reciklirati taljenjem matrice, već samo mehanički usitniti čime se dobivaju sitne granule koje u sebi sadrže i vlakna i matricu.

Duromeri su polimeri koji se najčešće koriste u proizvodnji kompozita zbog relativno niže cijene, niskih proizvodnih temperatura, niske viskoznosti pri proizvodnji te dobrog oplakivanja vlakana. Dobro reagiraju s većinom vrsta vlakana s obzirom da pritom ostvaruju dobru adheziju. Budući da pri proizvodnji prolaze kroz period vrlo visoke viskoznosti, mogu se proizvoditi pomoću više različitih tehnika proizvodnje [4].

Tehnike proizvodnje kompozita s duromernom matricom su:

- ručni dodirni postupak laminiranja,
- dodirni postupak štrcanjem,
- pultrudiranje,
- namotavanje filameta i dr.

Duromerne matrice prema vrsti materijala dijele se na:

- epoksidne smole,
- poliesterske smole,
- vinil-esterske smole,
- fenolne smole i
- poliimide[5].

### 2.1.1.2 Matrica od epoksidne smole

Epoksidi su najčešće dvokomponentne smjese pri čemu se u procesu proizvodnje dodaje očvršćivač koji postaje sastavni strukturni dio matrice. Nakon miješanja epoksida i očvršćivača, dolazi do očvršćivanja pod djelovanjem topline. Konačna svojstva epoksidne matrice pokazuju izrazitu krhkost što rezultira znatnom osjetljivošću na pojavu pukotina. Kako bi se poboljšala ova svojstva, ujedno i otpornost na vlagu i toplinska stabilnost, danas se epoksidima dodaju elastomeri te drugi tipovi polimera. Primjenjuju se u avioindustriji, brodogradnji, elektroindustriji, prilikom izrade kalupa i dr. [6].

Prednosti epoksidne matrice su:

- izvrsna mehanička svojstva,
- postojanost na atmosferilije,
- vrlo dobra postojanost na djelovanje agresivnih medija i vode,
- u laminatnim konstrukcijama dobro prijanjana ojačalo te je postojana na utjecaj vlage,
- dobra električna svojstva te
- dobra otpornost na zamor materijala.

Nedostatci epoksidne matrice su:

- teško je dobiti proizvod koji je istovremeno žilav i postojan pri visokim temperaturama,
- podložnost UV razgradnji,
- za visoku proizvodnost zahtijevaju umrežavanje pri povišenim temperaturama,
- visoka cijena[7].

### 2.1.1.3 Matrica od poliestereske smole

Poliesterske smole (PU) se često koriste zbog svojih jako dobrih mehaničkih svojstava, otpornosti na koroziju, male mase i niske cijene izrade. Dodatak stirena do 50 % snizuje viskoznost smole i olakšava primjenu (stiren služi za povezivanje molekula poliestera i samim time očvršćuje materijal). Poliesteri su makromolekule na bazi diabazičnih kiselina (ortofalna, izoftalna, tetrafalna kiselina, itd.) i diola kao što su to etilen glikol, propilen glikol, neopentil glikol, bisfenol, itd.

Prednosti poliesterskih smola:

- povišena rastezna i savojna čvrstoća,
- manja osjetljivost na krhki lom,
- dobra kemijska postojanost i postojanost na koroziju,
- dobra postojanost na atmosferilije,
- lako se prerađuju.

Nedostatci poliesterskih smola:

- imaju ograničen rok trajanja jer nakon nekog vremena počinju gelirati, stoga se često u procesu proizvodnje dodaju male količine usporavala,
- vrlo lako se razgrađuju[7].

#### 2.1.1.4 Matrica od vinil - esterske smole

Vinil-esterske smole su duromerne smole koje se uobičajeno sastoje od epoksidne smole kao osnove te se pripremaju dodavanjem nezasićenih etilnih kiselina epoksidnim smolama u prisustvu osnovnog katalizatora. Ova vrsta smole razvijena je kao pokušaj kombinacije kemijskih, mehaničkih i toplinskih svojstava epoksidnih smola s brзом polimerizacijom nezasićenih poliestera kako bi postali prikladni za razne industrijske primjene kao što su adhezivi, za prevlačenje površine, u kompozitima i sl.[6].

Svojstva vinil-esterskih smola:

- po svojoj molekulskoj strukturi slične su poliesterima, no pokazuju bolja mehanička svojstva,
- čvršća i bitno postojanije na vlagu i kemikalije (neke kiseline, lužine i druga otapala) od poliesterskih,
- često se primjenjuju kao završni premaz brodskih trupova i kao različiti dodaci čime se poboljšava postojanosti na djelovanjem UV zraka te vatrootpornost,
- mogu se primijeniti do temperature  $\approx 125$  °C[7].

#### 2.1.1.5 Matrica od fenolne smole

Fenol-formaldehidni polimeri poznati su i pod nazivom fenoplasti, fenol-formaldehidne ili fenolne smole. Upotrebljavaju se najviše kao ljepilo za drvene izrađevine, izolatori i konstrukcijski materijali. Toplinski su postojane, samogasive, tvrde i imaju povišenu postojanost prema utjecaju organskih otapala i kiselina[8]. Pri umrežavanju otpuštaju veliku količinu hlapljivih tvari, što nepovoljno utječe na mehanička svojstva smole kao matrice. Relativno su krhke i slabijih mehaničkih svojstava od epoksidnih i poliesterskih smola[7].

### 2.1.1.6 Matrica od poliimidne smole

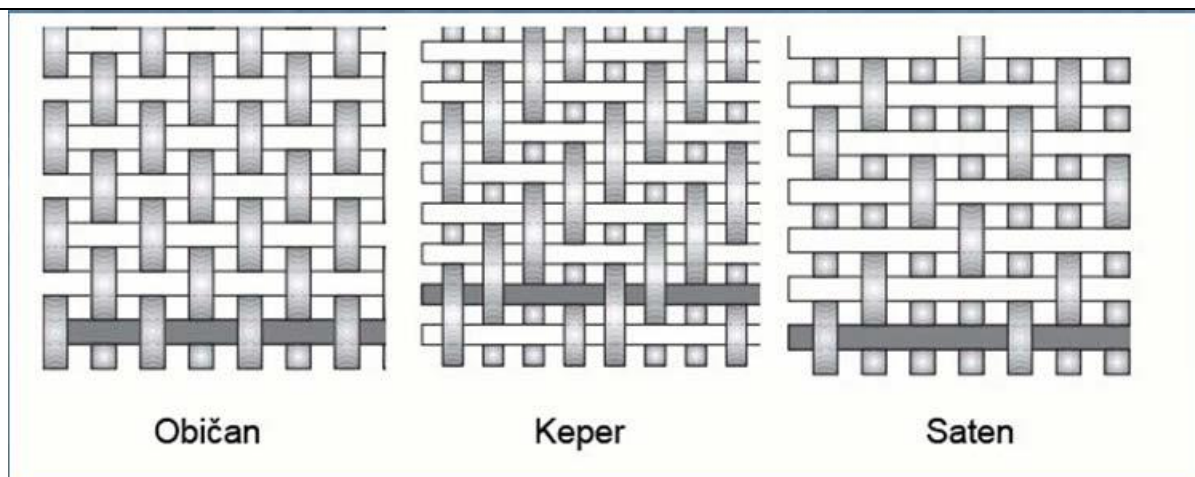
Poliimidi su polimeri sastavljeni od makromolekula naizmjeničnog poretka ugljikovodičnih i funkcionalnih imidnih – NHCO – skupina. Te skupine povezuju linearne makromolekule jakim vodikovim vezama i zato su poliimidi kristalasti duromeri visokog tališta, postojani na utjecaj otapala koji lako adsorbiraju vodu[8]. Mogu biti prozirni ili mutni, nisu zapaljivi, a primjenjuju se u optici zbog visoke prozirnosti. Primjenjuju se i umjesto stakla zbog odličnih mehaničkih svojstava i postojanosti na oksidaciju pri povišenim temperaturama (do 250 °C, kratko čak i do 450 °C), a moguća je i njihova upotreba za izradu dijelova motora. Glavni nedostatak poliimida je vrlo visoka cijena[7].

## 2.2 Podjela prema vrsti ojačala

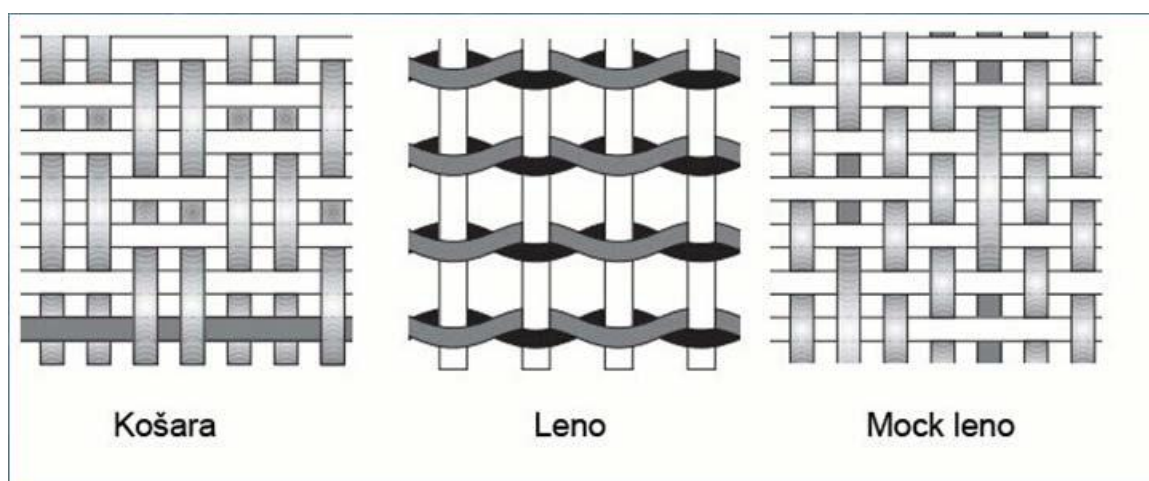
Ojačala su definirana kao punila velikoga  $L/D$  omjera koja služe ponajprije za poboljšanje mehaničkih svojstava kompozitnih materijala. Nazivaju se i aktivnim punilima jer imaju ulogu ispunjavanja praznina u kompozitnim materijalima. Glavna su vlaknasta ojačala koja kompozitima daju visoku čvrstoću i tvrdoću, a pogotovo su pogodna zbog mogućnosti polaganja u smjeru opterećenja. Druga vrsta ojačala su čestice. Jedna od razlika vlakana i čestica je omjer  $L/D$  koji je za čestice puno veći od 1. Kompoziti ojačani česticama obično se proizvode kako bi se povećao modul elastičnosti, tj. čvrstoća i smanjila rastezljivost materijala matrice te smanjila njena propusnost za plinove i kapljevine[3].

### 2.2.1 Kompoziti s vlaknima kao ojačalom

Vlakna kao ojačalo u materijalima imaju dvije prednosti. Većina materijala je čvršća kada je ojačano vlaknima maloga promjera zbog prirodnog izuzimanja defekata visoke razine. Nadalje, oblik vlakna omogućuje prilagođavanje svojstava u specifičnim smjerovima. Vlakna dodana matrici od smole daju čvrstoću konačnom obliku. Uglavnom matrica štiti vlakna od štetnih utjecaja okoline, kao što su to oksidacija i korozija. Materijal se bira u skladu sa željenim svojstvima gotovog proizvoda [6]. Različiti oblici prediva, namotaja, niti, tkanine, i matova u naprednijim kompozitima kao što je prikazano na slici 2. i slici 3.[1].



Slika 2. Vrste tkanja[1]

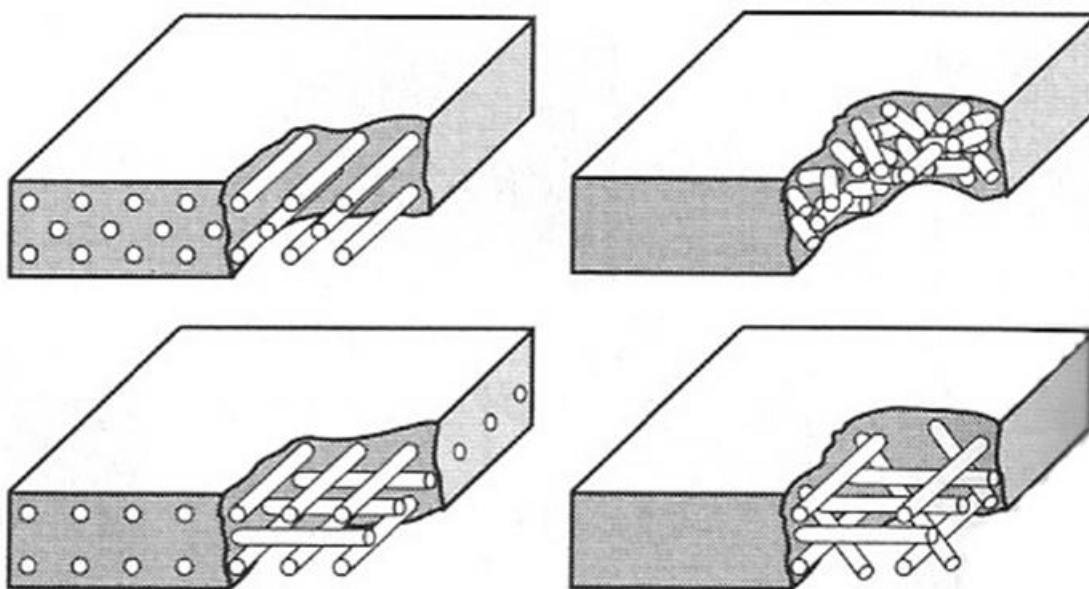


Slika 3. Vrste tkanja[1]

Svaki od navedenih oblika ima svoju posebnu primjenu. Prediva i namotaji se koriste kod namotavanja filamenata ili pultrudiranja. Vlakna nose opterećenja matrice i mogu spriječiti širenje pukotina[1]. Pri konstruiranju vlaknima ojačanih kompozita potrebno je uzeti u obzir brojne faktore. Jedan od njih je omjer „duljina/promjer“. Gledajući ovaj faktor, vlakna se dijele na kontinuirana ( $L > L_c$ ) i diskontinuirana ( $L < L_c$ ) vlakna.  $L_c$  predstavlja minimalnu kritičnu duljinu koja omogućava kvalitetan prijenos opterećenja na vlakno[2].

Prema rasporedu vlakana, vlakna se dijele na:

- a) kontinuirana jednosmjerna vlakna,
- b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna,
- c) ortogonalno raspoređena vlakna i
- d) višesmjerno usmjerena vlakna, što prikazuje **Error! Reference source not found.**[1].



Slika 4. Različiti raspoređi vlakana[1]

Prilikom izrade kompozita se ne mora koristiti samo jedna vrsta vlakana. Kao ojačalo se mogu koristiti dvije ili više vrste ojačala i takvi kompoziti zovu se hibridni kompoziti. Hibridni kompoziti mogu se izrađivati slaganjem slojeva vlakana u obliku laminata ili međusobno miješajući vlakna u zajedničku matricu.

Prednosti hibridnih kompozita:

- mogućnost zamjene skupih materijala adekvatnijim jeftinim materijalima, npr. staklena vlakna u kombinaciji s ugljičnim vlaknima,
- miješanjem dvaju tipova vlakana mogu se dobiti sinergijski efekti koji vode do otpornosti na zamor materijala,
- šira mogućnost manipuliranja čvrstoće, krutosti i cijene,
- termostabilni na promijene temperature[9].

### 2.2.2 Vrste vlakana

Postoje četiri vrste glavnih vlakana koja se koriste kao ojačalo, a to su: staklena, aramidna, ugljična i borova vlakna. Nova skupina vlakana koja se danas sve češće koriste su prirodna vlakna[6].

### 2.2.3 Vlakna biljnog podrijetla

Primjena biljnih vlakana plijeni veliku pozornost u akademskom i industrijskom sektoru. Biljna vlakna imaju značajne prednosti u usporedbi sa sintetskim vlaknima. Trenutno veliki broj prirodnih vlakana se istražuje za upotrebu umjesto polimera, uključujući lan, konoplju, jutu, pamuk, drvo, pšenicu, ječam i mnoge druge. Posebno se istražuju kompoziti temeljeni na razgradivim poliester amidima i biljnim vlaknima (lan i pamuk) s dobrim mehaničkim svojstvima, kao što su to dobra otpornost na upijanje vode i biorazgradivost[10].

#### 2.2.3.1 Mineralna vlakna

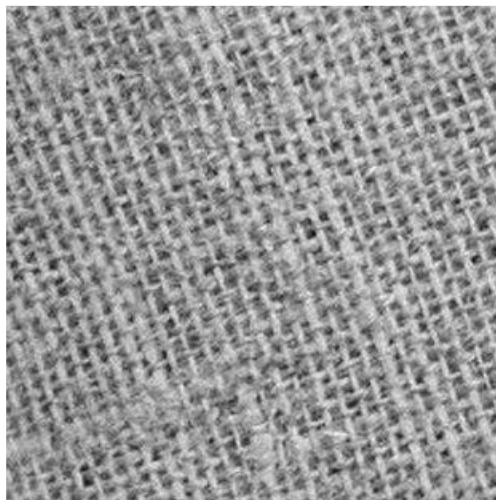
Glavni predstavnik mineralnih vlakana su azbestna vlakna. Iako se odlikuju vrlo dobrim mehaničkim svojstvima i niskom cijenom, zbog lošeg utjecaja na zdravlje čovjeka njihova primjena je u nekim državama u potpunosti zabranjena. Odlikuju se dobrom toplinskom postojanošću, postojanošću na različite kemikalije i prigušuju zvuk. Zapaljiva su, pa se pri upotrebi za zaštitu od vatre često miješaju sa cementom, te se pletu u tkanine ili matove [11].

#### 2.2.3.2 Lanena vlakna

Lanena vlakna potencijalno mogu biti odlična ojačala u biokompozitima s duromernom maticom. Upotrebom ovakvih kompozita, smanjuje se količina plastike na bazi nafte. Automobilaska i građevinska industrija te industrija izrade uređaja za svakodnevnu upotrebu povećavaju upotrebu lanenih vlakana iz dana u dan zbog svoje male cijene, neabrazivnosti i ekoloških pokreta[12]. Biokompoziti s duromernom matricom poboljšani lanenim vlaknima svojim mehaničkim svojstvima su usporedivi s kompozitima s duromernom matricom ojačanim staklenim vlaknima (LLDPE / HDPE). Omjerom „duljina/promjer“ znatno se lakše ugrađuju u matricu stvarajući materijal visoke krutosti i čvrstoće. Lan je likovo vlakno. Lanena vlakna

variraju u dužini između 25 i 150 cm i otprilike 12 do 16  $\mu\text{m}$  u promjeru kao što je vidljivo na

**Error! Reference source not found.** 5. [10].



**Slika 5. Niti lanenih vlakana**[13]

Lan je jedno od najjačih prirodnih vlakana, čvrstoće veće dva do tri puta od čvrstoće pamuka. Lanena vlakna su glatka tako da konačni proizvod ima malu površinsku hrapavost. Dobro apsorbiraju kapljevine te su dobar vodič topline. Lan ima dobra akustična svojstva i prigušuje vibracije. Može se primjenjivati kod svih vrsta postupaka prerade. Raspada se pri temperaturi od 200 °C. Na suncu lanena vlakna postupno gube čvrstoću, uslijed djelovanja UV zračenja. Lan se primjenjuje kao ojačalo u PP i PE od plastomernih matrica i u epoksidnoj i poliuretanskoj matrice od duromernih matrica. Postoji i kao prepreg[12].

#### **2.2.4 Staklena vlakna**

Staklena vlakna sastoje od se ( -  $\text{SiO}_4$  - ) tetraedarskih jedinica u osnovi. Amorfne su prirode. Najčešće se koriste kao ojačalo za PMC jer imaju visoku čvrstoću, a niske su cijene. Pristupačna su kao kontinuirana ili diskontinuirana vlakna, ali imaju loša abrazivna svojstva, lošu adheziju prema polimernoj matrici. Kako bi se nedostaci reducirali, koriste se kontaktna sredstva. Staklo za izradu vlakana je podijeljeno u pet glavnih skupina.



Podjela staklenih vlakana se temelji s obzirom na svojstva stakla od kojeg se izrađuje:

- A – staklo je visoko alkalno staklo, otporno na kemijsko trošenje, ali je loših električnih svojstava,
- C – staklo je kemijski otporno, što daje veoma visoku kemijsku postojanost,
- E – staklo ima nizak udio alkala i dobra električna svojstva, dobra izolacijska svojstva i vodootpornost,
- S – staklo ima 33 % bolja rastezna svojstva od E – stakla,
- D – staklo ima superiornija električna svojstva s manjom dielektričnom konstantom.

Usporedba svojstva staklenih i drugih vrsta vlakana prikazani su u **Error! Reference source not found.**[6].

**Tablica 1. Svojstva vlakana korištenih kao ojačanje u kompozitima[6]**

| Vrsta vlakana               | Gustoća (g/cm <sup>3</sup> ) | Rastezna čvrstoća (MPa) | Rastezni modul elastičnosti (GPa) | Istezljivost (%) |
|-----------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------|
| E-Staklo                    | 2,54                         | 3450                    | 72                                | 4,5              |
| S-Staklo                    | 2,49                         | 4300                    | 87                                | 5,3              |
| Ugljična vlakna (HT)        | 1,8                          | 5000                    | 250                               | 1,6              |
| Aramidna vlakna (Kevlar 49) | 1,44                         | 3600                    | 131                               | 2,8              |
| Borna vlakna                | 2,6                          | 3500                    | 400                               | 0,8              |

E – staklena vlakna dominiraju u trenutnoj PMC industriji i imaju jako dobra mehanička i električna svojstva za pristupačnu cijenu. Rastezna čvrstoća i krutost E – stakla iznose 3450 MPa i 72 GPa. S – staklo sadrži veći udio aluminija i silicija uspoređujući s E – staklom. Tipična rastezna čvrstoća S – stakla i krutost su 4300 MPa i 87 GPa kao što se može iščitati iz **Error! Reference source not found.**[6].

## 2.3 Mehanička svojstva

Pojam „mehanička svojstva“ opisuje reakciju materijala na vanjske sile. Dvije osnovne reakcije materijala su deformiranje i lom. Deformacije mogu biti elastične, viskoelastične, plastične ili deformacije puzanjem. Lom se može dogoditi iznenada ili nakon ponovljenog korištenja opterećenja (zamor). Za neke materijale kvar je vremenski ovisan. Deformacije i lomovi ovise o pukotinama, temperaturi i načinu opterećenja[14].

### 2.3.1 Rastezna svojstva

#### 2.3.1.1 Rastezna čvrstoća

Rastezna svojstva se često uzimaju kao uvjet prilikom odabira materijala u raznim primjenama. Specifikacije materijala često uključuju minimalnu rasteznu čvrstoću kako bi se osigurala kvaliteta[14]. Razina opterećenja koja uzrokuje primjetljivu plastičnu deformaciju zove se granica razvlačenja koja se utvrđuje izrazom:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, MPa \text{ gdje je}$$

$R_e$  – granica razvlačenja [MPa],

$F_e$  – sila tečenja [N],

$S_0$  – ploština poprečnog presjeka [mm<sup>2</sup>].

Granica razvlačenja predstavlja ono naprezanje prema kojem se odabrani stupanj sigurnosti utvrđuje dopušteno naprezanje pri radu strojnih dijelova i dijelova uređaja. Naprezanja veća od granice razvlačenja  $R_e$  izazivaju istovremeno elastičnu i plastičnu (trajnu) deformaciju epruvete. Naprezanje kod maksimalne sile naziva se rastezna čvrstoća  $R_m$  i jednaka je omjeru maksimalne sile  $F_m$  i ploštine početnog presjeka  $S_0$ :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, MPa \text{ gdje je}$$

---

$R_m$  – rastezna čvrstoća [MPa],

$F_m$  – maksimalna sila [N],

$S_0$  – ploština poprečnog presjeka [mm<sup>2</sup>][15].

### 2.3.1.2 Rastezni modul elastičnosti

Rastezni modul elastičnosti je elastična konstanta materijala koja ovisi o čvrstoći veze između atoma u kristalu ili amorfnoj strukturi. Što je rastezni modul elastičnosti  $E_R$  veći, za isto istezanje  $\varepsilon$  bit će potrebno veće naprezanje  $\sigma$ , odnosno nagib Hookeovog pravca će biti strmiji. Rastezni modul elastičnosti ( $E_R$ ) određuje se iz nagiba pravca prema Hookovom zakonu pomoću izraza:

$$E_R = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ MPa} \text{ gdje je}$$

$E_R$  – rastezni modul elastičnosti [MPa],

$\sigma$  – rastezno naprezanje [MPa],

$\varepsilon$  – istezanje [mm/mm][15].

Što je veza između atoma jača to je rastezni modul elastičnosti veći.

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

#### 3.1 Izrada uzoraka i sastav

Ispitni uzorci su izrađeni postupkom vakuumske infuzije pri temperaturi od 25 °C, vlazi od 45 % i vakuumu od 90 %. Za matricu su, ovisno o kompozitu, korištene dvije smole, a to su epoksidna smola InfuGreen 810 (Sicomina, Francuska) i poliesterska smola Synolite 1967 – 2 – G (Baltazar kompozyty, Poljska). Kao ojačalo su korištena lanena vlakna Amplitex 500 (Bcomp, Švicarska) i staklena vlakna Triaxal 1200 (Hebei, Kina). Izrađeno je pet vrsta kompozita koji se razlikuju po udjelu vlakana, vrsti smole, vrsti vlakana, broju slojeva vlakana. Maseni udio i vrsta vlakana je prikazana u Tablica 2.

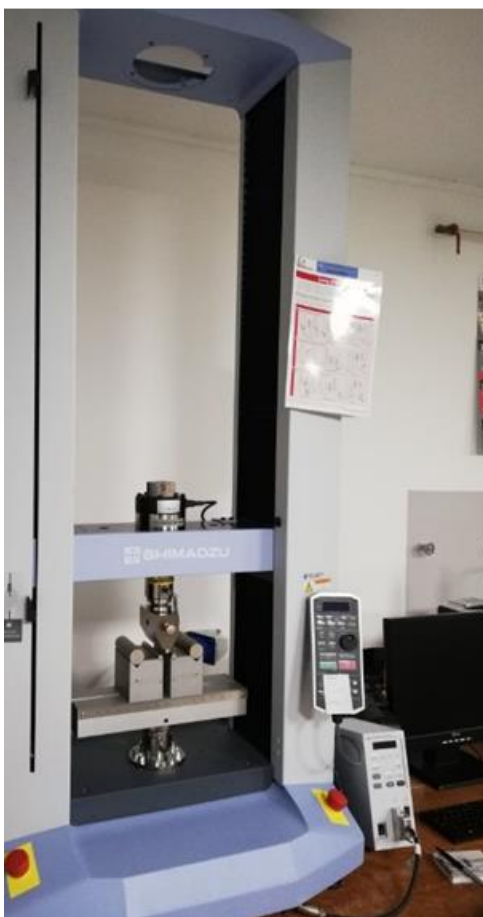
**Tablica 2. Maseni udio vlakana i vrsta vlakana**

|                         |                    |                    |                        |                 |                        |
|-------------------------|--------------------|--------------------|------------------------|-----------------|------------------------|
| Broj slojeva vlakana    | 4                  | 4                  | 4 + 2 + 4              | 6               | Nepoznat               |
| Vrsta vlakna            | Lanena vlakna      | Staklena vlakna    | Lanena/staklena vlakna | Lanena vlakna   | Staklena/lanena vlakna |
| Matrica                 | Poliesterska smola | Poliesterska smola | Poliesterska smola     | Epoksidna smola | Poliesterska smola     |
| Maseni udio vlakana (%) | 58,70              | 73,80              | 55,00                  | 41,57           |                        |

Hibridni kompozit s masenim udjelom od 55 % vlakana načinjen je tako da su dva sloja vlakana smještena u središnju ravninu, dok su s gornje i donje strane u odnosu na staklena vlakna četiri sloja lanenih vlakana. Kompozit koji je označen kao svijetli, dostavljen je naknadno, nakon što je uočena pogreška u planu laminiranja. Kod ovog kompozita staklena su vlakna u površinskim slojevima, što je nužno za savojna opterećenja. U ovom radu istražena su rastezna svojstva, te se ne očekuje upliv pogreške u slaganju. Već prvom optičkom kontrolom uočen je niz nesavršenosti u ovom kompozitu.

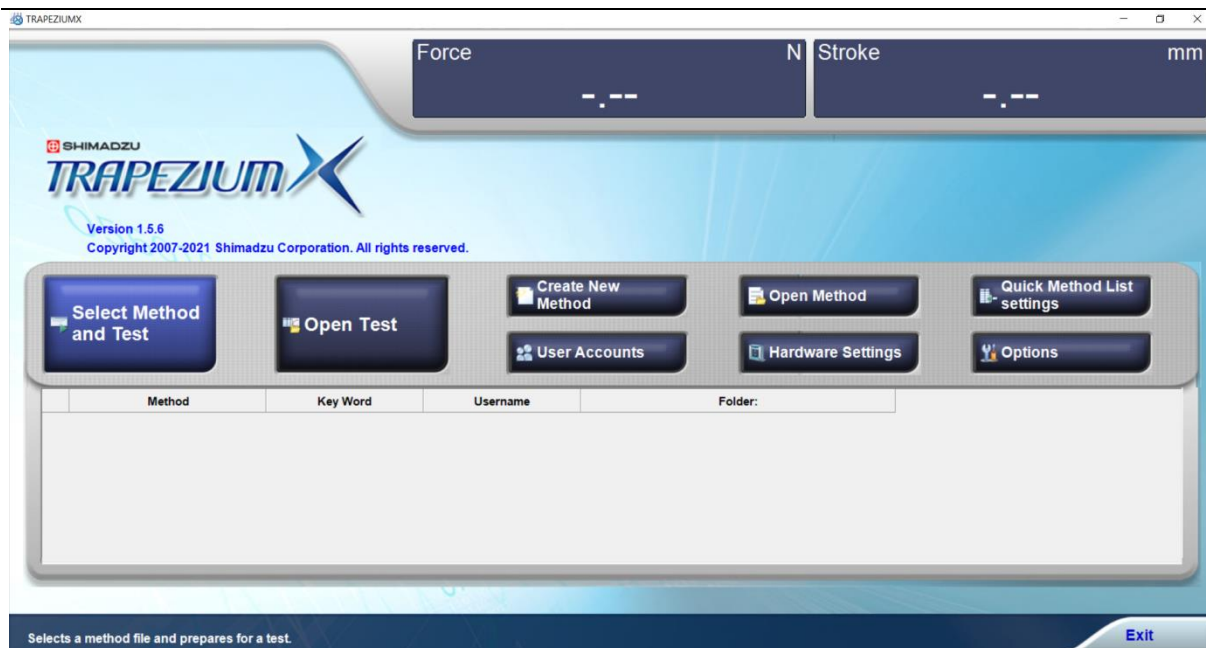
### 3.2 Ispitivanje rastezne čvrstoće

Uzorci su pravokutnog poprečnog presjeka izrađeni prema normi HRN EN ISO 527 – 4:1997 – Plastika – Određivanje rasteznih svojstava – 4. dio: Ispitni uvjeti za izotropne i ortotropne polimerne kompozite ojačane vlaknima, po kojoj je provedeno ispitivanje u Laboratoriju za polimere i kompozite, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Izrezano je ukupno 59 ispitnih tijela iz kompozita. Ispitna tijela su ispitani na kidalici Shimadzu AGS – X prikazanoj na slici 6.



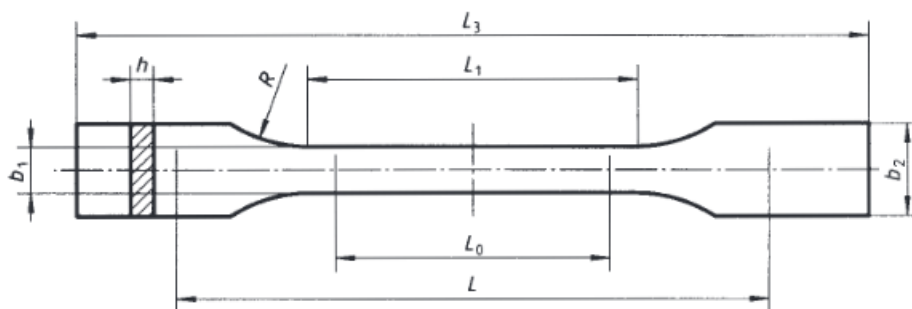
Slika 6. Kidalica Shimadzu AGS – X

Kidalicom se upravlja pomoću programa TrapeziumX (**Error! Reference source not found.**). Mjerenje se odvija uz pomoć senzora. Dobiveni rezultati mjerenja kao i grafovi tijekom ispitivanja obrađuju se tokom samog ispitivanja. Mjerno područje ispitivanja kidalice je od 0 do 50000 N, a brzina ispitivanja 5 mm/min. Senzor za očitavanje sile ima grešku  $\pm 1\%$  mjerne skale.



Slika 7. Početno sučelje programa TrapeziumX

Ispitni uzorci izrađeni su prema tipu 1B prema prethodno navedenoj normi čije su opće dimenzije prikazane na **Error! Reference source not found.**



Slika 8. Opće dimenzije ispitnih tijela

$L_3$  – ukupna duljina  $\geq 150$  mm

$L$  – duljina između pakni  $60 \pm 5$  mm

$R$  – radijus  $\geq 60$  mm

$b_2$  – širina glave ispitnoga tijela  $20 \pm 0,2$  mm

$b_1$  – širina vrata ispitnoga tijela  $10 \pm 0,1$  mm

$h$  – debljina ispitnoga tijela 2 do 10 mm

$L_0$  – početna mjerna duljina ispitnoga tijela  $50 \pm 0,5$  mm

$L_1$  – ispitna duljina ispitno tijela  $60 \pm 0,5$  mm

Dimenzije epruveta iz programa TrapeziumX dane su u milimetrima (**Error! Reference source not found.**) te su prikazane u Tablica 3., Tablica 4., Tablica 5., Tablica 6. i tablici 7.

Test Wizard

| Method            | Specimen         | Reports       |
|-------------------|------------------|---------------|
| Material: Plastic | No of Batches: 4 | Size Unit: mm |
| Shape: Plate      | Qty/Batch: 17    |               |

| Sizes:   |       |                  |              | Data/Constant:                           |       |                             |
|--|-------|------------------|--------------|--|-------|-----------------------------|
| <input type="button" value="Represent"/> <input type="button" value="AutoNo."/> <input type="button" value="Reset No."/> |       |                  |              | <input type="button" value="Represent"/> |       |                             |
| <input type="button" value="Load collectively"/>   |       |                  |              |  |       |                             |
|  | Name  | Thickness<br>[T] | Width<br>[W] | Gauge_Length<br>[GL(G)]                  |       | Vaziv tkaninej slojeva tkan |
| 1- 1   | 1_ 1  | 4,72             | 10,06        | 50,00                                    | 1- 1  | mpIITEX 500 4               |
| 1- 2   | 1_ 2  | 4,72             | 9,86         | 50,00                                    | 1- 2  | mpIITEX 500 4               |
| 1- 3   | 1_ 3  | 3,74             | 10,02        | 50,00                                    | 1- 3  | mpIITEX 500 4               |
| 1- 4   | 1_ 4  | 3,66             | 10,06        | 50,00                                    | 1- 4  | mpIITEX 500 4               |
| 1- 5   | 1_ 5  | 3,68             | 9,80         | 50,00                                    | 1- 5  | mpIITEX 500 4               |
| 1- 6   | 1_ 6  | 3,52             | 9,96         | 50,00                                    | 1- 6  | mpIITEX 500 4               |
| 1- 7   | 1_ 7  | 3,64             | 9,70         | 50,00                                    | 1- 7  | mpIITEX 500 4               |
| 1- 8   | 1_ 8  | 3,62             | 10,00        | 50,00                                    | 1- 8  | mpIITEX 500 4               |
| 1- 9   | 1_ 9  | 3,88             | 10,04        | 50,00                                    | 1- 9  | mpIITEX 500 4               |
| 1- 10  | 1_ 10 | 3,72             | 9,98         | 50,00                                    | 1- 10 | mpIITEX 500 4               |
| 1- 11  | 1_ 11 | 3,76             | 9,84         | 50,00                                    | 1- 11 | mpIITEX 500 4               |
| 1- 12  | 1_ 12 | 3,50             | 9,96         | 50,00                                    | 1- 12 | mpIITEX 500 4               |
| 1- 13  | 1_ 13 | 3,66             | 9,92         | 50,00                                    | 1- 13 | mpIITEX 500 4               |
| 1- 14  | 1_ 14 | 3,80             | 9,94         | 50,00                                    | 1- 14 | mpIITEX 500 4               |
| 1- 15  | 1_ 15 | 3,86             | 9,98         | 50,00                                    | 1- 15 | mpIITEX 500 4               |
| 1- 16  | 1_ 16 | 3,76             | 9,96         | 50,00                                    | 1- 16 | mpIITEX 500 4               |
| 1- 17  | 1_ 17 | 4,82             | 9,92         | 50,00                                    | 1- 17 | mpIITEX 500 4               |
| 2- 1   | 2_ 1  | 1,00             | 1,00         | 50,00                                    | 2- 1  | 1,00000 1                   |
| 2- 2   | 2_ 2  | 1,00             | 1,00         | 50,00                                    | 2- 2  | 1,00000 1                   |
| 2- 2   | 2_ 2  | 1,00             | 1,00         | 50,00                                    | 2- 2  | 1,00000 1                   |

Slika 9. Dimenzije ispitnih tijela prikazane u programu TrapeziumX



**Tablica 3. Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rastezne čvrstoće (lan – 4 sloja, poliesterska smola)**

| Ime  | Debljina (h) | Širina ( $b_1$ ) | Početna mjerna duljina epruvete ( $L_0$ ) |
|------|--------------|------------------|---|
| 1_1  | 4,72         | 10,06            | 50,00                                     |
| 1_2  | 4,72         | 9,86             | 50,00                                     |
| 1_3  | 3,74         | 10,02            | 50,00                                     |
| 1_4  | 3,66         | 10,06            | 50,00                                     |
| 1_5  | 3,68         | 9,80             | 50,00                                     |
| 1_6  | 3,52         | 9,96             | 50,00                                     |
| 1_7  | 3,64         | 9,70             | 50,00                                     |
| 1_8  | 3,62         | 10,00            | 50,00                                     |
| 1_9  | 3,88         | 10,04            | 50,00                                     |
| 1_10 | 3,72         | 9,98             | 50,00                                     |
| 1_11 | 3,76         | 9,84             | 50,00                                     |
| 1_12 | 3,50         | 9,96             | 50,00                                     |
| 1_13 | 3,66         | 9,92             | 50,00                                     |
| 1_14 | 3,80         | 9,94             | 50,00                                     |
| 1_15 | 3,86         | 9,98             | 50,00                                     |
| 1_16 | 3,76         | 9,96             | 50,00                                     |
| 1_17 | 4,82         | 9,92             | 50,00                                     |

**Tablica 4. Dimenzije ispitnog tijela za ispitivanje rastezne čvrstoće (staklo 4 sloja, poliesterska smola)**

| Ime  | Debljina (h) | Širina ( $b_1$ ) | Početna mjerna duljina epruvete ( $L_0$ ) |
|------|--------------|------------------|---|
| 2_1  | 5,02         | 9,78             | 50,00                                     |
| 2_2  | 4,94         | 9,84             | 50,00                                     |
| 2_3  | 4,90         | 9,82             | 50,00                                     |
| 2_4  | 4,86         | 9,86             | 50,00                                     |
| 2_5  | 4,86         | 9,80             | 50,00                                     |
| 2_6  | 4,88         | 9,90             | 50,00                                     |
| 2_7  | 4,90         | 9,78             | 50,00                                     |
| 2_8  | 4,82         | 9,84             | 50,00                                     |
| 2_9  | 4,86         | 9,80             | 50,00                                     |
| 2_10 | 4,72         | 9,66             | 50,00                                     |
| 2_11 | 4,86         | 9,90             | 50,00                                     |

**Tablica 5. Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rastezne čvrstoće (lan – 6 slojeva, epoksidna smola)**

| Ime  | Debljina (h) | Širina ( $b_1$ ) | Početna mjerna duljina epruvete ( $L_0$ ) |
|------|--------------|------------------|---|
| 3_1  | 6,04         | 9,96             | 50,00                                     |
| 3_2  | 6,18         | 10,12            | 50,00                                     |
| 3_3  | 5,92         | 9,98             | 50,00                                     |
| 3_4  | 5,94         | 10,16            | 50,00                                     |
| 3_5  | 6,08         | 10,08            | 50,00                                     |
| 3_6  | 5,62         | 10,06            | 50,00                                     |
| 3_7  | 6,10         | 10,12            | 50,00                                     |
| 3_8  | 6,06         | 10,18            | 50,00                                     |
| 3_9  | 6,16         | 10,10            | 50,00                                     |
| 3_10 | 6,08         | 10,12            | 50,00                                     |
| 3_11 | 6,08         | 10,08            | 50,00                                     |
| 3_12 | 6,04         | 10,16            | 50,00                                     |
| 3_13 | 6,04         | 10,18            | 50,00                                     |
| 3_14 | 5,90         | 10,04            | 50,00                                     |

**Tablica 6. Dimenzije ispitnog tijela za ispitivanje rastezne čvrstoće (lan/staklo 4+2+4 sloja, poliesterska smola)**

| Ime  | Debljina (h) | Širina ( $b_1$ ) | Početna mjerna duljina epruvete ( $L_0$ ) |
|------|--------------|------------------|---|
| 4_1  | 8,88         | 10,16            | 50,00                                     |
| 4_2  | 9,08         | 10,14            | 50,00                                     |
| 4_3  | 8,94         | 10,08            | 50,00                                     |
| 4_4  | 8,64         | 10,04            | 50,00                                     |
| 4_5  | 8,82         | 10,16            | 50,00                                     |
| 4_6  | 8,92         | 10,12            | 50,00                                     |
| 4_7  | 9,04         | 10,18            | 50,00                                     |
| 4_8  | 8,88         | 10,04            | 50,00                                     |
| 4_9  | 8,74         | 10,24            | 50,00                                     |
| 4_10 | 8,94         | 10,04            | 50,00                                     |
| 4_11 | 8,64         | 10,00            | 50,00                                     |
| 4_12 | 8,88         | 10,20            | 50,00                                     |

**Tablica 7. Dimenzije ispitnog tijela za ispitivanje rastezne čvrstoće (svijetli)**

| Ime | Debljina (h) | Širina ( $b_1$ ) | Početna mjerna duljina epruvete ( $L_0$ ) |
|-----|--------------|------------------|---|
| 5_1 | 8,16         | 9,94             | 50,00                                     |
| 5_2 | 8,48         | 9,84             | 50,00                                     |
| 5_3 | 8,52         | 9,88             | 50,00                                     |
| 5_4 | 8,30         | 9,98             | 50,00                                     |
| 5_5 | 8,04         | 9,98             | 50,00                                     |

## 4. Rezultati ispitivanja rasteznih svojstava

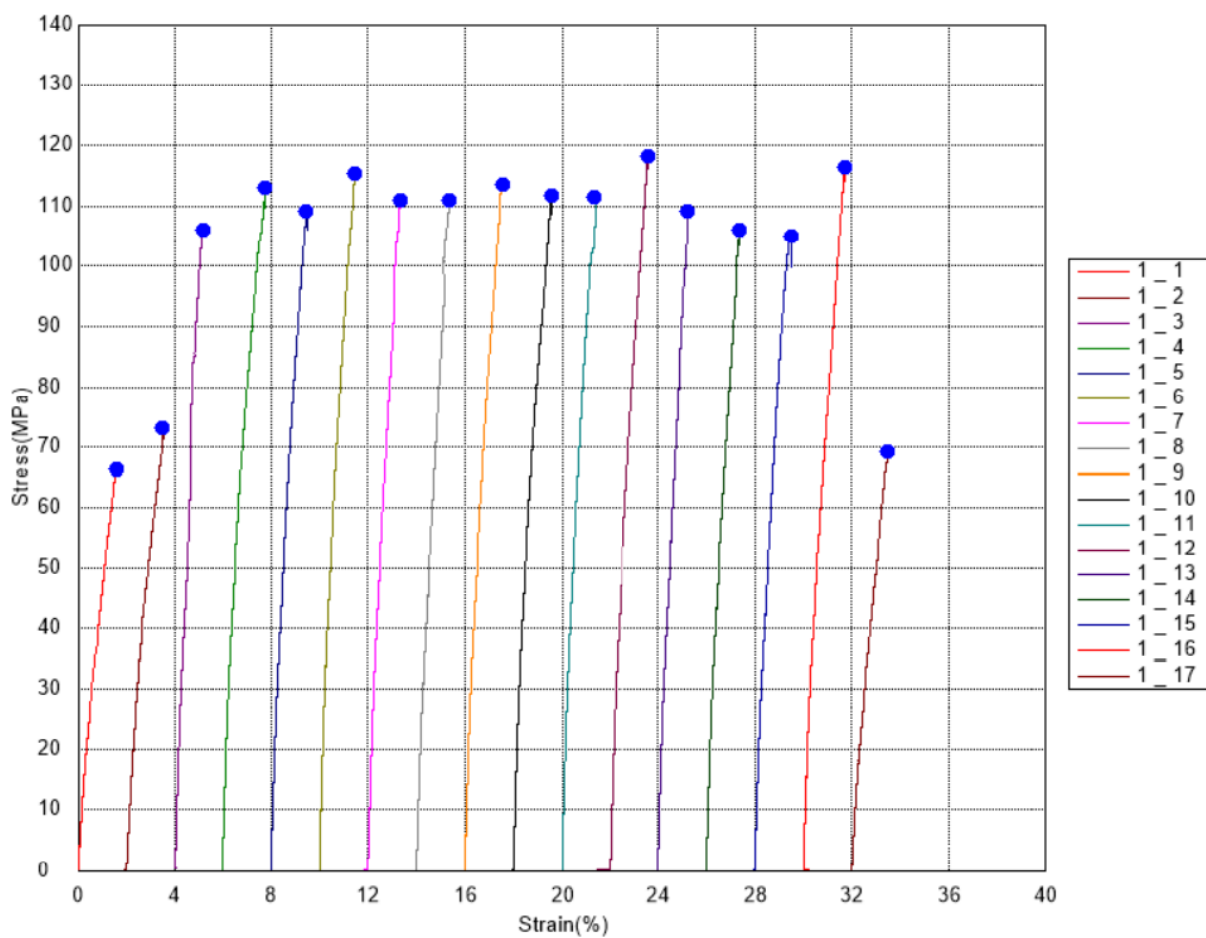
### 4.1 Kompozit poliesterske matrice s 4 sloja lanenih vlakana

U Tablica 8. prikazane su vrijednosti izmjerene rastezne čvrstoće, modula elastičnosti te prekidnog istezanja i maksimalne sile kompozita s poliesterskom matricom i 4 sloja lanenih vlakana kao ojačalo.

**Tablica 8. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće (lan – 4 sloja, poliesterska smola)**

| Ispitno tijelo        | Maksimalna sila F [N] | Prekidno istezanje [mm] | Rastezna čvrstoća [MPa] | Rastezni modul elastičnosti [MPa] |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 1 _ 1                 | 3156                  | 0,78                    | 66,47                   | 4300                              |
| 1 _ 2                 | 3401                  | 0,74                    | 73,08                   | 5600                              |
| 1 _ 3                 | 3976                  | 0,59                    | 106,10                  | 8900                              |
| 1 _ 4                 | 4160                  | 0,89                    | 112,98                  | 8600                              |
| 1 _ 5                 | 3932                  | 0,74                    | 109,02                  | 8700                              |
| 1 _ 6                 | 4048                  | 0,73                    | 115,47                  | 9800                              |
| 1 _ 7                 | 3913                  | 0,67                    | 110,83                  | 9100                              |
| 1 _ 8                 | 4012                  | 0,68                    | 110,82                  | 8300                              |
| 1 _ 9                 | 4423                  | 0,77                    | 113,54                  | 8700                              |
| 1 _ 10                | 4146                  | 0,78                    | 111,68                  | 8900                              |
| 1 _ 11                | 4123                  | 0,67                    | 111,44                  | 9900                              |
| 1 _ 12                | 4121                  | 0,80                    | 118,21                  | 8800                              |
| 1 _ 13                | 3964                  | 0,60                    | 109,19                  | 8800                              |
| 1 _ 14                | 4002                  | 0,68                    | 105,95                  | 8600                              |
| 1 _ 15                | 4040                  | 0,75                    | 104,87                  | 8200                              |
| 1 _ 16                | 4364                  | 0,85                    | 116,52                  | 8000                              |
| 1 _ 17                | 3304                  | 0,75                    | 69,11                   | 4600                              |
| Srednja vrijednost    | 3946,18               | 0,73                    | 103,84                  | 8105,88                           |
| Standardna devijacija | 335,41                | 0,08                    | 16,29                   | 1601,64                           |

Na Sliku 10. prikazan je dijagram naprežanje-istežanje dobiven u programu TrapeziumX nakon ispitivanja rastezne čvrstoće promatranog kompozita.



Slika 10. Dijagram naprežanje-istežanje za UP/4lan

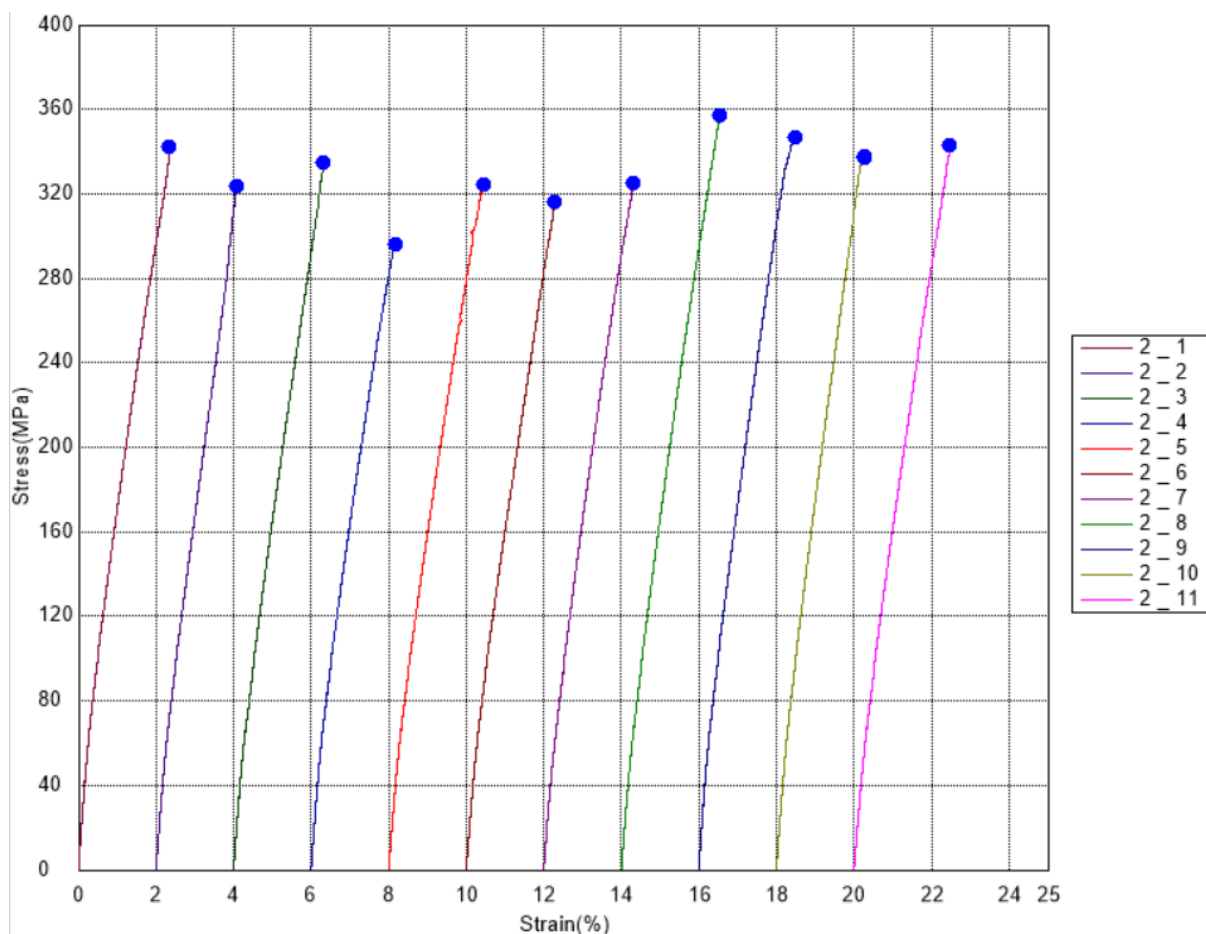
## 4.2 Kompozit poliesterske matrice s 4 sloja staklenih vlakana

U tablici 9. prikazane su vrijednosti izmjerene rastezne čvrstoće, modula elastičnosti te prekidnog istežanja i maksimalne sile za kompozit s poliesterskom matricom i 4 slojeva staklenih vlakana kao ojačalo.

**Tablica 9. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće (staklo – 4 sloja, poliesterska smola)**

| Ispitno tijelo        | Maksimalna sila F [N] | Prekidno istežanje [mm] | Rastezna čvrstoća [MPa] | Modul elastičnosti [MPa] |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 2_1                   | 16820                 | 1,16                    | 342,61                  | 23100                    |
| 2_2                   | 15718                 | 1,04                    | 323,36                  | 22000                    |
| 2_2                   | 16095                 | 1,16                    | 334,50                  | 22000                    |
| 2_4                   | 14176                 | 1,10                    | 295,82                  | 22400                    |
| 2_5                   | 15459                 | 1,22                    | 324,58                  | 21100                    |
| 2_6                   | 15290                 | 1,15                    | 316,49                  | 21600                    |
| 2_7                   | 15581                 | 1,16                    | 325,14                  | 20600                    |
| 2_8                   | 16945                 | 1,28                    | 357,27                  | 21000                    |
| 2_9                   | 16515                 | 1,25                    | 346,75                  | 23300                    |
| 2_10                  | 15400                 | 1,14                    | 336,74                  | 22700                    |
| 2_11                  | 16511                 | 1,23                    | 343,15                  | 20100                    |
| Srednja vrijednost    | 15865                 | 1,17                    | 331,49                  | 21809,09                 |
| Standardna devijacija | 776,81                | 0,07                    | 16,08                   | 985,77                   |

Na Sliku 11. prikazan je dijagram naprezanje-istezanje dobiven u programu TrapeziumX nakon ispitivanja rastezne čvrstoće promatranog kompozita.



Slika 11. Dijagram naprezanje-istezanje za UP/4staklo

### 4.3 Kompozit epoksidne matrice sa 6 slojeva lanenih vlakana

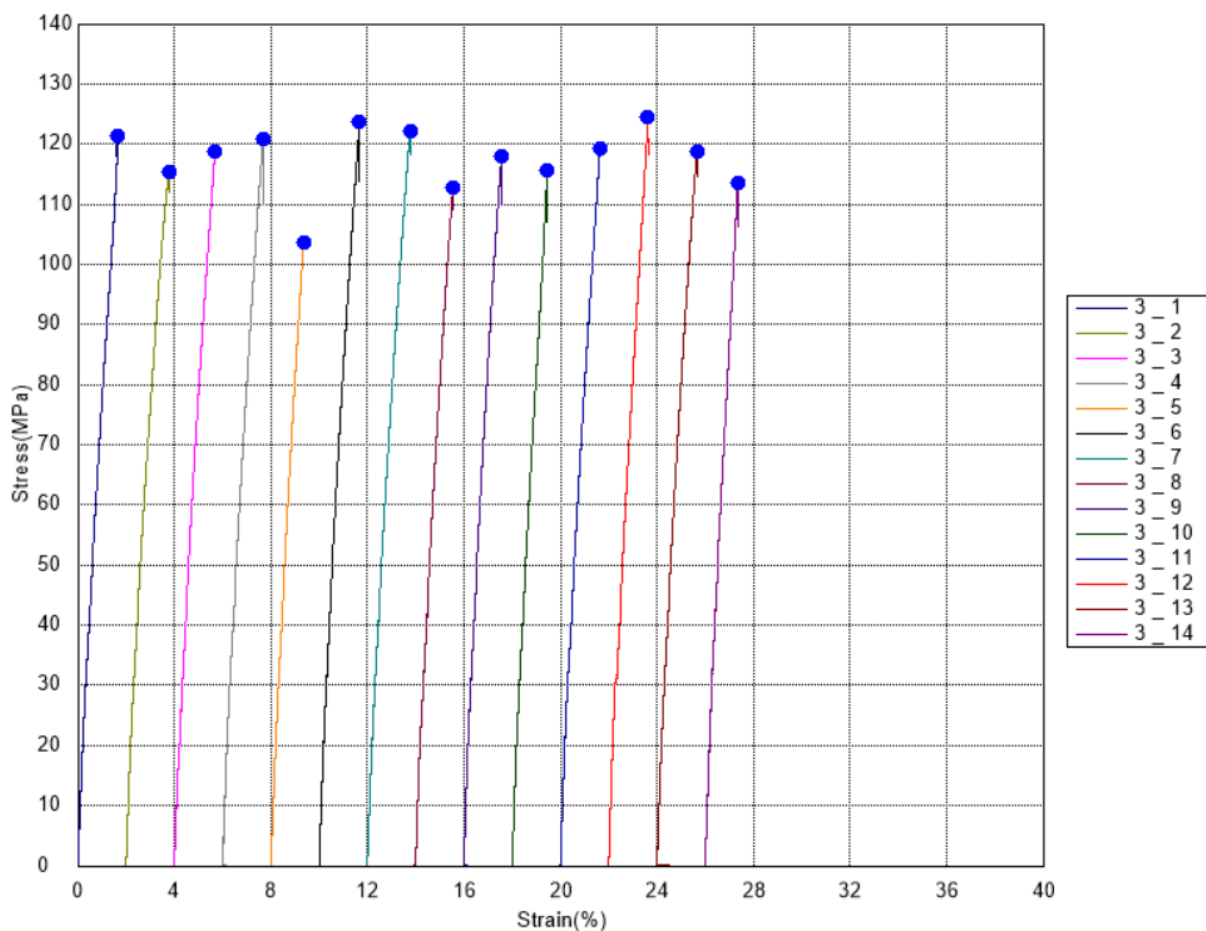
U tablici 10. prikazane su vrijednosti izmjerene rastezne čvrstoće, modula elastičnosti te prekidnog istezanja i maksimalne sile za kompozit s epoksidnom matricom i 6 slojeva lanenih vlakana kao ojačalo.

**Tablica 10. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće (lan – 6 slojeva, epoksidna smola)**

| Ispitno tijelo        | Maksimalna sila F [N] | Prekidno istezanje [mm] | Rastezna čvrstoća [MPa] | Modul elastičnosti [MPa] |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 3_1                   | 7303                  | 0,81                    | 121,39                  | 7800                     |
| 3_2                   | 7211                  | 0,90                    | 115,30                  | 7600                     |
| 3_3                   | 7013                  | 0,85                    | 118,70                  | 7800                     |
| 3_4                   | 7297                  | 0,84                    | 120,92                  | 7900                     |
| 3_5                   | 6355                  | 0,69                    | 103,70                  | 8200                     |
| 3_6                   | 6994                  | 0,84                    | 123,71                  | 8500                     |
| 3_7                   | 7547                  | 0,89                    | 122,25                  | 7900                     |
| 3_8                   | 6956                  | 0,78                    | 112,75                  | 7400                     |
| 3_9                   | 7334                  | 0,79                    | 117,88                  | 8100                     |
| 3_10                  | 7119                  | 0,73                    | 115,69                  | 8000                     |
| 3_11                  | 7316                  | 0,83                    | 119,37                  | 7700                     |
| 3_12                  | 7633                  | 0,82                    | 124,38                  | 7000                     |
| 3_13                  | 7304                  | 0,83                    | 118,79                  | 7900                     |
| 3_14                  | 6726                  | 0,68                    | 113,55                  | 8900                     |
| Srednja vrijednost    | 7150,57               | 0,81                    | 117,74                  | 7907,14                  |
| Standardna devijacija | 318,28                | 0,06                    | 5,20                    | 439,91                   |



Na Sliku 12. prikazan je dijagram naprežanje-istezanje dobiven u programu TrapeziumX nakon ispitivanja rastezne čvrstoće promatranog kompozita.



Slika 12. Graf naprežanje-istezanje za EP/6lan

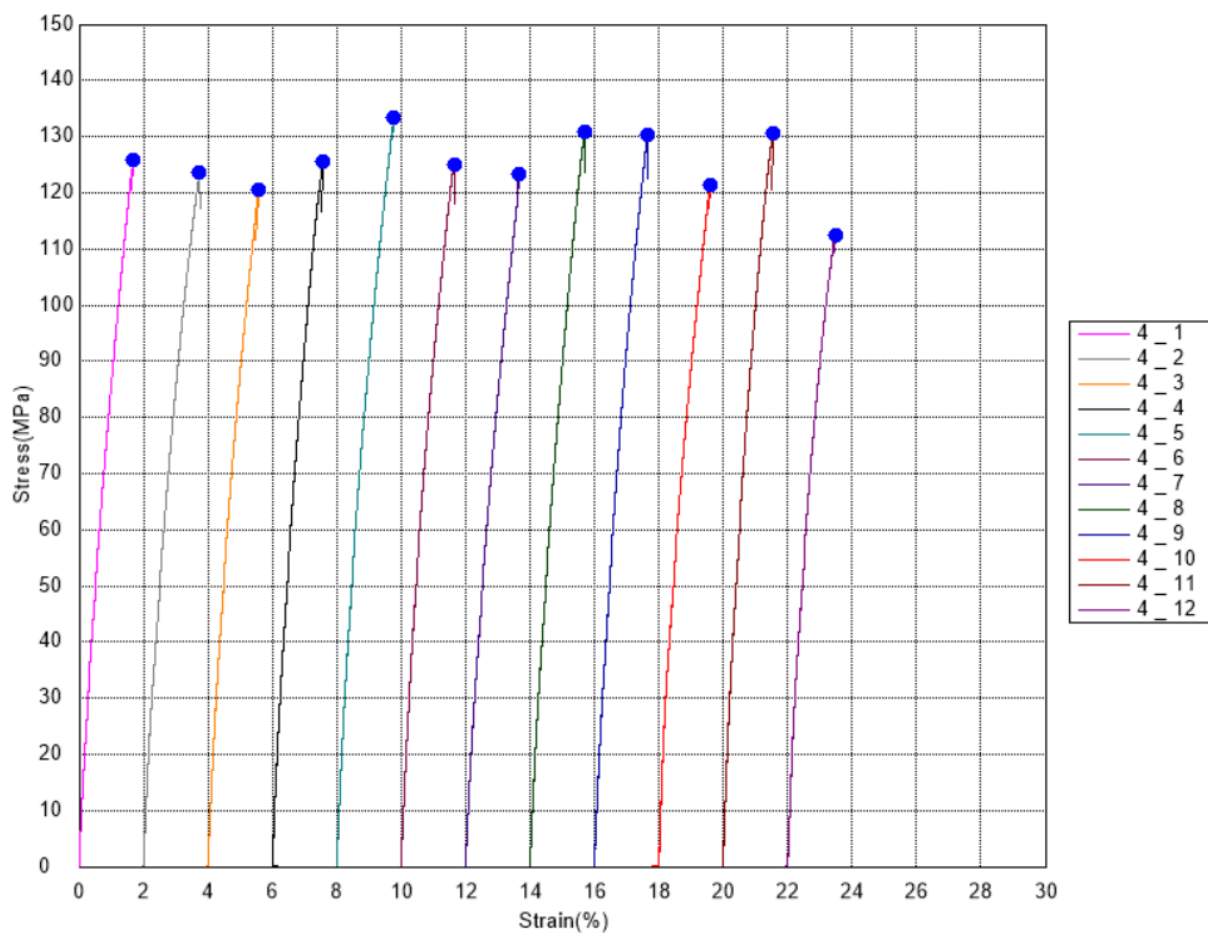
#### 4.4 Kompozit poliesterske matrice s 4 sloja lanenih vlakana, 2 sloja staklenih vlakana i 4 sloja lanenih vlakana

U tablici 11. prikazane su vrijednosti izmjerene rastezne čvrstoće, modula elastičnosti te prekidnog istežanja i maksimalne sile za kompozit sa staklenim vlaknima u blizini središnje ravnine.

**Tablica 11. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće (kompozit 4lan/2staklo/4lan, poliesterska smola)**

| Ispitno tijelo        | Maksimalna sila F [N] | Prekidno istežanje [mm] | Rastezna čvrstoća [MPa] | Modul elastičnosti [MPa] |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 4_1                   | 11356                 | 0,85                    | 125,86                  | 9200                     |
| 4_2                   | 11382                 | 0,87                    | 123,62                  | 8500                     |
| 4_3                   | 10872                 | 0,79                    | 120,64                  | 9500                     |
| 4_4                   | 10892                 | 0,79                    | 125,57                  | 10000                    |
| 4_5                   | 11960                 | 0,89                    | 133,47                  | 10000                    |
| 4_6                   | 11296                 | 0,83                    | 125,13                  | 10100                    |
| 4_7                   | 11354                 | 0,82                    | 123,38                  | 8600                     |
| 4_8                   | 11663                 | 0,85                    | 130,82                  | 9300                     |
| 4_9                   | 11654                 | 0,83                    | 130,21                  | 9800                     |
| 4_10                  | 10906                 | 0,80                    | 121,50                  | 10000                    |
| 4_11                  | 11275                 | 0,77                    | 130,50                  | 11000                    |
| 4_12                  | 10195                 | 0,74                    | 112,55                  | 9900                     |
| Srednja vrijednost    | 11233,75              | 0,82                    | 125,27                  | 9658,33                  |
| Standardna devijacija | 445,28                | 0,04                    | 5,43                    | 661,39                   |

Na Sliku 13. prikazan je dijagram naprezanje-istezanje dobiven u programu TrapeziumX nakon ispitivanja rastezne čvrstoće za promatrani kompozit.



Slika 13. Graf naprezanje-istezanje UP/4lan/2staklo/4lan

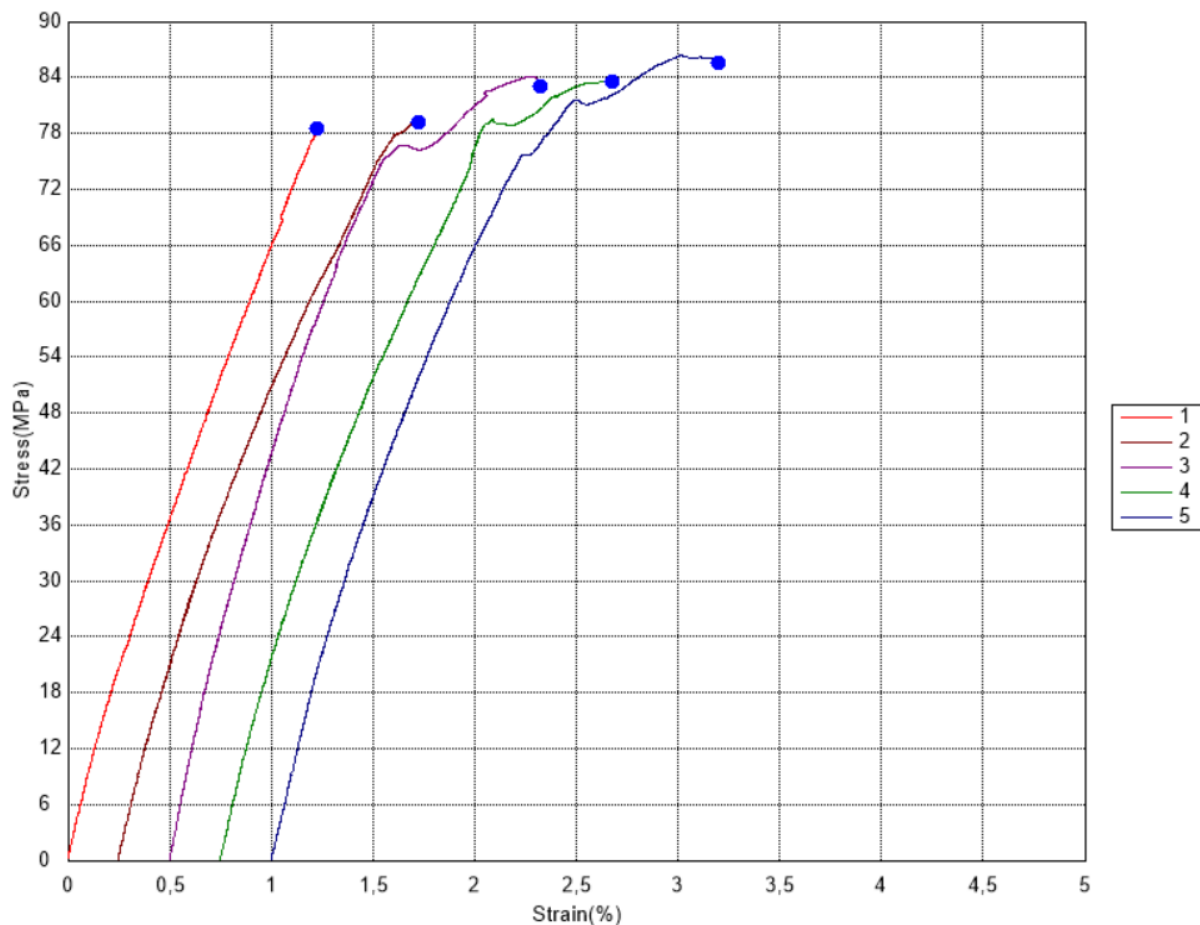
#### 4.5 Kompozit poliesterska matrica sa slojem staklenih vlakana, lanenih vlakana i staklenih vlakana

U tablici 12. prikazane su vrijednosti izmjerene rastezne čvrstoće, modula elastičnosti te prekidnog istezanja i maksimalne sile za promatrani kompozit, gdje su staklena vlakna u blizini vanjskih ploha..

**Tablica 12. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće (kompozit staklo/lan/staklo, poliesterska smola)**

| Ispitno tijelo        | Maksimalna sila F [N] | Prekidno istezanje [mm] | Rastezna čvrstoća [MPa] | Modul elastičnosti [MPa] |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 5 _ 1                 | 6374                  | 0,61                    | 78,59                   | 6200                     |
| 5 _ 2                 | 6603                  | 0,74                    | 79,13                   | 5800                     |
| 5 _ 3                 | 6988                  | 0,91                    | 83,01                   | 7400                     |
| 5 _ 4                 | 6920                  | 0,96                    | 83,54                   | 5900                     |
| 5 _ 5                 | 6867                  | 1,10                    | 85,58                   | 6200                     |
| Srednja vrijednost    | 6750,40               | 0,86                    | 81,97                   | 6300,00                  |
| Standardna devijacija | 229,01                | 0,17                    | 2,69                    | 572,71                   |

Na slici 14. prikazan je dijagram naprezanje-istezanje dobiven u programu TrapeziumX nakon ispitivanja rastezne čvrstoće za promatrani kompozit.



Slika 14. Graf naprezanje-istezanje UP/staklo/lan/staklo

#### 4.6 Usporedba rasteznih svojstava kompozita sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova

U tablici 13. navedena su rastezna svojstva ispitivanih kompozita. Navedena je rastezna čvrstoća, zajedno s rasteznim modulom elastičnosti. Kompoziti su poredani kako su prethodno označeni u tablicama. Dobiveni podaci su uspoređeni s minimalnim vrijednostima za kompozite ojačane staklenim vlaknima danima u Hrvatskom registru brodova. Usporedbe se provode samo sa staklenim vlaknima jer za lanena vlakna još ne postoje posebni zahtjevi.

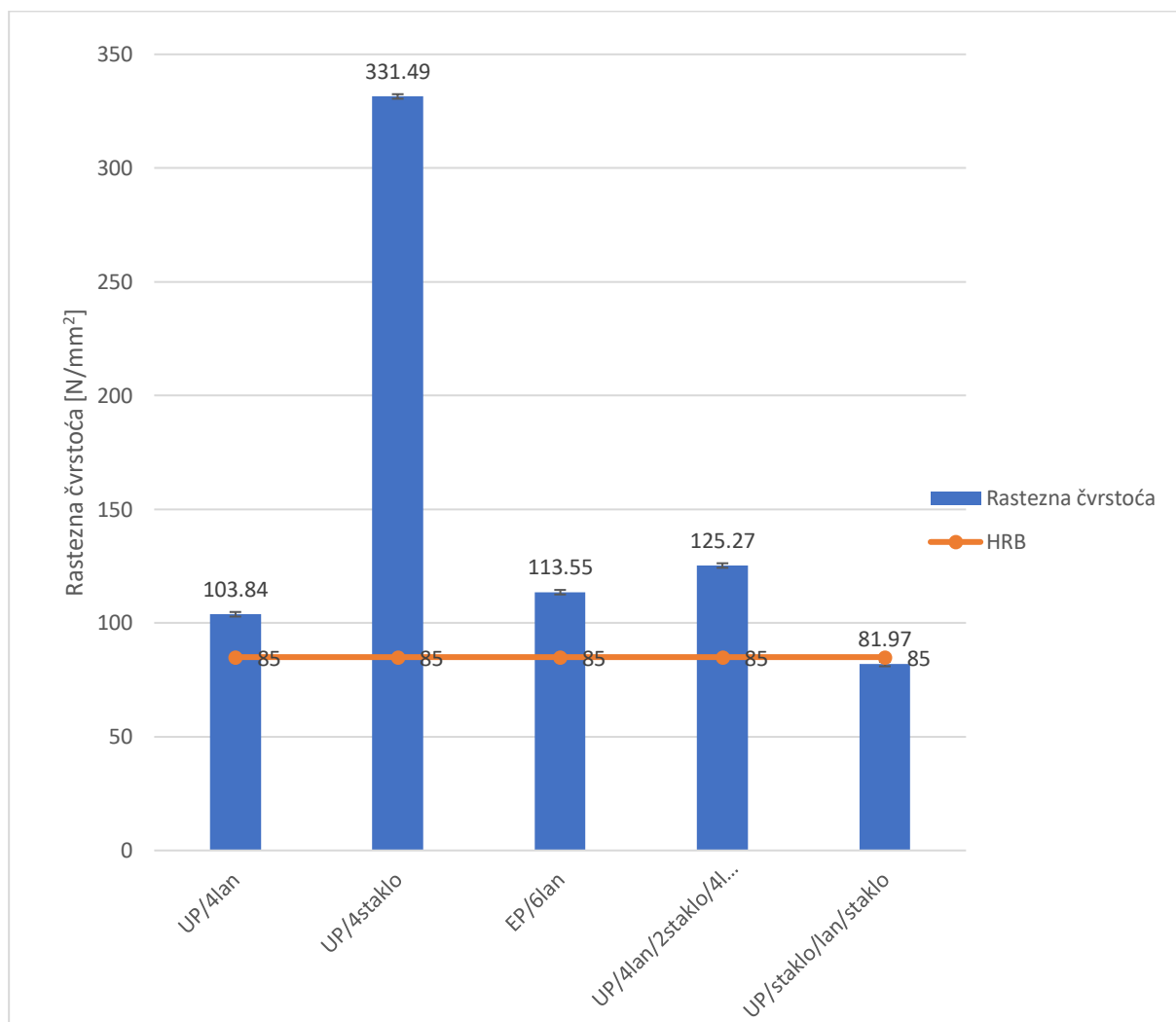
**Tablica 13. Rezultati ispitivanja**

| Redni broj kompozita | Maseni udio vlakana | Rastezna čvrstoća [MPa] | Rastezni modul elastičnosti [MPa] |
|----------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| UP/4lan              | 58,70%              | 103,84                  | 8105,88                           |
| UP/4staklo           | 73,80%              | 331,49                  | 21809,09                          |
| EP/6lan              | 41,57%              | 113,55                  | 7907,14                           |
| UP/4lan/2staklo/4lan | 55%                 | 125,27                  | 9658,33                           |
| UP/staklo/lan/staklo |                     | 81,97                   | 6300,00                           |
| <b>HRB</b>           |                     | <b>85</b>               | <b>6500</b>                       |

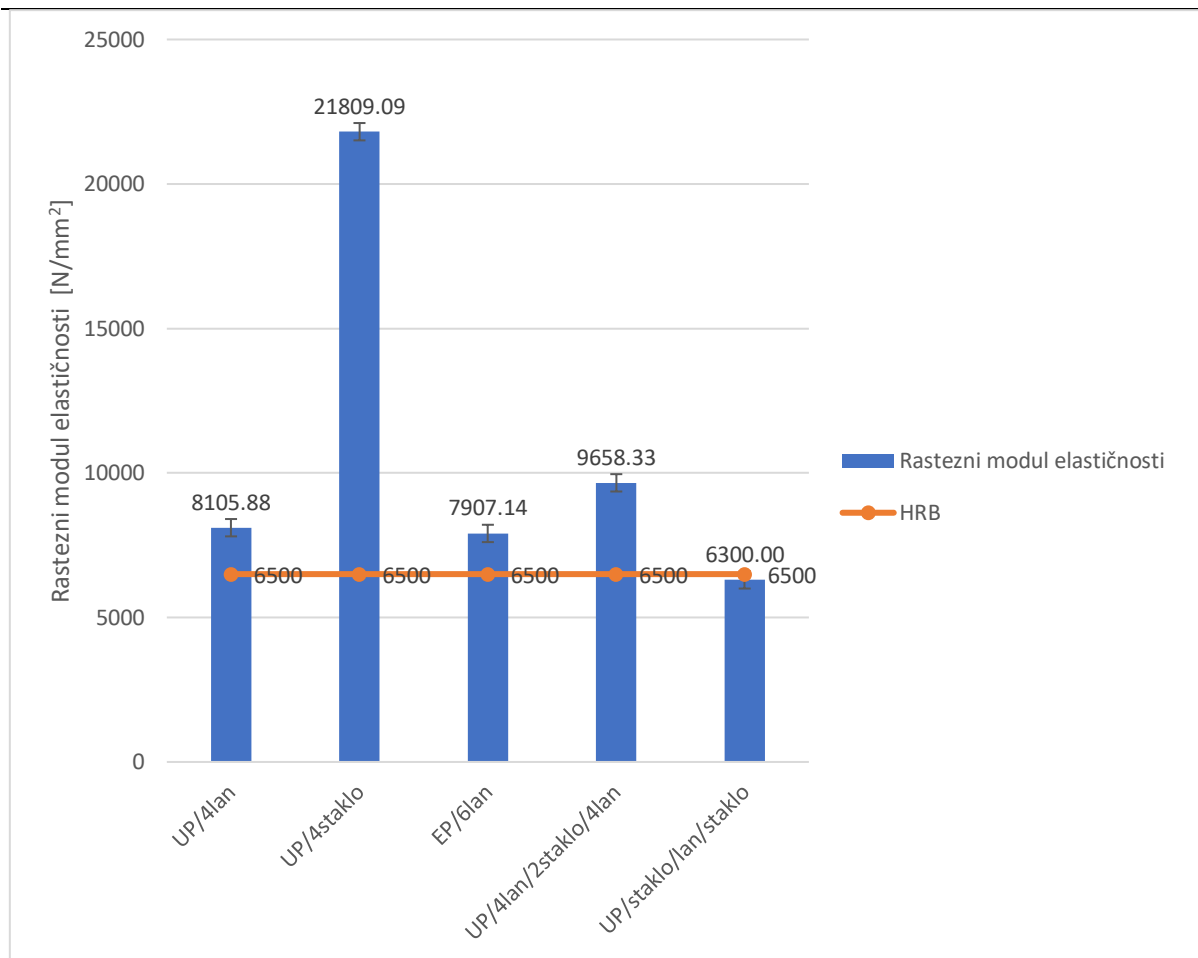
Iz tablice 13 vidljivo je da su prva četiri kompozita zadovoljila uvjete HRB-a. Peti kompozit je jedini koji nije zadovoljio minimalnu vrijednost zahtjeva Hrvatskog registra brodova. Staklena vlakna daju veće vrijednosti samostalno i u hibridnom obliku uz iznimku petog kompozita. Kompozit s EP/lan ima bolju čvrstoću od kompozita UP/lan, što je u skladu s očekivanjima, s obzirom na bolja adhezijska svojstva EP-a. Efekt razlike u broju slojeva na rastezna svojstva istražen je u završnom radu od Karle Pintur [16], gdje se pokazalo da se rastezna svojstva ne razlikuju bitno za kompozite s približno istim masenim udjelom vlakana, a različitim brojem slojeva. Povećanjem broja slojeva vlakana dolazi do povećanja rastezne čvrstoće do određenog broja slojeva (osam slojeva). Jedan od mogućih razloga je duži proces izrade kompozita s više slojeva i nemogućnost postizanja dovoljno dobre adhezije između matrice i vlakana jer dolazi do preranog umrežavanja [16].

#### 4.7 Grafička usporedba rezultata

Na slici 15. i slici 16. su grafički uspoređeni rezultati ispitivanja. Rezultati su uspoređeni s minimalnim zahtjevima HRB-a za kompozite sa staklenim vlaknima.



**Slika 15. Vrijednosti rastezne čvrstoće ispitivanih kompozita uspoređenih s minimalnim zahtjevom HRB-a za staklena vlakna.**



**Slika 16. Vrijednosti rasteznog modula elastičnosti kompozita uspoređenih s minimalnim zahtjevom HRB-a**



## 5. ZAKLJUČAK

Za potrebe ovoga ispitivanja izrađeno je pet ploča kompozita s različitim smolama, različitim vlaknima i različitim brojevima slojeva vlakana. Kompoziti su bili rezani s vodenim mlazom, Ploče su bile izrađene vakumskom infuzijom kako bi se dobila što bolja impregnacija vlakana, manja mogućnost pogreške u izradi i bolja svojstva.

Ispitivana su rastezna svojstva u skladu s Pravilnikom HRB-a. U tablici 13. jasno možemo vidjeti da su četiri kompozita zadovoljila uvjete HRB-a, a jedan koji nije zadovoljio je bio jako blizu. Kompozit koji nije zadovoljio rastezna svojstva je bio napravljen u posebnoj šarži i vizualnim testom se na njemu vidjelo dosta grešaka zbog kojih je unatoč pretpostavki da će imati najbolja svojstva, imao najlošija. Naime unutar kompozita su uočeni mjehurići zraka, došlo je do karbonizacije vlakana i bili su vidljivi zarezi na površini. Najbolja svojstva je pokazao kompozit s masenim udjelom staklenih vlakana od 73,80 % i poliesterskom matricom. Svojstva od ostala tri kompozita koja su zadovoljila svojstva su slična, ali najbolja je pokazao kompozit šest slojeva lanenih vlakana i matricom od epoksidne smole. Razlika u masenom djelu vlakana posljedica je velike razlike u gustoći stakla i lana, gdje staklo ima dvostruko veću gustoću. Epoksidna smola bolji je adheziv u kombinaciji s lanenim vlaknima. Odabirom prikladne matrice dobiva se bolji kompozit..

Lanena vlakna su se pokazala kao dobra alternativa u usporedbi sa staklenim vlaknima. Iako su svojstva staklenih bolja, lan ima dobar potencijal u maloj brodogradnji. Izradom boljih hibridnih kompozita mogli bi djelomično zamijeniti staklena vlakna i tako izvući najbolje od oba materijala.

## LITERATURA

- [1] Pilipović A. PROIZVODNJA KOMPOZITNIH TVOREVINA Uvod i definicije. 2022.
- [2] Filetin T, Kovačiček F, Indof J. Svojstva i primjena materijala. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2002.
- [3] Jelena Macan. Kompozitni materijali, interna skripta za studente Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnike. Zagreb; 2020.
- [4] Ivica Smojver. Mehanika kompozitnih materijala - interna skripta. Zagreb; 2007.
- [5] Pilipović A. PROIZVODNJA KOMPOZITNIH TVOREVINA Postupci proizvodnje polimernih kompozita. 2022.
- [6] Kamal K.Kar. Processing, Applications, Characterizations. 2017.
- [7] Pilipović A. PROIZVODNJA KOMPOZITNIH TVOREVINA Matrice. 2022.
- [8] Zvonimir Janović. Polimerizacija i polimeri. Zagreb: Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa; 1997.
- [9] Lubin George, Peters ST (Stanley T). Handbook of composites. Chapman & Hall; 1998. 1118 p.
- [10] Ali Munawar M. Natural fiber-reinforced polymer composites [Internet]. 2007 (pristupljeno: 08/17/2022). Dostupno na: <https://www.researchgate.net/publication/228636811>
- [11] Pilipović A. PROIZVODNJA KOMPOZITNIH TVOREVINA Ojačavala. 2022.
- [12] Diaconescu Alexandru. Flax fiber composite. 2019.
- [13] Navin Chand, Mohammed Fahim. Tribology of Natural Fiber Polymer Composites. 2nd ed. Sawston: Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering; 2020.
- [14] William F. Hosford. Mechanical Behavior of Materials. 2nd ed. Cambridge University Press; 2009.
- [15] Mladen Franz, Danko Čorić. Mehanička svojstva materijala - Interna skripta. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2008.
- [16] Pintur K. Mehanička svojstva kompozita ojačanih različitim brojem slojeva lanenih vlakana i njihova primjena u brodogradnji [Internet]. 2022. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:801235>