# Biokompozitni materijali za gradnju trupa rekreacijskog plovila

**Blažeka, Tin**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*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:235:511720

*Rights / Prava:* Attribution-NoDerivs 3.0 Unported/Imenovanje-Bez prerada 3.0

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-28**

*Repository / Repozitorij:*

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








SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Tin Blažeka**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:
dr. sc. Neven Hadžić, izv. prof.

Student:
Tin Blažeka

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem mentoru dr. sc. Nevenu Hadžiću na iskazanoj stručnoj pomoći i suradnji koji je sa svojim savjetima i stručnim znanjem bio poticaj u odabiru teme, te uvelike olakšao provođenje eksperimentalnog dijela završnog rada.

Tin Blažeka

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje

| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
|---|---|
| Datum | Prilog |
| Klasa: **602 - 04 / 21 - 6 / 1** | |
| Ur.broj: **15 - 1703 - 21 -** | |

# ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Tin Blažeka** Mat. br.: 0035211635

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Biokompozitni materijali za gradnju trupa rekreacijskog plovila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Biocomposite materials for recreational vessel hull construction**

Opis zadatka:

Razvoj suvremenih materijala se u sve značajnijoj mjeri oslanja na projekciju cjeloživotnog ciklusa proizvoda što u prvom redu podrazumijeva njihov utjecaj na okoliš. U tom je kontekstu značajno intenziviran i razvoj biokompozita. Međutim, njihova je primjena trenutno ograničena na specifične proizvode uz koje se ne veže zahtjevno radno okruženje poput onog koje se susreće na brodu. Jedan od osnovnih uzroka tome je značajan nedostatak informacija i iskustava vezanih uz osnovna fizikalna, kemijska, mehanička i tehnološka svojstva biokompozita. Stoga je osnovni zadatak ovog završnog rada istražiti mogućnosti primjene biokompozitnih materijala za potrebe gradnje trupa rekreacijskog plovila, odnosno u radu je potrebno:

1. Prikazati osnovne značajke i područja primjene biokomozita
2. Pripremiti plan ispitivanja mehaničkih i kemijskih svojstava izabranih biokompozita
3. Provesti ispitivanja mehaničkih i kemijskih svojstava izabranih biokompozita
4. Izabrati odgovarajući biokopmozit za gradnju trupa rekreacijskog plovila
5. Definirati geometriju plovila i ispitati uvjete plovnosti.

Tijekom rada koristiti literaturu i infrastrukturu dostupnu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Zadatak zadan:

30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Neven Hadžić

Datum predaje rada:
**1. rok:** 18 veljače 2021.
**2. rok (izvanredni):** 5. srpnja 2021.
**3. rok:** 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
**1. rok:** 22.2. – 26.2.2021.
**2. rok (izvanredni):** 9.7.2021.
**3. rok:** 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Ćatipović

# SADRŽAJ

SADRŽAJ ..... I
POPIS SLIKA ..... II
POPIS TABLICA ..... IV
POPIS OZNAKA ..... V
SAŽETAK ..... VII
SUMMARY ..... VIII
1. UVOD ..... 1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI ..... 4
2.1. Općenito o kompozitnim materijalima ..... 4
2.2. Podjela kompozita ..... 5
2.3. Matrica kompozita ..... 5
2.4. Ojačalo ..... 8
3. BIOKOMPOZITI ..... 10
3.1. Podjela prirodnih vlakana ..... 10
3.2. Mehanička svojstva prirodnih vlakana ..... 11
3.3. Prednosti i nedostaci prirodnih vlakana ..... 12
3.4. Odabir matrice ..... 12
4. BIOKOMPOZITI U BRODOGRADNJI ..... 13
4.1. Biokompoziti u vodi ..... 13
4.2. Primjena biokompozita u brodogradnji ..... 15
5. EKSPERIMENTALNI DIO ..... 16
5.1. Priprema za ispitivanje ..... 16
5.1.1. Izrada ispitnih epruveta ..... 16
5.1.2. Definiranje dimenzija ispitnih epruveta ..... 19
5.1.3. Izrada kalupa ..... 21
5.1.4. Postupak izrade ispitnih epruveta ..... 22
5.1.5. Statistička obrada rezultata ..... 26
5.2. Rezultati ispitivanja ..... 27
5.2.1. Statičko vlačno ispitivanje ..... 27
5.2.2. Oprema za statičko vlačno ispitivanje ..... 27
5.2.3. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja (lan) ..... 28
5.2.4. Proračun mehaničkih svojstva za statičko vlačno ispitivanje (lan) ..... 33
5.2.5. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja (juta) ..... 36
5.2.6. Proračun mehaničkih svojstva za statičko vlačno ispitivanje (juta) ..... 41
5.2.7. Savojno ispitivanje ..... 44
5.2.8. Rezultati savojnog ispitivanja (lan) ..... 45
5.2.9. Proračun mehaničkih svojstva za savojnu čvrstoću (lan) ..... 49
5.2.10. Rezultati savojnog ispitivanja (juta) ..... 50
5.2.11. Proračun mehaničkih svojstva za savojnu čvrstoću (juta) ..... 53
5.2.12. Ispitivanje žilavosti ..... 55
5.2.13. Rezultati ispitivanja žilavosti ..... 56
5.2.14. Test higroskopnosti ..... 58
6. GEOMETRIJA PLOVILA I PRORAČUN PLOVNOSTI ..... 59
6.1. Izračun mase plovila ..... 61
6.2. Proračun plovnosti ..... 61
7. ZAKLJUČAK ..... 63
LITERATURA ..... 64
PRILOG ..... 66

# POPIS SLIKA

Slika 1.1. Dijagram ukupne potrošnje prirodnih vlakana u kompotnim materijalima .....3
Slika 2.1. Ojačalo i matrica .....5
Slika 2.2. Raspored vlakana u matrici .....8
Slika 4.1. Bubrenje kompozita .....14
Slika 4.2. Dijagram postotka upijene vode u kompozitu u ovisnosti o vremenu .....14
Slika 4.3. Sportska jedrilica „GreenBente24“ .....15
Slika 5.1. Lanena tkanina .....16
Slika 5.2. Jutene vreće .....17
Slika 5.3. Epoksidna smola .....17
Slika 5.4. Svojstva epoksidne smole .....18
Slika 5.5. Dimenzija epruveta za vlačno ispitivanje .....19
Slika 5.6. Dimenzije epruveta za savojno ispitivanje .....19
Slika 5.7. Dimenzije epruveta za ispitivanje žilavosti .....20
Slika 5.8. Izrada kalupa .....21
Slika 5.9. Kalup .....22
Slika 5.10. Izrađene epruvete za mehanička ispitivanja .....25
Slika 5.11. Oprema za statičko vlačno ispitivanje .....27
Slika 5.12. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 1 (lan) .....28
Slika 5.13. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 2 (lan) .....29
Slika 5.14. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 3 (lan) .....30
Slika 5.15. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 4 (lan) .....31
Slika 2.16. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 5 (lan) .....32
Slika 5.17. Dijagram „sila-produljenje“ za sve epruvete (lan) .....33
Slika 5.18. Dijagram „naprezanje-istezanje“ (lan) .....34
Slika 5.19. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 1 (juta) .....36
Slika 5.20. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 2 (juta) .....37
Slika 5.21. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 3 (juta) .....38
Slika 5.22. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 4 (juta) .....39
Slika 5.23. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 5 (juta) .....40
Slika 5.24. Dijagram „sila-produljenje“ za sve epruvete (juta) .....41
Slika 2.25. Dijagram „naprezanje-istezanje“ (juta) .....42
Slika 5.26. Savojno ispitivanje .....44
Slika 5.27.Dijagram „sila-progib“ za epruvetu 1 (lan) .....45
Slika 5.28. Dijagram „sila-progib“ za epruvetu 2 (lan) .....46
Slika 5.29. Dijagram „sila-progib“ za epruvetu 3 (lan) .....47
Slika 5.30. Dijagram „sila-progib“ za epruvetu 4 (lan) .....47
Slika 5.31. Dijagram „sila-progib“ za epruvetu 5 (lan) .....48
Slika 5.32. Dijagram „sila-progib“ za sve epruvete (lan) .....48
Slika 5.33. Dijagram „sila-progib“ za epruvetu 1 (juta) .....50
Slika 5.34. Dijagram „sila-progib“ za epruvetu 2 (juta) .....51
Slika 5.35. Dijagram „sila-progib“ za epruvetu 3 (juta) .....51
Slika 5.36. Dijagram „sila-progib“ za epruvetu 4 (juta) .....52
Slika 5.37. Dijagram „sila-progib“ za epruvetu 5 (juta) .....52

Slika 5.38. Dijagram „sila-progib“ za sve epruvete (juta).....53
Slika 5.39. Charpyjev bat.....55
Slika 5.40. Epruvete za test higroskopnosti.....58
Slika 6.1. Nacrt rebara.....59
Slika 6.2. Pogled sa boka i tlocrt.....60
Slika 6.3. Prikaz 3D modela plovila.....60

# POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva matrica ....7
Tablica 2. Mehanička svojstva staklenih, aramidnih i ugljičnih vlakana ....9
Tablica 3. Kemijski sastav biljnih vlakana ....11
Tablica 4. Mehanička svojstva biljnih vlakana ....11
Tablica 5. Izrađene ispitne epruvete (juta)....23
Tablica 6. Izrađene ispitne epruvete (lan)....24
Tablica 7. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 1 (lan)....28
Tablica 8. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 2 (lan)....29
Tablica 9. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 3 (lan)....30
Tablica 10. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 4 (lan)....31
Tablica 11. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 5 (lan)....32
Tablica 12. Dimenzije i mehanička svojstva za vlačnu čvrstoću za sve epruvete (lan)....34
Tablica 13. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 1 (juta)....36
Tablica 14. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 2 (juta)....37
Tablica 15. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 3 (juta)....38
Tablica 16. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 4 (juta)....39
Tablica 17. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 5 (juta)....40
Tablica 18. Dimenzije i mehanička svojstva za vlačnu čvrstoću za sve epruvete (juta)....42
Tablica 19. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 1 (lan)....45
Tablica 20. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 2 (lan)....46
Tablica 21. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 3 (lan)....46
Tablica 22. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 4 (lan)....47
Tablica 23. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 5 (lan)....48
Tablica 24. Dimenzije i mehanička svojstva za savojnu čvrstoću za sve epruvete (lan)....49
Tablica 25. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 1 (juta)....50
Tablica 26. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 2 (juta)....51
Tablica 27. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 3 (juta)....51
Tablica 28. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 4 (juta)....52
Tablica 29. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 5 (juta)....52
Tablica 30. Dimenzije i mehanička svojstva za savojnu čvrstoću za sve epruvete (juta)....53
Tablica 31. Rezultati ispitivanja žilavosti (lan)....56
Tablica 32. Rezultati ispitivanja žilavosti (juta)....57

# POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---|---|---|
| $A$ | $mm^2$ | površina |
| $A_{cu}$ | $kJ/m^2$ | žilavost |
| $B$ | mm | širina epruvete za ispitivanje žilavosti |
| $b_1$ | mm | širina vrata epruvete za ispitivanje žilavosti |
| $b_2$ | mm | širina pri kraju epruvete za statičko vlačno ispitivanje |
| $E$ | $N/mm^2$ | modul elastičnosti |
| $E_{vl}$ | $N/mm^2$ | vlačni modul elastičnosti |
| $E_s$ | $N/mm^2$ | savojni modul elastičnosti |
| $f$ | mm | progib |
| $F$ | N | sila |
| $F_{max}$ | N | maksimalna sila |
| $\bar{h}$ | mm | srednja debljina epruvete |
| $h_1$ | mm | početna visina Charpyjevog bata |
| $h_2$ | mm | konačna visina Charpyjevog bata |
| $k$ | | broj stupnjeva slobode uzorka |
| $L$ | mm | Početna udaljenost između čeljusti kidalice |
| $L_0$ | mm | mjerna duljina epruvete za statičko vlačno ispitivanje |
| $l$ | mm | produljenje pri statičkom vlačnom ispitivanju |
| $l_1$ | mm | duljina uskog paralelnog dijela epruvete za statičko vlačno ispitivanje |
| $l_2$ | mm | udaljenost između proširenog paralelnog dijela epruvete za statičko vlačno ispitivanje |
| $l_3$ | mm | ukupna duljina epruvete za statičko vlačno ispitivanje |
| $L_s$ | mm | razmak između oslonaca savojnog ispitivanja |
| $n$ | mm | količina uzoraka |
| $p$ | | vjerojatnost |
| $R$ | mm | radijus zakrivljenosti epruvete za statičko vlačno ispitivanje |
| $S$ | | standardna devijacija |
| $R_m$ | $N/mm^2$ | vlačna čvrstoća |
| $R_{ms}$ | $N/mm^2$ | savojna čvrstoća |
| $t$ | | varijabla Studentove t-razdiobe |
| $\bar{X}$ | | aritmetička sredina uzoraka |
| $\alpha$ | | stupanj značajnosti |
| $\varepsilon$ | mm/mm | istezanje |
| $\mu$ | | procijenjeno očekivanje osnovnog skupa |
| $\mu_{Rm,vl}$ | | intervalna procjena vlačne čvrstoće |

| | | |
|---|---|---|
| $\mu_{Rm,s}$ | | intervalna procjena savojne čvrstoće |
| $\mu_{E,s}$ | | intervalna procjena savojnog modula |
| $\mu_{E,vl}$ | | intervalna procjena vlačnog modula |
| $\mu_{Acu}$ | | intervalna procjena udarnog rada loma |
| $\sigma$ | $N/mm^2$ | naprezanje |
| $m_{vl}$ | g | masa vlakana |
| $n_{sl}$ | | broj slojeva |
| $m_{uk}$ | g | ukupna masa jednog uzorka |
| $w_t$ | % | maseni udio ojačala u kompozitu |
| $L_{OA}$ | mm | duljina preko svega |
| $B_p$ | mm | ukupna širina plovila |
| $D$ | mm | ukupni gaz plovila |
| $\rho_{lan}$ | $kg/m^3$ | gustoća kompozita ojačanog lanenim vlaknima |
| $T_g$ | °C | temperatura izgaranja vlakana |
| $m_p$ | kg | masa plovila |
| $\Delta$ | kg | ukupna masa plovila |
| $F_L$ | N | sila uzgona |
| $V$ | $m^3$ | volumen podvodnog dijela forme plovila |
| $\rho_{sv}$ | $kg/m^3$ | gustoća slatke vode |
| $T$ | mm | gaz |
| $KG$ | mm | položaj centra masa plovila na z osi |
| $KB_0$ | mm | položaj centra istisnine na z osi |
| $M_0G$ | mm | početna metacentarska visina |

# SAŽETAK

Tema završnog rada je primjena biokompozita za gradnju rekreacijskih plovila. U današnje vrijeme pokušava se pronaći ekološki prihvatljivu alternativu svim materijalima koji tijekom svoje proizvodnje zahtijevaju veliku količinu energije te nemaju mogućnost recikliranja. Tako i u gradnji rekreacijskih plovila kao i u maloj brodogradnji trenutno se koriste materijali koji štetno utječu na okoliš.

Teoretski dio ovog završnog rada daje uvid u prednosti i nedostatke kompozitnih materijala i prirodnih vlakana te poteškoće u upotrebi istih u zahtjevnom okruženju u kojem se nalaze. Eksperimentalni dio rada opisuje izradu dvije vrste kompozita ojačanih prirodnim biljnim vlaknima s matricom od epoksidne smole s visokim udjelom biorazgradivog sadržaja. Također, opisuje se ispitivanje mehaničkih svojstava provedenih na materijalu koji ukazuju na moguću primjenu ovog materijala u raznim granama industrije. Nadalje, prikazan je kratki test higroskopnosti koji je trenutačno i najveća prepreka u primjeni ovog materijala u uvjetima velike vlage ili potpune uronjenosti u vodu.

Zadnji dio ovog rada obuhvaća analizu plovnosti rekreacijskog plovila izrađenog od biokompozita. Izračunom mase plovila i proračunom početnog stabiliteta kojeg definiraju tri uvjeta plovnosti pokazalo se kako je ovaj materijal moguće primijeniti za izrađen model plovila.

Ključne riječi: lanena vlakna, jutena vlakna, biokompozit, mehanička svojstva, kemijska svojstva, primjena biokompozita

## SUMMARY

In this bachelor thesis, the possibility of application of biocomposite material for recreational craft in marine environment was analyzed. Today, scientists are trying to provide an alternative to all the materials that, during their production, require a lot of energy and don't have a possibility of recycling. So, in marine application materials that are currently used have significant ecological impact on its environment.

Theoretical part of the thesis gives an insight into the advantages and disadvantages of composite materials and natural fibers, also it gives an insight to problems of application of this types of materials exposed to rough environment. Experimental part of this paper presets manufacturing and mechanical testing of two types of composite material reinforced with natural fibers using an epoxy matrix with a large proportion of biodegradable content. Results of mechanical testings show the possibility of wide application to all branches of industry. Also it describes a short experiment of hygroscopicity which currently represents the main obstacle for application of these types of materials when exposed to harsh environment.

The last part of this paper deals with calculation of essential characteristics due to the application of biocomposites to a recreational vessel, in this case a canoe. The calculation of the vessel mass and initial stability, defined by the three conditions of initial stability, showed that this material could be applied to the developed 3D model of the vessel.

Key words: flax fiber, jute fiber, biocomposite, mechanical properties, chemical properties, application of biocomposites.

# 1. UVOD

Stopa rasta u korištenju neobnovljivih materijala na bazi fosilnih naftnih resursa predstavlja ozbiljnu prijetnju ne samo ljudskoj populaciji nego i cjelokupnoj kvaliteti života. Ljudske su aktivnosti kroz protekli niz godina uvelike odgovorne za sva ekološka pitanja koja se suvremenom čovjeku nameću u vidu onečišćenja okoliša i poboljšanja kvalitete života. Svijet u kojem živimo stalno je pod prijetnjom zagađenja. Ako se ne djeluje brzo i učinkovito na ovo pitanje, čovječanstvo će se morati nositi s velikim izazovom u nadolazećoj budućnosti, prije svega s klimatskim promjenama. Smanjenje uporabe proizvoda koji nisu ekološki prihvatljivi i uporaba biorazgradivih proizvoda predstavlja izazov na području materijala, a tu svoje mjesto uvelike zauzimaju ekološki prihvatljivi kompoziti koji mogu biti djelomično ili potpuno biološkog podrijetla, [1].

Uporaba prirodnih vlakana u kompozitnoj industriji odavno se prakticira. Tijekom posljednjih 80 godina došlo je do smanjenja interesa za uporabom prirodnih vlakana zbog razvoja sintetičkih vlakana poput staklenih i ugljičnih vlakna. Rastuća uporaba sintetskih vlakana gotovo je ugrozila razvoj i uporabu prirodnih vlakana. Međutim, posljednjih godina, porastom razine svijesti o ekološkoj održivosti u društvu, uporaba prirodnih vlakana u polimernim kompozitima predstavlja održivu alternativu sintetskim vlaknima. Tako danas prirodna vlakna postaju sve popularnija u primjeni i stoga njihova proizvodnja raste na globalnoj razini, [1].

Polimerni kompoziti ojačani prirodnim vlaknima predstavljaju materijal koji kombinira najbolja svojstva oba materijala. Suvremena tehnologija uvelike je pridonijela novom i uzbudljivom razvoju u području polimernih kompozita. Europske zemlje naglašavaju uporabu biorazgradivih tvari, a tu naročito svoj doprinos daje automobilska industrija koja je pokazala veći interes za korištenje prirodnih kompozitnih materijala. Najveća prednost prirodnih vlakna su njihova svojstva poput male mase i niske cijene te ono najvažnije, ekološka prihvatljivost koja je pogodnija u usporedbi sa staklenim i ostalim sintetičkim vlaknima, [1].

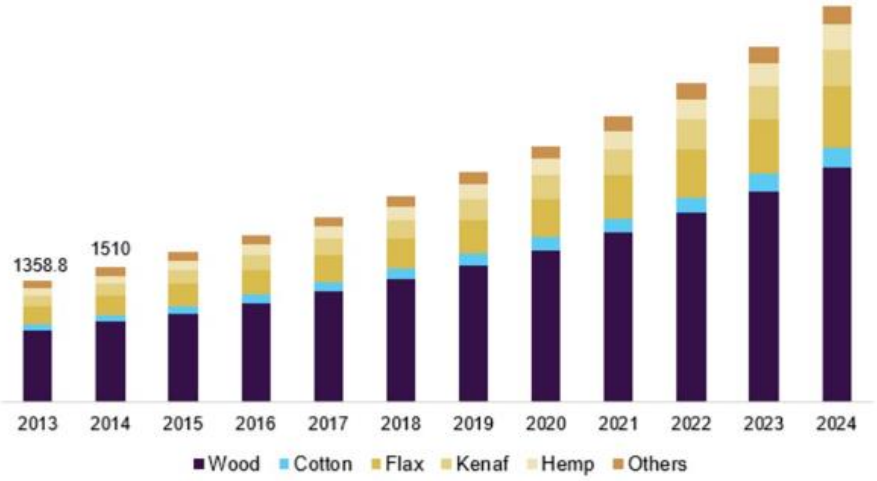
S ekološkog stajališta biokompoziti koji su dostupni na tržištu općenito se smatraju ekološki prihvatljivima zahvaljujući uporabi ojačala od biljnih vlakana, iako je u većini slučajeva njihova matrica dobivena iz fosilnih goriva. Ipak, razvojem novih tehnologija i utjecajem većih ulaganja u biorazgradive materijale razvija se nova skupina matrica s udjelom biorazgradivog sadržaja i do 40%, [2].

Kompoziti s prirodnim ojačalima predstavljaju potrošnju od 362,000 t u Europi u 2010., što čini oko 15 % ukupne proizvodnje kompozita, procijenjene na 2,5 milijuna tona godišnje. Očekuje se da će taj postotak doseći oko 30 % u 2021. godini od ukupne potrošnje kompozita (oko 3,2 milijuna tona). Glavni čimbenici koji doprinose ubrzanom rastu primjene tih materijala su; [3]:

- ograničeni resursi fosilnih goriva koji su sve skuplji
- održivi razvoj i zabrinutost oko klimatskih promjena
- europska re-industrijalizacija djelomično utemeljena na razvoju bio-ekonomije
- potrošači zahtijevaju veću odgovornost prema održivom razvoju i zaštite okoliša.

Glavni čimbenik koji ograničava razvoj bioloških materijala i njihovo masovno probijanje na tržište je omjer proizvodnje i troškova koji još uvijek pogodniji kod sintetskih materijala. Nedostatak podataka o životnom ciklusu tih materijala također ograničava njihov razvoj, [3].

Europska Unija je odigrala značajnu ulogu u promicanju zaštite okoliša uporabom ekoloških kompozitnih proizvoda izdavanjem smjernica i nizom zakonskih regulativa koje potiču uporabu materijala koji imaju svojstvo recikliranja. Uporaba polimernih kompozita ojačanih prirodnim vlaknima dobiva brzi zamah u cijelom svijetu. Slika 1.1. pokazuje potrošnju prirodnih vlakana u industriji tijekom posljednjih 8 godina te procjenu daljnjeg rasta interesa za prirodna vlakna. U Europi, Njemačka dominira uporabom dvije trećine svih prirodnih vlakana u polimernim kompozitima u automobilskoj industriji, [1]. Osim automobilske industrije, kompoziti ojačani prirodnim vlaknima sve se više upotrebljavaju i u ostalim granama industrije poput zrakoplovstva, brodogradnje, elektrotehnike, transporta, industrije pakiranja i sl, [1].




Slika 1.1. Dijagram ukupne potrošnje prirodnih vlakana u kompozitnim materijalima (USD), [4]

Broj objavljenih radova na temu razgradivosti kompozita ojačanih vlaknima pod utjecajem vlage, UV zračenja i povišenih temperatura je također u porastu što pokazuje interes znanstvene zajednice i industrije za ovu temu, [2].

# 2. KOMPOZITNI MATERIJALI

## 2.1. Općenito o kompozitnim materijalima

Kompozitni materijali (kompoziti) su materijali koji se dobivaju spajanjem dva ili više različitih materijala koji međusobno imaju veoma različita svojstva. Spajanjem materijala na određen način dobivamo novi materijal s novim jedinstvenim svojstvima koja materijal zasebno ne posjeduje. U strukturi kompozitnog materijala lagano je razlikovati različite materijale jer se oni ne otapaju jedan u drugom niti se jedan s drugim stapa. Kompozitni materijali postoje i u prirodi gdje je drvo jako dobar primjer vlakna spojenih matricom koja se naziva lignin, [5].

Kompozitni materijali nisu inovacija, naime koriste se već jako dugo vrijeme u ljudskoj povijesti. Danas su zanimljivi zbog svojih specifičnih svojstava, najviše svoje specifične čvrstoće, [5].

Prednosti kompozitnih materijala su, [6]:

- mogućnost izrade vrlo složenih oblika
- smanjenje troškova naknadne obrade dijelova
- mogućnost spajanja dijelova tijekom samog postupka proizvodnje
- dimenzijska stabilnost pri ekstremnim radnim uvjetima
- otpornost na koroziju.

Nedostaci kompozitnih materijala su, [6]:

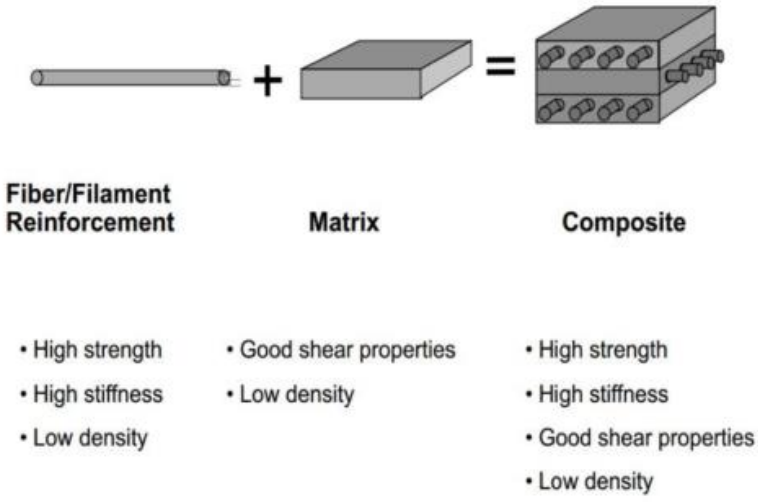
- popravak kompozitnih proizvoda je kompliciraniji nego kod metala
- nije nužno da su kompoziti superiorniji metalima u svim svojstvima
- konstrukcijski problemi (spajanje kompozitnih dijelova, izrada provrta i sl.)
- međuslojna naprezanja i mogući lom, anizotropna svojstva materijala i sl.

## 2.2. Podjela kompozita

Razlikujemo kompozite ojačane vlaknima, kompozite ojačane česticama i strukturne kompozite (laminati i složene konstrukcije), [7].

U većini slučajeva kao i u ovom završnom radu koristi se jedan materijal kao kontinuirana faza (matrica), a sa njom su spojeni odvojeni dijelovi druge faze koja služi kao ojačalo te doprinosi krutosti i čvrstoći, [8].

Stoga će ovdje, kompozitni materijali, biti podijeljeni na vrstu matrice i vrstu ojačala, [8].




Slika 2.1 Ojačalo i matrica, [8]

## 2.3. Matrica kompozita

Zadaće matrica je da:

- tvori sa ojačalom kompaktnu strukturu
- štiti ojačalo od vanjskih utjecaja
- ima važnu funkciju u prijenosu opterećenja na ojačalo
- daje vanjsku formu kompozitu
- određuje njegovo ponašanje s obzirom na djelovanje atmosfere itd, [7].

Općenito, kompozitni materijali mogu se svrstati u tri skupine na temelju materijala matrice, a one su; [9]:

- kompoziti s polimernom matricom (PMC)
- kompoziti s metalnom matricom (MMC)
- kompoziti s keramičkom matricom (CMC).

**Kompoziti s polimernom matricom**

Najčešće korišteni matrični materijali su polimerni. U usporedbi sa kompozitima sa metalnom i keramičkom matricom imaju lošija mehanička svojstva. Međutim, korištenjem raznih ojačala mehanička svojstva se mijenjaju. Druga pogodnost polimerne matrice je obrada polimernih kompozita koja ne zahtijeva visoku temperaturu i tlak. Također oprema potrebna za proizvodnju polimernih kompozita je jednostavnija. Zbog toga su se kompoziti s polimernom matricom razvili vrlo brzo, te su se počeli i široko primjenjivati.

Kompoziti s polimernom matricom se koriste zato što su ukupna svojstva kompozita superiornija u odnosu na svojstva pojedinačnih komponenata, na primjer polimera / keramike. Kompoziti imaju veći modul elastičnosti nego samo polimerna komponenta i nisu krhki kao sama duromerna matrica.[10]

Danas se najčešće koriste dvije vrste polimernih kompozita s obzirom na vrstu ojačala:

• polimerni kompoziti ojačani vlaknima (FRP)

• polimerni kompoziti ojačani česticama (PRP).

**Kompoziti s metalnom matricom**

Kompoziti s metalnom matricom imaju mnoge prednosti u odnosu na monolitne metale poput većeg specifičnog modula, veće specifične čvrstoće, boljih svojstava pri povišenim temperaturama. Zbog svojih svojstava kompoziti s metalnom matricom imaju širok raspon proizvoda u kojima se upotrebljavaju, npr. mlaznica komore za izgaranje (u raketnim sustavima), kućišta, cijevi, kabeli, izmjenjivači topline, itd., [9].

**Kompoziti s keramičkom matricom**

Jedan od glavnih ciljeva u proizvodnji kompozita s keramičkom matricom jest povećati čvrstoću. Uz to se uporabom keramičke matrice povećava i krutost kompozita, [9].

U tablici 1. prikazana su mehanička svojstva više vrsta matrica iz 3 skupine navedene gore.

Tablica 1. Mehanička svojstva matrica, [11]

| tip matrice | $\rho$ [kg/m$^3$] | E [GPa] | G [GPa] | $\sigma_v$ [MPa] | $\varepsilon$[%] | $\alpha[10^{-6}/°C]$ | $T_g$[°C] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Poliester | 1500 | 4.5 | 2 | 90 | 5 | 200 | 110 |
| Vinil ester | 1150 | 4 | - | 90 | 5 | 53 | 150 |
| Epoksi | 1400 | 6 | 2.2 | 130 | 8.5 | 70 | 250 |
| Bizmaleimid | 1320 | 3.6 | 1.8 | 78 | 6.6 | 49 | 300 |
| Poliimid | 1890 | 4.9 | - | 120 | 3 | 90 | 320 |
| Polieter imid | 1270 | 3 | - | 105 | 60 | 62 | 217 |
| Poliamid imid | 1400 | 5 | - | 95-185 | 12-18 | 36 | 240 - 270 |
| PPS | 1340 | 3.3 | - | 70-75 | 3 | 54-110 | 85 |
| PEEK | 1320 | - | - | 92-100 | 150 | - | 143 |
| Polisulfon (PS) | 1240 | 2.5 | - | 70-75 | 50-100 | 56-100 | 190 |
| Polipropilen (PP) | 900 | 1-1.4 | - | 25-38 | 300 | 110 | -20 - -5 |
| Polikarbonat (PC) | 1200 | 2.4 | - | 45-70 | 50-100 | 70 | 133 |
| Aluminij | 2700 | 70 | - | 200 | - | - | - |
| Ti-6Al-4V | 4500 | 110 | - | 1000 | - | - | - |
| borosilikatno staklo | 2300 | 60 | - | 100 | | 3.5 | - |
| MgO | 3600 | 210-300 | - | 97-130 | - | 13.8 | - |
| $Al_2O_3$ | 4000 | 360-400 | - | 250-300 | - | 8.5 | - |
| SiC | 3200 | 400-440 | - | 310 | - | 4.8 | - |

U eksperimentalnom dijelu ovog završnog rada korišten je kompozit s polimernom matricom (PMC) epoksidnog tipa zbog izraženih mehaničkih svojstva i velikog udjela biorazgradivog sadržaja, slika 5.3.

## 2.4. Ojačala

Zadaća ojačala je da budu nosivi element kompozita, tj. da osiguraju:[6]

- visoku čvrstoću
- visoki modul elastičnost – krutost
- otpornost na trošenje.

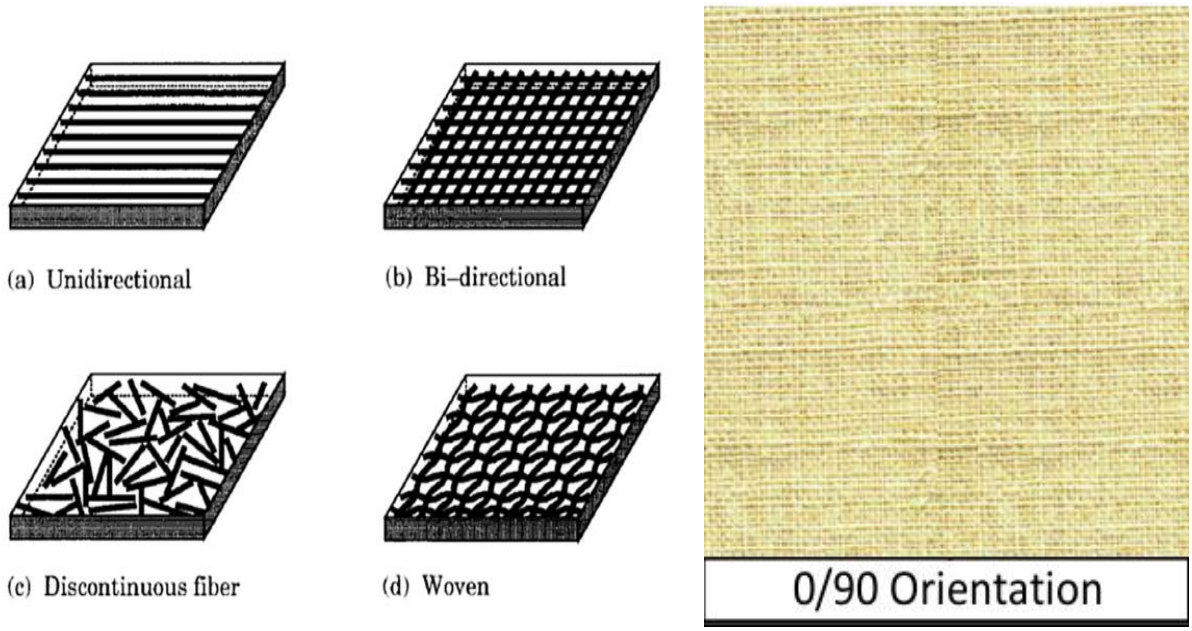
Prema obliku ojačala dijelimo na:

- čestice
- vlakna.

U eksperimentalnom dijelu ovog završnog rada korišteno je ojačalo u obliku pletenih vlakana sa orijentacijom 0/90, slika 2.2.

### Vlakna

Kompoziti ojačani vlaknima sadrže mekšu, duktilnu matricu u koju su ugrađena čvrsta, kruta i krhka vlakna. Djelotvornost ojačanja najveća je upravo u tim kompozitima. Opterećenja se s matrice prenose na vlakna, pa su ona osnovni nosioci opterećenja. Vlakna mogu biti različite duljine i usmjerenja. Na slici 2.2. prikazan je različit raspored vlakna u matrici, [14].




Slika 2.2. – Raspored vlakna u matrici

a) jednosmjerni b) višesmjerni c) diskontinuirani d) pleteni, [14]

Neke od najraširenijih vrsta vlakana su:

a) staklena vlakna (vrste staklenih vlakana A, E i S-stakla)

b) ugljična ( „*karbonska*“) vlakna (ugljik; HM-visoki modul elastičnosti, HST- visoke čvrstoće i istezljivosti)

c) aramidna vlakna (aramid; HM-visoki modul elastičnosti, LM-niski visoki modul elastičnosti)

d) prirodna vlakna, [10].

U tablici 2. prikazana su osnovna mehanička svojstva raznih vrsta vlakana.

Tablica 2. Mehanička svojstva staklenih, aramidnih i ugljičnih vlakana, [10]

| Tip vlakna | Gustoća, $\rho$ [g/cm$^3$] | Youngov modul elastičnosti, $E$ [GPa] | Vlačna čvrstoća $R_m$ [MPa] | Istezljivost, $L_0/L$ [%] |
|---|---|---|---|---|
| E - staklena | 2,60 | 72 | 1,72 | 2,40 |
| S – staklena | 2,50 | 87 | 2,53 | 2,90 |
| Aramidna (Kevlar 29) | 1,44 | 100 | 2,27 | 2,80 |
| Aramidna (Kevlar 49) | 1,44 | 124 | 2,27 | 1,80 |
| Ugljična HS | 1,80 | 230 | 2,48 | 11,00 |
| Ugljična HM | 1,90 | 370 | 1,79 | 0,50 |

Ove vrste vlakana, iako pokazuju odlična mehanička svojstva, imaju veliki otisak ugljikovog dioksida zbog energije koja je iskorištena za dobivanje istih. Zbog toga raste potreba za upotrebom prirodnih vlakana pa su tako i ona dospjela među najkorištenija ojačala u obliku vlakana, [10].

# 3. BIOKOMPOZITI

Prirodna vlakna već duže vrijeme privlače pažnju istraživača, te postaju predmet interesa u vidu uporabe u polimernim kompozitima zbog njihovog ekološkog aspekta, tj. zbog ekološke održivosti i obnovljivosti tih sirovina. U nastavku će biti prikazan niz prednosti, ali i nedostataka koje prirodna vlakna posjeduju. Uporaba prirodnih vlakana u polimernim kompozitima nalazi svoju primjenu jer njihove prednosti prevladavaju nedostatke.[6]

## 3.1. Podjela prirodnih vlakana

Prirodna vlakna se u prirodi nalaze u obliku u kojemu se mogu izravno iskoristiti (npr. pamuk) ili u obliku iz kojeg se na neki način upotrebom mehaničke energije moraju odvojiti prije upotrebe (npr. juta, lan, kokos).

Prirodna vlakna dijele se na tri skupine:

- biljna vlakna građena od celuloze
- životinjska vlakna građena od bjelančevina
- mineralna vlakna silikatnog minerala (bijeli azbest)

Biljna vlakna mogu izrasti iz sjemenke, biti sastavni dio stabljike ili sastavni dio lišća. Vlakna biljnog podrijetla mogu se prema tome podijeliti po vrsti podrijetla na:

- vlakna (drvo, trave, slame itd.)
- lišće
- sjeme
- voće
- liko

U primjeni prirodnih vlakana u kompozitu poželjna je što veća duljina vlakana pa su takve vrste vlakana poželjnije od ostalih, [12].

### 3.2. Mehanička svojstva prirodnih vlakana

Utjecaj na mehanička svojstva prirodnih vlakana najviše ima dužina i promjer kao i uvjeti u kojima su vlakna ispitivana. Također veliki utjecaj ima kemijski sastav vlakana odnosno postotak celuloze, vode, hemiceluloze i lignina koji ovise o klimatskim uvjetima u kojima je biljka rasla te metodom kojom su vlakna odvojena od ostatka biljke. U tablici 3. prikazan je kemijski sastav nekih prirodnih vlakana, [12].

Tablica 3. Kemijski sastav biljnih vlakana, [12]

| Vrsta vlakana | Celuloza [%] | Hemiceluloza [%] | Lignin [%] |
|---|---|---|---|
| Juta | 61-63 | 13 | 5-13 |
| Banana | 60-65 | 6-8 | 5-10 |
| Lan | 70-72 | 14 | 4-5 |
| Lišće ananasa | 80 | - | 12 |
| Sisal | 60-67 | 10-15 | 8-12 |
| Drvo | 45-50 | 23 | 27 |
| Indijska konoplja | 70-78 | 18-19 | 4-5 |

Među prirodnim vlaknima biljnog podrijetla lan ima najbolja mehanička svojstva te najmanju gustoću. Pored lana, konoplja i juta su druga dva najkorištenija tipa prirodnih vlakana. U tablici 4. prikazana su mehanička svojstva najkorištenijih biljnih vlakana, [12].

Tablica 4. Mehanička svojstva biljnih vlakana, [12]

| Material | Gustoća [g/cm$^3$] | Vlačna čvrstoća [MPa] | Youngov modul [Gpa] | Maksimalno produljenje [%] |
|---|---|---|---|---|
| Lan | 1,45 | 500-900 | 50-70 | 1,5-4,0 |
| Konoplja | 1,48 | 350-800 | 30-60 | 1,6-4,0 |
| Juta | 1,3 | 300-700 | 20-50 | 1,2-3,0 |
| Bambus | 1,4 | 500-700 | 30-50 | 2 |
| Kokos | 1,2 | 150-180 | 4-6 | 20-40 |
| Sisal | 1,5 | 300-500 | 10-30 | 2-5 |

Veći udio celuloze usmjeren u smjeru vlakna povećava mehanička svojstva. Sa svakom žetvom i odvajanjem vlakana svojstva variraju. Vlakna su u većini slučajeva kruće i čvršće od matrice i mehanička svojstva rastu s porastom udjela vlakna. Svojstva kompozita dosežu svoju maksimalnu vrijednost na 40-55% masenog udjela vlakna u kompozitu, [12].

### 3.3. Prednosti i nedostaci prirodnih vlakana

Pored obnovljivosti koja svakako predstavlja jednu od ključnih prednosti prirodnih vlakana, ona posjeduju i niz drugih prednosti bez kojih se ne bi prirodna vlakna nametnula kao adekvatna zamjena konvencionalnim ojačalima u polimernim kompozitima.

- niža gustoća biljnih vlakana (~ 1,5 g/cm$^3$) u usporedbi sa staklenim vlaknima (~ 2,5 g/cm$^3$) osigurava visoku specifičnu čvrstoću i krutost u usporedbi sa staklenim vlaknima
- biljna vlakna omogućuju proizvodnju laganih konstrukcija i naknadno utječu na smanjenje potrošnje goriva u vozilu
- obnovljivi izvor sirovina
- laka dostupnost
- niska cijena i mali utrošak energije tijekom proizvodnje
- sigurnija za rukovanje i proizvodnju u odnosu prema sintetskim vlaknima
- ušteda zbog manjeg trošenja opreme jer su prirodna vlakna ne abrazivna u odnosu prema sintetskim vlaknima
- visoka električna provodnost i dobra zvučna izolacija, [10].

Nedostaci prirodnih vlakana su:

- svojstva ovise o žetvi i načinu obrade
- slaba kompatibilnost sa nekim matricama
- niska mikrobna otpornost i podložnost truljenju (hidroskopnost)
- niska izdrživa temperatura (200°C), [13].

### 3.4. Odabir matrice

Matrica igra veliku ulogu u kompozitnom materijalu. Matrice koje se koriste s prirodnim vlaknima su ograničene temperaturom i u slučaju loše adhezije između vlakna i matrice potrebno je koristiti kemikalije. Koriste se termoplasti (polietilen, PP, polivinil i polistiren) i duromeri (epoksi, poliester itd.), [12].

# 4. Biokompoziti u brodogradnji

Kako bi se dogodila tranzicija sa trenutačno korištenih materijala na ekološki prihvatljivije materijale, oni moraju pokazati ista ako ne i superiornija svojstva. Također, način izrade elemenata ne smije biti kompliciran i mora biti izvediv. Na kraju mora biti financijski prihvatljiv za tržište.

Ovdje se javljaju dva problema. Najčešći način izrade elemenata od kompozitnog materijala ojačanog vlaknima je korištenjem vakuumske infuzije. Prednost ovog načina izrade je u tome što postoji mogućnost izrade velikih elemenata sa minimalnim udjelom mjehurića zraka.

Kao prvi problem se pojavljuje ovisnost debljine kompozita o broju slojeva i rasporedu tkanine gdje staklena vlakna nemaju izražen ovaj problem.

Drugi problem, veoma bitan u brodogradnji, javlja se tijekom primjene biokompozita u okruženju koje potiče razgradnju materijala. Takva okruženja imaju povišenu temperaturu, mehaničko opterećenje i UV zračenje a najveći problem stvara doticaj sa vodom. Staklena vlakna su se pokazala kao veoma otporna u uvjetima velike vlage, potpune uronjenosti u vodu ili na granici dvaju medija baš zbog izraženog svojstva hidrofobnosti. Prirodna vlakna naime imaju izraženo svojstvo higroskopnosti koje dolazi do izražaja u uvjetima velike vlage ili kada postoji doticaj sa vodom, [2].

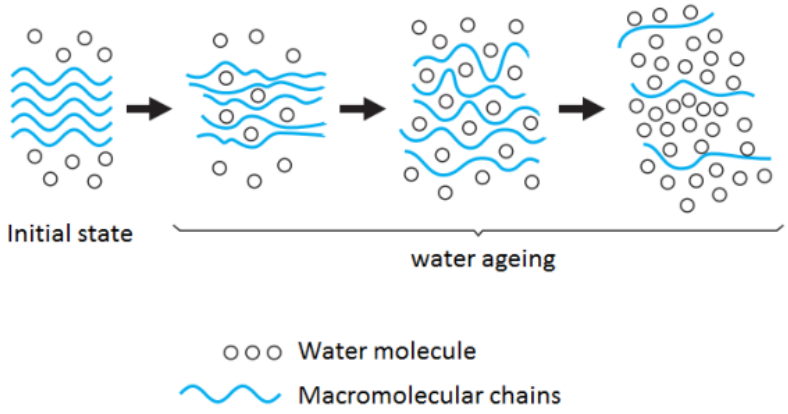
## 4.1. Biokompoziti u vodi

Količina vode koju biokompozit apsorbira određena je sa 4 mehanizma:

- difuzija vode u polimernu matricu
- kapilarno širenje vode duž vlakana
- difuzija vode u vlaknima
- širenje vode duž mikro pukotina nastale bubrenjem materijala između matrice i ojačala

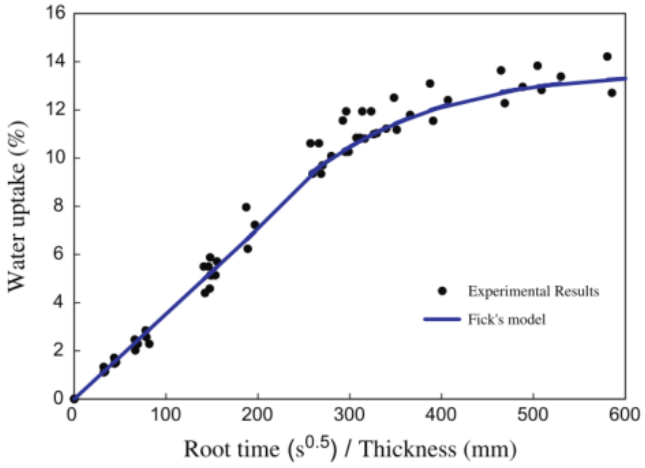
Potrebna su dodatna istraživanja za ove mehanizme zato što ne postoji literatura za bubrenje biokompozita pod utjecajem nekog opterećenja, [2].

Kompoziti su općenito podložni difuziji vode. Molekule vode se raširе kroz materijal i zauzimaju mjesto između makromolekula, time materijal postaje sve teži. Voda počinje raskidati vezu između makromolekula pa materijal počinje bubriti, slika 4.1.




Slika 4.1. Bubrenje kompozita, [2]

Difuzija vode u polimernu matricu može prouzrokovati kemijsku reakciju s polimernim lancem. Ta kemijska reakcija naziva se hidroliza te je glavni mehanizam oštećenja kod polimera izloženih vlažnim uvjetima ili u doticaju s vodom. Sljedeća slika pokazuje postotak vode koja se raširila u kompozitu ojačanom lanenim vlaknima u ovisnosti o vremenu, [2].




Slika 4.2. Postotak upijene vode u kompozitu u ovisnosti o vremenu, [2]

Proučavanjem difuzije vode u kompozitni materijal primijećeno je da nakon određenog postotka vode u strukturi kompozita dolazi do zasićenja te voda prestaje prodirati u kompozit. Za kompozit ojačan lanenim vlaknima postotak zasićenja iznosi 13% dok za kompozit ojačan staklenim vlaknima iznosi 1%. Veći postotak zasićenja dovodi i do brže razgradnje materijala, [2]. Ovaj problem moguće je riješiti korištenjem hibridnih kompozita, dodataka matrici ili dodatnim premazima.

### 4.2. Primjena biokompozita u brodogradnji

Ova vrsta materijal, osim nekih detalja, vjerojatno nikada neće naći primjenu u velikoj brodogradnji. Primjeri primjene biokompozitnih materijala su svi gdje se kompoziti već koriste. Tako u maloj brodogradnji, danas, već postoje primjeri upotrebe. Danska sportska jedrilica „GreenBente24“ izrađena je od 80% biorazgradivog materijala, drvo i kompozit ojačan prirodnim vlaknima. „GreneBente24“ je skuplja 20% od ekvivalentne jedrilice izgrađene od kompozita sa staklenim vlaknima ali teži 1300 kg što je za 100 kg manje. slika 4.3, [15]



Slika 4.3. Sportska jedrilica „GreenBente24“, [15]

# 5. EKSPERIMENTALNI DIO

## 5.1. Priprema za ispitivanje

U ovom završnom radu izrađena su dva tipa kompozita. Prvi, ojačan lanenim vlaknima u obliku tkanine i drugi, ojačan jutenim vlaknima u obliku grubo pletenih jutenih vreća. Matrica je epoksidna s velikim udjelom biološkog sastava te je korištena za obje vrste kompozitnog materijala. Metoda izrade je laminiranje u kalupu. Sam postupak izrade kompozita se odvijao u nekoliko faza:

- nabava materijala i priprema za izradu kalupa
- izrada kalupa
- priprema materijala za laminiranje
- postupak laminiranja u kalupu
- sušenje ispitnih epruveta
- ispitivanje epruveta

Nakon sušenja i dodatnog stvrdnjavanja ispitnih epruveta na njima je provedeno mehaničko ispitivanje svojstava (vlačna čvrstoća, savojna čvrstoća i žilavost). Dodatno, proveden je kratak test higroskopnosti.

### 5.1.1. Izrada ispitnih epruveta

Izrada kompozitnog materijala se odvijala u nekoliko faza. Prva faza je bila nabava vlakana i matrice. Vlakna lana su, u obliku tkanine, kao otpadak od krojenja prikazani na slici 5.1.



Slika 5.1. Lanena tkanina

Vlakna jute su kupljene u obliku jutenih vreća te su izabrane kao kandidat za ovaj eksperiment zbog svoje dostupnosti i niske cijene. Izgled i oblik jutenih vreća prikazan je na slici 5.2.



Slika 5.2. Jutene vreće

Cilj ovog eksperimenta je bio stvoriti materijal sa što većim udjelom biorazgradivog sadržaja te je zbog toga odabrana epoksidna smola proizvođača “entropy resins“. Vrsta smole je ONE-F što označava brzu reakciju između smole i katalizatora. Ova smola ima veliki udio biorazgradivog sadržaja i to 28%. Smola je prikazana na slici 5.3.




Slika 5.3 Epoksidna smola

Mehanička svojstva te informacije potrebne za ispravnu upotrebu smole pružana su od strane proizvođača te su prikazana na slici 5.4.

ONF
FAST

| MECHANICAL DATA | |
|---|---|
| Tensile Modulus (ASTM D638) | 2.7 GPa |
| Tensile Strength (ASTM D638) | 53.2 MPa |
| Elongation (ASTM D638) | 6% |
| Flexural Modulus (ASTM D790) | 2.5 GPa |
| Flexural Strength (ASTM D790) | 82.1 MPa |
| Compression Strength (ASTM D695) | 77.9 MPa |
| Tg Ultimate (DSC, midpoint) | 63°C |
| Hardness (Shore D) | 70-80 |

| PROCESSING DATA | |
|---|---|
| Mix Ratio (by volume) | 2:1 |
| Mix Ratio (by weight) | 100:43 |
| Viscosity (A/B/Mixed @ 25 °C) | 1870/120/1020 mPas |
| Component Density (specific density @ 25°C) | 1.14 (resin), 0.98 (hardener) $gcm^{-3}$ |
| Mixed Density (specific density @ 25°C) | 1.09 $gcm^{-3}$ |
| Pot Life (@ 25°C) | 18 min |
| Tack Free Time (@ 35°C) | 3 hrs |
| Recommended Full Cure | 7 days @ 25°C |

| ENVIRONMENT DATA | |
|---|---|
| VOC Content (ASTM D2369) | 21.0 g/l |
| Biobased Carbon Content (ASTM D6866) | 28% |

Slika 5.4. Svojstva epoksidne smole

Važno je napomenuti kako se eksperimentalni dio ovog završnog rada odvijao u zimskim mjesecima te uvjeti rada sa smolom nisu bili idealni. To je moglo promijeniti svojstva smole te tako utjecati na cjelokupni materijal i rezultate dobivene ispitivanjem.

Sljedeći korak je bio odrediti način na koji će se materijal ispitivati kako bi znali količinu i dimenzije ispitnih epruveta. Odabrane su sljedeće metode:

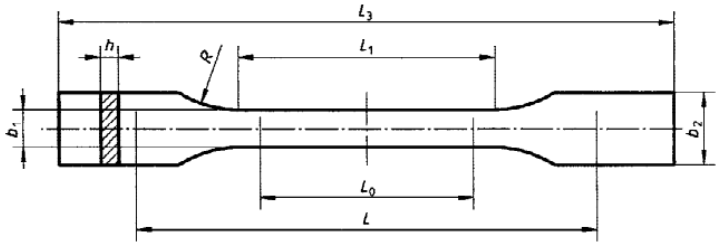
- Statičko vlačno ispitivanje (2x10 epruveta)
- Savojno ispitivanje (2x10 epruveta)
- Ispitivanje žilavosti – Charpyjev bat (2x10 epruveta)
- Test obraštanja (2x1 epruveta)

Ukupni broj epruveta je 60 ali će za svako ispitivanje biti odabrano 5 najkvalitetnije izrađenih epruveta. Prekomjeran broj epruveta napravljen je zbog nepredvidivih problema u ispitivanju što se pokazalo kao pametan odabir.

### 5.1.2. Definiranje dimenzija ispitnih epruveta

Dimenzije ispitnih epruveta su određene prema ISO standardu i to :

**A)** Statičko vlačno ispitivanje (ISO 527-4), slika 5.5




Dimensions in millimetres

| | | |
|---|---|---|
| $L_3$ | Overall length | ⩾ 150 [1] |
| $L_1$ | Length of narrow parallel-sided portion | 60 ± 0,5 |
| $R$ | Radius | ⩾ 60 [2] |
| $b_2$ | Width at ends | 20 ± 0,2 |
| $b_1$ | Width of narrow portion | 10 ± 0,2 |
| $h$ | Thickness | 2 to 10 |
| $L_0$ | Gauge length (recommended for extensometers) | 50 ± 0,5 |
| $L$ | Initial distance between grips | 115 ± 1 |

Slika 5.5. Dimenzije epruvete za vlačno ispitivanje [ISO 527-3]

Dimenzije koje su odabrane su:

$$h = 4mm$$
$$L_3 = 180mm$$
$$R = 60$$

Dimenzije su odabrane u skladu s kapacitetom kidalice, na temelju približnog proračuna čvrstoće kompozita.

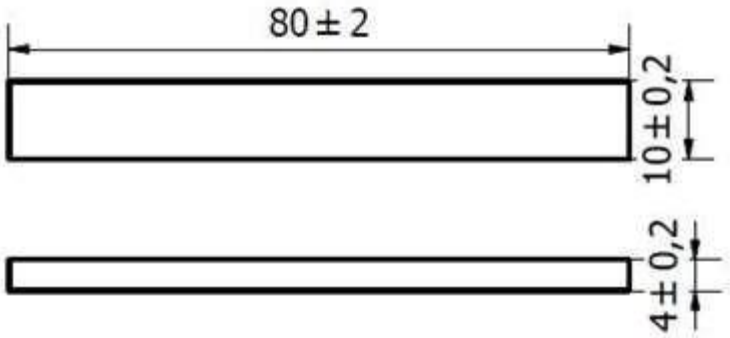
**B)** Savojno ispitivanje (ISO 14125), slika 5.6

| Material | Specimen length ($l$) | Outer span ($L$) | Width ($b$) | Thickness ($h$) |
|---|---|---|---|---|
| Class I<br>Discontinuous-fibre-reinforced thermoplastics | 80 | 64 | 10 | 4 |
| Class II<br>Plastics reinforced with mats, continuous matting and fabrics, as well as mixed formats (e.g. DMC, BMC, SMC and GMT) | 80 | 64 | 15 | 4 |
| Class III<br>Transverse (90°) unidirectional composites; undirectional (0°) and multidirectional composites with $5 < E_{fl}/G_{13} \leq 15$<br>(e.g. glass-fibre systems) | 60 | 40 | 15 | 2 |
| Class IV<br>Unidirectional (0°) and multidirectional composites with $15 < E_{fl}/G_{13} \leq 50$<br>(e.g. carbon-fibre systems) | 100 | 80 | 15 | 2 |
| Tolerances | –0<br>+10 | ±1 | ±0,5 | ±0,2 |
| NOTE To reduce variability in data for specimens using coarse reinforcements, a specimen width of 25 mm may be used. | | | | |

Slika 5.6. Dimenzije epruveta za savojno ispitivanje, [ISO 14125]

Dimenzije epruveta za savojno ispitivanje su određene kao „Class II“ (slika 5.6.). U dogovoru s mentorom duljina epruvete (*l)* povećana je sa 80mm na 100mm radi lakše provedbe ispitivanja.

**C)** Ispitivanje žilavosti (Charpyjev bat) – (ISO179-1), slika 5.7




Slika 5.7. Dimenzije Epruvete za ispitivanje žilavosti, [ISO179-1]

**D)** Test obraštanja

Test obraštanja trebao je biti proveden na rijeci Mrežnici ali zbog novonastale situacije i ograničenja kretanja nije bilo moguće provesti ispitivanje. Također proces obraštanja se većinom događa u ljetnim mjesecima, stoga test proveden u mjesecima ne bi bio važeći.

**E)** Test higroskopnosti

Dvije epruvete kvadratnog oblika i dimenzija 100x100mm te debljine 3mm. Tijekom ovog ispitivanja nisu važne dimenzije epruveta nego da je tkanina koja služi kao ojačalo potpuno zaštićena sa smolom.

### 5.1.3. Izrada kalupa

Nakon definiranja dimenzija ispitnih epruveta potrebno je odrediti način izrade. Odabran je način izrade u kalupu čime se dobivaju točnije dimenzije epruveta s manje udjela mjehurića zraka u njima. Sama izrada kalupa i proces izrade epruveta u njima je kompliciranija i skuplja.

Kalup je izrađen u suradnji s tvrtkom „Tehnotrik (Isaac Benedict)“ , na CNC stroju, slika 5.8.

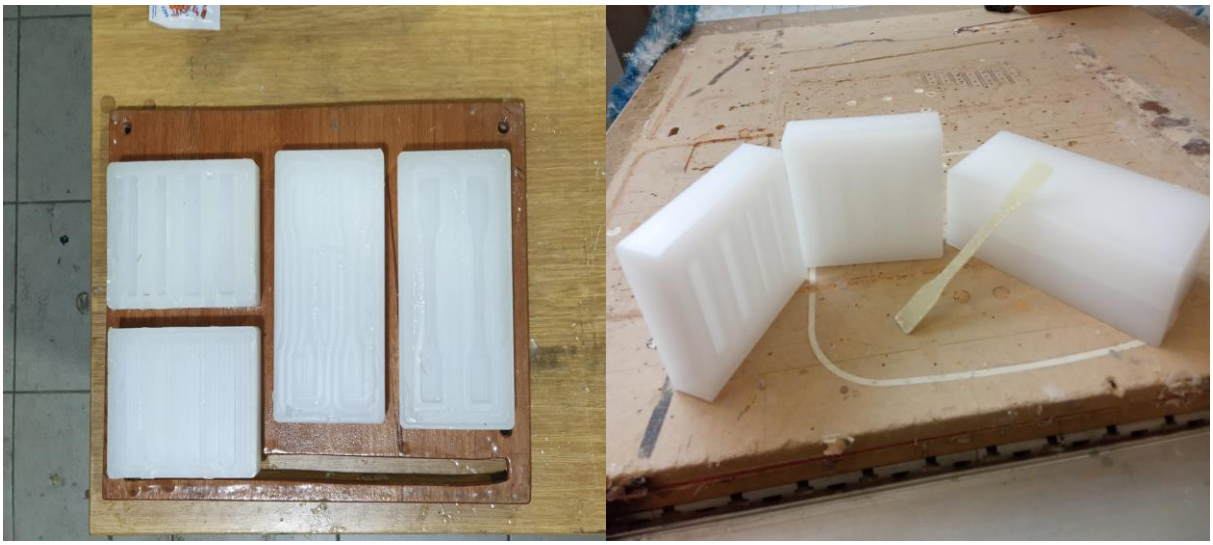


Slika 5.8. Izrada kalupa

U sklopu ovog završnog rada izrađena su dva kalupa:

1. Za statičko vlačno ispitivanje (2 epruvete po kalupu)
2. Za savojnu čvrstoću i ispitivanje žilavosti (4 epruvete po kalupu)

Završni izgled kalupa 1 i kalupa 2 zajedno sa prvim testnim uzorkom izrađenim od poliesterske smole i staklenih vlakana prikazan je na slici 5.9.



Slika 5.9. Kalup

### 5.1.4. Postupak izrade ispitnih epruveta

Postupak izrade epruveta u kalupu je jednostavan. Potrebno je izrezati tkaninu na već određene dimenzije te ih, u kalupu , uroniti u smolu. I lanena tkanina i jutene vreće pletene su tako da im je smjer vlakana zakrenut kao 0/90° te su tako postavljene u kalup (Slika 2.2). Kako bi se iz ispitnih epruveta istisnuli svi mjehurići zraka koji su zadržani u kalupu potrebna je velika tlačna sila. Tlačna sila je postignuta korištenjem nekoliko stolarskih stega. Metoda je pokazala zadovoljavajuće rezultate te je korištena za izradu svih ispitnih epruveta u eksperimentalnom dijelu ovog završnog rada. Idealna temperatura za stvrdnjavanje smole dana je od strane proizvođača te iznosi 25°C stoga su se epruvete sušile pored radijatora. Masa epruveta mjerena je uređajem HADEX R276 s točnošću 0.01g.

Važno je napomenuti kako je za svaku ispitnu epruvetu maseni udio vlakana $w_t$ drugačiji zbog zasebne izrade svake epruvete. Željeni maseni udio vlakana za kompozite ojačane lanenom tkaninom i jutenim vrećama je 40% što je već obrazloženo u poglavlju 3. Oznake ispitnih epruveta, masa vlakana $m_{vl}$, maseni udio vlakana $w_t$, te ukupna masa svih epruveta $m_{uk,}$ prikazane su tablicom 5. i tablicom 6.

Tablica 5. Izrađene ispitne epruvete (juta)

| | Juta | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Oznaka | $m_{vl}$ [g] | $n_{sl}$ | $m_{uk}$ [g] | $w_t$ [%] |
| **Vlačna čvrstoća** | J1 | 3,78 | 5 | 12,23 | 30,91 |
| | J2 | 4,95 | 7 | 12,45 | 39,76 |
| | J3 | 4,914 | 7 | 12,48 | 39,38 |
| | J4 | 4,886 | 7 | 12,47 | 39,18 |
| | J5 | 4,78 | 7 | 12,61 | 37,91 |
| | J6 | 4,71 | 7 | 12,51 | 37,65 |
| | J7 | 4,77 | 7 | 12,43 | 38,37 |
| | J8 | 5,06 | 7 | 12,57 | 40,25 |
| | J9 | 5,12 | 7 | 12,64 | 40,51 |
| | J10 | 4,98 | 7 | 12,43 | 40,06 |
| **Savojna čvrstoća** | JS1 | 2,91 | 7 | 6,85 | 42,48 |
| | JS2 | 3 | 7 | 7,06 | 42,49 |
| | JS3 | 2,98 | 7 | 6,9 | 43,19 |
| | JS4 | 2,55 | 7 | 6,94 | 36,74 |
| | JS5 | 2,67 | 7 | 6,99 | 38,20 |
| | JS6 | 2,7 | 7 | 7,05 | 38,30 |
| | JS7 | 2,91 | 7 | 7,08 | 41,10 |
| | JS8 | 2,71 | 7 | 7,04 | 38,49 |
| | JS9 | 2,73 | 7 | 6,85 | 39,85 |
| | JS10 | 2,76 | 7 | 6,76 | 40,83 |
| **Udarna čvrstoća** | JU1 | 1,9 | 7 | 4,51 | 42,13 |
| | JU2 | 1,68 | 7 | 4,65 | 36,13 |
| | JU3 | 1,69 | 7 | 4,51 | 37,47 |
| | JU4 | 1,52 | 7 | 4,47 | 34,00 |
| | JU5 | 1,63 | 7 | 4,5 | 36,22 |
| | JU6 | 1,5 | 7 | 4,51 | 33,26 |
| | JU7 | 1,51 | 7 | 4,52 | 33,41 |
| | JU8 | 1,64 | 7 | 4,57 | 35,89 |
| | JU9 | 1,51 | 7 | 4,53 | 33,33 |
| | JU10 | 1,56 | 7 | 4,54 | 34,36 |

Epruveta J1 se upotrijebila kao početna eksperimentalna epruveta kako bi se dobio maseni udio ojačala te je kasnije koristila za prvi test na vlačnom ispitivanju da se dobije okvirna sila vlaka. Ovdje maseni udjeli imaju veliki raspon zbog grubog pletenja jutene tkanine.

Tablica 6. Izrađene ispitne epruvete (lan)

| | Lan | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Oznaka | $m_{vl}$ [g] | $n_{sl}$ | $m_{uk}$ [g] | $w_t$ [%] |
| **Vlačna čvrstoća** | L1 | 4,62 | 8 | 12,5 | 36,96 |
| | L2 | 5,4 | 10 | 12,85 | 42,02 |
| | L3 | 5,6 | 10 | 13,05 | 42,91 |
| | L4 | 5,65 | 10 | 13,02 | 43,39 |
| | L5 | 5,65 | 10 | 13,03 | 43,36 |
| | L6 | 5,69 | 10 | 13,04 | 43,63 |
| | L7 | 5,6 | 10 | 12,95 | 43,24 |
| | L8 | 5,66 | 10 | 13,02 | 43,47 |
| | L9 | 5,66 | 10 | 12,93 | 43,77 |
| | L10 | 5,81 | 10 | 12,98 | 44,76 |
| **Savojna čvrstoća** | LS1 | 3 | 10 | 7 | 42,86 |
| | LS2 | 2,98 | 10 | 7,15 | 41,68 |
| | LS3 | 3,1 | 10 | 7,34 | 42,23 |
| | LS4 | 2,81 | 10 | 7,2 | 39,03 |
| | LS5 | 2,78 | 10 | 7,43 | 37,42 |
| | LS6 | 2,76 | 10 | 7,28 | 37,91 |
| | LS7 | 2,88 | 10 | 7,23 | 39,83 |
| | LS8 | 2,87 | 10 | 7,19 | 39,92 |
| | LS9 | 2,73 | 10 | 7,12 | 38,34 |
| | LS10 | 2,76 | 10 | 7,13 | 38,71 |
| **Udarna čvrstoća** | LU1 | 2,15 | 10 | 4,83 | 44,51 |
| | LU2 | 2,2 | 10 | 4,88 | 45,08 |
| | LU3 | 2,18 | 10 | 4,84 | 45,04 |
| | LU4 | 2,05 | 10 | 4,74 | 43,25 |
| | LU5 | 2,01 | 10 | 4,71 | 42,68 |
| | LU6 | 1,91 | 10 | 4,8 | 39,79 |
| | LU7 | 1,91 | 10 | 4,84 | 39,46 |
| | LU8 | 1,8 | 10 | 4,7 | 38,30 |
| | LU9 | 1,84 | 10 | 4,76 | 38,66 |
| | LU10 | 1,89 | 10 | 4,8 | 39,38 |

Epruveta L1 se upotrijebila kao početna eksperimentalna epruveta kako bi se dobio maseni udio ojačala te je kasnije koristila za prvi test na vlačnom ispitivanju da se dobije okvirna sila vlaka. Ovdje su maseni udjeli bliži željenoj vrijednosti zbog finijeg pletenja lanene tkanine i lakšeg rezanja iste.

Na slici 5.10 prikazane su ispitne epruvete za statičko vlačno ispitivanje, ispitivanje žilavosti i ispitivanje savojne čvrstoće.



Slika 5.10. Izrađene epruvete za mehanička ispitivanja

Nakon stvrdnjavanja u kalupu epruvete moraju stajati dodatnih sedam dana u uvjetima od 25°C i postotku vlage od 5% do 55% kako bi završile sve kemijske reakcije unutar smole. Izrađen materijal ima prosječni udio biorazgradivog sadržaja od 60%.

### 5.1.5. Statistička obrada rezultata mjerenja

Prilikom ispitivanja na dobivenim rezultatima mjerenja kompozitnog materijala ojačanog lanenim vlaknima određena je nepristrana procjena parametara osnovnog skupa na temelju teorije uzoraka. Temeljem malog broja uzoraka koji su ispitivani ($n \leq 30$ elemenata, tj. podataka), potrebno je koristiti Studentovu *t*-razdiobu s parametrom $k = n - 1$ za intervalnu procjenu očekivanja osnovnog skupa iz kojeg potječe uzorak. Intervalna procjena pojedinih svojstava kompozitnog materijala uz interval vjerodostojnosti $1 - \alpha = 0{,}95$ u ovom je radu izračunata prema izrazu, [16].

$$\bar{x} - t_{(k,\frac{\alpha}{2})} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{(k,1-\frac{\alpha}{2})} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (1)$$

gdje su; [16]:

$\bar{x}$ – aritmetička sredina uzorka

*t* – varijabla Studentove *t*-razdiobe

*k* –broj stupnjeva slobode uzorka od *n* podataka

*n* – veličina uzorka

$\alpha$ – stupanj značajnosti

*s* – nepristrana procjena standardne devijacije

$\mu$ – procijenjeno očekivanje osnovnog skupa.

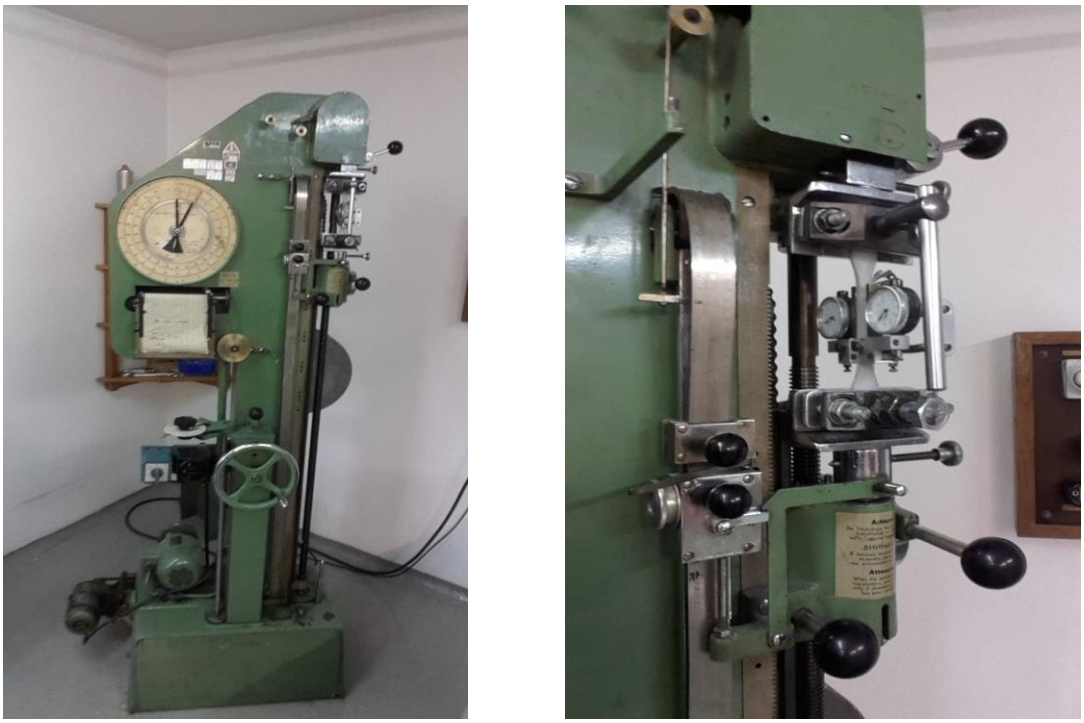
## 5.2. Rezultati ispitivanja

### 5.2.1. Statičko vlačno ispitivanje

Statičkim vlačnim ispitivanjem utvrđuje se elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičnog vlačnog naprezanja. Samo ispitivanje se provodi uređajem koji se naziva kidalica. Mehanička svojstva koja je ovim putem moguće odrediti su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, vlačni modul, itd. Tijekom ispitivanja se na epruvetu postepeno povećava sila te se na ekstenziometru očitava produljenje za određen iznos sile. Dobiva se nekoliko točaka koje se prikazuju u dijagramu „sila-produljenje“ te se kroz te točke provuče krivulja koja aproksimira dobivene rezultate.

### 5.2.2. Oprema za statičko vlačno ispitivanje

Za potrebe statično vlačnog ispitivanja u ovom završnom radu korištena je kidalica u Laboratoriju za polimere i kompozite Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Statičko vlačno ispitivanje provedeno je na univerzalnoj kidalici, slika 5.11.



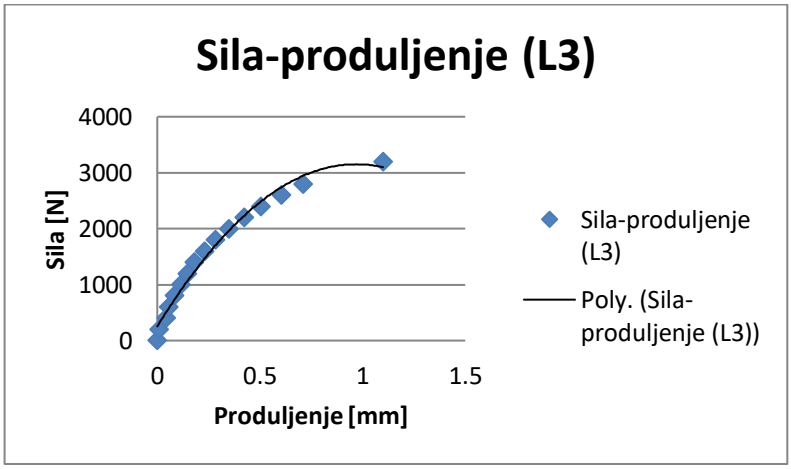
Slika 5.11. Oprema za statičko vlačno ispitivanje

### 5.2.3. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja (Lan)

U sljedećim tablicama prikazane su vrijednosti produljena u ovisnosti o sili. Za svaku epruvetu rezultati su prikazani u dijagramu sila-produljenje. Produljenje je mjereno na lijevom i desnom kraju te je kao stvarno produljenje uzeto srednje produljenje kao aritmetička sredina lijevog i desnog. Prvo će biti prikazani rezultati ispitivanja epruveta ojačanih lanenom tkaninom. Izabrano je pet najbolje izrađenih epruveta sa najmanje mjehurića zraka.

Tablica 7. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 1 (lan)

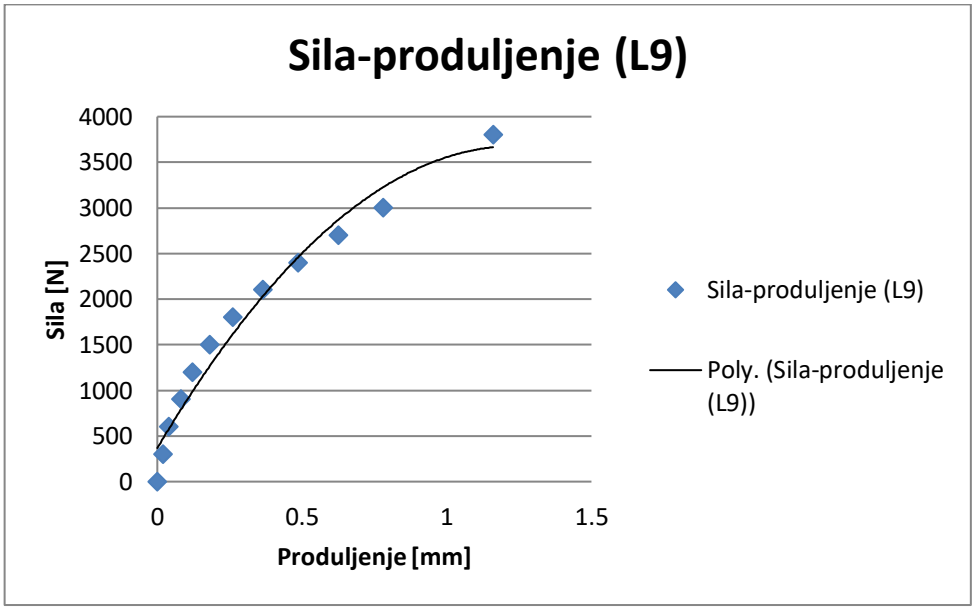
| Epruveta 1 (L3) | | | |
|---|---|---|---|
| Produljenje [mm] | | | Sila [N] |
| Lijevi | Sredina | Desno | |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.01 | 0.01 | 0.01 | 200 |
| 0.042 | 0.042 | 0.042 | 400 |
| 0.06 | 0.055 | 0.05 | 600 |
| 0.09 | 0.085 | 0.08 | 800 |
| 0.12 | 0.115 | 0.11 | 1000 |
| 0.15 | 0.145 | 0.14 | 1200 |
| 0.18 | 0.18 | 0.18 | 1400 |
| 0.23 | 0.23 | 0.23 | 1600 |
| 0.28 | 0.285 | 0.29 | 1800 |
| 0.35 | 0.35 | 0.35 | 2000 |
| 0.42 | 0.425 | 0.43 | 2200 |
| 0.5 | 0.505 | 0.51 | 2400 |
| 0.6 | 0.605 | 0.61 | 2600 |
| 0.7 | 0.71 | 0.72 | 2800 |
| 1.1 | 1.1 | 1.1 | 3200 |




Slika 5.12. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 1 (lan)

Tablica 8. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 2 (lan)

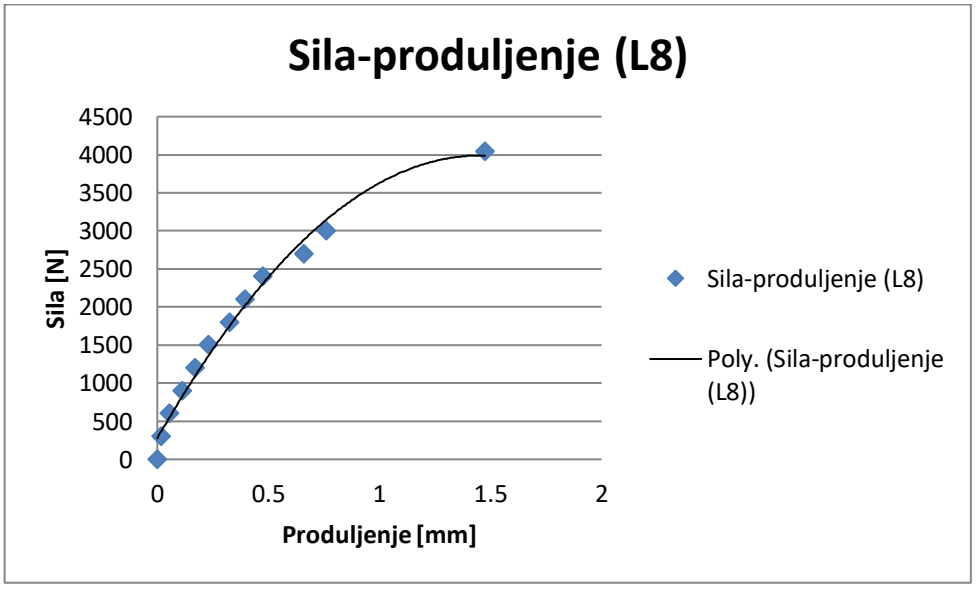
| Epruveta 2 (L9) | | | |
|---|---|---|---|
| Produljenje [mm] | | | Sila [N] |
| Lijevi | Sredina | Desno | |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,02 | 0,02 | 0,02 | 300 |
| 0,04 | 0,04 | 0,04 | 600 |
| 0,08 | 0,08 | 0,08 | 900 |
| 0,12 | 0,12 | 0,12 | 1200 |
| 0,18 | 0,18 | 0,18 | 1500 |
| 0,26 | 0,26 | 0,26 | 1800 |
| 0,36 | 0,365 | 0,37 | 2100 |
| 0,48 | 0,485 | 0,49 | 2400 |
| 0,61 | 0,625 | 0,64 | 2700 |
| 0,76 | 0,78 | 0,8 | 3000 |
| 1,17 | 1,16 | 1,15 | 3800 |




Slika 5.13. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 2 (lan)

Tablica 9. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 3 (lan)

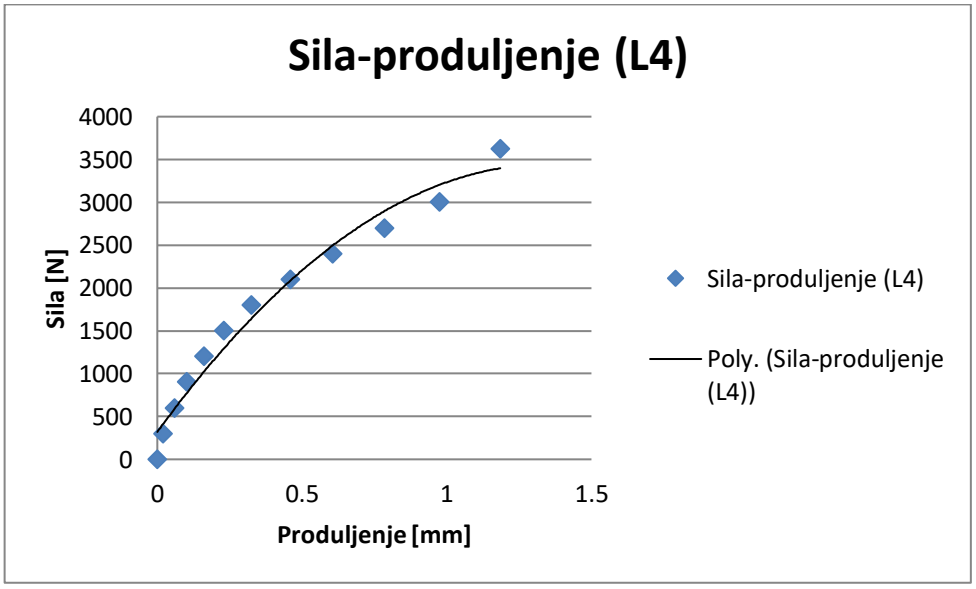
| Epruveta 3 (L8) | | | |
|---|---|---|---|
| Produljenje [mm] | | | Sila [N] |
| Lijevi | Sredina | Desno | |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.02 | 0.015 | 0.01 | 300 |
| 0.06 | 0.055 | 0.05 | 600 |
| 0.11 | 0.11 | 0.11 | 900 |
| 0.17 | 0.17 | 0.17 | 1200 |
| 0.23 | 0.23 | 0.23 | 1500 |
| 0.32 | 0.325 | 0.33 | 1800 |
| 0.39 | 0.395 | 0.4 | 2100 |
| 0.47 | 0.475 | 0.48 | 2400 |
| 0.65 | 0.66 | 0.67 | 2700 |
| 0.75 | 0.76 | 0.77 | 3000 |
| 1.5 | 1.475 | 1.45 | 4040 |




Slika 5.14. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 3 (lan)

Tablica 10. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 4 (lan)

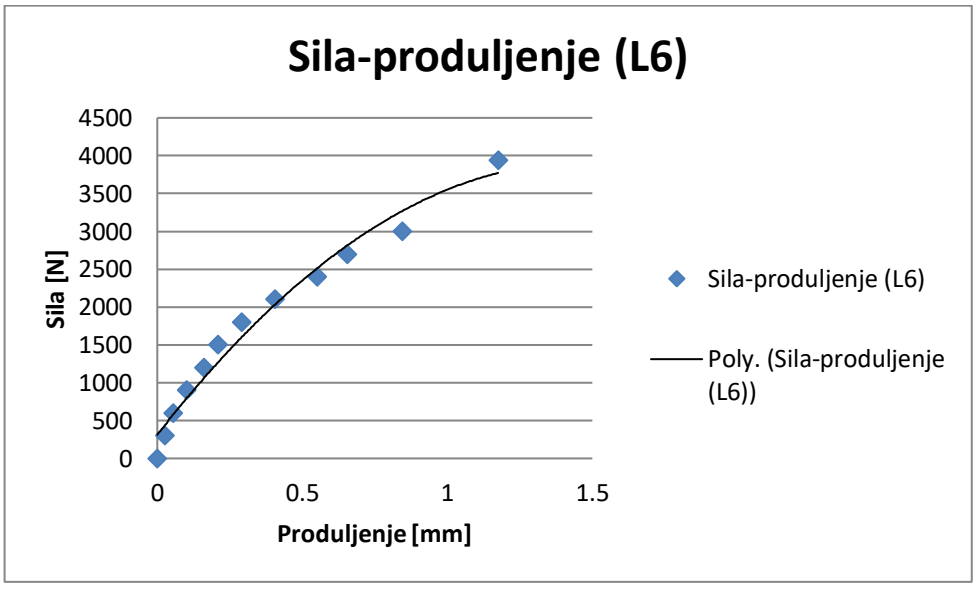
| Epruveta 4 (L4) | | | |
|---|---|---|---|
| Produljenje [mm] | | | Sila [N] |
| Lijevi | Sredina | Desno | |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,03 | 0,02 | 0,01 | 300 |
| 0,07 | 0,06 | 0,05 | 600 |
| 0,11 | 0,1 | 0,09 | 900 |
| 0,17 | 0,16 | 0,15 | 1200 |
| 0,24 | 0,23 | 0,22 | 1500 |
| 0,34 | 0,325 | 0,31 | 1800 |
| 0,47 | 0,46 | 0,45 | 2100 |
| 0,61 | 0,605 | 0,6 | 2400 |
| 0,79 | 0,785 | 0,78 | 2700 |
| 0,98 | 0,975 | 0,97 | 3000 |
| 1,17 | 1,185 | 1,2 | 3620 |




Slika 5.15. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 4 (lan)

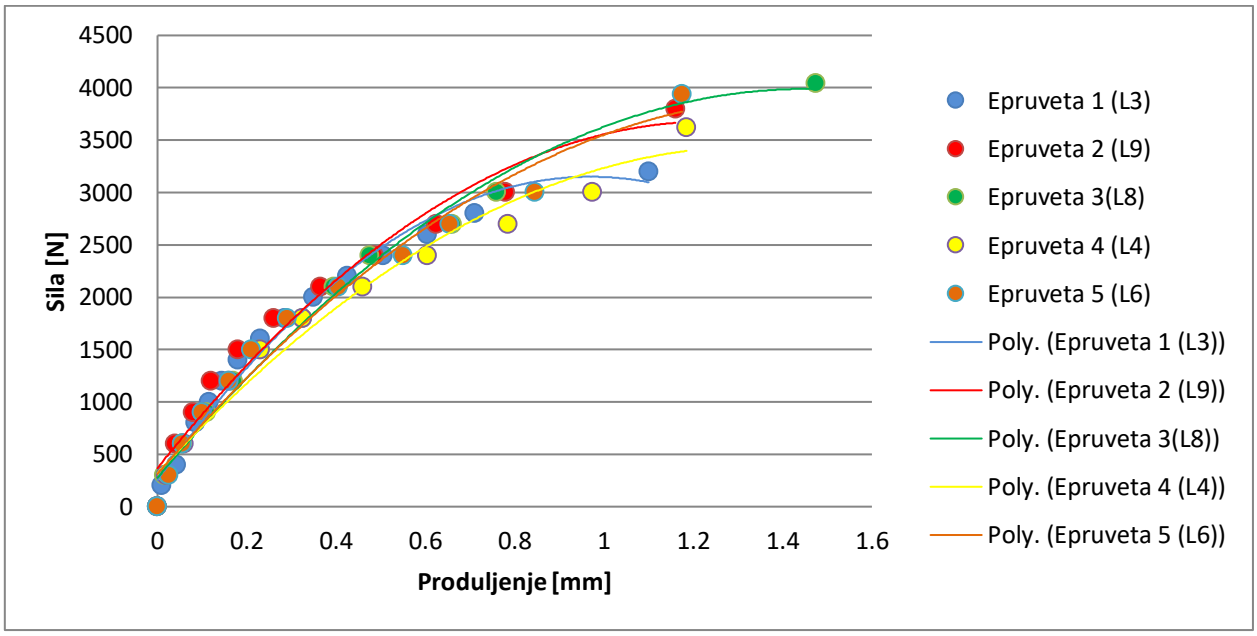
Tablica 11. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 5 (lan)

| Epruveta 5 (L6) | | | |
|---|---|---|---|
| Produljenje [mm] | | | Sila [N] |
| Lijevi | Sredina | Desno | |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,04 | 0,025 | 0,01 | 300 |
| 0,07 | 0,055 | 0,04 | 600 |
| 0,12 | 0,1 | 0,08 | 900 |
| 0,18 | 0,16 | 0,14 | 1200 |
| 0,22 | 0,21 | 0,2 | 1500 |
| 0,31 | 0,29 | 0,27 | 1800 |
| 0,42 | 0,405 | 0,39 | 2100 |
| 0,56 | 0,55 | 0,54 | 2400 |
| 0,64 | 0,655 | 0,67 | 2700 |
| 0,86 | 0,845 | 0,83 | 3000 |
| 1,2 | 1,175 | 1,15 | 3940 |




Slika 5.16. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 5 (lan)

Na slici 5.17. prikazan je dijagram u ovisnosti produljenja o sili za svih 5 ispitanih epruveta. Iz dijagrama se može zaključiti da do rasipanja rezultata dolazi samo u zadnjem dijelu ispitivanja prije loma epruvete.




Slika 5.17. Dijagram „sila-produljenje“ za sve epruvete (lan)

### 5.2.4 Proračun mehaničkih svojstva za statičko vlačno ispitivanje

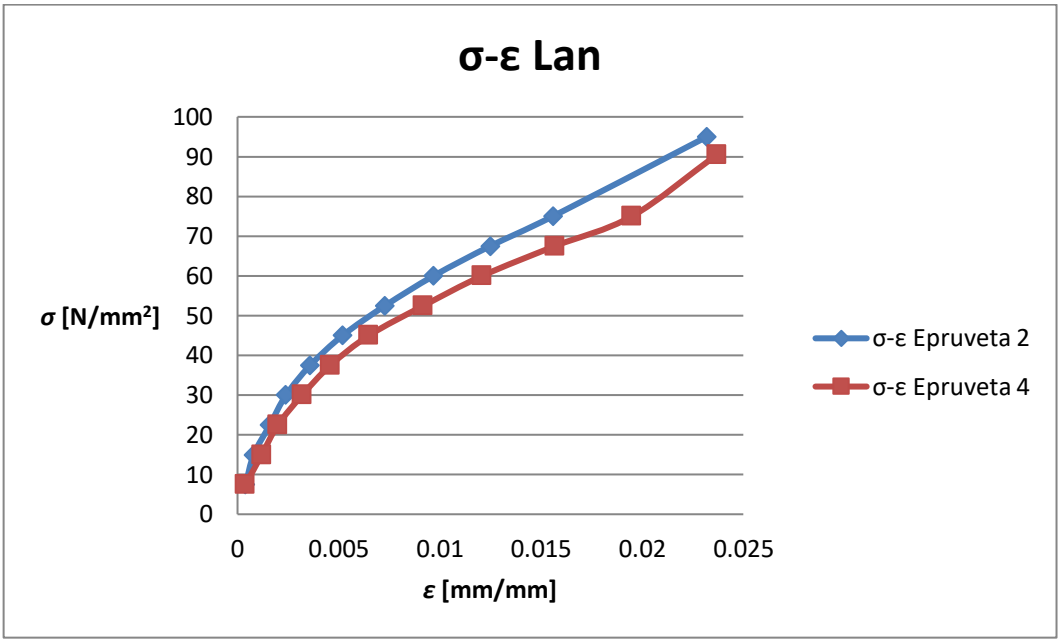
Za sve ispitane epruvete bit će izračunat iznos vlačne čvrstoće $R_{m,vl}$ i to po izrazu :

$$R_{m,vl} = \frac{F_{\max}}{A}. \qquad (2)$$

Također će biti određen vlačni modul elastičnosti na temelju dijagrama „naprezanje - deformacija“. Vlačni modul elastičnosti, $E_{vl}$ određuje se na način da se odbace početni i završni, nelinearni dio krivulje „σ - ε“ te se središnji, približno linearan dio krivulje aproksimira pravcem. Jednadžba pravca određuje modul elastičnosti po Hookeovom zakonu: [17]

$$\sigma = E\varepsilon. \qquad (3)$$

Na slici 5.18. je prikazan opisan linearni dio krivulje,za dvije epruvete, koji će se koristiti za izračun vlačnog modula. Prikazane su dvije epruvete radi preglednosti.




Slika 5.18. Dijagram „naprezanje - istezanje“ za lan

U sljedećoj tablici prikazane su dimenzije epruveta i izračunate vrijednosti vlačne čvrstoće i vlačnog modula.

Tablica 12. Dimenzije i mehanička svojstva za vlačnu čvrstoću za sve epruvete (lan)

| Epruveta | *b1* [mm] | *h* [mm] | *A* [mm$^2$] | $F_{max}$ [N] | $R_{m,vl,}$ [MPa] | *E* [MPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 9,9 | 4,1 | 40,59 | 3300 | 81,30 | 4106,102 |
| 2 | 9,85 | 4 | 39,4 | 3800 | 96,45 | 4115,791 |
| 3 | 9,92 | 4,05 | 40,176 | 4040 | 100,56 | 4525,542 |
| 4 | 9,86 | 4,12 | 40,6232 | 3620 | 89,11 | 3210,845 |
| 5 | 9,86 | 4,2 | 41,412 | 3940 | 95,14 | 3715,014 |
| | | | | $\bar{x}$ | 92,51 | 3934,66 |
| | | | | S | 7,49 | 495,86 |

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena vlačne čvrstoće kompozitnog materijala, $\mu_{Rm,vl}$ uz interval vjerodostojnosti $1 - 0{,}95 = \alpha$ .

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima iznos intervalne procjene vlačne čvrstoće kompozitnog

materijala iznosi:

$$83{,}21 \ \text{N/mm}^2 < \mu_{Rm,vl} < 101{,}81 \ \text{N/mm}^2. \qquad (4)$$

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena vlačnog modula kompozitnog materijala, $E_{vl}$ uz interval vjerodostojnosti $1 - 0{,}95 = \alpha$ .

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima iznos intervalne procjene vlačnog modula kompozitnog materijala iznosi:

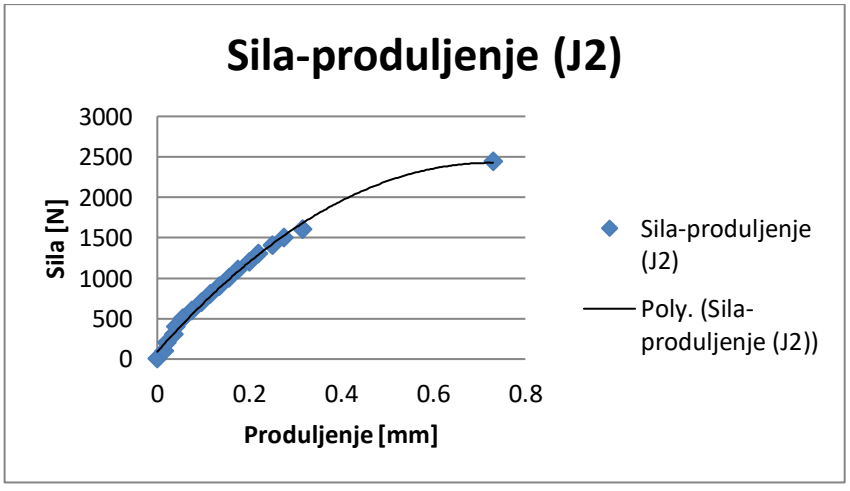
$$3319{,}07 \ \text{N/mm}^2 < \mu_{E,vl} < 4550{,}25 \ \text{N/mm}^2. \qquad (5)$$

### 5.2.5. Rezultati statično vlačnog ispitivanja (Juta)

Analogno kao i kod prikazivanja rezultat ispitivanja epruveta ojačanih lanom sada će biti prikazani rezultati statičkog vlačnog ispitivanja epruveta ojačanim jutom. Izabrano je pet najbolje izrađenih epruveta koje sadrže najmanje mjehurića zraka.

Tablica 13. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 1 (juta)

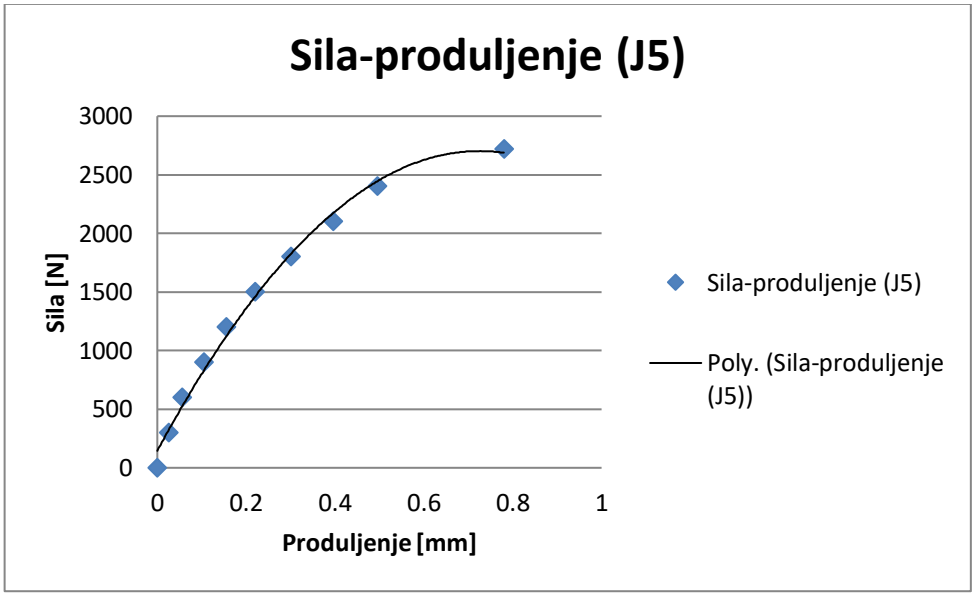
| Epruveta 1 (J2) | | | |
|---|---|---|---|
| Produljenje [mm] | | | Sila [N] |
| Lijevi | Sredina | Desno | |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.02 | 0.015 | 0.01 | 100 |
| 0.03 | 0.02 | 0.01 | 200 |
| 0.06 | 0.035 | 0.01 | 300 |
| 0.06 | 0.04 | 0.02 | 400 |
| 0.08 | 0.055 | 0.03 | 500 |
| 0.1 | 0.075 | 0.05 | 600 |
| 0.12 | 0.095 | 0.07 | 700 |
| 0.14 | 0.115 | 0.09 | 800 |
| 0.16 | 0.135 | 0.11 | 900 |
| 0.18 | 0.155 | 0.13 | 1000 |
| 0.2 | 0.175 | 0.15 | 1100 |
| 0.22 | 0.2 | 0.18 | 1200 |
| 0.24 | 0.22 | 0.2 | 1300 |
| 0.27 | 0.25 | 0.23 | 1400 |
| 0.3 | 0.275 | 0.25 | 1500 |
| 0.33 | 0.315 | 0.3 | 1600 |
| 0.75 | 0.73 | 0.71 | 2440 |




Slika 5.19. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 1 (juta)

Tablica 14. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 2 (juta)

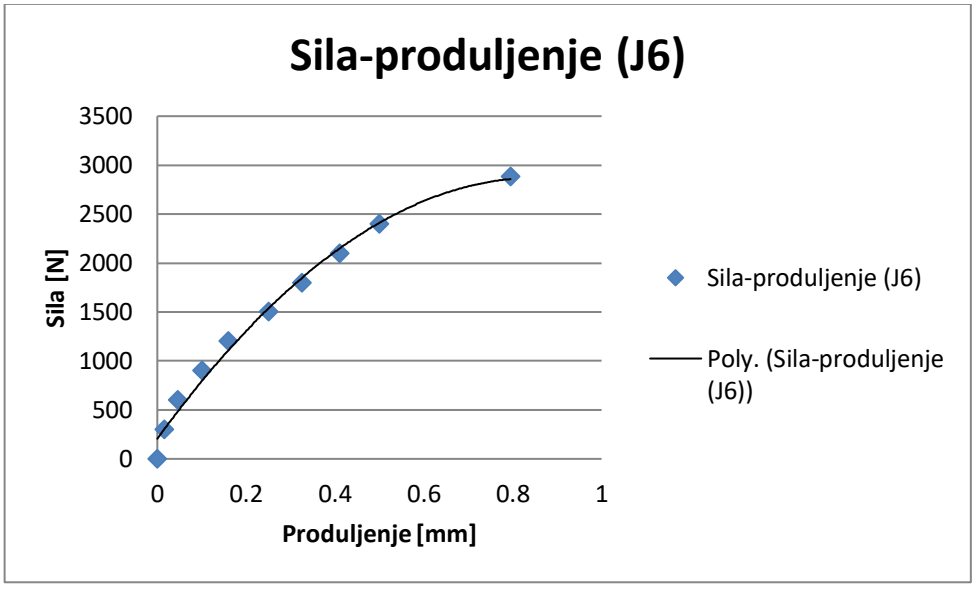
| Epruveta 2 (J5) | | | |
|---|---|---|---|
| Produljenje [mm] | | | Sila [N] |
| Lijevi | Sredina | Desno | |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.03 | 0.025 | 0.02 | 300 |
| 0.07 | 0.055 | 0.04 | 600 |
| 0.13 | 0.105 | 0.08 | 900 |
| 0.19 | 0.155 | 0.12 | 1200 |
| 0.26 | 0.22 | 0.18 | 1500 |
| 0.34 | 0.3 | 0.26 | 1800 |
| 0.42 | 0.395 | 0.37 | 2100 |
| 0.5 | 0.495 | 0.49 | 2400 |
| 0.76 | 0.78 | 0.8 | 2720 |




Slika 5.20. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 2 (juta)

Tablica 15. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 3 (juta)

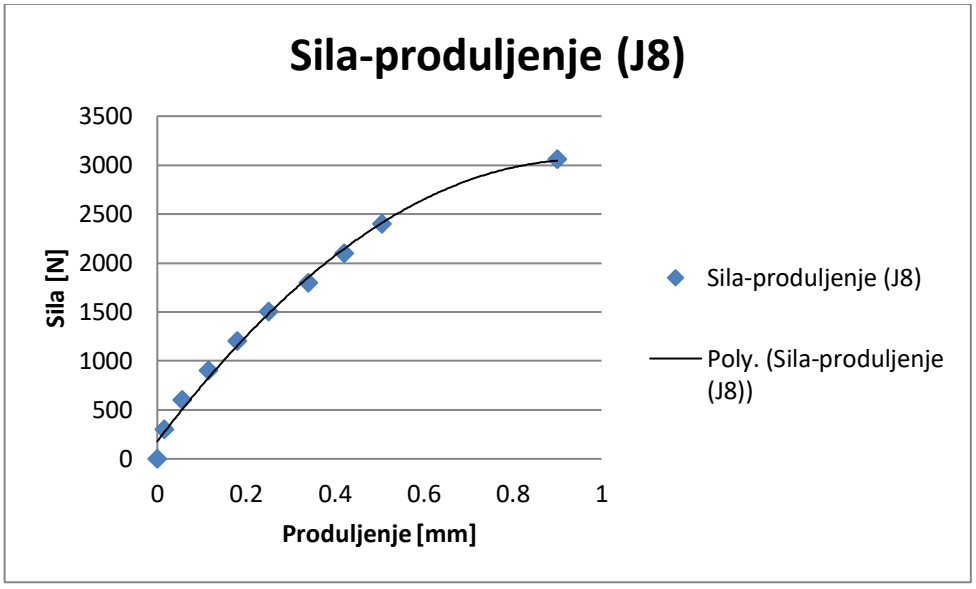
| Epruveta 3 (J6) | | | |
|---|---|---|---|
| Produljenje [mm] | | | Sila [N] |
| Lijevi | Sredina | Desno | |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,02 | 0,015 | 0,01 | 300 |
| 0,06 | 0,045 | 0,03 | 600 |
| 0,11 | 0,1 | 0,09 | 900 |
| 0,17 | 0,16 | 0,15 | 1200 |
| 0,26 | 0,25 | 0,24 | 1500 |
| 0,34 | 0,325 | 0,31 | 1800 |
| 0,42 | 0,41 | 0,4 | 2100 |
| 0,51 | 0,5 | 0,49 | 2400 |
| 0,79 | 0,795 | 0,8 | 2880 |




Slika 5.21. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 3 (juta)

Tablica 16. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 4 (juta)

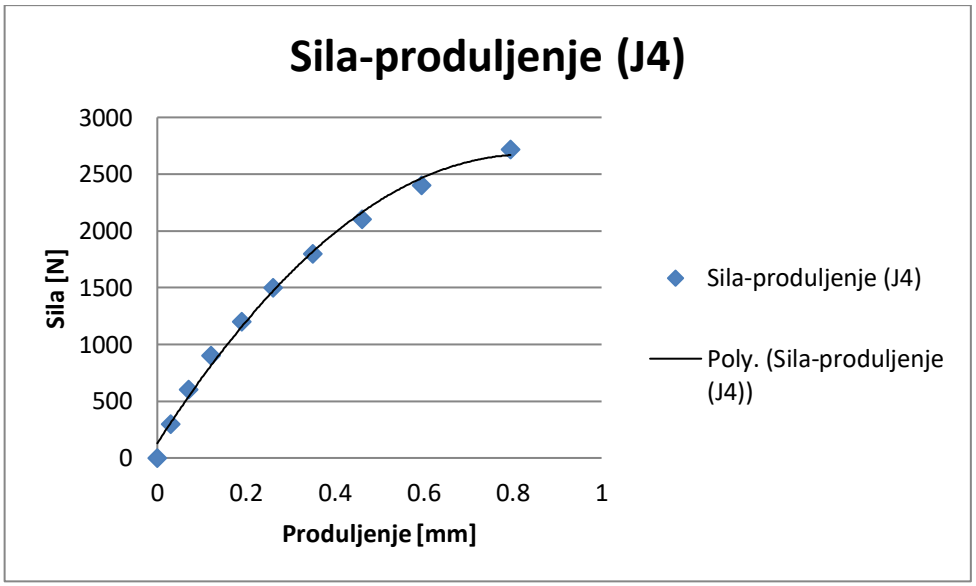
| Epruveta 4 (J8) | | | |
|---|---|---|---|
| Produljenje [mm] | | | Sila [N] |
| Lijevi | Sredina | Desno | |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,01 | 0,015 | 0,02 | 300 |
| 0,06 | 0,055 | 0,05 | 600 |
| 0,12 | 0,115 | 0,11 | 900 |
| 0,18 | 0,18 | 0,18 | 1200 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 1500 |
| 0,34 | 0,34 | 0,34 | 1800 |
| 0,42 | 0,42 | 0,42 | 2100 |
| 0,5 | 0,505 | 0,51 | 2400 |
| 0,91 | 0,9 | 0,89 | 3060 |




Slika 5.22. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 4 (juta)

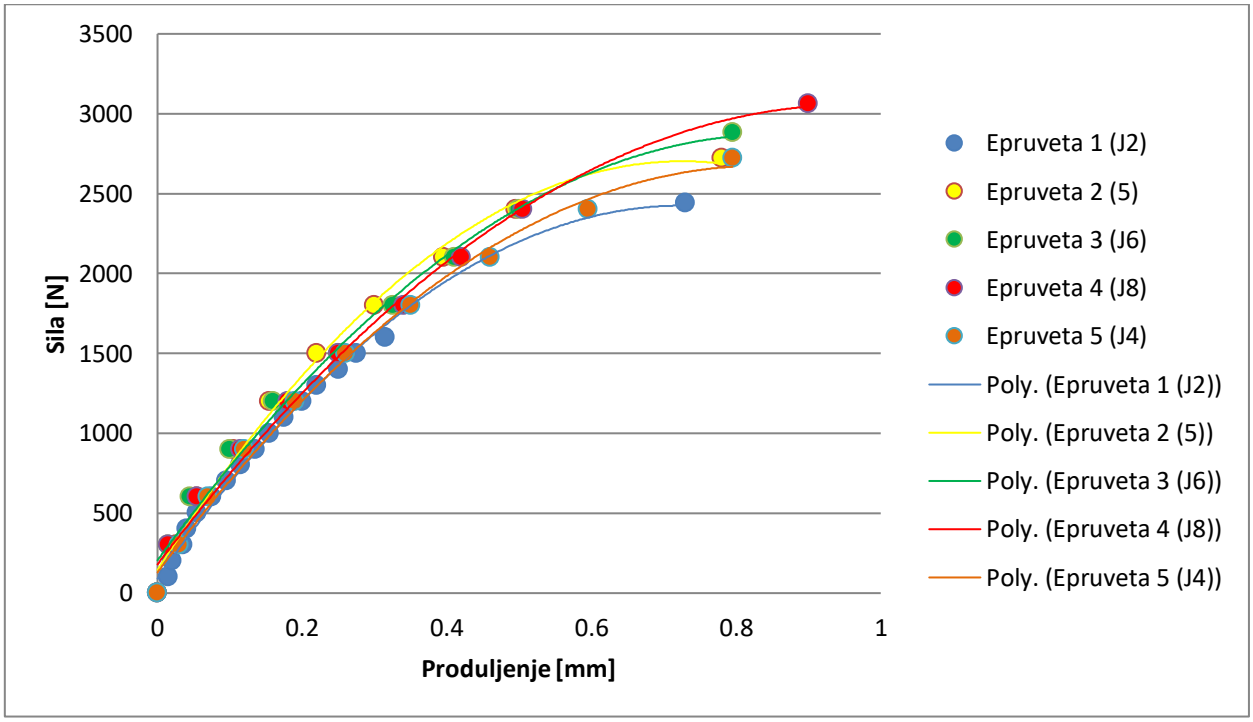
Tablica 17. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za epruvetu 5 (juta)

| Epruveta 5 (J4) | | | |
|---|---|---|---|
| Produljenje [mm] | | | Sila [N] |
| Lijevi | Sredina | Desno | |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0.03 | 0.01 | 300 |
| 0.1 | 0.07 | 0.04 | 600 |
| 0.16 | 0.12 | 0.08 | 900 |
| 0.24 | 0.19 | 0.14 | 1200 |
| 0.32 | 0.26 | 0.2 | 1500 |
| 0.43 | 0.35 | 0.27 | 1800 |
| 0.53 | 0.46 | 0.39 | 2100 |
| 0.65 | 0.595 | 0.54 | 2400 |
| 0.8 | 0.795 | 0.79 | 2720 |




Slika 5.23. Dijagram „sila-produljenje“ za epruvetu 5 (juta)

Na slici 5.24. prikazan je dijagram u ovisnosti produljenja o sili za svih 5 ispitanih epruveta. Iz dijagrama se može zaključiti da do rasipanja rezultata dolazi samo u zadnjem dijelu ispitivanja prije loma epruvete.

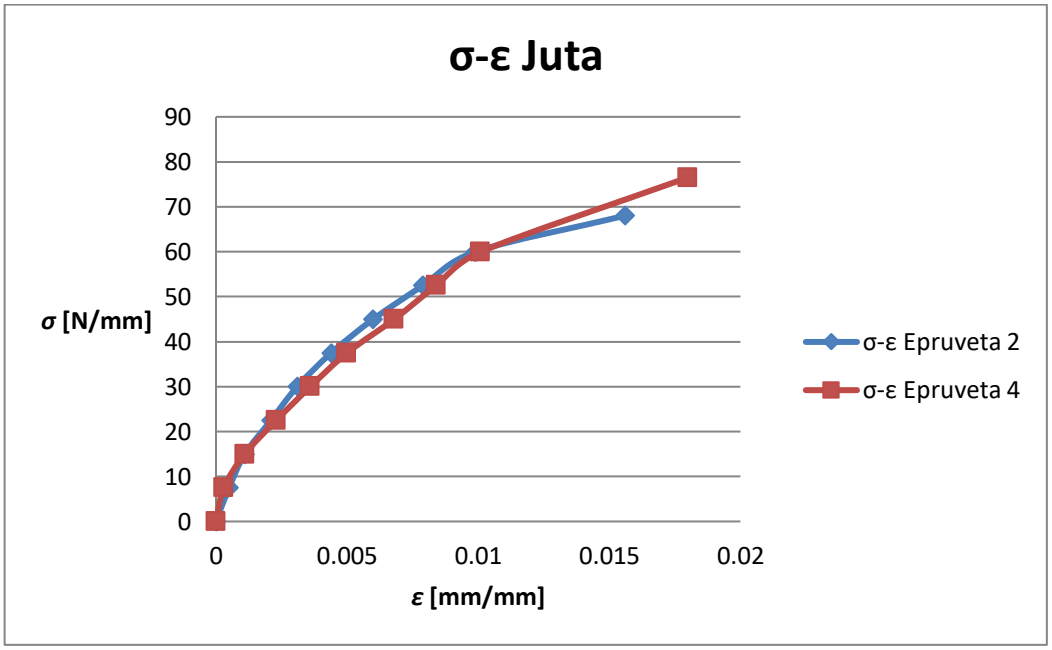



Slika 5.24. Dijagram „sila-produljenje“ za sve epruvete (juta)

### 5.2.6. Proračun mehaničkih svojstva za statičko vlačno ispitivanje (juta)

Analogno proračunu mehaničkih svojstva za statičko vlačno ispitivanje provest će se proračun za jutom ojačane epruvete.

Na slici 5.25. je prikazan opisan linearni dio krivulje,za dvije epruvete, koji će se koristiti za izračun vlačnog modula, [17].




Slika 5.25 Dijagram „naprezanje - istezanje“ (juta)

U tablici 18. prikazane su dimenzije epruveta i izračunate vrijednosti vlačne čvrstoće i vlačnog modula.

Tablica 18. Dimenzije i mehanička svojstva za vlačnu čvrstoću za sve epruvete (juta)

| Epruveta | *b1* [mm] | *h* [mm] | *A* [mm$^2$] | $F_{max}$ [N] | $R_{m,vl,}$ [MPa] | *E* [MPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 4,14 | 41,4 | 2720 | 65,70 | 4830,918 |
| 2 | 9,82 | 4,06 | 39,8692 | 3220 | 80,76 | 4299,775 |
| 3 | 9,74 | 4,15 | 40,421 | 2880 | 71,25 | 4638,678 |
| 4 | 9,86 | 4,04 | 39,8344 | 3060 | 76,82 | 4430,105 |
| 5 | 9,92 | 4,02 | 39,8784 | 2440 | 61,19 | 3761,435 |
| | | | | $\bar{x}$ | 71,14 | 4392,18 |
| | | | | S | 7,96 | 406,53 |

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena vlačne čvrstoće kompozitnog materijala, $\mu_{Rm,vl}$ uz interval vjerodostojnosti $1 - 0{,}95 = \alpha$ .
Za kompozit ojačan lanenim vlaknima iznos intervalne procjene vlačne čvrstoće kompozitnog

$$63{,}03 \ \text{N/mm}^2 < \mu_{Rm,vl} < 79{,}25 \ \text{N/mm}^2. \quad (6)$$

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena vlačnog modula kompozitnog materijala, $E_{vl}$ uz interval vjerodostojnosti $1 - 0{,}95 = \alpha$ .

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima iznos intervalne procjene vlačnog modula kompozitnog materijala iznosi:

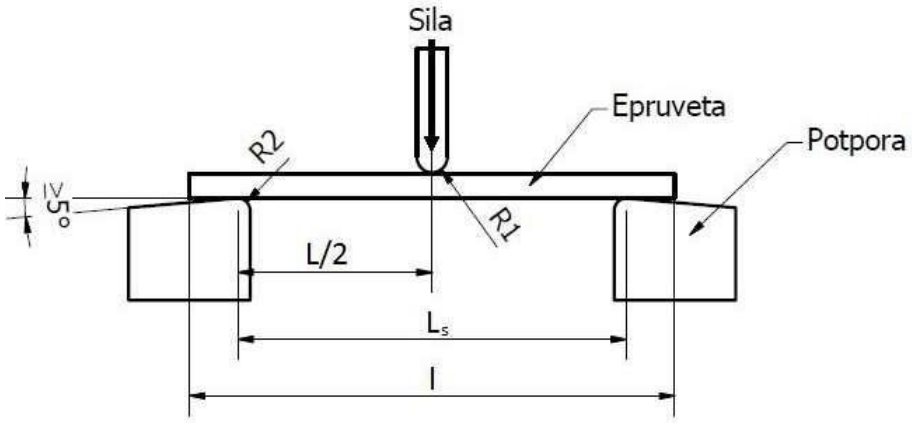
$$3887{,}5 \ \text{N/mm}^2 < \mu_{E,vl} < 4896{,}87 \ \text{N/mm}^2. \quad (7)$$

Usporedba dobivenih rezultata

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je u ovom ispitivanju materijal ojačan lanenim vlaknima pokazao bolja svojstva nego materijal ojačan jutenim vlaknima. Juta, u linearnom dijelu „σ - ε“ dijagrama pokazuje veću krutost ali ima puno manju vlačnu čvrstoću.

### 5.2.7. Savojno ispitivanje

Savojno ispitivanje ili ispitivanje savojne čvrstoće polimernih kompozita provodi se također na univerzalnoj kidalici i to najčešće prema normi ISO 178. Epruvete se postavljaju na postolje za savijanje u tri točke slika 5.26., te se povećava sila savijanja sve do pojave loma, [18].




Slika 5.26. Savojno ispitivanje, [18]

gdje je:
$L_S$ – razmak između oslonaca = 64mm
$l$ – duljina epruvete
$R_1$ = 5 mm ± 0,1 mm
$R_2$ = 5 mm ± 0,2 mm

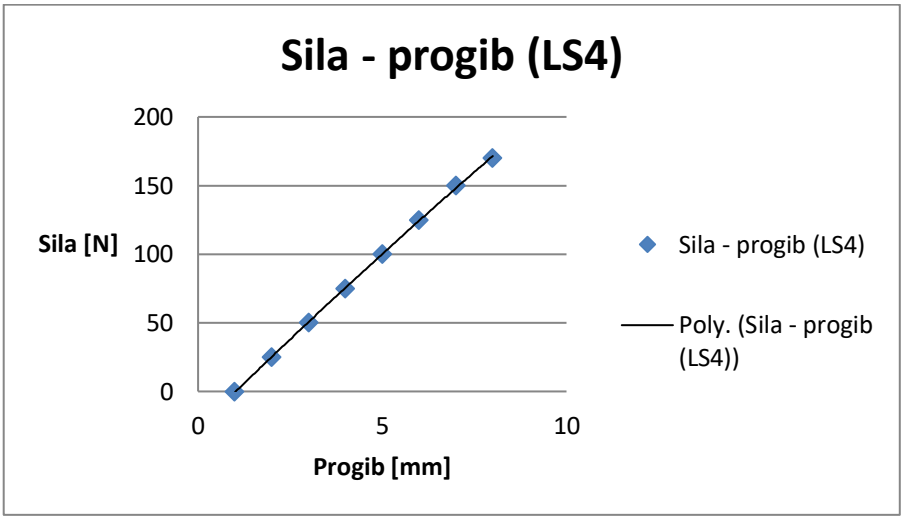
Tijekom ispitivanja se bilježi progib epruvete kako bi se kasnije mogao odrediti i savojni modul elastičnosti. Savojno ispitivanje uglavnom je namijenjeno za utvrđivanje graničnog naprezanja pri kojem dolazi do loma ako je materijal napregnut na savijanje, [18].

### 5.2.8. Rezultati savojnog ispitivanja (lan)

U sljedećim tablicama prikazani su rezultati dobiveni ispitivanje savojne čvrstoće epruveta ojačanih lanenom tkaninom. Rezultati su također prikazani u dijagramu „sila-progib“.

Tablica 19. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 1 (lan)

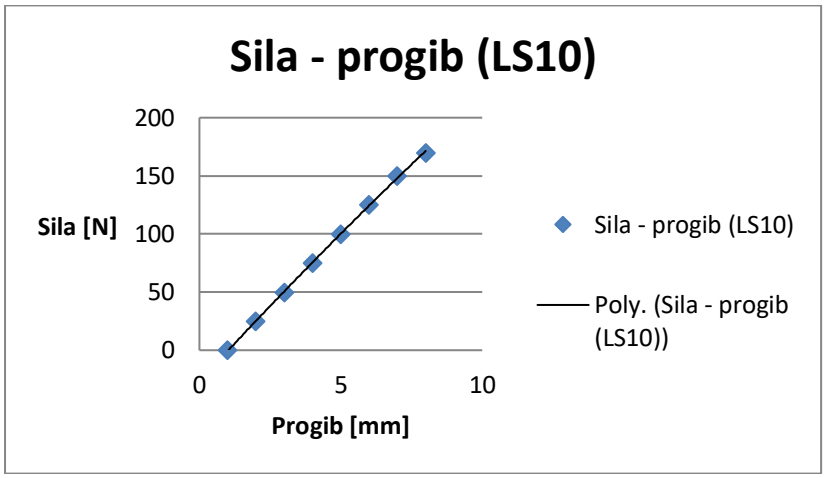
| Epruveta 1 (LS4) | |
|---|---|
| Progib [mm] | Sila [N] |
| 0 | 0 |
| 1,4 | 25 |
| 2,72 | 50 |
| 3,55 | 75 |
| 4 | 100 |
| 4,9 | 125 |
| 5,88 | 150 |
| 9 | 170 |




Slika 5.27. Dijagram „sila - progib“ za epruvetu 1 (lan)

Tablica 20. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 2 (lan)

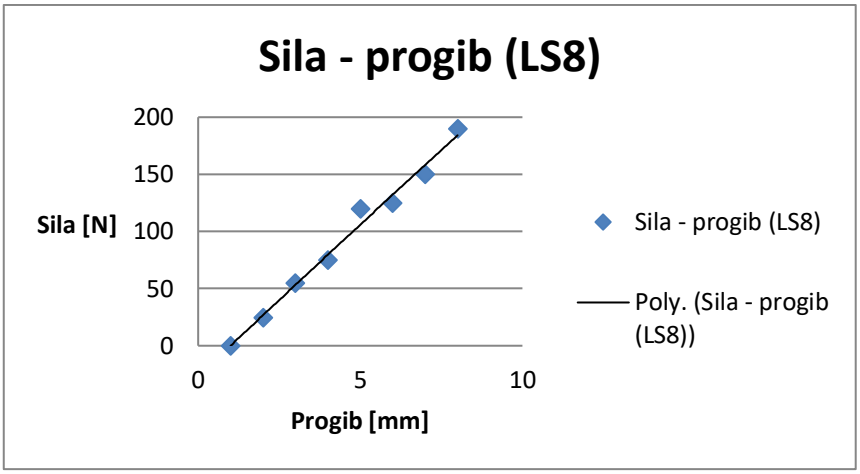
| Epruveta 2 (LS10) | |
|---|---|
| Progib [mm] | Sila [N] |
| 0 | 0 |
| 1,65 | 25 |
| 2,9 | 50 |
| 3,45 | 75 |
| 4,86 | 100 |
| 5,2 | 125 |
| 6 | 150 |
| 10 | 170 |




Slika 5.28. Dijagram „sila - progib“ za epruvetu 2 (lan)

Tablica 21. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 3 (lan)

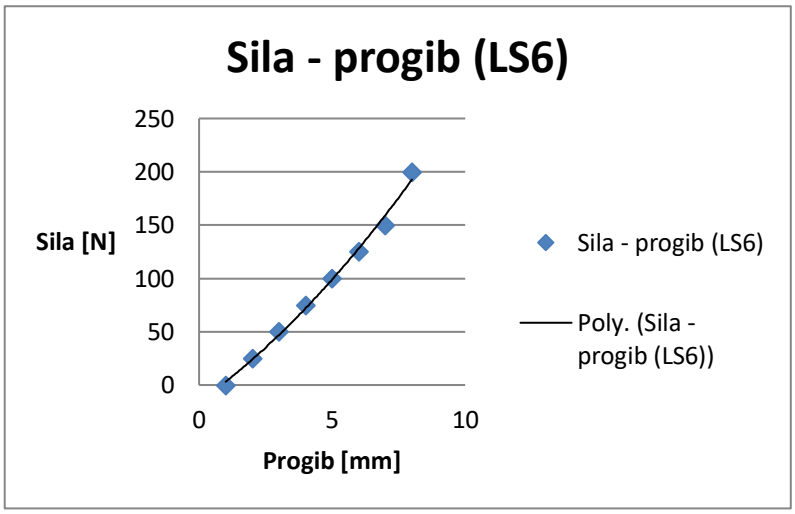
| Epruveta 3 (LS8) | |
|---|---|
| Progib [mm] | Sila [N] |
| 0 | 0 |
| 1,9 | 25 |
| 3,89 | 55 |
| 3,55 | 75 |
| 6 | 120 |
| 6,6 | 125 |
| 7,2 | 150 |
| 9 | 190 |




Slika 5.29. Dijagram „sila - progib“ za epruvetu 3 (lan)

Tablica 22. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 4 (lan)

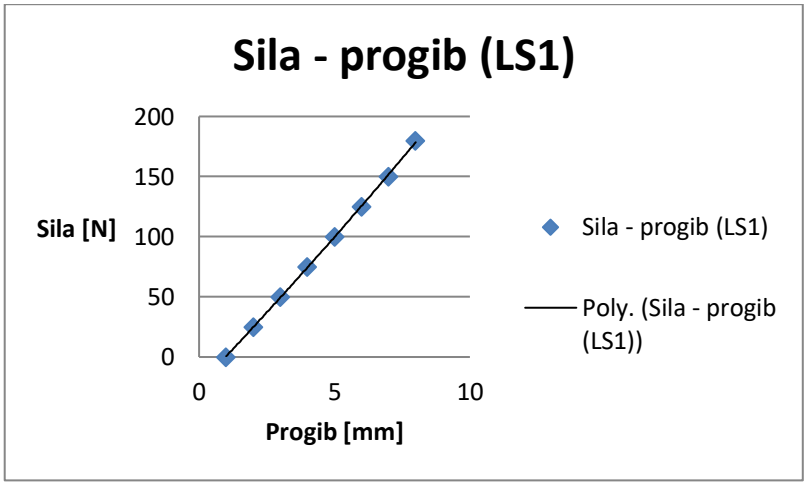
| Epruveta 4 (LS6) | |
|---|---|
| Progib [mm] | Sila [N] |
| 0 | 0 |
| 1,4 | 25 |
| 3 | 50 |
| 3,55 | 75 |
| 4 | 100 |
| 4,9 | 125 |
| 6,3 | 150 |
| 10 | 200 |




Slika 5.30. Dijagram „sila - progib“ za epruvetu 4 (lan)

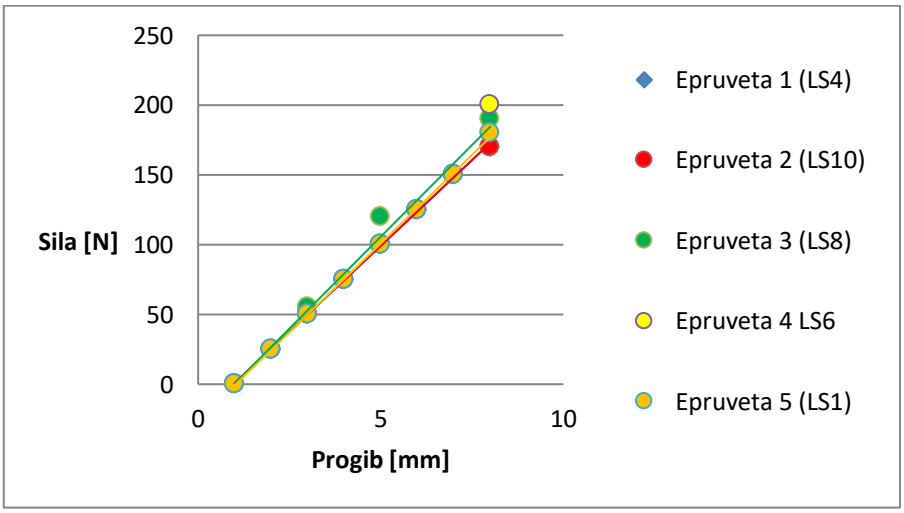
Tablica 23. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 5 (lan)

| Epruveta 5 (LS1) | |
|---|---|
| Progib [mm] | Sila [N] |
| 0 | 0 |
| 1,4 | 25 |
| 3 | 50 |
| 3,55 | 75 |
| 4 | 100 |
| 4,9 | 125 |
| 6,4 | 150 |
| 10 | 180 |




Slika 5.31. Dijagram „sila - progib“ za epruvetu 5 (lan)

Na Slici 5.32. prikazana je ovisnost progiba o sili za svih 5 ispitanih epruveta. Iz dijagrama se može zaključiti da ne postoji značajno rasipanje rezultata te je ispitivanje uspjelo.




Slika 5.32. Dijagram „sila - progib“ za sve epruvete (lan)

### 5.2.9. Proračun mehaničkih svojstva za savojnu čvrstoću (lan)

Za sve ispitane epruvete biti će izračunat iznos savojne čvrstoće $R_{ms}$ i to po izrazu, [19]:

$$R_{ms} = \frac{3F_{\max} \cdot L}{2b \cdot h^2} \qquad [\text{MPa}] \quad . \tag{8}$$

Također će biti određen savojni modul elastičnosti $E_s$ na temelju izraza,[17]:

$$E_s = \frac{L^3}{4bh^3} \cdot f \qquad [\text{N/mm}^2] \quad . \tag{9}$$

Tablica 24. Dimenzije i mehanička svojstva za savojnu čvrstoću za sve epruvete (lan)

| Epruveta | *b1* [mm] | *h* [mm] | *L* [mm] | *F/f* | $F_{max}$ [N] | $R_{ms}$ [MPa] | $E_s$ [MPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 9,72 | 4,02 | 64 | 18,89 | 170 | 103,90 | 1960,387 |
| 2 | 9,76 | 3,98 | 64 | 17 | 170 | 105,56 | 1810,63 |
| 3 | 9,9 | 4 | 64 | 21,11 | 190 | 115,15 | 2183,614 |
| 4 | 9,8 | 4 | 64 | 20 | 200 | 122,45 | 2089,796 |
| 5 | 9,82 | 4 | 64 | 18 | 180 | 109,98 | 1876,986 |
| | | | | | $\bar{x}$ | 111,41 | 1984,28 |
| | | | | | S | 7,56 | 152,57 |

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena savojne čvrstoće kompozitnog materijala, $\mu_{Rm,s}$ uz interval vjerodostojnosti 1 - 0,95 = $\alpha$ .

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima iznos intervalne procjene savojne čvrstoće kompozitnog materijala iznosi:

$$102{,}02 \ \text{N/mm}^2 < \mu_{Rm,s} < 120{,}8 \ \text{N/mm}^2. \tag{10}$$

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena savojnog modula kompozitnog materijala, $E_s$ uz interval vjerodostojnosti $1 - 0{,}95 = \alpha$ .

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima iznos intervalne procjene savojnog modula kompozitnog materijala iznosi:

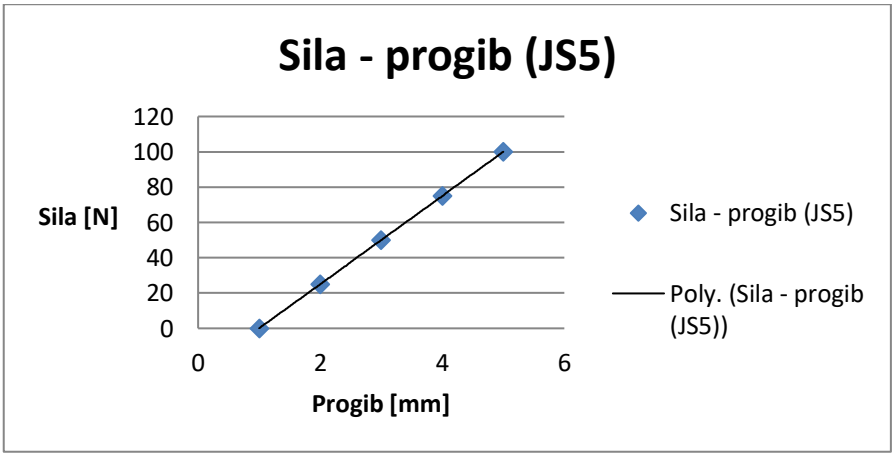
$$1794{,}87 \ \text{N/mm}^2 < \mu_{Es} < 2173{,}7 \ \text{N/mm}^2. \qquad (11)$$

### 5.2.10. Rezultati savojnog ispitivanja (juta)

U sljedećim tablicama prikazani su rezultati dobiveni ispitivanje savojne čvrstoće epruveta ojačanih jutenim vlaknima. Rezultati su također prikazani u dijagramu „sila-progib“.

Tablica 25. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 1 (juta)

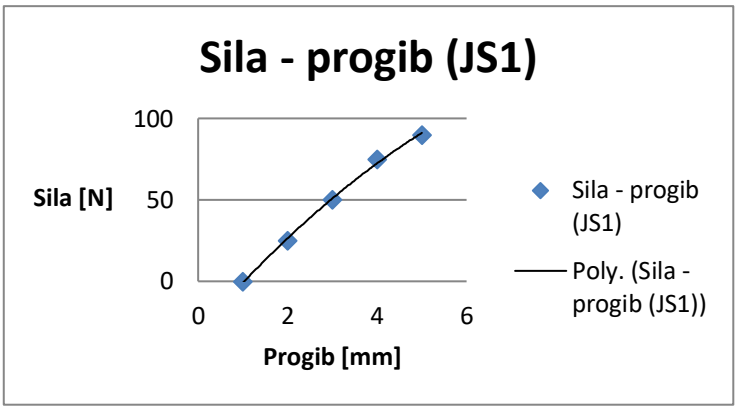
| Epruveta 1 (JS5) | |
|---|---|
| Progib [mm] | Sila [N] |
| 0 | 0 |
| 2,6 | 25 |
| 3,85 | 50 |
| 7,3 | 75 |
| 10 | 100 |




Slika 5.33. Dijagram „sila - progib“ za epruvetu 1 (juta)

Tablica 26. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 2 (juta)

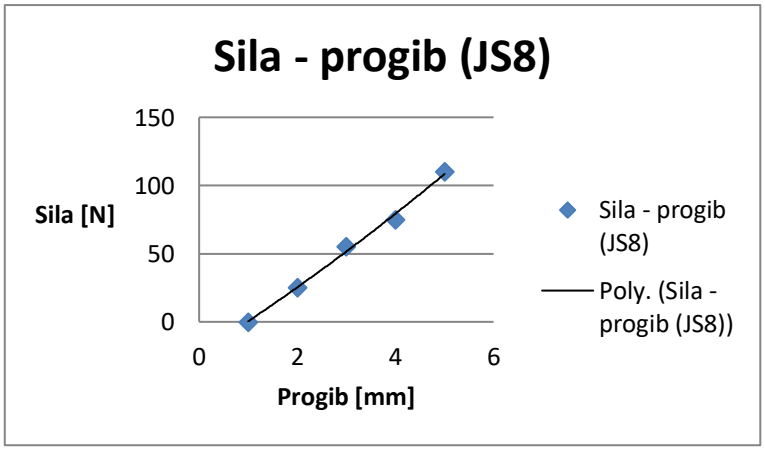
| Epruveta 2 (JS1) | |
|---|---|
| Progib [mm] | Sila [N] |
| 0 | 0 |
| 2,1 | 25 |
| 3,9 | 50 |
| 6,3 | 75 |
| 8,2 | 90 |




Slika 5.34. Dijagram „sila - progib“ za epruvetu 2 (juta)

Tablica 27. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 3 (juta)

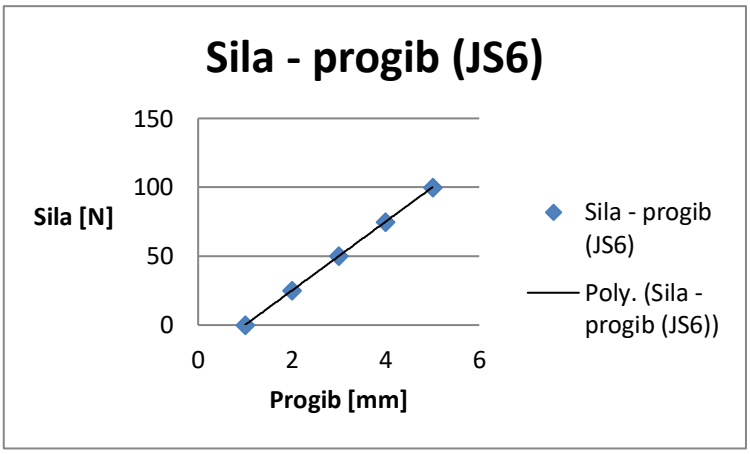
| Epruveta 3 (JS8) | |
|---|---|
| Progib [mm] | Sila [N] |
| 0 | 0 |
| 2,21 | 25 |
| 4,1 | 55 |
| 6,2 | 75 |
| 7,2 | 110 |




Slika 5.35. Dijagram „sila - progib“ za epruvetu 3 (juta)

Tablica 28. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 4 (juta)

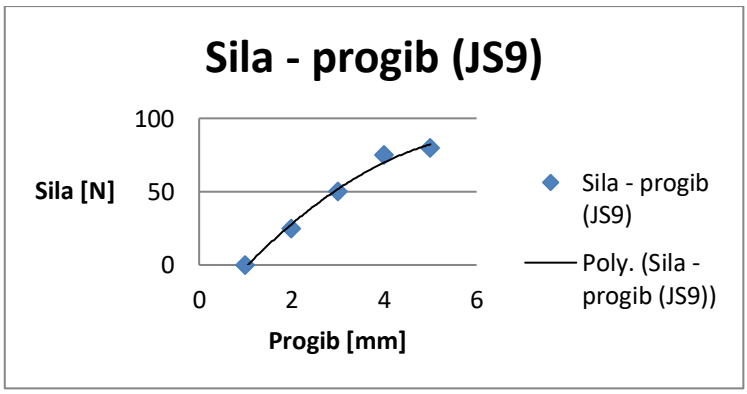
| Epruveta 4 (JS6) | |
|---|---|
| Progib [mm] | Sila [N] |
| 0 | 0 |
| 1,95 | 25 |
| 3,8 | 50 |
| 6,05 | 75 |
| 9,2 | 100 |




Slika 5.36. Dijagram „sila - progib“ za epruvetu 4 (juta)

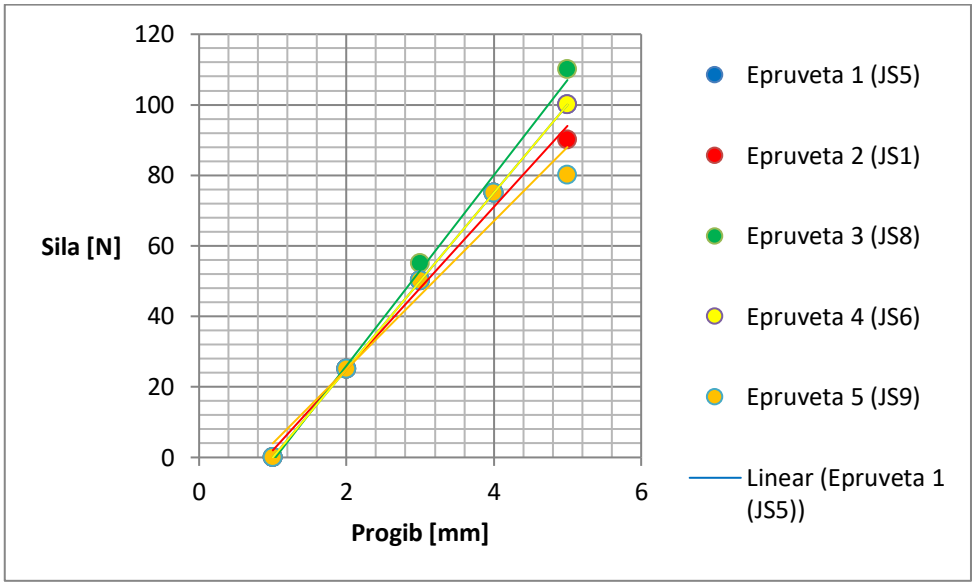
Tablica 29. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za epruvetu 5 (juta)

| Epruveta 5 (JS9) | |
|---|---|
| Progib [mm] | Sila [N] |
| 0 | 0 |
| 2,3 | 25 |
| 3,96 | 50 |
| 6,1 | 75 |
| 7,5 | 80 |




Slika 5.37. Dijagram „sila - progib“ za epruvetu 5 (juta)

Na slici 5.38. prikazana je ovisnost progiba o sili za svih 5 ispitanih epruveta. Iz dijagrama se može zaključiti da postoji određeno rasipanje rezultata koje je prihvatljivo te dovoljno za statističku obradu podataka.




Slika 5.38. Dijagram „sila - progib“ za sve epruvete (juta)

### 5.2.11. Proračun mehaničkih svojstva za savojnu čvrstoću (juta)

Analogno proračunu mehaničkih svojstva za savojnu čvrstoću lana u sljedećoj tablici će biti prikazane vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula za kompozit ojačan jutenim vlaknima.

Tablica 30. Dimenzije i mehanička svojstva za savojnu čvrstoću za sve epruvete (juta)

| Epruveta | *b1* [mm] | *h* [mm] | *L* [mm] | *F/f* | $F_{max}$ [N] | $R_{ms}$ [MPa] | $E_s$ [MPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 9,88 | 4,08 | 64 | 10 | 100 | 58,37 | 976,658 |
| 2 | 9,92 | 4,04 | 64 | 10,98 | 90 | 53,36 | 1099,646 |
| 3 | 9,9 | 4 | 64 | 15,278 | 110 | 66,67 | 1580,247 |
| 4 | 9,8 | 3,94 | 64 | 10,87 | 100 | 63,10 | 1188,44 |
| 5 | 9,88 | 3,9 | 64 | 10,67 | 80 | 51,11 | 1192,773 |
| | | | | | $\bar{x}$ | 58,52 | 1207,55 |
| | | | | | S | 6,50 | 226,08 |

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena savojne čvrstoće kompozitnog materijala, $\mu_{Rm,s}$ uz interval vjerodostojnosti $1 - 0{,}95 = \alpha$ .

Za kompozit ojačan jutenim vlaknima iznos intervalne procjene savojne čvrstoće kompozitnog materijala iznosi:

$$50{,}45 \ \text{N/mm}^2 < \mu_{Rm,s} < 66{,}59 \ \text{N/mm}^2. \qquad (12)$$

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena savojnog modula kompozitnog materijala, $E_s$ uz interval vjerodostojnosti $1 - 0{,}95 = \alpha$ .

Za kompozit ojačan jutenim vlaknima iznos intervalne procjene savojnog modula kompozitnog materijala iznosi:

$$926{,}88 \ \text{N/mm}^2 < \mu_{Es} < 1488{,}22 \ \text{N/mm}^2. \qquad (13)$$

Usporedba dobivenih rezultata

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da kompozit ojačan lanenim vlaknima pokazuje skoro dvostruko veću savojnu čvrstoću od kompozita ojačanog jutenim vlaknima.

### 5.2.12. Ispitivanje žilavosti

Žilavost se ispituje ako su materijali u konstrukciji izloženi udarnom opterećenju. Žilavost je najlakše odrediti ispitivanjem udarnog rada loma na uređaju koji se naziva Charpyjev bat, slika 5.39, [18].



Slika 5.39. Charpyjev bat

Glava bata se postavlja u početnu poziciju $h_1$ te se iz tog položaja pušta da udari epruvetu. Nakon što bat udari epruvetu doseže određenu visinu u stanju mirovanja $h_2$, a pritom zaustavlja pokazivač na određenoj vrijednosti na mjernoj skali. Na temelju tih dviju vrijednosti visina bata u stanju mirovanja i mase bata, na mjernoj skali se očitava iznos žilavosti. Točnije, razlika potencijalnih energija glave bata u stanju mirovanja prije i nakon udarca jednaka je energiji utrošenoj na lom uzorka, odnosno jednaka je udarnom radu loma, [18].

$$KV = mgh_1 - mgh_2, \tag{13}$$

$$A_{cu} = \frac{KV}{b \cdot h}. \tag{14}$$

### 5.2.13. Rezultati ispitivanja žilavosti

Rezultati ispitivanja žilavosti kompozitnog materijala ojačanog lanenim vlaknima, prikazani su u tablici 31. Masa bata sa slike 5.39. iznosi 1000 grama te je početni kut nagiba bata 30°. Visina $h_1$ = 430mm.

Tablica 31. Rezultati ispitivanja žilavosti (lan)

| Epruveta | *b* [mm] | *h* [mm] | *L* [mm] | $h_1$ [mm] | $h_2$ [mm] | $E_{cu}$ [J] | $A_{cu}$ [J/mm$^2$] | *Acu* [J/m$^2$] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LU4 | 9,92 | 4,01 | 70 | 430 | 374,74 | 0,54 | 0,01 | 13,62 |
| LU10 | 9,81 | 3,92 | 70 | 430 | 388,32 | 0,41 | 0,01 | 10,63 |
| LU3 | 9,97 | 3,98 | 70 | 430 | 365,19 | 0,64 | 0,02 | 16,02 |
| LU7 | 10,01 | 4 | 70 | 430 | 365,19 | 0,64 | 0,02 | 15,87 |
| LU5 | 9,9 | 4,05 | 70 | 430 | 386,12 | 0,43 | 0,01 | 10,73 |
| | | | | | | | $\bar{x}$ | 13,37 |
| | | | | | | | **S** | 2,64 |

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena udarnog rada loma kompozitnog materijala, $\mu_{Acu}$ uz interval vjerodostojnosti 1 - 0,95 = $\alpha$ .

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima iznos intervalne procjene udarnog rada loma kompozitnog materijala iznosi:

$$10{,}09 \ \text{kJ/m}^2 < \mu_{Acu} < 16{,}65 \ \text{kJ/m}^2. \qquad (15)$$

Rezultati ispitivanja žilavosti kompozita ojačanog jutenim vlaknima prikazani su u tablici 32.

Tablica 32. Rezultati ispitivanja žilavosti (juta)

| Epruveta | $b$ [mm] | $h$ [mm] | $L$ [mm] | $h_1$ [mm] | $h_2$ [mm] | $E_{cu}$ [J] | $A_{cu}$ [J/mm$^2$] | $Acu$ [J/m$^2$] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| JU3 | 9,94 | 4 | 70 | 430 | 421,24 | 0,09 | 0,002 | 2,16 |
| JU4 | 9,94 | 3,9 | 70 | 430 | 416,07 | 0,14 | 0,004 | 3,52 |
| JU10 | 10,01 | 3,96 | 70 | 430 | 410,62 | 0,19 | 0,005 | 4,79 |
| JU1 | 10 | 4,02 | 70 | 430 | 422,89 | 0,07 | 0,002 | 1,73 |
| JU7 | 9,4 | 4,01 | 70 | 430 | 425,32 | 0,05 | 0,001 | 1,22 |
| | | | | | | | $\bar{x}$ | 2,69 |
| | | | | | | | **S** | 1,46 |

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena udarnog rada loma kompozitnog materijala, $\mu_{Acu}$ uz interval vjerodostojnosti $1 - 0{,}95 = \alpha$ .

Za kompozit ojačan jutenim vlaknima iznos intervalne procjene udarnog rada loma kompozitnog materijala iznosi:

$$0{,}878 \ \text{kJ/m}^2 < \mu_{Acu} < 4{,}5 \ \text{kJ/m}^2. \qquad (16)$$

Usporedba dobivenih rezultata

Iz dobivenih rezultata može se vidi kako oba materijala imaju veoma loše svojstvo žilavosti ali kompozit ojačan lanenim vlaknima i dalje pokazuje puno bolju žilavost nego kompozit ojačan jutenim vlaknima.

### 5.2.14. Test higroskopnosti

Zbog nedostatka vremena dvije ispitne epruvete, slika 5.40., bile su uronjene u vodu tjedan dana, na konstantnoj temperaturi, te im je nakon toga izmjerena masa. Masa uzoraka se nije promijenila ali je na mjestima loših rezova došlo do laganog bubrenja. Iz ovog testa se može zaključiti da rezovi gdje su u poprečnom presjeku prisutna vlakna nisu dobri te da će prirodna vlakna kroz te rezove kapilarno upiti vodu te otežati konstrukciju. Za ovaj test potrebno je puno više istraživanja, veći broj epruveta i veći vremenski period ispitivanja.



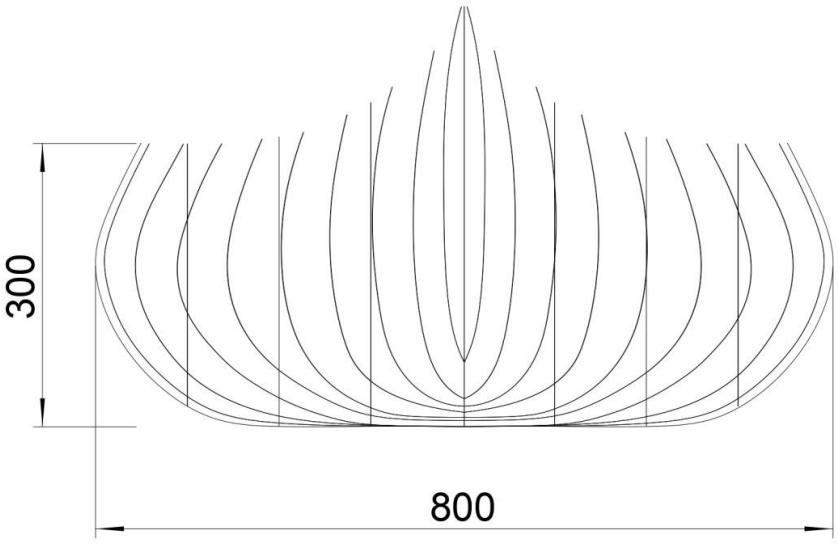
Slika 5.40. Epruvete za test higroskopnosti

# 6. GEOMETRIJA PLOVILA I PRORAČUN PLOVNOSTI

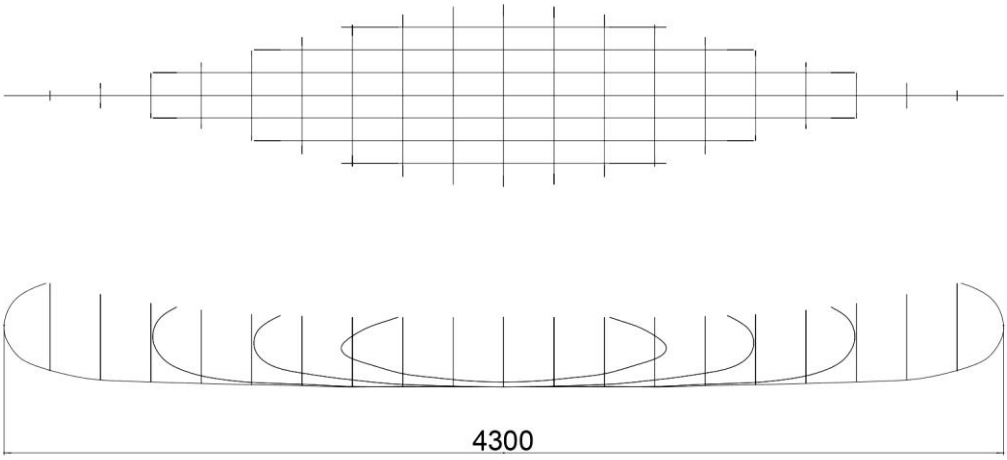
U ovom poglavlju bit će definirana osnovna geometrija rekreacijskog plovila, u ovom slučaju riječni čamac te će za njega biti proračunata tri uvjeta plovnosti. Model po kojem je određena geometrija preuzet je iz [20]. Sa sličnog modela su izmjerene polu širine rebra i kontura pramca i krme. Model je simetričan u odnosu na uzdužnu i poprečnu os. Glavne dimenzije ovog modela iznose:

$$\begin{aligned} L_{OA} &= 4300 \text{ mm}, \\ D &= 300 \text{ mm}, \\ B_p &= 800 \text{ mm}. \end{aligned} \tag{17}$$

Model je izrađen u programskom paketu „Rhinoceros 6“. Na sljedećim slikama prikazan je nacrt rebara, pogled s boka (uzdužnice) i tlocrt, slika 6.1. i slika 6.2.

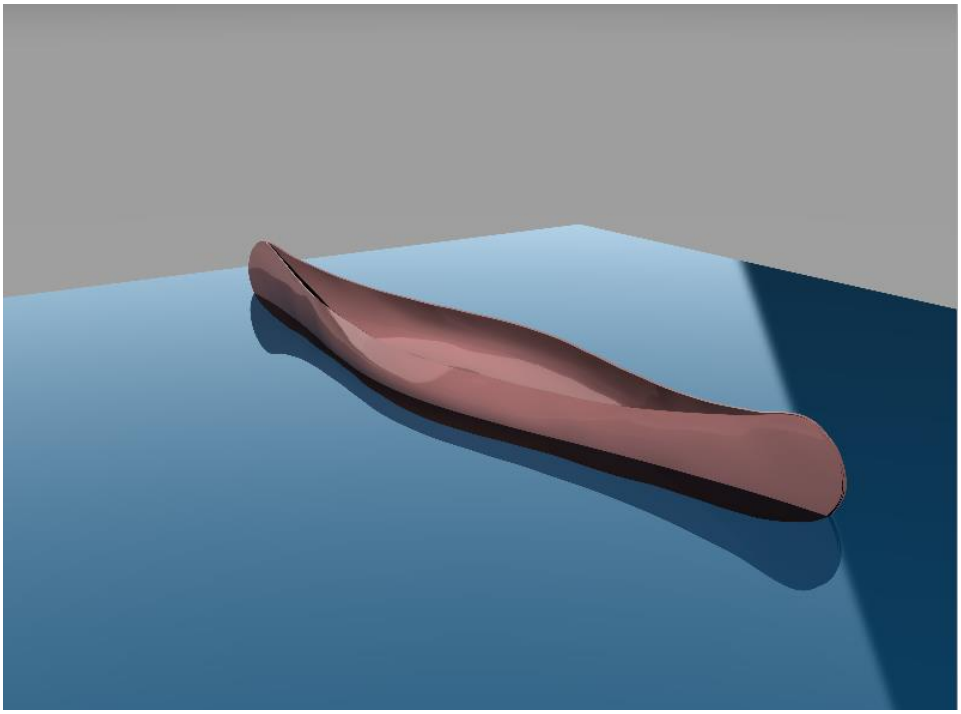



Slika 6.1 Nacrt rebara




Slika 6.2. Pogled s boka i tlocrt

Radi izračuna osnovnih hidrostatičkih značajki model je izrađen kao površina i kao tijelo. Na modelu je zanemareno ojačanje kobilice, ojačanja rebra, obrub i sjedala koji doprinose čvrstoći. Modelirana je samo oplata kako bi se odredile osnovne značajke ove forme, slika 6.3.



Slika 6.3. Prikaz 3D modela plovila

### 6.1 Izračun mase plovila

Za proračun tri uvjeta plovnosti potrebna nam je masa plovila. Kao materijal odabran je kompozit ojačan lanenom tkaninom zbog boljih mehaničkih svojstava. Iz dimenzija epruveta za ispitivanje i njihovih masa slijedi da je gustoća ovog materijala jednaka:

$$\rho_{LAN} = 1836,969 \text{ kg/m}^3 = 1,83696 \text{ g/cm}^3. \quad (18)$$

Za potrebe ovog izračuna odabrana je debljina stijenke 10 mm [21], te je na spojevima lijeve i desne strane na pramcu i krmi debljina 20 mm. Te debljine stijenke su nepotrebne za stvarno plovilo i masa bi bila prevelika ali za proračun plovnosti to neće biti bitno. Masa plovila navedenih dimenzija s materijalom gustoće $\rho_{lan}$ iznosi:

$$m_p = 69,75 \text{ kg} . \quad (19)$$

### 6.2 Proračun plovnosti

Prvi uvjet plovnosti se može izraziti jednadžbom:

$$\Delta = F_L = V \cdot \rho_{sv}, \quad (20)$$

gdje je $\Delta$ težina plovila i svih predmeta na njemu, $F_L$ je sila uzgona, V volumen podvodnog dijela forme plovila a $\rho_{sv}$ gustoća vode. Da bi opteretili plovilo postavit ćemo dvije mase od 100 kg, koje predstavljaju veslače, na jednaku udaljenost od glavnog rebra i na visinu centra masa kako se ne bi promijenilo težište masa. Voda je slatkovodna te njena gustoća iznosi 1000 kg/m$^3$. U programskom paketu „Rhinoceros 6“ izračunat je volumen uronjene forme za ovo opterećenje koji iznosi 0,26975m$^3$ . Time plovilo zadovoljava prvi uvjet plovnosti i dobiva gaz koji je jednak:

$$T = 174,02 \text{ mm} . \quad (21)$$

Dugi uvjet plovnosti zahtjeva da pravac sile težine i uzgona odnosno, težište sustava G i težište istisnine $B_0$ nalaze na istom pravcu. Budući da je forma plovila simetrična oko uzdužne i poprečne osi drugi uvjet je zadovoljen.

Treći uvjet plovnosti zahtjeva da početna metacentarska visina $M_0G$ bude pozitivna odnosno da model plovi stabilno te da kod malih poprečnih nagiba moment sila težine i uzgona vraća brod u prvobitni, stabilan položaj. Početna metacentarska visina se računa prema izrazu:

$$M_0G = KB_0 + M_0B_0 - KG. \tag{22}$$

Programski paket „Rhinoceros 6“ ima mogućnost izračuna svih hidrostatičkih značajki modela ako se model pozicionira na ispravan način. Vrijednosti dobivene za izračun početne metacentarske visine iznose :

$$\begin{aligned} KG &= 135,64 \text{ mm}, \\ KB_0 &= 97,6252 \text{ mm}, \\ M_0B_0 &= 620,2124 \text{ mm}. \end{aligned} \tag{23}$$

Uz prekomjernu masu trupa plovila metacentarska visina je pozitivna i time zadovoljava sva tri uvjeta plovnosti.

# 7. ZAKLJUČAK

U ovome završnom radu cilj je bio istražiti mogućnosti primjene biokompozitnog materijala za potrebe gradnje trupa rekreacijskog plovila. Odabrana su dva kandidata te su ispitana njihova mehanička i kemijska svojstva. Kao materijal s boljim svojstvima pokazao se biokompozit ojačan lanenom tkaninom. Proučavajući kompozit ojačan lanenom tkaninom sa stajališta rezultata koji su dobiveni mehaničkim ispitivanjem, može se zaključiti kako uz malo rasipanja rezultata, materijal pokazuje vlačnu i savojnu čvrstoću približnu kompozitu ojačanom staklenim vlaknima. Žilavost ovog materijala je veoma loša pa bi, u svrhu povećanja žilavosti, bilo potrebno provesti dodatna ispitivanja mijenjanjem smjera vlakana ili miješanjem lanene tkanine s još nekom vrstom prirodnih vlakna.

Kompozit ojačan prirodnim vlaknima, kada je izložen zahtjevnom radnom okruženju poput onog koje se susreće na brodu, se brže razgrađuje te s vremenom gubi svoja mehanička svojstva. Također prirodna vlakna zbog svojstva higroskopnosti upijaju vodu mnogo jače nego bilo koji drugi tip vlakana te tako dobivaju na masi. U sljedećem koraku ispitivanja trebalo bi više dati naglasak na ponašanje kompozita u takvim uvjetima te korištenjem nekih dodataka smoli pokušati spriječiti prodiranje vode u materijal.

Prema dobivenim rezultatima ovakav kompozit bi mogao biti primijenjen u raznim granama industrije pa tako i u maloj i velikoj brodogradnji. Uz dovoljnu potporu znanstvenika, inženjera i industrije mogao bi zamijeniti trenutačno korištene kompozite i tako značajno smanjiti ekološki utjecaj istih.

# LITERATURA

[1] Adhikari M.: Natural fibre composites for injection moulding, Plastics Technology, 2012

[2] In situ long-term durability analysis of biocomposites int he marine enviorment Guilherme Apolinario Testoni (2015)

[3] Composites: materials of the future, Part 8: Bio-based composites, http://www.pluscomposites.eu/sites/default/files/Technical-articles-chapter8-English.pdf. (5. 12. 2017.)

[4] http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/natural-fibre-composites-overview

[5] https://www.science.org.au/curious/technology-future/composite-materials

[6] Marić G.; Materijali II, autorizirano predavanje, FSB, Zagreb, 2012.

[7] Hrvatska enciklopedija, tehnički materijali, http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=60649 (5. 12. 2017.)

[8] Yadav Khagendra Kumar, Dr. Dalbir Singh Lohnhab; Influence of Aviation Fuel on Mechanical properties of Glass Fiber-Reinforced Plastic Composite, India, 2016

[9] Tudu, P.; Processing and Characterization of Natural Fiber Feinforced Polymer Composites, završni rad, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, Indija, 2009. http://www.unn.edu.ng/publications/files/images/final_project%20mme%20okey.PDF (8. 12. 2017.)

[10] Karačić M. ;Svojstva i primjena lanenim vlaknima ojačanih biokompozita,Sveučilište u Zagrebu,Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2020

[11] Ivica Smojver; Mehanika kompozitnih materijala FSB,Zagreb, 06/2007

[12] T. Raja, Dr. P. Anand, M. Karthik, M. Sundaraj; EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF NATURAL FIBRE REINFORCED COMPOSITES – A REVIEW ,2017

[13] Balakrishnan P., John M.J, Pothen L., Sreekala M.S., Thomas S.; Natural Fibre Composites and their Applications in Aerospace Engineering, Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering, Processing, Properties and Applications, Elsevier, 2016., 365-383, https://researchspace.csir.co.za/dspace/handle/10204/9314 (20. 12.2017.)

[14] Basem E. Tawfik,Heba Leheta,Ahmed Elhewy,Tarek Elsayed ;Weight reduction and strengthening of marine hatch covers by using composite materials, 2016

[15] https://biofuelsdigest.com/nuudigest/2018/09/03/biocomposite-boat-takes-sail/

[16] Osnove teorije uzoraka, Inženjerska statistika, https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/30_05_2012__15718_Osnove_teorije_uzoraka_2011.pdf (29. 10. 2018.)

[17] Zweben, C.; W. S. Smith & M. W. Wardle (1979), "Test methods for fiber tensile strength, composite flexural modulus, and properties of fabric-reinforced laminates", Composite Materials: Testing and Design (Fifth Conference), ASTM International: 228–228–35

[18] Kupres K.; Kompozitni materijali proizveden od otpadnog papira, FSB, 2015.,repozitorij.fsb.hr/4560/ (10. 5. 2018.)

[19] Špiranec R.; Savojna čvrstoća drva hrasta u longitudinalnom smjeru, FSB, 2018

[20] https://grabcad.com/library/wood-canoe

[21] Gibbs and Cox, Inc.; Marine design manual for fiberglass reinforced plastics, McGraw-hill book company, New york, Toronto, London, 1960

# PRILOG

I. CD-disk