

# Mehanička svojstva epoksidne smole ojačane lanenim vlaknima

---

Živoder, Matija

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:235:718793>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-12**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Matija Živoder**

Zagreb, 2021. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Tatjana Haramina, dipl, ing.

Student:

Matija Živoder

Zagreb, 2021. godina.

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

Zahvaljujem se mentorici izv. prof. dr. sc. Tatjani Haramini koja mi je omogućila svu potrebnu opremu i pomogla svojim savjetima pri izradi ovog završnog rada, te što je uvijek imala strpljenja i vremena za moje upite. Također se zahvaljujem tehničkim suradnicima Mireli Petranović i Božidaru Bušetinčanu oko pomoći kod izrade eksperimentalnog dijela rada. Još se zahvaljujem i prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu, dipl. ing., na davanju literature.

Matija Živoder



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

**Matija Živoder**

Mat. br.: 0035207903

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Mehanička svojstva epoksidne smole ojačane lanenim vlaknima**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Mechanical properties of epoxy resin reinforced with flax fibers**

Opis zadatka:

Zbog dobrih mehaničkih svojstava, niske gustoće i prihvatljive cijene, lanena vlakna se sve više koriste kao alternativa staklenim vlaknima za ojačavanje polimera. Dobra adhezijska svojstava epoksidne smole čine ju prikladnim materijalom za matrice kompozita ojačanih biološkim vlaknima.

U radu je potrebno izraditi kompozitnu ploču od epoksidne smole i lanenih vlakana, te ispitati mehanička svojstva pri rasteznom i savojnom opterećenju, prividnu smičnu međuslojnu čvrstoću i tvrdoću.

Rad mora sadržavati:

- pregled materijala za izradu biokompozita
- opis izrade i ispitivanja kompozita
- prikaz i analizu rezultata
- usporedbu rezultata s literaturnim vrijednostima za epoksidnu smolu ojačanu staklenim vlaknima, kao i drugim biološkim vlaknima.

Zadatak zadan:

30. studenoga 2020.

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.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Tatjana Haramina

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

# SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	2
2.1. Definicija i podjela [2] .....	2
2.2. Funkcije komponenata kompozita .....	3
2.2.1. Funkcije matrice.....	3
2.2.2. Funkcije vlakana .....	3
2.3. Kompoziti s polimernom matricom [2] .....	4
2.3.1. Duromerne matrice [2], [3] .....	4
2.3.2. Plastomerne matrice [2], [3] .....	5
2.3.3. Epoksidna smola .....	6
2.4. Vrste tkanja i usmjerenost.....	7
2.5. Vrste ojačala.....	9
2.5.1. Kompoziti s česticama .....	9
2.5.2. Vlaknima ojačani kompoziti .....	10
2.6. Biorazgradiva ojačala.....	11
2.6.1. Lanena vlakna .....	11
2.6.2. Jutena vlakna.....	13
2.6.3. Konopljina vlakna .....	13
2.6.4. Pregled mehaničkih i fizikalnih svojstava različitih biljnih vlakana .....	14
3. METODE ISPITIVANJA.....	16
3.1. Materijali .....	16
3.2. Izrada ploča kompozita i izrezivanje uzoraka.....	16
3.2.1. Izrada ploča .....	16
3.2.2. Određivanje masenog udjela vlakana .....	18
3.2.3. Izrezivanje uzoraka .....	18
3.3. Mjerenje tvrdoće .....	19
3.4. Mjerenje prividne smične međuslojne čvrstoće.....	21
3.5. Mjerenje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti .....	24
3.6. Mjerenje rastezne čvrstoće i rasteznog modula elastičnosti .....	26
4. REZULTATI ISPITIVANJA KOMPOZITA.....	30
4.1. Ploče kompozita .....	30
4.2. Rezultati mjerenja tvrdoće .....	30
4.3. Rezultati mjerenja prividne smične međuslojne čvrstoće.....	32
4.4. Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti .....	33
4.5. Rezultati mjerenje rastezne čvrstoće i rasteznog modula elastičnosti .....	39
4.6. Usporedba rezultata ispitivanja kompozita s drugim vrstama kompozitima .....	47

---

5. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA.....	52
PRILOZI.....	53

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Neki od osnovnih tipova kompozita: a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) laminati [2] .....	2
Slika 2. a) duga, u jednom smjeru b) kratka slučajno orijentirana c) duga, međusobno okomito orijentirana d) duga, isprepletana, slučajno orijentirana [2] .....	3
Slika 3. Utjecaj usmjerenosti vlakna obzirom na smjer naprezanja [2] .....	7
Slika 4. Vrste tkanja: a) kvadratno, b) keper, c) atlas [5] .....	8
Slika 5. Usmjerenje i orijentacija vlakana [6] .....	9
Slika 6. Prikaz utjecaja temperature kod kompozita s disperzijom na granicu razvlačenja i puzanje [2] .....	10
Slika 7. Svojstva vlakana: a) krivulja "naprezanje stezanje", b) usporedba specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti metala i nekih vlakana [2] .....	11
Slika 8. Dijagram naprezanja istežanja lanenih vlakna [11] .....	12
Slika 9. Tkanina od lanenih vlakana .....	12
Slika 10. Tkanina od jutenih vlakana [12] .....	13
Slika 11. Vlakna konoplje [15] .....	14
Slika 12. A i B komponente za izradu matrice .....	17
Slika 13. Ojačalo od lanenih vlakna .....	17
Slika 14. Ručno polaganje u kalup .....	18
Slika 15. Ploče kompozita .....	19
Slika 16. Uzorci za ispitivanje mehaničkih svojstava: lijevo je uzorak za rastezna svojstva, u sredini za prividnu smičnu međuslojnu čvrstoću i desno za savojna svojstva. ....	19
Slika 17. Ispitna pločica nakon provedenog ispitivanja tvrdoće .....	20
Slika 18. Tvrdomjer Zwick 3106 .....	21
Slika 19. Oblik ispitnog tijela za ispitivanje prividne smične međuslojne čvrstoće .....	22
Slika 20. Ispitani uzorak .....	22
Slika 21. Shema metode ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće .....	22
Slika 22. Ispitivanje prividne smične međuslojne čvrstoće .....	23
Slika 23. Shema savojnog ispitivanja .....	24
Slika 24. Ispitani ispitni uzorci .....	25
Slika 25. Ispitivanje savojne čvrstoće .....	25
Slika 26. Univerzalna kidalica .....	27
Slika 27. Uzorci ispitani statičkim rasteznim pokusom .....	28
Slika 28. Rastezno ispitivanje i komparator .....	29
Slika 29. Očitanje vrijednosti sile .....	33
Slika 30. Grafički prikaz savojnog ispitivanja .....	36
Slika 31. Dijagram naprezanje deformacija pri savojnom opterećenju za ispitno tijelo 1 .....	36
Slika 32. Dijagram naprezanje deformacija pri savojnom opterećenju za ispitno tijelo 2 .....	37
Slika 33. Dijagram naprezanje deformacija pri savojnom opterećenju za ispitno tijelo 3 .....	37
Slika 34. Dijagram naprezanje deformacija pri savojnom opterećenju za ispitno tijelo 4 .....	38
Slika 35. Dijagram naprezanje deformacija pri savojnom opterećenju za ispitno tijelo 5 .....	38
Slika 36. Dijagram naprezanje deformacija pri savojnom opterećenju za ispitno tijelo 6 .....	39
Slika 37. Grafički prikaz statičko rasteznog pokusa .....	43
Slika 38. Dijagram naprezanje-deformacija pri rasteznom opterećenju za ispitno tijelo 1 .....	44
Slika 39. Dijagram naprezanje-deformacija pri rasteznom opterećenju za ispitno tijelo 2 .....	45
Slika 40. Dijagram naprezanje-deformacija pri rasteznom opterećenju za ispitno tijelo 3 .....	45
Slika 41. Dijagram naprezanje-deformacija pri rasteznom opterećenju za ispitno tijelo 4 .....	46
Slika 42. Dijagram naprezanje-deformacija pri rasteznom opterećenju za ispitno tijelo 5 .....	46



---

Slika 43. Usporedba savojne čvrstoće ispitanog kompozita s literaturnim vrijednostima za srodne kompozite .....	48
Slika 44. Usporedba savojnog modula elastičnosti ispitanog kompozita s literaturnim vrijednostima za srodne kompozite .....	49
Slika 45. Usporedba rastezne čvrstoće ispitanog kompozita s literaturnim vrijednostima za srodne kompozite .....	49
Slika 46. Usporedba rasteznog modula elastičnosti ispitanog kompozita s literaturnim vrijednostima za srodne kompozite .....	50

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Usporedba mehaničkih svojstava konopljinih i staklenih vlakna [14].....	14
Tablica 2. Pregled svojstava bio vlakana .....	15
Tablica 3. Izmjerene mase.....	30
Tablica 4. Maseni udjeli materice i ojačala u kompozitu.....	30
Tablica 5. Očitane vrijednosti prodiranja.....	31
Tablica 6. Rezultati tvrdoće ispitanog kompozita .....	31
Tablica 7. Dimenzije ispitnih uzoraka.....	32
Tablica 8. Rezultati ispitivanja prividne smične međuslojne čvrstoće .....	32
Tablica 9. Dimenzije uzoraka kod savojnog ispitivanja .....	33
Tablica 10. Očitani progibi.....	34
Tablica 11. Rezultati naprezanja i istežanja kod ispitivanja savojne čvrstoće. Naprezanje $\sigma$ izraženo je u $N/mm^2$ , a $\varepsilon$ u $mm/mm$ .....	35
Tablica 12. Dimenzije ispitnog tijela .....	40
Tablica 13. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 1 .....	40
Tablica 14. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 2 .....	41
Tablica 15. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 3 .....	41
Tablica 16. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 4 .....	42
Tablica 17. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 5 .....	42
Tablica 18. Mehanička svojstva kompozita s epoksidnom matricom ojačanom različitim vrstama bioloških vlakana [14], [16], [17] .....	47

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$E$	$\text{N/mm}^2$	modul elastičnosti
$R_m$	$\text{N/mm}^2$	rastezna čvrstoća
$L$	mm	duljina vlakna, razmak između oslonaca
$L_C$	mm	minimalna duljina vlakna za prijenos svog opterećenja
$\sigma_f$	$\text{N/mm}^2$	rastezna čvrstoća vlakna
$d$	mm	promjer vlakana
$\tau_c$	$\text{N/mm}^2$	smična čvrstoća
$\rho$	$\text{g/cm}^3$	gustoća
$F$	N	sila opterećenja
$H$	$\text{N/mm}^2$	tvrdća
$D$	mm	promjer kuglice
$h_k$	mm	dubina prodiranja penetratora
$\tau$	$\text{N/mm}^2$	prividna međuslojna smična čvrstoća
$F_{max}$	N	maksimalna sila
$h$	mm	debljina ispitnog tijela, ploče
$b$	mm	širina ispitnog tijela
$h_{sr}$	mm	aritmetička sredina debljine ispitnog tijela
$R_{m,S}$	$\text{N/mm}^2$	savojna čvrstoća
$\sigma_{m,S}$	$\text{N/mm}^2$	vrijednost pripadajućeg savojnog naprezanja za određeni iznos sile
$\varepsilon$	mm/mm	istezanje uslijed savojnog opterećenja
$f$	mm	progib ispitnog tijela
$\sigma$	$\text{N/mm}^2$	naprezanje
$R_{m,V}$	$\text{N/mm}^2$	rastezna čvrstoća
$A$	$\text{mm}^2$	početna površina poprečnog presjeka ispitnog tijela
$\varepsilon$	mm/mm	istezanje uslijed naprezanja
$\Delta l$	mm	promjena duljine ispitnog tijela
$l_0$	mm	početna mjerna duljina ispitnog tijela
$\bar{x}$	-	aritmetička sredina
$m_{vl}$	g	masa vlakana
$m_p$	g	masa ploče
$E_S$	$\text{N/mm}^2$	savojni modul
$E_V$	$\text{N/mm}^2$	rastezni modul

**SAŽETAK**

U radu su izrađeni kompoziti od epoksidne smole s lanenim ojačanjem. Ispitana su savojna i rastezna svojstva, te prividna smična međuslojna čvrstoća ploče s 26,98% lanenih vlakana. Svojstva materijala uspoređena su sa svojstvima koje propisuje Hrvatski registar brodova za kompozite ojačane staklenim vlaknima. Dobiveni kompozit ne zadovoljava minimalne zahtjeve za izradu brodova, s izuzetkom rasteznog modula.

U teorijskom dijelu opisani su osnovni dijelovi od kojih se kompozit sastoji te njihove glavne funkcije, s naglaskom na lanena vlakna kao ojačalo, te vrste matrica (plastomerne i duromerne). Također dan je i pregled nekih biovlakana.

Ključne riječi: epoksidna smola, lanena vlakna, kompoziti s polimernom matricom, tvrdoća, savojna čvrstoća, rastezna čvrstoća, prividna smična međuslojna čvrstoća

---

**SUMMARY**

In the paper, compositions of epoxy resins were produced with flax reinforcement. This paper deals with the investigation of flexural, tensile properties, and the apparent shear interlayer strength of 26,98% flax fiberboards. The properties of the material were compared with the properties prescribed by the Croatian Register of Shipping for glass fibre reinforced composites. With the exception of the expansion module, the resulting composite does not meet the minimum requirements for the manufacture of ships.

The theoretical part describes the basic parts of composite, their main functions, with an emphasis on flax fibre as an amplifier, and the types of matrix (thermoplastic and thermoset). In addition, there is an overview of some biofibers as well.

Key words: epoxy resin, flax fibers, polymer matrix composites, hardness, flexural strength, tensile strength, apparent shear interlayer strength

## 1. UVOD

Odlaganje i zbrinjavanje nerazgradivih materijala postaje sve veći ekološki problem. Osim toga, s porastom stanovništva količina dostupnih sirovina nije dugoročno dostatna. U duhu doprinosa održivom razvoju, sve više se teži pronalasku biorazgradivih materijala iz obnovljivih izvora. Naravno uz ekološku prihvatljivost, tehnički materijali moraju imati i zadovoljavajuća mehanička svojstva. Vlakna iz obnovljivih izvora imaju široku primjenu u industriji, pretežno tekstilnoj. Tkanja od takvih vlakana mogu se koristiti kao ojačanje za polimere. Ovi kompoziti su zasada još uvijek nedovoljno istraženi. Lan, juta, konoplja i ostala vlakna i prediva iz obnovljivih izvora te kompoziti njima ojačani, bi mogli imati značajnu ulogu u procesu zamjene kompozita ojačanih staklenim vlaknima u pomorstvu, brodogradnji i ostalim granama industrije.[1]

Izrada biokompozita se provodi istim tehnikama kao i ostale vrste kompozita (u ovom radu je korištena tehnička ručnog polaganja u kalup), ali uporaba biovlakana čini sam postupak ekološki prihvatljivijim. Proizvodnja biljnih vlakana ekološki prihvatljivija, dio se dobiva iz biljaka koje rastu u prirodi, dok se dio uzgaja. Proces prerade u pravilu zahtjeva manje energije. Osim toga, saniranje takvih materijala nakon isteka životnog vijeka ili škarta puno je lakše i manje štetno za okoliš, te se čak može iskoristiti u energetske svrhe u nekim slučajevima.

U svrhu određivanja mehaničkih svojstava u ovom radu proizvedene su ploče kompozita od epoksidne smole kao matrice i lanenih vlakana kao ojačala. Dobra adhezijska svojstva čine ju prikladnim materijalom za povezivanje lanenih vlakana. Dok je najveća prednost lanenih vlakana niska gustoća, pristupačnost i cijena. Kako bi se ispitala mehanička svojstva te napravila usporedba u odnosu na kompozite ojačane staklenim vlaknima provedeno je ispitivanje tvrdoće, prividne međuslojne smične čvrstoće te čvrstoće i modula pri rasteznom i savojnom opterećenju. Istraživanje je provedeno u sklopu optimiranja izrade kompozita za izradu dijelova katamarana.

## 2. KOMPOZITNI MATERIJALI

### 2.1. Definicija i podjela [2]

Kompozitni materijali ili kraće kompoziti su heterogeni materijali koji se sastoje od više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Dakle, višefazni materijali koji imaju željenu kombinaciju najboljih svojstava konstituenata. Uobičajeno, jedna faza (matrica) je kontinuirana i okružuje ostale faze - ojačalo (disperzirane faze). Tako se postižu neobične, odnosno kod drugih materijala neuobičajene kombinacije svojstava poput krutosti, čvrstoće, težine, antikorozivnosti i ostalo.

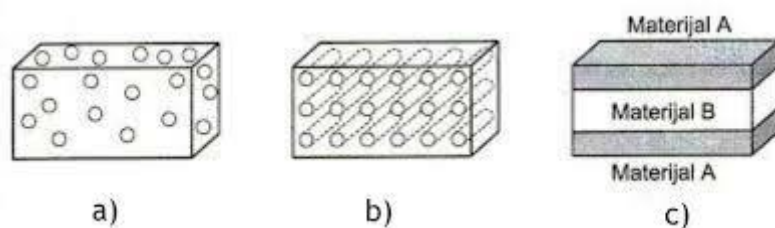
Prednosti u odnosu na ostale uobičajene materijale su mehanička svojstva, otpornost na koroziju, održavanje, vijek trajanja i krojenje svojstava. Njihova velika prednost je dobar omjer svojstava u odnosu na gustoću, odnosno specifična čvrstoća i specifična krutost.

Kao neki od nedostataka kompozitnih materijala može se navesti njihovo teško i komplicirano popravljanje, nisu nužno superiorniji metalni materijalima (pogotovo pri visokim temperaturama), konstrukcijski problemi, odnosno spajanje, te nelinearno ponašanje materijala.

Ukupno ponašanje kompozita ovisi o:

- veličini, oblik i rasporedu konstituenata
- svojstvima matrice i ojačala
- volumnom udjelu konstituenata
- prirodi i jakosti veza među konstituentima

Podjela kompozita se može napraviti prema obliku ojačala, materijalu matrice ili strukturi. Obzirom na oblik ojačala, dijelimo ih na kompozite s česticama ili kompozite ojačane vlaknima. Prema materijalu matrice podjela se vrši na metalne, keramičke, polimerne i ugljične. Dok prema strukturi mogu biti laminati ili sendvič konstrukcije.



**Slika 1. Neki od osnovnih tipova kompozita: a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) laminati [2]**

## 2.2. Funkcije komponenata kompozita

### 2.2.1. Funkcije matrice

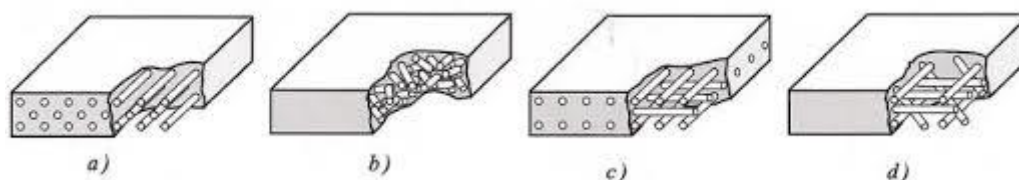
Osnovne funkcije matrice su:

- povezivanje vlakana
- prijenos opterećenja na ojačalo
- zaštita ojačala od okolnih utjecaja

Kod kompozita ojačanih vlaknima matrica ima nekoliko uloga. Ona povezuje vlakna te služi kao medij kojim se izvana nametnuto naprezanje prenosi i raspoređuje na vlakna, inače bi opterećenje nosilo samo jedno vlakno. Matrica samostalno nosi vrlo mali dio opterećenja. Bitno je da su adhezijske veze između matrice i vlakna dovoljne da spriječe izvlačenje vlakna i da osiguraju prijenos opterećenja na vlakna. Sljedeća funkcija je da matrica služi kao prepreka napredovanju pukotina. Još neki od zahtjeva za matricu su otpornost na koroziju, poboljšanje žilavosti konstrukcije i svojstava u poprečnom smjeru. [2]

### 2.2.2. Funkcije vlakana

Osnovni uvjeti za vlakna su proizvodnja s velikim odnosnom dužina/promjer, čvrstoća i savitljivost, te mogućnost izrade tkanina. Njihov volumni udio u kompozitu uvelike utječe na sveukupna svojstva, a glavna zadaća je nošenje nametnutog vanjskog opterećenja. Prema promjeru i karakteru vlakna su svrstana u tri skupine: viskeri (izrazita pravilnost kristalne građe što dovodi do visoke čvrstoće, ultra mali promjer), vlakna (polikristalna ili amorfna, mali promjer) i žice (relativno veliki promjeri). [2]



Slika 2. a) duga, u jednom smjeru b) kratka slučajno orijentirana c) duga, međusobno okomito orijentirana d) duga, isprepletana, slučajno orijentirana [2]



### 2.3. Kompoziti s polimernom matricom [2]

Kompoziti s polimernom matricom, ili kraće PMC, sastoje se od polimerne smole kao matrice te vlakana kao komponente za ojačavanje. Pojam "smola" ovdje se koristi za obilježavanje polimera – tvari visoke molekulske mase koje treba ojačati. Polimerna matrica najčešće određuje najvišu radnu temperaturu. Plastomeri se tale, dok duromeri mekšaju, pri čemu im pada krutost pri znatno nižim temperaturama nego vlaknastom ojačanju. Stoga treba obratiti pažnju na izbor polimerne matrice. Najraširenije i pretežno najjeftinije polimerne smole su vinil esteri i poliesteri. Ti materijali matrice pretežno se primjenjuju kod kompozita ojačanih staklenim vlaknima. Epoksidne smole značajno su skuplje i zbog toga su često neadekvatne za komercijalnu upotrebu, njihova upotreba je koncentrirana na brodogradnju i zrakoplovnu industriju. Ove smole imaju bolja mehanička svojstva te veću postojanost prema vlazi (uspoređujući s nezasićenim poliesterskim i vinilesterskim smolama). Za visokotemperaturne primjene (iznad 200 °C) primjenjuju se poliimidi čija gornja temperatura dugotrajne primjene iznosi oko 230 °C. Također koriste se i fenolne smole. Kao ojačanje polimernih kompozita najčešće se koriste staklena vlakna, ugljična vlakna i aramidna vlakna. Polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima predstavljaju najrašireniju vrstu kompozita s polimernom matricom.

Polimeri su često jeftini i lako prerađljivi. Imaju manju gustoću što ih čini pogodnim za lake konstrukcije i kemijski su postojaniji u odnosu na, metalne i keramičke matrice. S druge strane, glavni nedostatak im je smanjena otpornost na povišene i visoke temperature, manja čvrstoća usporedno s metalnim i keramičkim matricama, te su neke vrste osjetljive na UV zračenje.

U ovome završnome radu, u eksperimentalnome djelu, zbog dobrih adhezijskih svojstava, kao materijal matrice odabrana je epoksidna smola koju ubrajamo u duromere.

#### 2.3.1. Duromerne matrice [2], [3]

Duromeri su jedna od temeljnih skupina sintetskih polimernih materijala. Izrađuju se iz dvo- ili višekomponentnih smjesa pri čemu se polimerizacija provodi u kalupu. Gotovi duromer trodimenzionalno je umrežen, a ispravnim omjerima komponenata dobiva se gusto umrežen polimer, visoke čvrstoće, tvrdoće i toplinske postojanosti. Umrežavanjem nepovratno očvrstnu, ne bubre, stvarajući netopljive, netačljive i nepreoblikovljive proizvode. Inicijacija umrežavanja ostvaruje se pomoću topline, kemijskih očvršćivača, primjenom pritiska ili izlaganju mlazu

elektrona. Važniji duromeri su fenolformaldehidni polimeri, epoksidne, melaminske i ureaformaldehidne smole.

Glavni nedostaci duromernih matrica su:

- manja žilavost i udarni rad loma, te slabija otpornost na umor materijala u odnosu na plastomere
- vrijeme omogućeno za rad s duromernom matricom je ograničeno, vrlo brzo počnu očvršćivanje
- prilikom umrežavanja dolazi do egzotermne reakcije pri čemu dolazi do skupljanja materijala
- nastanak zaostalih naprezanja prilikom očvršnuća i umreživanja
- neumrežene smole imaju ograničen rok trajanja jer s vremenom počinju gelirati, te mogu zahtijevati posebne uvjete skladištenja poput niskih temperatura
- nemogućnost recikliranja škarta i ponovne prerade nakon umrežavanja

Dok su glavne prednosti:

- duromerne smole mogu postići odlična svojstva obzirom na cijenu sirove
- jednostavnost izrade i niža cijena alata
- kompoziti se mogu proizvoditi pri sobnoj temperaturi
- otpornost na puzanje
- najviši modul elastičnosti od svih skupina polimera

### **2.3.2. *Plastomerne matrice [2], [3]***

Plastomeri su sintetski polimerni materijali koji su topljivi i taljivi, te razlikujemo amorfne i kristalaste plastomere. Ako je više amorfne faze, onda su fleksibilniji i lakše se obrađuju, a ako je više kristalne faze u njima, onda su gušći, čvršći, tvrdi i otporniji prema otapalima. Pri zagrijavanju omekšavaju, porastom temperature raste nepravilno gibanje atoma oko njihovih ravnotežnih položaja. Prilikom taljenja dolazi do prekida veza među makromolekulama. Pri hlađenju, ponovno postaju čvrsti. Na toj pojavi se temelji prerada plastomera. Kod zagrijavanja najprije slabe sekundarne veze što dovodi do tečenja plastomera, raste deforabilnost i smanjuju se nosiva svojstva. Pri prekoračenju određene temperature dolazi do njihova razlaganja na niskomolekulske plinove, a pretvorba je ireverzibilna. Podložni su pojavi bubrenja. Poznati plastomeri su polietilen, polistiren, poli(vinil klorid). Kao ojačalo

za plastomerne matrice najviše se koriste kontinuirana vlakna, jer takvi kompoziti pokazuju bolju čvrstoću od onih ojačanih diskontinuiranim vlaknima. U procesima obrade ne dolazi do kemijskih reakcija kao kod duromernih smola.

Neki od nedostataka plastomernih matrica:

- prerađuju se pri temperaturi iznad tališta
- još uvijek nedovoljno istražene mogućnosti proizvodnje kompozita s plastomernom matricom
- neotporne na puzanje
- potrebno korištenje posebnih tehnika i alata kod izrade što dovodi do većih troškova u konačnici

Dok su prednosti:

- mogućnost recikliranja škarta (ne dolazi do umrežavanja pa su pretaljivi)
- uzastopno omekšavanje i skrućivanje bez bitne promjene osnovnih svojstava
- dobra žilavost i istežljivost u odnosu na duromerne
- neki od njih imaju mogućnost samoobnavljanja
- mogućnost zavarivanja

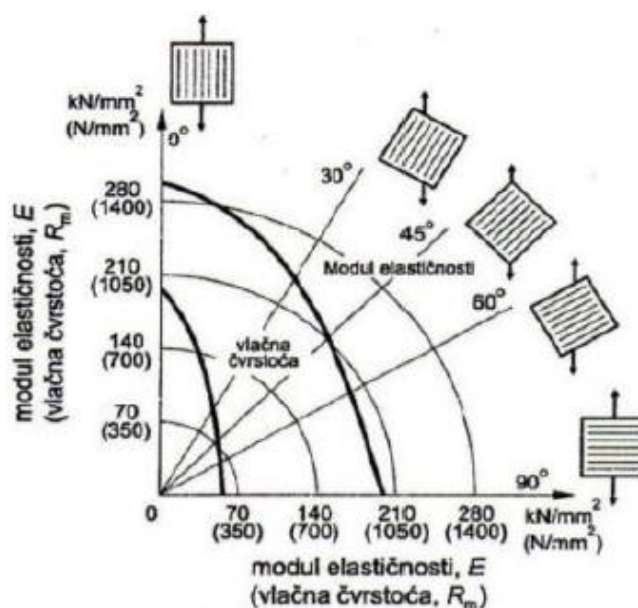
### 2.3.3. Epoksidna smola

Epoksidne smole spadaju u skupinu amorfnih polimera koje karakterizira pojava gumaste faze pri višim te staklaste faze pri nižim temperaturama. Epoksidi koji polimeriziraju pri sobnoj temperaturi pogodni su za korištenje pri temperaturama do 50 °C dok se ovisno o tipu očvršćivala ostale vrste epoksida obrađuju pri temperaturama između 120 i 180 °C. Kemijske reakcije koje se pri polimerizaciji događaju su egzotermne te upotreba velike količine očvršćivala ili previsoka temperature polimerizacije može dovesti do toplinske razgradnje matrice, a time i samog kompozita. Ovo je razlog zbog kojeg se posebna pažnja mora posvetiti izradi kalupa, posebice ako se radi o debljim ili većim dijelovima. Da bi im se promijenila mehanička svojstva, epoksidima se mogu dodavati različite tvari u svrhu snižavanja viskoznosti prilikom obrade, povećanja lomnog produljenja uz snižavanje modula elastičnosti, poboljšanje otpornosti širenju pukotina, promjena gustoće i drugo. Njihov je osnovni nedostatak inherentna krhkost popraćena visokom čvrstoćom što se često poboljšava dodavanjem plastomera. Glavne prednosti epoksida jesu mogućnost modificiranja svojstava prema postavljenim zahtjevima, mogućnost kontrole žilavosti te laka i sigurna proizvodljivost zbog male količine štetnih tvari

koje se pri tome oslobađaju, malo skupljanje, dobra kemijska otpornost te dobra dimenzijska i toplinska stabilnost. Skupljanje prilikom egzotermne reakcije polimerizacije u procesu proizvodnje, unosi značajna zaostala naprezanja, krhkost te slabu kemijsku otpornost alkalima. Uz bolja mehanička svojstva, prednost epoksidne smole pred najraširenijom poliesterskom je upravo u manjem skupljanju. Glavni nedostaci jesu viša cijena proizvodnje u odnosu na npr. poliestere (posebice specijalne vrste epoksida koje se koriste u zrakoplovstvu), osjetljivost na vlagu, sporo polimeriziranje, mala otpornost nekim organskim spojevima (npr. organskim kiselinama i fenolima) te relativno niska najviša temperatura primjene. [4]

## 2.4. Vrste tkanja i usmjerenost

Sveukupna svojstva kompozita ojačanih vlaknima ovise o svojstvima matrice i vlakana, ali isto tako i o usmjerenosti vlakna i tipovima tkanja. Na slici 6. su prikazana rastezna čvrstoća i modul elastičnosti u ovisnosti o usmjerenosti vlakna na smjer naprezanja, za slučaj jednosmjernog (jednoosnog) rasporeda vlakana.



Slika 3. Utjecaj usmjerenosti vlakna obzirom na smjer naprezanja [2]

Na slici 3. vidi se kako je najveća nosivost odnosno rastezna čvrstoća i modul elastičnosti u slučaju kada naprezanje djeluje u smjeru polaganja vlakna, dok u slučaju kada je opterećenje okomito na vlakna nosivost biti bitno smanjena. Stoga kod kompozita ojačanog vlaknima treba voditi računa o smjeru djelovanja opterećenja na kompozit. Također usmjerenošću vlakna mogu se krojiti svojstva, ovisno o tome je li potrebna najveća moguća izdržljivost u jednom smjeru ili su bitnija dobra nosiva svojstva u svim smjerovima pa će raspored vlakana biti pod

kutem. Kod jednoosnog rasporeda vlakna mogu se koristiti kontinuirana i diskontinuirana vlakna ( $L < L_C$  za diskontinuirana i  $L \geq L_C$  za kontinuirana). [2]

$$L = \frac{\sigma_f \cdot d}{2 \tau_c} \quad (1.1)$$

Gdje je:

$L$  [mm] – duljina vlakna

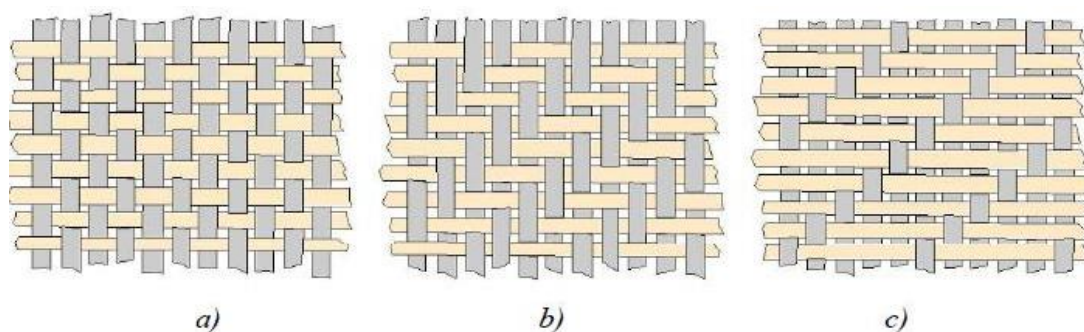
$L_C$  [mm] – minimalna duljina vlakna za prijenos svog opterećenja

$\sigma_f$  [N/mm<sup>2</sup>] – rastezna čvrstoća vlakna

$d$  [mm] – promjer vlakna

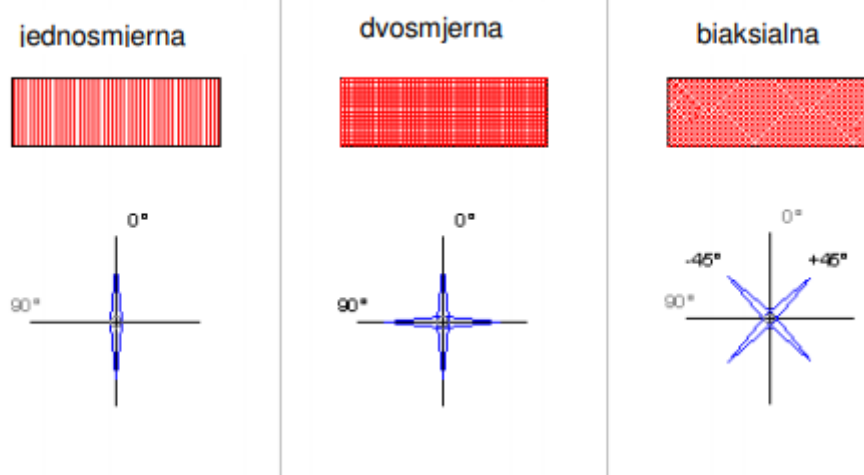
$\tau_c$  [N/mm<sup>2</sup>] – smična čvrstoća [7]

Najčešće korištena tri tipa tkanja za kompozite, za slučaj dvoosnog usmjerenja, prikazana su na slici 4. [5]



**Slika 4. Vrste tkanja: a) kvadratno, b) keper, c) atlas [5]**

Kod svih navedenih vrsta tkanina, vlakna su pletena pod kutem od 90° u odnosu na zamišljeni koordinatni sustav s osima postavljenim u okomitom i horizontalnom smjeru odnosno smjer rezanja tkanine. Moguće je proizvesti i tkanine kod kojih taj kut iznosi 45° ili 60°. Uređenje vlakana u kojem je pletenje pod 45° naziva se biaksialno. Promjena kuta također utječe na svojstva kompozita. Na slici 5. su prikazane neke od mogućih orijentacija vlakana. [5]



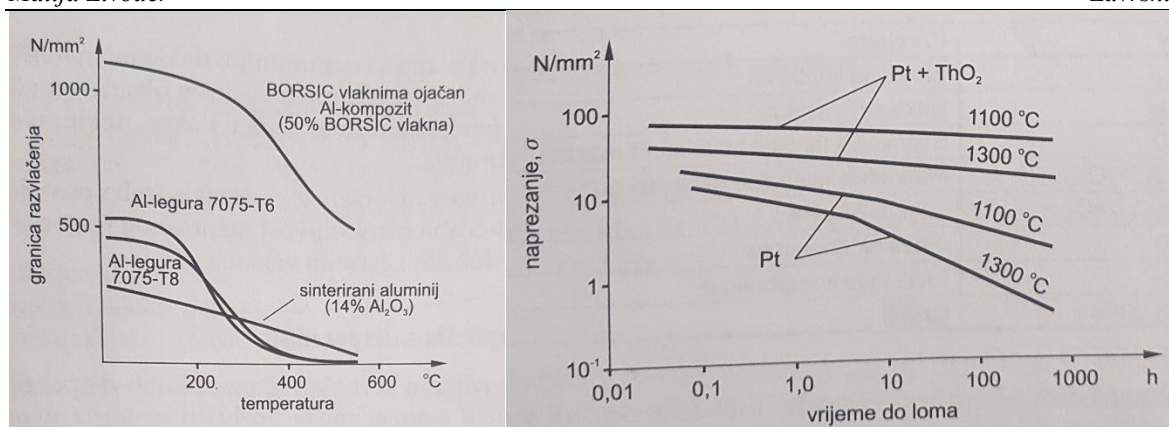
Slika 5. Usmjerenje i orijentacija vlakana [6]

## 2.5. Vrste ojačala

### 2.5.1. Kompoziti s česticama

Kod kompozitnih materijala, uz vlakna, za ojačanje se mogu primijeniti i čestice. Pri opterećivanju kompozita s česticama jednako se deformiraju matrica i čestice, ali se javljaju različita naprezanja. Čestice su diskretno jednolično raspoređene tvrd i krhak materijal vrlo malog promjera. Obzirom na veličinu čestica te na način na koji utječu na svojstva kompozita, kompoziti s česticama se dijele u dvije skupine: kompozite s disperzijom kod kojih su čestice do promjera  $0,1 \mu\text{m}$  te volumni udio u pravilu ne premašuje 15% ukupnog volumena, i kompozite s velikim česticama čiji je promjer čestica u pravilu veći od  $1 \mu\text{m}$  dok im volumni udio ne premašuje 20% ukupnog volumena. [2], [8]

Kod kompozita s disperzijom glavni mehanizam kojim se postiže ojačanje je sprečavanje gibanja dislokacija, a njihova čvrstoća ne prelazi čvrstoću dvofaznih metalnih legura. Dok je njihova otpornost na puzanje zadovoljavajuća, čvrstoća se s porastom temperature smanjuje. [2], [8]



**Slika 6. Prikaz utjecaja temperature kod kompozita s disperzijom na granicu razvlačenja i puzanje [2]**

Disperzirani materijal ne smije imati veliku rastvorljivost u materijalu matrice te s njim ne smije kemijski reagirati, također treba biti zapreka klizanju; tipičan primjer su tvrdi i stabilni oksidi. Slaba rastvorljivost je bitna jer doprinosi čvrstim vezama, no najvažnije od svega je da između matrice i raspršenog materijala postoji dobra povezanost.

Kod kompozita s velikim česticama, velike čestice ne djeluju izravno na sprečavanje gibanja dislokacija već su svojstva poboljšanja djelovanjem samih čestica. Tim kompozitima nije cilj nužno osigurati visoku čvrstoću nego neka druga zahtijevana svojstva.

Glavne prednosti čestica su izotropnost mehaničkih svojstava, porast tlačne čvrstoće, dobra obradivost, kompatibilnost s većinom današnjih tehnologija te povećanje električnih, toplinskih i magnetskih svojstava. [2]

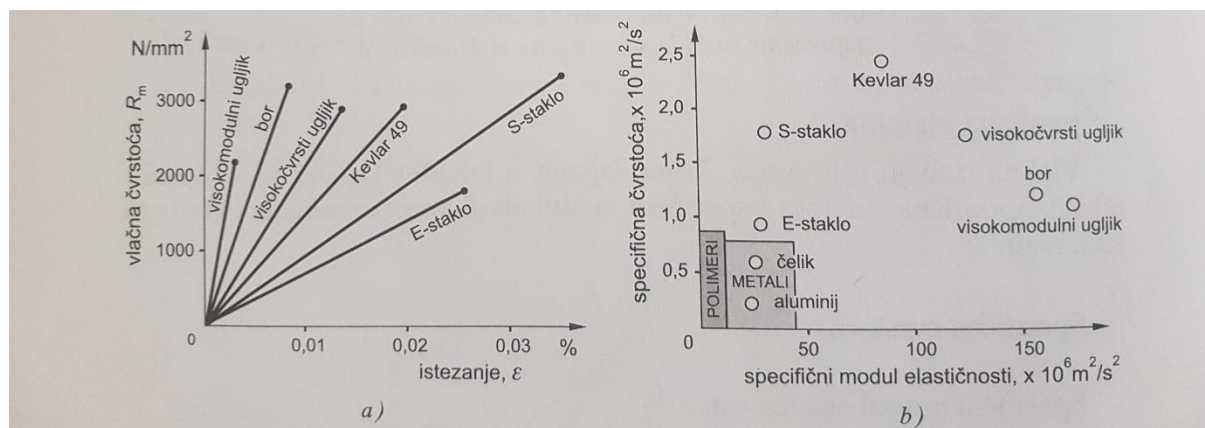
### 2.5.2. *Vlaknima ojačani kompoziti*

Kompoziti s vlaknima čine najvažniju grupu kompozita, a glavna karakteristika vlakna je veliki omjeri duljina/promjer. Koriste se zbog značajno manje kristalnih nesavršenosti u strukturi. Svojstva ponajviše ovise o veličini kontaktne površine između vlakana i matrice, jer se opterećenje prenosi s matrice na vlakna. To je izrazito bitno za čvrstoću jer ako i dođe do puknuća ono ide do idućeg vlakna. Kod vlaknima ojačanih kompozita dolazi do izražaja poboljšanje čvrstoće, žilavosti, krutosti, te povećanja omjera čvrstoća/gustoća. [7]

Razlikujemo vlakna izrađena od metala, bora, ugljika, polimera, vlakna iz obnovljivih izvora (bi vlakna), viskera i staklena vlakna koja čine 90% svih vlakana. Staklena vlakna toliku uporabu zahvaljuju niskoj cijeni, jednostavnoj proizvodnji i lako dostupnom materijalu,

postojanosti na koroziju i temperaturnoj postojanosti do 200 °C. Staklena vlakna se još dijele na E, A, C, D, T, R i S stakla, svaka grupa ima izraženo neko specifično svojstvo. [7]

Volumni udio vlakana u samome kompozitu ne prelazi više od 40%, ta granica je određena mogućnošću da se vlakna okruže materijalom matrice, odnosno da se dobije dobra povezanost. [2]



**Slika 7. Svojtva vlakana: a) krivulja "naprezanje stezanje", b) usporedba specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti metala i nekih vlakana [2]**

## 2.6. Biorazgradiva ojačala

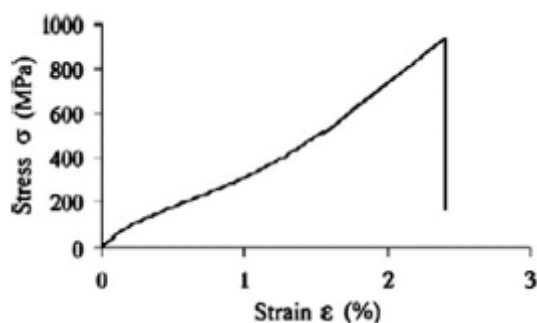
Biokompoziti su kompozitni materijali koje se sastoje od vlakana biljnog (ponekad i životinjskog) podrijetla te biološki nerazgradivog polimera, biopolimera i sintetskih vlakana. Kombinaciju gdje su i matrica i ojačalo od biorazgradivih materijala iz obnovljivih izvora ponekad se naziva zeleni kompoziti. Glavne prednosti biorazgradivih ojačala su niska gustoća koja osigurava visoku specifičnu čvrstoću i krutost, nastaju iz obnovljivih izvora te su lako dostupni. Dok su neki od nedostataka to što upijaju vlagu što utječe na pojačano stvaranje pora i slabljena veza, osjetljivost na truljenje pa je skladištenje kompliciranije. [9] Dodatni problem može stvarati razlika uslijed različitih uvjeta prilikom rasta biljaka, te svojstva često ovise o klimatskim uvjetima i godini uzgoja.

### 2.6.1. Lanena vlakna

Lan (*lat. Linum usitatissimum*) je jedno od najčešće korištenih biovlakana, uz to se koristi još i kao prehrambena biljka za dobivanje lanenog ulja. Uporaba lana kao tekstilnog materijala spominje se već u doba starog Egipta, 5000 p.n.e. U današnje vrijeme Kanada je najveći proizvođač i izvoznik lana. [10]



Udio vlakana u stabljici lana iznosi oko 30%, te su raspoređena u svežnjeve u kori biljke. Nakon ekstrahiranja iz biljke, prerađuju se u oblik za uporabu te njihova duljina iznosi do 900 mm, dok za finija vlakna ta mjera iznosi 300-600 mm. Fina i duga lanena vlakna uobičajeno se predu u pređe, te se kasnije izrađuju tkanine. Lanena vlakna spadaju u skupinu celuloznih polimera, ali je njihova struktura više kristalna. Spadaju u najčvršća prirodna vlakna, slika 8. prikazuje dijagram napreznja istežanja za elementarna lanena vlakna. [11]



Slika 8. Dijagram napreznja istežanja lanenih vlakna [11]

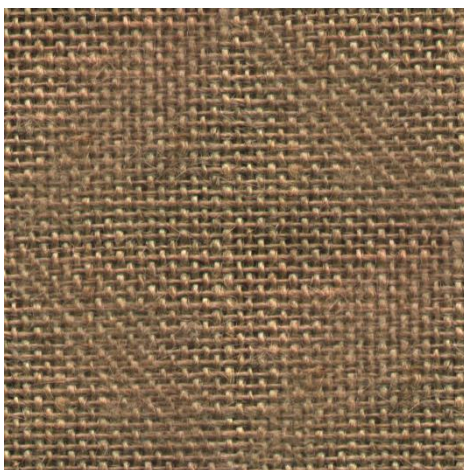
Vrlo česta je uporaba u kombinaciji s epoksidnom smolom zbog dobrih mehaničkih svojstava, povećanjem udjela vlakana u kompozitu se povisuje i povisuju mehanička svojstva. Danas se najviše koriste u autoindustriji, zrakoplovstvu i brodogradnji. Na slici 9. je prikazana tkanina izrađena od lanenih vlakana [11]



Slika 9. Tkanina od lanenih vlakana

### 2.6.2. Jutena vlakna

Juta je vlakno koje se dobiva iz stabljika biljaka lat. *Corchorus capsularis* i *Corchorus olitorius*. Biljka raste do visine od 4 metra te najbolje uspijeva u tropskoj klimi. Nakon branja mora se držati potopljena u vodi kako bi se vlakna oslobodila od kore. U odnosu na lanena vlakna, vlakna jute su kraća (malo dulja od 100 mm). Karakterizira ih gruba površina, otpornost na istezanje te niska cijena. Stoga najčešće se koristi kao zamjena za neko skuplje ojačanje poput staklenih vlakana, kada nije zahtijevana visoka čvrstoća. Uz primjenu za izradu biokompozita vlakna jute se koriste za izradu vreća i užadi zbog svoje niske cijene. [11]



Slika 10. Tkanina od jutenih vlakana [12]

### 2.6.3. Konopljina vlakna

Konoplja (lat. *Cannabis sativa*) je jednogodišnja, do 3 m visoka, biljka koja potječe iz središnje Azije, a uzgaja se još od 3000. god p.n.e. Ne ograničavaju je klimatski uvjeti jer se odlično prilagođava različitim tipovima tla i klime. Vlakna se izdvajaju iz stabljike nakon žetve i sušenja, močenjem i mehaničkom obradom. Duljina vlakana varira od 20 cm do 200 cm, te su obogaćena visokim udjelom celuloze što daje visoku čvrstoću. Mehanička svojstva konopljinih vlakana su dovoljno dobra da zamjene sintetska vlakna, pogotovo zbog svoje manje mase i gustoće. U tablici 1. prikazana su mehanička svojstva konoplje u odnosu na sintetsko vlakno. [13]

**Tablica 1. Usporedba mehaničkih svojstava konopljinih i staklenih vlakna [14]**

Mehanička svojstva	Gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	Rastezna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Krutost [kN/mm <sup>2</sup> ]	Rastezni modul [kN/mm <sup>2</sup> ]	Specifična rastezna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> x cm <sup>3</sup> /g]	Modul elastičnosti [kN/mm <sup>2</sup> ]	Specifični modul elastičnosti [kN/mm <sup>2</sup> x cm <sup>3</sup> /g]
<b>Konopljina vlakna</b>	1,4-1,6	200-1040	17,66-66	23,5-90	210-510	30-60	20-41
<b>Staklena vlakna</b>	2,5-2,6	1800-3500	79	-	700-1400	70-80	27-32

**Slika 11. Vlakna konoplje [15]**

#### 2.6.4. Pregled mehaničkih i fizikalnih svojstava različitih biljnih vlakana

Najveća prednost biovlakana kao ojačala je njihova mala gustoća te niska cijena, te zbog male gustoće vrijednosti specifičnih mehaničkih svojstava. Tamo gdje glavni zahtjev nije izrazito visoka rastezna čvrstoća, odličan su izbor.[7]

U tablici 2. su prikazan mehanička i fizikalna svojstva različitih bioojačala, te je dana usporedba naspram staklenih vlakna.

**Tablica 2. Pregled svojstava bio vlakana**

Vlakno	Vrsta vlakna	Gustoća, g/cm <sup>3</sup>	Prekidna čvrstoća, MPa	Modul rasteznosti, GPa	Specifična čvrstoća, MPa/(g/cm <sup>3</sup> )	Prekidno istezanje, %	Apsorpcija vlage, %	Cijena po kg, USD
Stakleno vlakno	mineral	2,50 – 2,55	1 800 – 3 500	70,0 – 73,0	700 – 1 400	2,5 – 3,0	0,0	1,30
Lan	lika	1,40 – 1,50	345 – 1 500	27,6 – 80,0	230 – 1 070	1,2 – 3,2	7,0	1,50
Konoplja	lika	1,48	550 – 900	70,0	370 – 610	1,60	8,0	0,6 – 1,8
Juta	lika	1,30 – 1,45	400 – 800	10,0 – 30,0	280 – 610	1,16 – 1,8	12,0	0,35
Agava	list	1,33 – 1,45	468 – 700	9,4 – 38,0	320 – 530	2,0 – 7,0	11,0	0,6 – 0,7
Curaua	list	1,40	500 – 1 150	11,8	360 – 820	3,7 – 4,3	n/a	0,60

### **3. METODE ISPITIVANJA**

Cilj provođenja ispitivanja kompozita je određivanje njegovih mehaničkih svojstava na temelju kojih se kompozit može usporediti s drugim vrstama materijala, utvrditi kvalitetu postupka izrade materijala i potencijalne primjene. Kako bi bila provedena ispitivanja mehaničkih svojstava izrađen je kompozit ručnim laminiranjem. Biološka vlakna se često tretiraju lužinama kako bi se poboljšala adhezija između komponenata. Ova vlakna nisu prethodno tretirana, stoga je jedan od očekivanih problema nedovoljno povezivanje matrice i ojačala.

#### **3.1. Materijali**

Za ova ispitivanja proizvedene su kompozitne ploče ojačane vlaknima lana, te epoksidnom smolom kao matricom. Epoksidna smola je napravljena od dvokomponentne smjese NOVAPOX VEZA (univerzalno vezivo), čiji je proizvođač Nova-chem d.o.o. iz Karlovca. Ojačalo je izrađeno od lanenih vlakna, koja su pletena pod kutem od 45° u odnosu na zamišljeni kordinatni sustav s osima postavljenim u okomitom i horizontalnom smjeru odnosno smjer rezanja tkanine – biaksialno. Proizvođač vlakana je Bcomp, Fribourg, Švicarska.

#### **3.2. Izrada ploča kompozita i izrezivanje uzoraka**

##### **3.2.1. Izrada ploča**

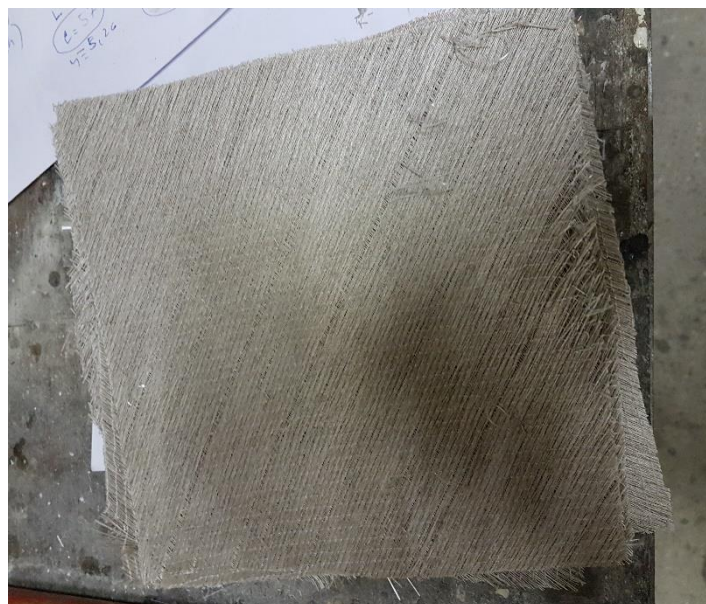
Za izradu korištena je metoda ručnog polaganja u otvoreni kalup. Prije početka izrade, gornja površina kalupa je očišćena kako kompozit ne bi sadržavao neželjene uključke. Matrica je pripremljena miješanjem epoksidne smole iz dvije komponente; A i B. One su miješane u omjeru 2:1, prema preporuci proizvođača. Važno je obratiti pažnju da nakon miješanja komponenata ima 20 min vremena za rukovanje smolom, odnosno premazivanja kalupa i tkanina lanenih vlakna, jer nakon tog vremena smola očvrstne. Komponente za izradu matrice prikazane su na slici 12.





Slika 12. A i B komponente za izradu matrice

Lanena vlakna u tkanini uređena su na biaksialan način, vlakna idu pod  $45^\circ$  na smjer rezanja . Prikazana su na slici 13.



Slika 13. Ojačalo od lanenih vlakna

Prije nanošenja prvog premaza smole, u kalup je položena staklena ploča. Nadalje je nanešen prvi sloj epoksidne smole, te na nj položeno ojačalo (tkanina lanenih vlakna). U ovom slučaju izrade korištena su tri sloja ojačala. Nakon nanošenja zadnjeg sloja smole, ploča kompozita je prekrivena staklenom pločom te je na to još postavljen uteg kako bi došlo do boljeg povezivanja matrice i ojačala. Naposljetku kompozit je ostavljen pri sobnoj temperaturi kako bi umrežila smola.

Na slici 14. je prikazan postupak ručnog polaganja u kalup.



Slika 14. Ručno polaganje u kalup

### 3.2.2. Određivanje masenog udjela vlakana

Prilikom izrade ploča kompozita, nakon vađenja istih iz kalupa, primijećeno je da vlakna na rubovima ploče nisu potpuno impregnirana, u pojasu od oko 1 cm (ukupna širina i duljina ploče je 20x20 cm). Uzimajući to u obzir napravljena je približna korekcija prilikom određivanja udjela vlakna gotove ploče. Masa vlakana je stoga pomnožena je s procijenjenim koeficijentom  $k = 0,95$  te je na taj način dobivena točnija masa vlakana u izrađenoj ploči. Udio vlakana u ploči računa se prema sljedećem izrazu:

$$\text{udio vlakana} = \frac{k \cdot m_{vl}}{m_p} \cdot 100 \% \quad (1.2)$$

gdje je:

$m_{vl}$  [g] – masa lanenih vlakana

$m_p$  [g] – masa cijele ploče

### 3.2.3. Izrezivanje uzoraka

Nakon umrežavanja, sljedeći korak je vađenje gotovih ploča kompozita iz kalupa, njihovo vaganje radi određivanja udjela ojačala, te izrezivanje uzoraka za ispitivanja mehaničkih svojstva. Na slici 18. su prikazane gotove ploče kompozita, dok su na slici 16. prikazani izrezani uzorci



Slika 15. Ploče kompozita



Slika 16. Uzorci za ispitivanje mehaničkih svojstava: lijevo je uzorak za rastezna svojstva, u sredini za prividnu smičnu međuslojnu čvrstoću i desno za savojna svojstva.

### 3.3. Mjerenje tvrdoće

Svojstvo materijala koje se protivi zadiranju stranog, tvrdog tijela u njegovu strukturu ili površinu naziva se tvrdoća. Tvrdoća je jedno od osnovnih mehaničkih svojstava materijala, te su podaci o tvrdoći materijala neophodni za izbor postupka strojne ili ručne obrade.



Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za polimere i kompozite Fakulteta strojarstva i brodogradnje, pomoću tvrdomjera Zwick 3106, prikazanog na slici 18. Očitavanja na tvrdomjeru bilježena su svakih 10, 30 i 60 sekundi opterećenja. Egzaktan iznos tvrdoće se ne očitava na tvrdomjeru, već se tvrdomjerom bilježi dubina prodiranja penetratora (kuglice) u pločicu kompozita. Tvrdoća je mjerena prema normi EN ISO 2039-1, utiskivanjem kuglice promjera 5 mm, opterećenjem od 36,5 kP odnosno 357,94 N na 10 različitih mjesta, pri čemu utiskivanje ne smije biti uz rub ispitnog tijela. Mjerenja su provedena na jednom ispitnom tijelu, slika 17. Tvrdoća se izračunava prema sljedećem izrazu:

$$H = \frac{1}{\pi \cdot D} \cdot \frac{F}{h_k} \quad (1.3)$$

gdje je:

$F$  [N] – sila opterećenja

$H$  [N/mm<sup>2</sup>] – tvrdoća

$D$  [mm] – promjer kuglice

$h_k$  [mm] – dubina prodiranja penetratora

Uvrštavanjem vrijednosti promjera kuglice u gornji izraz, dobivamo izraz za izračun tvrdoće:

$$H = 0,06366 \cdot \frac{F}{h_k} \quad (1.4)$$



**Slika 17. Ispitna pločica nakon provedenog ispitivanja tvrdoće**

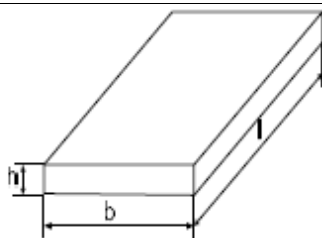


Slika 18. Tvrdomjer Zwick 3106

### 3.4. Mjerenje prividne smične međuslojne čvrstoće

Mjera za kvalitetu granične površine (međusloja) naziva se prividna smična međuslojna čvrstoća. Ona ovisi o čvrstoći prljanjanja između polimerne matrice i vlakana ojačala, te ukupnoj veličini dodirnih površina vlakana i adhezije na tim površinama. Dobrom adhezijom je osiguran dobar prijenos vanjskog opterećenja s matrice na vlakna, te je dobru adheziju potrebno osigurati duž cijele cijele granične površine matrice i vlakana kako bi bila postignuta zadovoljavajuća vrijednost prividne smične međuslojne čvrstoće.

Ispitivanje je provedeno na 5 ispitnih tijela prema normi HRN EN ISO 14130:2005 na univerzalnoj kraljici ZMG VEB Thueringer Industriewerk Rauenstein u Laboratoriju za polimere i kompozite. Uzorak za ispitivanje sastoji se od 5 ispitnih tijela, a izrezan je iz izrađene ploče kompozita (slika 20). Ispitivanje je provedeno u mjernom području od 0 do 980 N, dok je brzina ispitivanja iznosila 7 mm/min. Na slici 19. prikazano je ispitno tijelo za ispitivanje.

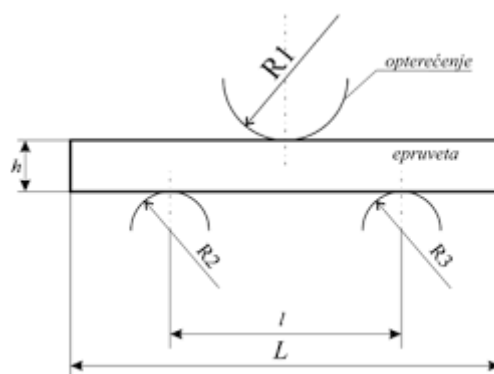


Slika 19. Oblik ispitnog tijela za ispitivanje prividne smične međuslojne čvrstoće



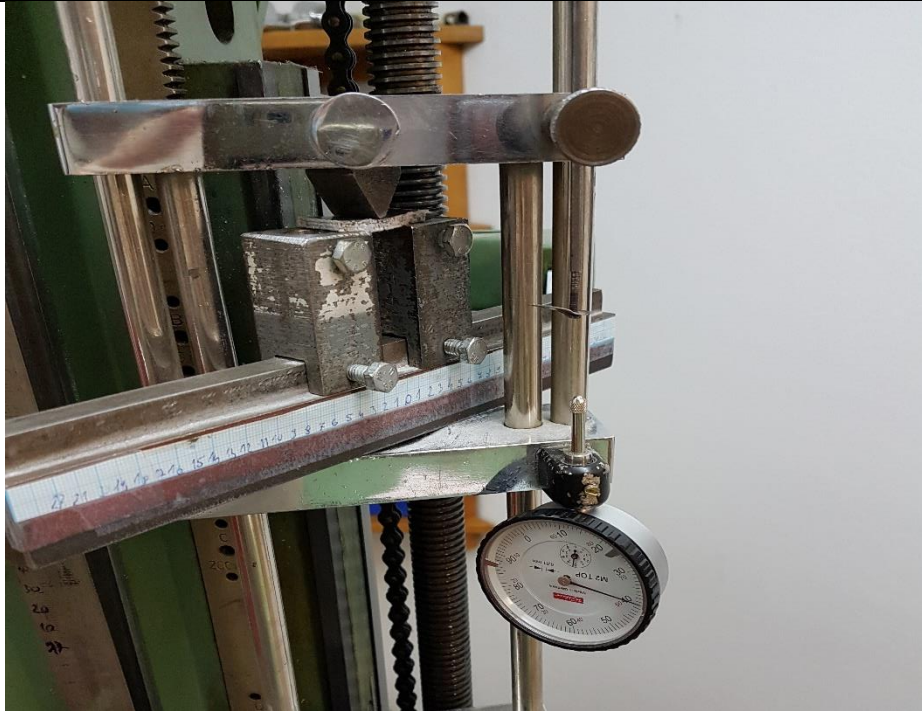
Slika 20. Ispitani uzorak

Opterećenje uzorka je provedeno trotočkastim savijanjem. Razmak između oslonaca računa se prema izrazu (1.5), što je dovoljno malo da se izazove smično naprezanje između slojeva. Shema metode je prikazana na slici 21.



Slika 21. Shema metode ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće

Postupak provedenog ispitivanja prikazan je na slici 22.



Slika 22. Ispitivanje prividne smične međuslojne čvrstoće

Prije početka ispitivanja potrebno je odrediti razmak između oslonaca. Razmak  $L$  se određuje prema srednjoj vrijednosti debljine ispitnih tijela  $h_{sr}$  prema sljedećem izrazu:

$$L = 5 \cdot h_{sr} \quad (1.5)$$

Prividna smična međuslojna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$\tau = \frac{3 \cdot F_{max}}{4 \cdot b \cdot h} \quad (1.6)$$

Gdje je:

$\tau$  [N/mm<sup>2</sup>] – prividna međuslojna smična čvrstoća

$F_{max}$  [N] – maksimalna sila

$h$  [mm] – debljina ispitnog tijela

$b$  [mm] – širina ispitnog tijela

Uzorci su opterećivani na kidalici silom do prekida. Dostizanjem tog iznosa sile došlo je do raslojavanja svih 5 ispitnih tijela, a prekidna sila je ujedno i maksimalnom, te ovdje pokus završava.

### 3.5. Mjerenje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti

Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti provedeno je u Laboratoriju za polimere i kompozite, na istoj kidalici kao i ispitivanje međuslojne smične čvrstoće - ZMG VEB Thueringer Industrierwerk Rauenstein. Jedna od razlika u odnosu na prethodni pokus je razmak između oslonaca. Ispitivanje se provodi savijanjem u tri točke, a razmak između oslonaca je izračunat prema izrazu:

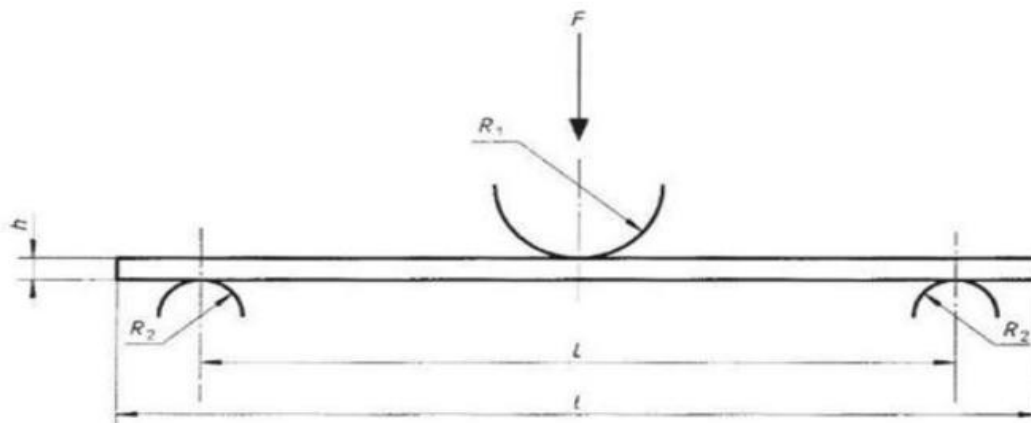
$$L = h_{sr} \cdot 16 \quad (1.7)$$

gdje je:

$L$  [mm] – razmak između oslonaca

$h_{sr}$  [mm] – aritmetička sredina debljine ispitnog tijela

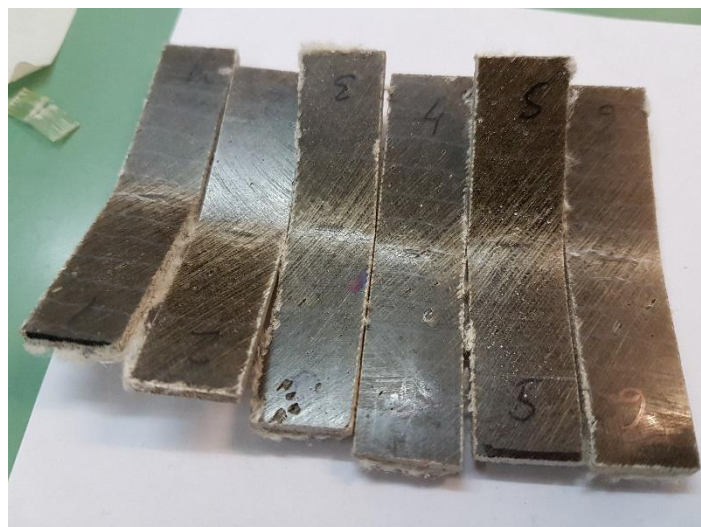
Shema ispitivanja prikazana je na slici 23.



Slika 23. Shema savojnog ispitivanja

Tako postavljeno ispitno tijelo pritiskano je indenterom koji je pričvršćen na kidalicu. Postupnim povećanjem sile ispitno tijelo je savijano sve do trenutka loma, te je za svaki određeni korak povećanja sile očitavan progib.

Ispitivanje je provedeno prema normi HR EN ISO 14125: 2005, u mjernom području o 0 do 980 N, brzinom ispitivanja 7 mm/min. Ispitano je 6 ispitnih uzoraka prikazanih na slici 24.



Slika 24. Ispitani ispitni uzorci



Slika 25. Ispitivanje savojne čvrstoće

Za izračun vrijednosti savojne čvrstoće i pripadajućih napreznja korišteni su izrazi:

$$R_{m,s} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}, \quad \sigma_{m,s} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (1.8), (1.9)$$

gdje je:

$R_{m,s}$  [N/mm<sup>2</sup>] – savojna čvrstoća

$\sigma_{m,s}$  [N/mm<sup>2</sup>] – vrijednost pripadajućeg savojnog napreznja za određeni iznos sile

$F_{max}$  [N] – maksimalna sila

$F$  [N] – sila opterećivanja

$b$  [mm] – širina ispitnog uzorka

$h$  [mm] – debljina ispitnog uzorka

Dok se za izračun istežanja koristi formula:

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot f \cdot h}{L^2} \quad (1.10)$$

gdje je:

$\varepsilon$  [mm/mm] – istežanje uslijed savojnog opterećenja

$f$  [mm] – progib ispitnog tijela

Savojni modul elastičnosti –  $E_s$ , određuje se pomoću nagiba pravca linearnog područja dijagrama naprezanje istežanje, gdje vrijedi Hookeov zakon  $\sigma = \varepsilon E$ .

### 3.6. Mjerenje rastezne čvrstoće i rasteznog modula elastičnost

Naprezanje kod maksimalne sile naziva se rastezna (vlačna) čvrstoća  $R_m$  i jednako je omjeru maksimalne sile  $F_{max}$  i površine početnog presjeka  $A$ . Rastezna čvrstoća je osnovno mehaničko svojstvo materijala prema kojem se izražava mehanička otpornost materijala na rastezno naprezanje.





**Slika 26. Univerzalna kidalica**

Ispitivanje je provedeno statičkim rasteznim pokusom prema normi HRN EN ISO 527-4:1997 na univerzalnoj kidalici ZMG VEB Thuringer Industriewerk Rauenstein prikazanoj na slici 26. u Laboratoriju za polimere i kompozite, isto kao i ispitivanje prividne smične međuslojne čvrstoće. Prirast sile pri statičkom rasteznom ispitivanju u jedinici vremena mora biti takav da prirast proizvedenog naprezanja bude  $\leq 10 \text{ N/mm}^2$ . Brzina ispitivanja iznosila je  $7 \text{ mm/min}$ , dok je mjerno područje bilo od 0 do 4800 N.

Ispitivanje se provelo na uzorcima standardnih dimenzija izrezanih iz ploče kompozita. Kod svih 5 ispitnih tijela je došlo do loma prilikom ispitivanja te su one prikazane na slici 27.





Slika 27. Uzorci ispitani statičkim rasteznim pokusom

Za izračun naprezanja i rastezne čvrstoće kod ispitivanja rastezne čvrstoće kompozita koriste se sljedeći izrazi:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad R_{m,V} = \frac{F_{max}}{A} \quad (1.11), (1.12)$$

Dok se za izračun istežanja koristi formula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1.13)$$

Gdje je:

$\sigma$  [N/mm<sup>2</sup>] – naprezanje uslijed djelovanja sile

$R_{m,V}$  [N/mm<sup>2</sup>] – rastezna čvrstoća

$A$  [mm<sup>2</sup>] – početna površina poprečnog presjeka ispitnog tijela

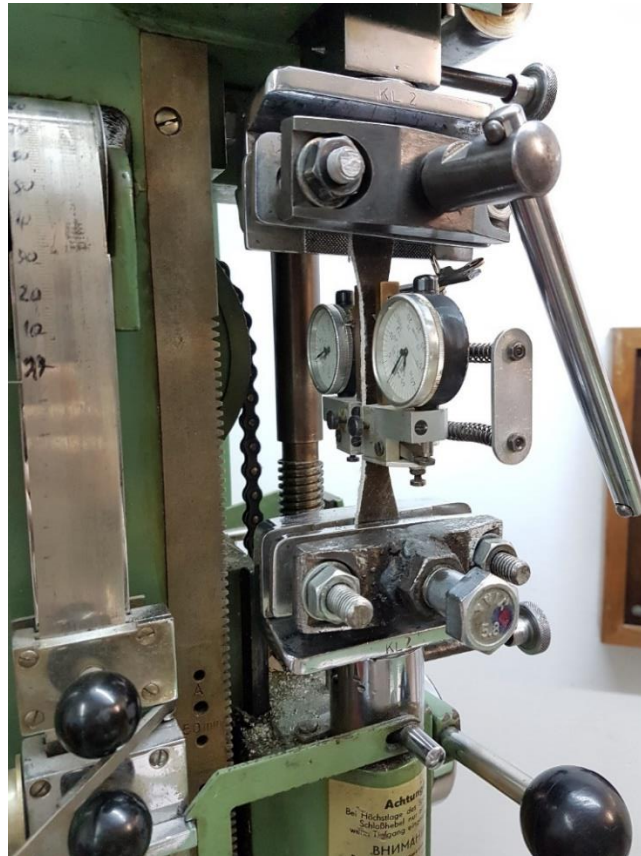
$\varepsilon$  [mm/mm] – istežanje uslijed naprezanja

$\Delta l$  [mm] – promjena duljine ispitnog tijela

$l_0$  [mm] – početna mjerna duljina ispitnog tijela

Rastezni modul elastičnosti određuje se iz nagiba pravca, isto kao kod ispitivanja savojnog modula elastičnosti.

Tokom rasteznog ispitivanja na komparatoru, koji se sastoji od dvije mjerne ure, očitava se promjena duljine ispitnog tijela pri određenim iznosima sila. Komparator i rastezno ispitivanje prikazani su na slici 28. Promjena duljine ispitnog tijela očitava se na način da se očitavaju vrijednosti koje pokazuju lijeva ( $\Delta l_L$ ) i desna ( $\Delta l_D$ ) mjerna ura, te se izračuna aritmetička sredina ( $\bar{x}$ ) te dvije vrijednosti koja označava promjenu duljine ispitnog tijela odnosno  $l_0$ .



**Slika 28. Rastezno ispitivanje i komparator**

## 4. REZULTATI ISPITIVANJA KOMPOZITA

### 4.1. Ploče kompozita

Tablica 3. prikazuje izmjerenu mase gotovih ploča epoksidne smole ojačane lanenim vlaknima ( $m_p$ ) i mase lanenih vlakana ( $m_{vl}$ ).

Tablica 3. Izmjerene mase

	Ploča 1	Ploča 2	Ploča 3
$m_{vl}$ [g]	56,1	54,2	52,1
$m_p$ [g]	197,5	191,6	195,9
$h$ [mm]	3,1	3,2	3,4

Rezultati izračuna udjela matrice i ojačala u pločama izrađenog kompozita prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Maseni udjeli materice i ojačala u kompozitu

	Ploča 1	Ploča 2	Ploča 3
Udio vlakana	26,98 %	26,87 %	25,27 %
Udio epoksidne smole	73,02 %	73, 13 %	74,73 %

Prilikom izrade samih ploča, vrijeme rada s epoksidnom smolom ograničeno je na 20 min jer nakon tog vremena epoksidna smola očvrstne te postaje neupotrebljiva za daljnju izradu. Iz podataka u tablici 4. i tablici 3. primjećuje se da je u prvoj izrađenoj ploči najveći udio vlakana dok je debljina najmanja, a u zadnje izrađenoj ploči udio vlakana je najmanji dok je debljina najveća. Iz toga se opaža da je epoksidna smola s vremenom sve viskozija te se vlakna teže impregniraju.

Prilikom provođenja ispitivanja korištena je samo ploča broj 1.

### 4.2. Rezultati mjerenja tvrdoće

U tablici 5. prikazana su očitavanja dubine prodiranja kuglice tvrdomjera ispitivanog kompozita, za određene vremenske intervale.

Tablica 5. Očitavanje vrijednosti prodiranja

Vrijeme [s]	10	30	60	očitanje
Dubine prodiranja $h_k$ [mm]	0,215	0,220	0,230	1
	0,205	0,210	0,210	2
	0,190	0,195	0,200	3
	0,185	0,1900	0,195	4
	0,190	0,195	0,200	5
	0,205	0,202	0,210	6
	0,180	0,190	0,195	7
	0,205	0,210	0,215	8
	0,195	0,200	0,210	9
	0,220	0,225	0,230	10

Nakon uvrštavanja dobivenih rezultata u formulu za izračun tvrdoće, dobiveni su sljedeći rezultati, prikazani u tablici 6.

Tablica 6. Rezultati tvrdoće ispitanog kompozita

Vrijeme [s]	10	30	60	očitanje
H [N/mm <sup>2</sup> ]	105,98	103,57	99,07	1
	111,15	108,51	108,51	2
	119,93	116,85	113,93	3
	123,17	119,93	116,85	4
	119,93	116,85	113,93	5
	111,15	112,80	108,51	6
	126,59	119,93	116,85	7
	111,15	108,51	105,98	8
	116,85	113,93	108,51	9
	103,57	101,27	99,07	10
<b>H<sub>sr</sub> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	114,95	112,22	109,12	

### 4.3. Rezultati mjerenja prividne smične međuslojne čvrstoće

U tablici 7. su prikazane izmjerene dimenzije ispitnih uzoraka kompozita, te određena duljina razmaka između oslonaca.

**Tablica 7. Dimenzije ispitnih uzoraka**

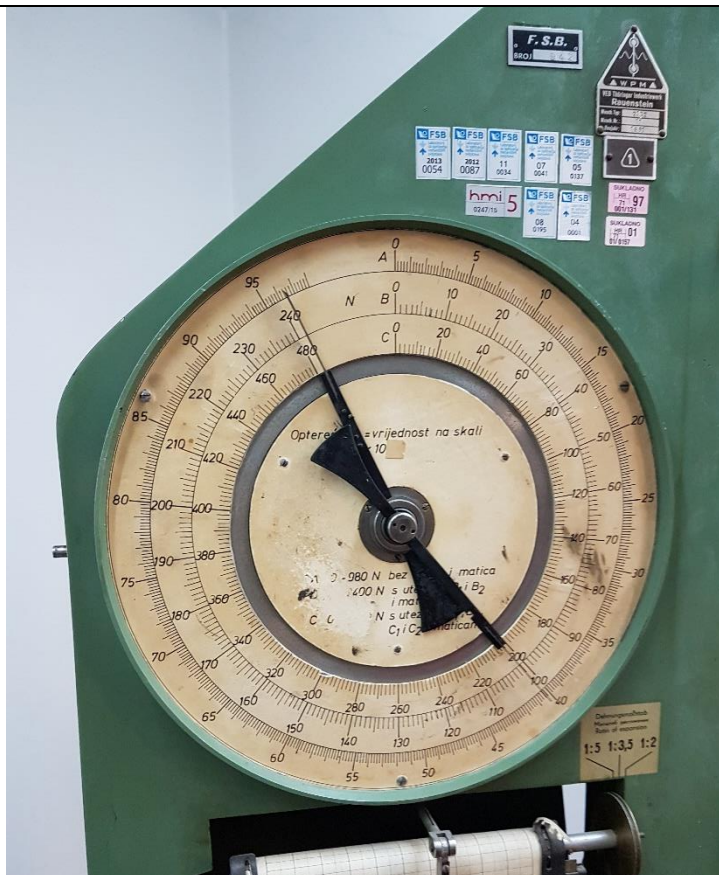
$L = 5 \cdot h_{sr}$ $L = 16,5 \text{ mm}$	Ispitni uzorak						
	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	st.dev.
$b$ [mm]	16	16,1	16,1	16,1	15,8	16,02	0,13
$h$ [mm]	3,2	3,2	3,3	3,3	3,4	3,28	0,08

U tablici 8. prikazani su rezultati mjerenja odnosno iznos izmjerene maksimalne sile, te izračunate vrijednosti prividne smične međuslojne čvrstoće

**Tablica 8. Rezultati ispitivanja prividne smične međuslojne čvrstoće**

	Ispitni uzorak						
	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	st.dev.
$F_{max}$ [N]	930	936	964	972	960	952,4	18,35
$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	13,62	13,63	13,6	13,72	13,4	13,59	0,12

Na slici 29. je prikazano jedno očitavanje maksimalne sile prilikom ispitivanja prividne smične međuslojne čvrstoće.



Slika 29. Očitavanje vrijednosti sile

#### 4.4. Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti

U tablici 9. prikazane su izmjerene dimenzije ispitnog tijela korištenih prilikom savojnog ispitivanja te razmak između oslonaca

Tablica 9. Dimenzije uzoraka kod savojnog ispitivanja

Ispitno tijelo	$b$ [mm]	$h$ [mm]	$L$ [mm]	$L = h_{sr} \cdot 16$
1	15,3	3,2	51	
2	15,3	3,1	51	
3	15,1	3,2	51	
4	15,2	3,1	51	
5	15,2	3,2	51	
6	15,4	3,2	51	

Tablica 10 prikazuje očitane progibe za pripadajući iznos sile kod savojnog ispitivanja, za svih 6 ispitnih tijela.

Tablica 10. Očitani progibi

$F$ [N]	$f_1$ [mm]	$f_2$ [mm]	$f_3$ [mm]	$f_4$ [mm]	$f_5$ [mm]	$f_6$ [mm]
10	0,3	0,86	0,22	0,19	0,21	0,3
20	0,5	1,02	0,34	0,37	0,35	0,55
30	0,65	1,12	0,47	0,55	0,5	0,68
40	0,8	1,32	0,6	0,7	0,67	0,8
50	0,96	1,45	0,74	0,88	0,78	0,97
60	1,14	1,59	0,88	1,02	0,92	1,11
70	1,33	1,76	1,03	1,2	1,11	1,26
80	1,52	1,96	1,2	1,41	1,29	1,44
90	1,76	2,15	1,38	1,62	1,47	1,68
100	1,98	2,37	1,59	1,85	1,65	1,86
110	2,23	2,58	1,81	2,12	1,89	2,09
120	2,48	2,84	2,03	2,38	2,1	2,31
130	2,79	3,11	2,3	2,66	2,33	2,55
140	3,11	3,4	2,59	3	2,56	2,87
150	3,49	3,66	2,87	3,36	2,8	3,16
$F_{max}$ [N]	210	210	210	204	230	216

Pomoću izraza za izračun savojne čvrstoće izračunate su sljedeće vrijednosti:

Ispitno tijelo 1:  $R_{m,S} = 102,54 \text{ N/mm}^2$

Ispitno tijelo 2:  $R_{m,S} = 109,26 \text{ N/mm}^2$

Ispitno tijelo 3:  $R_{m,S} = 103,89 \text{ N/mm}^2$

Ispitno tijelo 4:  $R_{m,S} = 106,84 \text{ N/mm}^2$

Ispitno tijelo 5:  $R_{m,S} = 113,04 \text{ N/mm}^2$

Ispitno tijelo 6:  $R_{m,S} = 104,78 \text{ N/mm}^2$

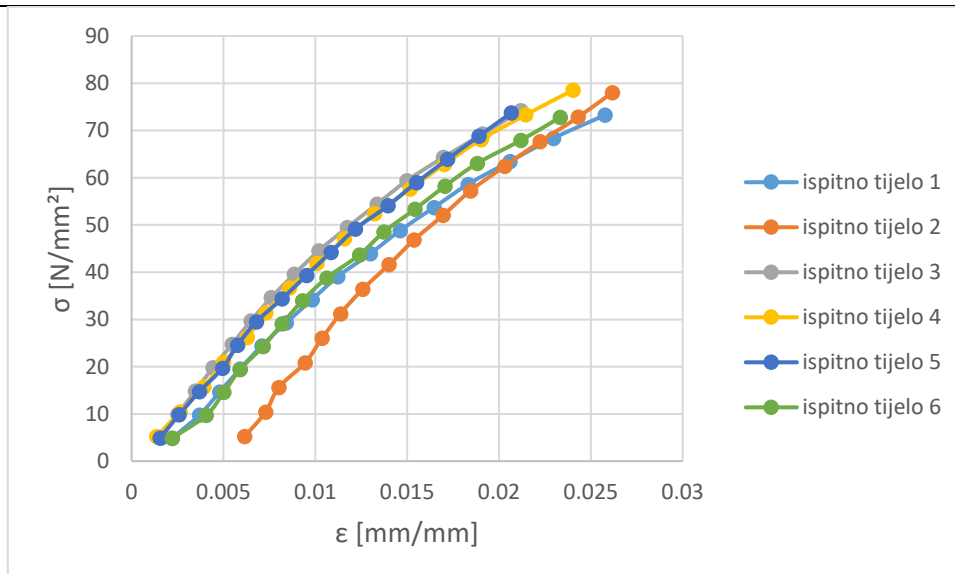
Srednja vrijednost savojne čvrstoće računa se kao aritmetička sredina dobivenih vrijednosti savojne čvrstoće za svako ispitno tijelo. Izračunom aritmetičke sredine dobiva se vrijednost savojne čvrstoće –  $R_{mS} = 106,73 \text{ N/mm}^2$ , uz standardnu devijaciju  $3,89 \text{ N/mm}^2$ .

Izračunata naprezanja i istežanja prikazana su u tablici 11.

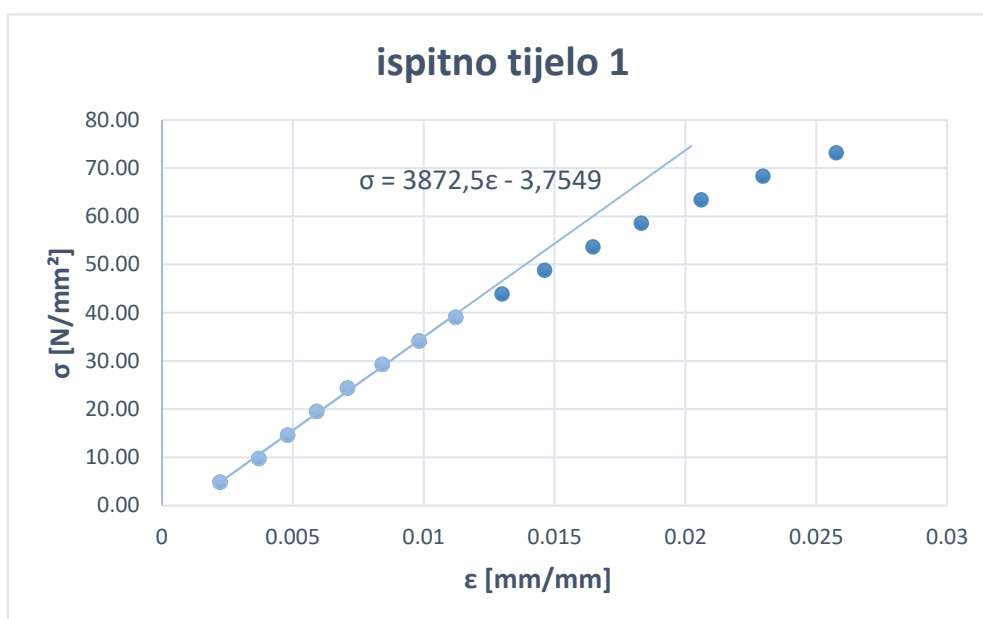
**Tablica 11. Rezultati naprezanja i istežanja kod ispitivanja savojne čvrstoće. Naprezanje  $\sigma$  izraženo je u N/mm<sup>2</sup>, a  $\varepsilon$  u mm/mm.**

<b><i>F</i></b>	<b><math>\sigma_1</math></b>	<b><math>\varepsilon_1</math></b>	<b><math>\sigma_2</math></b>	<b><math>\varepsilon_2</math></b>	<b><math>\sigma_3</math></b>	<b><math>\varepsilon_3</math></b>
<b>10</b>	4,88	0,002215	5,20	0,006150	4,95	0,001624
<b>20</b>	9,77	0,003691	10,41	0,007294	9,89	0,002510
<b>30</b>	14,65	0,004798	15,61	0,008009	14,84	0,003469
<b>40</b>	19,53	0,005905	20,81	0,009439	19,79	0,004429
<b>50</b>	24,41	0,007087	26,01	0,010369	24,74	0,005463
<b>60</b>	29,30	0,008415	31,22	0,011370	29,68	0,006496
<b>70</b>	34,18	0,009818	36,42	0,012586	34,63	0,007603
<b>80</b>	39,06	0,011220	41,62	0,014016	39,58	0,008858
<b>90</b>	43,95	0,012992	46,83	0,015375	44,53	0,010187
<b>100</b>	48,83	0,014616	52,03	0,016948	49,47	0,011737
<b>110</b>	53,71	0,016461	57,23	0,018450	54,42	0,013361
<b>120</b>	58,59	0,018307	62,43	0,020309	59,37	0,014985
<b>130</b>	63,48	0,020595	67,64	0,022240	64,32	0,016978
<b>140</b>	68,36	0,022957	72,84	0,024314	69,26	0,019119
<b>150</b>	73,24	0,025762	78,04	0,026173	74,21	0,021186
<b><i>F</i></b>	<b><math>\sigma_4</math></b>	<b><math>\varepsilon_4</math></b>	<b><math>\sigma_5</math></b>	<b><math>\varepsilon_5</math></b>	<b><math>\sigma_6</math></b>	<b><math>\varepsilon_6</math></b>
<b>10</b>	5,24	0,001359	4,91	0,001550	4,85	0,002215
<b>20</b>	10,47	0,002646	9,83	0,002584	9,70	0,004060
<b>30</b>	15,71	0,003933	14,74	0,003691	14,55	0,005020
<b>40</b>	20,95	0,005006	19,66	0,004946	19,40	0,005905
<b>50</b>	26,19	0,006293	24,57	0,005758	24,26	0,007160
<b>60</b>	31,42	0,007294	29,49	0,006791	29,11	0,008194
<b>70</b>	36,66	0,008581	34,40	0,008194	33,96	0,009301
<b>80</b>	41,90	0,010083	39,32	0,009522	38,81	0,010630
<b>90</b>	47,13	0,011585	44,23	0,010851	43,66	0,012401
<b>100</b>	52,37	0,013230	49,15	0,012180	48,51	0,013730
<b>110</b>	57,61	0,015160	54,06	0,013952	53,36	0,015428
<b>120</b>	62,85	0,017020	58,98	0,015502	58,21	0,017052
<b>130</b>	68,08	0,019022	63,89	0,017200	63,06	0,018824
<b>140</b>	73,32	0,021453	68,81	0,018897	67,92	0,021186
<b>150</b>	78,56	0,024028	73,72	0,020669	72,77	0,023326

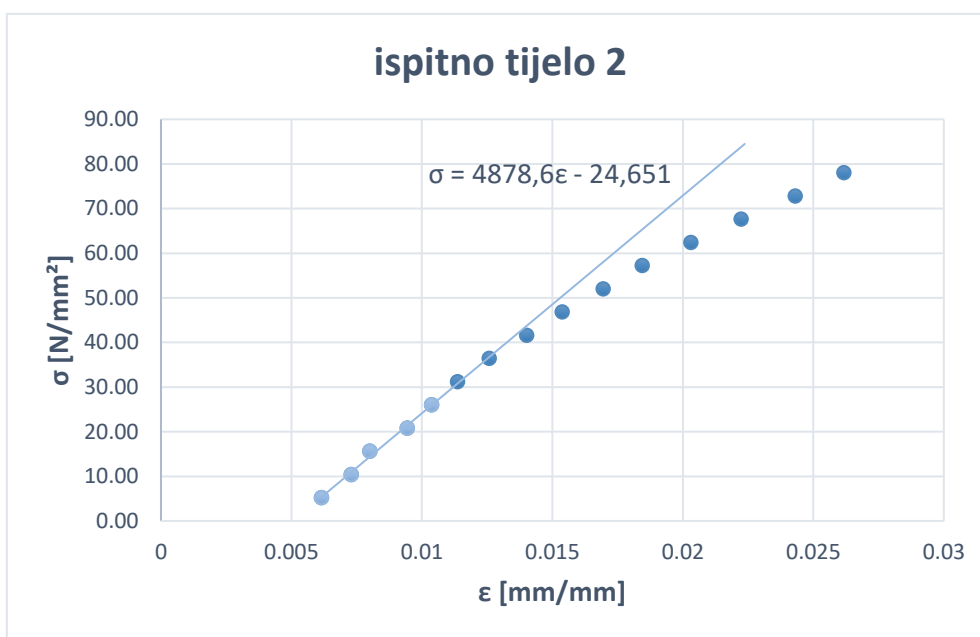




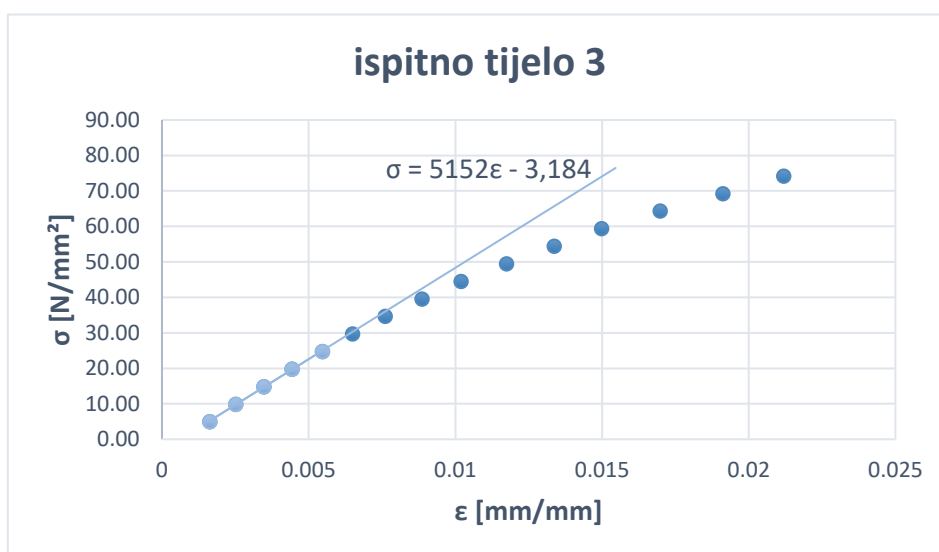
Slika 30. Grafički prikaz savojnog ispitivanja



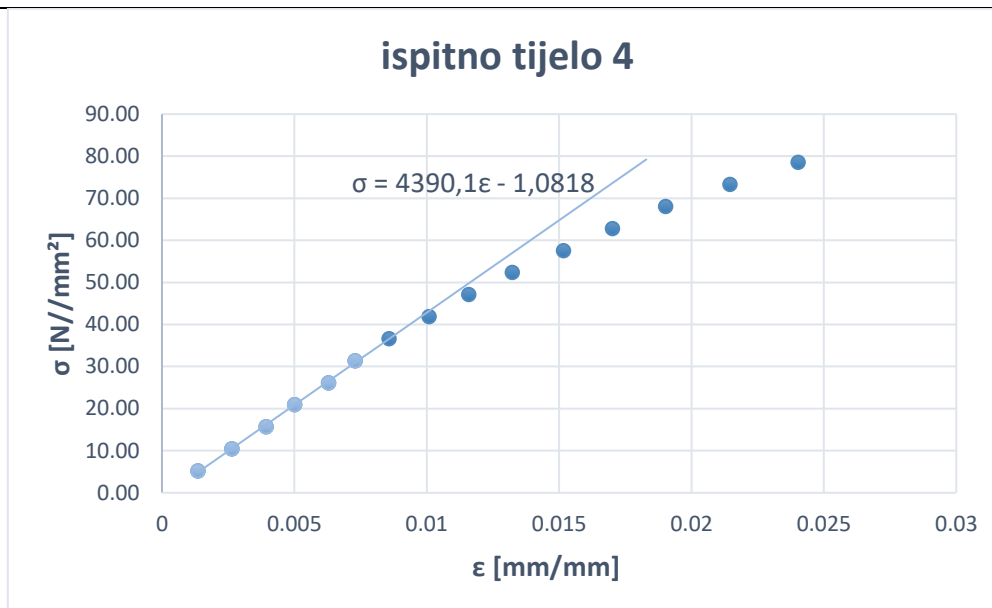
Slika 31. Dijagram naprezanje deformacija pri savojnom opterećenju za ispitno tijelo 1



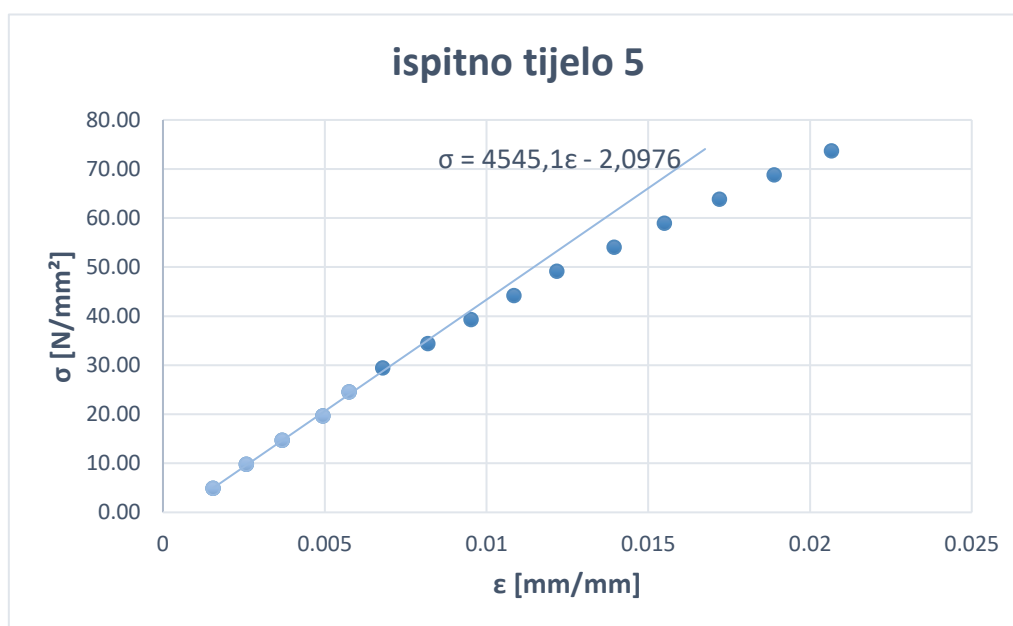
Slika 32. Dijagram naprezanje deformacija pri savojnom opterećenju za ispitno tijelo 2



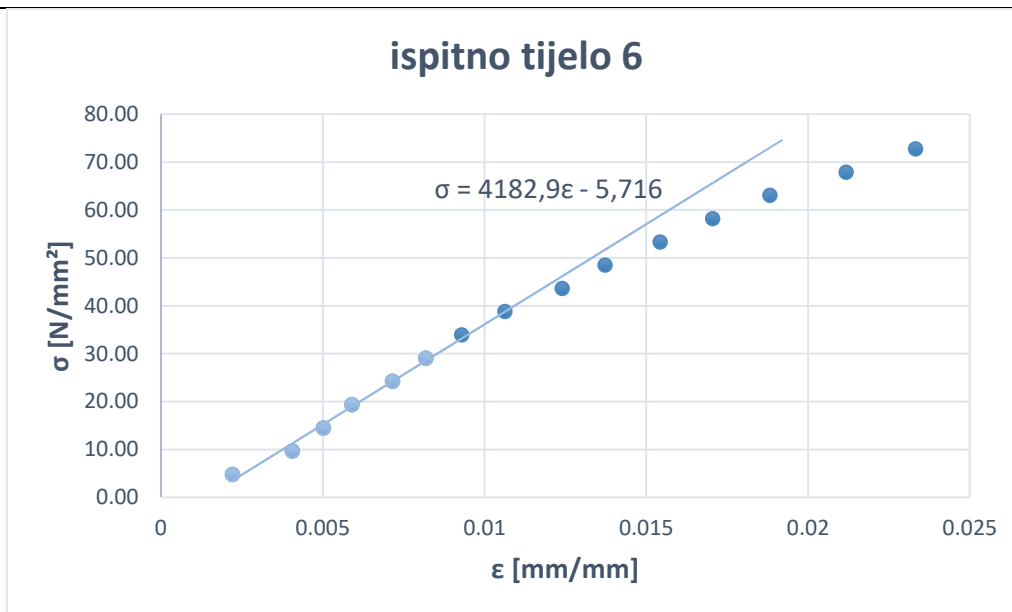
Slika 33. Dijagram naprezanje deformacija pri savojnom opterećenju za ispitno tijelo 3



Slika 34. Dijagram naprezanje deformacija pri savojnom opterećenju za ispitno tijelo 4



Slika 35. Dijagram naprezanje deformacija pri savojnom opterećenju za ispitno tijelo 5



**Slika 36. Dijagram naprezanje deformacija pri savojnom opterećenju za ispitno tijelo 6**

Pomoću jednadžbi pravaca, odnosno njegovog nagiba, sa slika 31. do 36. očitani su sljedeći savojni moduli:

Ispitno tijelo 1:  $E_1 = 3872,5 \text{ N/mm}^2$

Ispitno tijelo 2:  $E_2 = 4878,6 \text{ N/mm}^2$

Ispitno tijelo 3:  $E_3 = 5152 \text{ N/mm}^2$

Ispitno tijelo 4:  $E_4 = 4390,1 \text{ N/mm}^2$

Ispitno tijelo 5:  $E_5 = 4545,1 \text{ N/mm}^2$

Ispitno tijelo 5:  $E_6 = 4182,9 \text{ N/mm}^2$

Srednja vrijednost savojnog modula računa se kao aritmetička sredina dobivenih vrijednosti savojnih modula za svako ispitno tijelo. Izračunom aritmetičke sredine dobiva se vrijednost savojnog modula elastičnosti –  $E_S = 4503,53 \text{ N/mm}^2$  uz standardnu devijaciju  $464,07 \text{ N/mm}^2$ .

#### 4.5. Rezultati mjerenje rastezne čvrstoće i rasteznog modula elastičnosti

U tablici 12. prikazane su izmjerene dimenzije ispitnog tijela korištenih prilikom rasteznog ispitivanja te početna mjerna duljina ispitnog tijela.

Tablica 12. Dimenzije ispitnog tijela

Ispitno tijelo	$b$ [mm]	$h$ [mm]	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	$l_0$ [mm]
1	10,5	3,5	36,75	50
2	10,5	3,4	35,7	
3	10,3	3,3	33,99	
4	10,4	3,3	34,32	
5	10,4	3,2	33,28	

U tablici 13. prikazani su rezultati ispitivanja za ispitno tijelo 1. Pri ispitivanju ispitnog tijela 1 došlo je do proklizavanja ispitnog tijela iz oslonaca pri sili od 1200 N. Nakon namještanja ispitivanje je nastavljeno do pucanja ispitnog tijela kako bi se zabilježila maksimalna sila, ali produljenja nisu razmatrana.

Tablica 13. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 1

$F$ [N]	$\Delta l_L$ [mm]	$\Delta l_D$ [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon$ [mm/mm]
0	0	0	0	0	0
100	0,01	0,01	0,01	2,72	0,0002
200	0,02	0,03	0,025	5,44	0,0005
300	0,05	0,03	0,04	8,16	0,0008
400	0,07	0,06	0,065	10,88	0,0013
500	0,1	0,09	0,095	13,61	0,0019
600	0,12	0,11	0,115	16,33	0,0023
700	0,15	0,14	0,145	19,05	0,0029
800	0,18	0,17	0,175	21,77	0,0035
900	0,21	0,2	0,205	24,49	0,0041
1000	0,25	0,24	0,245	27,21	0,0049
1100	0,28	0,27	0,275	29,93	0,0055
1200	0,3	0,29	0,295	32,65	0,0059
$F_{max}$	2440 N				

U tablici 14. prikazani su rezultati ispitivanja ispitnog tijela 2.

Tablica 14. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 2

$F$ [N]	$\Delta l_L$ [mm]	$\Delta l_D$ [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon$ [mm/mm]
0	0	0	0	0	0
100	0,01	0,01	0,01	2,80	0,0002
200	0,04	0,01	0,025	5,60	0,0005
300	0,06	0,02	0,04	8,40	0,0008
400	0,08	0,05	0,065	11,20	0,0013
500	0,11	0,07	0,09	14,01	0,0018
600	0,14	0,1	0,12	16,81	0,0024
700	0,17	0,13	0,15	19,61	0,003
800	0,2	0,16	0,18	22,41	0,0036
900	0,23	0,2	0,215	25,21	0,0043
1000	0,26	0,24	0,25	28,01	0,005
1100	0,3	0,27	0,285	30,81	0,0057
1200	0,34	0,31	0,325	33,61	0,0065
1300	0,38	0,35	0,365	36,41	0,0073
1400	0,42	0,39	0,405	39,22	0,0081
1500	0,46	0,44	0,45	42,02	0,009
1600	0,51	0,48	0,495	44,82	0,0099
1700	0,56	0,55	0,555	47,62	0,0111
1800	0,63	0,61	0,62	50,42	0,0124
1900	0,72	0,7	0,71	53,22	0,0142
2000	0,8	0,78	0,79	56,02	0,0158
$F_{max}$	2600 N				

U tablici 15. prikazani su rezultati ispitivanja ispitnog tijela 3.

Tablica 15. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 3

$F$ [N]	$\Delta l_L$ [mm]	$\Delta l_D$ [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon$ [mm/mm]
0	0	0	0	0	0
100	0,02	0,01	0,015	2,94	0,0003
200	0,03	0,02	0,025	5,88	0,0005
300	0,06	0,04	0,05	8,83	0,001
400	0,08	0,06	0,07	11,77	0,0014
500	0,11	0,09	0,1	14,71	0,002
600	0,14	0,12	0,13	17,65	0,0026
700	0,17	0,16	0,165	20,59	0,0033
800	0,21	0,2	0,205	23,54	0,0041
900	0,24	0,23	0,235	26,48	0,0047
1000	0,28	0,27	0,275	29,42	0,0055
1100	0,33	0,31	0,32	32,36	0,0064
1200	0,37	0,36	0,365	35,30	0,0073
1300	0,41	0,4	0,405	38,25	0,0081
1400	0,46	0,45	0,455	41,19	0,0091
1500	0,51	0,51	0,51	44,13	0,0102

<b>1600</b>	0,57	0,57	0,57	47,07	0,0114
<b>1700</b>	0,65	0,65	0,65	50,01	0,013
<b>1800</b>	0,74	0,74	0,74	52,96	0,0148
<b>1900</b>	0,86	0,87	0,865	55,90	0,0173
<b>2000</b>	0,99	0,99	0,99	58,84	0,0198
$F_{max}$	2340 N				

U tablici 16. prikazani su rezultati ispitivanja ispitnog tijela 4.

**Tablica 16. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 4**

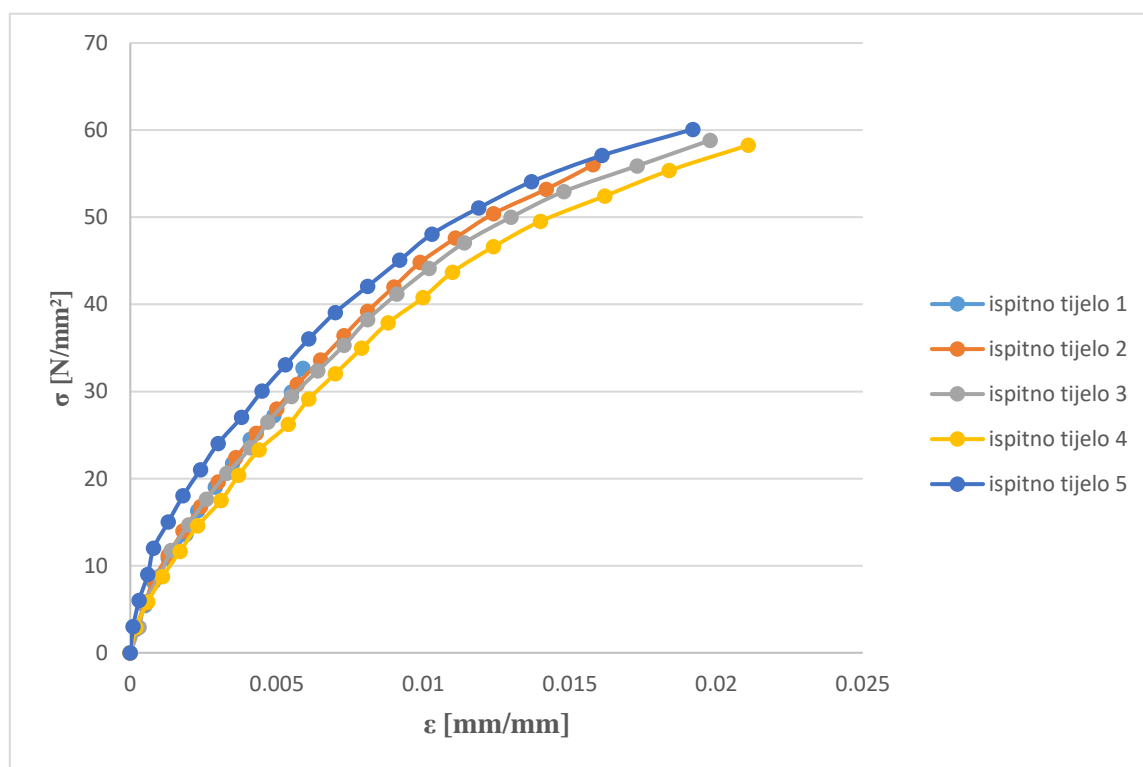
$F$ [N]	$\Delta l_L$ [mm]	$\Delta l_D$ [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon$ [mm/mm]
<b>0</b>	0	0	0	0	0
<b>100</b>	0,01	0,01	0,01	2,91	0,0002
<b>200</b>	0,04	0,02	0,03	5,82	0,0006
<b>300</b>	0,06	0,05	0,055	8,74	0,0011
<b>400</b>	0,09	0,08	0,085	11,65	0,0017
<b>500</b>	0,12	0,11	0,115	14,56	0,0023
<b>600</b>	0,16	0,15	0,155	17,48	0,0031
<b>700</b>	0,19	0,18	0,185	20,39	0,0037
<b>800</b>	0,22	0,22	0,22	23,31	0,0044
<b>900</b>	0,27	0,27	0,27	26,22	0,0054
<b>1000</b>	0,31	0,3	0,305	29,13	0,0061
<b>1100</b>	0,35	0,35	0,35	32,05	0,007
<b>1200</b>	0,4	0,39	0,395	34,96	0,0079
<b>1300</b>	0,44	0,44	0,44	37,87	0,0088
<b>1400</b>	0,5	0,5	0,5	40,79	0,01
<b>1500</b>	0,55	0,55	0,55	43,70	0,011
<b>1600</b>	0,62	0,62	0,62	46,62	0,0124
<b>1700</b>	0,7	0,7	0,7	49,53	0,014
<b>1800</b>	0,81	0,81	0,81	52,44	0,0162
<b>1900</b>	0,92	0,92	0,92	55,36	0,0184
<b>2000</b>	1,05	1,06	1,055	58,27	0,0211
$F_{max}$	2300 N				

U tablici 17. prikazani su rezultati ispitivanja ispitnog tijela 5.

**Tablica 17. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 5**

$F$ [N]	$\Delta l_L$ [mm]	$\Delta l_D$ [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon$ [mm/mm]
<b>0</b>	0	0	0	0	0
<b>100</b>	0,01	0	0,005	3,00	0,0001
<b>200</b>	0,02	0,01	0,015	6,01	0,0003
<b>300</b>	0,05	0,01	0,03	9,01	0,0006

<b>400</b>	0,07	0,01	0,04	12,02	0,0008
<b>500</b>	0,1	0,03	0,065	15,02	0,0013
<b>600</b>	0,13	0,05	0,09	18,03	0,0018
<b>700</b>	0,16	0,08	0,12	21,03	0,0024
<b>800</b>	0,19	0,11	0,15	24,04	0,003
<b>900</b>	0,23	0,15	0,19	27,04	0,0038
<b>1000</b>	0,27	0,18	0,225	30,05	0,0045
<b>1100</b>	0,31	0,22	0,265	33,05	0,0053
<b>1200</b>	0,35	0,26	0,305	36,06	0,0061
<b>1300</b>	0,39	0,31	0,35	39,06	0,007
<b>1400</b>	0,44	0,37	0,405	42,07	0,0081
<b>1500</b>	0,5	0,42	0,46	45,07	0,0092
<b>1600</b>	0,55	0,48	0,515	48,08	0,0103
<b>1700</b>	0,63	0,56	0,595	51,08	0,0119
<b>1800</b>	0,72	0,65	0,685	54,09	0,0137
<b>1900</b>	0,83	0,78	0,805	57,09	0,0161
<b>2000</b>	0,98	0,94	0,96	60,10	0,0192
<b><math>F_{max}</math></b>	2260 N				



Slika 37. Grafički prikaz statičko rasteznog pokusa

Prema izrazu za izračun rasteznih čvrstoća dobiveni su sljedeći rezultati:



Ispitno tijelo 1:  $R_{mV1} = 60,95 \text{ N/mm}^2$

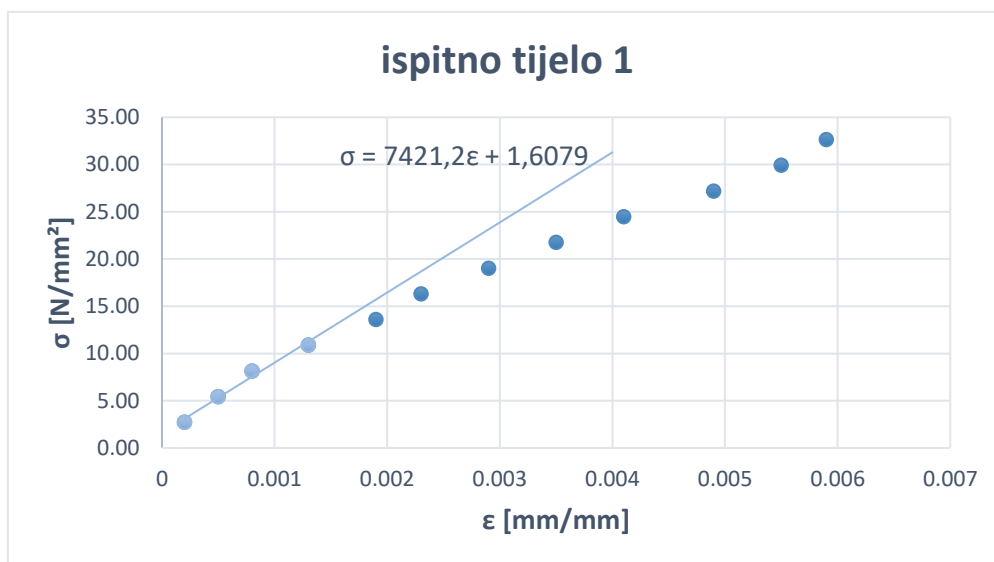
Ispitno tijelo 2:  $R_{mV2} = 72,83 \text{ N/mm}^2$

Ispitno tijelo 3:  $R_{mV3} = 68,84 \text{ N/mm}^2$

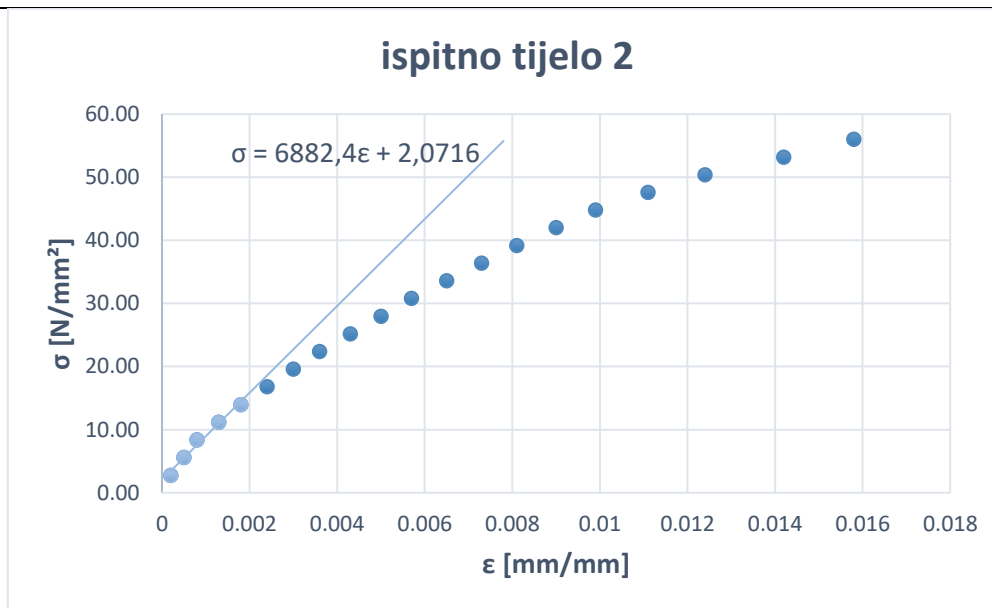
Ispitno tijelo 4:  $R_{mV4} = 67,02 \text{ N/mm}^2$

Ispitno tijelo 5:  $R_{mV5} = 67,91 \text{ N/mm}^2$

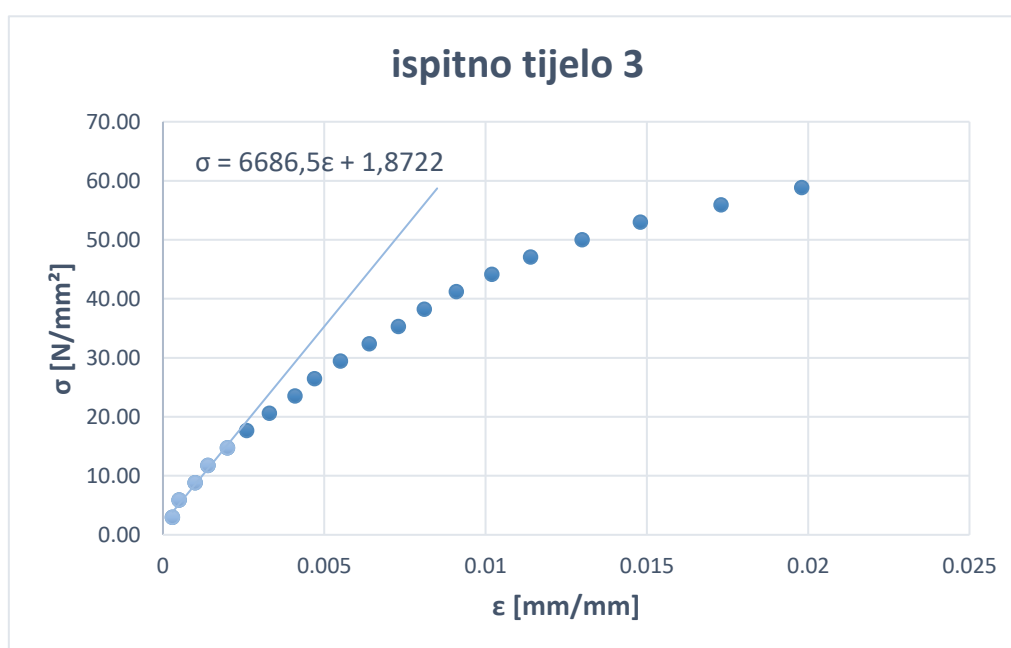
Srednja vrijednost rastezne čvrstoće računa se kao aritmetička sredina dobivenih vrijednosti rastezne čvrstoće za svako ispitno tijelo. Izračunom aritmetičke sredine dobiva se vrijednost rastezne čvrstoće –  $R_{mV} = 67,51 \text{ N/mm}^2$  uz standardnu devijaciju  $4,29 \text{ N/mm}^2$ .



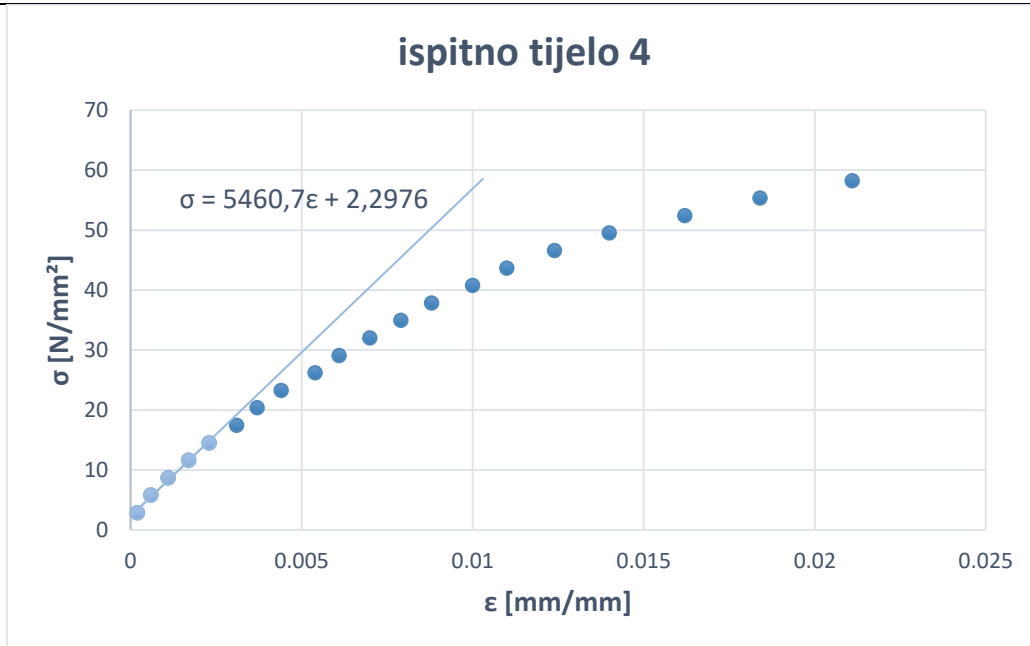
Slika 38. Dijagram naprezanje-deformacija pri rasteznom opterećenju za ispitno tijelo 1



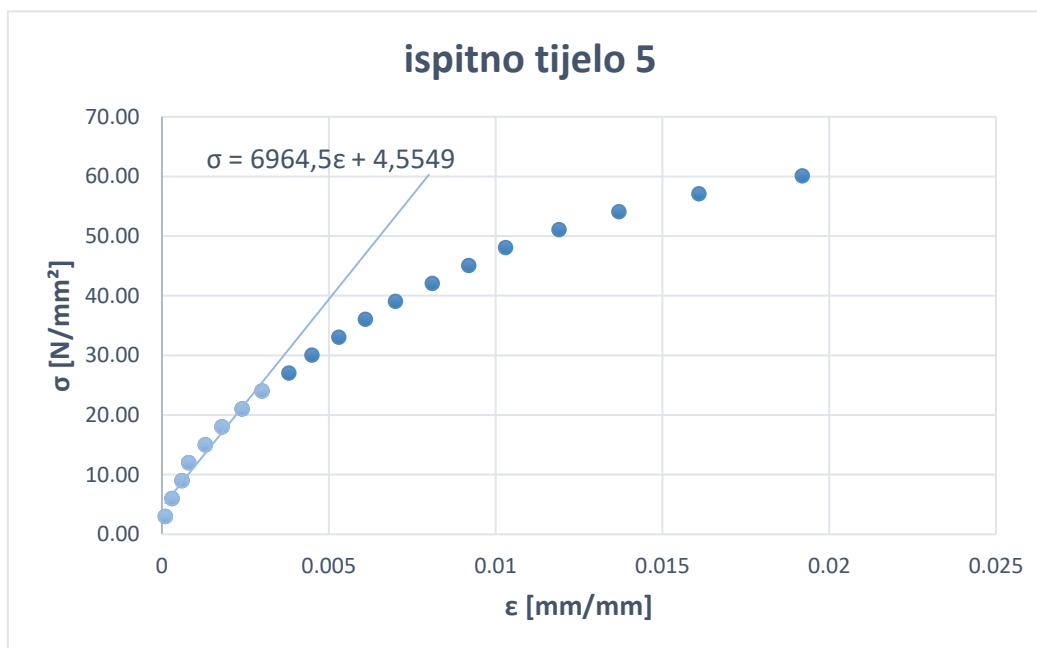
Slika 39. Dijagram naprežanje-deformacija pri rasteznom opterećenju za ispitno tijelo 2



Slika 40. Dijagram naprežanje-deformacija pri rasteznom opterećenju za ispitno tijelo 3



Slika 41. Dijagram naprežanje-deformacija pri rasteznom opterećenju za ispitno tijelo 4



Slika 42. Dijagram naprežanje-deformacija pri rasteznom opterećenju za ispitno tijelo 5

Pomoću jednadžbi pravaca, odnosno njegovog nagiba, sa slika 38. do 42. očitani su sljedeći rastezni moduli:

Ispitno tijelo 1:  $E_1 = 7421,2 \text{ N/mm}^2$

Ispitno tijelo 2:  $E_2 = 6882,4 \text{ N/mm}^2$

Ispitno tijelo 3:  $E_3 = 6686,5 \text{ N/mm}^2$

Ispitno tijelo 4:  $E_4 = 5460,7 \text{ N/mm}^2$

Ispitno tijelo 5:  $E_5 = 6964,5 \text{ N/mm}^2$

Srednja vrijednost rasteznog modula računa se kao aritmetička sredina dobivenih vrijednosti rasteznih modula za svako ispitno tijelo. Izračunom aritmetičke sredine dobiva se vrijednost rasteznog modula elastičnosti –  $E_V = 6683,06 \text{ N/mm}^2$  uz standardnu devijaciju  $734,5 \text{ N/mm}^2$ .

#### 4.6. Usporedba rezultata ispitivanja kompozita s drugim vrstama kompozitima

U tablici 18. su prikazana mehanička svojstva biokompozita izrađenog od epoksidne smole ojačanog lanenim vlaknima, analiziranog u ovom završnom radu, biokompozita također izrađenog od epoksidne smole ojačanog različitim udjelima konopljinih vlakna, te kompozita ojačanih staklenim vlaknima i kombinacijom staklena/konopljina vlakna.

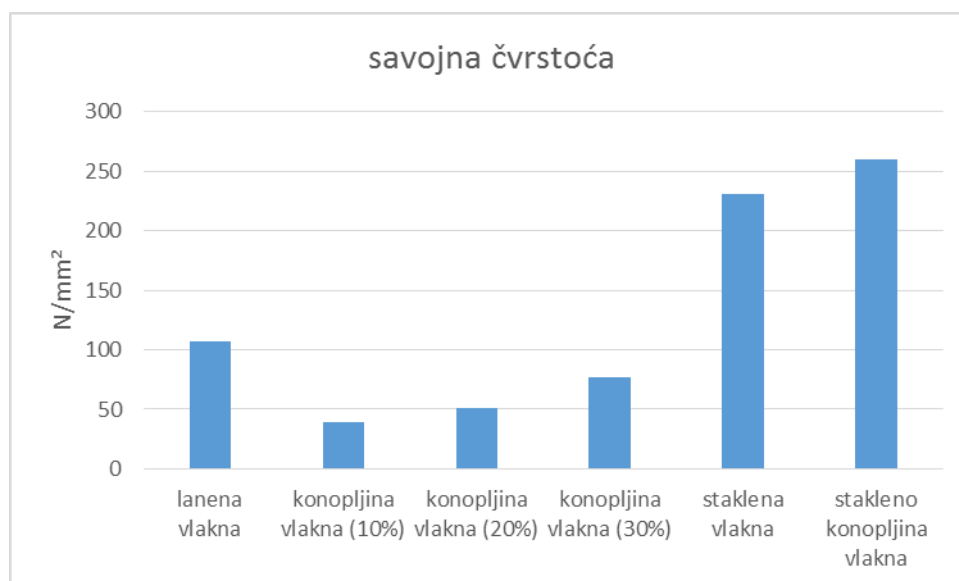
**Tablica 18. Mehanička svojstva kompozita s epoksidnom matricom ojačanom različitim vrstama bioloških vlakana [14], [16], [17]**

ojačalo	Konoplja (10 % m.)	Konoplja (20 % m.)	Konoplja (30 % m.)	staklena vlakna	Staklena vlakna + konoplja	lanena vlakna (27%udio)
$R_{m,S}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	39,24	50,75	76,69	230,9	260	106,73
$E_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1310	2520	3790	21217	-	3389,7
$R_{m,V}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	40,66	40,83	50,46	353	37,16	67,51
$E_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1830	1730	1720	-	-	3482,5

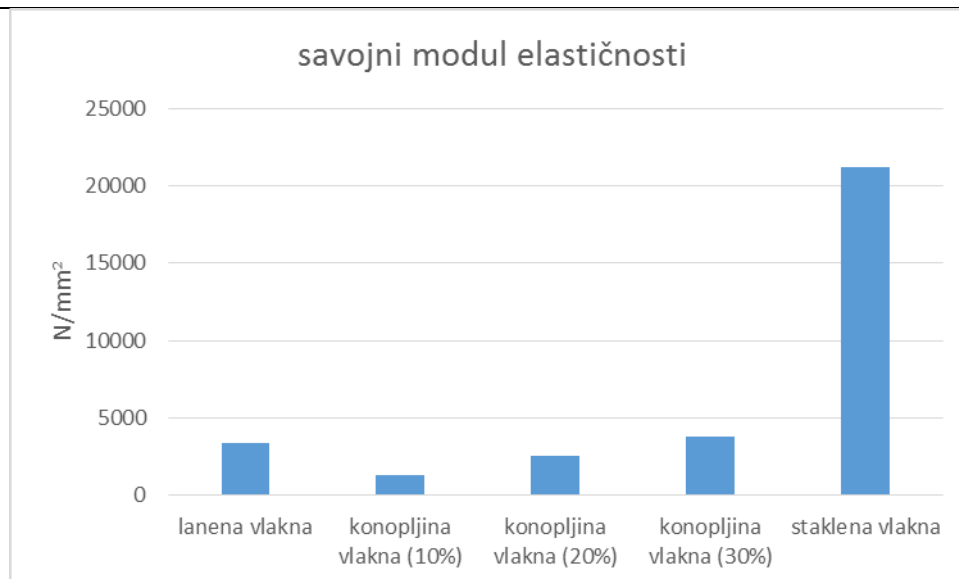
Iz prikazanih podatka vidi se kako je biokompozit na bazi epoksidne smole ojačan lanenim vlaknima, superiorniji u odnosu na biokompozit iste vrste matrice ojačan konopljinim vlaknima. Čak i kada sadrži manji udio vlakana u sastavu.

Kombinacija sintetskih i bioojačala daje iznimnu vrijednost savojne čvrstoće u odnosu na druge kompozite na bazi epoksidne smole. Dok je najveća prednost kompozita ojačanog staklenim vlaknima njegoa rastezna čvrstoća i savojni modul.

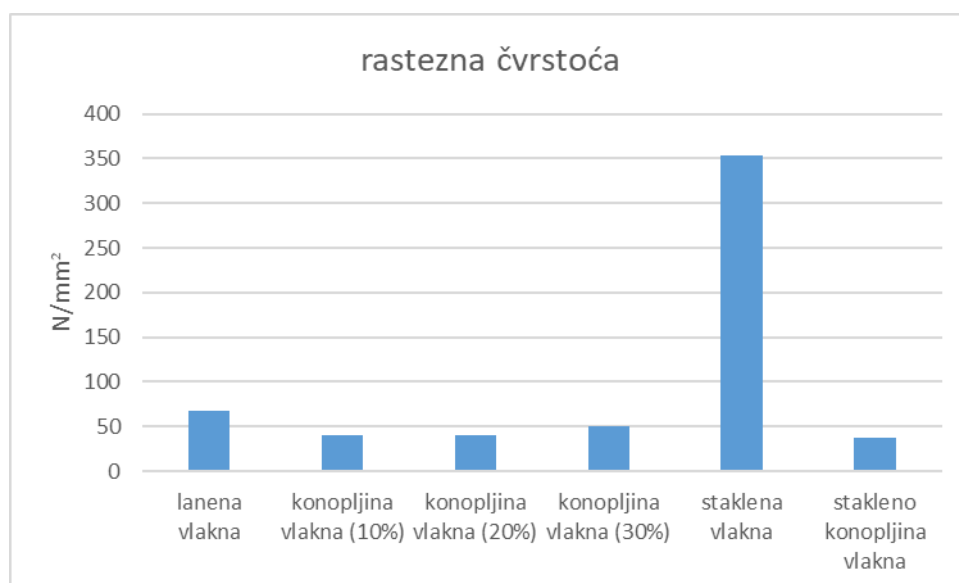
Na sljedećim slikama dan je grafički prikaz ovisnosti mehaničkih svojstva i vrsti ojačala kod kompozita na bazi epoksidne smole.



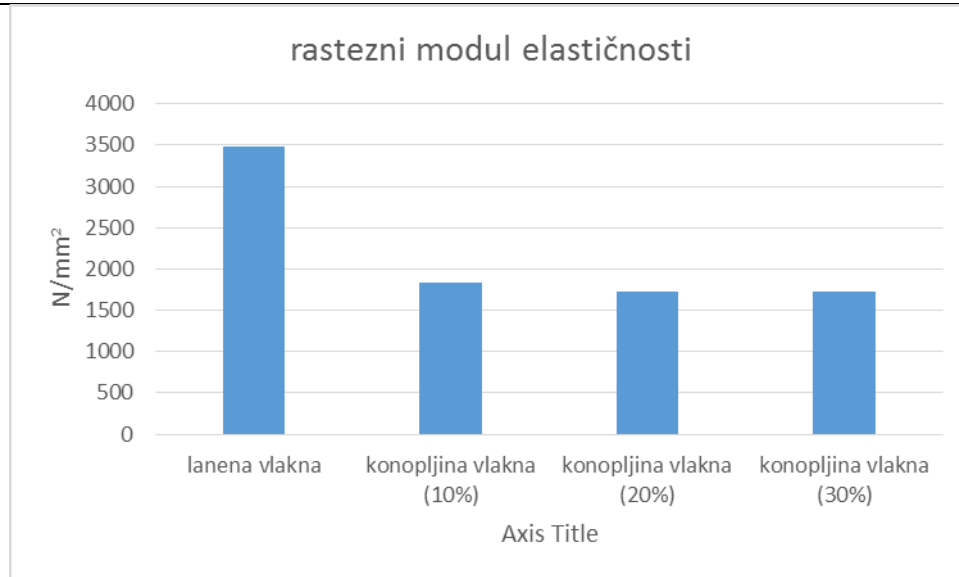
**Slika 43. Usporedba savojne čvrstoće ispitanog kompozita s literaturnim vrijednostima za srodne kompozite**



**Slika 44. Usporedba savojnog modula elastičnosti ispitanog kompozita s literaturnim vrijednostima za srodne kompozite**



**Slika 45. Usporedba rastezne čvrstoće ispitanog kompozita s literaturnim vrijednostima za srodne kompozite**



**Slika 46. Usporedba rasteznog modula elastičnosti ispitanog kompozita s literaturnim vrijednostima za srodne kompozite**

## 5. ZAKLJUČAK

U radu su izrađene ploče kompozita od lanenih vlakana i epoksidne smole tehnikom ručnog polaganja u kalup, ta tehnika se pokazala vrlo brzom i jednostavnom za izradu. Epoksidna smola je očvrtnula bez potrebe za naknadnim očvršćivanjem pri povišenoj temperaturi. Savojni modul iznosi  $4503 \text{ N/mm}^2$ , savojna čvrstoća  $106 \text{ N/mm}^2$ , rastezni modul  $6683 \text{ N/mm}^2$ , rastezna čvrstoća  $67,5 \text{ N/mm}^2$ , te prividna međuslojna smična čvrstoća  $13,6 \text{ N/mm}^2$ . Ispitivanje materijala napravljeno je u sklopu pripreme za projekt izrade katamarana. U Pravilima za klasifikaciju brodova, dio 24 iz 2009. izdan od Hrvatskog registra brodova propisana su svojstva za kompozite ojačane staklenim vlaknima. Pri tome su minimalne propisane vrijednosti: savojni modul:  $5500 \text{ N/mm}^2$ , savojna čvrstoća  $150 \text{ N/mm}^2$ , rastezni modul  $6500 \text{ N/mm}^2$ , rastezna čvrstoća  $85 \text{ N/mm}^2$ , te prividna smična međuslojna čvrstoća  $17 \text{ N/mm}^2$ . Materijal dobiven u okviru rada zadovoljava ove kriterije samo u rasteznom modulu, dok su druga svojstva preniska. Dozvoljeni maseni udio pletenih staklenih vlakana je 50%, dok su ploče izrađene u ovom radu imale maseni udio od približno 27%. Najčešće korištena E staklena vlakna imaju otprilike dvostruko veću gustoću od lanenih [7]. Iz tog razloga volumni udio vlakana je podjednak, te značajno povećanje udjela vlakana nema smisla zbog ograničenja u impregnaciji materijala. Kako bi se postigla svojstva koja bi zadovoljavala kriterije za izradu brodova, može se kombinirati prirodna vlakna s ugljičnim, ili se može pokušati tretirati prirodna vlakna lužinom, npr. s NaOH kako bi se povećala hrapavost vlakna i udio celuloznih vlakana u lanu.



---

**LITERATURA**

- [1] S. Castegno, M. Quaresimin, C. Gomiero, A. Lazzaretto: *A bio-composite racing sailboat: Materials selection, design, manufacturing and sailing*, article in *Ocean Engineering*, 2017.
- [2] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [3] K.K. Chawla: *Composite Materials: Science and Engineering*, 3<sup>rd</sup> edition, New York, 2012
- [4] I. Smojver: *Mehanika kompozitnih materijala*, FSB, Zagreb, 2007.
- [5] E. Garafulić, *Detekcija i procjena oštećenja kompozitnih struktura primjenom aktivne metode infracrvene termografije*, Doktorska disertacija, FESB, Split, 2013.
- [6] <http://www.akroterij.hr/PDF/CarbonIAR%20sistem.pdf> (pristupljeno 18.12.2020.)
- [7] Z. Schauerl: *Kompozitni materijali – bilješke s nastave*, FSB, Zagreb 2020.
- [8] D. Ćorić, T. Filetin: *Materijali u zrakoplovstvu – skripta*, FSB, Zagreb, 2010
- [9] T. Filetin, G. Marić: *Napredne tehnologije materijala*, FSB, Zagreb, 2013.
- [10] <https://tehnika.Izmk.hr/tehnickaenciklopedija/vlakna.pdf> (pristupljeno 19.12.2020.)
- [11] L. Yan, N. Chouw, K. Jayaraman: *Flax fibre and its composites – A review*, 2012.
- [12] <https://www.indiamart.com/proddetail/jute-fabric-20656751562.html> (pristupljeno 19.12.2020.)
- [13] <https://www.agroklub.com/sortna-lista/uljarice-predivo-bilje/industrijska-konoplja-80> (pristupljeno 19.12.2020.)
- [14] R. Bhoopathi *et al* 2018 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 402 012083
- [15] <https://www.udruzenjekonoplja.net/blog/vlakna-od-konoplje> (pristupljeno 19.12.2020.)
- [16] M. Dananić, *Analiza strukture i svojstva kompozita staklena vlakna – epoksidna smola*, završni rad, Zagreb, 2011.
- [17] A.C.C. Neves, L.A. Rohen, D.P. Mantovani..., *Comparative mechanical properties between bio-composites of epoxy and polyester matrices reinforced by hemp fiber*, 2019.

---

**PRILOZI**

I. CD-R disc