

Mehanička svojstva kompozita ojačanih različitim brojem slojeva lanenih vlakana i njihova primjena u brodogradnji

Pintur, Karla

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:801235>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-29**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Karla Pintur

Zagreb, 2022. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Karla Pintur

Zagreb, 2022. godina.

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

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Tatjani Haramini na mentorstvu, pomoći i savjetima prilikom pisanja ovog rada. Zahvaljujem se asistentu dr. sc. Danielu Pugaru na korisnim savjetima, te tehničkom suradniku Božidaru Bušetinčanu koji je pomogao kod eksperimentalnog dijela ovog rada. Također, želim zahvaliti svojoj obitelji koja mi je bila velika podrška tijekom studiranja.

Karla Pintur



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Karla Pintur** JMBAG: **0035216353**
Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mehanička svojstva kompozita ojačanih različitim brojem slojeva lanenih vlakana i njihova primjena u brodogradnji**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Mechanical properties of polymer composites reinforced with different number of layers of flax fibers and their application in shipbuilding**

Opis zadatka:

Kompoziti ojačani vlaknima iz obnovljivih izvora poželjna su alternativa uobičajenim kompozitima ojačanim staklenim vlaknima koji se primjenjuju u brodogradnji. Međutim, pravilnik Hrvatskog registra brodova nema regulirane zahtjeve za njih vezane uz mehanička svojstva.

Vakuumskom infuzijom izrađeni su kompoziti od epoksidne smole ojačane s 4 do 10 slojeva lanenih vlakana. Proučiti i analizirati normu za ispitivanje rasteznih svojstava kompozita. Ispitati utjecaj debljine kompozita, odnosno broja slojeva vlakana, na rezultate ispitivanja kompozita pri rasteznom opterećenju. Prikupiti podatke za savojna svojstva i prividnu smičnu međuslojnu čvrstoću za iste kompozite, te usporediti sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova. Komentirati primjenjivost ovih materijala kao alternative kompozitima ojačanim staklenim vlaknima.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Tatjana Haramina

Datum predaje rada:

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

Predviđeni datumi obrane:

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

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITI	2
2.1. Kompoziti i njihova opća podjela [3], [4].....	2
2.2. Podjela prema vrsti matrice.....	3
2.2.1. Kompoziti s polimernom matricom	3
2.2.1.1. Polimerni kompoziti s duromernom matricom	6
2.3. Podjela prema vrsti ojačala	8
2.3.1. Kompoziti ojačani vlaknima [4], [6], [13]	8
2.3.1.1. Vrste vlakana	11
2.3.1.2. Karakteristike kompozita ojačanih vlaknima [6].....	15
2.4. Mehanička svojstva kompozita.....	16
2.4.1. Savojna svojstva.....	16
2.4.2. Prividna međuslojna smična čvrstoća	16
3. EKSPERIMENTALNI DIO	17
3.1. Materijali i maseni udio vlakana	17
3.2. Ispitivanje rastezne čvrstoće i rasteznog modula elastičnosti	18
4. REZULTATI ISPITIVANJA I USPOREDBA	23
4.1. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće i rasteznog modula elastičnosti.....	23
4.1.1. Usporedba svojstava lanenih vlakana s drugim vrstama vlakana	36
4.2. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti	37
4.3. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće	38
4.4. Usporedba rezultata ispitivanja sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova	39
5. ZAKLJUČAK.....	41
LITERATURA.....	42
PRILOZI.....	44

POPIS SLIKA

Slika 1.	Neke vrste kompozita: a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) strukturni kompoziti [3].....	2
Slika 2.	Svojstva polimernog kompozita [6]	4
Slika 3.	Različiti načini usmjerenosti vlakana ojačala: a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna [4].....	9
Slika 4.	Najčešći načini tkanja: a) platneno tkanje (obično), b) atlas, c) keper, d) tkanje košarice, e) leno, f) inačica običnog tkanja [13]	9
Slika 5.	Tkanje pod kutom od 45° [13]	10
Slika 6.	Dijagram naprezanje-deformacija kompozita izrađenog od epoksidne smole ojačane staklenim vlaknima u uvjetima savojnog opterećenja tijekom različitih razdoblja izlaganja morskoj vodi [16].....	12
Slika 7.	Dijagram naprezanje-istezanje kompozita izrađenog od epoksidne smole ojačane staklenim vlaknima u uvjetima rasteznog opterećenja tijekom različitih razdoblja izlaganja morskoj vodi [16].....	12
Slika 8.	Različiti oblici staklenih vlakana: a) stakleni mat, b) kontinuirana pređa, c) roving niti, d) staklena tkanina [15].....	13
Slika 9.	Termogravimetrijske krivulje lanenih vlakana u atmosferi helija pri različitim brzinama zagrijavanja (4 K/min – 15 K/min) [14].....	14
Slika 10.	Svojstva vlakana: a) krivulja "naprezanje–istezanje" b) usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće metala i nekih vlakana [6].....	15
Slika 11.	Kidalice Shimadzu AGS-X	18
Slika 12.	Računalni program Trapezium X.....	19
Slika 13.	Odabir metode ispitivanja	19
Slika 14.	Odabir podataka koji se ispituju	20
Slika 15.	Unos dimenzija i materijala ispitnih tijela.....	20
Slika 16.	Uzorci nakon provedenog rasteznog ispitivanja	21
Slika 17.	Dijagram naprezanje-istezanje pri rasteznom opterećenju za kompozit s 4 sloja vlakana.....	26
Slika 18.	Dijagram naprezanje-istezanje pri rasteznom opterećenju za kompozit s 5 slojeva vlakana.....	27
Slika 19.	Dijagram naprezanje-istezanje pri rasteznom opterećenju za kompozit sa 6 slojeva vlakana.....	28
Slika 20.	Dijagram naprezanje-istezanje pri rasteznom opterećenju za kompozit sa 7 slojeva vlakana.....	29
Slika 21.	Dijagram naprezanje-istezanje pri rasteznom opterećenju za kompozit s 8 slojeva vlakana.....	30
Slika 22.	Dijagram naprezanje-istezanje pri rasteznom opterećenju za kompozit s 9 slojeva vlakana.....	31
Slika 23.	Dijagram naprezanje-istezanje pri rasteznom opterećenju za kompozit s 10 slojeva vlakana.....	32
Slika 24.	Grafički prikaz promjene maksimalne sile u ovisnosti o broju slojeva vlakana u kompozitu kod rasteznog ispitivanja	34
Slika 25.	Grafički prikaz promjene maksimalnog istežanja u ovisnosti o broju slojeva vlakana u kompozitu kod rasteznog ispitivanja	34
Slika 26.	Grafički prikaz promjene rastezne čvrstoće u ovisnosti o broju slojeva vlakana u kompozitu te njena minimalna propisana granica	35

Slika 27.	Grafički prikaz promjene rasteznog modula elastičnosti u ovisnosti o broju slojeva vlakana u kompozitu te njegova minimalna propisana granica	35
Slika 28.	Grafički prikaz svojstava različitih vrsta vlakana [13].....	36

POPIS TABLICA

Tablica 1. Maseni udio vlakana u kompozitu.....	18
Tablica 2. Dimenzije uzorka s 4 sloja vlakana za rastezno ispitivanje	23
Tablica 3. Dimenzije uzorka s 5 slojeva vlakana za rastezno ispitivanje.....	23
Tablica 4. Dimenzije uzorka s 6 slojeva vlakana za rastezno ispitivanje.....	24
Tablica 5. Dimenzije uzorka s 7 slojeva vlakana za rastezno ispitivanje.....	24
Tablica 6. Dimenzije uzorka s 8 slojeva vlakana za rastezno ispitivanje.....	24
Tablica 7. Dimenzije uzorka s 9 slojeva vlakana za rastezno ispitivanje.....	24
Tablica 8. Dimenzije uzorka s 10 slojeva vlakana za rastezno ispitivanje.....	25
Tablica 9. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka s 4 sloja vlakana	26
Tablica 10. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka s 5 slojeva vlakana	27
Tablica 11. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka sa 6 slojeva vlakana	28
Tablica 12. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka sa 7 slojeva vlakana	29
Tablica 13. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka s 8 slojeva vlakana	30
Tablica 14. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka s 9 slojeva vlakana	31
Tablica 15. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka s 10 slojeva vlakana	31
Tablica 16. Rastezna čvrstoća i rastezni modul elastičnosti za kompozite s različitim brojem slojeva vlakana	32
Tablica 17. Prikaz rezultata nakon provedenog savojnog ispitivanja: rezultati su dobiveni ispitivanjem 6 do 10 ispitnih tijela, a izražene su srednje vrijednosti.....	37
Tablica 18. Prikaz rezultata nakon provedenog ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće: rezultati su dobiveni ispitivanjem 6 do 10 ispitnih tijela, a izražene su srednje vrijednosti	38
Tablica 19. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava kompozita uspoređeni sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova [20].....	39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_0	mm^2	površina poprečnog presjeka ispitnog tijela
b	mm	širina ispitnog tijela
d	mm	promjer vlakana
E	N/mm^2	modul elastičnosti
E_R	N/mm^2	rastezni modul
E_S	N/mm^2	savojni modul
F	N	sila opterećivanja
F_{\max}	N	maksimalna sila
h	mm	debljina ispitnog tijela
l_0	mm	početna duljina ispitnog tijela
l	mm	konačna duljina ispitnog tijela
Δl	mm	promjena duljine ispitnog tijela
τ	N/mm^2	prividna smična međuslojna čvrstoća
L_C	mm	minimalna kritična duljina vlakana
m_{vl}	g	masa lanenih vlakana
m_p	g	masa cijele ploče
σ_m	N/mm^2	rastezna čvrstoća
σ_{fM}	N/mm^2	savojna čvrstoća
s	-	standardna devijacija
ε	mm/mm, %	istezanje
ρ	kg/m^3	gustoća
σ	N/mm^2	naprezanje

SAŽETAK

Male brodice uobičajeno se izrađuju od polimernih kompozita ojačanih nerazgrađivim staklenim vlaknima. Lanena vlakna usporedivih su mehaničkih svojstava, a uz biorazgrađivost njihova je prednost i što se dobivaju iz obnovljivih izvora.

U ovom radu izrađeni su kompoziti na bazi epoksidne smole ojačane različitim brojem slojeva biaksijalno orijentiranih lanenih vlakana i istražen je utjecaj broja slojeva na rastezna svojstva kompozita. Analizirana su i savojna svojstva te međuslojna smična čvrstoća. Dobiveni podaci uspoređeni su sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova (HRB) za polimerne kompozite ojačane staklenim vlaknima.

Istraživanje je pokazalo kako rastezna svojstva i savojni modul neovisno o broju slojeva zadovoljavaju zahtjeve HRB-a. Savojna čvrstoća i prividna međuslojna smična čvrstoća su tek malo niže od propisanih. Kompoziti s više od sedam slojeva vlakana imaju viši maseni udio vlakana i višu istezljivost, a kritična svojstva pri savojnom opterećenju su im slabija nego kod tanjih. Povećanjem udjela smole postigla bi se bolja impregnacija vlakana i uravnoteženost svojstava koja bi zadovoljila zahtjeve HRB-a.

Ključne riječi: biokompozit, lanena vlakna, kompozit s polimernom matricom, epoksidna smola, rastezna svojstva, savojna svojstva, prividna smična međuslojna čvrstoća

SUMMARY

Small boats are usually made of polymer composites reinforced with non-degradable glass fibers. Flax fibers have comparable mechanical properties, and in addition to biodegradability, their advantage is that they are obtained from renewable sources.

In this paper, composites based on epoxy resin reinforced with different number of layers of biaxially oriented flax fibers were made and the influence of the number of layers on the tensile properties of composites was investigated. Bending properties and interlayer shear strength were also analyzed. The obtained data were compared with the requirements of the Croatian Register of Shipping (CRS) for glass fiber reinforced polymer composites.

The research showed that the tensile properties and the bending module, regardless of the number of layers, meet the requirements of CRS. Flexural strength and apparent interlayer shear strength are only slightly lower than prescribed. Composites with more than seven layers of fibers have a higher mass fraction of fibers and higher elongation, and their critical bending properties are weaker than those of thinner ones. Increasing the resin content would achieve better fiber impregnation and a balance of properties that would meet the requirements of CRS.

Key words: biocomposite, flax fiber, polymer matrix composite, epoxy resin, tensile properties, flexural properties, apparent shear interlayer strength

1. UVOD

Onečišćenje okoliša je globalni problem, a proizvodnja i odlaganje materijala ima značajan utjecaj. Iz tog razloga teži se pronalasku biorazgradivih materijala kako bi se doprinijelo brizi za okoliš. Povećanje korištenja obnovljivih izvora postalo je nužno kako bi se osigurala dostupnost resursa u budućnosti. Zbog toga primjena biokompozita ojačanih biološkim vlaknima iz obnovljivih izvora, kao alternativa općeprihvaćenim kompozitnim materijalima ojačanim sintetskim vlaknima (staklena, ugljikova ili aramidna vlakna), od velike je važnosti. Ti materijali još uvijek nisu dovoljno istraženi pa postoje istraživački programi čiji je glavni zadatak povećanje njihove kompetitivnosti. [1]

U maloj brodogradnji uobičajena je primjena kompozita od duromerne matrice ojačane staklenim vlaknima. Ovakvi kompoziti teško se recikliraju stoga je glavna prednost kompozita ojačanih biljnim vlaknima vezana uz održivi razvoj. Osim što su u pitanju ekološke prednosti to rezultira i ekonomskim prednostima kao što je niža cijena proizvodnje. Također, biljna vlakna su lakša, imaju nižu gustoću, čime se smanjuje potrošnja goriva. Njihova mehanička svojstva usporediva su sa svojstvima staklenih vlakana. Primjenom takvih kompozita smanjuje se gomilanje nerazgradivog kompozitnog otpada te se potiče razvoj poljoprivrede. Kao prirodna ojačala najčešće se koriste biljna vlakna lana, konoplje, jute, agave i slično. Nedostatak biljnih vlakana je što se ne povezuju dobro s polimernom matricom, zbog čega je reduciran prijenos opterećenja s matrice na ojačalo, što posebno dolazi do izražaja pri savojnom opterećenju. [2]

U ovom radu izrađene su ploče kompozita od epoksidne smole kao matrice ojačane lanenim vlaknima biaksijalne orijentacije. Izrađeni su kompoziti od istih materijala, s različitim brojem slojeva, čime se mijenjaju uvjeti očvršćivanja smole. Cilj je ispitati mehanička svojstva kompozita u ovisnosti o broju slojeva vlakana te napraviti usporedbu u odnosu na kompozite ojačane staklenim vlaknima i vidjeti jesu li ovi materijali dobra alternativa. Budući da je ovo istraživanje vezano uz izradu katamarana, provedena je usporedba dobivenih svojstava sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova za polimerne kompozite ojačane staklenim vlaknima. Trenutno ne postoje pravila za kompozite s biljnim vlaknima za primjenu u brodogradnji.

Ova zamjena bi značajno doprinijela brizi o okolišu jer su lanena vlakna biorazgradiva, lako dostupna i oporabljiva.

2. KOMPOZITI

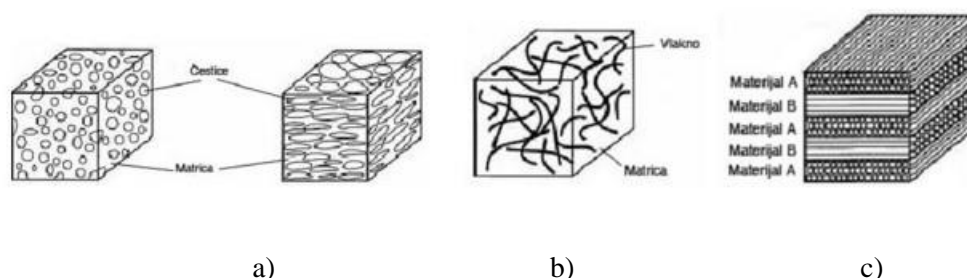
2.1. Kompoziti i njihova opća podjela [3], [4]

Kompozitni materijali ili kompoziti su heterogeni materijali koji se sastoje od dva ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Sastoje se od dva osnovna konstituenta – matrice i ojačala. U većini slučajeva jedna faza (matrica) je kontinuirana i okružuje ostale disperzirane faze.

Kompoziti su dobiveni umjetnim spajanjem materijala različitih svojstava s jasnom granicom između njih. Tako se mogu dizajnirati svojstva kao što su poboljšanje i promjena čvrstoće, krutosti, mase materijala, otpornosti na djelovanje viših temperatura, kemijske otpornosti i ostalih svojstava. Neke od glavnih prednosti kompozita prema konvencionalnim materijalima su manji troškovi naknadne obrade, bolja mehanička svojstva, mogućnost izrade vrlo složenih oblika, dimenzijska stabilnost u vrlo teškim radnim uvjetima, vodljivost te otpornost na koroziju. Također imaju specifičnu tvrdoću i specifičnu krutost.

S druge strane kompoziti imaju i nedostataka poput nelinearnog ponašanja materijala, interlaminarnih naprezanja, kompliciranijeg popravka kompozitnih proizvoda te nisu superiorniji metalima u svim svojstvima. Mogu se javiti i konstrukcijski problemi kao što je spajanje dijelova ili izrada provrta i slično.

Kompoziti se dijele prema materijalu matrice, obliku ojačala i strukturi. S obzirom na materijal matrice kompoziti mogu biti metalni, keramički i polimerni. Prema obliku ojačala mogu biti kompoziti ojačani česticama i kompoziti ojačani vlaknima. I posljednja podjela s obzirom na strukturu je na laminate i sendvič konstrukcije.



Slika 1. Neke vrste kompozita: a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) strukturni kompoziti [3]

2.2. Podjela prema vrsti matrice

Osnovne funkcije matrice su:

- prijenos opterećenja na vlakna
- međusobno odvajanje vlakana s ciljem sprečavanja širenja pukotine u materijalu
- daje vanjsku formu kompozitu
- zaštita kompozita od utjecaja okoline

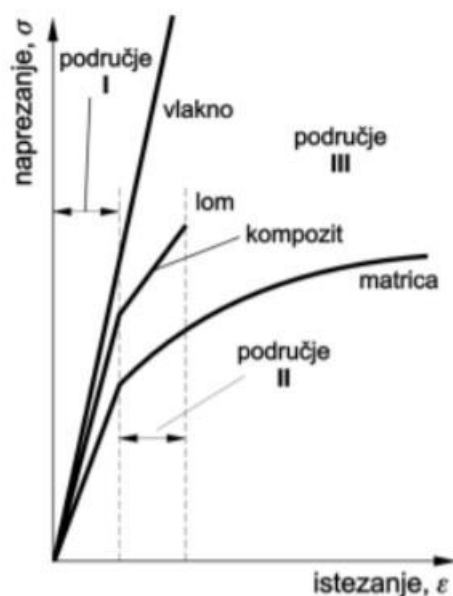
Svojstva matrice su iznimno važna jer određuju svojstva kompozita poput uzdužne tlačne čvrstoće, poprečne rastezne čvrstoće, kao i prividne međuslojne smične čvrstoće. Matrica mora imati i zadovoljavajuću čvrstoću, a talište značajno utječe na prikladnost matrice. Adhezijske sile između matrice i vlakna moraju biti dovoljne da spriječe izvlačenje vlakna, zato je važno pravilno odabrati kombinaciju "matrica–vlakno". Matrica se izrađuje od polimera, metala ili keramike. Polimeri se mogu primjenjivati do maksimalno 80 °C, s iznimkom visokotemperaturnih polimera koji izdržavaju temperature i do 300 °C. Metalne i keramičke matrice najčešće izdržavaju više temperature od polimernih. Tehnologija izrade kompozita je također bitna kako bi se osigurao minimalan udio šupljina ili pukotina. [5], [6]

Matrica također daje čvrstu vanjsku formu kompozitu što olakšava rukovanje i obično se zahtijeva u završnom dijelu proizvodnje. To je osobito važno kod kompozita ojačanih slučajno usmjerenim diskontinuiranim vlaknima jer vlakna nisu dovoljne duljine da bi osigurala stabilan oblik kojim se može rukovati. Također, matrica osigurava da su vlakna u pravom položaju te pravilno orijentirana tako da mogu izdržati predviđeno opterećenje te da se ono ravnomjerno raspoređi po vlaknima. [7]

2.2.1. Kompoziti s polimernom matricom

Zahvaljujući svojim povoljnim preradbenim i mehaničkim svojstvima, te pristupačnoj cijeni, polimeri se najčešće primjenjuju kao materijal matrice pri izradi kompozita. Primjenjuju se u automobilske industriji, vojnoj industriji, u brodogradnji, zrakoplovstvu i sličnim područjima te su vrlo dobra alternativa klasičnim konstrukcijskim materijalima. U pravilu se ojačavaju vlaknima, međutim na tržištu se javljaju i polimerni kompoziti ojačani česticama, kao i strukturni kompoziti. [8]

Ponašanje polimernih kompozita ovisi o svojstvima matrice i ojačala, obliku konstituenata, njihovoj veličini i rasporedu te o prirodi i jakosti veza među njima. Najčešće se primjenjuju duromerne smole poput poliester i vinil estera koji se najviše koriste za proizvodnju kompozita sa staklenim vlaknima. Epoksidne smole su znatno skuplje, a izrada kompozita je složenija, te se stoga rjeđe primjenjuju. Imaju bolja mehanička i adhezijska svojstva i najviše se koriste u zrakoplovstvu. Slika 2 prikazuje polimerni kompozit sa svojstvima kakva nema niti jedna komponentna zasebno. [6], [7]



Slika 2. Svojstva polimernog kompozita [6]

Kod polimernih kompozita materijal matrice može biti od plastomera, elastomera ili duromera. Najviše se koriste duromeri jer je duromerna smola pri sobnoj temperaturi kapljevinna, što omogućava izradu kompozita pri sobnoj temperaturi. Plastomeri se prilikom prerade zagrijavaju iznad tališta, a talina je viskozna te je otežana impregnacija vlakana, koja je nužna za prijenos opterećenja s matrice na vlakna. Kompoziti s elastomernom matricom se primjenjuju za uzak spektar proizvoda. [5]

Iako se kao materijal matrice najčešće koriste duromeri, sve više su u upotrebi i plastomerne matrice zbog svojih prednosti. Najčešće se ojačavaju staklenim vlaknima. Kombinacija jeftine proizvodnje i poboljšanih svojstava omogućila je da plastomeri ojačani vlaknima zamjene metale u mnogim primjenama kao npr. u automobilske industriji za izradu

brojnih dijelova. Također mogu se ponovno formirati, odnosno oblikovati nakon početne proizvodnje. To dovodi do rasta tržišta kompozita s plastomernom matricom, dok je tržište duromernih kompozita zasićeno. [9]

Uporaba neojačanih polimera kao strukturnih materijala karakterizirana je lošijim mehaničkim svojstvima, odnosno nižom čvrstoćom, modulom te slabom otpornošću na udarce. Zbog toga polimerni kompoziti obično se ojačavaju staklenim vlaknima, ugljičnim vlaknima, aramidnim vlaknima. U novije vrijeme sve se više primjenjuju biološka vlakna.

Takve polimerne kompozite ojačane vlaknima karakterizira:

- visoka specifična čvrstoća
- visoka specifična krutost
- visoka otpornost na lom
- dobra otpornost na trošenje
- dobra otpornost na koroziju
- dobra otpornost na udarce
- dobra otpornost na umor materijala
- niska cijena

Dok su glavni nedostaci:

- niska toplinska otpornost
- visok koeficijent toplinskog širenja [10]

2.2.1.1. Polimerni kompoziti s duromernom matricom

Duromeri nastaju umrežavanjem duromernih viskoznih smola. Umrežavanje se može pokrenuti zagrijavanjem ili zračenjem pri povišenom tlaku ili se može dodati katalizator. Pri tome se stvaraju ireverzibilne kemijske veze između molekula, te nastaje trodimenzionalna mreža makromolekula. Pri ponovnom zagrijavanju ostaju kruti, ne tale se, već se potpuno razgrađuju uslijed djelovanja visoke temperature. Ta činjenica ukazuje na veliki problem današnjice, a to je nemogućnost recikliranja. No s druge strane duromeri se najčešće koriste u proizvodnji zbog svojih prednosti. Izrađuju se iz dvokomponentnih ili višekomponentnih smjesa. Prednosti duromera su relativno niska cijena i jednostavnost izrade, niske proizvodne temperature, niska viskoznost pri proizvodnji i otpornost na puzanje. [5]

Proizvode se jednostavnim tehnikama kao što su ručno polaganje, oblikovanje naštrcavanjem, injekcijsko prešanje, izravno prešanje, pultrudiranje i sl. Tijekom proizvodnje ovih kompozita vlakna se koriste kao prostirke te se natapaju polimernom smolom, nakon čega slijedi očvršćivanje matrice. [11]

Duromeri koji se koriste kao materijal matrice:

- Poliesterske smole
- Vinilesterske smole
- Fenolne smole
- Epoksidne smole [5]

2.2.1.1.1. Poliesterske smole [5]

Poliesterske smole se najčešće koriste i najvažniji su materijal u proizvodnji kompozita. Proizvode se egzotermnim kemijskim reakcijama tijekom kojih se nezasićeni poliesteri miješaju s relativno malom količinom katalizatora. Glavne prednosti su znatno niža cijena u odnosu na epoksidnu smolu, jednostavna proizvodnja, dobra električna i dielektrična svojstva, mogućnost bojanja organskim i anorganskim bojama te dobra otpornost okolnim utjecajima. Odlikuje ih izvrsna kemijska postojanost pa se koriste i kao zaštita od korozije. No zbog vrlo egzotermne polimerizacije tijekom proizvodnje unose se značajna zaostala naprezanja i krhkost. Nedostatak je i niža čvrstoća u odnosu na epoksidnu smolu.

2.2.1.1.2. Vinil esteri [5], [12]

Vinil esteri se po svojstvima nalaze između poliestera i epoksida. Polimerizacija se odvija pri relativno niskim temperaturama. Konačna svojstva su dobra kemijska otpornost uz jednostavniju proizvodnju nego kod epoksida, dok u odnosu na poliestere imaju bolju adheziju između vlakna i matrice te bolja mehanička svojstva. Vinil esterske smole često se koriste kao završni premaz jer osiguravaju visoku toplinsku postojanost. Troškovi proizvodnje su ipak veći nego kod poliestera.

2.2.1.1.3. Fenolne smole [5]

Fenolne smole se proizvode polimerizacijom fenola te im je glavna prednost postojanost pri visokim temperaturama i otpornost gorenju. Također, postoje su na kiseline i organska otapala. Nedostatak je visoki tlak potreban pri proizvodnji za polimerizaciju i veliki postotak šupljina.

2.2.1.1.4. Epoksidne smole [5], [7], [12]

Epoksidne smole danas se sve više koriste kao materijal matrice za proizvodnju kompozitnih materijala, a posebice za zrakoplovne primjene. Epoksidi koji polimeriziraju pri sobnoj temperaturi su pogodni za korištenje pri temperaturama do 50 °C dok ostale vrste epoksida zahtjevaju naknadno očvršćivanje pri temperaturama u blizini staklišta. Prednost epoksidnih smola pred poliesterskim je što se prilikom očvršćivanja značajno manje skupljaju uslijed egzotermne reakcije. Posebna pažnja mora se posvetiti izradi kalupa i pravilnom udjelu katalizatora jer se upravo zbog egzotermne reakcije tijekom polimerizacije može razviti previsoka temperatura te može doći do toplinske degradacije matrice.

Epoksidima se mogu dodavati različite tvari s ciljem kreiranja svojstava odnosno s ciljem promjene gustoće, poboljšanja otpornosti širenju pukotina ili sličnih zahtjeva. Glavna prednost epoksida je upravo takvo modificiranje svojstava te dobra mehanička i adhezijska svojstva. Karakterizira ih dobra postojanost na vanjske utjecaje, mogućnost kontrole žilavosti, dimenzijska i toplinska postojanost te laka proizvodljivost.

Najveći nedostatak epoksida je njegova visoka cijena proizvodnje u usporedbi s ostalim polimernim smolama. Zbog toga se koriste u zrakoplovnoj industriji ili za izradu zahtjevnijih komponenti u brodogradnji na koje djeluje veće opterećenje, poput jarbola.

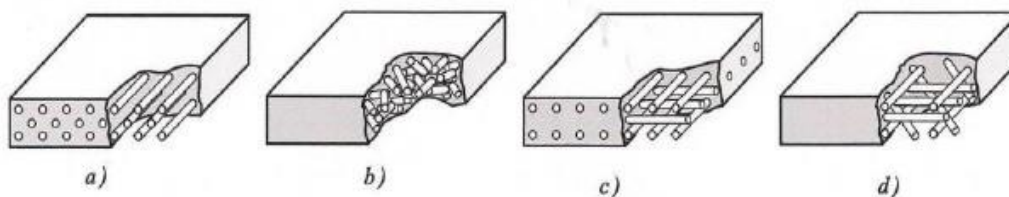
Kod kompozita s biljnim vlaknima postoji problem ostvarivanja dobre adhezije između vlakana koja su hidrofilne prirode i matrice koja je hidrofobna. U usporedbi s ostalim duromerima, epoksidne smole imaju bolja adhezijska svojstva. Epoksidi su superiorni svim ostalim vrstama smola u otpornosti na vlagu, agresivne medije i ostale utjecaje iz okoline te imaju bolja mehanička svojstva. Upravo ta kombinacija otpornosti na vlagu i odličnih adhezijskih svojstva čini ih najboljim izborom za primjenu u brodogradnji. Često se koriste i kao zaštita trupa brodova. Zbog toga i ovdje u eksperimentalnom dijelu ovog rada izrađen je kompozit od epoksidne smole kao matrice te se istražuje njegova prikladnost za ojačavanje lanenim vlaknima za izgradnju putničkog eko-katamarana.

2.3. Podjela prema vrsti ojačala

Uloga ojačala u kompozitnom materijalu u osnovi je poboljšanje mehaničkih svojstava kompozita. Kompoziti se dijele na kompozite ojačane vlaknima i kompozite ojačane česticama, a glavna razlika proizlazi iz njihove građe. Kompoziti ojačani česticama su izotropni, dok su oni ojačani vlaknima najčešće anizotropni. [6]

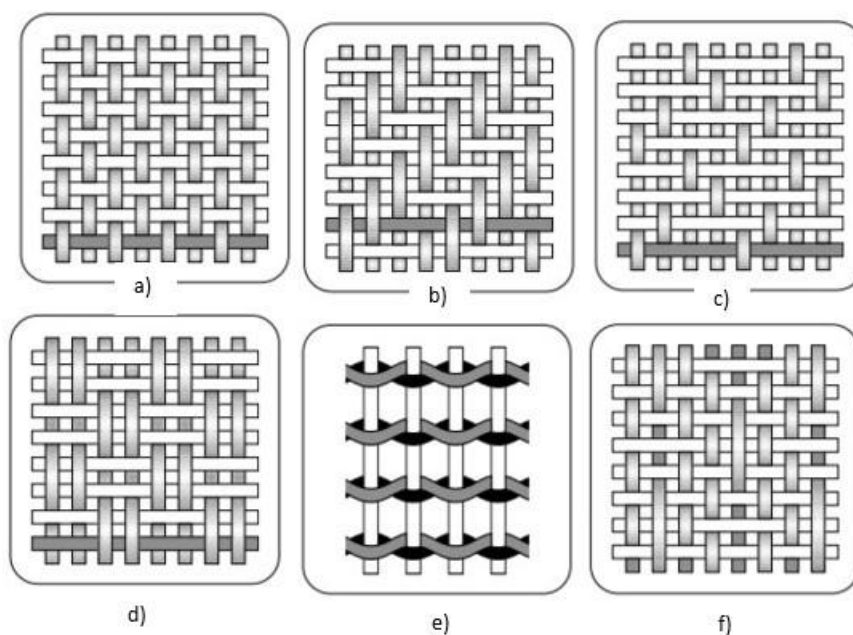
2.3.1. Kompoziti ojačani vlaknima [4], [6], [13]

Vlakna su ojačala kojima je jedna dimenzija znatno veća od drugih. Kod ove vrste kompozita materijal matrice prenosi opterećenje na vlakna te osigurava duktilnost i žilavost. Raspored vlakana značajno utječe na svojstva ove vrste kompozita. Kompoziti ojačani kontinuiranim usmjerenim vlaknima imaju vrlo anizotropna mehanička svojstva što znači da je čvrstoća maksimalna u smjeru vlakana, a u okomitom na njih je minimalna. S druge strane, kompoziti ojačani slučajno usmjerenim kratkim vlaknima mogu biti izotropni tj. ukoliko nisu raspoređena u ravninama, već u svim smjerovima, svojstva im mogu biti identična u svim smjerovima.



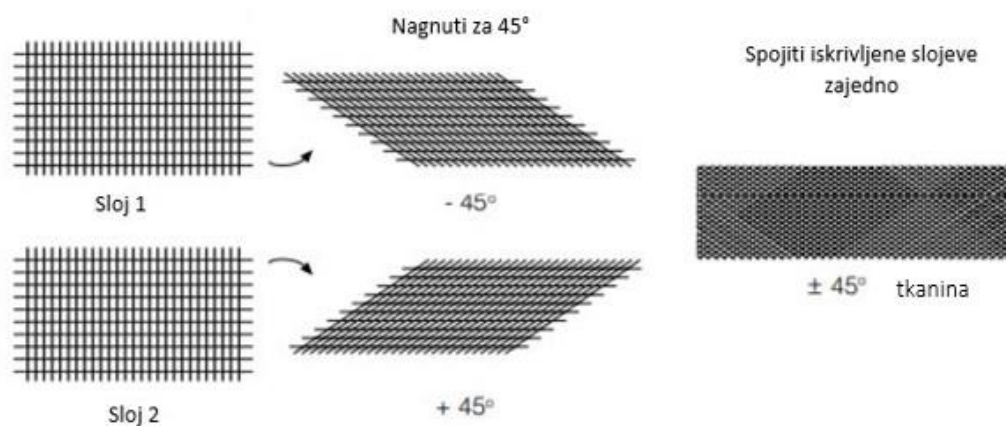
Slika 3. Različiti načini usmjerenosti vlakana ojačala: a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna [4]

Pojedinačna vlakna ili snopovi vlakna mogu se koristiti samostalno u samo nekoliko procesa kao što je namotavanje niti. Za većinu drugih upotreba vlakna se moraju rasporediti u neki oblik, odnosno tkaninu, da bi rukovanje bilo moguće. Različiti načini polaganja niti te raznovrsnost moguće orijentacije vlakana dovode do toga da postoji mnogo različitih vrsta tkanina sa različitim svojstvima. Tkanine se proizvode preplitanjem vlakana pod kutom od 90° . Na slici 4 su prikazani neki od najčešćih načina tkanja.



Slika 4. Najčešći načini tkanja: a) platneno tkanje (obično), b) atlas, c) keper, d) tkanje košarice, e) leno, f) inačica običnog tkanja [13]

Također moguće je i tkanje pod kutom od 45° na posebnom stroju (slika 5).



Slika 5. Tkanje pod kutom od 45° [13]

Vlakna se mogu podijeliti prema vrsti, duljini, promjeru i orijentaciji. Prema promjeru dijele se na viskere, vlakna i žice. Viskeri su vrlo tanke niti keramičkih monokristala pravilne građe s ekstremno velikim omjerom "duljina/promjer". Nedostatak im je visoka cijena i teška ugradnja u matricu.

S obzirom na omjer "duljina/promjer" vlakna se dijele na kontinuirana ($L > 15 L_C$) i diskontinuirana ($L < 15 L_C$) pri čemu L_C predstavlja minimalnu kritičnu duljinu koja omogućava kvalitetan prijenos opterećenja na vlakno.

Formula za određivanje minimalne kritične duljine glasi:

$$L_C = \frac{\sigma_t d}{2\tau_c} \quad (2.1)$$

Gdje je:

L_C [mm] – minimalna kritična duljina koja omogućava kvalitetan prijenos opterećenja

σ_t [N/mm²] – čvrstoća vlakana

d [mm] – promjer vlakna

τ_c [N/mm²] – smična čvrstoća komponente

2.3.1.1. Vrste vlakana

Vlakna mogu biti izrađena od različitih materijala, ali bitno je naglasiti da materijal mora biti kemijski kompatibilan matrici. Sintetska vlakna poput staklenih, aramidnih i ugljičnih su uobičajena za ojačavanje polimera. Međutim, sva vlakna biljnog podrijetla (poput pamuka, lana, jute, konoplje..) sve su više u primjeni.

Biljna vlakna mogu biti odlična alternativa staklenim vlaknima, a velika prednost im je ekološka prihvatljivost. Također, jeftinija su, imaju manju masu i lakše ih je operabiti nakon upotrebe. Zbog niske gustoće prirodna vlakna se sve više koriste u automobilskoj industriji čime se smanjuje masa komponenata što u konačnici rezultira manjim troškom goriva. Najveći nedostatak biljnih vlakana je velika oscilacija u kvaliteti i to što su hidrofilna pa upijaju vlagu. Upotreba je dodatno ograničena i zbog niže temperature prerade u usporedbi sa staklenim vlaknima te manje prekidne čvrstoće. [14]

U nastavku su opisana najpoznatija i najraširenija sintetska vlakna (staklena), te često korištena prirodna vlakna (lanena), koja su korištena za izradu kompozita u ovom radu.

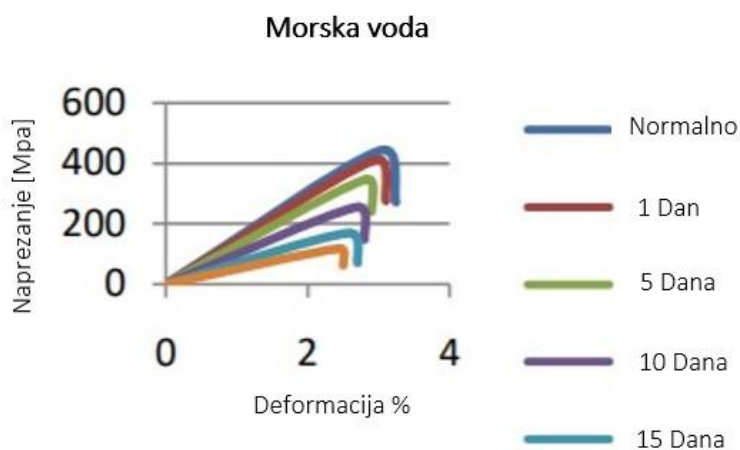
2.3.1.1.1. Staklena vlakna

Polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima građeni su od polimerne matrice i staklenih vlakana kao ojačala. Najčešće se koriste, a jedan od razloga je niska cijena staklenih vlakana, dostupnost na tržištu, a ujedno i relativno dobra specifična čvrstoća te kemijska postojanost.

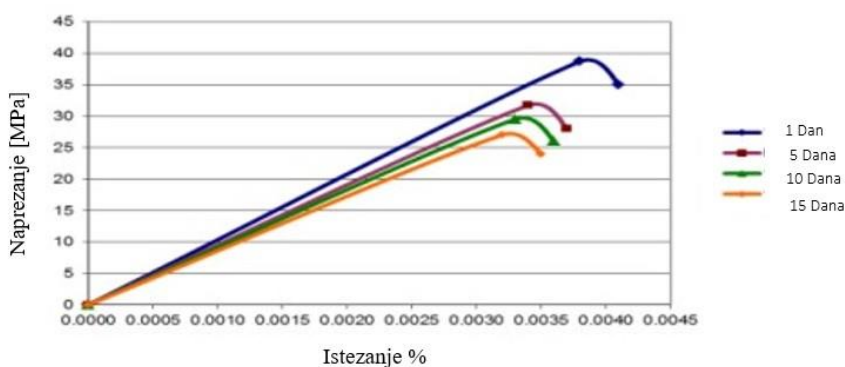
Polimeri ojačani staklenim vlaknima široko se primjenjuju u građevinskoj industriji. Koriste se u obliku obloga za druge konstrukcijske materijale ili kao sastavni dio nenosivih zidnih ploča, uobičajeni primjeri su prozorski okviri, rezervoari, cijevi i kanali. Od sredine 1960-ih trupovi čamaca se izgrađuju prvenstveno upotrebom staklenih vlakana. Također, važnu ulogu imaju i u željezničkoj, cestovnoj i zrakoplovnoj industriji. [6], [15]

Nedostatak staklenih vlakana je utjecaj vlage na smanjenje njihove čvrstoće. Osjetljiva su i na statički umor, tj. u uvjetima konstantnog opterećenja tijekom dužeg vremenskog razdoblja mogu doživjeti subkritični rast pukotina. Morska voda također djeluje na staklena vlakna.

Istraživanja pokazuju da uzorci kompozita uronjeni u morsku vodu nakon 15 dana pokazuju smanjenje rastezne čvrstoće za 46 %, savojne čvrstoće za 73 %, savojnog modula elastičnosti za 55 % i rasteznog modula elastičnosti za 17,08 % u askijalnom i 29,23 % u poprečnom smjeru (slika 6 i 7). [16]



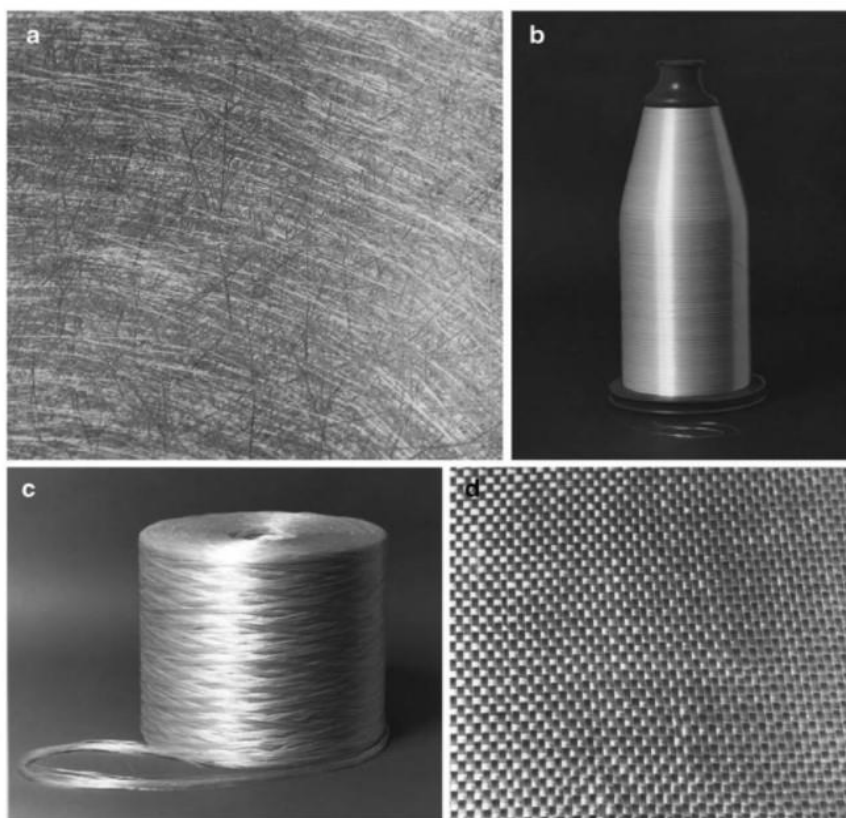
Slika 6. Dijagram naprezanje-deformacija kompozita izrađenog od epoksidne smole ojačane staklenim vlaknima u uvjetima savojnog opterećenja tijekom različitih razdoblja izlaganja morskoj vodi [16]



Slika 7. Dijagram naprezanje-istezanje kompozita izrađenog od epoksidne smole ojačane staklenim vlaknima u uvjetima rasteznog opterećenja tijekom različitih razdoblja izlaganja morskoj vodi [16]

Staklena vlakna se izrađuju od određenog tipa stakla prema kojima se razlikuju i svojstva:

- A-staklo – alkalijsko staklo, dobra kemijska otpornost, slaba električna svojstva
- C-staklo – specijalan sastav za izuzetno agresivne kemikalije
- E-staklo – čini više od 50 % svih staklenih ojačala, dobra čvrstoća, otpornost na utjecaj morske vode (brodogradnja)
- S-staklo – čvrstoća 30 % veća od E-stakla, bolja dinamička izdržljivost, skuplje
- D-staklo – loša mehanička svojstva, mala dielektrična konstanta
- T-staklo – viša vlačna čvrstoća i modul elastičnosti, primjena do 1050 °C [4]



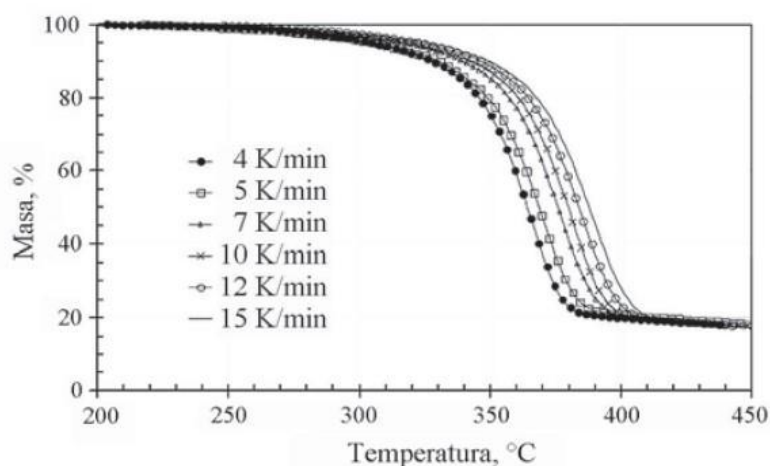
Slika 8. Različiti oblici staklenih vlakana: a) stakleni mat, b) kontinuirana pređa, c) roving niti, d) staklena tkanina [15]

2.3.1.1.2. Lanena vlakna

Lanena vlakna spadaju među najbolja prirodna vlakna dobivena od biljaka. Dobivaju se od biljke lana, a za izradu je pogodan samo središnji dio stabljike. Iako imaju dugu povijest njihova primjena u izradi kompozita počela je tek odnedavno.

Karakteristike ovih vlakana su čvrstoća i fleksibilnost te slabo istezanje prilikom naprežanja. Također su i elastična, ali samo za mala istezanja. Prednost im je postojanost u lužnatim otopinama i slabim razrijeđenim kiselinama. Ne podnose hladne koncentrirane kiseline, vruće razrijeđene kiseline, a tijekom izloženosti suncu potpuno gube čvrstoću. Postojana su do temperatura od približno 200°C što je vidljivo iz slike 9 u nastavku.

Stanična stijenka građena je od celuloze (70 – 75 %), hemiceluloze (15 %), pektinske tvari (10 – 15 %), lignina (2 %) i voska (2 %). Lanena vlakna pokazuju oscilaciju u kvaliteti zbog mnogo koraka u proizvodnji koji zahtijevaju ljudski rad te je zbog toga i viša cijena. Koriste se za izradu kompozitnih proizvoda koji moraju podnijeti malo do srednje opterećenje. Njihova primjena je sve veća i u automobilskoj industriji gdje se koriste za izradu unutrašnjosti automobila (nasloni sjedala, paneli vrata, pregradne police, unutrašnje presvlake..). [14]



Slika 9. Termogravimetrijske krivulje lanenih vlakana u atmosferi helija pri različitim brzinama zagrijavanja (4 K/min – 15 K/min) [14]

2.3.1.2. Karakteristike kompozita ojačanih vlaknima [6]

Brojni faktori utječu na karakteristike kompozita ojačanih vlaknima. Najbolja svojstva ima kompozit ojačan kontinuiranim vlaknima, ali se ona teško proizvode i teško ugrađuju u matricu. Diskontinuirana vlakna se u pravilu lakše ugrađuju u matricu te daju materijal visoke čvrstoće i krutosti.

Vlakna moraju biti čvrsta, lagana i kruta te imati visoko talište. Specifična čvrstoća i specifični modul elastičnosti opisani su izrazima:

$$\text{Specifična čvrstoća} = \sigma_m / \rho \quad (2.2)$$

$$\text{Specifični modul elastičnosti} = E / \rho \quad (2.3)$$

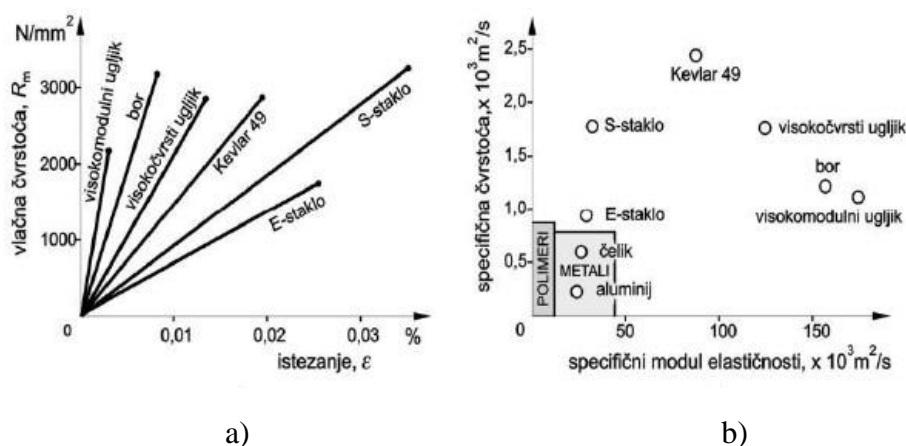
gdje je:

E [N/mm²] – modul elastičnosti

σ_m [N/mm²] – rastezna čvrstoća

ρ [kg/m³] – gustoća

Za izradu vlakna koriste se materijali visoke specifične čvrstoće ili visokog specifičnog modula elastičnosti. Neka svojstva vlakana prikazana su na slici 10.



Slika 10. Svojsva vlakana: a) krivulja "naprezanje-istezanje" b) usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće metala i nekih vlakana [6]

Bitan faktor je i volumni udio vlakna koji povećava čvrstoću i krutost. Gornja granica (oko 40 %) definirana je mogućnošću da se vlakna okruže materijalom matrice.

2.4. Mehanička svojstva kompozita

Materijali se razlikuju prema raznim fizikalno-kemijskim svojstvima, a sukladno tome imaju i različita tehnološka svojstva. Tehnološka svojstva ukazuju na ponašanje materijala pri različitim postupcima obrade i spajanja. Upravo mehanička svojstva materijala su ta koja definiraju mehaničko ponašanje materijala, a samim time i njegova tehnološka svojstva. Na materijal se postavljaju raznovrsne skupine zahtjeva, a najvažnije su otpornost materijala, funkcionalnost i pouzdanost. [17]

U mehanička svojstva ubrajaju se rastezna svojstva kompozita (detaljnije u poglavlju 3.2.), savojna svojstva te prividna međuslojna smična čvrstoća.

2.4.1. Savojna svojstva

Savojna čvrstoća je sposobnost materijala da izdrži sile savijanja koje se primjenjuju okomito na njegovu uzdužnu os. Kada je uzorak savijen javljaju se različita naprezanja po njegovoj dubini. Prilikom savijanja na unutarnjoj strani naprezanje će biti maksimalno tlačno, dok će na suprotnoj strani doseći maksimalnu vrijednost rasteznog naprezanja. Stoga se najveća vrijednost rasteznog naprezanja pri savijanju prije nego uzorak pukne smatra njegovom savojnom čvrstoćom. Ispitivanje se provodi savijanjem u tri točke gdje se opterećenje na uzorak postavlja u središte između dva nosača. [18]

2.4.2. Prividna međuslojna smična čvrstoća

Smično opterećenje nastoji izazvat klizanje susjednih slojeva vlakana jedan preko drugog. Kod ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće matrica ima glavnu ulogu jer prenosi opterećenje preko cijelog kompozita. Zbog toga mora imati dobra mehanička svojstva te mora biti postignuta dobra adhezija između vlakana i matrice duž cijele granične površine kako bi se što veće opterećenje moglo prenositi. Ispitivanje se također provodi savijanjem u tri točke samo razmak između oslonaca mora biti manji kako bi došlo do smičnog naprezanja među slojevima. [13], [19]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimentalnog dijela ovog rada je odrediti mehanička svojstva polimernog kompozita koji se sastoji od epoksidne smole kao matrice i lanenih vlakana kao ojačala te utvrditi može li takav kompozit biti alternativa uobičajenim kompozitima ojačanim staklenim vlaknima koji se koriste u brodogradnji. Također, cilj je i istražiti utjecaj debljine kompozita, odnosno broja slojeva vlakana, na rezultate ispitivanja kompozita pri rasteznom opterećenju. S tom namjerom izrađeni su kompoziti s različitim brojem slojeva lanenih vlakana kao ojačala (od 4 do 10 slojeva). Iz svakog kompozita izrezani su uzorci odgovarajućeg oblika i dimenzija koji služe za ispitivanje mehaničkih svojstava.

3.1. Materijali i maseni udio vlakana

Izrađeno je 7 ravnih ploča kompozita od epoksidne smole kao matrice ojačane s različitim brojem slojeva lanenih vlakana. Ploče su napravljene u poduzeću Marservis d.o.o.

Kompoziti su izrađeni vakuuskom infuzijom pri temperaturi 29,8 °C, relativnoj vlazi zraka 42 % te 90-postotnom vakuumu. Korištena je epoksidna smola InfuGreen 810 (Sicomina, Francuska), te lanena vlakna AmpliTEX 5042 (Bcomp, Švicarska). Lanena vlakna su pletena pod kutom od 90° atlas načinom tkanja (slika 4, poglavlje 2.3.1.).

Određen je i maseni udio vlakana u svakoj ploči prema izrazu:

$$\text{udio vlakana} = \frac{m_{vl}}{m_p} 100\% \quad (3.1)$$

pri čemu je:

m_{vl} [g] – masa vlakana

m_p [g] – masa cijele ploče

Tablica 1 prikazuje maseni udio vlakna za svaku vrstu kompozita.

Tablica 1. Maseni udio vlakana u kompozitu

Broj slojeva vlakana	4	5	6	7	8	9	10
Udio vlakana u kompozitu [%]	40,43	40,45	40,73	40,77	41,14	41,28	41,38

3.2. Ispitivanje rastezne čvrstoće i rasteznog modula elastičnosti

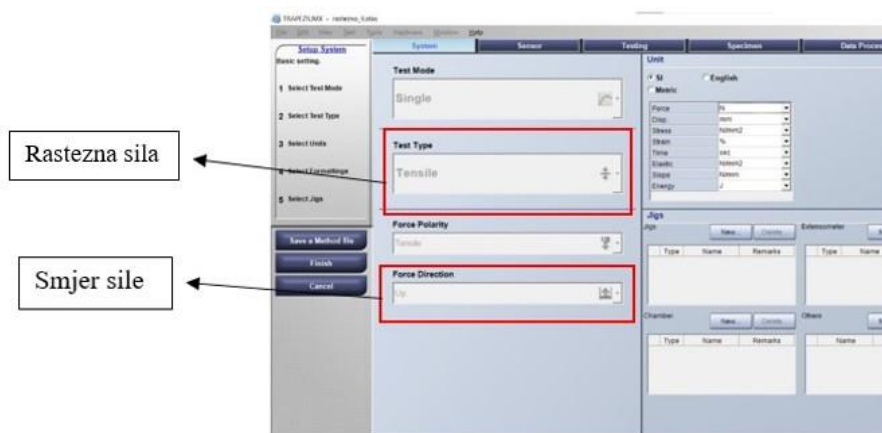
Nakon što je iz svakog kompozita izrezan određen broj uzoraka pravokutnog poprečnog presjeka provedeno je ispitivanje u Laboratoriju za polimere i kompozite na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Iz gotovih ploča s X,Y,Z,... slojeva vlakana izrezana su ispitna tijela. Ukupno je izrezano 55 uzoraka iz kompozita. Ispitivanje je provedeno prema normi HRN EN ISO 527-4:1997 – Plastika – Određivanje rasteznih svojstava – 4.dio: Ispitni uvjeti za izotropne i ortotropne plastične kompozite ojačane vlaknima.

**Slika 11. Kidalica Shimadzu AGS-X**

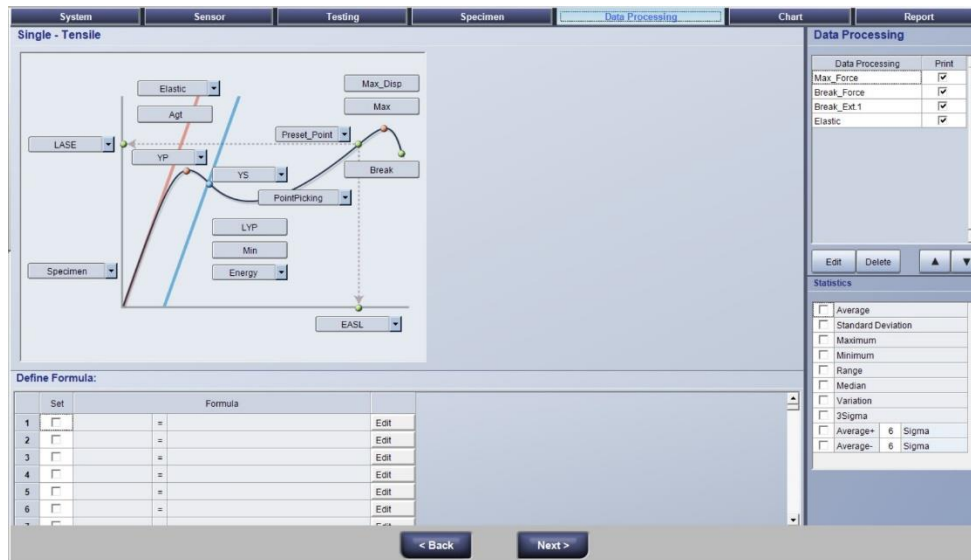
Ispitivanje je provedeno na kidalici Shimadzu AGS-X prikazanoj na slici 11. Kidalica je upravljana računalom pomoću programa Trapezium X (slika 12). Program omogućuje zapisivanje rezultata mjerenja u elektronskom obliku te po završetku mjerenja prikazuje dijagram naprezanje-istezanje za svako ispitivanje. Pokretanjem programa potrebno je odabrati vrstu ispitivanja i smjer sile kao što je prikazano na slici 13. Kidalica omogućuje ispitivanje na rastezanje, tlak i savijanje. Mjerno područje kidalice je 50 kN. Nakon što je odabran način ispitivanja potrebno je odrediti i podatke koji će se mjeriti tijekom ispitivanja (slika 14), unijeti vrstu materijala i dimenzije ispitnih tijela (slika 15) te odrediti brzinu ispitivanja. Brzina ispitivanja bila je 5 mm/min za sve uzorke.



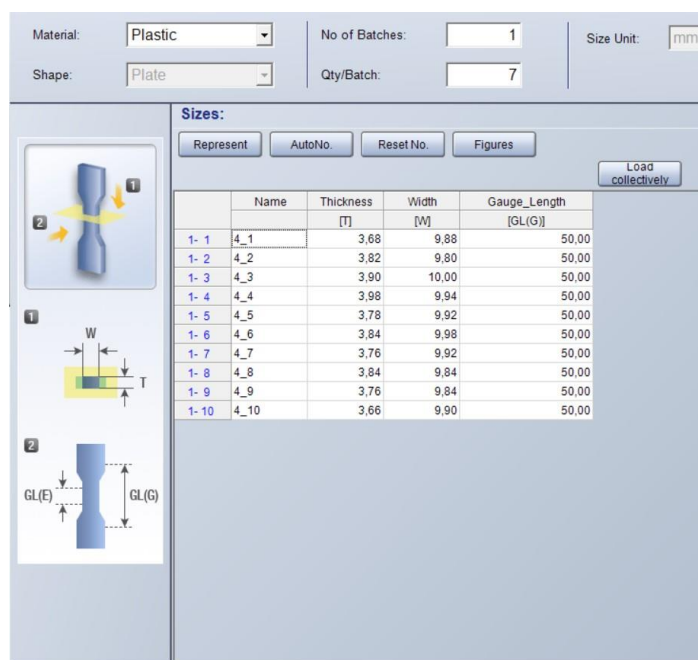
Slika 12. Računalni program Trapezium X



Slika 13. Odabir metode ispitivanja



Slika 14. Odabir podataka koji se ispituju



Slika 15. Unos dimenzija i materijala ispitnih tijela

Na slici 16 prikazani su uzorci nakon provedenog ispitivanja. Uočeno je kako je kod svih uzoraka došlo do loma.



Slika 16. Uzorci nakon provedenog rasteznog ispitivanja

Rastezna čvrstoća računa se kao omjer maksimalne sile (sile u trenutku loma ispitnog tijela) rastezanja i početne površine poprečnog presjeka ispitnog tijela A_0 :

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (3.2)$$

Za izračun naprezanja te istezanja ispitnog tijela koriste se sljedeći izrazi:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} 100\% = \frac{\Delta l}{l_0} 100\% \quad (3.4)$$

Gdje je:

σ_m [N/mm²] – rastezna čvrstoća

F_{max} [N] – maksimalna sila

A_0 [mm²] – površina poprečnog presjeka ispitnog tijela

σ [N/mm²] – rastezno naprezanje ispitnog tijela uslijed djelovanja sile

ε [mm/mm] – istežanje

l_0 [mm] – početna mjerna duljina ispitnog tijela

l [mm] – konačna mjerna duljina ispitnog tijela

Δl [mm] – promjena duljine ispitnog tijela

Rastezni modul elastičnosti (E_R) se određuje iz nagiba pravca pomoću Hookeovog zakona prema izrazu:

$$\sigma = E_R \varepsilon \quad (3.5)$$

4. REZULTATI ISPITIVANJA I USPOREDBA

4.1. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće i rasteznog modula elastičnosti

U sljedećim tablicama prikazane su dimenzije uzorka korištenih prilikom ispitivanja. Svaka tablica daje pregled uzorka s različitim brojem slojeva lanenih vlakana kao ojačala pri čemu prvi broj u oznaci predstavlja broj slojeva vlakana, a drugi broj je broj ispitnog tijela. Kao primjer uzet je uzorak 4_1, znači da se radi o uzorku sa četiri sloja vlakana i ispitnom tijelu broj jedan.

Tablica 2. Dimenzije uzorka s 4 sloja vlakana za rastezno ispitivanje

Ispitno tijelo	b [mm]	h [mm]	l_0 [mm]
4_1	9,88	3,68	50
4_2	9,80	3,82	50
4_3	10,00	3,90	50
4_4	9,94	3,98	50
4_5	9,92	3,78	50
4_6	9,98	3,84	50
4_7	9,92	3,76	50
4_8	9,84	3,84	50
4_9	9,84	3,76	50
4_10	9,90	3,66	50

Tablica 3. Dimenzije uzorka s 5 slojeva vlakana za rastezno ispitivanje

Ispitno tijelo	b [mm]	h [mm]	l_0 [mm]
5_1	9,94	4,48	50
5_2	9,90	4,52	50
5_3	10,10	4,50	50
5_4	9,94	4,40	50
5_5	9,98	4,32	50
5_6	10,10	4,42	50
5_7	9,98	4,48	50
5_8	9,94	4,42	50
5_9	10,02	4,58	50
5_10	9,94	4,36	50

Tablica 4. Dimenzije uzorka s 6 slojeva vlakana za rastezno ispitivanje

Ispitno tijelo	b [mm]	h [mm]	l_0 [mm]
6_1	10,00	5,5	50
6_2	10,28	5,9	50
6_3	10,08	5,5	50
6_4	10,00	5,7	50
6_5	10,08	5,5	50
6_6	10,06	5,5	50
6_7	9,88	5,6	50
6_8	10,04	5,4	50

Tablica 5. Dimenzije uzorka s 7 slojeva vlakana za rastezno ispitivanje

Ispitno tijelo	b [mm]	h [mm]	l_0 [mm]
7_1	10,14	6,72	50
7_2	10,16	6,76	50
7_3	10,10	6,64	50
7_4	10,24	6,78	50
7_5	10,06	6,78	50
7_6	10,20	6,86	50
7_7	10,30	6,72	50
7_8	10,28	6,86	50

Tablica 6. Dimenzije uzorka s 8 slojeva vlakana za rastezno ispitivanje

Ispitno tijelo	b [mm]	h [mm]	l_0 [mm]
8_1	10,18	7,50	50
8_2	10,20	7,42	50
8_3	10,20	7,52	50
8_4	10,16	7,42	50
8_5	10,14	7,46	50
8_6	10,14	7,58	50
8_7	10,26	7,42	50

Tablica 7. Dimenzije uzorka s 9 slojeva vlakana za rastezno ispitivanje

Ispitno tijelo	b [mm]	h [mm]	l_0 [mm]
9_1	10,24	8,42	50
9_2	10,24	8,48	50
9_3	10,10	8,24	50
9_4	10,24	8,24	50
9_5	10,06	8,32	50
9_6	10,28	8,46	50

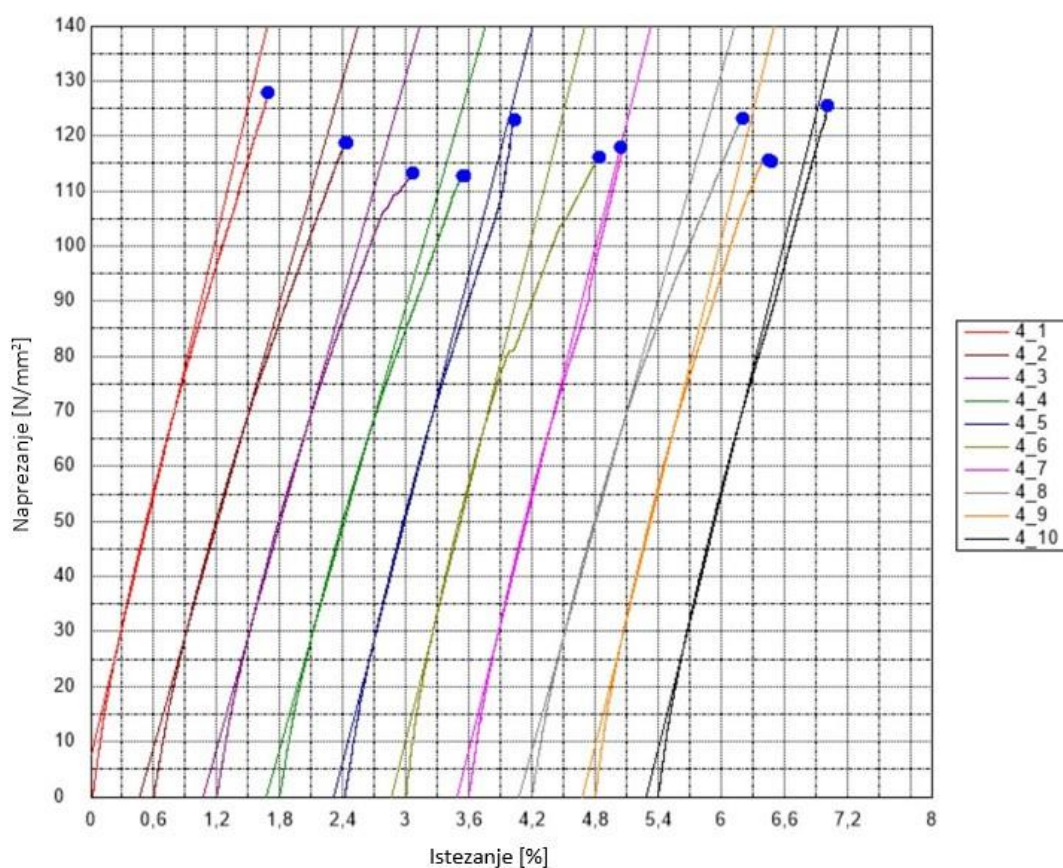
Tablica 8. Dimenzije uzorka s 10 slojeva vlakana za rastezno ispitivanje

Ispitno tijelo	b [mm]	h [mm]	l_0 [mm]
10_1	10,18	9,58	50
10_2	10,20	9,56	50
10_3	10,30	9,18	50
10_4	10,28	9,42	50
10_5	10,28	9,50	50
10_6	10,20	9,42	50

Prije samog ispitivanja dimenzije ispitnih tijela, kao i odgovarajuće, ranije navedene formule, unesene su u program Trapezium X, te su u konačnici nakon provedenog ispitivanja dobiveni podaci rastezne čvrstoće i rasteznog modula elastičnosti za svaki uzorak. Rezultati su prikazani u tablicama zajedno s njihovim srednjim vrijednostima te standardnom devijacijom s . Uz svaku tablicu priložen je i dijagram naprezanje–istezanje za svaku vrstu kompozita (slike 17-23).

Tablica 9. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka s 4 sloja vlakana

Ispitno tijelo	F_{max} [N]	ε [%]	σ_m [N/mm ²]	E_R [N/mm ²]
4_1	4646,44	5,40	127,80	7907,93
4_2	4449,30	6,25	118,85	6733,36
4_3	4419,96	5,46	113,33	6785,12
4_4	4463,04	5,12	112,81	6706,79
4_5	4609,32	5,40	122,92	7388,94
4_6	4446,53	5,31	116,03	7604,50
4_7	4401,88	4,37	118,02	7588,76
4_8	4653,99	5,36	123,17	6822,66
4_9	4278,76	5,25	115,65	7668,95
4_10	4548,30	5,20	125,53	7680,54
\bar{x}	4491,75	5,31	119,41	7288,76
s	120,433	0,455	5,192	471,310

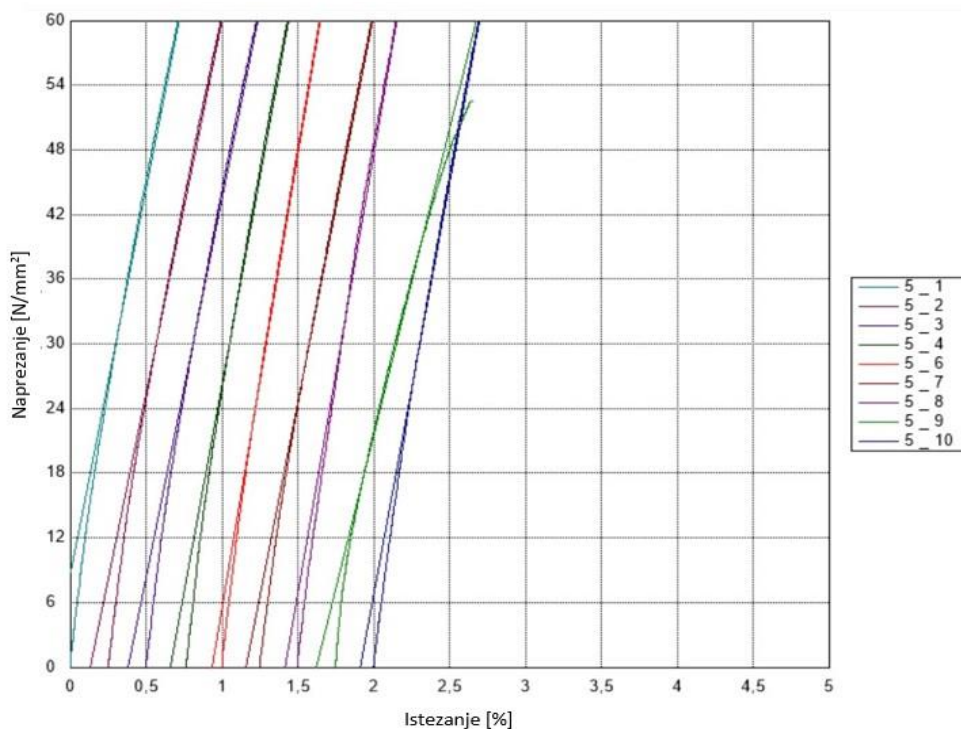


Slika 17. Dijagram napreznje-istezanje pri rasteznom opterećenju za kompozit s 4 sloja vlakana

Tablica 10. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka s 5 slojeva vlakana

Ispitno tijelo	F_{max} [N]	ε [%]	σ_m [N/mm ²]	E_R [N/mm ²]
5_1	5380,26	5,36	120,82	7165,53
5_2	5204,72	4,72	116,31	6909,38
5_3	5331,32	5,07	117,30	7027,37
5_4	5406,86	5,43	123,62	7698,10
5_5	5688,23	4,84	131,94	24419,51
5_6	5768,04	4,94	129,21	8422,09
5_7	5446,23	5,02	121,81	7186,09
5_8	5588,09	5,16	127,19	8153,69
5_9	2413,77	2,12	52,60	5690,65
5_10	5369,01	5,09	123,89	7644,22
\bar{x}	5436,82	5,10	122,52	7525,81
s	171,703	0,226	4,454	549,662

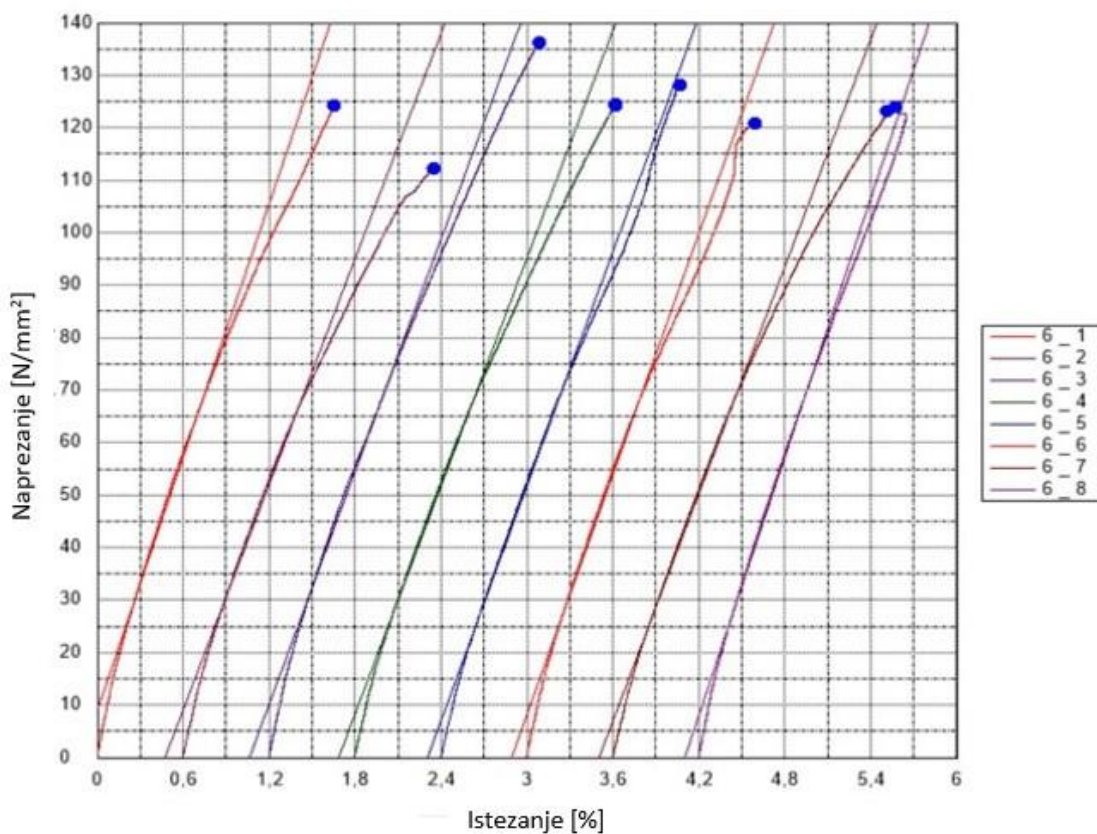
Rezultati ispitivanja na ispitnom tijelu 5_5 nisu vjerodostojni jer se prilikom ispitivanja dogodila pogreška. Ostala je blokada na ekstenzometru tijekom mjerenja i zbog toga se u tablici vidi veliko odstupanje kod modula elastičnosti te je taj podatak zanemaren kod izračuna srednjih vrijednosti. Na ispitnom tijelu 5_9 se isto dogodila pogreška pa je podatak za taj uzorak također izbačen iz proračuna.



Slika 18. Dijagram naprezanje-istezanje pri rasteznom opterećenju za kompozit s 5 slojeva vlakana

Tablica 11. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka sa 6 slojeva vlakana

Ispitno tijelo	F_{max} [N]	ε [%]	σ_m [N/mm ²]	E_R [N/mm ²]
6_1	6836,39	6,38	124,30	8044,94
6_2	6804,67	5,46	112,19	7159,03
6_3	7549,37	7,59	136,17	8386,27
6_4	7099,27	6,33	124,55	7236,79
6_5	7100,68	7,06	128,08	7449,35
6_6	6684,49	5,58	120,81	7632,09
6_7	6809,22	5,74	123,07	7210,04
6_8	6725,34	5,35	124,05	8209,82
\bar{x}	6967,58	6,16	124,13	7469,06
s	306,588	0,870	7,251	365,081

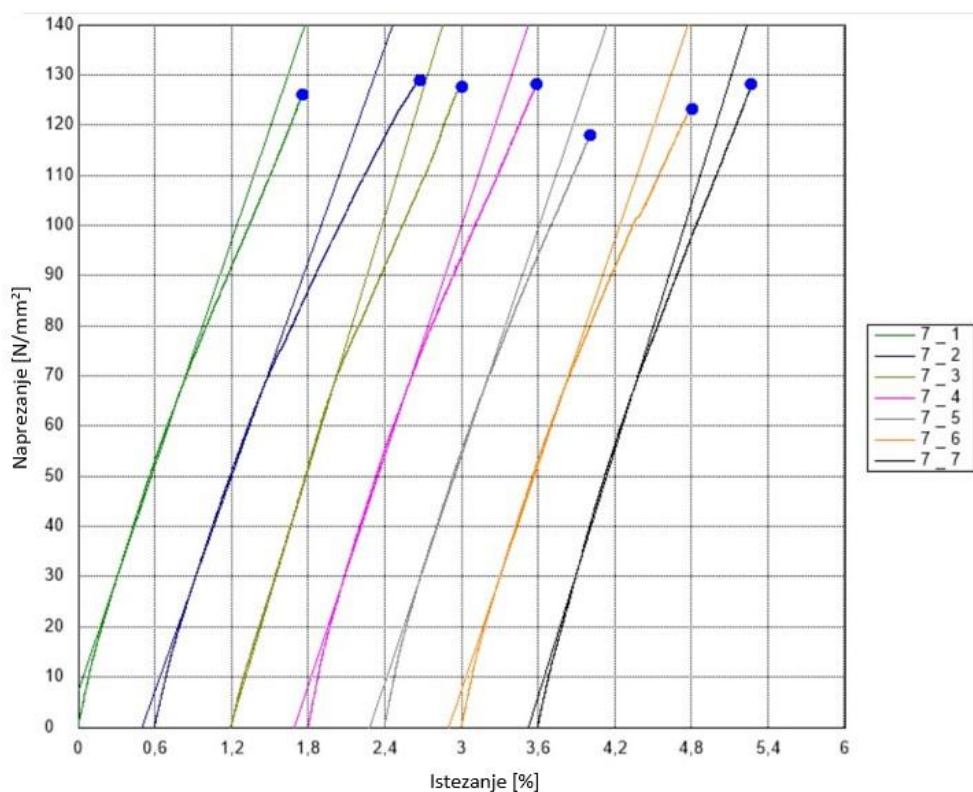


Slika 19. Dijagram naprezanje-istezanje pri rasteznom opterećenju za kompozit sa 6 slojeva vlakana

Tablica 12. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka sa 7 slojeva vlakana

Ispitno tijelo	F_{max} [N]	ε [%]	σ_m [N/mm ²]	E_R [N/mm ²]
7_1	8593,59	7,06	126,12	7477,56
7_2	8861,40	6,78	129,02	7128,68
7_3	8553,39	6,57	127,54	8413,91
7_4	8896,29	7,22	128,14	7639,27
7_5	8054,15	7,27	118,08	7543,36
7_6	8625,79	6,45	123,27	7472,29
7_7	8867,46	7,06	128,11	8183,57
7_8	8270,07	7,08	117,27	305110,70
\bar{x}	8636,01	6,92	125,75	7694,09
s	294,224	0,320	3,879	447,069

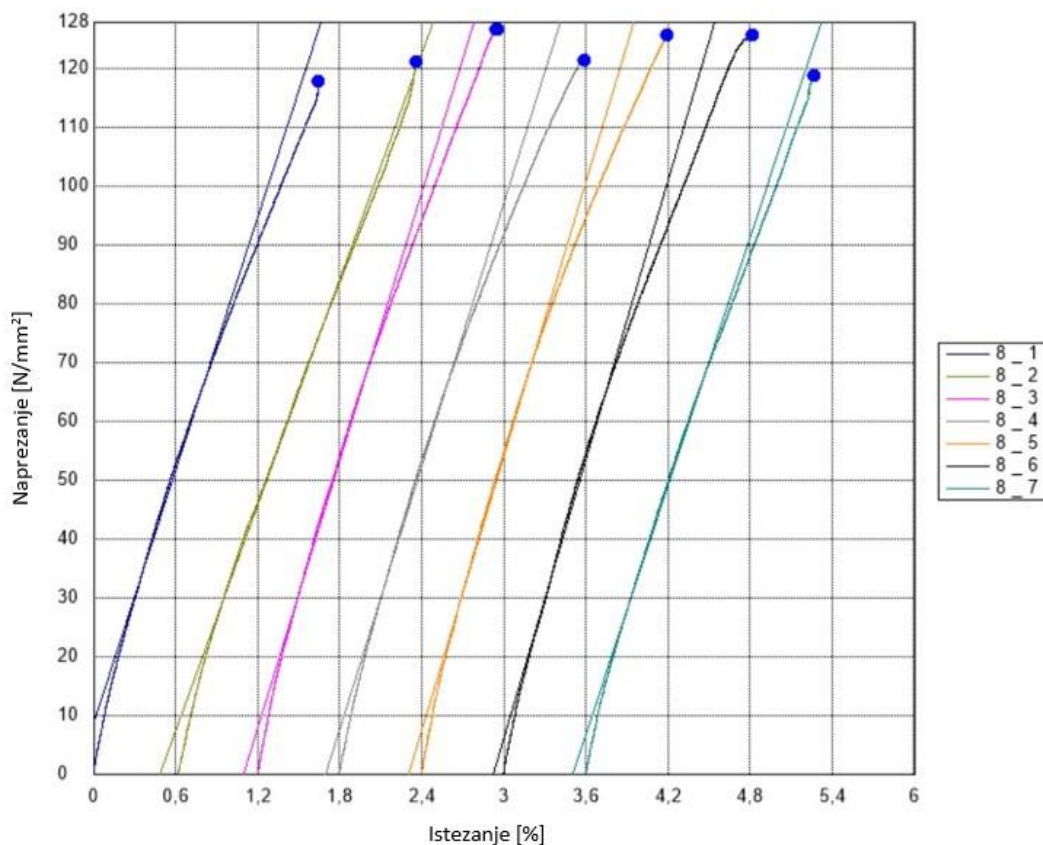
Ispitno tijelo 7_8 pokazuje značajno odstupanje vrijednosti modula elastičnosti zbog toga što prilikom mjerenja nije stavljen ekstenzometar. Iz tog razloga je izbačen kod izračuna srednje vrijednosti jer bi uvelike promjenio prosjek ostalih rezultata mjerenja



Slika 20. Dijagram naprezanje-istezanje pri rasteznom opterećenju za kompozit sa 7 slojeva vlakana

Tablica 13. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka s 8 slojeva vlakana

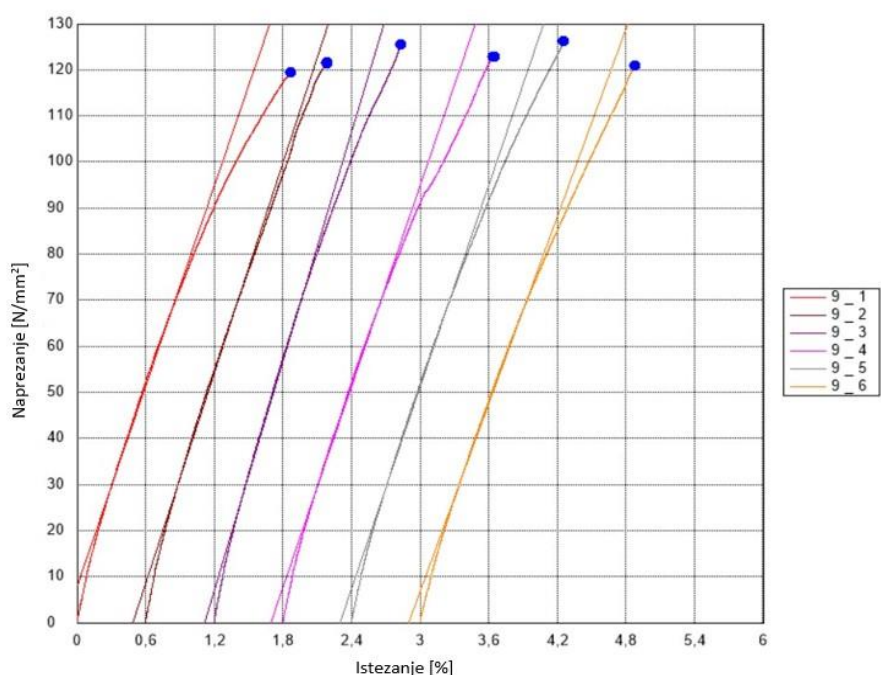
Ispitno tijelo	F_{max} [N]	ε [%]	σ_m [N/mm ²]	E_R [N/mm ²]
8_1	8992,26	8,75	117,78	7175,86
8_2	9169,21	9,03	121,15	6401,37
8_3	9723,18	9,00	126,76	7595,85
8_4	9161,27	8,47	121,52	7459,10
8_5	9508,32	8,87	125,70	7775,41
8_6	9667,75	9,76	125,78	7910,82
8_7	9042,82	7,90	118,78	7044,17
\bar{x}	9323,54	8,83	122,50	7337,51
s	303,050	0,568	3,607	514,863



Slika 21. Dijagram naprezanje-istezanje pri rasteznom opterećenju za kompozit s 8 slojeva vlakana

Tablica 14. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka s 9 slojeva vlakana

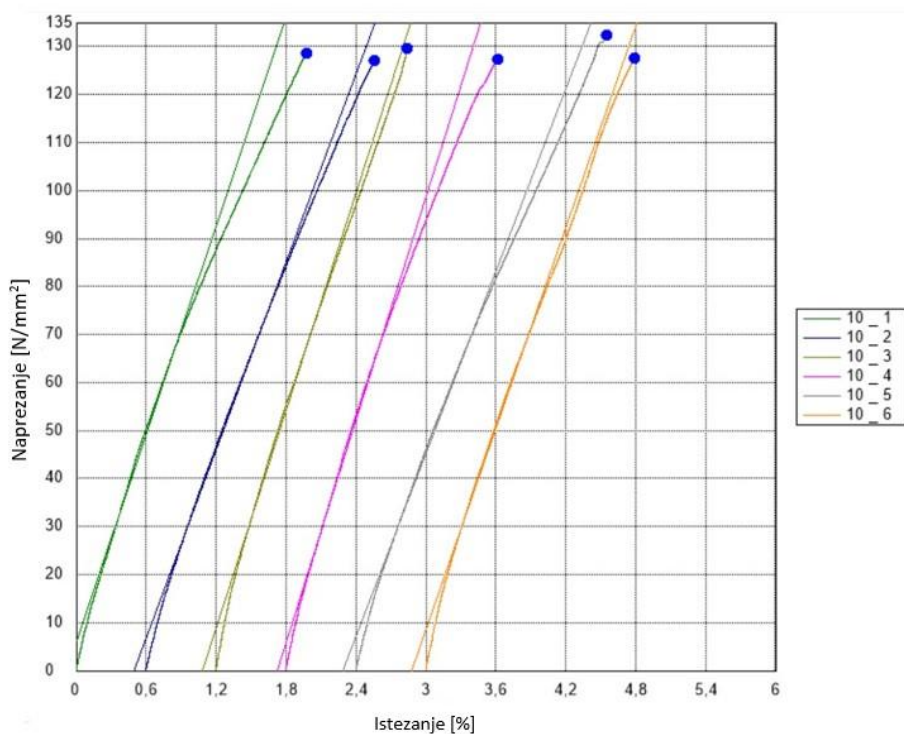
Ispitno tijelo	F_{\max} [N]	ε [%]	σ_m [N/mm ²]	E_R [N/mm ²]
9_1	10293,88	8,56	119,39	7245,91
9_2	10552,92	8,43	121,53	7606,50
9_3	10441,80	8,60	125,47	8285,91
9_4	10363,17	8,58	122,82	7270,40
9_5	10560,39	8,52	126,17	7301,22
9_6	10523,08	8,98	121,00	6777,88
\bar{x}	10482,20	8,69	123,33	7116,50
s	104,759	0,250	2,622	293,658



Slika 22. Dijagram naprezanje-istezanje pri rasteznom opterećenju za kompozit s 9 slojeva vlakana

Tablica 15. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka s 10 slojeva vlakana

Ispitno tijelo	F_{\max} [N]	ε [%]	σ_m [N/mm ²]	E_R [N/mm ²]
10_1	12541,77	9,02	128,60	7230,37
10_2	12393,74	9,75	127,10	6527,13
10_3	12257,06	8,58	129,63	7553,20
10_4	12337,41	9,12	127,40	7733,56
10_5	12920,99	9,24	132,31	6335,26
10_6	12250,37	8,80	127,50	6984,05
\bar{x}	12450,22	9,09	128,76	7060,60
s	254,233	0,402	1,979	555,143



Slika 23. Dijagram naprezanje-istezanje pri rasteznom opterećenju za kompozit s 10 slojeva vlakana

U tablici 16 prikazane su srednje vrijednosti rastezne čvrstoće i rasteznog modula elastičnosti za kompozite s različitim brojem slojeva vlakana.

Tablica 16. Rastezna čvrstoća i rastezni modul elastičnosti za kompozite s različitim brojem slojeva vlakana

Broj slojeva vlakana	$\sigma_{m, sr}$ [N/mm ²]	$E_{R, sr}$ [N/mm ²]
4	119,41	7288,76
5	122,52	7525,81
6	124,13	7469,06
7	125,75	7694,09
8	122,50	7337,51
9	123,33	7116,50
10	128,76	7060,60

Kao što je vidljivo iz tablice 16, rastezna čvrstoća i rastezni modul elastičnosti mijenjaju se u ovisnosti o broju slojeva lanenih vlakana u kompozitu. S povećanjem broja slojeva vlakana dolazi do povećanja rastezne čvrstoće kompozita. Primjećuje se nekoliko iznimaka, odnosno odstupanja. Npr. kompozit s osam slojeva vlakana ima nižu čvrstoću od onoga sa sedam. Jedan od mogućih razloga je duži proces izrade kompozita s više slojeva i nemogućnost postizanja dovoljno dobre adhezije između matrice i vlakana jer dolazi do preranog umrežavanja. Također, postoji ograničen udio vlakana koji je moguće uporabiti kako bi se ona uspjela okružiti materijalom matrice i kvalitetno povezati. Količina vlakana u kompozitu je uveliko definirana njegovim procesom proizvodnje.

Na slikama 24-27 nalazi se grafički prikaz ovisnosti mehaničkih svojstava u uvjetima rasteznog opterećenja o broju slojeva vlakana u kompozitu.

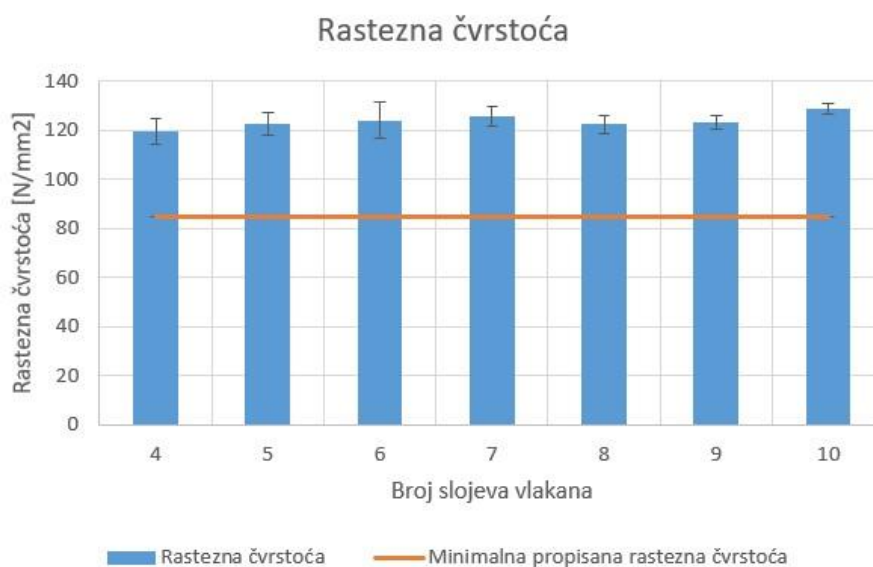
Na slici 24 vidljivo je da maksimalna sila raste s brojem slojeva, što je očekivan rezultat, s obzirom na poraste debljine. Rastezna čvrstoća prikazana na slici 26 pokazuje da kada se sila podjeli s poprečnim presjekom, vrijednosti su ujednačene. Međutim, na slici 25 vidi se da i istezljivost kompozita raste s brojem slojeva, što nije očekivano. Mogući razlozi za ovu pojavu su slabija umreženost smole i lošija impregnacija vlakana, te je stoga istezljivija. Veća istezljivost reflektira se na nižem modulu elastičnosti, posebno za uzorke s 9 i 10 slojeva.



Slika 24. Grafički prikaz promjene maksimalne sile u ovisnosti o broju slojeva vlakana u kompozitu kod rasteznog ispitivanja

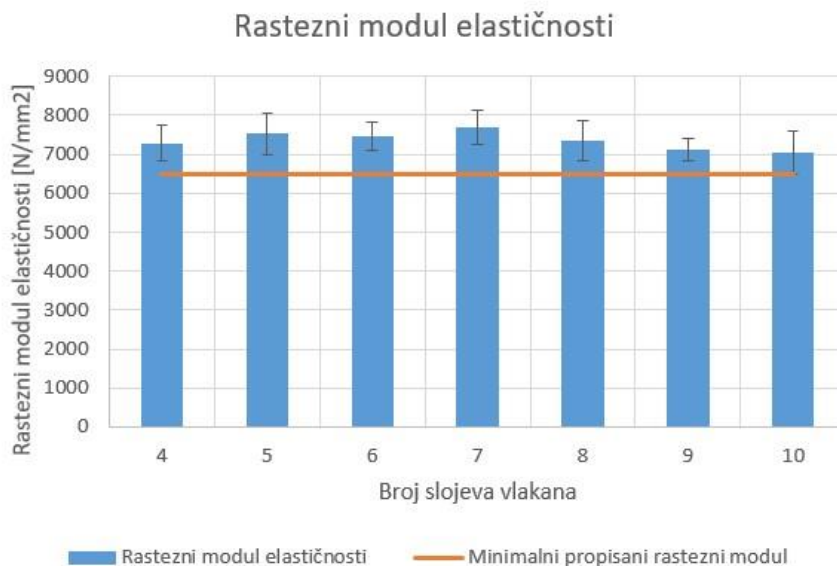


Slika 25. Grafički prikaz promjene maksimalnog istezanja u ovisnosti o broju slojeva vlakana u kompozitu kod rasteznog ispitivanja



Slika 26. Grafički prikaz promjene rastezne čvrstoće u ovisnosti o broju slojeva vlakana u kompozitu te njena minimalna propisana granica

Sa slike 26 vidljivo je kako svi ispitani uzorci zadovoljavaju minimalnu propisanu granicu rastezne čvrstoće od strane Hrvatskog registra brodova koja iznosi 85 N/mm^2 (detaljnije u poglavlju 4.4).

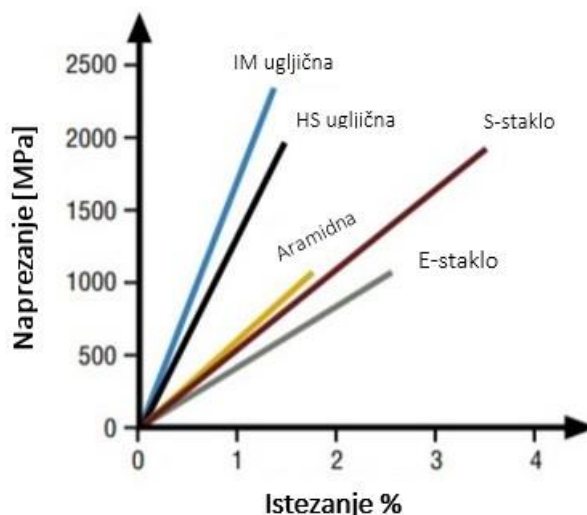


Slika 27. Grafički prikaz promjene rasteznog modula elastičnosti u ovisnosti o broju slojeva vlakana u kompozitu te njegova minimalna propisana granica

Sa slike 27 vidljivo je kako svi uzorci zadovoljavaju minimalnu propisanu granicu modula elastičnosti od 6500 N/mm^2 .

4.1.1. Usporedba svojstava lanenih vlakana s drugim vrstama vlakana

Slika 28 prikazuje usporedbu rasteznih svojstava vlakana izrađenih od različitih materijala. Nagib pravca ukazuje na krutost kompozita, odnosno što je pravac strmiji veća je krutost materijala.



Slika 28. Grafički prikaz svojstava različitih vrsta vlakana [13]

Iz σ - ε grafa moguće je uočiti kako su ugljična vlakna superiornija po krutosti u odnosu na sva ostala. Lanena vlakna, koja su analizirana u ovom radu, i dalje zaostaju po pitanju rastezne čvrstoće u odnosu na najčešće korištena staklena vlakna, ali i dalje zadovoljavaju zahtjeve Hrvatskog registra brodova u pogledu rasteznih svojstava što će biti detaljnije prikazano u poglavlju 4.4.

4.2. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti

Istovremeno s ovim istraživanjem provedeno je i ispitivanje savojnih svojstava kompozita te međuslojne smične čvrstoće također u Laboratoriju za polimere i kompozite za potrebe drugog Završnog rada (Završni rad, Marko Tuškan 2022.). Ispitivanje je provedeno na kitalici Shimadzu AGS-X kao i prethodno. U tablici 17 prikazane su srednje vrijednosti savojne čvrstoće te savojnog modula elastičnosti za svaku vrstu kompozita uz pripadajuću standardnu devijaciju s .

Tablica 17. Prikaz rezultata nakon provedenog savojnog ispitivanja: rezultati su dobiveni ispitivanjem 6 do 10 ispitnih tijela, a izražene su srednje vrijednosti

Broj slojeva vlakana	$\sigma_{fM, sr}$ [N/mm ²]	$E_{S, sr}$ [N/mm ²]
4	152,44	8690,57
s	7,18	567,44
5	149,14	8681,82
s	9,80	617,09
6	147,54	9408,81
s	3,89	494,79
7	151,31	10330,09
s	3,26	465,71
8	144,62	10099,29
s	4,33	447,45
9	145,52	10750,30
s	5,18	361,79
10	139,71	10516,22
s	4,39	319,43

4.3. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće

Tablica 18 prikazuje srednje vrijednosti međuslojne smične čvrstoće uz pripadajuću standardnu devijaciju s . Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za polimere i kompozite.

Tablica 18. Prikaz rezultata nakon provedenog ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće: rezultati su dobiveni ispitivanjem 6 do 10 ispitnih tijela, a izražene su srednje vrijednosti

Broj slojeva vlakana	τ_{sr} [N/mm ²]
4	15,96
<i>s</i>	0,85
5	16,85
<i>s</i>	0,53
6	17,65
<i>s</i>	0,23
7	16,73
<i>s</i>	0,20
8	16,64
<i>s</i>	0,76
9	16,12
<i>s</i>	0,38
10	15,93
<i>s</i>	0,96

4.4. Usporedba rezultata ispitivanja sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova

Tablica 19 prikazuje rezultate ispitivanja mehaničkih svojstava svih kompozita uspoređene sa pravilima Hrvatskog registra brodova. U tablici su navedene srednje vrijednosti savojne čvrstoće, savojnog modula elastičnosti, rastezne čvrstoće, rasteznog modula elastičnosti te prividne smične međuslojne čvrstoće, za kompozite s 4 do 10 slojeva vlakana. Podaci su uspoređeni s propisanim minimalnim vrijednostima za kompozite ojačane staklenim vlaknima koje se nalaze u Pravilima za klasifikaciju brodova, dio 24, 2017. godina, izdanim od strane Hrvatskog registra brodova.

Tablica 19. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava kompozita uspoređeni sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova [20]

Broj slojeva vlakana	Udio vlakana [%]	ε [%]	σ_{FM} [N/mm ²]	E_s [N/mm ²]	σ_m [N/mm ²]	E_R [N/mm ²]	τ [N/mm ²]
4	40,43	5,31	152,44	8690,57	119,41	7288,76	15,96
5	40,45	5,10	149,14	8681,82	114,75	7321,90	16,85
6	40,73	6,16	147,54	9408,81	124,13	7469,06	17,65
7	40,77	6,92	151,31	10330,09	125,75	7694,09	16,73
8	41,14	8,83	144,62	10099,29	122,50	7337,51	16,64
9	41,28	8,69	145,52	10750,30	123,33	7116,50	16,12
10	41,38	9,09	139,71	10516,22	128,76	7060,60	15,93
HRB			150	5500	85	6500	17

Kao što je vidljivo iz tablice rastezna svojstva i savojni modul kompozita građenih od epoksidne smole kao matrice i lanenih vlakana kao ojačanje (neovisno o broju slojeva) zadovoljavaju propisane zahtjeve Hrvatskog registra brodova. Kritične vrijednosti su savojna čvrstoća i prividna smična međuslojna čvrstoća koje su malo niže od propisanih, uz poneku iznimku (tamno zelena polja). Oba mjerenja provode se na isti način, gdje je greda na dva oslonca opterećena silom u sredini. U gornjoj plohi javlja se tlačno, u donjoj rastezno naprezanje. Jedina razlika je što je kod prividne međuslojne smične čvrstoće razmak između oslonaca puno manji. Slabija savojna svojstva posljedica su slabije međuslojne čvrstoće.

Najslabiji rezultat postignut je kod najdeblje ploče od 10 slojeva, što može biti posljedica nešto duže pripreme tijekom koje smola umrežava te postaje viskozija što otežava impregnaciju ili drugačijih uvjeta odvođenja topline, uslijed čega je matrica manje umrežena. Iz istežljivosti je vidljivo da upravo kompoziti s većim brojem slojeva pokazuju više vrijednosti. Udio vlakana upravo kod te ploče je najviši, što ukazuje na slabiju impregnaciju. Za ploču s 10 slojeva savojna čvrstoća je 6,7% niža od minimalno dopuštene vrijednosti, dok je prividna međuslojna smična čvrstoća niža za 16,5%. Već prva sljedeća po kvaliteti je za savojnu čvrstoću samo 3,3% slabija, dok je prividna međuslojna smična čvrstoća niža 5,3%. Kako su kompoziti izrađeni vakuumskom infuzijom, moguće je da je impregnacija vlakana nedovoljna zbog premalo smole. Maseni udio vlakana od nešto više od 40% odgovarao bi zahtjevima HRB-a, ali su lanena vlakna upola manje gustoće, te je volumni udio vlakana realno velik. Stoga je za očekivati da bi se s većim udjelom smole zadržala dovoljno dobra rastezna svojstva, a poboljšala međuslojna čvrstoća.

5. ZAKLJUČAK

Za potrebe ovog rada izrađeno je sedam ploča kompozita od epoksidne smole s različitim brojem slojeva lanenih vlakana kao ojačala. U ovom radu kompoziti su izrađeni vakuumskom infuzijom što se pokazalo kao dobra metoda za izradu kompozita s višim udjelom vlakana u usporedbi s ručnim laminiranjem.

U radu su ispitana i analizirana rastezna svojstva koja su u skladu s pravilima HRB-a. Osim toga prikupljeni su podaci za savojna svojstva i prividnu smičnu međuslojnu čvrstoću, te je napravljena usporedba svih svojstava s Pravilnikom HRB-a. Iz tablice 19 vidljivo je da su savojna i prividna međuslojna smična čvrstoća ili u skladu s propisima ili vrlo blizu za kompozite do 7 slojeva vlakana. Istovremeno, vidljivo je da je maseni udio vlakana upravo na pločama s 8 do 10 slojeva viša od 41%, dok je za ploče s 4 do 7 slojeva ispod 41%. Isto tako istezljivost kompozita za ploče od 8 do 10 slojeva je viša. Iz toga se može zaključiti da je udio vlakana kod ovih ploča previsok, te da bi se snižavanjem potlaka mogli dobiti kompoziti s manjim udjelom vlakana, ali s uravnoteženim svojstvima.

Kompoziti ojačani prirodnim vlaknima pokazali su se kao dobra alternativa uobičajenim kompozitima ojačanim staklenim vlaknima. Iako su se staklena vlakna, očekivano, dokazala kao bolje ojačalo lanena vlakna imaju dobar potencijal za primjenu u maloj brodogradnji uz prilagodbu parametara izrade kompozita, kako bi se osigurala dobra impregnacija vlakana. Međutim, trenutno je prepreka primjeni ovih ekološki prihvatljivih vlakana nedostatak propisa koje bi ovi materijali trebali zadovoljiti kako bi dobili odgovarajući certifikat.

LITERATURA

- [1] T. R. K. Reddy, H. Kim, J. Park: *Renewable Biocomposite Properties and their Applications*, University of Caxias Do Sul, Brazil 2016.
- [2] K. Repar, I. Žmak: *Mehanička svojstva lanom ojačanog zelenog kompozita*, Zagreb 2016.
- [3] I. Gabrić, S. Šitić: *Materijali 1*, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, Split 2012.
- [4] Z. Schauerl: *Kompozitni materijali – nastavni materijali*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2020.
- [5] I. Smojver: *Mehanika kompozitnih materijala – interna skripta*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2007.
- [6] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2007.
- [7] D. B. Miracle, S. L. Donaldson: *ASM Handbook Volume 21: Composites*, ASM International Handbook Committee, Ohio 2001.
- [8] T. Filetin: *Materijali i tehnologijski razvoj*, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, Zagreb 2002.
- [9] M. A. Masuelli: *Introduction of Fibre-Reinforced Polymers – Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes*, InTech, Rijeka 2013.
- [10] J. P. Jose, S. K. Malhotra, S. Thomas, K. Joseph, K. Goda, M. S. Sreekala: *Polymer Composites: Volume 1*, First edition, Germany 2012.
- [11] D. Nabi Saheb, J. P. Jog: *Natural fiber polymer composites: A review*, Polymer Engineering Group, Chemical Engineering Division, National Chemical Laboratory, India 1999.
- [12] W. Kunej: *Poliesterski kompoziti 2*, Prošireno izdanje, DIA – MAR, Rijeka 2006.
- [13] *SP System guide to composites (Composite Engineering Materials)*
- [14] G. Milardović: *Kompoziti u automobilskoj industriji*, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 2011.
- [15] K. K. Chawla: *Composite Materials: Science and Engineering*, 3rd edition, New York, 2012.
- [16] M. Suresh, T. Babu, A. Ravinthiran, A. Dhanalakshmi, S. Ganapathy: *Effect of Sea Water Environment Exposure on Glass Fiber Reinforced Polymer Composites*, India 2019.
- [17] D. Ćorić, Ž. Alar: *Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstva materijala*, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2016./2017.

-
- [18] M. A. Meyers, K. K. Chawla: *Mechanical Behavior of Materials*, Cambridge University Press, England 2009.
- [19] A. Lončar, D. Vojvodić, D. Komar: *Vlaknima ojačani polimeri, Prvi dio: osnova i problematika izgradnje*, Zagreb 2006.
- [20] *Rules for the classification of ships; Part 24 – Non-metallic materials, 2017.*, http://www.crs.hr/Portals/0/HRB%20CRS%20pravila/PART%2024,%202017_07.pdf?ver=2017-07-12-083503-253 (zadnji pristup 3.1.2022.)

PRILOZI

I. CD-R disc