

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Tuškan

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Marko Tuškan

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Tatjani Haramini na prihvaćanju mentorstva za završni rad te na njenoj stalnoj neupitnoj pomoći i potpori tijekom izrade istoga. Također izrazito se želim zahvaliti asistentu dr. sc. Danielu Pugaru na njegovom vremenu i pomoći koju mi je pružio tijekom pisanja ovog rada i tehničkom suradniku Božidaru Bušetinčanu na danim savjetima i pomoći oko eksperimentalnog dijela. Na kraju zahvalio bi se roditeljima i sestri koji su mi bili od velike važnosti tijekom studiranja.

Marko Tuškan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	2
2.1. Definicija i podjela kompozita	2
2.2. Komponente kompozita	3
2.2.1. Svojstva matrice.....	3
2.2.2. Svojstva ojačala	3
2.3. Kompoziti s polimernom matricom	4
2.3.1. Duromerne matrice	4
2.3.1.1. Epoksidna smola	5
2.4. Vlaknima ojačani kompoziti	6
2.5. Prirodna ojačala.....	8
2.5.1. Konoplja.....	10
2.5.2. Kenaf.....	10
2.5.3. Sisal.....	11
2.5.4. Lan	12
2.6. Mehanička svojstva.....	13
2.6.1. Savojna čvrstoća i savojni modul.....	13
2.6.2. Prividna međuslojna smična čvrstoća	16
3. EKSPERIMENTALNI DIO	19
3.1. Materijali	19
3.2. Ispitivanja prividne međuslojna smična čvrstoće	20
3.3. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće	24
3.3.1. Kompozit s četiri sloja vlakana.....	24
3.3.2. Kompozit s pet slojeva vlakana	25
3.3.3. Kompozit sa šest slojeva vlakana	27
3.3.4. Kompozit sa sedam slojeva vlakana	29
3.3.5. Kompozit s osam slojeva vlakana.....	31
3.3.6. Kompozit s devet slojeva vlakana.....	33
3.3.7. Kompozit s deset slojeva vlakana	34
3.4. Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti.....	36
3.4.1. Kompozit s četiri sloja vlakana.....	40
3.4.2. Kompozit s pet slojeva vlakana	41
3.4.3. Kompozit sa šest slojeva vlakana	43
3.4.4. Kompozit sa sedam slojeva vlakana	45
3.4.5. Kompozit s osam slojeva vlakana.....	47
3.4.6. Kompozit s devet slojeva vlakana.....	48
3.4.7. Kompozit s deset slojeva vlakana	50

3.5. Analiza rezultata savojnog i međuslojnog ispitivanja.....	51
4. ZAKLJUČAK.....	54
LITERATURA.....	55

POPIS SLIKA

Slika 1. Vrste kompozita: (a) ojačani česticama, (b) ojačani vlaknima i (c) slojeviti kompozit [1]	2
Slika 2. Epoksidna molekula [3]	6
Slika 3. Raspored vlakana u matrici: (a) kratka, proizvoljno orijentirana, (b) duga, u jednom smjeru orijentirana, (c) duga, u dva okomita smjera orijentirana i (d) duga, isprepletena, proizvoljno orijentirana [4]	6
Slika 4. Dijagram naprezanje-istezanje vlaknima ojačanog kompozita [1]	7
Slika 5. Cijena prirodnih i staklenih vlakana [5]	8
Slika 6. Usporedba prirodnih i staklenih vlakana [5]	8
Slika 7. Podjela prirodnih vlakana	9
Slika 8. Vlakna od konoplje [7]	10
Slika 9. Vlakna kenafa [8]	11
Slika 10. Sisal [9]	11
Slika 11. Statičko rastezno ispitivanje prirodnih vlakana [10]	12
Slika 12. Tkanje lana [10]	13
Slika 13. Shematski prikaz savojnog ispitivanja [11]	13
Slika 14. Smično ispitivanje [12]	17
Slika 15. SHIMADZU AGS-X kidalica	20
Slika 16. Dijagram sila - progib dobiven nakon provedenog ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (kompozit s četiri sloja vlakana)	25
Slika 17. Graf sila - progib kod ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (pet slojeva vlakana)	27
Slika 18. Graf sila - progib kod ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (šest slojeva vlakana)	29
Slika 19. Graf sila - progib kod ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (sedam slojeva vlakana)	31
Slika 20. Graf sila - progib kod ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (osam slojeva vlakana)	32
Slika 21. Graf sila - progib kod ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (devet slojeva vlakana)	34
Slika 22. Graf sila - progib kod ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (deset slojeva vlakana)	35
Slika 23. Prikaz savojnoga ispitivanja	36
Slika 24. Graf naprezanje - istezanje kod savojnog ispitivanja (četiri sloja vlakana)	41
Slika 25. Graf naprezanje - istezanje kod savojnog ispitivanja (pet slojeva vlakana)	43
Slika 26. Graf naprezanje - istezanje kod savojnog ispitivanja (šest slojeva vlakana)	45
Slika 27. Graf naprezanje - istezanje kod savojnog ispitivanja (sedam slojeva vlakana)	46
Slika 28. Graf naprezanje - istezanje kod savojnog ispitivanja (osam slojeva vlakana)	48
Slika 29. Graf naprezanje - istezanje kod savojnog ispitivanja (devet slojeva vlakana)	49
Slika 30. Graf naprezanje - istezanje kod savojnog ispitivanja (deset slojeva vlakana)	51
Slika 31. Vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće kompozita s različitim brojem slojeva lanenih vlakana te njena minimalna granica propisana od strane HRB-a [14]	51
Slika 32. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti kompozita s različitim brojem slojeva lanenih vlakana te njegova minimalna granica propisana pravilnikom HRB-a [14]	52
Slika 33. Vrijednosti savojne čvrstoće kompozita s različitim brojem slojeva lanenih vlakana te njena minimalna granica propisana pravilnikom HRB-a [14]	52

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva biljnih i staklenih vlakana [6].....	10
Tablica 2. Normirane dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje u 3 točke [11].....	14
Tablica 3. Duljina (l) i razmak između oslonaca (L) kao funkcije debljine (h) [11]	15
Tablica 4. Iznosi širine (b) kao funkcija debljine (h) [11]	15
Tablica 5. Udio vlakana u kompozitu [13].....	20
Tablica 6. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje (kompozit s četiri sloja vlakana)	21
Tablica 7. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje (kompozit s pet slojeva vlakana)	22
Tablica 8. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje (kompozit sa šest slojeva vlakana)	22
Tablica 9. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje (kompozit sa sedam slojeva vlakana)	23
Tablica 10. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje (kompozit s osam slojeva vlakana)	23
Tablica 11. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje (kompozit s devet slojeva vlakana)	23
Tablica 12. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje (kompozit s deset slojeva vlakana)	24
Tablica 13. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (kompozit s četiri sloja vlakana)	24
Tablica 14. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (kompozit s pet slojeva vlakana)	26
Tablica 15. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (kompozit sa šest slojeva vlakana).....	28
Tablica 16. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (kompozit sa sedam slojeva vlakana).....	30
Tablica 17. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (kompozit s osam slojeva vlakana).....	32
Tablica 18. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (kompozit s devet slojeva vlakana).....	33
Tablica 19. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (kompozit s deset slojeva vlakana).....	35
Tablica 20. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje (kompozit s četiri sloja vlakana)	37
Tablica 21. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje (kompozit s pet slojeva vlakana)	37
Tablica 22. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje (kompozit sa šest slojeva vlakana)	38
Tablica 23. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje (kompozit sa sedam slojeva vlakana)	38
Tablica 24. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje (kompozit s osam slojeva vlakana)	39
Tablica 25. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje (kompozit s devet slojeva vlakana)	39
Tablica 26. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje (kompozit s deset slojeva vlakana)	39
Tablica 27. Rezultati savojnog ispitivanja kompozita s četiri sloja vlakana.....	40
Tablica 28. Rezultati savojnog ispitivanja (pet slojeva vlakana)	42
Tablica 29. Rezultati savojnog ispitivanja (šest slojeva vlakana)	44
Tablica 30. Rezultati savojnog ispitivanja (sedam slojeva vlakana).....	46

Tablica 31. Rezultati savojnog ispitivanja (osam slojeva vlakana)	47
Tablica 32. Rezultati savojnog ispitivanja (devet slojeva vlakana)	49
Tablica 33. Rezultati savojnog ispitivanja (deset slojeva vlakana).....	50
Tablica 34. Vrijednosti dobivene savojnim i međuslojnim ispitivanjem kompozita s različitim brojem slojeva vlakana [14]	53

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
b	mm	Širina
E_f	N/mm ²	Savojni modul elastičnosti
E_k	N/mm ²	Modul elastičnosti kompozita
E_m	N/mm ²	Modul elastičnosti matrice
E_o	N/mm ²	Modul elastičnosti ojačala
F	N	Sila
F_{\max}	N	Maksimalna sila
f	mm	Progib
f_{\max}	mm	Maksimalni progib
G_l	N/mm ²	Smični modul elastičnosti
h	mm	Debljina
h_{sr}	mm	Srednja debljina
L	mm	Razmak između oslonaca
l	mm	Duljina
m_{vl}	g	Masa vlakana
m_{vl}	g	Masa cijele ploče
V_c	%	Volumni udio kompozita
V_m	%	Volumni udio matrice
V_f	%	Volumni udio ojačala
ε	mm/mm	Istezanje
ρ_c	kg/m ³	Gustoća kompozita
ρ_m	kg/m ³	Gustoća matrice
ρ_f	kg/m ³	Gustoća ojačala
$\sigma_{m,s}$	N/mm ²	Savojna čvrstoća
σ_s	N/mm ²	Savojno naprezanje
τ	N/mm ²	Prividna međuslojna smična čvrstoća

SAŽETAK

U ovome radu istražena su savojna i međuslojna svojstva kompozita na bazi epoksidne smole ojačane različitim brojem slojeva biaksijalno orijentiranih lanenih vlakana. U sklopu projekta izrade ekološki prihvatljivoga katamarana PROeco, u tvrtki Marservis d.o.o., procesom vakuumske infuzije izrađeni su visokokvalitetni kompoziti s 40 % masenog udjela ojačala. Istražen je utjecaj broja slojeva vlakana na savojna i međuslojna svojstva kompozita. Dobiveni rezultati uspoređeni su sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova (HRB) za kompozite ojačane staklenim vlaknima. Rezultati pokazuju da propisane minimalne vrijednosti savojnog modula elastičnosti zadovoljavaju svi uzorci, minimalne vrijednosti savojne čvrstoće zadovoljavaju samo uzorci s četiri i sedam slojeva vlakana, dok vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće zadovoljava samo uzorak sa šest slojeva vlakana. Odstupanja od propisanih vrijednosti čvrstoće su od 0,57 do 6,85 %, a prividne međuslojne smične čvrstoće od 0,88 do 6,29 %.

Ključne riječi: biokompozit, kompozit s polimernom matricom, epoksidna smola, lanena vlakna, savojna čvrstoća, savojni modul elastičnosti, prividna međuslojna smična čvrstoća

SUMMARY

In this work, the bending and interlayer properties of epoxy based composites reinforced with a different number of layers of biaxially oriented flax fibers were investigated. As part of the project for the production of environmentally friendly catamaran PROeco, in the company Marservis d.o.o., high quality composites with 40 m.% fibers were made by vacuum infusion process. The influence of the number of fiber layers on the bending and interlaminar properties of composites was investigated. The obtained results were compared with the requirements of the Croatian Register of Shipping (CRS) for glass fibers reinforced composites. The results show that the prescribed minimum values of flexural modulus of elasticity are met by all samples, minimum values of flexural strength are met only by samples with four and seven layers of fibers, while the values of apparent interlaminar shear strength are satisfied only by sample with six layers of fibers. The deviation of flexural strength is between 0,57 and 6,85 %, whereas apparent interlaminar shear strength is between 0,88 and 6,29 % lower.

Key words: biocomposite, polymer matrix composite, epoxy resin, flax fibers, flexural strength, flexural modulus of elasticity, apparent interlaminar shear strength

1. UVOD

Velike količine nerazgradljivog otpada na odlagališta predstavljaju veliki problem današnjice. Iz tog razloga, prilikom razvoja novih materijala, velika pozornost usmjerena je na uporabu biorazgradljivih, ekološki prihvatljivih materijala. Osim zbog ekoloških propisa, materijali iz obnovljivih izvora sve su zanimljiviji i zbog ograničenih količina resursa za proizvodnju sintetskih materijala. Prirodni, biorazgradivi materijali sve više se koriste u različitim industrijama kao što su automobilska, nautička te građevinska industrija.

Kao alternativa u izradi brodova, u malim brodogradilištima, umjesto kompozita ojačanih staklenim vlaknima sve više se koriste kompoziti ojačani prirodnim vlaknima. Njihova mehanička svojstva usporediva su sa staklenim vlaknima te kvalitetnom izradom i pristupačnom cijenom mogu im konkurirati na tržištu. Uz to mogu se reciklirati čime se pokreće sekundarna prerada bilja koje bi inače završilo u biootpadu ili kompostu. Samim time dolazi do napretka poljoprivrede te do nastanka novih ogranaka zaduženih za izradu takvih vlakana. Radi male gustoće biljnih vlakana takvi kompoziti su puno lakši od kompozita ojačanih staklenim vlaknima čime se smanjuje potrošnja goriva kod plovila izrađenih od takvog materijala. Usprkos dobiti koja bi se postigla primjenom biljnih vlakana, u pravilniku HRB-a ovakvi kompoziti nisu predviđeni pa niti ne postoje propisana svojstva.

Najčešći problem kod kompozita ojačanih biljnim vlaknima je loše razvijen proces izrade kompozita što u konačnici rezultira lošom kvalitetom gotovog proizvoda. Loša kvaliteta gotovog proizvoda rezultat je slabe adhezije između hidrofobne matrice i hidrofilnih vlakana. Najčešća prirodna vlakna koja se koriste u izradi kompozita su lan, sisal, konoplja, juta i dr.

Tvrtka Marservis d.o.o. iz Kaštelira nositelj je EU-projekta izgradnje eko-katamarana PROeco kojim će se odgovoriti na ekološke izazove suvremenog društva i potrebe za pametnim i ekološki prihvatljivim transportnim rješenjima. Cilj projekta je izgradnja putničkog eko-katamarana od prirodnih materijala. U sklopu projekta izrađeni su kompoziti na bazi epoksidne smole ojačane različitim brojem (od 4 do 10) slojeva biaksijalno orijentiranih lanenih vlakana. Cilj ovog završnog rada je ispitati svojstva kompozita ojačanih lanenim vlaknima te istražiti mogu li takvi biokompoziti biti dobra alternativa klasičnim kompozitima ojačanim staklenim vlaknima. Dobivena svojstva mogu se usporediti jedino sa zahtjevima na svojstva kompozita ojačanih staklenim vlaknima prema Pravilniku HRB-a.

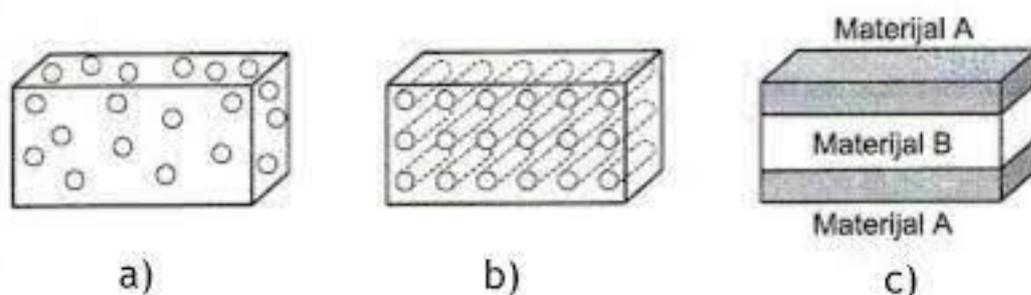
2. KOMPOZITNI MATERIJALI

2.1. Definicija i podjela kompozita

Kompozitni materijali ili kompoziti su materijali proizvedeni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Različitim tehnološkim postupcima kao što su laminiranje, istiskivanje, prešanje i dr., postižu se kombinacije svojstava koje nisu uobičajene za druge vrste materijala, poput krutosti, čvrstoće, tvrdoće, kemijske postojanosti, težine, ponašanja pri visokim temperaturama i dr. [1]

Uz povoljna mehanička svojstva kompozita, do izražaja dolazi i njihova otpornost na koroziju, jednostavno održavanje, površinska izdržljivost, vijek trajanja, te dobar omjer svojstava u odnosu na gustoću. Negativna strana ovakvih materijala njihovo je teško popravljjanje, još uvijek visoka cijena proizvodnje, nisu uvijek nadmoćniji nad metalnim materijalima (posebno pri visokim temperaturama), problemi pri konstruiranju i spajanju te nelinearno ponašanje. [2]

Glavna podjela kompozita je prema vrsti matrice, koja može biti metalna, keramička i polimerna. Struktura kompozita je heterogena, sastavljena od dvije ili više faza. Faze nastaju od metala, nemetala, kemijskih i intermetalnih spojeva koji nisu međusobno topljivi te mogu biti dispergirane ili kontinuirane unutar matrice. Osim prema vrsti matrice, podjela kompozita vrši se i prema vrsti ojačala. Prema tome kompoziti se dijele na kompozite ojačane česticama, kompozite ojačane vlaknima i strukturne kompozite, koji se dodatno dijele na slojevite kompozite i sendvič konstrukcije (Slika 1). [2]



Slika 1. Vrste kompozita: (a) ojačani česticama, (b) ojačani vlaknima i (c) slojeviti kompozit [1]

2.2. Komponente kompozita

Općenito, kompoziti su sastavljeni od matrice i ojačala. Ojačalo služi kao faza koja ojačava i nalazi se u manjoj količini, dok je matrica osnovni materijal, najčešće mekši [2], dok joj su glavne funkcije da prenosi opterećenje na vlakna, štiti vlakna od vanjskih utjecaja i daje oblik proizvodu.

Ukupno ponašanje kompozita ovisi o:

- svojstvu matrice i ojačala,
- veličini i rasporedu (raspodjeli) konstituenata,
- volumnom udjelu konstituenata,
- obliku konstituenata,
- prirodi i jakosti veze između konstituenata. [1]

2.2.1. Svojstva matrice

Osim povezivanja ojačala, matrica mora zadovoljiti niz drugih svojstava, poput žilavosti i duktilnosti kako bi prenijela opterećenje na vlakna i onemogućila napredovanje pukotine od prekinutih vlakana dalje kroz materijal. Ujedno ona štiti ojačala od okolnih utjecaja i mora biti čvrsta kako bi pridonijela sveukupnoj čvrstoći kompozita. Ovisno o temperaturi kojoj će kompozit biti izložen matrica mora imati i prikladno talište (polimerne matrice do 80 °C, matrice od nezasićene poliesterske smole do 315 °C). [1]

2.2.2. Svojstva ojačala

Dva su glavna načina ojačavanja kompozita – česticama i vlaknima. Disperzijom sitnih čestica koje usporavaju gibanje dislokacija dolazi do povećanja čvrstoće ili se tvore kompoziti s velikim česticama kojima nije glavna svrha osigurati čvrstoću nego utjecati na druga svojstva. Ojačavanje vlaknima je najefikasniji i najčešći način ojačavanja kompozita. O vrsti i materijalu ojačala ovisit će svojstva kompozitnoga materijala. Glavni zahtjevi za izbor ojačala su njihovo dobro vezivanje s matricom, netopljivost ojačala u matrici i da ne dođe do reakcije između ojačala i matrice te nastanka novih neočekivanih spojeva. [3]

2.3. Kompoziti s polimernom matricom

Prednost polimerne matrice, koja je strukturno kompleksnija od metalne i keramičke matrice, je niža cijena te bolja obradljivost. Zbog svoje lančane strukture i kovalentnih veza polimeri su puno otporniji na kemijske reakcije s okolnim medijem. Makromolekulski lanci polimera nastaju povezivanjem manjih molekula (monomera) u procesu zvanom polimerizacija. Stupanj polimerizacije, tj. broj monomernih jedinica u molekuli utječe na masu molekule, talište i čvrstoću. Što je stupanj veći, doći će do većeg povećanja čvrstoće, mase i tališta polimera, što je izrazito bitno kod primjene polimernoga materijala kao matrice. Polimer kao matrica ujedno određuje temperaturu primjene kompozita, pa se za visokotemperaturnu uporabu koriste poliimidi čija je gornja granica dugotrajne primjene oko 230 °C. Osim nižih temperatura primjene, nedostatak polimernih matrica je niža čvrstoća i niži modul elastičnosti. Za matricu kompozita najčešće se primjenjuju polimera iz skupine duromeri i plastomeri. [3]

2.3.1. Duromerne matrice

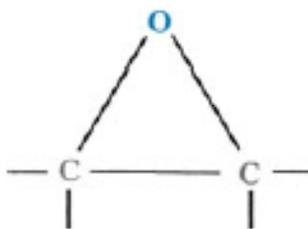
Duromeri su trodimenzionalno umreženi sintetski polimerni materijali nastali polimerizacijom dviju komponenta u kalupu. Postoje dve klase duromera – K1 (pomiješane komponente), čije je umrežavanje aktivirano kemijskim ili fizičkim putem (npr. doticaj sa zrakom, povišenje topline), i druga klasa K2 (odvojene komponente), čije umrežavanje počinje čim se pomiješaju. Za razliku od plastomera, duromeri zagrijavanjem ne mekšaju i ne tale se, već se razgrađuju, stoga nisu preradljivi. Zbog njihove umreženosti teško dolazi do međusobnoga klizanja molekula što duromere čini izrazito čvrstim i krutim. Proces umrežavanja provodi se pomoću topline, kemijskih učvršćivača, primjenom pritiska, izlaganjem mlazu elektrona, itd. Primjena vakuuma pri umrežavanju pridonosi boljoj kakvoći i povezanosti duromera s ojačalima. [3]

Izrada kompozita s duromernom matricom jednostavnija je i jeftinija u odnosu na kompozite s plastomernom matricom. Cijena alata je niska, a svojstva smole odlična su s obzirom na njezinu cijenu. Duromeri se mogu proizvoditi pri sobnoj temperaturi, imaju najviši modul elastičnosti od svih skupina polimera te su zbog umreženosti otporni na puzanje. Nedostatak rada s duromerom ograničeno je vrijeme ulijevanja budući da vrlo brzo očvršćuju te dolazi do skupljanja i zagrijavanja materijala zbog egzotermne reakcije tijekom umrežavanja. Skupljanje materijala ujedno uvjetuje i pojavu zaostalih naprezanja unutar samoga materijala.

Krhkiji su i manje otporni na udarni rad loma od plastomera te imaju slabu otpornost na umor materijala. Najčešći duromeri koji se koriste kao matrica su poliesterska i epoksidna smola. [3]

2.3.1.1. Epoksidna smola

Epoksidna smola jedan je od glavnih materijala matrice za izradu kompozita. Ona je duromer koji se sastoji od epoksidne grupe (jedan kisikov atom i dva ugljikova atoma) u kemijskoj strukturi (Slika 2). Do umrežavanja dolazi dodatkom katalizatora koji reagira s *epoksi-* i *hidroksi-* skupinama između susjednih lanaca. Najčešći katalizator je amino spoj. Opseg umrežavanja ovisan je o količini katalizatora koji dodajemo te njegovo povećanje utječe na krutost, čvrstoću i temperaturu staklastog prijelaza, no ne i na žilavost na koju se utječe dodavanjem plastomera. Često se koristi mnogo aditiva kako bi se poboljšala kakvoća i mehanička svojstva smole, npr. dodatak za razrjeđivanje, kako bi se smanjila njezina viskoznost, dodatak za povećanje fleksibilnosti, dodatak za zaštitu od UV zračenja i dr. Za vrijeme miješanja moguće je dodati i akceleratora kako bi se ubrzao proces umrežavanja smole. Proces umrežavanja je egzoterman stoga je potrebno paziti na količinu katalizatora i generirane topline kako ne bi došlo do razgradnje smole tijekom njezina ulijevanja. Epoksidne su smole skuplje od poliesterskih, no imaju znatno bolju otpornost na vlagu, manje skupljanje tijekom umrežavanja, što znači manja zaostala naprezanja, višu temperaturu uporabe i dobru povezanost s ojačalima. Prednost smole je modifikacija svojstava dodavanjem različitih dodataka ovisno o njezinim zahtjevima. Rad je s epoksidnom smolom je jednostavan i siguran budući da ispušta malo štetnih tvari (opasne u direktnome kontaktu s tijelom), premda je, za razliku od poliesterskih smola, od velikog značaja održati ispravan omjer komponenata koje se miješaju. Toplinski je i dimenzijski stabilna. Glavni nedostatak smole je mala otpornost na neke organske spojeve (organske kiseline i fenoli) i maksimalna temperatura primjene od oko 120 °C. Kod korištenja prirodnih vlakana kao ojačala uzima se u obzir to da su ojačala hidrofilna dok matrica hidrofobna. Vlakna vežu na sebe molekule vode te dolazi do njihova bubrenja, a dolazi do slabljenja adhezijskih veza između njih i matrice. Kako ne bi došlo do toga najbolji izbor za matricu kompozita ojačanog prirodnim vlaknima je epoksidna smola. [3]

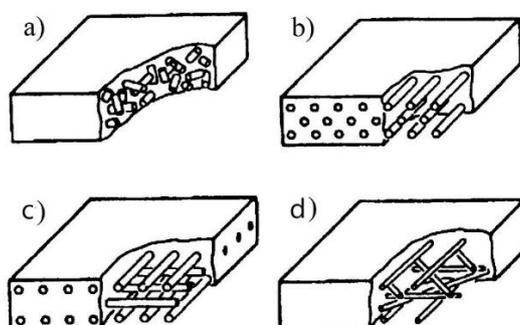


Slika 2. Epoksidna molekula [3]

2.4. Vlanknima ojačani kompoziti

Vlanknima ojačani kompoziti prenose i distribuiraju opterećenja preko matrice na vlakna pod uvjetom da je njihova međusobna veza jaka. Kombinacijom vlakana s osrednje duktilnom matricom nastaje materijal visoke čvrstoće i dobrih mehaničkih svojstava ovisno o području uporabe. Vlakna trebaju biti čvrsta, kruta, lagana, a također trebaju imati visoko talište. Izrazito je važno da materijal vlakana ima visoki specifični modul elastičnosti ili čvrstoću. [1]

Ovisno o njihovom promjeru vlaknasta ojačala dijelimo na žice, vlakna i viskere. Viskeri su niti čiji je omjer duljine i promjera iznimno velik. Ako je riječ o diskontinuiranim vlaknima, za svaku izvedbu vlakno-matrica postoji njihova efektivna duljina o kojoj ovisi ojačanje kompozita. Ako su vlakna kontinuirana, efektivna duljina znatno je premašena, pa su i svojstva materijala s takvim vlaknima vrlo anizotropna. U smjeru vlakana čvrstoća i krutost biti će maksimalni dok će u smjeru okomitom na njih biti minimalni. Osim toga, raspored ojačala u matrici može biti različit (Slika 3). [1]



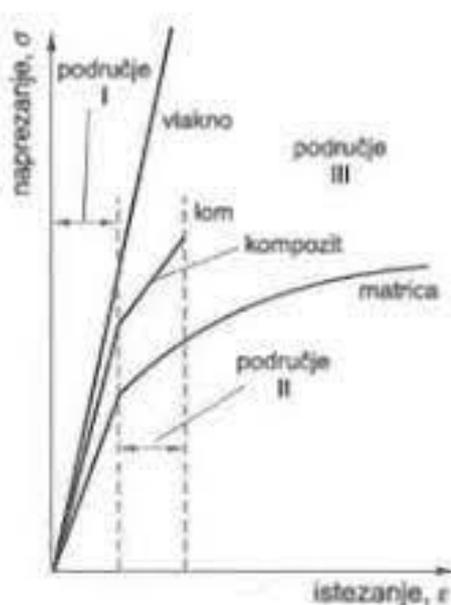
Slika 3. Raspored vlakana u matrici: (a) kratka, proizvoljno orijentirana, (b) duga, u jednom smjeru orijentirana, (c) duga, u dva okomita smjera orijentirana i (d) duga, isprepletena, proizvoljno orijentirana [4]

Poznavanjem volumnih udjela komponenti moguće je odrediti gustoću kompozita (jednadžba 1), ali i njegovu toplinsku i električnu vodljivost ako su vlakna kontinuirana i jednosmjerna. U slučaju jednoosno orijentiranih vlakana, djeluje li opterećenje u smjeru vlakana modul elastičnosti kompozita moguće je odrediti uz pomoć jednadžbe 2. [1]

$$\rho_c = V_m * \rho_m + V_f * \rho_f \quad (1)$$

$$E_c = V_m * E_m + V_f * E_f \quad (2)$$

Djelovanjem velikih napreznja dolazi do deformacije matrice te prestaje linearno ponašanje kompozita u dijagramu napreznja-istezanje (Slika 4). [1]



Slika 4. Dijagram napreznja-istezanje vlaknima ojačanog kompozita [1]

Kod jednoosno ojačanih kompozita, kada sila djeluje okomito na smjer vlakana, djelovanje jedne komponente neovisno je o djelovanju druge te je modul predvidljiv jednadžbom 3. Kako bi se dobila jednolika svojstva, vlakna se mogu slagati pod različitim kutovima u više slojeva. [1]

$$\frac{1}{E_k} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_o}{E_o} \quad (3)$$

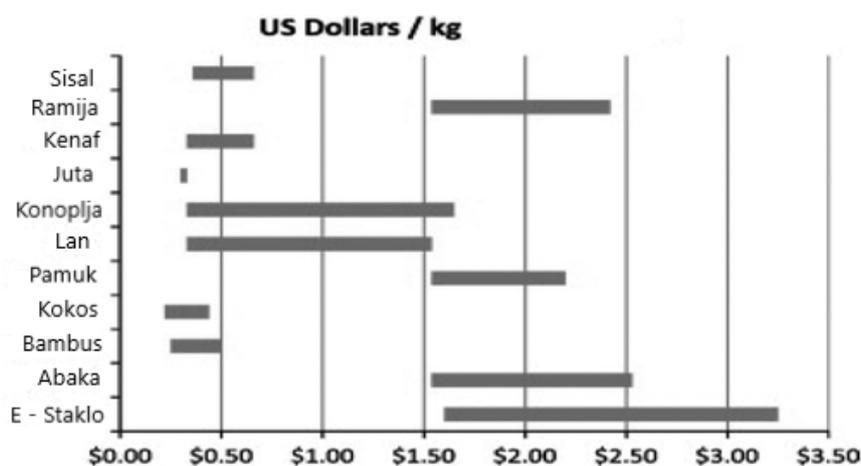
Stvarna krutost sustava većinom je manja od predviđene zakonima miješanja te najviše ovisi o adheziji između vlakana i matrice i ograničena je deformiranjem matrice. Što je viši

volumni udio vlakana, to je veća čvrstoća i krutost materijala. Ostala svojstva kao što su duktilnost, udarni rad loma, umor materijala i puzanje teže je predvidjeti. [1]

Najčešća vlakna koja se koriste u proizvodnji kompozita su aramidna, staklena, ugljična i borova vlakna. Sve više dolaze u uporabu i prirodna vlakna zbog njihove niske cijene, dostupnosti te širokoga spektra primjene. [3]

2.5. Prirodna ojačala

Ljudi odavno skupljaju prirodne materijale zbog njihovih vlakana te ih koriste u izradi užadi i tkanine. Razvojem društvene svijest sve se više širi područje njihove primjene, kao alternative sintetskim materijalima. Cijena i potrebna energija pri izradi takvih vlakana triput je manja od cijene staklenih vlakana (Slika 5), masa im je upola manja u odnosu na staklena vlakna te su puno manje opterećenje za okoliš (Slika 6). [5]



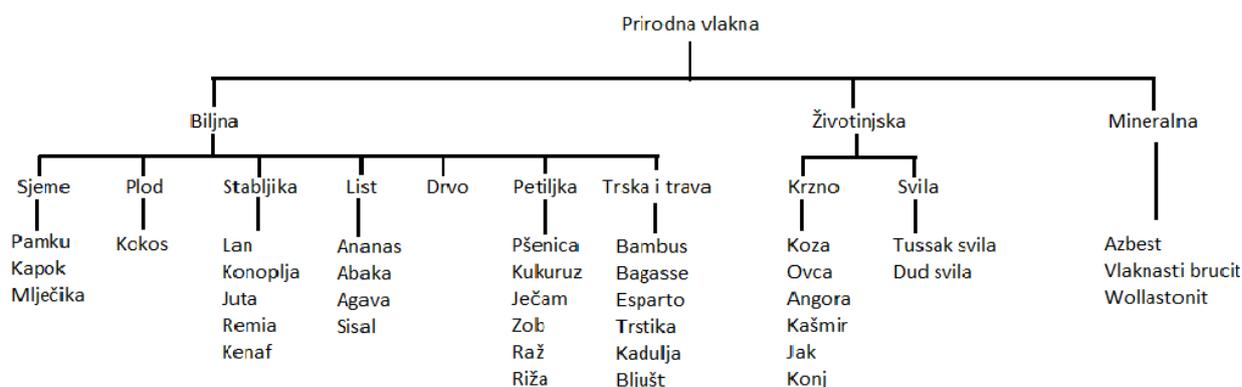
Slika 5. Cijena prirodnih i staklenih vlakana [5]



Slika 6. Usporedba prirodnih i staklenih vlakana [5]

Mnogi proizvođači automobila proizvode komponente automobila od kompozita ojačanih vlaknima kao što su lan, konoplja, kenaf ili sisal. Hidrofilna priroda prirodnih vlakana predstavlja veliki problem ako se ona koriste kao ojačala u kompozitu, budući da reagiraju s molekulama vode te bubre. Pri njihovoj primjeni najveći je problem njihova dimenzijska stabilnost, struktura te čvrstoća. [5]

Prirodna vlakna dijele se po podrijetlu nastanka (Slika 7). Dijelev se na biljna, životinjska i mineralna vlakna. Životinjska vlakna dobivaju se iz čahura životinja ili njihova krzna. Biljna vlakna potječu od različitih dijelova kao što su listovi, stabljika, sjeme, plod i dr. Pri izradi kompozita od biljnih vlakana najzastupljeniji su lan, konoplja, kenaf, juta i sisal. [6]



Slika 7. Podjela prirodnih vlakana

Mehanička svojstva kompozita ojačanih biljnim vlaknima pokazuju prihvatljive vrijednosti uzevši u obzir cijenu i potrošnju energije za njihovo dobivanje. Puno su sigurnija za uporabu, mogu se prerađivati i reciklirati. Najbolje rezultate pokazuju lanena vlakna koja u usporedbi sa staklenima pokazuju gotovo jednaka svojstva (Tablica 1). Kompoziti ojačani sisalom imaju jednako dobru otpornost na trošenje i trenje kao i kompoziti s mineralnim ojačalima. Prirodna vlakna se često tretiraju različitim lužinama kako bi im se poboljšala svojstva. Svi kompoziti s prirodnim vlaknima imaju odlična toplinsko-izolacijska svojstva te prigušuju vibracije. Ovisno o zahtjevima i izboru ojačala mogu se dobiti jednaka svojstva kao i kod uobičajenih kompozitnih materijala. [6]

Tablica 1. Mehanička svojstva biljnih i staklenih vlakana [6]

Vlakno	Vrsta vlakna	Gustoća, g/cm ³	Prekidna čvrstoća, MPa	Modul rasteznosti, GPa	Specifična čvrstoća, MPa/(g/cm ³)	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

2.5.1. Konoplja

Konoplja je podrijetlom iz Azije, a na području centralne Europe počela se uzgajati oko 400. godine prije Krista. Prednosti uzgoja konoplje su što ne treba biti špricana protiv različitih bolesti i kukaca, u tri mjeseca naraste do četiri metra, vraća hranjive tvari u zemlju te ima duboko korijenje koje je štiti od bolesti. Vlakna ove biljke (Slika 8) imaju slična svojstva lanenim vlaknima, a jedina im je prednost što imaju veću otpornost na vezivanje s vodom. Vlakna konoplje imaju visoku postojanost, ali malu istezljivost pri naprezanju. Jedna su od najčešće primjenjivanih biljnih vlakana i koriste se u tekstilnoj industriji, proizvodnji papira i kompozita, medicini i prehrambenoj industriji. [7]

**Slika 8. Vlakna od konoplje [7]**

2.5.2. Kenaf

Kenaf je ljetna biljka podrijetlom iz centralne Afrike, a danas se proširila i na područje tropske Azije. Otporna je na vrućine te u tri mjeseca naraste i do tri metra sa stabljikom promjera 3 - 5 cm. Njezina stabljika sastoji se od dviju vrsta vlakana - vanjskih, dugih i unutarnjih, kratkih (Slika 9). Vlakna su joj gruba, lomljiva i teška za obradu. Rastezna čvrstoća ovih vlakana manja

je nego kod konoplje i lana, nisu otporna na vlagu, kiseline i UV zračenje, ali imaju izrazito dobru otpornost na toplinu i vatru. Koriste se najviše u tekstilnoj, automobilskoj i građevinskoj industriji. [8]



Slika 9. Vlakna kenafa [8]

2.5.3. Sisal

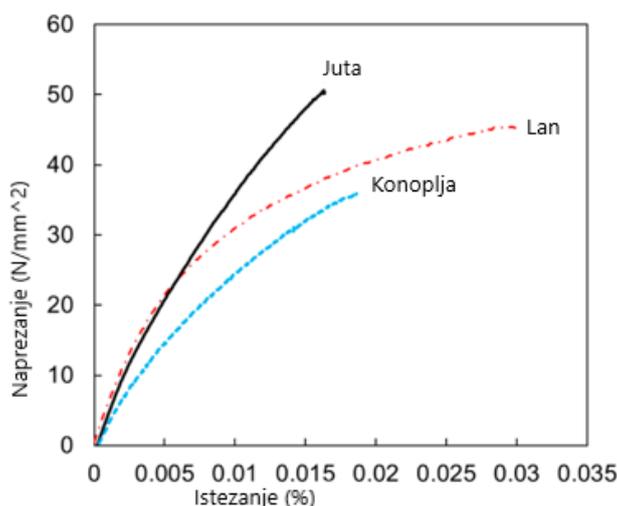
Sisal se uzgaja u tropskim zemljama Afrike, zapadne Indije te Dalekoga Istoka. Životni mu je vijek 7 – 10 godina s oko 200 – 250 listova, od kojih svaki može izdvojiti oko 1000 snopova vlakana. Listovi mogu narasti do dva metra duljine, a njihova su vlakna dugačka od 0,6 do 1,5 metara. U listu se nalaze tri vrste vlakana od kojih su najbitnija strukturna, koja se ne lome dok se odvajaju od lista (Slika 10). Vlakna sisala izrazito su čvrsta, izdržljiva, istežljiva te otporna na slanu vodu, pa se koriste pri izradi konopa. Kompoziti s ovim vlaknima imaju izrazito dobra klizna svojstva. Ova vlakna nisu otporna na svjetlost te im s povišenjem temperature opada rastezna čvrstoća, modul i žilavost. [9]



Slika 10. Sisal [9]

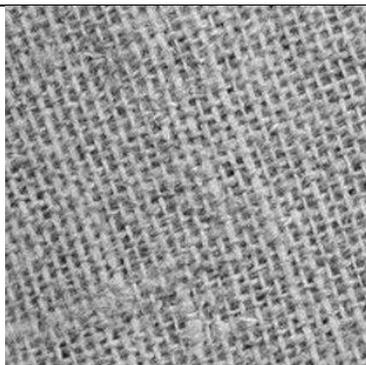
2.5.4. Lan

Lan koji se uzgaja za vlakna sadi se u zemljama umjerene klime kao što su Nizozemska, Španjolska, Francuska, Belgija, Kina i SAD. Njegova su vlakna najstariji izvor tekstila koji se koristio te je u moderno doba postavio standarde razmjene ovakvih vrsta vlakana. Može narasti 80 – 150 cm u 80 – 110 dana te se gotovo 75 % visine biljke može iskoristiti za izradu vlakana. Duljina vlakana varira 5 – 80 cm te se tek njihovom preradom dobivaju dugačka vlakna spremna za korištenje. Vlakna u obliku niti izvlače se iz kožnatoga dijela njegove stabljike u kojoj su složena u uzdužne vitke snopove oko srednjega drvenoga cilindra. Lanena su vlakna mekana, sjajna i fleksibilna, mnogo su jača od pamučnih, no nisu toliko istežljiva. Od svih biljnih vlakana, lanena vlakna daju najbolju kombinaciju mehaničkih svojstava (Slika 11). [10]



Slika 11. Statičko rastezno ispitivanje prirodnih vlakana [10]

Danas se lanena vlakna najviše koriste u izradi kompozita za automobilsku, zrakoplovnu i brodogradilišnu industriju. Tijekom izrade kompozita koriste se tkanja (Slika 12) napravljena od lanenih vlakana koja se zatim slažu u više slojeva kako bi se dobila bolja svojstva. [10]

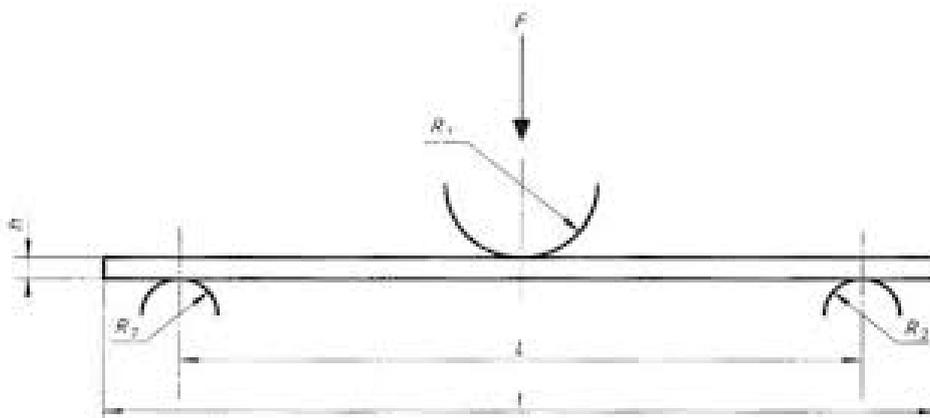


Slika 12. Tkanje lana [10]

2.6. Mehanička svojstva

2.6.1. Savojna čvrstoća i savojni modul

Savojna čvrstoća mehaničko je svojstvo koje nam prikazuje otpornost materijala na savojno opterećenje. Savojni modul prikazuje omjer naprezanja i istežanja uzrokovanog savijanjem. Metodom ispitivanja u tri točke zadani su radijusi valjaka prema normi, gdje radijus r_1 pritiskoga valjka iznosi $5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, a radijus r_2 , ovisan o debljini uzorka koji je deblji od 3 mm , iznosi $5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ (Slika 13). Norma određuje maksimalnu dopuštenu pogrešku izmjerenih sila i progiba od $\pm 1 \%$ mjernoga područja. Na početku ispitivanja, zbog mogućih pomicanja pritiskoga valjka, primijenjena je početna sila, kako bi se korigirao početni progib. [11]



Slika 13. Shematski prikaz savojnog ispitivanja [11]

Kod savojnog ispitivanja normirane dimenzije ispitnog tijela podijeljene su u pet klasa (Tablica 2). Prema normi debljina ispitnog tijela na sredini 1/3 ispitnog tijela sa svake strane ne smije odstupati više od 2 % središnje debljine, dok širina ne smije odstupati više od 3 % po cijelome presjeku (kvadratni oblik, bez zaobljenih rubova). Zbog različitih debljina ispitnih tijela dobivenih korištenjem različitoga broja slojeva tkanja u ovome ispitivanju koristit će se ispitna tijela dimenzije prema tablici 3 i tablici 4. [11]

Tablica 2. Normirane dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje u 3 točke [11]

Materijal	Duljina [mm]	Razmak između oslonaca [mm]	Širina [mm]	Debljina [mm]
Klasa I (diskontinuirani vlaknom ojačani plastomeri)	80	64	10	4
Klasa II (polimeri ojačani tkanjima i tkaninom i njihova kombinacija (DMC ¹ , SMC ² , BMC ³ ...))	80	64	15	4
Klasa III (poprečni (90°) jednosmjerni kompoziti; neusmjereni (0°) i višesmjerni kompoziti s $5 < E_{f1}/G_{13} \leq 15$ (npr. kompoziti sa staklenim vlaknima))	60	40	15	2
Klasa IV (neusmjereni (0°) i višesmjerni kompoziti s $15 < E_{f1}/G_{13} \leq 50$ (npr. kompoziti s karbonskim vlaknima))	100	80	15	2
Tolerancije	- 0 + 10	± 1	± 0,5	± 0,2

¹ DMC - Dough Molding Compound

² SMC – Sheet Molding Compound

³ BMC - Bulk molding compound

Gdje je:

E_f – savojni modul elastičnosti

G_1 – smični modul elastičnosti.

Tablica 3. Duljina (l) i razmak između oslonaca (L) kao funkcije debljine (h) [11]

Materijal	L/h	l/h
Klasa I	16	20
Klasa II	16	20
Klasa III	20	30
Klasa IV	40	50

Tablica 4. Iznosi širine (b) kao funkcija debljine (h) [11]

Debljina [mm]	Širina [mm]	
	Klasa I	Klasa II, III i IV
$1 < h \leq 3$	25	15
$3 < h \leq 5$	10	15
$5 < h \leq 10$	15	15
$10 < h \leq 20$	20	30
$20 < h \leq 35$	35	50
$35 < h \leq 50$	50	80

Prije početka svakog ispitivanja pomičnim mjerilom mjere se točne dimenzije ispitnih tijela koje se unose u računalni program. Ispitno tijelo se postavlja tako da pritisni valjak pritišće središte ispitnog tijela. Nakon što je ispitno tijelo ispitano, u programu je zabilježena njezina maksimalna sila te je izračunata savojna čvrstoća prema izrazu 4. [11]

Savojna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$\sigma_{mf} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}, \quad (4)$$

gdje je:

- σ_{mf} [N/mm²] – savojna čvrstoća,
- L [mm] – razmak između oslonaca,
- h [mm] – debljina ispitnoga tijela,
- b [mm] – širina ispitnoga tijela. [11]

Pripadajuća naprezanja moguće je izračunati ovom formulom:

$$\sigma_f = \frac{3*F*L}{2*b*h^2}, \quad (5)$$

gdje je:

- σ_f [N/mm²] – savojno naprezanje,
- F [N] – zadana sila. [11]

Za izračun istežanja kod savijanja koristi se ova formula:

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

gdje je:

- ε [mm/mm] – istežanje uslijed savojnoga opterećenja,
- f [mm] – progib ispitnoga tijela. [11]

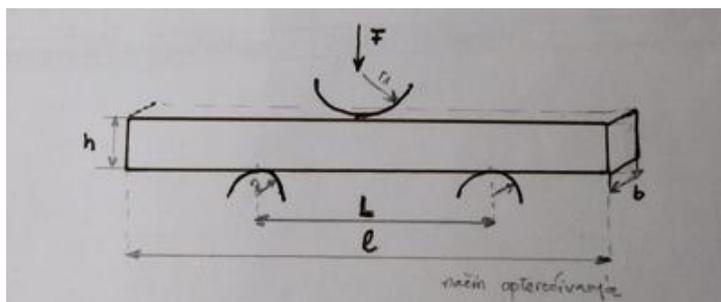
Modul elastičnosti (E_f) dobiven je aproksimacijom krivulje linearnim pravcem, između 10 i 100 N, u programu TrapeziumX. Modul elastičnosti nagib je toga aproksimiranoga pravca. [11]

2.6.2. *Prividna međuslojna smična čvrstoća*

Prividna međuslojna smična čvrstoća mehaničko je svojstvo koje nam pokazuje kvalitetu graničnih površina (međuslojeva). Ovisna je o čvrstoći veza između polimerne

matrice i vlakana, ukupnoj veličini dodirnih površina vlakana i njihovim adhezijskim svojstvima. Dobrom vezom između vlakana i matrice osiguran je potpuni prijenos vanjskih opterećenja s matrice na vlakna te je takva svojstva potrebno osigurati duž cijeloga ispitnoga tijela. Dobra adhezijska svojstva utjecat će na postizanje tražene prividne međuslojne smične čvrstoće. [12]

Prema normi radijus r_1 pritisknoga valjka mora iznositi $5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, a radijus oslonaca $2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ i oboje moraju biti širi od ispitnog tijela (Slika 14). [12]



Slika 14. Smično ispitivanje [12]

Razmak između oslonaca određuje se iz srednje vrijednosti debljine ispitnih tijela uzorka h_{sr} prema izrazu:

$$L = 5 * h_{sr}. \quad (7)$$

Odstupanje razmaka između oslonaca ne smije biti veće od $\pm 0,3 \text{ mm}$. [12]

Izrezana ispitna tijela moraju biti ravna i bez prisutnih uvijanja, a površina i rubovi bez prisustva pogrešaka. Debljina ispitnih tijela po cijeloj površini treba biti unutar $\pm 5 \%$ debljine, a razlika u širini ispitnih tijela ne veća od $0,2 \text{ mm}$. Prije postavljanja potrebno je na sredini izmjeriti širinu i debljinu ispitnog tijela i pustiti da pritiski valjak tijekom testiranja djeluje na sredinu. Za vrijeme ispitivanja treba zabilježiti maksimalnu silu ili silu loma i pomoću nje izračunati prividnu međuslojnu smičnu čvrstoću prema izrazu:

$$\tau = \frac{3 * F_{max}}{4 * b * h}. \quad (8)$$

U izrazu je:

τ [N/mm²] – prividna međuslojna smična čvrstoća,

F_{\max} [N] – maksimalna sila,

h [mm] – debljina ispitnoga tijela,

b [mm] – širina ispitnoga tijela. [12]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj ispitivanja kompozita ojačanih lanenim vlaknima je utvrđivanje njihovih mehaničkih svojstava i njihova usporedba s kompozitima ojačanim staklenim vlaknima po HRB normi, utvrđivanje kvalitete procesa izrade ovakvoga materijala i mogućnosti njegove primjene u brodogradnji.

3.1. Materijali

U eksperimentalnom dijelu izrađen je kompozit od epoksidne smole ojačane lanenim vlaknima. Kompozit je izrađen vakuumskom infuzijom u tvrtki Marsevis d.o.o. Za izradu kompozita korištena je smola Infugreen 810 (Sicomina, Francuska), dvokomponentna epoksidna smola niske viskoznosti. Radna temperatura ove smole je do 100 °C, proizvodi se s oko 38 % ugljika biljnog podrijetla i ima manji utjecaj na okoliš od uobičajenih epoksidnih sustava. Korištena su lanena vlakna AmpliTEX 5042 (Bcomp, Švicarska), biaksialnog tkanja pod kutom od 90° (roving), gustoće 1350 kg/m³. Proces vakuumске infuzije proveden je pri temperaturi od 29,8 °C, relativne vlažnosti od 42 % i vakuuma 0,9. Za potrebe eksperimenta izrađene su ploče s 4, 5, 6, 7, 8, 9 i 10 slojeva vlakana. Maseni udio vlakana u kompozitu dobiven je vaganjem vlakana prije ugradnje i vaganjem gotovog kompozita prema izrazu (9). Pregled vrijednosti za sve ispitane kompozite je u tablici 5.

$$\text{udio vlakana} = \frac{m_{vl}}{m_p} * 100 \% \quad (9)$$

Gdje su:

m_{vl} [g] – masa vlakana

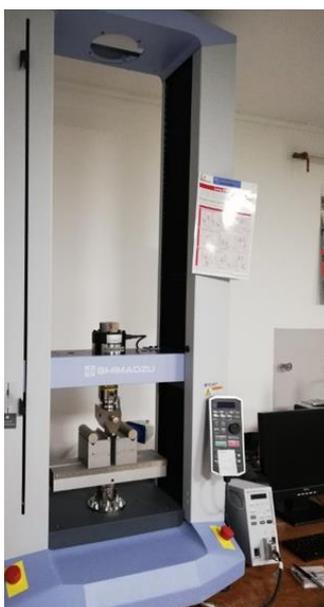
m_p [g] – masa cijele ploče

Tablica 5. Udio vlakana u kompozitu [13]

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

3.2. Ispitivanja prividne međuslojna smična čvrstoće

Ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće provedeno je prema normi HRN EN ISO 14130:1997 metodom kratke grede na sedam kompozita s različitim brojem slojeva vlakana. Ispitivanje je provedeno na univerzalnoj kidalici SHIMADZU AGS-X (Slika 15), a rezultati su bilježeni uz pomoć programa TrapeziumX. Mjerno područje ispitivanja je 0 – 50000 N, a brzina ispitivanja 5 mm/min. Sustav za očitavanje sile smije imati pogrešku manju od ± 1 % mjerne skale.

**Slika 15. SHIMADZU AGS-X kidalica**

Prema navedenoj normi dimenzije ispitnih tijela određene su srednjom vrijednosti debljine uzorka ispitnih tijela h_{sr} . Pritom se duljina l određuje prema:

$$l = 10 * h_{sr}, \quad (9)$$

dok se širina b određuje prema:

$$b = 5 * h_{sr}. \quad (10)$$

U tablici 6, tablici 7, tablici 8, tablici 9, tablici 10, tablici 11 i tablici 12 prikazane su dimenzije ispitnih tijela te izračunata vrijednost razmaka između oslonaca.

Tablica 6. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje (kompozit s četiri sloja vlakana)

Ispitno tijelo	Debljina [mm]	Širina [mm]	Razmak oslonaca [mm]
4-1	3,84	22,40	20,00
4-2	3,94	22,38	20,00
4-3	3,98	22,26	20,00
4-4	3,94	22,40	20,00
4-5	3,94	22,34	20,00
4-6	3,88	22,40	20,00
4-7	3,90	22,30	20,00
4-8	3,70	22,18	20,00

Tablica 7. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje (kompozit s pet slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Debljina [mm]	Širina [mm]	Razmak oslonaca [mm]
5-1	4,34	22,50	22,00
5-2	4,34	23,46	22,00
5-3	4,22	23,34	22,00
5-4	4,26	23,42	22,00
5-5	4,42	23,32	22,00
5-6	4,34	23,32	22,00
5-7	4,28	23,30	22,00
5-8	4,28	23,32	22,00
5-9	4,36	23,28	22,00
5-10	4,32	23,26	22,00

Tablica 8. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje (kompozit sa šest slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Debljina [mm]	Širina [mm]	Razmak oslonaca [mm]
6-1	5,70	27,90	28,00
6-2	5,36	27,80	28,00
6-3	5,46	28,00	28,00
6-4	5,68	27,96	28,00
6-5	5,42	27,84	28,00
6-6	5,68	27,96	28,00
6-7	5,62	27,94	28,00
6-8	5,50	27,90	28,00

Tablica 9. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje (kompozit sa sedam slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Debljina [mm]	Širina [mm]	Razmak oslonaca [mm]
7-1	6,60	33,00	34,00
7-2	6,76	33,00	34,00
7-3	6,56	33,14	34,00
7-4	6,48	33,04	34,00
7-5	6,52	33,04	34,00
7-6	6,66	32,96	34,00
7-7	6,78	33,18	34,00

Tablica 10. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje (kompozit s osam slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Debljina [mm]	Širina [mm]	Razmak oslonaca [mm]
8-1	7,94	38,52	38,00
8-2	7,0	38,44	38,00
8-3	7,94	38,58	38,00
8-4	7,54	38,76	38,00
8-5	7,66	38,56	38,00
8-6	7,54	38,50	38,00
8-7	7,46	38,48	38,00

Tablica 11. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje (kompozit s devet slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Debljina [mm]	Širina [mm]	Razmak oslonaca [mm]
9-1	9,62	42,68	44,00
9-2	8,48	42,68	44,00
9-3	8,48	42,68	44,00
9-4	8,52	42,00	44,00
9-5	8,64	42,70	44,00
9-6	8,64	42,88	44,00

Tablica 12. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje (kompozit s deset slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Debljina [mm]	Širina [mm]	Razmak oslonaca [mm]
10-1	10,00	42,76	48,00
10-2	9,34	42,72	48,00
10-3	9,34	42,78	48,00
10-4	9,76	42,78	48,00
10-5	9,52	42,80	48,00
10-6	9,76	42,80	48,00

3.3. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće

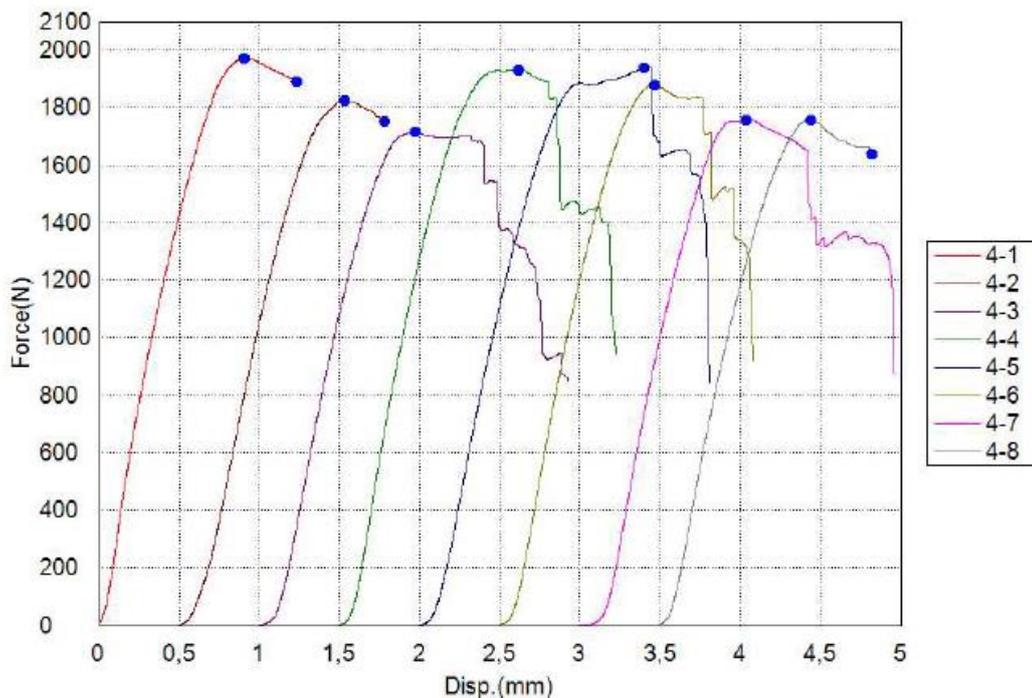
3.3.1. Kompozit s četiri sloja vlakana

U tablici 13 prikazani su rezultati maksimalne sile i progiba te izračunate vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće.

Tablica 13. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (kompozit s četiri sloja vlakana)

Ispitno tijelo	Maksimalna sila [N]	Maksimalni progib [mm]	Međuslojna čvrstoća [N/mm ²]
4-1	1972,76	0,91	17,20
4-2	1826,51	1,03	15,54
4-3	1714,68	0,97	14,52
4-4	1932,07	1,12	16,42
4-5	1940,85	1,40	16,54
4-6	1879,13	0,97	16,22
4-7	1756,49	1,04	15,15
4-8	1756,47	0,94	16,05
Srednja vrijednost			15,96
Standardna devijacija			0,85081

Na slici 16 prikazan je dijagram sile i progiba dobiven u programu TrapeziumX, nakon provedenog ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće. U dijagramu su prikazane krivulje osam ispitnih tijela, kompozita s četiri sloja lanenih vlakana.



Slika 16. Dijagram sila - progib dobiven nakon provedenog ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (kompozit s četiri sloja vlakana)

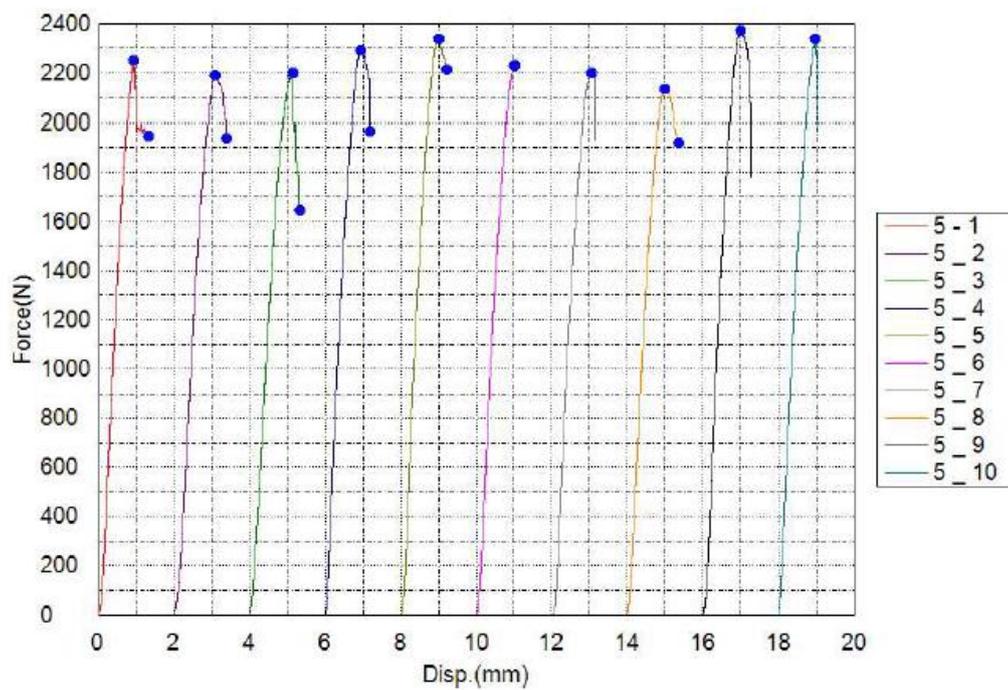
3.3.2. Kompozit s pet slojeva vlakana

U tablici 14 prikazani su rezultati maksimalne sile i progiba te izračunate vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće.

Tablica 14. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (kompozit s pet slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Maksimalna sila [N]	Maksimalni progib [mm]	Međuslojna čvrstoća [N/mm ²]
5-1	2251,36	0,93	17,29
5-2	2190,65	1,10	16,14
5-3	2198,86	1,15	16,74
5-4	2292,55	0,95	17,23
5-5	2336,87	1,01	17,00
5-6	2229,03	1,01	16,52
5-7	2198,66	1,05	16,54
5-8	2134,34	0,99	16,04
5-9	2370,86	1,00	17,52
5-10	2336,51	0,97	17,44
Srednja vrijednost			16,85
Standardna devijacija			0,53

Na slici 17 prikazan je graf sile i progiba dobiven međuslojnim ispitivanjem u programu TrapeziumX.



Slika 17. Graf sila - progib kod ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (pet slojeva vlakana)

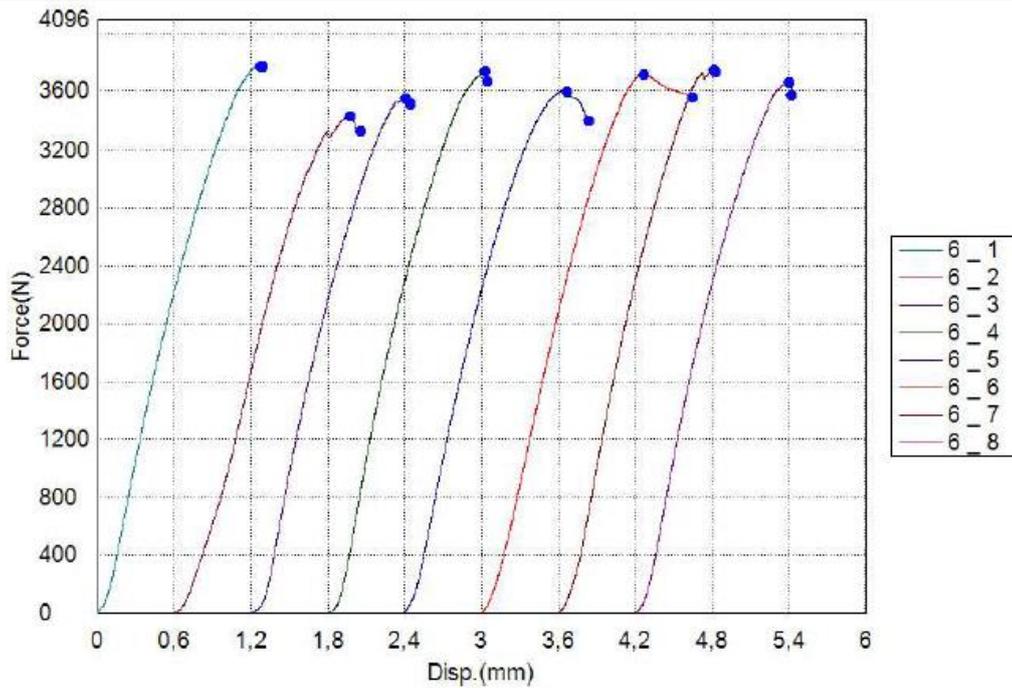
3.3.3. Kompozit sa šest slojeva vlakana

U tablici 15 prikazani su rezultati maksimalne sile i progiba te izračunate vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće.

Tablica 15. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (kompozit sa šest slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Maksimalna sila [N]	Maksimalni progib [mm]	Međuslojna čvrstoća [N/mm ²]
6-1	3770,97	1,27	17,78
6-2	3431,92	1,37	17,27
6-3	3544,70	1,20	17,39
6-4	3735,57	1,23	17,64
6-5	3596,44	1,27	17,88
6-6	3714,36	1,27	17,54
6-7	3741,73	1,22	17,87
6-8	3652,65	1,20	17,84
Srednja vrijednost			17,65
Standardna devijacija			0,23

Na slici 18 prikazan je graf sile i progiba dobiven međuslojnim ispitivanjem u programu TrapeziumX.



Slika 18. Graf sila - progib kod ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (šest slojeva vlakana)

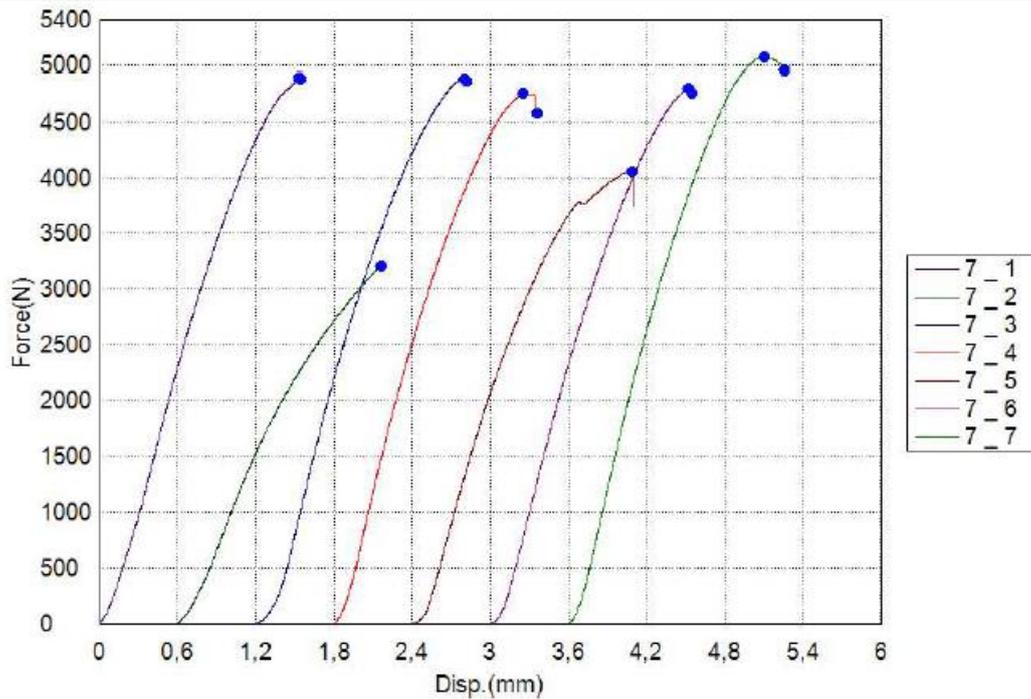
3.3.4. Kompozit sa sedam slojeva vlakana

U tablici 16 prikazani su rezultati maksimalne sile i progiba te izračunate vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće. Ispitna tijela 7-2 i 7-5 nisu uzeti u proračun središnjih vrijednosti zbog loše povezanosti matrice i ojačala.

Tablica 16. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (kompozit sa sedam slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Maksimalna sila [N]	Maksimalni progib [mm]	Međuslojna čvrstoća [N/mm ²]
7-1	4888,68	1,54	16,83
7-2	3209,42	1,56	10,79
7-3	4878,84	1,60	16,83
7-4	4753,20	1,45	16,65
7-5	4058,53	1,69	14,13
7-6	4802,87	1,52	16,41
7-7	5071,08	1,50	16,91
Srednja vrijednost			16,73
Standardna devijacija			0,20

Na slici 19 prikazan je graf sile i progiba dobiven međuslojnim ispitivanjem u programu TrapeziumX.



Slika 19. Graf sila - progib kod ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (sedam slojeva vlakana)

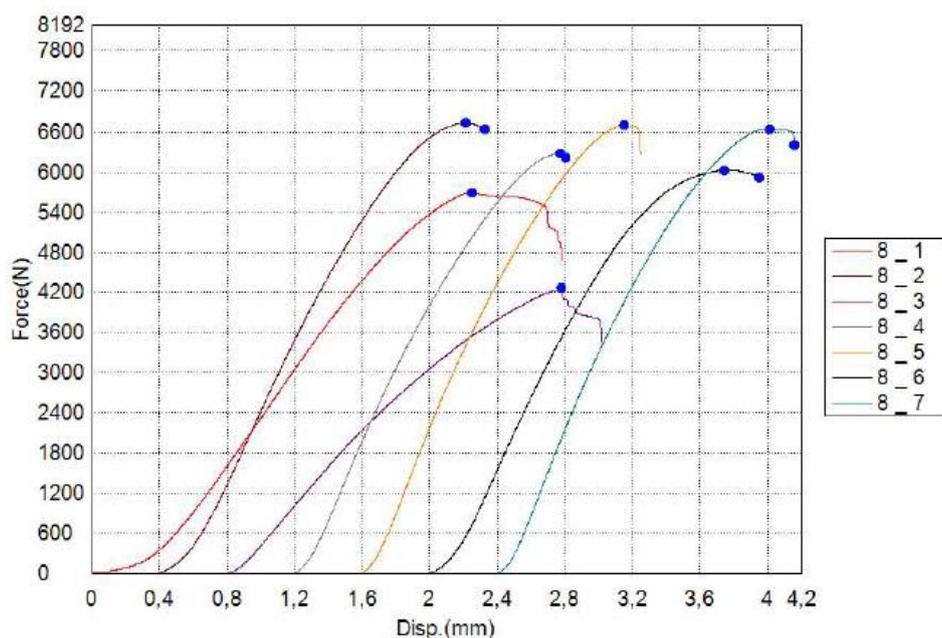
3.3.5. Kompozit s osam slojeva vlakana

U tablici 17 prikazani su rezultati maksimalne sile i progiba te izračunate vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće. Ispitna tijela 8-1 i 8-3 nisu uzeti u proračun središnjih vrijednosti zbog loše povezanosti matrice i ojačala.

Tablica 17. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (kompozit s osam slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Maksimalna sila [N]	Maksimalni progib [mm]	Međuslojna čvrstoća [N/mm ²]
8-1	5700,14	2,25	13,98
8-2	6740,86	1,81	17,08
8-3	4263,12	1,98	10,44
8-4	6279,65	1,57	16,12
8-5	6709,06	1,55	17,04
8-6	6028,87	1,75	15,58
8-7	6654,25	1,61	17,39
Srednja vrijednost			16,53
Standardna devijacija			0,76

Na slici 20 prikazan je graf sile i progiba dobiven međuslojnim ispitivanjem u programu TrapeziumX.

**Slika 20. Graf sila - progib kod ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (osam slojeva vlakana)**

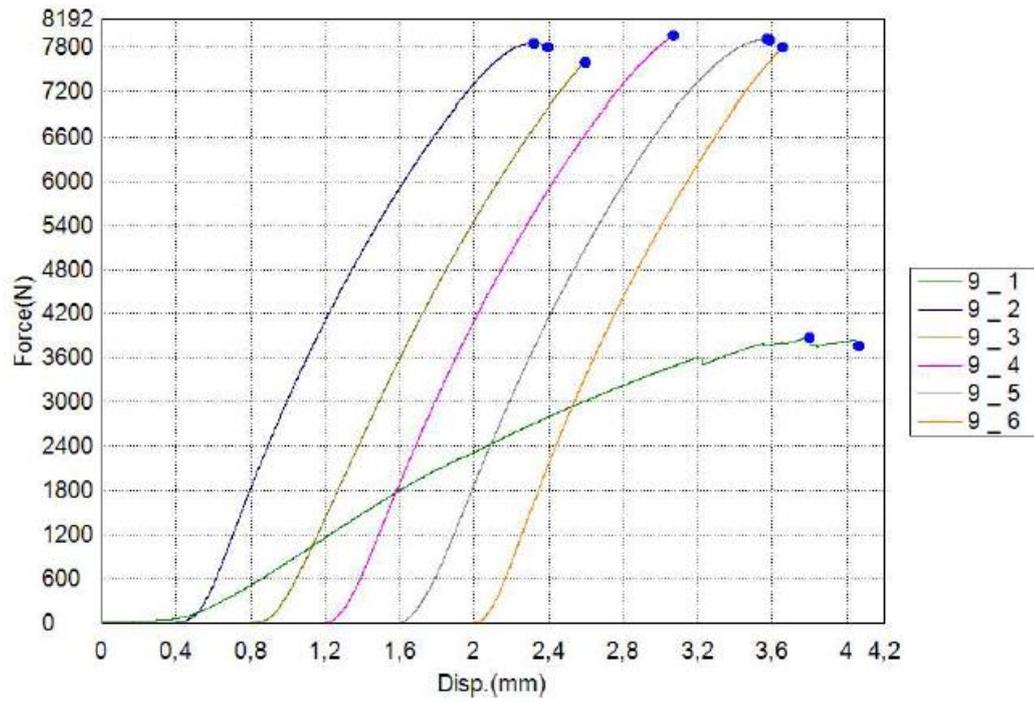
3.3.6. Kompozit s devet slojeva vlakana

U tablici 18 prikazani su rezultati maksimalne sile i progiba te izračunate vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće. Ispitno tijelo 9-1 nije uzet u proračun središnjih vrijednosti zbog loše povezanosti matrice i ojačala.

Tablica 18. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (kompozit s devet slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Maksimalna sila [N]	Maksimalni progib [mm]	Međuslojna čvrstoća [N/mm ²]
9-1	3876,63	3,80	7,08
9-2	7857,43	1,92	16,28
9-3	7603,00	1,80	15,76
9-4	7957,63	1,87	16,68
9-5	7914,16	1,97	16,09
9-6	7800,89	1,66	15,79
Srednja vrijednost			16,12
Standardna devijacija			0,38

Na slici 21 prikazan je graf sile i progiba dobiven međuslojnim ispitivanjem u programu TrapeziumX.



Slika 21. Graf sila - progib kod ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (devet slojeva vlakana)

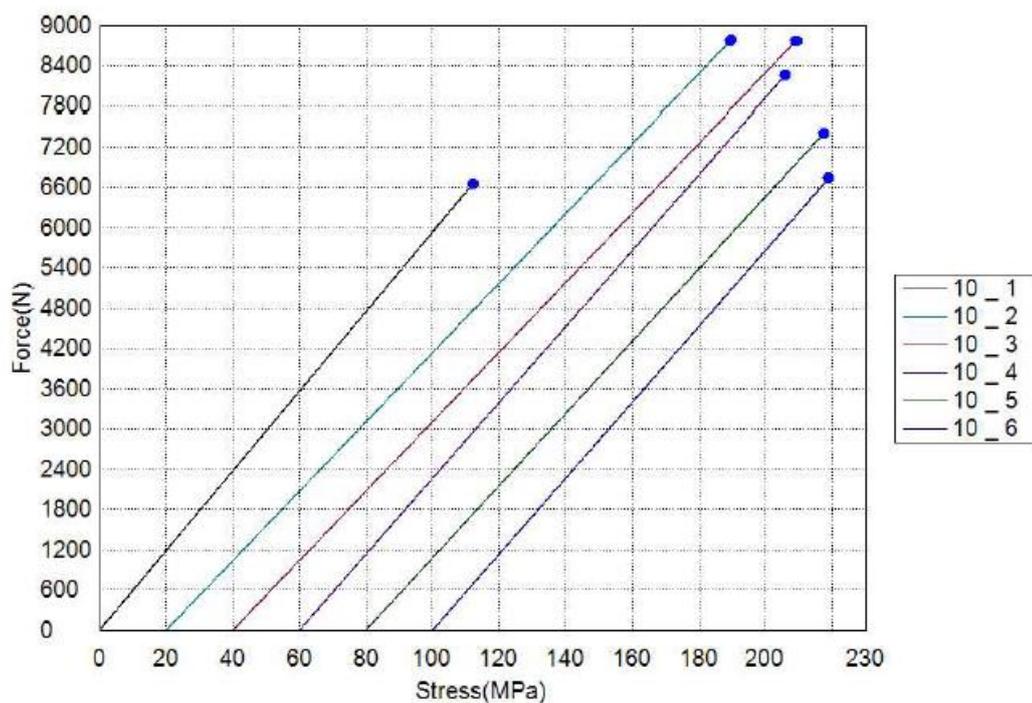
3.3.7. Kompozit s deset slojeva vlakana

U tablici 19 prikazani su rezultati maksimalne sile i progiba te izračunate vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće. Ispitna tijela 10-1, 10-5 i 10-6 nisu uzeti u proračun središnjih vrijednosti zbog loše povezanosti matrice i ojačala.

Tablica 19. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (kompozit s deset slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Maksimalna sila [N]	Maksimalni progib [mm]	Međuslojna čvrstoća [N/mm ²]
10-1	6667,27	2,79	11,69
10-2	8777,75	2,25	16,50
10-3	8772,57	2,09	16,47
10-4	8256,56	2,09	14,83
10-5	7415,00	2,08	13,65
10-6	6738,19	2,47	12,10
Srednja vrijednost			15,93
Standardna devijacija			0,96

Na slici 22 prikazan je graf sile i progiba dobiven međuslojnim ispitivanjem u programu TrapeziumX.

**Slika 22. Graf sila - progib kod ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće (deset slojeva vlakana)**

3.4. Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti

Ispitivanje je provedeno na kitalici SHIMADZU (Slika 23), a rezultati su bilježeni u programu TrapeziumX. Ispitivanje na svih sedam kompozita vršilo se brzinom od 5 mm/min s mjernim područjem kitalice 0 – 50000 N. Ispitivanje je provedeno prema normi HRN EN ISO 14125:1998. Dopušteno odstupanje od brzine 5 mm/min iznosi $\pm 20\%$ zadane brzine. [12]



Slika 23. Prikaz savojnoga ispitivanja

Prema tablici 2 korišteni kompozit spada u 2. klasu budući da je ojačan lanenim vlaknima i prema tome u tablici 3. su određene dimenzije ispitnih tijela.

U tablici 20, tablici 21, tablici 22, tablici 23, tablici 24, tablici 25 i tablici 26 prikazane su dimenzije ispitnih tijela kompozita ojačanih lanenim vlaknima te razmak između oslonaca.

Tablica 20. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje (kompozit s četiri sloja vlakana)

Ispitno tijelo	Debljina [mm]	Širina [mm]	Razmak oslonaca [mm]
4-1	3,98	14,92	60,00
4-2	3,92	14,84	60,00
4-3	3,86	14,74	60,00
4-4	3,84	14,94	60,00
4-5	3,96	14,80	60,00
4-6	3,78	14,88	60,00
4-7	3,76	14,82	60,00
4-8	3,68	14,84	60,00
4-9	3,68	14,86	60,00
4-10	3,82	14,82	60,00

Tablica 21. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje (kompozit s pet slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Debljina [mm]	Širina [mm]	Razmak oslonaca [mm]
5-1	4,52	15,24	70,00
5-2	4,42	15,02	70,00
5-3	4,58	15,18	70,00
5-4	4,46	15,00	70,00
5-5	4,56	15,00	70,00
5-6	4,52	15,12	70,00
5-7	4,40	15,06	70,00
5-8	4,46	14,96	70,00
5-9	4,42	15,02	70,00
5-10	4,30	15,04	70,00

Tablica 22. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje (kompozit sa šest slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Debljina [mm]	Širina [mm]	Razmak oslonaca [mm]
6-1	5,76	15,24	90,00
6-2	5,60	15,00	90,00
6-3	5,68	15,08	90,00
6-4	5,60	15,14	90,00
6-5	5,64	15,08	90,00
6-6	5,64	15,06	90,00
6-7	5,78	15,16	90,00
6-8	5,58	15,00	90,00

Tablica 23. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje (kompozit sa sedam slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Debljina [mm]	Širina [mm]	Razmak oslonaca [mm]
7-1	6,46	14,98	106,00
7-2	6,62	15,04	106,00
7-3	6,70	15,02	106,00
7-4	6,72	15,00	106,00
7-5	6,66	14,94	106,00
7-6	6,64	14,76	106,00
7-7	6,60	15,00	106,00
7-8	6,78	14,96	106,00

Tablica 24. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje (kompozit s osam slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Debljina [mm]	Širina [mm]	Razmak oslonaca [mm]
8-1	7,70	15,08	120,00
8-2	7,68	15,20	120,00
8-3	7,62	15,12	120,00
8-4	7,64	15,16	120,00
8-5	7,60	15,04	120,00
8-6	7,52	15,14	120,00
8-7	7,16	15,03	120,00

Tablica 25. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje (kompozit s devet slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Debljina [mm]	Širina [mm]	Razmak oslonaca [mm]
9-1	8,44	15,10	136,00
9-2	8,52	15,08	136,00
9-3	8,70	15,02	136,00
9-4	8,80	15,14	136,00
9-5	8,24	15,44	136,00
9-6	8,46	15,14	136,00

Tablica 26. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje (kompozit s deset slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Debljina [mm]	Širina [mm]	Razmak oslonaca [mm]
10-1	9,48	15,12	152,00
10-2	9,50	15,20	152,00
10-3	9,60	15,24	152,00
10-4	9,54	15,30	152,00
10-5	9,58	15,20	152,00
10-6	9,42	15,18	152,00

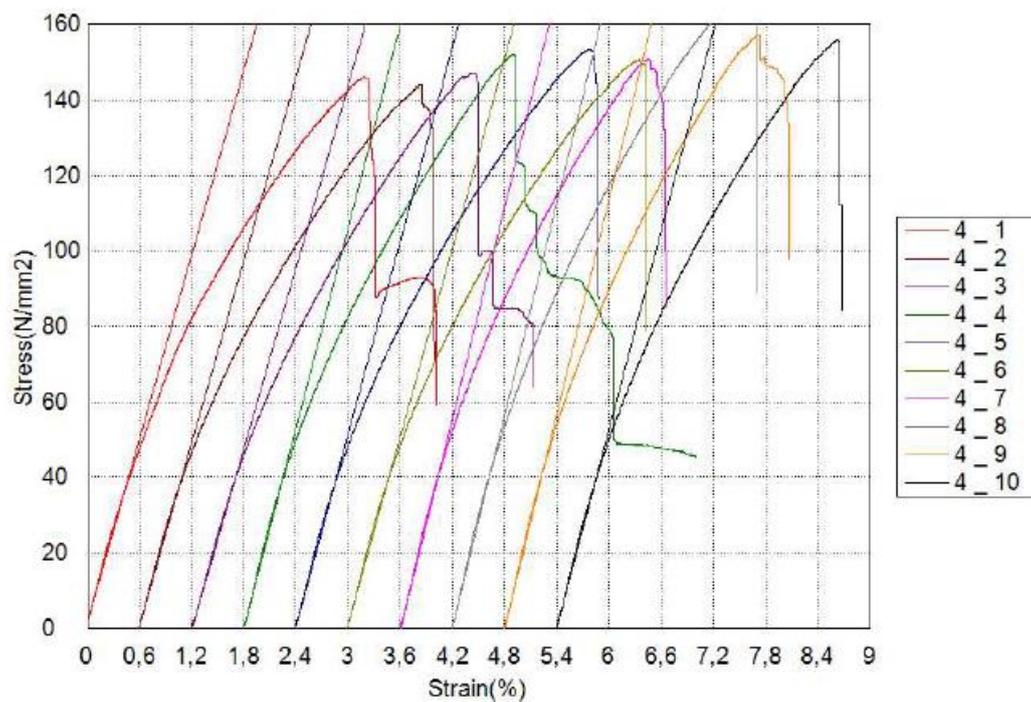
3.4.1. Kompozit s četiri sloja vlakana

U tablici 27 prikazani su rezultati maksimalne sile i progiba te savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti za kompozit s četiri sloja lanenih vlakana.

Tablica 27. Rezultati savojnog ispitivanja kompozita s četiri sloja vlakana

Ispitno tijelo	Modul elastičnosti [N/mm ²]	Maksimalna sila [N]	Maksimalni progib [mm]	Savojna čvrstoća [N/mm ²]
4-1	8130,06	382,99	4,79	145,85
4-2	8063,98	364,45	4,95	143,84
4-3	8015,93	358,64	5,05	146,97
4-4	8867,17	371,71	4,84	151,86
4-5	8516,72	394,65	5,10	153,04
4-6	8323,90	355,54	5,32	150,50
4-7	9353,55	350,43	4,56	150,53
4-8	9377,46	377,48	5,65	169,05
4-9	9478,65	351,45	4,77	157,18
4-10	8778,28	373,93	5,07	155,62
Srednja vrijednost	8690,57			152,44
Standardna devijacija	567,44			7,18

Na slici 24 prikazan je dijagram naprezanja i istezanja dobiven u programu TrapeziumX, nakon provedenog savojnog ispitivanja.



Slika 24. Graf naprezanje - istežanje kod savojnog ispitivanja (četiri sloja vlakana)

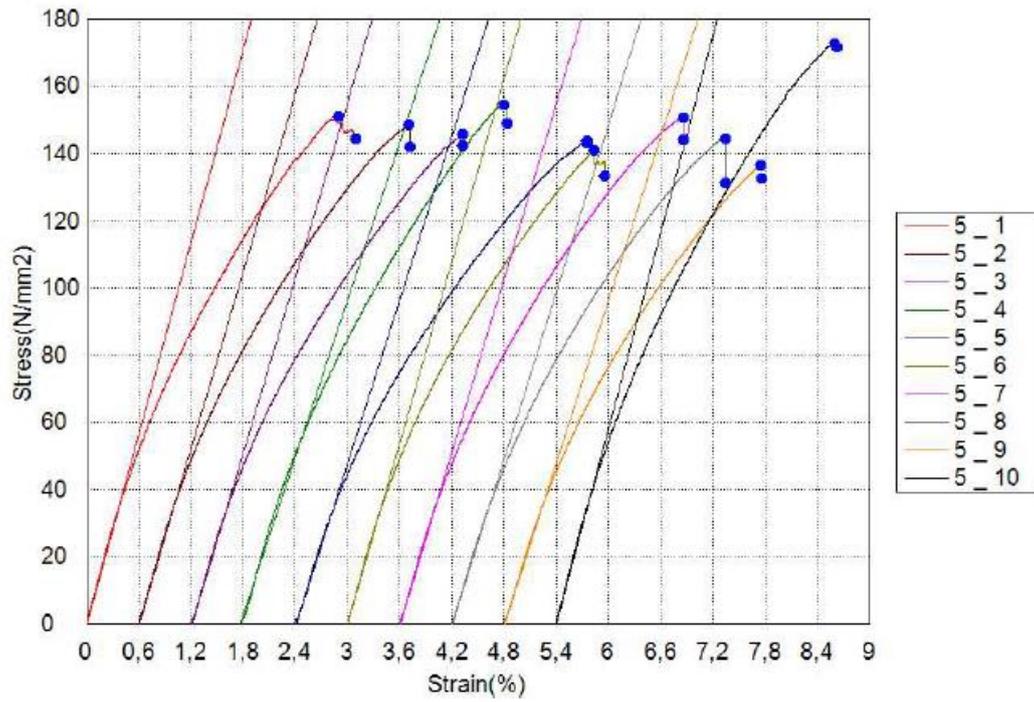
3.4.2. Kompozit s pet slojeva vlakana

U tablici 28 prikazani su rezultati maksimalne sile i progiba te savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti dobiveni savojnim ispitivanjem.

Tablica 28. Rezultati savojnog ispitivanja (pet slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Modul elastičnosti [N/mm ²]	Maksimalna sila [N]	Maksimalni progib [mm]	Savojna čvrstoća [N/mm ²]
5-1	9525,64	448,14	5,22	151,13
5-2	8800,25	416,26	5,74	148,95
5-3	8701,76	442,86	5,56	146,03
5-4	7829,14	439,99	5,49	154,84
5-5	8145,78	427,79	6,00	144,01
5-6	9035,31	415,60	5,12	141,27
5-7	8644,25	419,48	6,04	151,07
5-8	8302,65	410,25	5,75	144,76
5-9	8108,70	381,99	5,45	136,69
5-10	9724,76	457,26	6,08	172,65
Srednja vrijednost	8681,82			149,14
Standardna devijacija	617,088			9,80388

Na slici 25 prikazan je graf naprezanja i istežanja dobiven savojnim ispitivanjem u programu TrapeziumX.



Slika 25. Graf naprezanje - istežanje kod savojnog ispitivanja (pet slojeva vlakana)

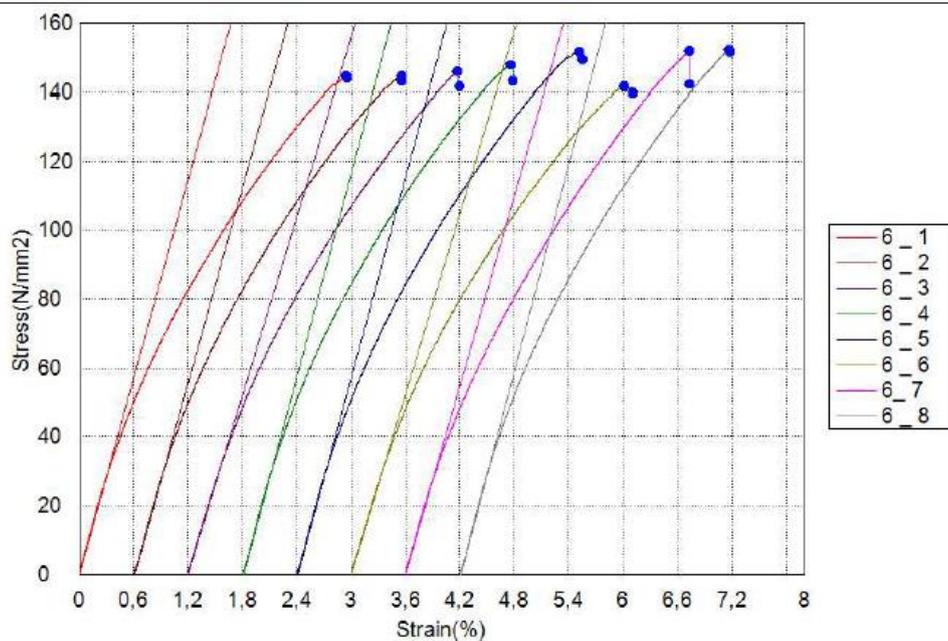
3.4.3. Kompozit sa šest slojeva vlakana

U tablici 29 prikazani su rezultati maksimalne sile i progiba te savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti dobiveni savojnim ispitivanjem.

Tablica 29. Rezultati savojnog ispitivanja (šest slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Modul elastičnosti [N/mm ²]	Maksimalna sila [N]	Maksimalni progib [mm]	Savojna čvrstoća [N/mm ²]
6-1	9585,63	542,23	6,91	144,77
6-2	9477,84	504,29	7,12	144,73
6-3	8660,27	526,08	7,07	145,98
6-4	9842,02	519,94	7,14	147,84
6-5	9710,82	537,94	7,46	151,39
6-6	8780,71	502,83	7,20	141,70
6-7	9178,94	569,74	7,32	151,86
6-8	10034,22	525,92	7,19	152,02
Srednja vrijednost	9408,81			147,54
Standardna devijacija	494,79			3,89

Na slici 26 prikazan je graf naprezanja i istezanja dobiven savojnim ispitivanjem u programu TrapeziumX.



Slika 26. Graf naprezanje - istežanje kod savojnog ispitivanja (šest slojeva vlakana)

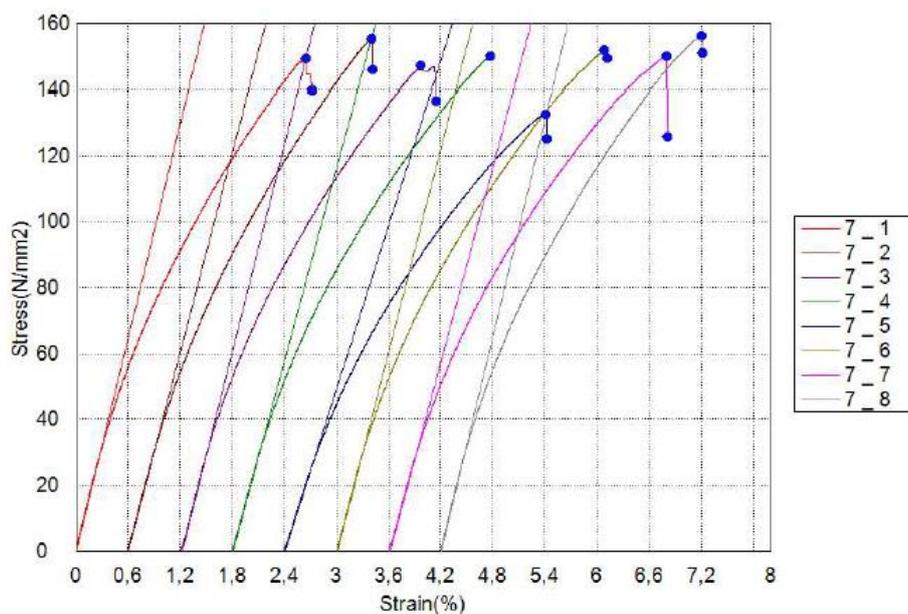
3.4.4. Kompozit sa sedam slojeva vlakana

U tablici 30 prikazani su rezultati maksimalne sile i progiba te savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti dobiveni savojnim ispitivanjem. Ispitno tijelo 7-5 nije uzet u proračun središnjih vrijednosti zbog loše povezanosti matrice i ojačala.

Tablica 30. Rezultati savojnog ispitivanja (sedam slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Modul elastičnosti [N/mm ²]	Maksimalna sila [N]	Maksimalni progib [mm]	Savojna čvrstoća [N/mm ²]
7-1	10857,54	587,4	7,69	149,39
7-2	10112,69	643,7	7,93	155,27
7-3	10487,63	623,7	7,76	147,09
7-4	9757,07	638,7	8,27	149,92
7-5	8294,29	553,3	8,47	132,75
7-6	10282,15	620,7	8,69	151,67
7-7	9855,15	615,7	9,07	149,82
7-8	10958,42	674,9	8,30	156,03
Srednja vrijednost	10330,09			151,31
Standardna devijacija	465,71			3,26

Na slici 27 prikazan je graf naprezanja i istežanja dobiven savojnim ispitivanjem u programu TrapeziumX.

**Slika 27. Graf naprezanje - istežanje kod savojnog ispitivanja (sedam slojeva vlakana)**

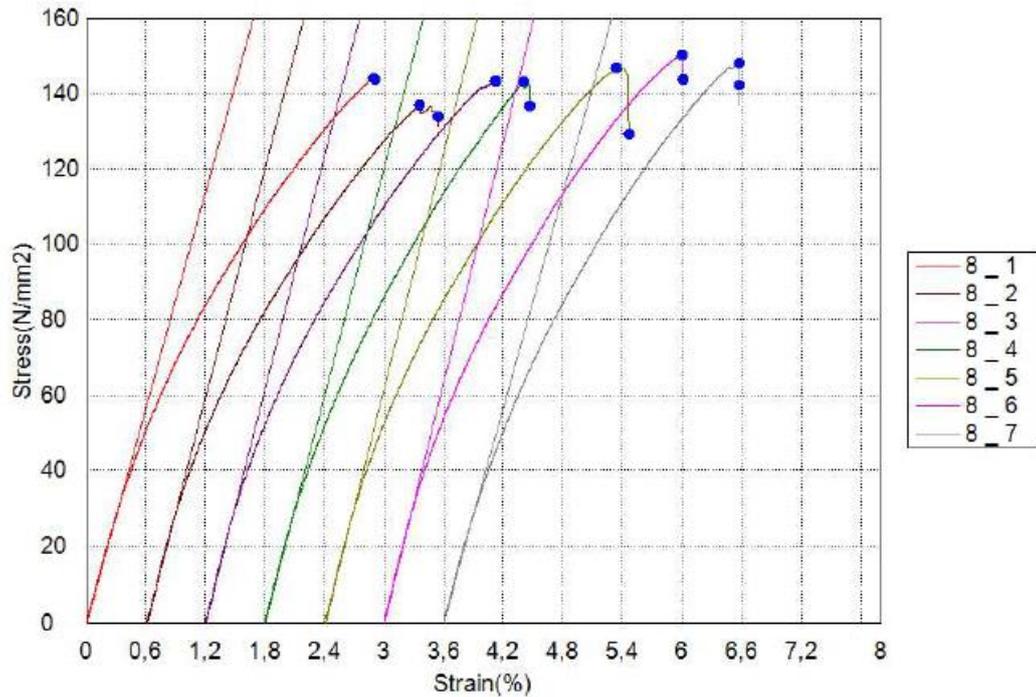
3.4.5. Kompozit s osam slojeva vlakana

U tablici 31 prikazani su rezultati maksimalne sile i progiba te savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti dobiveni savojnim ispitivanjem.

Tablica 31. Rezultati savojnog ispitivanja (osam slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Modul elastičnosti [N/mm ²]	Maksimalna sila [N]	Maksimalni progib [mm]	Savojna čvrstoća [N/mm ²]
8-1	9553,32	715,13	9,04	143,97
8-2	10161,14	681,76	8,61	136,88
8-3	10349,76	6,99,51	9,19	143,42
8-4	10054,85	703,19	8,19	143,04
8-5	10460,94	708,10	9,27	146,72
8-6	10649,28	714,79	9,57	150,28
8-7	9465,74	633,69	9,99	148,34
Srednja vrijednost	10099,29			144,62
Standardna devijacija	447,45			4,33

Na slici 28 prikazan je graf naprezanja i istežanja dobiven savojnim ispitivanjem u programu TrapeziumX.



Slika 28. Graf naprezanje - istezanje kod savojnog ispitivanja (osam slojeva vlakana)

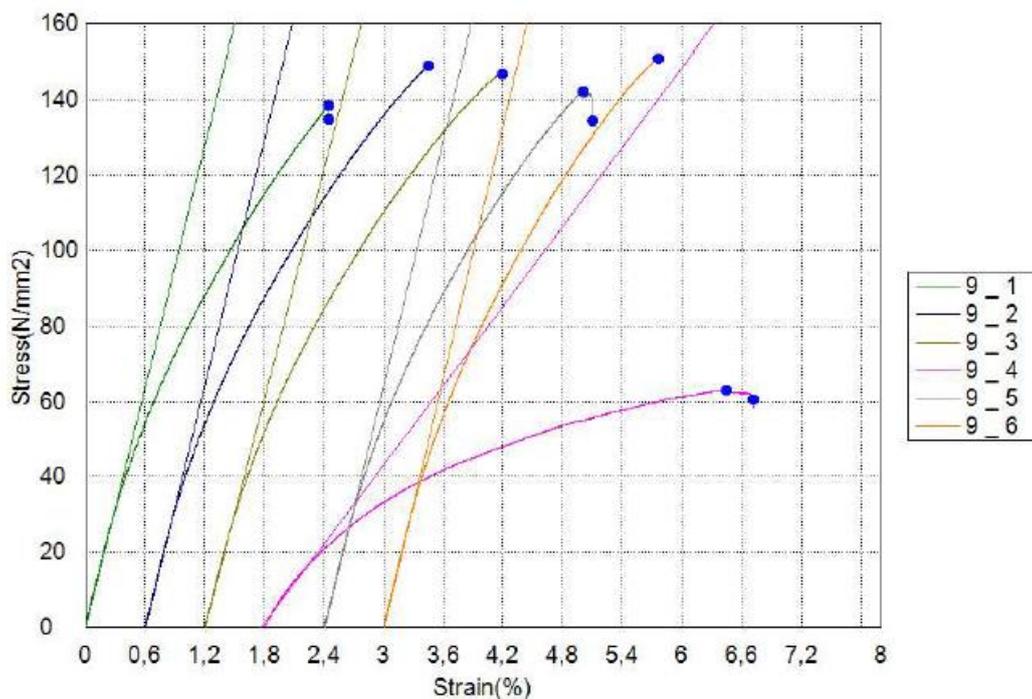
3.4.6. Kompozit s devet slojeva vlakana

U tablici 32 prikazani su rezultati maksimalne sile i progiba te savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti dobiveni savojnim ispitivanjem. Ispitno tijelo 9-4 nije uzeto u proračun središnjih vrijednosti zbog velikog odstupanja.

Tablica 32. Rezultati savojnog ispitivanja (devet slojeva vlakana)

Ispitno tijelo	Modul elastičnosti [N/mm ²]	Maksimalna sila [N]	Maksimalni progib [mm]	Savojna čvrstoća [N/mm ²]
9-1	10686,10	711,43	8,94	138,36
9-2	10847,95	799,47	10,31	149,09
9-3	10185,49	818,95	10,60	146,99
9-4	3513,03	361,51	16,29	62,90
9-5	10858,32	691,04	9,75	142,16
9-6	11173,66	801,49	10,07	150,97
Srednja vrijednost	10750,30			145,51
Standardna devijacija	361,791			5,17599

Na slici 29 prikazan je graf napreznja i istežanja dobiven savojnim ispitivanjem u programu TrapeziumX.

**Slika 29. Graf napreznja - istežanje kod savojnog ispitivanja (devet slojeva vlakana)**

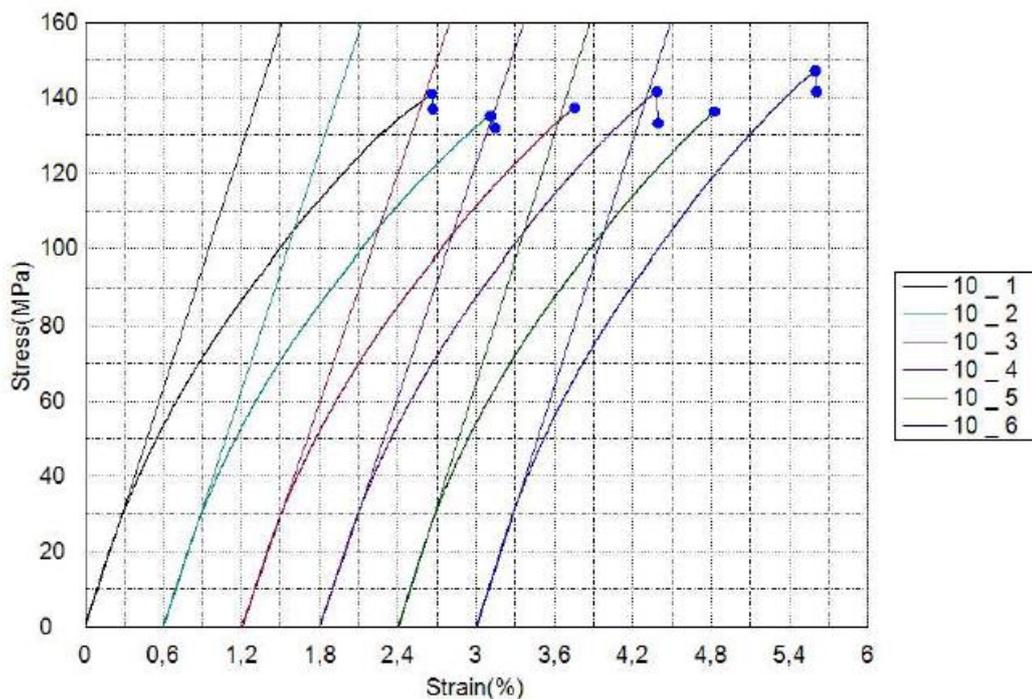
3.4.7. Kompozit s deset slojeva vlakana

U tablici 33 prikazani su rezultati maksimalne sile i progiba te savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti dobiveni savojnim ispitivanjem.

Tablica 33. Rezultati savojnog ispitivanja (deset slojeva vlakana)

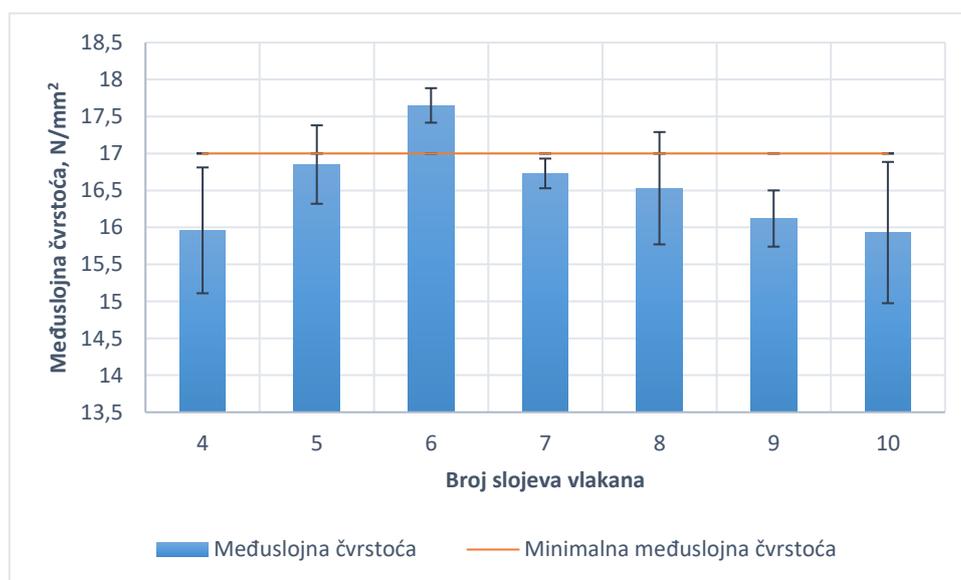
Ispitno tijelo	Modul elastičnosti [N/mm ²]	Maksimalna sila [N]	Maksimalni progib [mm]	Savojna čvrstoća [N/mm ²]
10-1	10594,38	839,30	10,81	140,83
10-2	10526,52	813,67	10,17	135,24
10-3	10064,98	845,42	10,24	137,24
10-4	10231,76	865,26	10,43	141,68
10-5	10910,42	833,86	9,74	136,29
10-6	10769,24	868,51	10,62	147,01
Srednja vrijednost	10516,22			139,72
Standardna devijacija	319,43			4,39

Na slici 30 prikazan je graf naprezanja i istezanja dobiven savojnim ispitivanjem u programu TrapeziumX.

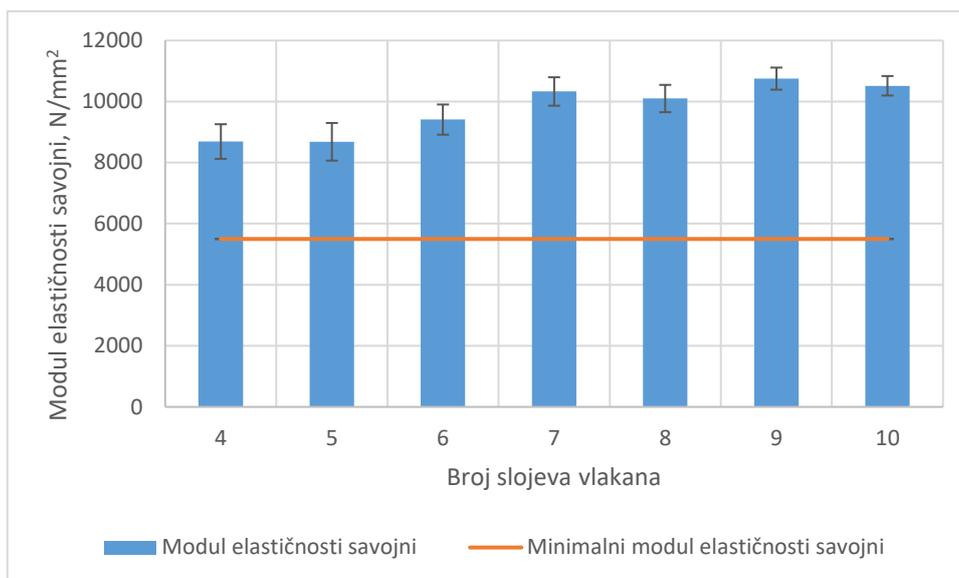


Slika 30. Graf naprezanje - istezanje kod savojnog ispitivanja (deset slojeva vlakana)

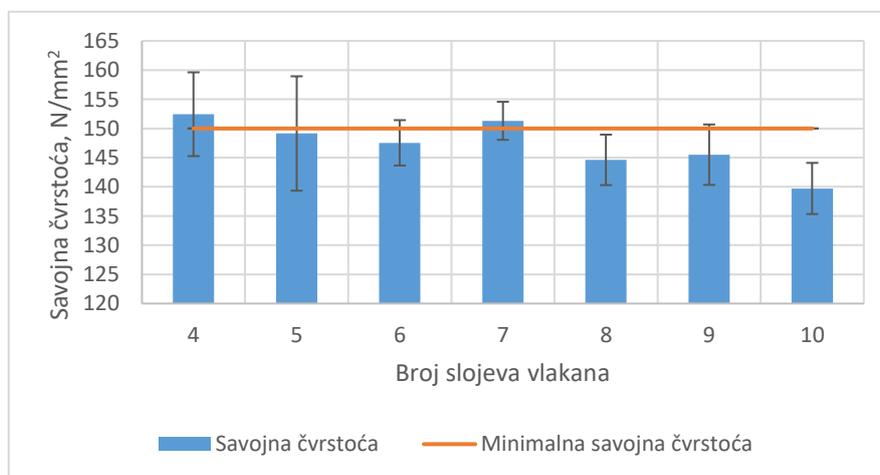
3.5. Analiza rezultata savojnog i međuslojnog ispitivanja



Slika 31. Vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće kompozita s različitim brojem slojeva lanenih vlakana te njena minimalna granica propisana od strane HRB-a [14]



Slika 32. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti kompozita s različitim brojem slojeva lanenih vlakana te njegova minimalna granica propisana pravilnikom HRB-a [14]



Slika 33. Vrijednosti savojne čvrstoće kompozita s različitim brojem slojeva lanenih vlakana te njena minimalna granica prepisana pravilnikom HRB-a [14]

Tablica 34. Vrijednosti dobivene savojnim i međuslojnim ispitivanjem kompozita s različitim brojem slojeva vlakana [14]

Broj slojeva	4	5	6	7	8	9	10	HRB pravilnik
$\sigma_{m,s}$ [N/mm ²]	152,44	149,14	147,54	151,31	144,62	145,51	139,72	150
E_s [N/mm ²]	8690	8681	9408	10330	10099	10750	10516	5500
τ [N/mm ²]	15,96	16,85	17,65	16,73	16,53	16,12	15,93	17
Udio vlakana u m%	40,43	40,45	40,73	40,77	41,14	41,28	41,38	

Iz slike 31 i tablice 34 vidljivo je da samo kompozit sa šest slojeva vlakana zadovoljava minimalnu vrijednost prividne međuslojne smične čvrstoće propisanu od strane HRB-a. Kompoziti sa pet i sedam slojeva imaju nešto manju vrijednost prividne međuslojne smične čvrstoće od propisane dok ostali kompoziti imaju vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće niže od minimalne propisane granice te ne zadovoljavaju taj kriterij. Vidljivo je da i porastom broja vlakana dolazi do sniženja vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće. Predpostavlja se da do toga dolazi zbog duljeg vremena izrade pri čemu dolazi do umrežavanja matrice što otežava povezivanje sa vlaknima.

Iz prikazanih rezultata (Slika 32, Slika 33 i Tablica 34) vidljivo je da s većim brojem slojeva ojačala dolazi do povećanja masenog udjela vlakana. Posljedica toga je i porast savojnog modula elastičnosti, odnosno dolazi do povećanja krutosti kompozita pri savojnom opterećenju. Modul elastičnosti kod svih ispitanih kompozita neovisno o broju slojeva vlakana zadovoljava minimalnu granicu propisanu od strane HRB-a. S druge strane, samo kompoziti sa četiri i sa sedam slojeva vlakana imaju nešto veću vrijednost savojne čvrstoće od minimalne propisane vrijednosti. Kompoziti s pet i šest slojeva imaju savojnu čvrstoću nešto manju od propisane minimalne vrijednosti te kao i kod prividne međuslojne smične čvrstoće s porastom slojeva i porastom vremena izrade samoga materijala dolazi do slabije povezanosti slojeva i do niže čvrstoće sustava. HRB norma je propisana za kompozite ojačane staklenim vlaknima te zbog toga možemo reći da su lanena vlakna konkurentna u odnosu na staklena.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu ispitani su kompoziti od epoksidne smole ojačane s različitim brojem slojeva lanenih vlakana pri savojnom opterećenju. Provedena su ispitivanja savojnog modula i savojne čvrstoće u tri točke, te prividne međuslojne smične čvrstoće. Ova dva tipa ispitivanja provede se na vrlo sličan način, pri čemu je ispitno tijelo položeno na dva oslonca i opterećeno silom u sredini. Razlika je u udaljenosti između oslonaca, pri čemu je kod savojnog ispitivanja udaljenost $16h_{sr}$, dok je kod prividne međuslojne smične čvrstoće razmak $5h_{sr}$. Manji razmak uzrokuje veća smična naprezanja, čime se prisiljava raslojavanje.

Budući da je taj kompozit namijenjen za izgradnju ekološki prihvatljivoga katamarana njegova svojstva su uspoređena sa svojstvima klasičnog kompozita ojačanog staklenim vlaknima kako bi se vidjelo da li takav kompozit zadovoljava minimalne propisane vrijednosti savojnih svojstava. Pri toj usporedbi korištena su pravila za klasifikaciju brodova iz članka 24. – nemetalni materijali (2017. godina) koja je izdao Hrvatski registar brodova. Pravilnikom je definirano: prividna međuslojna smična čvrstoća $17,0 \text{ N/mm}^2$, savojna čvrstoća $150,0 \text{ N/mm}^2$ te savojni modul elastičnosti 5500 N/mm^2 . Kako je vidljivo iz tablice 34, rezultati savojnog ispitivanja kompozita s različitim brojem slojeva lanenih vlakana, bez obzira na broj slojeva vlakana, zadovoljavaju propisanu minimalnu granicu savojnog modula elastičnosti. Propisanu savojnu čvrstoću zadovoljavaju samo kompoziti s četiri i sedam slojeva lanenih vlakana. Minimalnu propisanu vrijednost prividne međuslojne smične čvrstoće zadovoljio je samo kompozit sa šest slojeva vlakana, s time da je njegova vrijednost prividne međuslojne smične čvrstoće tek neznatno viša od propisane minimalne vrijednosti. Značajnija odstupanja svojstava su kod kompozita s više od 7 slojeva vlakana. Ovi kompoziti imaju i viši udio vlakana. Iz tog razloga lošija svojstva su vjerojatnije posljedica lošije impregnacije uslijed previsokog udjela vlakana, nego samog broja slojeva. Prema navedenom pravilniku, maseni udio stalnih vlakana ne smije biti viši od 50%. Budući da su lanena vlakna upola manje gustoće, kompozit s više od 40% lanenih vlakana ima puno veći volumni udio od kompozita s 50% staklenih vlakana. Kako bi se poboljšala impregnacija, trebalo bi povećati udio smole. Krutost materijala bi time bila smanjena, ali je modul dovoljno visok i kompozit s nešto nižim modulom i dalje bi imao zadovoljavajuću krutost. Osim toga, jedno od rješenja je i kombiniranje staklenih i lanenih vlakana za postizanje boljih mehaničkih svojstava.

LITERATURA

- [1] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [2] 6. *Kompozitni Materijali*, <https://www.scribd.com/document/397903892/11-Materijali-3-2009-kompoziti-kon-pdf>, pristupljeno 30.1.2022.
- [3] Chawla, K. K., *Composite Materials: Science and Engineering*, Third Edition, Springer, New York, 2012.
- [4] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala: čelici i željezni ljevovi, laki i obojeni metali, konstrukcijska keramika, polimerni materijali, kompozitni materijali i drvo.*; 2. izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2013.
- [5] Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H.-P., Sain, M.: *Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim , 2013.
- [6] Akil, H. M., Omar, M. F., Mazuki, A. A. M., Safiee, S., Ishak, Z. A. M., Abu Bakar, A.: *Kenaf fiber reinforced composites: A review*, Elsevier Ltd., Amsterdam, 2011.
- [7] Varghese, A. M., Mittal, V.: *Biodegradable and Biocompatible Polymer Composites*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Sawston, 2018.
- [8] Rahman, R., Putra, S. Z. F. S.: *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites: 5 - Tensile properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Sawston, 2019.
- [9] Naveen, J., Jawaid, M., Amuthakkannan, P., Chandrasekar, M., *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites, 21 - Mechanical and physical properties of sisal and hybrid sisal fiber-reinforced polymer composites*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Sawston, 2019.
- [10] Chand, N., Fahim, M.: *Tribology of Natural Fiber Polymer Composites (Second Edition)*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Sawston, 2021.
- [11] ISO 14125, *Fibre-reinforced plastic composites – Determination of flexural properties*
- [12] ISO 14130, *Fibre-reinforced plastic composites – Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method*

[13] Haramina, T.: *Svojstva kompozita lan/epoksid za primjenu u brodogradnji*, Zavod za materijale FSB, Zagreb, 2021.

[14] *Rules for the classification of ships: Part 24 – Non-metallic materials*, <http://www.crs.hr/Portals/0/adam/KlasifikacijskaPravila/RzmWMib7J0GCGcNZek0yzA/Dokument/NON-METALLIC%20MATERIALS.pdf>, Pristupljeno 5.2.2022.