

Utjecaj riječne vode na mehanička svojstva hibridnih kompozita epoksid/lan/staklo

Tuškan, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:235:430944>

Rights / Prava: [Attribution-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-27**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Tuškan

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Marko Tuškan

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem prof. dr. sc. Tatjani Haramini na prihvaćanju mentorstva za diplomski rad te na njezinoj stalnoj neupitnoj pomoći i potpori tijekom njegove izrade. Također, izrazito želim zahvaliti asistentu dr. sc. Danielu Pugaru na njegovu vremenu i pomoći koju mi je pružio tijekom pisanja ovoga rada i tehničkomu suradniku Božidaru Bušetinčanu na danim savjetima i pomoći oko eksperimentalnoga dijela. Nakraju, zahvalio bih roditeljima, sestri i cimerima koji su mi pružali veliku podršku tijekom studiranja .

Marko Tuškan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum 6 - 07 - 2023	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 - 249	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marko Tuškan** JMBAG: 0035216514

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj riječne vode na mehanička svojstva hibridnih kompozita epoksid/lan/staklo**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Effect of river water on mechanical properties of hybrid composites epoxy/flax/glass**

Opis zadatka:

Ojačavanje kompozita obnovljivim razgradivim vlaknima biljnog podrijetla, alternativa je nerazgradivim staklenim vlaknima. Budući da kompoziti s vlaknima biljnog podrijetla nemaju zadovoljavajuća svojstva za sve primjene, moguća je hibridizacija sa staklenim vlaknima.

Potrebno je izraditi kompozite s matricom od epoksidne smole ojačane lanenim (L) i staklenim (S) vlaknima s dva sloja staklenih i četiri sloja lanenih vlakana, s različitim rasporedom slojeva, slaganih simetrično, i to SLLLLS, LLSSLL, LSLLSL. Kompozitne ploče treba uroniti u riječnu vodu te ispitati upojnost vode. Po zasićenju, potrebno je ispitati mehanička svojstva izlaganih kompozita i usporediti s postojećim podacima za iste kompozite prije izlaganja riječnoj vodi.

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

Zadatak zadan:

4. svibnja 2023.

Datum predaje rada:

6. srpnja 2023.

Predvideni datumi obrane:

17. – 21. srpnja 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr.sc. Tatjana Haramina

T. Haramina

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

I. Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	3
2.1. Vlakeno kao ojačalo.....	6
2.1.1. Staklena vlakna	7
2.1.2. Prirodna vlakna	10
2.1.3. Lanena vlakna	12
2.2. Epoksidna smola kao matrica	14
2.3. Hibridni lan/staklo ojačani kompoziti.....	15
2.4. Utjecaj vode na mehanička svojstva kompozita s lanenim vlaknima	16
3. ISPITIVANJE SVOJSTVA KOMPOZITA	19
3.1. Materijali ispitnih tijela.....	19
3.2. Ispitivanje upojnosti vode	20
3.3. Ispitivanje rastezne čvrstoće i rasteznoga modula elastičnosti kompozita	28
3.4. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće i rasteznoga modula elastičnosti kompozita ..	31
3.5. Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnoga modula elastičnosti kompozita	35
3.6. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće i savojnoga modula elastičnosti kompozita...	39
3.7. Analiza rezultata ispitivanja.....	43
4. ZAKLJUČAK.....	46
LITERATURA.....	47

POPIS SLIKA

Slika 1. Kompozit ojačan kontinuiranim dugim vlaknima [3].....	3
Slika 2. Prikaz postupka ručnoga laminiranja [1]	6
Slika 3. Prikaz mogućih vlaknastih tkanja [5].....	7
Slika 4. Prikaz proizvodnje staklenih vlakana [7].....	9
Slika 5. Lijevo: karoserija automobila od staklenih vlakana; Desno: izolacija [8].....	10
Slika 6. Prirodna vlakna: (a) banana, (b) šećerna trska, (c) ruderalna konoplja, (d) lan, (e) konoplja, (f) juta, (g) sisal i (h) kenaf [9].....	11
Slika 7. Biljka lana [12].....	13
Slika 8. Prikaz sloj-sloj hibridnoga kompozita [2].....	16
Slika 9. Raslojavanje matice i vlakana usred djelovanja vode [18].....	18
Slika 10. Prikaz uzoraka za ispitivanje upojnosti.....	20
Slika 11. Vage za mjerenje mase: desno industrijska i lijevo zlatarska.....	21
Slika 12. Prikaz promjene mase konfiguracija materijala.....	24
Slika 13. Dijagram promjene mase SLLLLS konfiguracije materijala po korijenu vremena..	25
Slika 14. Dijagram promjene mase LLSSLL konfiguracije materijala po korijenu vremena..	25
Slika 15. Dijagram promjene mase LSLLSL konfiguracije materijala po korijenu vremena..	26
Slika 16. Dijagram promjene mase SSSSSS konfiguracije materijala po korijenu vremena ..	26
Slika 17. Dijagram promjene mase LLLLLL konfiguracije materijala po korijenu vremena .	27
Slika 18. Prikaz promjene mase konfiguracije materijala po korijenu vremena i njihovih pripadajućih pravaca aproksimacije	27
Slika 19. Ispitna tijela za rastezno ispitivanje	28
Slika 20. Ispitivanje rastezne čvrstoće i rasteznog modula na kidalici	29
Slika 21. Prikaz ispitnih tijela nakon rasteznog ispitivanja.....	32
Slika 22. Dijagram rasteznoga naprezanja – istežanja za SLLLLS konfiguraciju materijala ..	33
Slika 23. Dijagram rasteznoga naprezanja – istežanja za LLSSLL konfiguraciju materijala ..	34
Slika 24. Dijagram rasteznoga naprezanja – istežanja za LSLLSL konfiguraciju materijala ..	34
Slika 25. Dijagram rasteznoga naprezanja – istežanja za SSSSSS konfiguraciju materijala...	35
Slika 26. Dijagram rasteznoga naprezanja – istežanja za LLLLLL konfiguraciju materijala .	35
Slika 27. Prikaz ispitnih tijela za savojno ispitivanje.....	36
Slika 28. Prikaz savojnog ispitivanja u tri točke na kidalici	37
Slika 29. Prikaz ispitnih tijela nakon savojnog ispitivanja.....	40
Slika 30. Dijagram savojnoga naprezanja – istežanja za SLLLLS konfiguraciju materijala...	41
Slika 31. Dijagram savojnoga naprezanja – istežanja za LLSSLL konfiguraciju materijala...	42
Slika 32. Dijagram savojnoga naprezanja – istežanja za LSLLSL konfiguraciju materijala...	42
Slika 33. Dijagram savojnoga naprezanja – istežanja za SSSSSS konfiguraciju materijala....	43
Slika 34. Dijagram savojnoga naprezanja – istežanja za LLLLLL konfiguraciju materijala ..	43

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz početne mase mjerene u laboratoriju	21
Tablica 2. Prikaz mase [g] izmjerene industrijskom vagom od 1. do 5. dana.....	21
Tablica 3. Prikaz mase [g] izmjerene industrijskom vagom od 6. do 10. dana.....	22
Tablica 4. Prikaz mase [g] izmjerene industrijskom vagom od 11. do 15. dana.....	22
Tablica 5. Prikaz mase [g] izmjerene industrijskom vagom od 16. do 20. dana.....	22
Tablica 6. Prikaz mase [g] izmjerene zlatarskom vagom od 1. do 5. dana	22
Tablica 7. Prikaz mase [g] izmjerene zlatarskom vagom od 6. do 10. dana	22
Tablica 8. Prikaz mase [g] izmjerene zlatarskom vagom od 11. do 15. dana	23
Tablica 9. Prikaz mase [g] izmjerene zlatarskom vagom od 16. do 20. dana	23
Tablica 10. Prikaz upojnosti za uzorke dobivene mjerenjem industrijskom i zlatarskom vagom	24
Tablica 11. Dimenzije ispitnih tijela za rastezno ispitivanje u mm	30
Tablica 12. Dobiveni rezultati rasteznoga ispitivanja	31
Tablica 13. Prikaz aritmetičke sredine dobivenih rezultata po konfiguracijama materijala	33
Tablica 14. Dimenzije ispitnih tijela i pripadajući razmak između oslonaca u mm	38
Tablica 15. Dobiveni rezultati savojnoga ispitivanja	39
Tablica 16. Prikaz aritmetičke sredine dobivenih rezultata po konfiguracijama materijala	41
Tablica 17. Usporedba rezultata rasteznoga ispitivanja suh (mala slova) i mokrih (velika slova) ispitnih tijela po konfiguraciji materijala.....	44
Tablica 18. Usporedba rezultata savojnoga ispitivanja suh (mala slova) i mokrih (velika slova) ispitnih tijela po konfiguraciji materijala.....	44

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_0	mm ²	početna poprečna površina ispitnoga tijela
b	mm	Širina
E_f	MPa	savojni modul elastičnosti
E_r	MPa	rastezni modul elastičnosti
F_M	N	maksimalna sila
f	mm	progib
f_M	mm	maksimalni progib
h	mm	Debljina
h_{sr}	mm	srednja debljina
L	mm	razmak između oslonaca
l	mm	duljina
Mt	%	upojnost vode u materijal
m_t	g	krajnja masa uzorka
m_o	g	početna masa uzorka
s_M	mm	Maksimalni progib
ε	mm/mm	Istezanje
ε_M	mm/mm	maksimalno istezanje
σ_{rM}	MPa	rastezna čvrstoća
σ_{fM}	MPa	savojna čvrstoća

SAŽETAK

Prirodna vlakna sve su češća zamjena za do tada tradicionalne vrste ojačala u izradi kompozitnih materijala. Ekologija i kružno gospodarstvo utjecali su na porast biljnih vlakana u tehnologijama proizvodnje zbog njihovih mehaničkih svojstava, recikličnosti, maloga utjecaja na okoliš, male emisije CO₂ i širenja privrede na zabačene dijelove svijeta u kojima se ljudi još uvijek bave agrokulturom. Sama prirodna vlakna nemaju dovoljno dobra mehanička svojstva za primjenu u svim područjima strojarstva te se hibridizacijom miješaju sa staklenim vlaknima kako bi se utjecalo na njegov porast. Cilj ovoga rada bio je ispitati utjecaj hibridizacije lanenih vlakana staklenima u epoksidnoj matrici i uvidjeti utjecaj vode na mehaničko ponašanje takvih materijala. Voda je najmanje utjecala na mehanička svojstva kompozita koji su samo od staklenih vlakana ili su vlakna s vanjske strane materijala te su takva svojstva zamjetljiva i na mehaničkim svojstvima. Uzorcima koji su bili u vodi smanjio se modul, a rastezna su i savojna čvrstoća jedino porasle kod materijala sa SSSSSS i SLLLLS konfiguracijom.

Ključne riječi: staklena vlakna, epoksidna smola, lanena vlakna, prirodna vlakna, savojna čvrstoća, rastezna čvrstoća, savojni modul elastičnosti, rastezni modul elastičnosti, upojnost vode

SUMMARY

Natural fibers are an increasingly common substitute for previously traditional types of reinforced composite materials. Ecology and the circular economy have influenced the growth of plant fibers in production technologies due to their mechanical properties, recyclability, low impact on the environment, low CO₂ emissions and the expansion of the economy to remote parts of the world where people still engage in agriculture. Natural fibers alone do not have good enough mechanical properties for application in all areas of mechanical engineering, so they are mixed with glass fibers through hybridization in order to influence its growth. The aim of this work was to examine the influence of the hybridization of flax fibers with glass in an epoxy matrix and to see the influence of water on the mechanical behavior of such materials. Water had the least effect on composites that are only made of glass fibers or the fibers are on the outside of the material, and such properties are also noticeable in the mechanical properties. The modulus of the samples that were in water decreased, while the tensile and flexural strength only increased in materials with SSSSSS and SLLLLS configuration due to better fiber adhesion and their protection against water penetration.

Key words: glass fibers, epoxy resin, flax fibers, natural fibers, flexural strength, tensile strength, flexural modulus of elasticity, tensile modulus of elasticity, water absorption

1. UVOD

Poznato je da su vremenska razdoblja dobivala imena po različitim materijalima koji su u to vrijeme pronađeni i korišteni. Početkom 2000-ih u svijetu materijala vidljiva je dominacija keramičkih, polimernih i kompozitnih materijala. Kompozitni materijali proširili su svoje korištenje u sve industrije svijeta. Početak njihova postojanja vidljiv je još u davna vremena kada su se od gline i slame proizvodile različite građevinske strukture kao kuće i staje. Znatni napredak u razvoju kompozita dogodio se pronalaskom novih vrsta materijala, ali i metoda i pravila njihova ispitivanja. Sada se njihov broj stabilno povećava svakodnevno nalazeći i preuzimajući nova tržišta. Zahvaljujući razvoju i ulaganju u istraživanje i proizvodnju ovih vrsta materijala, moguće ih je vidjeti u različitim industrijama, od svemirske industrije preko industrije aviona i brodova, pa čak i do gradnje mostova. [1]

Kompoziti ojačani vlaknima najčešći su primjer takve vrste materijala zbog svoje čvrstoće, stabilnosti i male gustoće. Zbog zabrinutosti za okoliš i prilagodbe na kružnu ekonomiju u vidu smanjenja ugljičnoga otiska, sve je češća praksa korištenje ekološki prihvatljivih materijala. Vlakna biološkog podrijetla postaju sve više korištena u zamjenu za do tada tradicionalne materijale, kao što su ugljična, aramidna i staklena vlakna. Jedan od problema korištenja kompozita s takvom vrstom vlakana u industriji lošija čvrstoća i lomna žilavost. Zbog takvih zahtjeva potrebna je dobra karakterizacija te poznavanje izrade ovakvoga materijala, ali katkada i hibridizacija s tradicionalnijim vrstama materijala. Hibridizacijom vlakana, tj. izradom kompozita od dviju ili više vrsta vlakana, nastoje se nadoknaditi nedostaci dok se u isto vrijeme koriste više biološki prihvatljivi materijali. [2]

Vlakna biološkog podrijetla imaju hidrofilni karakter, te upijaju vodu, pri čemu se mijenjaju volumen i posljedično njihova mehanička svojstva. Osim toga dugim izlaganjem vodi može doći i do propadanja vlakana, a time i cijelog kompozita.

U nastavku ovoga rada bit će detaljnije objašnjena primjena ovakvih vrsta kompozita. Zbog zahtjeva za primjenom hibridnih kompozita u brodograditeljskoj industriji nastoje se ispitati mehanička svojstva kompozita s lanenim i staklenim vlaknima kao ojačalima i epoksidnom matricom. Kompoziti su utopljeni u rijeku Mrežnicu te se izvelo mjerenje promjena mase po danu do točke zasićenja, čime se dobila sklonost materijala upijanju riječne vode. Nakon toga kompoziti su izloženi mehaničkim ispitivanjima, a rezultati su uspoređeni sa sličnim kompozitima koji nisu prethodno izlagani vodi. Ispitana su rastezna i savojna svojstva materijala, kako bi se dobila njihova rastezna i savojna čvrstoća, te rastezni i savojni modul

elastičnosti. Hibridni kompoziti se sastoje od dvaju slojeva staklenih i četiriju slojeva lanenih vlakana u različitim kombinacijama, SLLLLS, LSLLSL i LLSSLL, pri čemu je S oznaka za staklo, a L za lan. Osim toga ispitani su kompoziti sa samo jednom vrstom vlakana, SSSSSS i LLLLLL.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

Kompoziti su heterogeni materijali koji se sastoje od dviju ili više jasno različitih komponenti koje zajedno tvore novi materijal poboljšanih svojstava kakva nijedna od komponenti nema samostalno. Kompozitne materijale moguće je klasificirati na različite načine. Prema glavnoj podjeli dijele se na kompozite s ojačalima, sendvič kompozite, laminate te noviju i sve razvijeniju vrstu – hibrid kompozite.

Po vrsti matrice dijele se na:

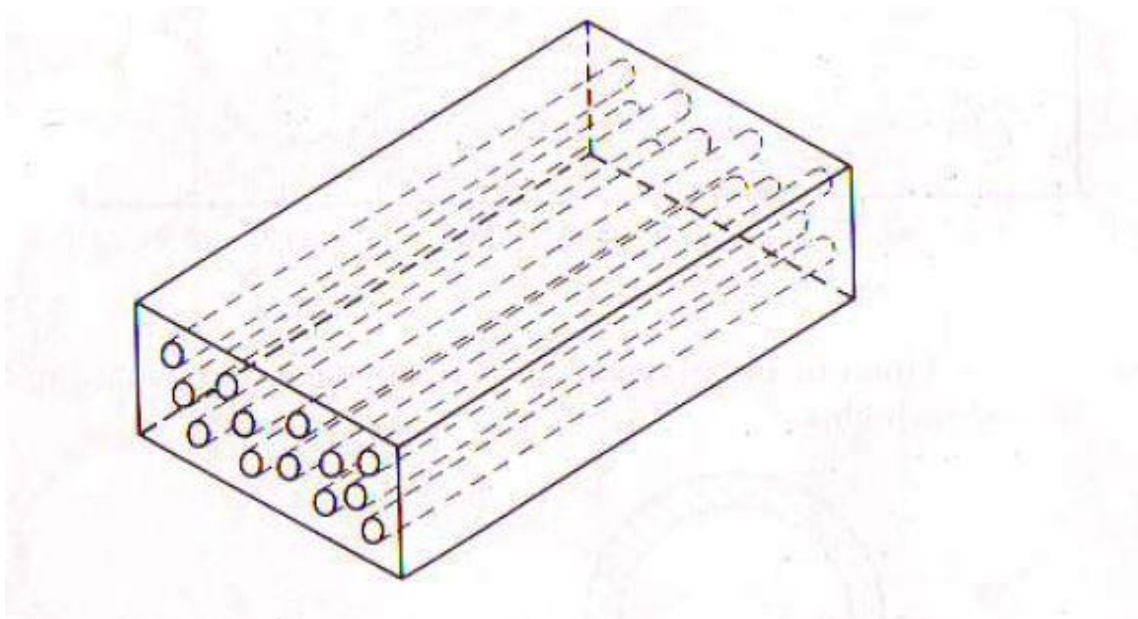
- polimerne
- keramičke
- metalne kompozite.

Po vrsti nastanka ojačala mogu biti:

- prirodni
- sintetski.

Po obliku ojačala:

- kontinuirana duga vlakna (Slika 1)
- diskontinuirana duga vlakna
- čestice i viskeri.



Slika 1. Kompozit ojačan kontinuiranim dugim vlaknima [3]

Moguća je i raspodjela na prirodne kompozitne materijale, mikrokompozitne materijale i makrokompozitne materijale. U prirodne se ubrajaju drvo, bambus i kost, a u mikrokompozitne materijale ubrajamo metalne legure (čelik), česticama ojačane duromere i vlaknom ojačane duromere. Makrokompoziti ili takozvani inženjerski proizvodi obuhvaćaju galvanizirani čelik i pojačane betonske grede i elise propelera helikoptera. Jedna od važnijih prednosti primjene kompozitnih materijala je smanjenje mase gotovoga proizvoda uz jednaku, ako ne i bolju, krutost. Zbog različitih ojačala koja se mogu koristiti u proizvodnji dolazi do „krojenja” svojstava kao što je npr. čvrstoća, u kojoj se vlakna nastoje orijentirati u smjeru u kojem će materijal biti napregnut. Ujedno, ovakvi materijali pokazuju znatnije bolji životni ciklus jer imaju dobru otpornost na koroziju u različitim okolišnim uvjetima. Ovisno o korištenoj matrici prigušuju zvuk i vibracije te se može smanjiti (ili povećati) toplinska ili električna provodljivost. Zbog načina na koji se iz kompozita izrađuju gotovi dijelovi i visoke ponovljivosti kalupa, trošak proizvodnje znatno je niži od drugih materijala. [3, 4]

Kompozitni materijali široko su primijenjeni u različitim poljima industrije. Neke od primjena kompozitnih materijala su u:

- elektrotehnici i elektronicima (izolacija u elektrograđevini, podrška za strujne prekidače, podrška za tiskane prekidače, zaštita, kutije, poklopci,...)
- građevini i javnim poslovima (kućišta za stanovanje, kalupi za betonske konstrukcije, bazeni, dimnjaci, fasadne ploče,...)
- cestovnom i željezničkom transportu (karoserije, felge, ratkape, branici, zaštita radijatora, prijenosna osovina, opruge ovjesa, kamionski tankeri, vagoni, jedinice hlađenja,...)
- nautici (patrolna vozila, čamci i pomagala za spašavanje, kanui, trkaći brodovi, čamci i jedrenjaci, brodovi za razminiranje,...)
- avio i svemirskoj industriji (*glaideri*, putnički avioni, propeleri i elise helikoptera, prijenosna osovina, diskovi kočnica, potisnici raketa, rezervoari, mlaznice,...)
- osnovnoj mehaničkoj uporabi (zupčanici, ležajevi, kućišta, cijevi, robotske ruke,...)
- sportu (tenis, skvoš, skijanje, sportski ribolov). [5]

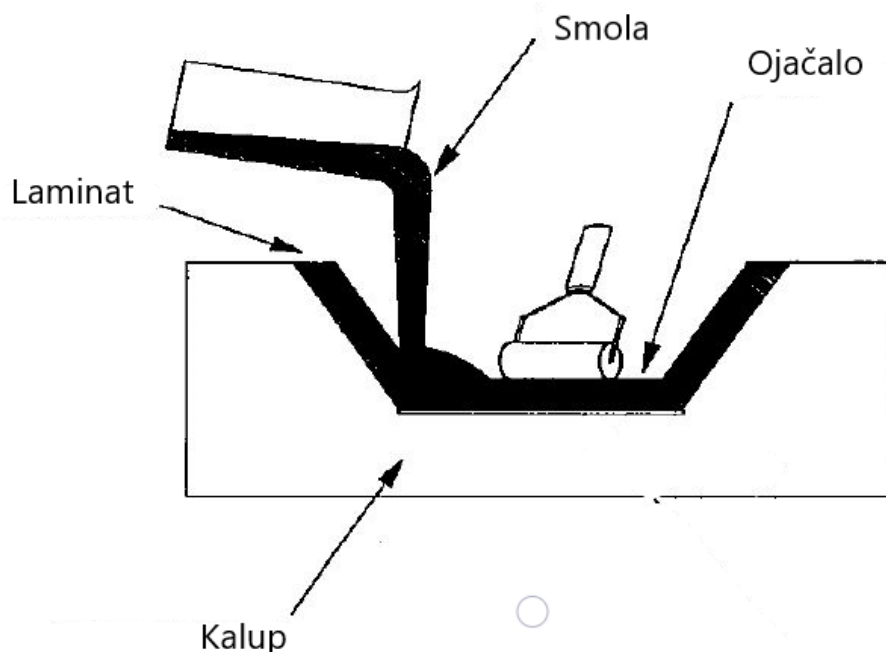
Mješavina ojačala i matrice ne postaju kompozit do zadnje faze proizvodnje, a to je faza izrade proizvoda, odnosno kalupljenja. U zadnjoj fazi, kada dođe do očvršćivanja, daljnjim procesima poput naknadnog očvršćivanja moguće je ograničeno mijenjati sastav i

mikrostrukturu kompozita. Nastanak gotovih proizvoda može se izvesti različitim načinima kalupljenja.

Neke od najpoznatijih metoda su:

- ručno laminiranje (Slika 2)
- laminiranje naštrcavanjem
- izrada prepregom
- tlačno kalupljenje
- podtlačno (vakuumsko) kalupljenje
- injekcijsko prešanje
- centrifugalno kalupljenje
- namotavanje.

Kako bi proces polimerizacije bio uspješniji i brži, tijekom kalupljenja dobro je regulirati temperaturu kako bi ova egzotermna kemijska reakcija imala povoljnu temperaturu umrežavanja. U smjesu matrice može se dodati i ubrzavalo polimerizacije. Kvaliteta konačnoga proizvoda najviše ovisi o kalupu, no i o matrici. Kako bi konačni materijal imao što bolju površinsku kvalitetu, smola se vodi na otplinjavanje ili se kalupljenje vrši u autoklavama. Autoklave posebni su uređaji koji služe za vršenje i provođenje kalupljenja kompozita u kontroliranim uvjetima tlaka i temperature. [1, 5]



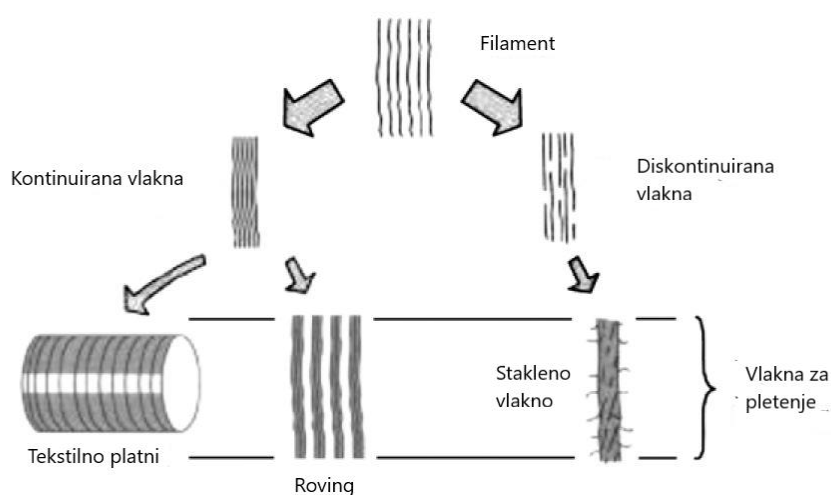
Slika 2. Prikaz postupka ručnoga laminiranja [1]

2.1. Vlakno kao ojačalo

Vlakna se sastoje od mnoštva (oko 1000) filamenata različitih duljina, čiji su promjeri između 5 i 15 μm . Zbog takvih osobina vlakna se mogu stvarati i plesti na strojevima za tekstil. Ojačala u kompozitima dijele se na žice, vlakna i viskere. Glavna razlika među ovim trima vrstama ojačala njihov je odnos između duljine i promjera. Vlakna se mogu pojaviti u dvama glavnim oblicima, a to su diskontinuirani i kontinuirani oblik. Kod kontinuiranoga oblika dolazi do neprestanoga protezanja vlakna kroz matricu i zbog prekoračenja efektivne duljine dolazi do pojave anizotropnih svojstava kompozita. Takva svojstva ovise o usmjerenosti napreznja naprema položaju vlakana. U slučaju u kojem je napreznje paralelno sa smjerom prostiranja vlakana, čvrstoća i krutost najveće su i smanjuju se s promjenom kuta. Najmanje je napreznje koje dovodi do loma u slučaju kada je sila okomita na smjer prostiranja vlakana. Diskontinuirana vlakna mogu biti kratko i dugačko sjeckana tijekom proizvodnoga procesa. Kratka vlakna koriste se u izradi kompozita kao filc ili mat tkanja i nanose se na kalup tijekom procesa injekcijskoga prešanja. Duga vlakna mogu se koristiti takva kakva jesu nakon procesa sjeckanja ili se tkaju (Slika 3). [5]

Najčešći su i najefikasniji oblik ojačala u kompozitima vlakna koja u materijalu služe kao glavni nosivi član. Vlaknasti oblik daje im najbolju čvrstoću i elastičnost u usporedbi s

drugim oblicima ojačala. Osim svojstava čvrstoće i elastičnosti, izrazito su laka i brzo se nanose. Neka od najpoznatijih vlakana u uporabi danas su staklena, ugljična i aramidna. Još postoje borova vlakna, silicijev karbid i aluminij oksidna vlakna, no zbog njihove cijene i ograničenja korištenja znatno su manje u uporabi. Sve češći materijali za izradu ojačala dolaze iz prirodnih izvora kao što su plodovi, korijenje, stabljike i listovi biljaka. Izbor vlakana ovisi o primjeni kompozita i matrici s kojom se kombiniraju. [1]



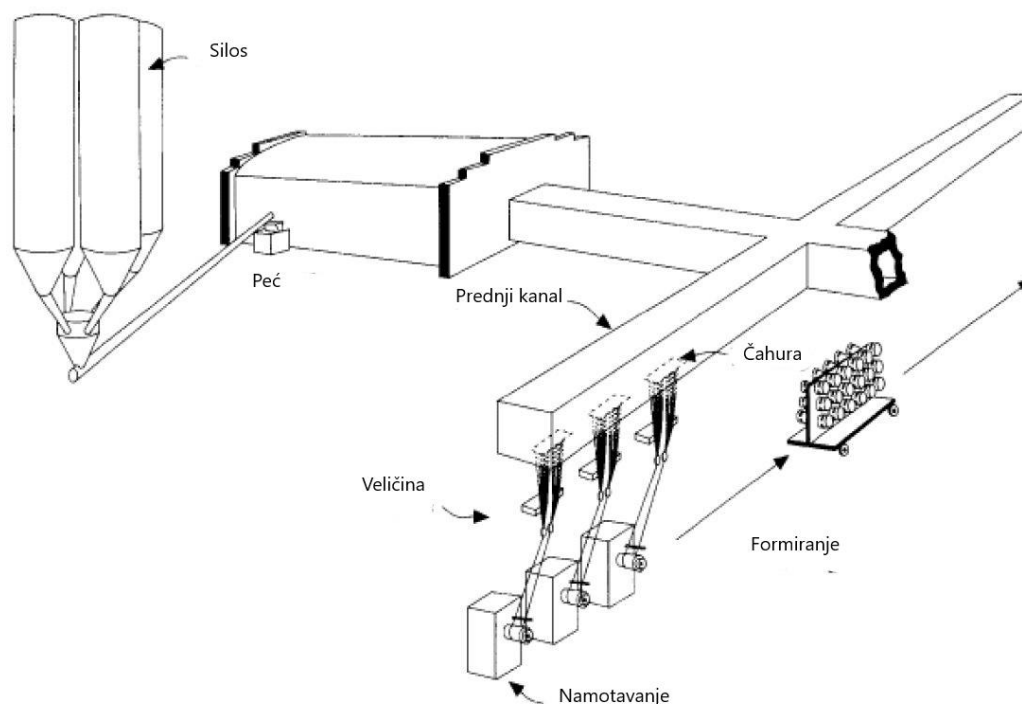
Slika 3. Prikaz mogućih vlaknastih tkanja [5]

2.1.1. Staklena vlakna

1713. godine fizičar i zoolog Rene Ferchault de Reaumur izumio je staklena vlakna. U postupku izrade puhanoga stakla ostaci vlakana ostali su na držačima plamenika. Nakon toga otkrića dolazi do nagloga razvoja i natjecanja oko proizvodnje staklenih vlakana za široku potrošnju. Početkom proizvodnje koristila se pomiješana sa svilom za izradu odjeće, no 1938. Russell Games Slayter proizvodi prvi patent za izradu staklene vune i staklenoga tkanja. Takav materijal pokazao se kao vrlo dobar električni izolator te je prema tome i dobio svoj naziv E-staklo. Zbog svoje otpornosti na provođenje struje staklena vlakna koristila su se kao izolatori na američkim ratnim brodovima. Početkom Drugoga svjetskog rata i miješanjem vlakana s poliesterskom smolom izrađivale su se kupole radara i strukturni dijelovi aviona. 1953. godine General Motors pokreće proizvodnju karoserije trkaćih automobila od istoga materijala. [6,7]

Industrije za proizvodnju staklenih vlakana morale su se suočiti s mnogim zakonima i političkim regulativama kako bi ekološki unaprijedile postupke izrade ovakvoga materijala. Prvi problem koji je riješen korištenje je peći na kisik, umjesto standardnih na ugljen i koks, kako bi se smanjila emisija prašine, sumporova dioksida i dušikova oksida u atmosferu. Kako bi znatnije smanjili utjecaj na okoliš, neki su staklari prestali s korištenjem fluora i bora u proizvodnji stakla. [7]

Proizvodnja staklenih vlakana (Slika 4) počinje iz silosa u kojima je svaka sirovina zasebno spremljena. Iz svakoga silosa, u točnim masenim omjerima, sirovine se prenose u spremnik za miješanje i potom u šaržni silos iz kojeg se puni peć. Kako bi se smanjilo širenje prašine, ovaj je dio procesa ventiliran i zračno nepropustan. Neki od materijala koji su potrebni za dobivanje E-stakla su pijesak iz kojega se dobiva silicijev dioksid, glina za glinicu, kolemanit ili borna kiselina za borov oksid i vapnenac ili kalcit za kalcijev oksid. Većina peći radi na zemni plin kao izvor goriva, kojim mogu postići temperature do 1600 °C. Peć kroz koju prolaze miješane sirovine sastoji se od pravokutnih kanala, na koje su u nastavku spojeni manji pravokutni kanali za formiranje vlakana. Kako bi se smjesa oslobodila neželjenih plinova, duž dna peći ugrađene su elektrode koje uzrokuju konvekciju u materijalu. Nakon ulaska materijala u prednji kanal, njime se pune čahure pravokutnoga oblika koje imaju istu funkciju kao predionica u proizvodnji tekstilnih vlakana. Kako ne bi došlo do korozije i taljenja, čahure su izrađene od rodija i platine te tako izdržavaju visoke temperature rastaljenoga materijala. Čahure završavaju s nekoliko tisuća mlaznica, koje su radi točnije i ujednačenije proizvodnje vlakana dodatno elektrolučno grijane. Izvlakač i/ili rezalica pomažu pri provlačenju i namotavanju vlakana te kontroli brzine i duljine vlakana pri proizvodnji. Širina mlaznica varira između 0,75 i 2 mm, a brzine izvlačenja mogu dostići i do 60 mm/s. Njihovom kalibracijom postižu se različite dimenzije vlakana. Kako vlakno napušta mlaznice, očvršćuje uz pomoć hladnog zraka i vode te dolazi do aplikatora veličine na izradu na točnu dimenziju. Nakon toga se vlakna diskovima strojno namotavaju na cilindar od plastike ili kartona za daljnju uporabu. [7]



Slika 4. Prikaz proizvodnje staklenih vlakana [7]

Staklena su vlakna visoko kvalitetan materijal, koji znatno poboljšava mehanička svojstva matrice kompozita. Dimenzionalno su stabilna pri povišenim i niskim temperaturama te imaju malu istezljivost od oko 4 – 5 %. Staklena su vlakna poznata po tome da imaju velik omjer čvrstoće naprema gustoći te se koriste u proizvodima u kojima je uz dobra mehanička svojstva potrebno i smanjenje mase. Svojstva kompozita ojačana staklenim vlaknima mogu biti jednosmjerna ili višesmjerna ovisno o vlaknima i njihovoj orijentaciji u materijalu. Ovakva vlakna otporna su na kemijsko i fizičko djelovanje vode, tj. ne dolazi do upijanja vode u materijal. Budući da je ovaj materijal anorganski spoj, ne gori niti podržava gorenje te zadržava četvrtinu svoje čvrstoće pri temperaturama oko 500 °C. Vlakna pokazuju savršenu kemijsku otpornost na lužine i kiseline bez pojave razlaganja ili plijesni, a iznimka su fluorovodične i fosforne kiseline koje izravno utječu na vlakna i tako uništavaju njihovu strukturu. Uz izolacijska električna svojstva, koja su prije navedena, pokazuju i niska svojstva toplinske provodljivosti te izričito dobru toplinsku izolaciju. [8]

Glavna primjena staklenih vlakana u kombinaciji je s nekom polimernom matricom za dobivanje kompozita. Takve kompozite najčešće je moguće naći u potrošnim dijelovima automobila (Slika 5), kao što su branici, pultrudirani dijelovi auta, zračni kanali i dijelovi motora. Često se mogu naći i u avio industriji kao materijal za izradu krila aviona i rotorskih

lopatica helikoptera. Većina brodova izrađena je od kombinacije polimerne matrice i staklenih vlakana, a ovakav je materijal popularan još i za izradu sportske opreme, izolacije (Slika 5), dijelova u graditeljstvu i elektronskih dijelova. [8]



Slika 5. Lijevo: karoserija automobila od staklenih vlakana; Desno: izolacija [8]

2.1.2. Prirodna vlakna

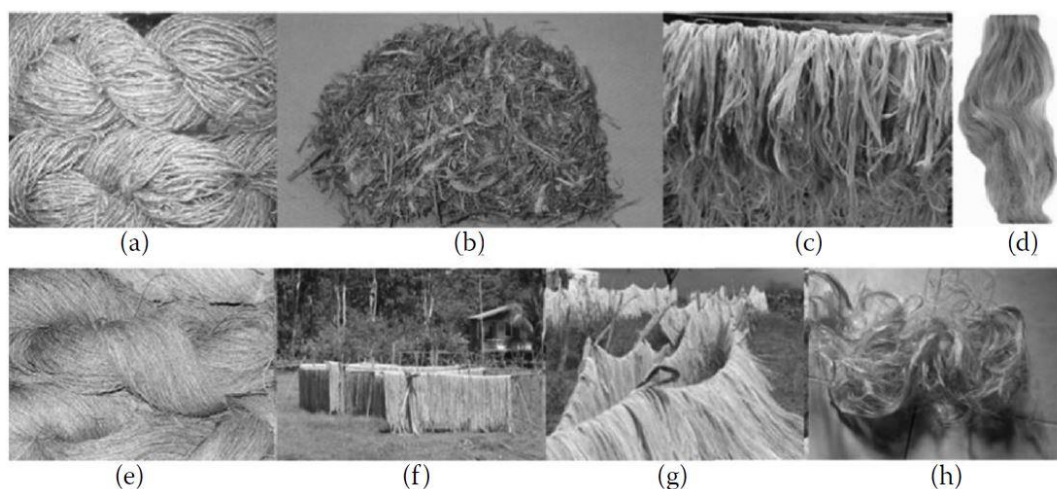
Korištenjem netoksičnih materijala iz obnovljivih izvora kao ojačala u kompozitu znatno možemo utjecati na očuvanje prirode. Sve češćim istraživanjima prirodnih vlakna ne samo da se dobiva alternativa tradicionalnom materijalu, nego se i stvara njegova konkurencija na svjetskome tržištu zbog manje potrošnje energije tijekom njihove proizvodnje. Ovo stoljeće poznato je po procvatu polimernih tehnologija proizvodnje te se sve više nastoji zamijeniti takve materijale prirodnima. Kompoziti ojačani prirodnim vlaknima stvaraju reciklične ostatke tijekom proizvodnje, no i sami proizvodi nakon svoje uporabe mogu se reciklirati i znatno utjecati na poboljšanje okolišnih uvjeta. [9]

Tijekom povijesti prirodni su se materijali koristili kao sirovine za proizvodnju i izradu materijala. S pojavom Egipatskoga Kraljevstva u izgradnji kuća počinje se koristiti mješavina gline i slame. Ovom tehnikom nastojali su ojačati zidove i toplinski izolirati prostorije u kojima su boravili. Nakon Egipta arheolozi su nalazili različite kombinacije prirodnih materijala u proizvodnji svakodnevnih proizvoda, a kosti, koža, drvo i divlje žitarice bili su im glavni izvor sirovina. Ljudi su tim materijalima razvijali oružje, oruđe, zdjele i posude za čuvanje stvari, pa čak i instrumente za stvaranje glazbe. [10]

Kako bi se od biljaka napravila vlakna kompatibilna s matricama, istraživači nastoje razvijati metode njihova tretiranja i premazivanja, kao i metode njihove kombinacije i proizvodnje gotovih kompozita i kompozitnih tvorevina. Osim što prirodna vlakna daju

svojstva usporediva sa sintetskim materijalima, biorazgradiva su, ima ih u izobilju i ekonomična su zbog svoje niske cijene proizvodnje. Uz to, proizvodnja ovakvih vlakana daje posao tisućama ljudi koji žive u ruralnim dijelovima svijeta, gdje se proizvodnja ovoga materijala i odvija. Uz ta svojstva bio vlakna pridonose kružnoj ekonomiji i smanjuju problem sve većih cijena, ali i mogućnosti propadanja naftnih industrija jer su sve češća zamjena za staklena vlakna u industrijama. [11]

Prema organskome podrijetlu prirodna vlakna dijele se u tri skupine: biljna, mineralna i životinjska vlakna. Biljna se vlakna većinom sastoje od lignocelulozne grupe, a životinjska od biomolekula i nanomolekula amino kiselina. Neka od životinjskih vlakana su devina dlaka, paukova svila i vuna. Od biljnih vlakana najpoznatija su vlakna konoplje, bambusa, pšenice, jute, agave, lana i banane (Slika 6). [10]



Slika 6. Prirodna vlakna: (a) banana, (b) šećerna trska, (c) ruderalna konoplja, (d) lan, (e) konoplja, (f) juta, (g) sisal i (h) kenaf [9]

Proizvodnja prirodnih vlakana počinje najbitnijim procesom, kojim se određuje kvaliteta i kvantiteta materijala, a to je odvajanje i izvlačenje vlakana iz biljke. Svaka biljka, tj. vlakno koje se iz nje dobiva, ima drugačiji proces odvajanja, samim time i drugačija svojstva te namjenu u proizvodnji kompozita. Vuna se škarama skida sa životinje te se čisti od svih nečistoća spužvom i povećalom. Kod izvlačenja vlakana iz bambusa koristi se metoda eksplozije i mljevenja te odvajanja u tekućini. Kao i kod životinjskih vlakana, biljna se vlakna nakon odvajanja namaču te se odvajaju, otapaju i različitim se postupcima raspadaju voskovi i drugi spojevi koji mogu utjecati na kakvoću gotovih vlakana. [10]

Mehanička ispitivanja vlakana prilagođavaju se ovisno o materijalu i obliku materijala koji se ispituje. Kod rastezne čvrstoće problem je s učvršćivanjem vlakana jer znaju biti krhka i osjetljiva. Bitno je provoditi rastezno ispitivanje jer se vlakna najčešće koriste kao ojačala u polimernim matricama, a zbog svoje hidrofilnosti ispituju se u suhome i vlažnome stanju. Rezultati dobiveni ovim ispitivanjem znatno će ovisiti o sastavu, kvaliteti i svojstvima vlakana, kao i o starosti biljke iz koje su izvađena. Analizom takvih ispitivanja pokazalo se da iako prirodna vlakna nisu jaka kao aramidna i ugljična, postoje prirodna vlakna čiji je modul elastičnosti, tj. krutost, veći od krutosti E-stakla. Mehanička svojstva, osim što ovise o sadržaju celuloze, ovise i o spiralnome kutu mikrofilija i osi vlakana. Pri njihovom ispitivanju, kao i kod ispitivanja drugih materijala, potrebno je prilagoditi duljinu vlakana, brzinu ispitivanja i promjer materijala koji se ispituje. [11]

2.1.3. Lanena vlakna

Biljka lan (Slika 7) ima životni ciklus od 90 do 125 dana, a glavni dio stabljike iz kojega se dobivaju vlakna ima promjer 1 – 2 mm i visinu od 80 cm. Za dobivanje vlakana koriste se primarni i sekundarni celulozni zidovi stabljike, što čini gotovo 75 % cijele biljke. Za uzgoj lana potrebna je temperaturno i vlažno stabilna klima. Za vrijeme branja ove biljke mašina izvlači stabljiku iznad korijena iz zemlje. Kako bi od stabljike nastala vlakna, nakon izvlačenja stabljika se namače u vodu i ostaje u njoj do tjedan dana kako bi nepotrebnim biljnim materijalom strunuo. Nakon toga se ponovno provlači i čisti. [12]



Slika 7. Biljka lana [12]

Tijekom povijesti od znatne su važnosti bile stabljike i plodovi žitarica i zeljastoga bilja. Tako se i lan počeo koristiti 8000 godina prije Krista u nastambama pored švicarskoga jezera. Tamo su pronađeni različiti artefakti koji se povezuju s lanom, kao što su konac, struna, pa čak i različite tkanine, kao i sjemenke i vlakna biljke. No nedavno su i u paleolitičkim spiljama pronađeni tragovi sjemenki lana kao materijala koji su praljudi koristili za ishranu ili za popravak i zatezanje oružja i košara. Iako se ne zna na kojem je području točno započeo uzgoj lana, njegove tragove vidimo još u drevnome Egiptu. Tamo je lanena tkanina imala visoku vrijednost zbog svoje niske gustoće i visoke upojnosti znoja. Zbog tadašnjih vremenskih prilika bio je poželjan materijal, kako zbog svoje brze apsorpcije, tako i zbog hlađenja tijekom isparavanja znoja iz odjeće. Drevni Feničani započeli su širenje lanenih vlakana na ostatak Europe, a znanost stvaranja ovakvoga tekstila prenijeli su čak do Iraca. Između Prvoga i Drugoga svjetskog rata došlo je do nestašice svile te ju je zamijenio irski lan. Nakon Drugoga svjetskog rata lan se širi na Ameriku te se tamo daljnje istražuju njegova svojstva. Danas je Francuska najveći proizvođač lana, premda je povjesno bitan dio irske i britanske kulture. [13]

Gledajući samo biljna vlakna, moglo bi se reći da upravo lan ima najbolja mehanička svojstva. Otporniji je na trošenje i čvršći od pamuka, dobro upija vodu i prozračan je. Vlakna pamuka su laka, sjajna i fleksibilna, a zbog njegove mekoće koriste se i u tekstilnoj industriji.

Ima dobru krutost, a u posljednjih nekoliko godina istražuje se njegova uloga u zamjeni sintetskih materijala, posebice staklenih vlakana. Konkurentan je staklenim vlaknima, a zahvaljujući upola manjoj gustoći masa proizvoda je manja, proizvodnja je jeftinija, mogućnosti recikliranja veće. Jedini su problem kod proizvodnje kompozitnih materijala s lanenim ojačalom njegova hidrofilna svojstva, iako polimerna matrica u pravilu pokazuje hidrofobnost. Zato se prije njihova spajanja nastoji što učinkovitije površinski ili u potpunosti tretirati vlakno lana kako bi što manje upijao matricu i ostao čvrst i krut, kao i što je namijenjeno za željeni materijal. [12]

2.2. Epoksidna smola kao matrica

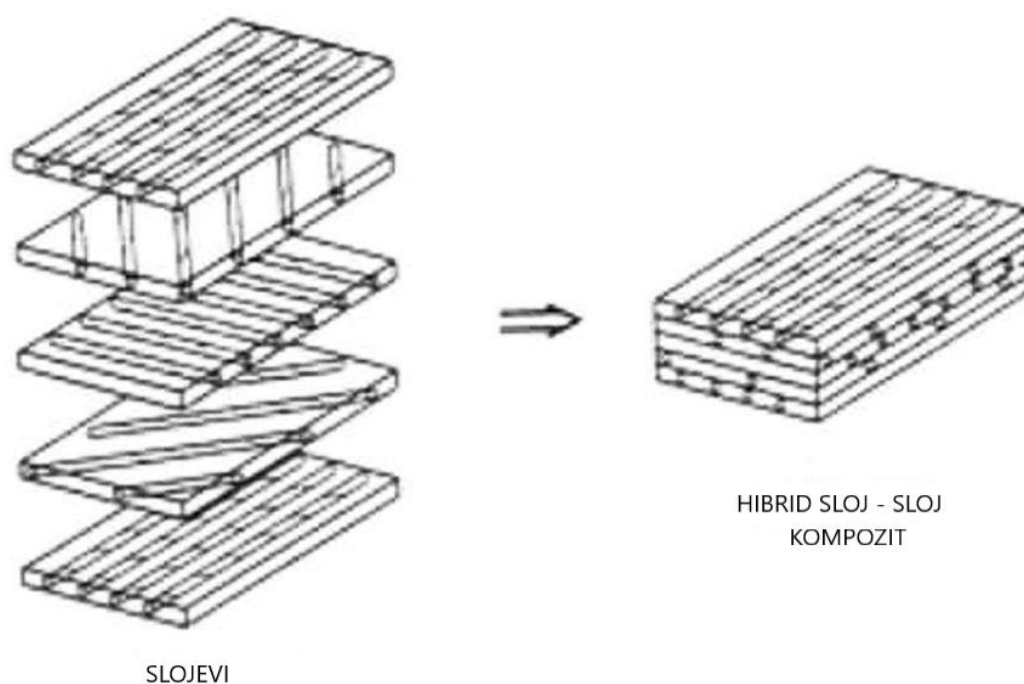
Epoksidna smola sastoji se od ugljičnih lanaca spojenih s ostalim elementima, kao što su vodik, kisik i dušik. Zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava epoksidna smola koristi se u različitim granama industrije, kao što su cestovni i zračni prijevoz, elektrotehnika i elektronika, građevina i u izradi sportske opreme. Osim svojih dobrih mehaničkih svojstava, ima dobru otpornost na vodu i kemikalije, a zbog svojih dobrih svojstava vezanja koristi se u kombinaciji s različitim materijalima u izradi kompozita. Osim kao kombinacija s drugim materijalima u kompozitima, koristi se još i kao premaz i vezivo za druge materijale. [14]

Pri korištenju kompozita dolazi do spajanja A i B dijela epoksidne smole, tj. umrežavala i smole. Postoje različite vrste epoksidnih smola – od onih koje su niske viskoznosti i počinju s polimerizacijom pri sobnoj temperaturi do onih velikih molekulskih masa kompleksnijega načina polimerizacije. Nastoje se istražiti različiti dodaci koji bi reakcijski s velikim molekulama smanjili viskoznost i temperaturu stvaranja polimera. Postoje dvije metode korištenja smole – suha i mokra. Mokra se metoda odnosi na nanošenje epoksidne smola za vrijeme postavljanja ili nakon postavljanja ojačala nekim od metoda proizvodnje kompozita. Kod suhe se metode na ojačalo dodaje smola koja ne počinje s umreženjem dok nije izložena povišenom tlaku ili temperaturi (npr. prepreg). Kako bi se dobila u potpunosti sjajna površina kompozita, proizvodnja se vrši uz pomoć tlaka ili vakuuma. Pri vakuumu ili povišenom tlaku molekule plinova izlaze iz smole te ne utječu na gotovi proizvod. Zbog brojnih istraživanja i razvoja korištenja epoksidne smole sve manje industrija nastoji proizvoditi metodom ručnoga laminiranja. Osim što je takva metoda dugotrajnija i zahtijeva veću preciznost i obučenosť radnika, sve je manje isplativa razvojem novih tehnologija i strojeva za laminiranje, npr. razvojem proizvodnje u autoklavama ili stroja za naštrcavanje smjese smole i ojačala. [15]

Kao što je rečeno, epoksidna smola je otporna na utjecaj vode i ostalih kemikalija, a zbog toga je jedan od glavnih materijala za korištenje u proizvodnji kompozitnih materijala. Ipak, u ovisnosti o umrežavala, epoksidna smola može imati i hidrofilni karakter, , pri čemu se veže vodikovim vezama za hidroksilne skupine što može utjecati na svojstva kompozita. Osim što štiti ojačala od utjecaja vanjskih medija, izrazito je duktilna i žilava, povezuje vlakna i služi za prijenos naprezanja na njih. Ovisno o primjeni proizvoda mora biti temperaturno postojana i služiti kao izolator, a u slučaju pojave pukotina može spriječiti njihovo širenje. [16]

2.3. Hibridni lan/staklo ojačani kompoziti

Uz razvoj tehnologije proizvodnje i primjene kompozitnih materijala istraživanje ovakve vrste materijala utjecalo je i na stvaranje novih vrsta kompozita – takozvanih hibrid kompozita. Hibrid kompoziti ili hibridi kompozitni su materijali koji se sastoje od dviju ili više vrsta ojačala unutar zajedničke, tj. jedinstvene matrice. Postupak hibridizacije zasniva se na očuvanju svojstava svih konstituenata zasebno. Postoji nekoliko vrsta hibridnih kompozita: sendvič kompoziti, sloj-sloj hibridi, pređa-pređa hibridi i vlakno-vlakno hibridi. Kod sendvič kompozita unutar vlaknom ojačane matrice koristi se ispuna kako bi se dobilo na dimenziji uz što manje povećanje mase. Ostale su tri vrste tipovi laminat kompozita. Sloj-sloj kompoziti (Slika 8) sastoje se od dvaju ili više ojačala koji su nasumično ili na pravilan način raspoređeni po slojevima, dok se kod pređa po pređa kompozita blokovi različitih ojačala nasumično ili pravilno raspoređuju unutar matrice. Unutar bloka slažu se dva sloja ili više slojeva iste vrste vlakana. Vlakno-vlakno kompozit sastoji se od kompozita unutar čijega su sloja isprepletene dvije ili više vrsta vlakana. Hibridizacija donosi miješanje svojstava vlakana materijala od kojih se sastoji. Unutar njega svaki materijal utječe na određeno svojstvo mehaničkoga ponašanja. [2]



Slika 8. Prikaz sloj-sloj hibridnoga kompozita [2]

Ekonomska politika i kružno gospodarstvo utjecali su na zamjenu sintetskih materijala jeftinijim, biorazgradivim materijalima iz obnovljivih izvora. Biljna vlakna, kao što je lan, pokazuju usporediva svojstva sa staklenim vlaknima uz nižu cijenu i veće zalihe. Staklena vlakna imaju duplo veću gustoću od lanenih te zbog toga znatno utječu na masu gotovoga proizvoda. Uz to, kancerogena su kada se udahnu te imaju abrazivno djelovanje na strojeve tijekom proizvodnje. Lan je biorazgradiv, nema gotovo nikakav utjecaj na atmosferu i potrebno je izrazito malo energije za njegovu proizvodnju. Recikličan je i obnovljiv dok staklena vlakna nisu. Na temelju ovih razlika vidljivo je zašto je potreba za zamjenu tradicionalnih vlakana prirodnima od velike važnosti. [17]

Kombinacijom ovih dviju vrsta materijala dobiva se savršen spoj ekonomičnijega materijala. Dodatkom staklenih vlakana lanenim dobiva se znatno veća čvrstoća i krutosti uz manju istežljivost. Konačni je zaključak da se mehanička svojstva obaju materijala poboljšavaju hibridizacijom. [2]

2.4. Utjecaj vode na mehanička svojstva kompozita s lanenim vlaknima

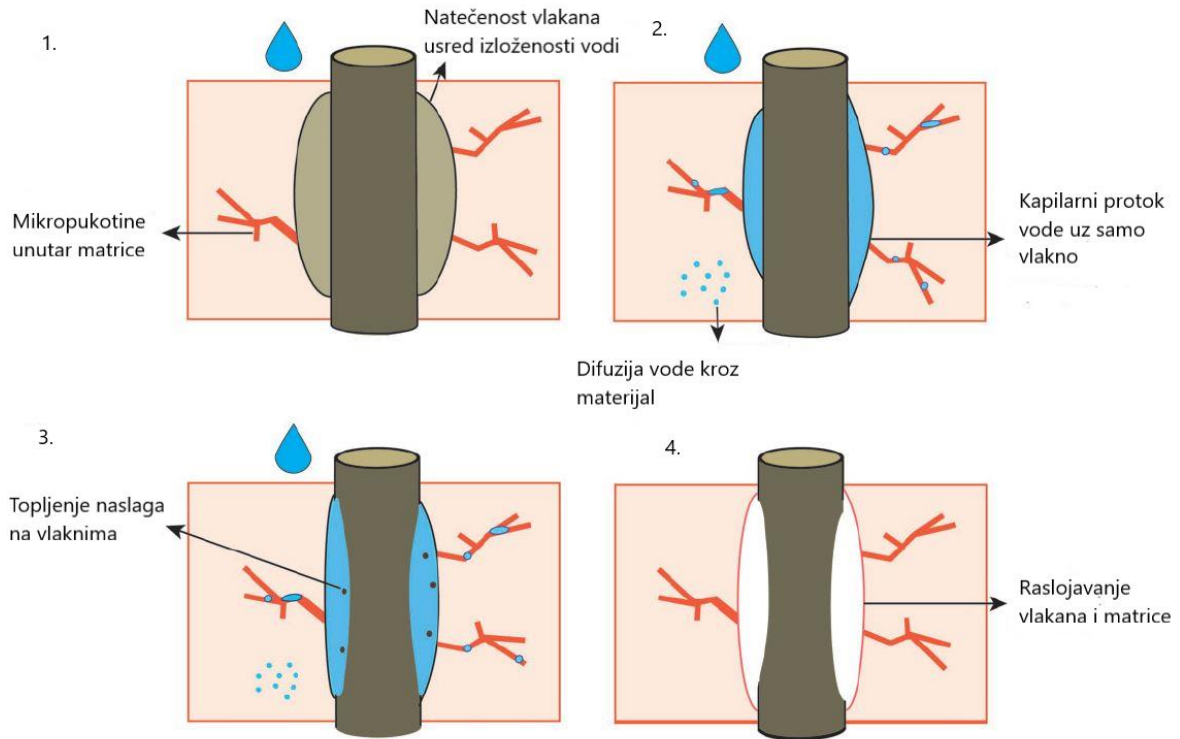
Zbog sve češćega korištenja lanenih vlakana u epoksidnoj matrici za izradu novih proizvoda, bitno je sagledati sve faktore koji utječu na njihova mehanička svojstva. Neki od tih

faktora utjecaj su vode i vlage na materijal i njegova mehanička svojstva. Zbog hidrofilnosti lanenih vlakana u odnosu na staklena, bitno je sagledati i njihovo ponašanje u vlažnim uvjetima. Uz to što se zna da vlaga i voda negativno utječu na vijek života lana, jer dolazi do pojave truleži i razlaganja, dolazi i do promjene njegovih mehaničkih svojstava i promjene na razini mikrostrukture. Pri proizvodnji kompozita vlaga negativno utječe na vezu između epoksidne matrice i vlakana te dolazi do nastajanja mikro pora uz vlakna i mikro pukotina u koje ulazi vlaga. U procesu sušenja lanenih vlakana unutar epoksidne matrice dolazi do procesa odvajanja dviju faza. Proces počinje tako što vlakna nabubre pod utjecajem vode. Ta voda u procesu sušenja izlazi iz vlakana osmozom te putuje kroz praznine između vlakana i matrice te pukotina koje su nastale. Budući da se lan brže suši i skuplja od epoksidne matrice to dovodi do raslojavanja između matrice i ojačala (Slika 9). Kao što difuzija vode u materijal ovisi o debljini materijala, tako ovisi i o usmjerenost vlakana. U slučaju u kojem se vlakno proteže okomito na debljinu materijala, dolazi do najniže apsorpcije vode u materijal dok najveću apsorpciju pokazuje materijal s tkanjem pod kutom od 45°. [18]

Promatranjem upojnosti vode u laneni kompozit istraživači su zaključili kako se proces difuzije vode u materijal ponaša po Fickovu zakonu. Brzina difuzije od 10^{-6} mm/s zabilježena je kod lanenih vlakana te se u potpunosti podudara s brzinom difuzije kod ostalih prirodnih vlakana. Uz to, prevelika izloženost ovakvoga kompozita vodi može doći do otapanja vodotopljivih spojeva na površini lana te spajanja molekula vode s OH skupinom na vlaknima. Iako je ulazak vode u materijal veliki problem kod ovakvih materijala te se zna da kemijski i fizički tretmani utječu na apsorpciju vode u materijal, on katkada ima i pozitivan učinak na mehanička svojstva. Iako dolazi do pada savojnoga i rasteznoga modula elastičnosti, kao i savojne čvrstoće kod materijala koji su bili pod utjecajem vode, rastezna čvrstoća znatno im raste zbog bolje međufazne veze lanenih vlakana i epoksidne matrice. Lanena vlakna nabubre te dolazi do povećanja u silama trenja između matrice i ojačala te samim time i do ojačanja međusobne veze. [19]

Apsorpcija vode u materijal može se smanjiti dodatkom grafita u epoksidnu smjesu pri čemu dolazi do smanjenja apsorbirane vode u materijalu zbog stvaranja barijere između matrice i vodenih molekula. Utjecaj grafita na modul nije značajan te se zna da s porastom vremena izloženosti materijala dolazi i do smanjenja modula, a savojna i međuslojna čvrstoća rastu s dodatkom grafita. Tim postupkom dolazi do bolje adhezije između lanenih vlakana i epoksidne matrice te grafit matrici donosi veću krutost zbog svojih mehaničkih svojstava. Samim time zaključeno je da ovakva vrsta kompozita može biti za vanjsku primjenu i primjenu u vlažnim

uvjetima te su sve veće šanse za njihovu primjenu na karoserijama automobila i vanjskim dijelovima aviona i brodova. [20]



Slika 9. Raslojavanje matrice i vlakana usred djelovanja vode [18]

3. ISPITIVANJE SVOJSTVA KOMPOZITA

Uzorci hibridno laminiranih vlakana staklo/lan uronjeni su u riječnu vodu kako bi se dobila ukupna upojnost materijala do točke zasićenja. Nakon izračuna upojnosti izrađena su ispitna tijela te su se testirala za dobivanje rastezne i savojne čvrstoće te rasteznoga i savojnoga modula elastičnosti. Cilj je zadatka ispitati odnos rezultata između uronjenih i ne uronjenih ispitnih uzoraka i analizirati dobivene čvrstoće.

3.1. Materijali ispitnih tijela

Uzorci za ispitivanje mehaničkih svojstava i upojnosti vode napravljeni su od lanenoga i staklenoga tkanja unutar epoksidne matrice. Uzorci su dobiveni ručnim laminiranjem uz pomoć utega radi bolje impregnacije smole u vlakna. Laminiranje se vršilo pri sobnoj temperaturi. Lanena vlakna koja su korištena za izradu kompozita tkana su u keper, tkanja s pravilnom dijagonalnom rebrastom teksturom, dok su staklena vlakna klasičnog tkanja u platno. Lanena vlakna tipa AmpliTEX 500 proizvedena su u tvornici Bcomp, Švicarska, imaju gustoću 1350 kg/m^3 , dok su staklena vlakna Woven Roving Glass 490 tkana u tvornici Kelteks d.o.o., Karlovac. Smola korištena u proizvodnji je dvokomponentna epoksidna smola niske viskoznosti (Nova-chem d.o.o., Karlovac). Napravljeno je 5 uzoraka sa 6 slojeva vlakana (Slika 10). Konfiguracije uzoraka su:

3.1. SLLLLS

3.2. LLSSLL

3.3. LSLLSL

3.4. SSSSSS

3.5. LLLLLL

S – tkanje staklenih vlakana

L – tkanje lanenih vlakana



Slika 10. Prikaz uzoraka za ispitivanje upojnosti

3.2. Ispitivanje upojnosti vode

Upojnost materijala je sposobnost materijala da se na fizičkoj i kemijskoj razini veže s molekulama vode. Na fizičkoj razini vezivanje vode znači njeno zadržavanje u porama pukotinama i šupljinama materijala, dok se kemijski molekule vode poznate po svojoj polarnosti mogu vezati za molekule materijala koje su također polarne. Ispitivanje upojnosti se vršilo tako što su uzorci stavljeni u metalni kavez i držani u rijeci Mrežnici 20 dana u periodu od 27.02. do 19.03. Svaki dan su uzorci vađeni iz kaveza te im se mjerila masa (Tablica 2, Tablica 3, Tablica 4, Tablica 5, Tablica 6, Tablica 7, Tablica 8 i Tablica 9). Nakon 20 dana krajnja masa je uspoređena s početnom masom (Tablica 1) te je dobiven maseni udio vode u materijalu. Kako bi rezultati bili što točniji korištene su dvije vrste vage, zlatarska i industrijska vaga (Slika 11), te su uzorci vađeni na isti način bez brisanja viška vode s njih.



Slika 11. Vage za mjerenje mase: desno industrijska i lijevo zlatarska

Tablica 1. Prikaz početne mase mjerene u laboratoriju

UZORAK	POČETNA MASA, [g]
SLLLLS	156,51
LLSSLL	307,37
LSLLSL	212,50
SSSSSS	76,09
LLLLLL	305,61

Tablica 2. Prikaz mase [g] izmjerene industrijskom vagom od 1. do 5. dana

INDUSTRIJSKA	28. 2.	1. 3.	2. 3.	3. 3.	4. 3.
SLLLLS	157,22	157,08	157,46	156,93	159,19
LLSSLL	309,43	309,07	310,29	309,42	314,35
LSLLSL	214,37	213,77	215,25	214,90	218,16
SSSSSS	77,14	76,75	77,05	76,50	78,81
LLLLLL	306,95	306,95	307,97	307,64	310,79

Tablica 3. Prikaz mase [g] izmjerene industrijskom vagom od 6. do 10. dana

INDUSTRIJSKA	5. 3.	6. 3.	7. 3.	8. 3.	9. 3.
SLLLLS	159,88	159,31	158,52	159,03	159,07
LLSSLL	314,72	313,42	313,83	314,06	314,32
LSLLSL	218,69	218,82	217,46	218,82	218,88
SSSSSS	78,90	78,39	77,70	78,05	77,89
LLLLLL	310,70	310,92	311,13	311,02	311,34

Tablica 4. Prikaz mase [g] izmjerene industrijskom vagom od 11. do 15. dana

INDUSTRIJSKA	10. 3.	11. 3.	12. 3.	13. 3.	14. 3.
SLLLLS	159,24	161,37	159,46	160,36	161,20
LLSSLL	315,09	316,11	316,13	315,60	315,91
LSLLSL	219,62	220,95	219,86	220,01	221,26
SSSSSS	77,76	79,02	78,07	79,18	80,35
LLLLLL	312,88	313,56	312,62	313,08	313,85

Tablica 5. Prikaz mase [g] izmjerene industrijskom vagom od 16. do 20. dana

INDUSTRIJSKA	15. 3.	16. 3.	17. 3.	18. 3.	19. 3.
SLLLLS	160,61	159,76	161,79	162,22	160,94
LLSSLL	316,47	316,60	319,52	317,94	317,84
LSLLSL	220,54	221,17	222,14	224,23	221,64
SSSSSS	80,60	80,38	80,97	80,54	78,72
LLLLLL	313,52	313,78	314,92	316,06	314,76

Tablica 6. Prikaz mase [g] izmjerene zlatarskom vagom od 1. do 5. dana

ZLATARSKA	28. 2.	1. 3.	2. 3.	3. 3.	4. 3.
SLLLLS	157,22	157,24	157,59	157,09	160,26
LLSSLL	309,43	309,51	310,86	310,02	314,93
LSLLSL	214,37	214,28	215,70	215,27	218,66
SSSSSS	77,14	76,68	76,72	76,62	79,10
LLLLLL	306,95	307,55	308,76	308,29	311,47

Tablica 7. Prikaz mase [g] izmjerene zlatarskom vagom od 6. do 10. dana

ZLATARSKA	5. 3.	6. 3.	7. 3.	8. 3.	9. 3.
SLLLLS	160,19	159,45	159,04	159,52	159,35
LLSSLL	315,35	314,04	314,96	314,96	314,89
LSLLSL	219,17	219,22	218,34	219,80	219,43
SSSSSS	79,04	78,52	78,00	78,42	78,14
LLLLLL	311,41	311,74	312,06	311,85	312,04

Tablica 8. Prikaz mase [g] izmjerene zlatarskom vagom od 11. do 15. dana

ZLATARSKA	10. 3.	11. 3.	12. 3.	13. 3.	14. 3.
SLLLLS	159,54	161,78	159,67	160,65	161,47
LLSSLL	315,92	316,80	316,83	316,30	316,66
LSLLSL	220,05	221,48	220,30	220,37	221,76
SSSSSS	77,82	79,00	78,25	79,26	80,36
LLLLLL	313,30	314,34	313,24	313,73	314,62

Tablica 9. Prikaz mase [g] izmjerene zlatarskom vagom od 16. do 20. dana

ZLATARSKA	15. 3.	16. 3.	17. 3.	18. 3.	19. 3.
SLLLLS	160,93	159,87	162,13	162,55	161,37
LLSSLL	317,07	317,25	320,23	318,92	318,43
LSLLSL	220,90	221,58	222,68	224,13	221,96
SSSSSS	80,87	80,30	81,03	80,70	78,66
LLLLLL	314,32	314,36	315,66	316,59	315,49

Promjene u masi koje su uočljive nakon prvog dana vaganja je radi otapanja masnoća i nečistoća nastalih tijekom proizvodnje, rukovanja, transporta te rezanja uzoraka.

Izračun upojnosti vode u materijalračuna se po izrazu:

$$Mt\% = \frac{m_t - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (1)$$

Pošto je zamijećeno da obje vage pokazuju isti postotni promjer mase uzoraka u daljnjoj analizi koristiti ćemo samo masu dobivenu vaganjem industrijskom vagom.

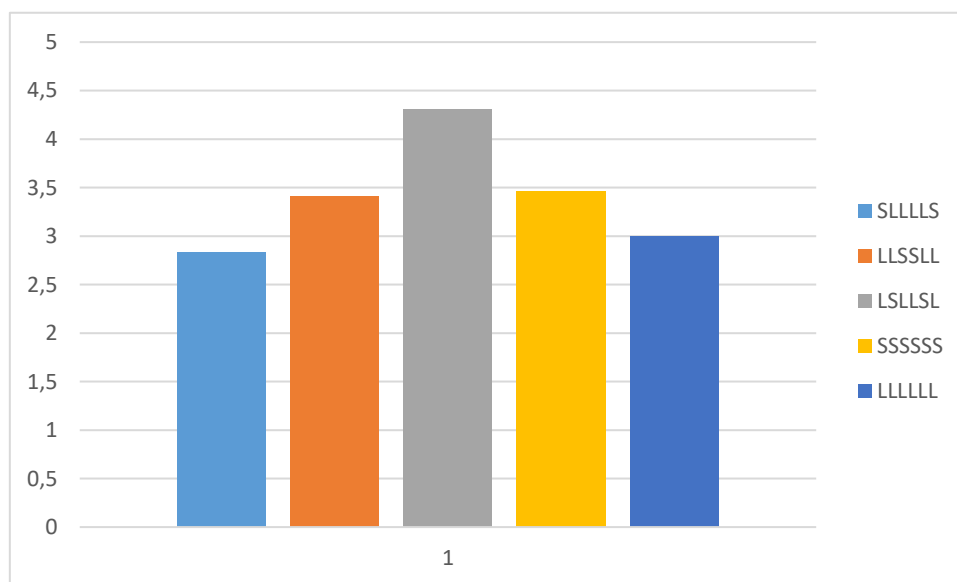
Slika 18. nam prikazuje pravce aproksimacije točaka prema čijem nagibu možemo dobiti koeficijent difuzije molekula vode unutar različitih konfiguracija uzoraka materijala. Prema tome se vidi da SSSSSS ima najveću brzinu difuzije vode, dok za 38 % manju ima SLLLLS čija je brzina ujedno i najmanja. Za 4 % veću od SLLLLS ima kompozit sa samo lanenim vlaknima te nakon njega dolaze LLSSLL i LSLLSL.

Analizom rezultata mjerenja upojnosti vode prikazanih na Slika 12, Slika 13, Slika 14, Slika 15, Slika 16 i Slika 17 te Tablica 10 dobiveno je da obje vage uz minimalne varijacije u mjerenju mase pokazuju da SLLLLS ima najmanju upojnost vode dok LSLLSL ima najveću. LLLLLL ima nešto veću od SLLLLS, dok su iznad njega SSSSSS i LLSSLL. Na upojnost vode utječe debljina ploče jer je teže vodi difundirati kroz deblji materija. Ovo posebno dolazi do izražaja kod najtanje ploče ojačane samo staklenim vlaknima, SSSSSS. Ipak, budući da je poznato da su lanena vlakna hidrofilna, a staklo hidrofobno, uz istu matricu, za očekivati je da

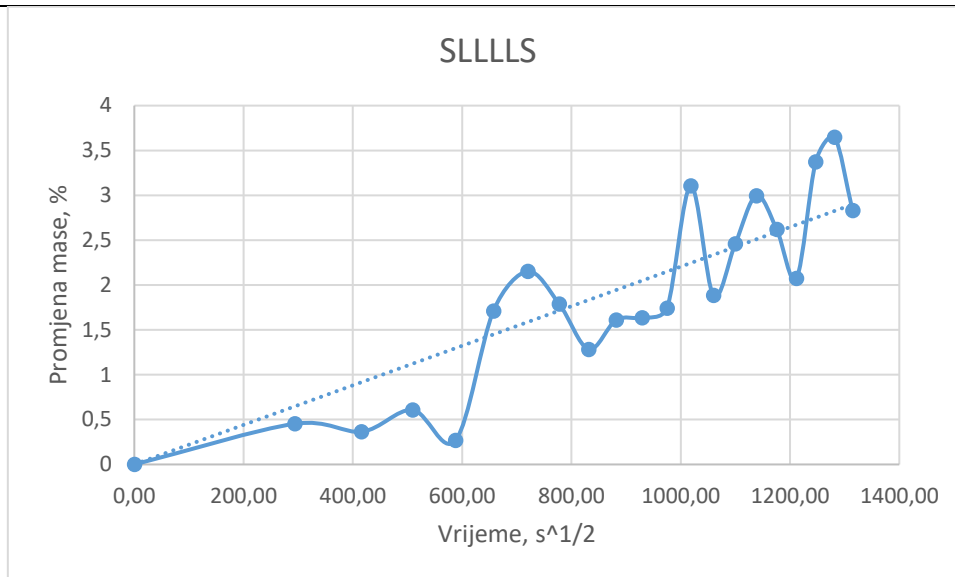
neće upiti puno vode. Relativno velika upojnost ploče SSSSSS najvjerojatnije je posljedica šupljina u materijalu, a moguće je i da je epoksidna smola preko vodikovih veza apsorbirala dio vode.

Tablica 10. Prikaz upojnosti za uzorke dobivene mjerenjem industrijskom i zlatarskom vagom

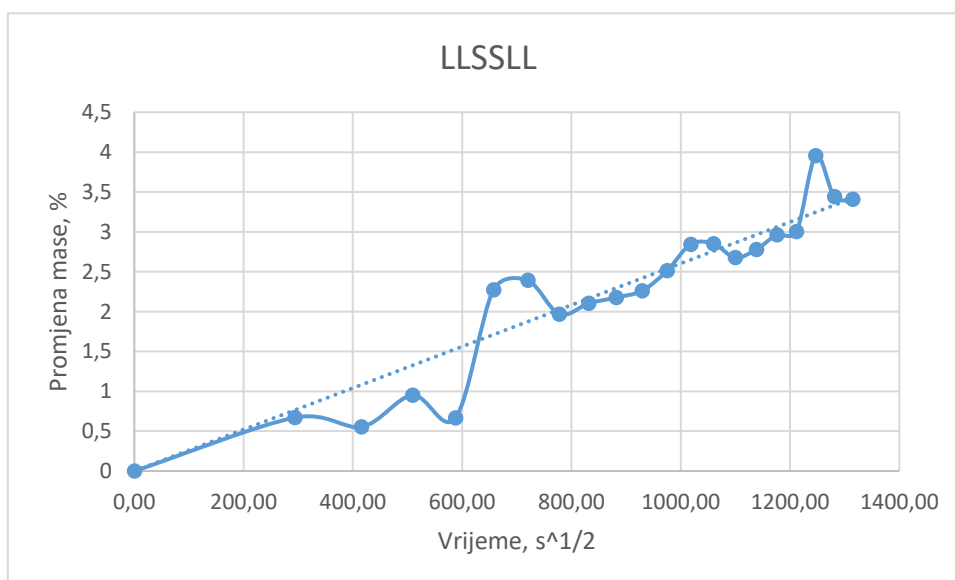
UPOJNOST	INDUSTRIJSKA	ZLATARSKA	POČETNA DEBLJINA, mm	KONAČNA DEBLJINA, mm
SLLLLS	2,83 %	3,11 %	3,85	3,72
LLSSLL	3,41 %	3,60 %	5,6	5,76
LSLLSL	4,30 %	4,45 %	4,4	4,59
SSSSSS	3,46 %	3,38 %	1,8	1,64
LLLLLL	2,99 %	3,23 %	6,3	6,65



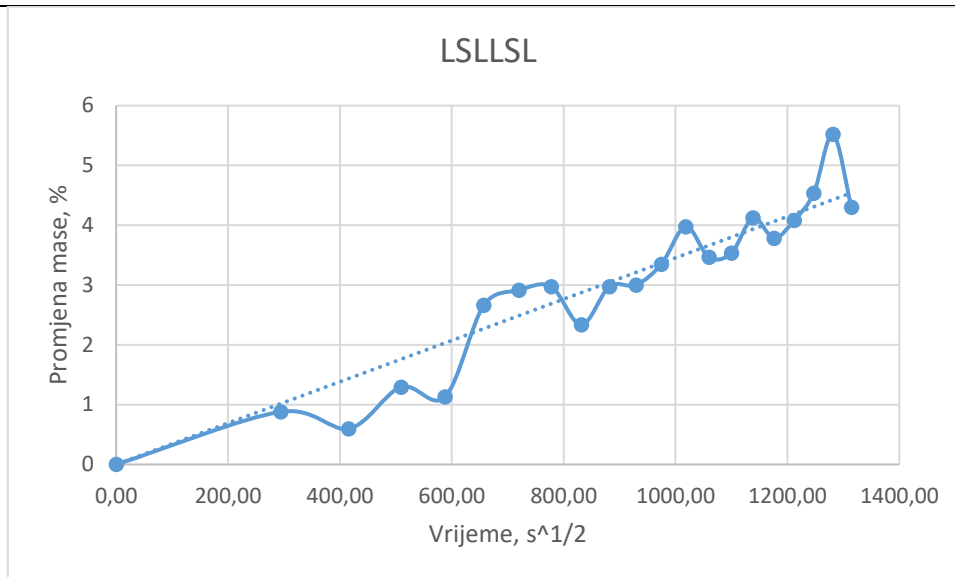
Slika 12. Prikaz promjene mase konfiguracija materijala



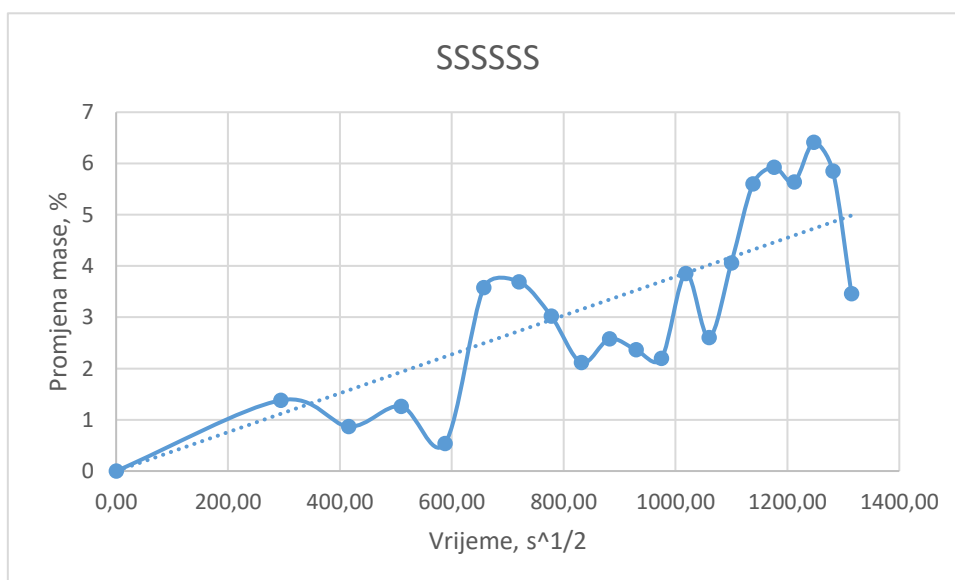
Slika 13. Dijagram promjene mase SLLLLS konfiguracije materijala po korijenu vremena



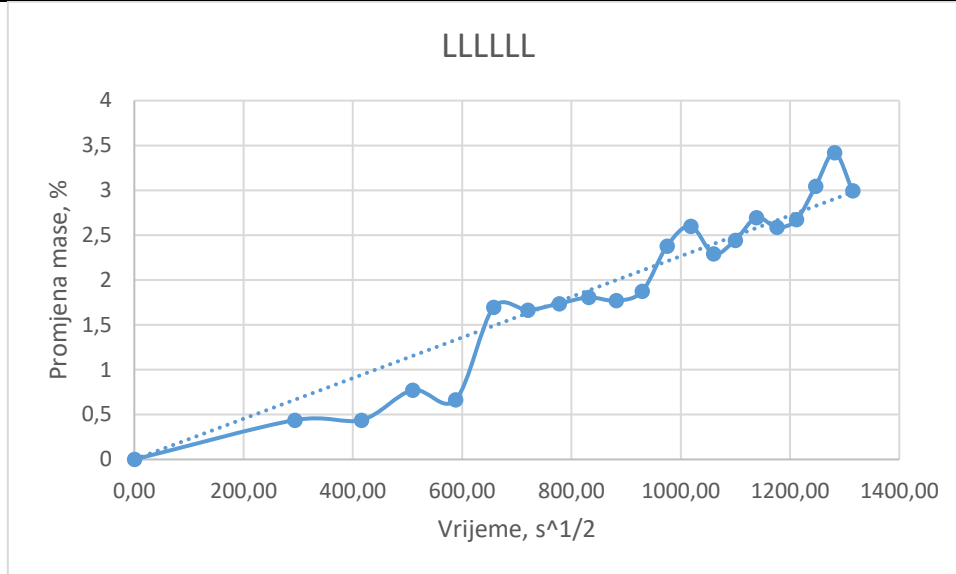
Slika 14. Dijagram promjene mase LLSSLL konfiguracije materijala po korijenu vremena



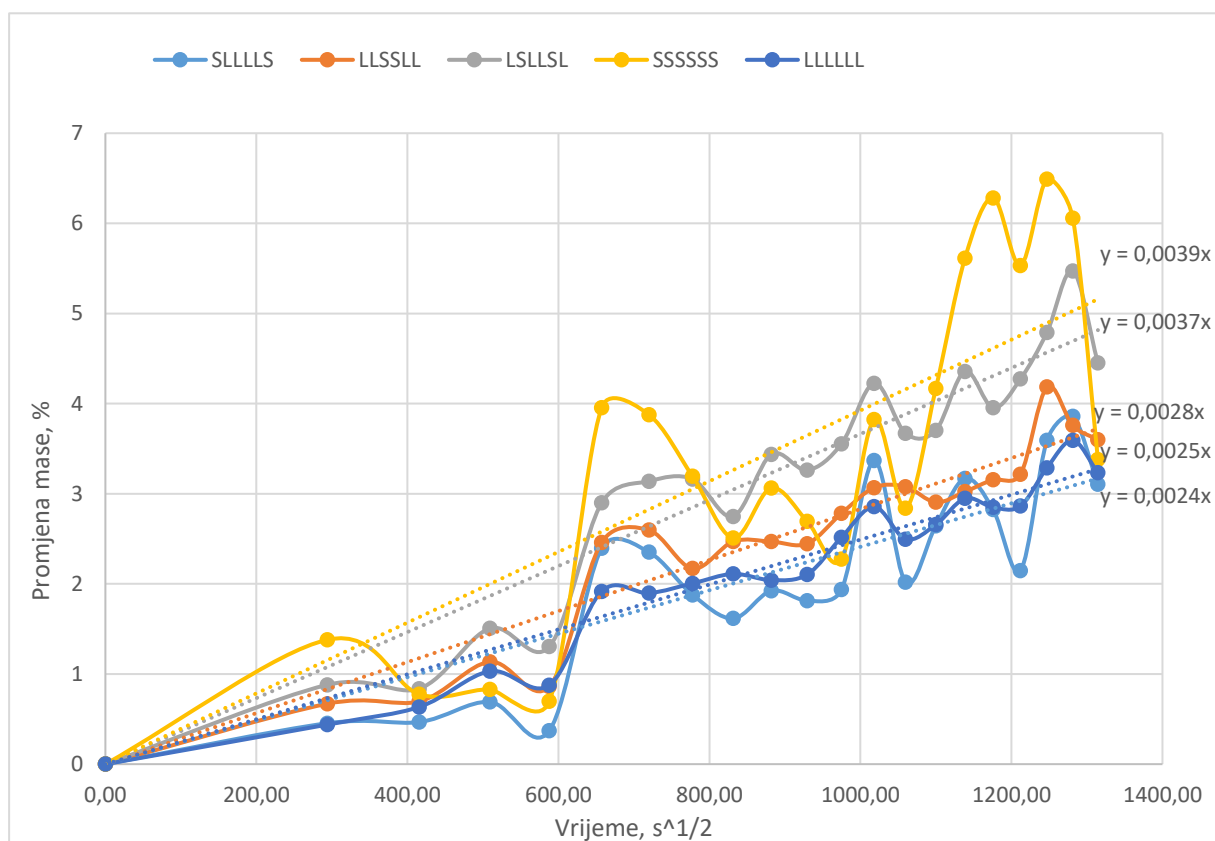
Slika 15. Dijagram promjene mase LSLLSL konfiguracije materijala po korijenu vremena



Slika 16. Dijagram promjene mase SSSSSS konfiguracije materijala po korijenu vremena



Slika 17. Dijagram promjene mase LLLLLL konfiguracije materijala po korijenu vremena



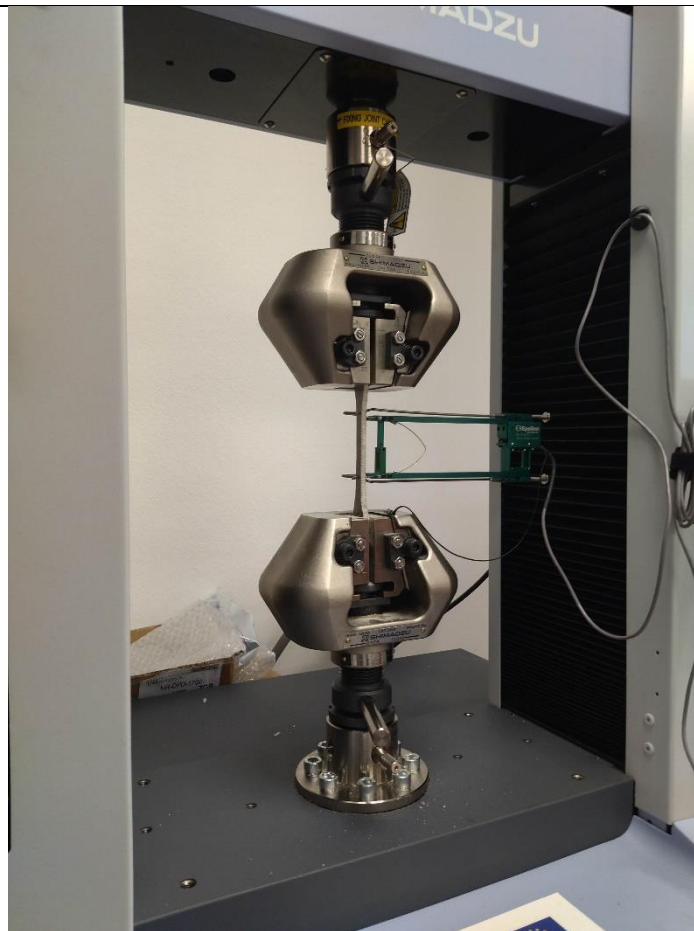
Slika 18. Prikaz promjene mase konfiguracije materijala po korijenu vremena i njihovih pripadajućih pravaca aproksimacije

3.3. Ispitivanje rastezne čvrstoće i rasteznoga modula elastičnosti kompozita

Nakon što je ispitana upojnost vode uzoraka, iz njih su izrezana ispitna tijela (Slika 19) za ispitivanje rastezne čvrstoće i rasteznoga modula elastičnosti. Ispitivanje se vršilo na Shimadzu AGS-X kidalici po normi HRN EN ISO 527-4:1997 – Plastika – Određivanje rastezних svojstava – 4.dio: Ispitni uvjeti za izotropne i ortotropne plastične kompozite ojačane vlaknima (Slika 20). Kidalica je povezana s računalom. Pomoću programa TrapeziumX upravljano je kidalicom te se na njemu dobiveni rezultati i iscrtani grafovi rezultata pojedinog ispitnog tijela. Mjerno područje ove kidalice je 50 kN te se ispitivanje vršilo brzinom od 2 mm/min za svako ispitno tijelo.



Slika 19. Ispitna tijela za rastezno ispitivanje



Slika 20. Ispitivanje rastezne čvrstoće i rasteznog modula na kidalici

Rastezna se čvrstoća (σ_{rM}) računa kao maksimalna rastezna sila u trenutku loma (F_{rM}) kroz početnu površinu poprečnoga presjeka ispitnoga tijela (A_0). Formula izgleda ovako:

$$\sigma_{rM} = \frac{F_{rM}}{A_0} \quad (2)$$

σ_{rM} [MPa] – rastezna čvrstoća

F_{rM} [N] – maksimalna rastezna sila

A_0 [mm²] – početna površina poprečnoga presjeka ispitnoga tijela

Za izračun maksimalnoga istežanja ispitnoga tijela ($\varepsilon_{\max,r}$) do trenutka loma korištena je formula:

$$\varepsilon_{rM} = \frac{l_{\max,r}}{l_0} * 100\% \quad (3)$$

ε_{rM} [mm/mm] – maksimalno rastežno istežanje ispitnoga tijela

l_{rM} [mm] – maksimalno produljenje ispitnoga tijela tijekom rasteznoga ispitivanja do trenutka loma

l_0 ili L [mm] – početna duljina ispitnoga tijela, razmak između čeljusti kidalice

Kako bi se dobio Youngov modul elastičnosti, za rastezno se ispitivanje (E_r) koristi Hooke-ov zakon:

$$\sigma_r = E_r * \varepsilon \quad (4)$$

σ_r [MPa] – naprezanje dobiveno rasteznim ispitivanjem

E_r [MPa] – Youngov modul elastičnosti za rastezno ispitivanje

ε [mm/mm] – istežanje ispitnoga tijela

Izraz (4) je jednadžba pravca u dijagramu naprežanje-istežanje, pri čemu se modul određuje kao nagib pravca u linearnom dijelu dijagrama, u kojem se materijal ponaša elastično. U ovome se primjeru modul elastičnosti dobio aproksimacijom pravca u programu TrapeziumX.

Dimenzije ispitnih tijela dane su u Tablica 11.

Tablica 11. Dimenzije ispitnih tijela za rastezno ispitivanje u mm

ISPITNO TIJELO	DEBLJINA, mm	ŠIRINA, mm	RAZMAK OSOLONACA, mm
1.1	3,84	11,04	50
1.2	3,7	10,6	50
1.3	3,59	10,36	50
1.4	3,76	10,43	50
1.5	3,72	10,48	50
2.1	5,7	10,74	50
2.2	5,82	10,16	50
2.3	5,78	10,34	50
2.4	5,72	10,82	50
3.1	4,64	10,6	50
3.2	4,56	10,63	50
3.3	4,53	10,32	50
3.4	4,64	10,59	50
4.1	1,46	10,28	50
4.2	1,71	10,22	50
4.3	1,64	10,26	50
4.4	1,71	10,8	50
4.5	1,69	10,09	50

5.1	6,6	10,26	50
5.2	6,5	9,8	50
5.3	6,73	10	50
5.4	6,76	10,1	50

3.4. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće i rasteznoga modula elastičnosti kompozita

Ispitivanjem rastezne čvrstoće i rasteznoga modula dobiveni su rezultati prikazani u Tablica 12.

Tablica 12. Dobiveni rezultati rasteznoga ispitivanja

UZORAK	MAX SILA $F_{\max,r}$, N	MODUL E_r , MPa	ČVRSTOĆA $\sigma_{m,r}$, MPa	PRODULJENJE $l_{\max,r}$, mm	ISTEZLJIVOST $\varepsilon_{\max,r}$, mm/mm
1.1	2862,31	3186,94	67,52	1,34	2,68
1.2	3263,03	4507,73	83,2	1,75	3,49
1.3	3273,54	4783,73	88,02	1,66	3,32
1.4	3225,04	4319,04	82,24	1,71	3,42
1.5	3238,85	5392,63	83,08	1,52	3,04
2.1	4321,69	4694,89	70,6	1,52	3,04
2.2	4191,26	4616,83	70,88	1,59	3,17
2.3	4258,62	4401,56	71,26	1,45	2,9
2.4	4413,22	4775,55	71,31	1,5	3
3.1	3154,79	4571,3	64,14	1,26	2,52
3.2	3009,58	3931,53	62,09	1,49	2,98
3.3	2660,26	3620,68	56,9	1,38	2,76
3.4	2812,01	3285,97	57,23	1,47	2,93
4.1	3828,47	10847,37	255,08	1,77	3,55
4.2	3769,98	9321,46	215,72	1,62	3,24
4.3	3752,05	9373,85	222,99	1,73	3,45
4.4	3658,06	7680,12	198,08	1,61	3,22
4.5	3641,14	8538,93	213,53	1,69	3,38
5.1	3442,71	3006,27	50,84	2,32	4,64
5.2	2815,07	2425,13	44,19	2,63	5,26
5.3	3857,1	3621,83	57,31	2,33	4,67
5.4	3869,03	3294,45	56,67	2,49	4,98

Tijekom ispitivanja pronađena su ispitna tijela s lošom adhezijom vlakana i matrice te s površinskim ili unutarnjim greškama i/ili nečistoćama. Zbog toga razloga 1.1 i 5.2 ispitna tijela ne ulaze u izračun aritmetičke sredine. Izgled ispitnih tijela nakon provedenog ispitivanja prikazano je na Slika 21.

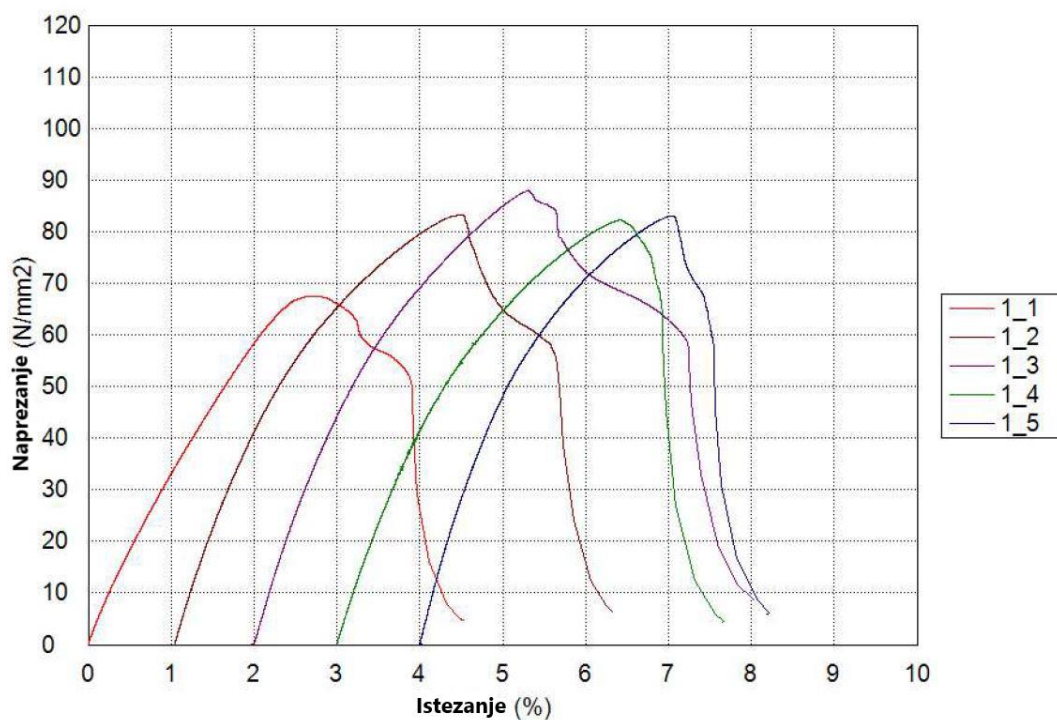


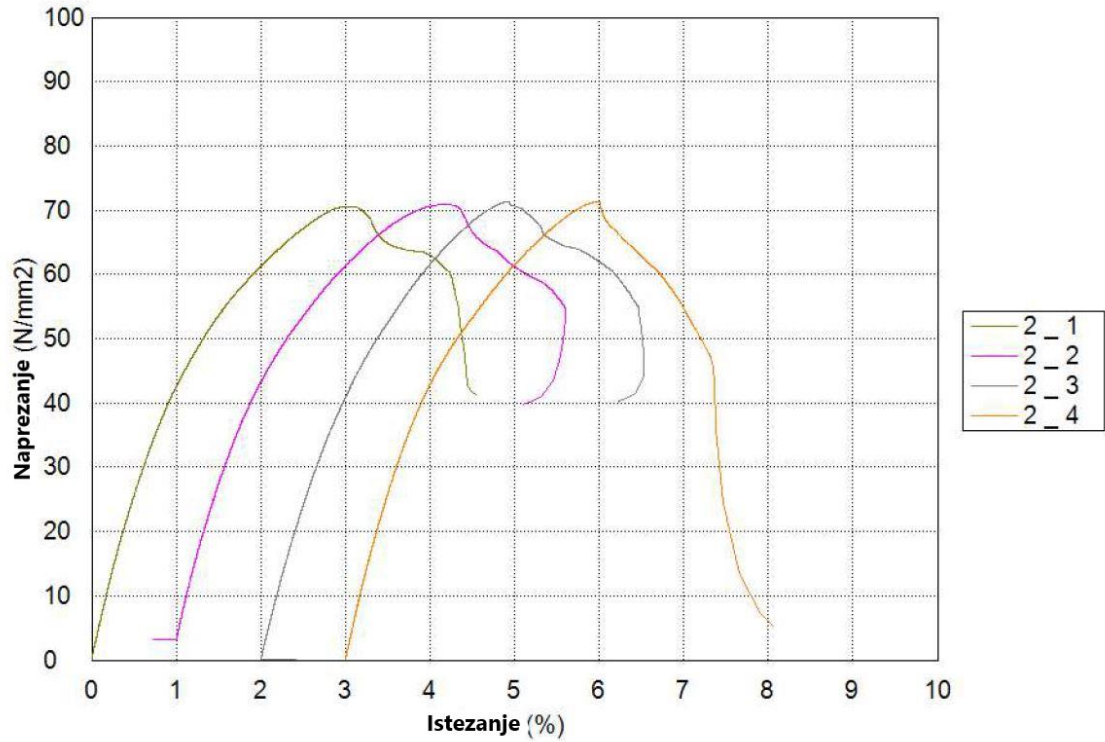
Slika 21. Prikaz ispitnih tijela nakon rasteznog ispitivanja

U Tablica 13 prikazana je aritmetička sredina po konfiguraciji vlakana kompozita kojima je ispitivana rastezna čvrstoća i rastezni modul. Prema Tablica 13 i dijagramima (Slika 22, Slika 23, Slika 24, Slika 25 i **Error! Reference source not found.**) je vidljivo da najveći modul ima kompozit ojačan staklenim vlaknima (9152,35 MPa), a najmanji onaj s lanenim (3307,52 MPa). Hibridni kompoziti očekivano imaju vrijednosti između navedenih veličina. Hibridizacijom lanenog kompozita s dva sloja staklenih vlakana, rastezni modul je porastao. Premda se radi o jednoosnom naprežanju pri čemu je jednak broj lanenih i staklenih vlakana, modul hibrida nije jednak, već je kompozitu SLLLLS porastao za 44 %, kompozitu LLSSLL za 40 %, dok je kompozitu LSLLSL porastao 16 %. Kod rastezne čvrstoće moguće je zamijetiti isto ponašanje materijala u kojem SSSSSS ima najveću čvrstoću (221,08 MPa), dok znatno najmanju ima LLLLLL konfiguracija (54,94 MPa). Kao i kod modula čvrstoća hibrida nije jednaka, već je kompozitu SLLLLS porastao za 53 %, kompozitu LLSSLL za 29 %, dok je kompozitu LSLLSL porastao 9,4 %.. Gledajući istezljivost moguće je zamijetiti da kompozit s lanenim vlaknima ima znatno veću istezljivost od kompozita samo sa staklenim dok su ostale kombinacije staklo/lan ispod oboje. Rezultati dokazuju da na rasteznu čvrstoću i modul bolje utječe vanjska strana materijala od staklenih vlakana dok unutarnja od lanenih.

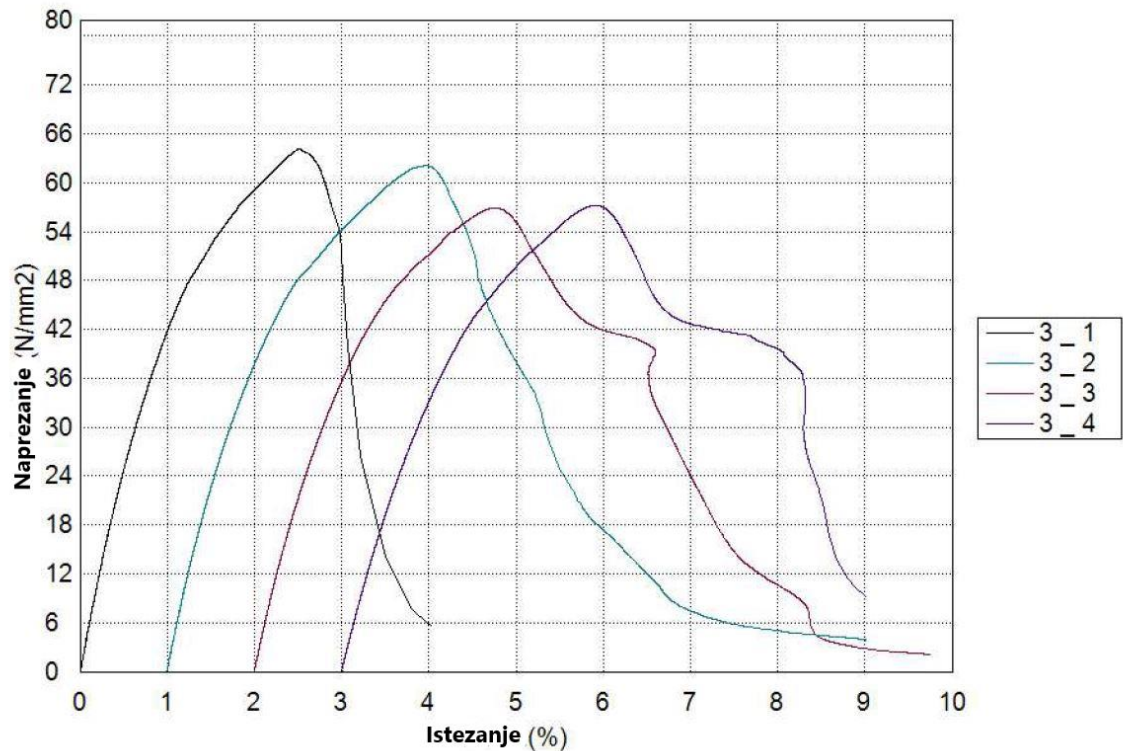
Tablica 13. Prikaz aritmetičke sredine dobivenih rezultata po konfiguracijama materijala

KONFIGURACIJE	MAX				
	SILA	MODUL	ČVRSTOĆA	PRODULJENJE	ISTEZLJIVOST
	$[F_{\max,r}]$, N	E_r , MPa	$[\sigma_{m,r}]$, MPa	$[l_{\max,r}]$, mm	$[\varepsilon_{\max,r}]$, mm/mm
SLLLLS	3250,12	4750,78	84,14	1,66	3,32
LLSSLL	4296,20	4622,21	71,01	1,52	3,03
LSSLSL	2909,16	3852,37	60,09	1,40	2,80
SSSSSS	3729,94	9152,35	221,08	1,68	3,37
LLLLLL	3722,95	3307,52	54,94	2,38	4,76

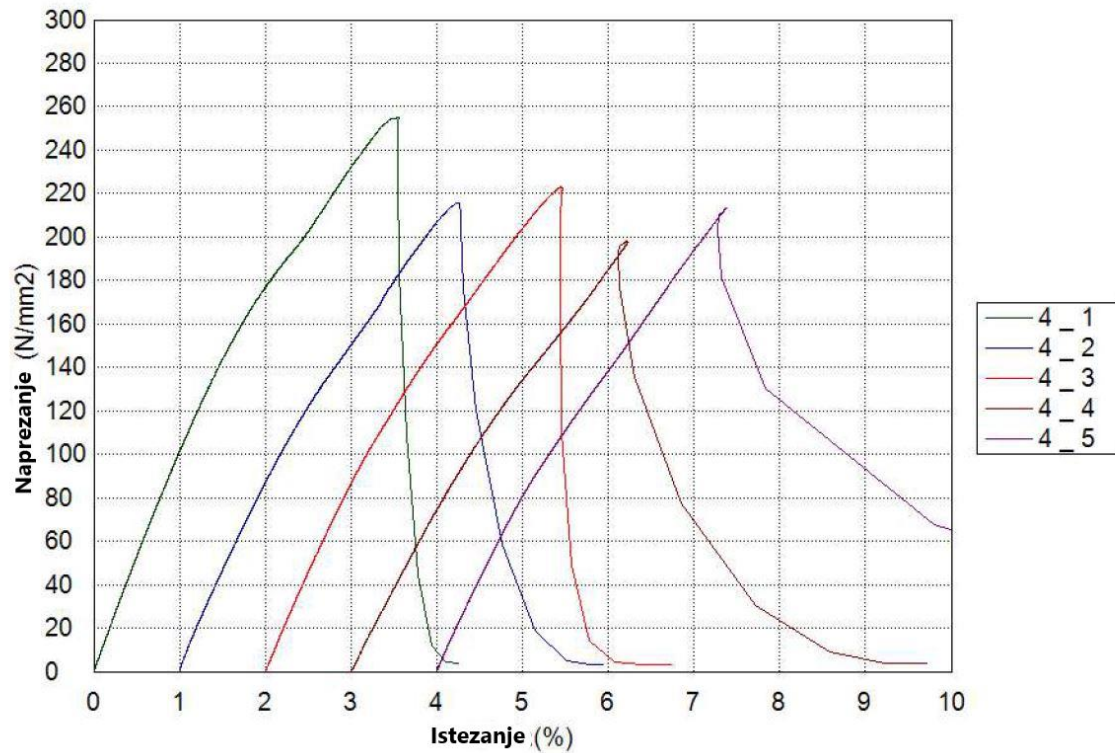
**Slika 22. Dijagram rasteznoga napreznja – istežanja za SLLLLS konfiguraciju materijala**



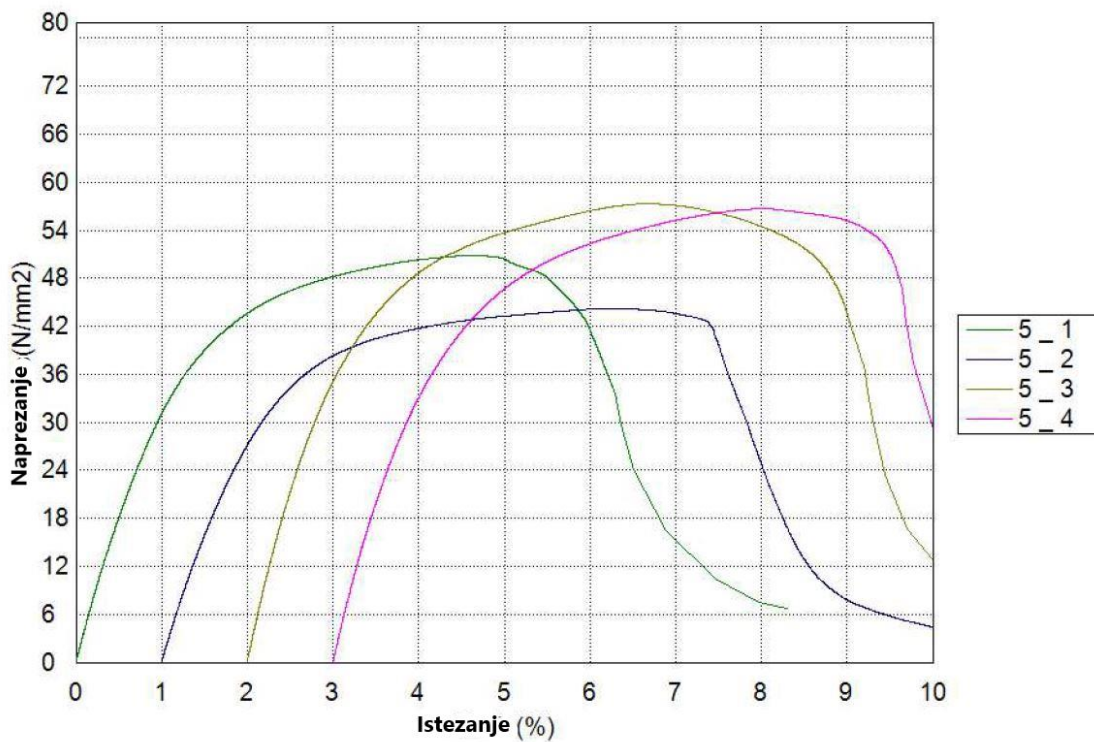
Slika 23. Dijagram rasteznoga napreznja – istezanja za LLSSL konfiguraciju materijala



Slika 24. Dijagram rasteznoga napreznja – istezanja za LSLLSL konfiguraciju materijala



Slika 25. Dijagram rasteznoga napreznja – istežanja za SSSSSS konfiguraciju materijala



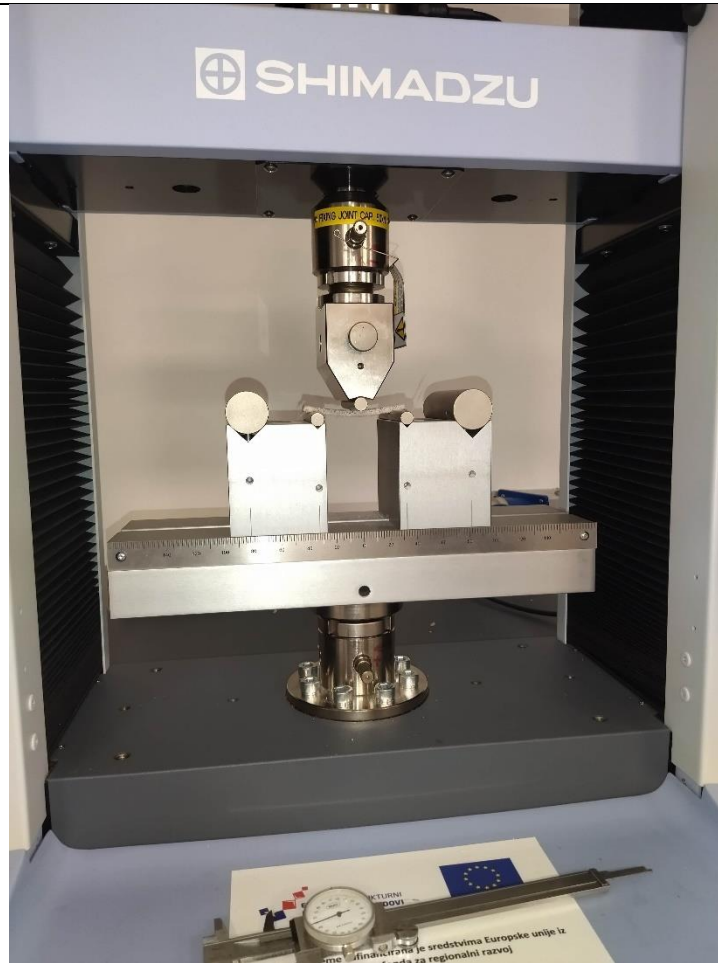
Slika 26. Dijagram rasteznoga napreznja – istežanja za LLLLLL konfiguraciju materijala

3.5. Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnoga modula elastičnosti kompozita

Savojnim ispitivanjem se utvrđuje otpornost materijala na savojno naprezanje. Ovim ispitivanjem se dobiva savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti. Iz druge polovice uzoraka izrezana su po normi ispitna tijela za savojno ispitivanje (Slika 27). Ispitivanje se vršilo na istoj kidalici kao i rastezno, brzinom ispitivanja od 25 mm/min. Savojna čvrstoća i modul se ispitani su u skladu s normom HRN EN ISO 14125:1998 Fibre-reinforced plastic composites – Determination of flexural properties. Norma propisuje ispitivanje u tri ili četiri točke, pri čemu je zbog relativno velikog progiba za kompozite prikladno ispitivanje u tri točke (Slika 28).



Slika 27. Prikaz ispitnih tijela za savojno ispitivanje



Slika 28. Prikaz savojnog ispitivanja u tri točke na kidalici

Savojno naprezanje (σ_f) računa se iz sile i dimenzija prema izrazu (5), pri čemu se uvrštavanjem maksimalne sile dobiva savojna čvrstoća (σ_{fM}).

$$\sigma_{fM} = \frac{3 \cdot F_{\max,s} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (5)$$

σ_{fM} [MPa] – savojna čvrstoća

F_{fM} [N] – maksimalna savojna sila

L [mm] – duljina između oslonaca kidalice

b [mm] – širina ispitnoga tijela

h [mm] – debljina ispitnoga tijela

Razmak između oslonaca računa se ovako:

$$L = 16 * h_{sr} \quad (6)$$

h_{sr} [mm] – aritmetička širina debljine ispitnoga tijela

Istezanje ε_f pri savijanju određuje se iz progiba i dimenzija prema izrazu (7), a označava promjenu duljine elementa na vanjskoj površini na polovici razmaka između oslonaca. Koristi se za izračunavanje savojnog modula.

Uvrštavanjem najvećeg progiba dobiva najveće istezanje ε_{fM} .

$$\varepsilon_f = \frac{6 * s * h}{L^2} \quad (7)$$

ε_{fM} [mm/mm] – maksimalna istezanje tijekom savijanja

s_{fM} [mm] – maksimalni progib

Savojni modul elastičnosti se dobije aproksimiranjem krivulje pomoću programa TrapeziumX.

Za debljinu kompozita manju od 10 mm širina je približno 15 mm. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje kao i razmak između oslonaca dani su u Tablica 14.

Tablica 14. Dimenzije ispitnih tijela i pripadajući razmak između oslonaca u mm

UZORAK	DEBLJINA, mm	ŠIRINA, mm	RAZMAK OSLONACA, mm
1.1	3,86	14,86	65
1.2	4,09	15,02	65
1.3	4,36	15,38	65
1.4	4	14,75	65
1.5	4,13	15,19	65
2.1	6,12	14,95	100
2.2	6,8	15,07	100
2.3	6,22	14,94	100
2.4	6,29	15,12	100
2.5	6,19	15,35	100
2.6	6,04	15,06	100
3.1	4,72	15,6	76
3.2	4,56	15,41	76
3.3	4,6	15,56	76
3.4	5,24	15,86	76

3.5	4,76	15,66	76
4.1	1,81	15,47	25
4.2	1,49	15	25
4.3	1,34	15,26	25
4.4	1,68	15,2	25
4.5	1,44	15,24	25
5.1	6,65	15,22	105
5.2	7,06	14,72	105
5.3	6,16	15,01	105
5.4	6,52	15,14	105
5.5	6,44	15,28	105

3.6. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće i savojnoga modula elastičnosti kompozita

Ispitivanjem savojne čvrstoće i savojnoga modula elastičnosti dobiveni su rezultati prikazani u Tablica 15.

Tablica 15. Dobiveni rezultati savojnoga ispitivanja

UZORAK	MODUL E_f , MPa	PROGIB s_{fM} , mm	MAX SILA F_{fM} , N	ISTEZLJIVOST ε_{fM} , mm/mm	ČVRSTOĆA σ_{fM} , MPa
1.1	2956,62	9,21	218,32	5,05	96,14
1.2	5373,13	8,34	311	4,84	120,68
1.3	2669,53	7,28	288,24	4,51	96,12
1.4	5505,98	8,61	293,52	4,89	121,26
1.5	5333,89	8,06	312,63	4,73	117,65
2.1	3038,4	13,09	279,05	4,81	74,75
2.2	3205,97	11,78	376,58	4,81	81,06
2.3	3859,91	13,15	322,89	4,91	83,79
2.4	3454,9	13,04	329,38	4,92	82,59
2.5	4812,25	8,72	368,32	3,24	93,93
2.6	3741,67	12,79	310,96	4,64	84,9
3.1	3106,01	11,48	230,66	5,63	75,66
3.2	3736,41	12,11	257,97	5,74	91,78
3.3	2970,9	9,31	212,92	4,45	73,72
3.4	2256,44	12,59	265,35	6,85	69,46
3.5	3180,67	12,36	270,84	6,11	87,02
4.1	7011,97	4,85	211,79	8,43	156,71
4.2	8965,42	5,7	136,01	8,16	153,16
4.3	11063,72	4,85	157,63	6,23	215,72
4.4	7706,99	2,31	139,05	3,72	121,54
4.5	10666,77	6,14	133,82	8,48	158,8
5.1	1791,49	16,02	244,3	5,8	57,17
5.2	1223	15,17	225,04	5,83	48,31
5.3	2759,63	15,7	286,36	5,26	79,19

5.4	2145,61	15,84	253,29	5,62	61,98
5.5	2261,47	15,37	274,66	5,39	68,26

Tijekom ispitivanja pronađena su ispitna tijela s lošom adhezijom vlakana i matrice te s površinskim ili unutarnjim greškama i/ili nečistoćama. Zbog toga razloga 1.1, 1.3, 3.4, 4.4, 5.1 i 5.2 ispitna tijela ne ulaze u izračun aritmetičke sredine. Izgled ispitnih tijela nakon savojnog ispitivanja prikazan je na Slika 29.



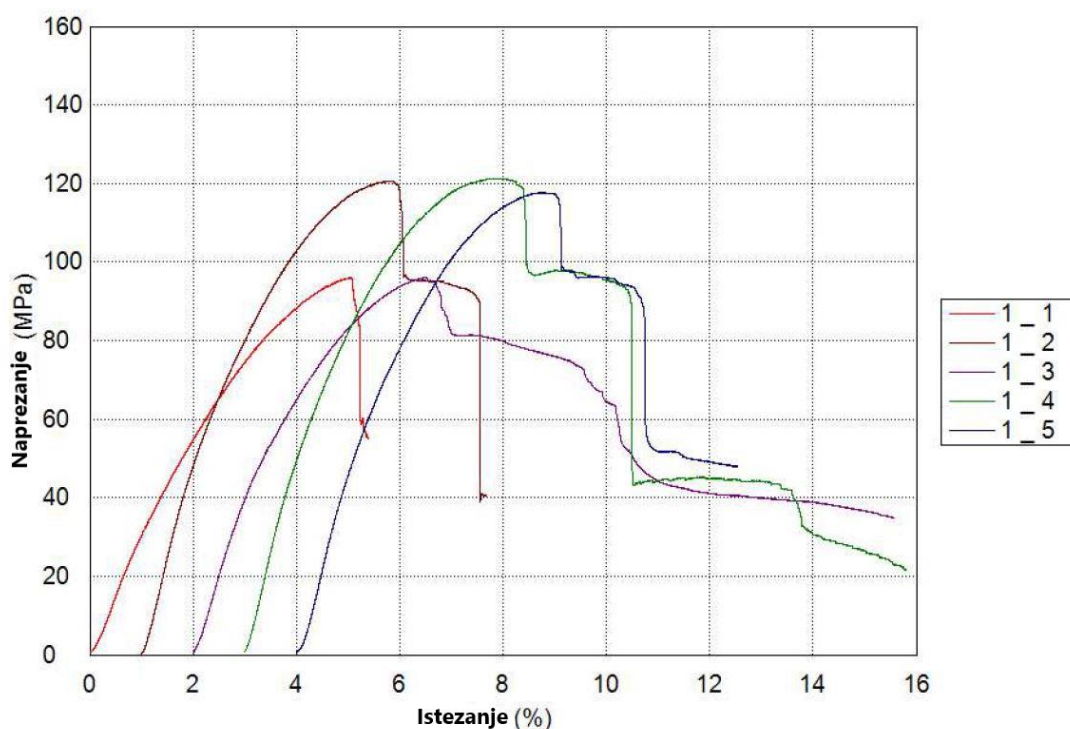
Slika 29. Prikaz ispitnih tijela nakon savojnog ispitivanja

U Tablica 16. prikazana je aritmetička sredina po konfiguraciji vlakana kompozita kojima je ispitivana savojna čvrstoća i savojni modul. Prema Tablica 16 i dijagramima (Slika 30, Slika 31, Slika 32, Slika 33 i **Error! Reference source not found.**) je vidljivo da najveći modul ima kompozit sa staklenim vlaknima (9426,97 MPa) dok najmanji modul opet ima LLLLLL kompozit (2388,90 MPa). Kao i kod rasteznog modula hibridizacijom lanenih vlakana staklenima došlo je do porasta u iznosu savojnog modula elastičnosti. SLLLLS- ov modul se

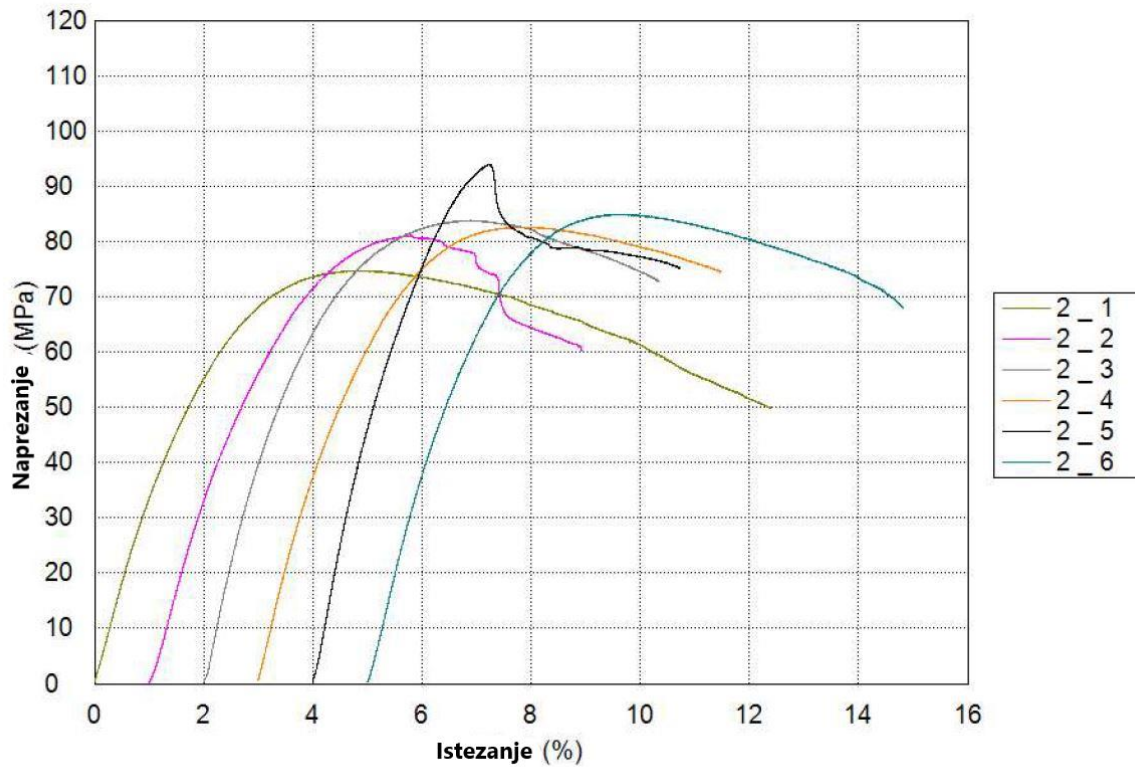
povećao za 126 % naprema LLLLLL, LLSSLL za 54 % i LSLLSL za 36 %. Kod savojne čvrstoće moguće je zamijetiti isto ponašanje materijala u kojem SSSSSS ima najveću čvrstoću (171,10 MPa), dok znatno najmanju ima LLLLLL konfiguracija (69,81 MPa). Kao i kod ostalih svojstava savojna čvrstoća je porasla hibridizacijom naprema čistog lanenog kompozita kod SLLLLS konfiguracije za 72 %, kod LLSSLL za 20 % i kod LSLLSL za 18 %. Za razliku od rasteznog ispitivanja ovdje je vidljivo da kompozit sa samo staklenim vlaknima ima najveću istežljivost dok nakon njega slijedi kompozit ojačan samo lanom i hibrid LSLLSL, te nakon njih ostala dva. Iz Tablice 16 je vidljivo da kompozit ojačan staklenim vlaknima u vanjskim površinama ima najbolja svojstva od triju hibrida.

Tablica 16. Prikaz aritmetičke sredine dobivenih rezultata po konfiguracijama materijala

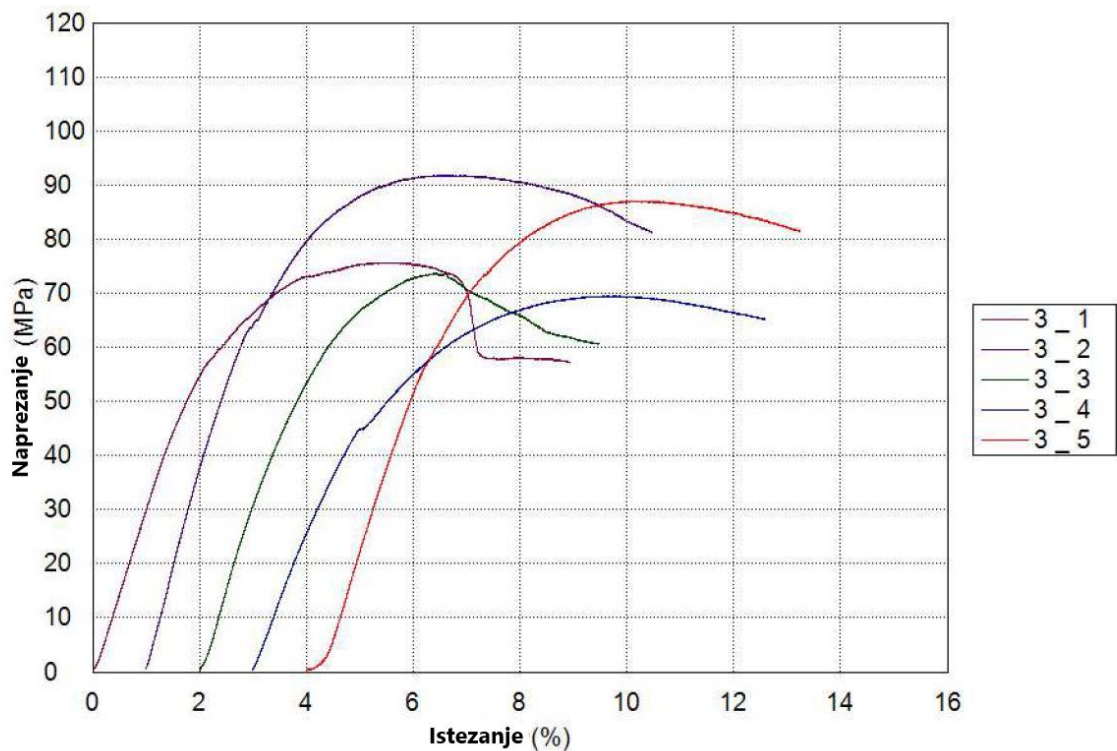
KONFIGURAC IJA	MODUL E_f , MPa	PROGIB s_{FM} , mm	MAX SILA F_{FM} , N	ISTEŽLJIVOST ε_{FM} , mm/mm	ČVRSTOĆA σ_{FM} , MPa
SLLLLS	5404,33	8,34	305,72	4,82	119,86
LLSSLL	3685,52	12,10	331,20	4,56	83,50
LSLLSL	3248,50	11,32	243,10	5,48	82,05
SSSSSS	9426,97	5,39	159,81	7,83	171,10
LLLLLL	2388,90	15,64	271,44	5,42	69,81



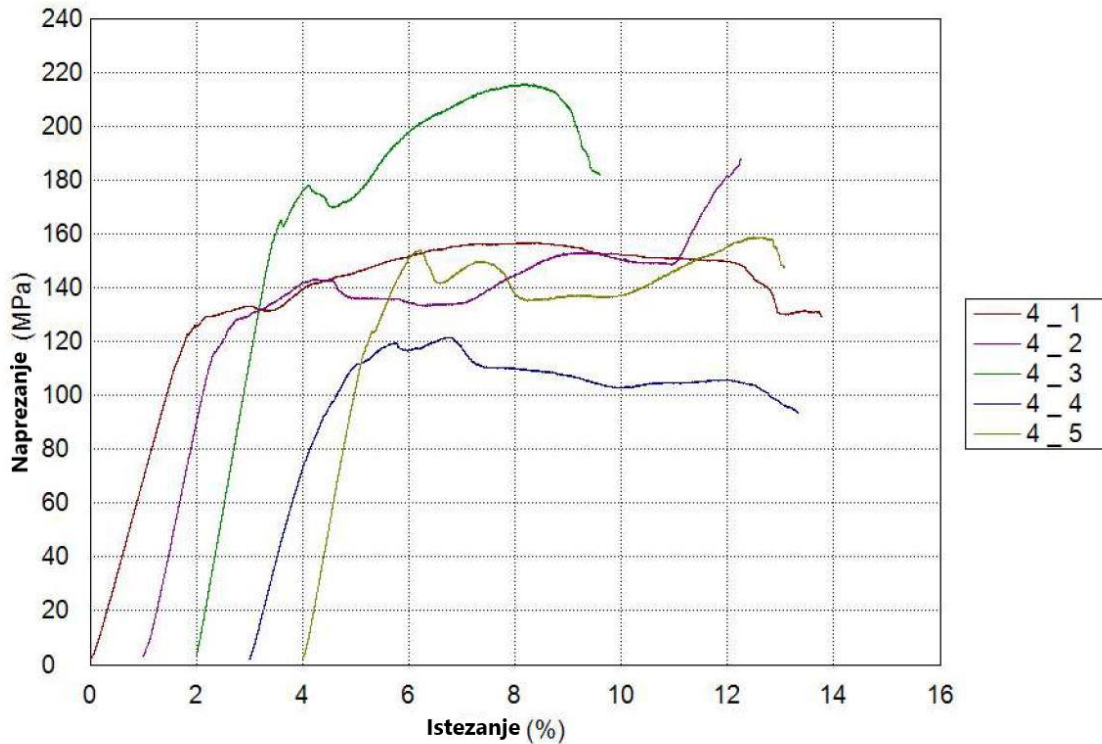
Slika 30. Dijagram savojnoga naprezanja – istežanja za SLLLLS konfiguraciju materijala



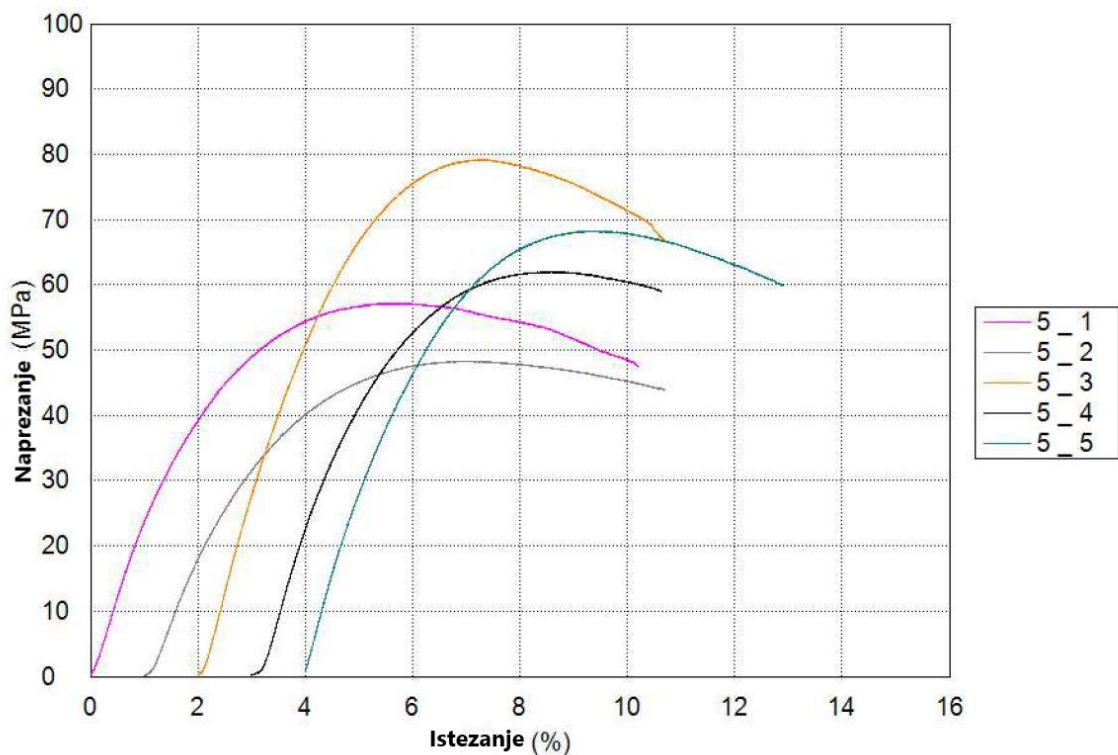
Slika 31. Dijagram savjnoga napreznja – istezanja za LLSSL konfiguraciju materijala



Slika 32. Dijagram savjnoga napreznja – istezanja za LSLLSL konfiguraciju materijala



Slika 33. Dijagram savojnoga napreznja – istežanja za SSSSSS konfiguraciju materijala



Slika 34. Dijagram savojnoga napreznja – istežanja za LLLLLL konfiguraciju materijala

3.7. Analiza rezultata ispitivanja

Rezultati ispitivanja uspoređeni su sa sličnim kompozitima koji nisu prethodno namočeni u vodu, a ispitani su u okviru drugog još neobjavljenog diplomskog rada (Lucija Lončar, 2023). Ovi su kompoziti izrađeni od iste matrice i staklenih vlakana, dok su lanena vlakna bila tanja i biaksialno orijentirana. Dobiveni rezultati prikazani su u Tablica 17. za rastezno i Tablica 18. za savojno ispitivanje.

Tablica 17. Usporedba rezultata rasteznoga ispitivanja suhих (mala slova) i mokrih (velika slova) ispitnih tijela po konfiguraciji materijala

KONFIGURACIJE	MODUL E_r , MPa	ČVRSTOĆA σ_{rM} , MPa	ISTEZLJIVOST ε_{rM} , mm/mm
SLLLLS	4750,78	84,14	3,32
slllls	5274,31	57,04	1,84
LLSSLL	4622,21	71,01	3,03
llssll	5853,54	72,25	2,23
LSLLSL	3852,37	60,09	2,8
lsllsl	5073,73	59,64	1,76
SSSSSS	9152,35	221,08	3,37
ssssss	12756,88	174,46	1,52
LLLLLL	3307,52	54,94	4,76
llllll	4695,75	61,7	2,79

Tablica 18. Usporedba rezultata savojnoga ispitivanja suhих (mala slova) i mokrih (velika slova) ispitnih tijela po konfiguraciji materijala

KONFIGURACIJA	MODUL E_t , MPa	ČVRSTOĆA σ_{tM} , MPa	ISTEZLJIVOST ε_{tM} , mm/mm
SLLLLS	5404,33	119,86	4,82
slllls	5184,87	86,7	1,89
LLSSLL	3685,52	83,5	4,56
llssll	2935,43	71,25	3,5
LSLLSL	3248,5	82,05	5,48
lsllsl	5263,72	117,34	3,7
SSSSSS	9426,97	171,1	7,83
ssssss	10288,70	259,58	2,39
LLLLLL	2388,90	69,81	5,42
llllll	3797,36	94,26	4,06

Tablica 17 i Tablica 18 pokazuju da rastezni i savojni moduli opadaju s izloženosti materijala utjecaju vode. Rastezni modul SLLLLS konfiguracije opada za 10 %, LLSSLL za 21 %, LSLLSL za 24 %. Kompozitu sa samo staklenim vlaknima rastezni modul opada za 28 %, dok kompozitu sa samo lanenima najvećih 29 %. Kod rasteznog ispitivanja pad su ostvarili

konfiguracije LSLLSL za 38 %, SSSSSS za 8,4 % i LLLLLL za 37 %. Izuzeci ovomu pravilu su kod savojnoga ispitivanja konfiguracije materijala SLLLLS i LLSSLL, u kojima dolazi do porasta modula elastičnosti pod utjecajem vode za 4,2 % i 26 %. Rastezna čvrstoća raste s utjecajem vode kod kompozita koji su u potpunosti (27 %) ili u vanjskome dijelu izrađeni od staklenih vlakana (47 % SLLLLS i 0,8% LSLLSL), dok čvrstoća opada kod kompozita čije je središte stakleno vlakno (1,7 %) ili kompozit koji je u potpunosti od lanenih vlakana (11 %). Savojna čvrstoća u većini slučajeva opada s izloženosti kompozita vodi (LSLLSL za 30 %, SSSSSS za 34 % i LLLLLL za 26 %) dok se suprotno ponašaju kompoziti s konfiguracijom SLLLLS (porast za 38 %) i LLSSLL (porast za 17 %) zbog nemogućnosti potpune penetracije vode u materijal. Istezljivost kod oba ispitivanja raste s izloženosti materijala vodi zbog povećanja elastičnosti materijala.

4. ZAKLJUČAK

U inženjerskom svijetu sve češća je primjena kompozitnih materijala u izradi proizvoda. Manja masa, jednostavnija izrada kompleksnih geometrija i odlična mehanička svojstva dovela su do naglog interesa za razvoj i istraživanje ovakve vrste materijala. Dominantni kompoziti na tržištu su načinjeni od polimerne matrice ojačane staklenim vlaknima. Zamjena staklenih vlakana ekološki prihvatljivijim lanenim vlaknima moguća je za manje zahtjevne proizvode, budući da su svojstva kompozita s lanenim vlaknima slabijih svojstava. Jedno rješenje je hibridizacija lanenih vlakana staklenim. Biljna vlakna sama po sebi su manje gustoće od staklenih, razgradiva su te za njihovu proizvodnju je potrebno mala količina energije.

Ovim radom ispitana je upojnost vode u hibridni kompozitni materijal s lanenim i staklenim ojačalima u epoksidnoj matrici. U eksperimentu rastezno i savojno su ispitani hibridni kompoziti od dva sloja staklenih i četiri sloja lanenih vlakana, složenih simetrično u odnosu na neutralnu ravninu pri savijanju, SLLLLS, LLSSLL, LSLLSL. Osim toga pripremljeni su i kompoziti ojačani samo staklom i samo lanom, SSSSSS i LLLLLL. Prema promjeni mase vidljivo je da na upojnost materijala najviše utječe debljina i raspored vrsta vlakna. Što je tanji materijal jača je penetracija vode što je vidljivo usporedbom LLLLLL i SSSSSS uzoraka. Prema rasporedu vrsta vlakana moguće je zamijetiti da s većom izmjenom lan/staklo dolazi i do veće upojnosti dok konfiguracija SLLLLS pokazuje najmanju radi dobe izoliranosti lanenih vlakana sa staklenima. Kod ispitivanja savojnog i rasteznog modula SSSSSS konfiguracija pokazuje najbolja svojstva dok LLLLLL najmanja. Takav odnos moguće je primijetiti i kod savojne i rastezne čvrstoće u kojima znatno bolja ima SSSSSS konfiguracija dok najmanja pokazuje LLLLLL. Od hibridnih konfiguracija moguće je zaključiti da najbolja mehanička svojstva pokazuje SLLLLS konfiguracija radi manje upojnosti vode od druge dvije. LLSSLL pokazuje bolja rastezna i savojna svojstva naprema LSLLSL konfiguraciji. U usporedbi suhih i mokrih kompozita moguće je zaključiti da moduli opadaju s izloženosti materijala vodi. Rastezna i savojna čvrstoća opada kod kompozita u čijim vanjskim dijelovima su lanena vlakna dok SLLLLS i SSSSSS pokazuju porast zbog slabije penetracije vode u materijal. Time je moguće zaključiti da s izloženosti hibridnih materijala vodi najbolje ponaša materijal sa SLLLLS konfiguracijom radi bolje adhezije vlakana i zaštićenosti penetracije vode kroz staklena vlakna u sami materijal.

LITERATURA

- [1] Barbero, J. E.: *Introduction to composite materials design*, Taylor and Francis, USA, 1999.
- [2] Silva, M.P., Santos, P., Parente, J. M., Valvez, S., Reis, P.N.B.: *Hybridization effect on the impact properties of flax composites*, Elsevier, Portugal, 2020.
- [3] Hull, D.: *An introduction to composite materials*, Cambridge University Press, SAD, 1995.
- [4] Peters, S.T.: *Handbook of composites*, Camphman and Hall, SAD, 1998.
- [5] Gay, D., Hoa, S.V., Tsai, S.W.: *Composite materials: Design and application*, CRC Press, SAD, 2003.
- [6] Srivastava, J.P., Kumar, P.: *Introduction to glass fiber-based composites and structures*, Wiley, SR University, Department of Mechanical Engineering, Center for Materials and Manufacturing, Ananthasagar, India, 2021.
- [7] Seydibeyoğlu, M.O., Mohanty, A.K., Misra, M.: *Fiber technology for fiber-reinforced composites: Glass fibers*, Woodhead Publishing, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2017.
- [8] Imitiaz, S.: *Glass Fibre*, The University of Faisalabad, Pakistan, 2014.
- [9] Campilho, R.D.S.G.: *Natural fiber composites*, Taylor and Francis, SAD, 2016.
- [10] Sinha, S., Devnani, G.L.: *Natural fiber composites: processing, characterization, applications and advancements*, CRC Press, SAD, 2023.
- [11] Chand, N., Fahim, M.: *Tribology of natural fiber polymer composites (Second edition)*, Woodhead Publishing, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2021.
- [12] Singh, J. P., Gulati, P., Kumar, R., Singh, M.: *Flax fiber reinforced polymer composites: A review*, Lovely Professional University, India, 2019.
- [13] Preisner, M., Wojtasik, W., Kumma, A., Zuk, M., Szopa, J.: *Flax fiber*, Wiley, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2014.
- [14] Dornbusch, M., Christ, U., Rasing, R.: *Epoxy resins: Fundamentals and applications*, Vincentz Network, Hanover, Njemačka, 2016.
- [15] May, C.A.: *Epoxy resins: Chemistry and technology (Second edition)*, Marcel Dekker, New York, SAD, 1988.
- [16] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje*, Zagreb, 2013.
- [17] Genc, G., El Hafidi, A., Gning, P.B.: *Comparison of the mechanical properties of flax*

and glass fiber composite materials, Journal of vibroengineering, Francuska, 2012.

[18] Moudood, A., Rahman, A., Ochsner, A., Islam, M., Francucci, G.: *Flax fiber and its composites: An overview of water and moisture absorption impact on their performance*, SAGE, SAD, 2018.

[19] Muñoz, E., García-Manrique, J.A.: *Water absorption behaviour and its effect on the mechanical properties of flax fibre reinforced bioepoxy composites*, Hindawi, Španjolska, 2015.

[20] Oun, A., Manalo, A., Alajarmeh, O., Abousnina, R., Gerdes, A.: *Long-term water absorption of hybrid flax fibre-reinforced epoxy composites with graphene and its influence on mechanical properties*, MDPI, Australia, 2022.

[21] Norma: HRN EN ISO 527-4:1997 – Plastika – Određivanje rasteznih svojstava – 4. dio:
Ispitni uvjeti za izotropne i ortotropne plastične kompozite ojačane vlaknima

[22] Norma: HRN EN ISO 14125:1998 *Fibre-reinforced plastic composites – Determination of flexural properties*