Tretiranje lanenih vlakana natrijevom lužinom i utjecaj koncentracije na mehanička svojstva kompozita s epoksidnom matricom

Žužić, Martina

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:200539

Rights / Prava: Attribution-ShareAlike 4.0 International/Imenovanje-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-23**

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Martina Žužić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Tatjana Haramina

Student:

Martina Žužić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Tatjani Haramini na stručnoj pomoći, strpljenju i susretljivosti. Također, zahvaljujem stručnim suradnicima Mireli Petranović i Božidaru Bušetinčanu na pomoći pri izvođenju eksperimentalnog dijela ovog diplomskog rada.

Veliku zahvalu upućujem sestri, dečku, bliskim prijateljima i kolegama koji su mi bili velika podrška tijekom cijelog studija, a posebno hvala mojim roditeljima koji su mi omogućili bezbrižno studiranje.

Martina Žužić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARTINA ŽUŽIĆ** Mat. br.: 0035209705

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Tretiranje lanenih vlakana natrijevom lužinom i utjecaj koncentracije na mehanička svojstva kompozita s epoksidnom matricom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Alkaline fiber treatment and the effect of concentration on mechanical properties of flax fiber reinforced epoxy based composites**

Opis zadatka:

Uz ekološku prihvatljivost, dobra mehanička svojstava, niska gustoća i prihvatljiva cijena čine lanena vlakna atraktivnom alternativom staklenim vlaknima za ojačavanje polimera. Povezanost vlakana s polimernom matricom krucijalna je za prenošenje opterećenja s matrice na ojačalo, što je kod prirodnih vlakana otežano. Tretiranjem vlakana lužinama može se popraviti adhezija izmedu vlakna i matrice, a time i svojstva kompozita.

Za sustav ojačan biaksijalno orijentiranim vlaknima u radu je potrebno:
- proučiti i opisati učinak natrijeve lužine na lanena vlakna
- proučiti i opisati uvjete i postupak tretiranja vlakana
- tretirati lanena vlakna različitim koncentracijama natrijeve lužine
- izraditi kompozite s matricom od epoksidne smole ojačane tretiranim vlaknima
- ispitati i evaluirati mehanička svojstva kompozita
- rezultate usporediti s rezultatima kompozita gdje vlakna nisu tretirana, te zahtjevima za mehanička svojstva kompozita propisanim od strane Hrvatskog registra brodova.

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

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
6. svibnja 2021.	8. srpnja 2021.	12. srpnja do 16. srpnja 2021.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Tatjana Haramina

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS OZNAKA VII
SAŽETAK VIII
SUMMARY IX
1. UVOD 1
2. PRIRODNA VLAKNA U KOMPOZITIMA 2
2.1. Prednosti i nedostaci prirodnih vlakana 2
2.2. Klasifikacija prirodnih vlakana 3
2.3. Struktura biljnih vlakana 4
2.4. Površinska obrada biljnih vlakana 6
3. LANENA VLAKNA 7
3.1. Struktura i kemijski sastav lanenih vlakana 7
3.2. Mehanička svojstva lanenih vlakana 8
4. ALKALNA OBRADA 9
4.1. Kemijsko djelovanje lužina na prirodna vlakna 9
4.2. Utjecajni parametri alkalne obrade 11
4.2.1. Varijacija vremena namakanja prirodnih vlakana u alkalnoj otopini 11
4.2.2. Varijacija koncentracije alkalne otopine 12
4.2.3. Varijacija temperature pri kojoj se odvija alkalna obrada 12
4.3. Natrijev hidroksid (NaOH) kao medij za alkalnu obradu 13
5. POSTUPCI PRIPREME PRIRODNIH VLAKANA PRIJE ALKALNE OBRADE I PRIJE IZRADE KOMPOZITA 14
5.1. Pranje i sušenje prirodnih vlakana prije alkalne obrade 14
5.2. Pranje i sušenje vlakana nakon alkalne obrade i prije izrade kompozita 14
6. KOMPOZITI NA BAZI EPOKSIDA 15
6.1. Epoksidna smola 16
6.2. Prednosti i nedostaci epoksidne smole 17
6.3. Mehanička svojstva i primjena epoksidne smole 18
7. EKSPERIMENTALNI DIO 19
7.1. Priprema ispitnih tijela 19
7.1.1. Provođenje procesa alkalne obrade lanenih vlakana 19
7.1.2. Izrada kompozita lanena vlakna/epoksidna smola 23
7.2. Provođenje ispitivanja mehaničkih svojstava 26
7.2.1. Statičko rastezno ispitivanje 27
7.2.2. Savojno ispitivanje 28
7.2.3. Ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće 30
8. REZULTATI I ANALIZA 31
8.1. Rezultati statičkog rasteznog ispitivanja 31

8.1.1. Rezultati statičkog rasteznog ispitivanja za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 2 mas.% NaOH. 32
8.1.2. Rezultati statičkog rasteznog ispitivanja za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 5 mas.% NaOH. 35
8.1.3. Rezultati statičkog rasteznog ispitivanja za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 10 mas.% NaOH. 38
8.1.4. Rezultati statičkog rasteznog ispitivanja za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 15 mas.% NaOH. 41
8.2. Rezultati savojnog ispitivanja 45
8.3. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće 51
8.4. Analiza dobivenih rezultata 52
8.4.1. Usporedba dobivenih rezultata sa zahtjevima za mehanička svojstva kompozita propisanim od strane Hrvatskog registra brodova (HRB) 58
9. ZAKLJUČAK 59
LITERATURA 60
PRILOZI 63

POPIS SLIKA

Slika 1. Prednosti i nedostaci biljnih vlakana [5]. 2
Slika 2. Klasifikacija prirodnih vlakana [5]. 4
Slika 3. Shematski prikaz strukture biljnih vlakana [6]. 5
Slika 4. Podjela postupaka površinske modifikacije biljnih vlakana [5]. 6
Slika 5. Shematski prikaz celulozne-I rešetke i polimorfnih oblika (Na celulozna-I rešetka i celulozna-II rešetka) uzrokovanih namakanjem prirodnih vlakana u otopini NaOH [11]. 10
Slika 6. Kemijska struktura natrijevog hidroksida [18]. 13
Slika 7. Kemijska struktura epoksidnih lanaca [21]. 16
Slika 8. Prikaz procesa pranja lanenih vlakana; a) pranje u kontroliranoj kupelji, b) vađenje lanenih vlakana iz kontrolirane kupelji. 20
Slika 9. Peć za sušenje lanenih vlakana proizvođača Instrumentaria d.d.. 20
Slika 10. Granule natrijevog hidroksida prije otapanja u destiliranoj vodi. 21
Slika 11. Namakanje lanenih vlakana u natrijevoj lužini. 22
Slika 12. Lanena vlakna nakon alkalne obrade i sušenja u peći. 22
Slika 13. Dvokomponentna smjesa NOVAPOX VEZA korištena za izradu materijala matrice; komponenta A – epoksi smola, komponenta B – epoksi veza. 23
Slika 14. Priprema kompozita u Laboratoriju za polimere i kompozite na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. 24
Slika 15. Pripremljeni ispitna tijela; a) epruvete za statičko rastezno ispitivanje, b) epruvete za savojno ispitivanje, c) epruvete za ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće. 26
Slika 16. Shema savojnog ispitivanja [23]. 28
Slika 17. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 1.1. 32
Slika 18. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 1.2. 33
Slika 19. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 1.3. 34
Slika 20. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 2.1. 35
Slika 21. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 2.2. 36
Slika 22. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 2.3. 37
Slika 23. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 3.1. 38
Slika 24. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 3.2. 39
Slika 25. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 3.3. 40
Slika 26. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 4.1. 41
Slika 27. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 4.2. 42
Slika 28. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 4.3. 43
Slika 29. Krivulje naprezanje - istezanje za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 2 mas.% NaOH. 48
Slika 30. Krivulje naprezanje - istezanje za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 5 mas.% NaOH. 48
Slika 31. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 10 mas.% NaOH. 49
Slika 32. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 15 mas.% NaOH. 49
Slika 33. Ovisnost rasteznog modula elastičnosti o koncentraciji natrijeve lužine. 53
Slika 34. Ovisnost rastezne čvrstoće o koncentraciji natrijeve lužine. 53

Slika 35. Ovisnost savojnog modula o koncentraciji natrijeve lužine. 54
Slika 36. Ovisnost savojne čvrstoće o koncentraciji natrijeve lužine. 55
Slika 37. Ovisnost prividne međuslojne smične čvrstoće o koncentraciji natrijeve lužine. 56
Slika 38. Ovisnost rasteznog i savojnog modula elastičnosti o sadržaju vlakana. 57
Slika 39. Ovisnost rastezne i savojne čvrstoće o sadržaju vlakana. 57

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav i maseni udjeli glavnih konstituenata (mas.%) lanenih vlakana i određenih celuloznih biljnih vlakana [10]. 8
Tablica 2. Usporedba mehaničkih svojstava lanenih vlakana i konvencionalnih vlakana [10]. 8
Tablica 3. Usporedba mehaničkih svojstava različitih duromernih matrica [12]. 15
Tablica 4. Prednosti i nedostaci epoksidne smole [21]. 17
Tablica 5. Mehanička svojstva epoksidne smole [21]. 18
Tablica 6. Izmjerene mase vlakana prije i nakon alkalne obrade, mase gotovih kompozita i maseni udjeli vlakana. 25
Tablica 7. Dimenzije epruveta izrezanih iz 4 ploče ojačane vlaknima tretiranim različitim koncentracijama NaOH za statičko rastezno ispitivanje; *b* - širina, *h* - debljina, S_0 - površina početnog poprečnog presjeka epruvete. 31
Tablica 8. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 1.1.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete. 32
Tablica 9. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 1.2.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete. 33
Tablica 10. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 1.3.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete. 34
Tablica 11. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 2.1.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete. 35
Tablica 12. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 2.2.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete. 36
Tablica 13. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 2.3.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete. 37
Tablica 14. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 3.1.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete. 38
Tablica 15. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 3.2.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete. 39
Tablica 16. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 3.3.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete. 40
Tablica 17. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 4.1.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete. 41
Tablica 18. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 4.2.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete. 42
Tablica 19. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 4.3.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete. 43
Tablica 20. Pregled vrijednosti rasteznih modula elastičnosti za 4 ploče ojačane vlaknima tretiranim različitim koncentracijama NaOH. Iz svake ploče izrezana su po 3 ispitna tijela. 44
Tablica 21. Pregled vrijednosti rasteznih čvrstoća za 4 ploče ojačane vlaknima tretiranim različitim koncentracijama NaOH. Iz svake ploče izrezana su po 3 ispitna tijela. 44
Tablica 22. Dimenzije epruveta izrezanih iz 4 ploče ojačane vlaknima tretiranim različitim koncentracijama NaOH za savojno ispitivanje; *b*-širina, *h*-debljina, *l*-razmak između oslonaca. 45
Tablica 23. Rezultati mjerenja prilikom savojnog ispitivanja za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 2 mas.% NaOH. 45
Tablica 24. Rezultati mjerenja prilikom savojnog ispitivanja za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 5 mas.% NaOH. 46

Tablica 25. Rezultati mjerenja prilikom savojnog ispitivanja za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 10 mas.% NaOH. 47
Tablica 26. Rezultati mjerenja prilikom savojnog ispitivanja za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 15 mas.% NaOH. 47
Tablica 27. Pregled vrijednosti savojnih modula elastičnosti za 4 ploče ojačane vlaknima tretiranim različitim koncentracijama NaOH. 50
Tablica 28. Pregled vrijednosti savojnih čvrstoća za 4 ploče ojačane vlaknima tretiranim različitim koncentracijama NaOH. 50
Tablica 29. Dimenzije epruveta izrezanih iz 4 ploče ojačane vlaknima tretiranim različitim koncentracijama NaOH za ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće; *b*-širina, *h*-debljina, *l*-razmak između oslonaca. 51
Tablica 30. Pregled vrijednosti prividnih međuslojnih smičnih čvrstoća za 4 ploče ojačane vlaknima tretiranim različitim koncentracijama NaOH. 51
Tablica 31. Maseni udio lanenih vlakana, izloženih različitim koncentracijama NaOH, srednje vrijednosti maksimalnih sila i srednje vrijednosti debljina epruveta za provedena ispitivanja. 52

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
σ	MPa	naprezanje
ε	mm/mm	istezanje
R_m	MPa	rastezna čvrstoća
E	MPa	rastezni modul elastičnosti
R_{ms}	MPa	savojna čvrstoća
E_s	MPa	savojni modul elastičnosti
l_0	mm	kontrolirana početna duljina
Δl	mm	produljenje
b	mm	širina epruvete
h	mm	debljina epruvete
F	N	sila
F_{max}	N	maksimalna sila
τ	MPa	prividna međuslojna smična čvrstoća
l	mm	razmak između oslonaca
S_0	mm^2	površina početnog poprečnog presjeka epruvete
m	g	masa

SAŽETAK

Mehanička svojstva kompozita lanena vlakna/epoksidna smola, ključna su za primjenu ovog kompozita u brodogradnji. Zbog hidrofilnosti prirodnih vlakana i posljedično tome slabe adhezivnosti prirodnih vlakana i polimerne matrice, mehanička svojstva takvog kompozita nedovoljna su i ne odgovaraju zahtijevanim svojstvima za primjene u brodogradnji. Za poboljšanje svojstava prirodnih vlakna, potrebno je provesti neki od procesa površinske modifikacije vlakana. U ovom su radu, alkalnom otopinom tretirana biaksijalno orijentirana (90°) lanena vlakna. Alkalne otopine bile su različitih masenih udjela od 2%, 5%, 10% i 15 % NaOH otopljenih u destiliranoj vodi. Alkalna obrada provedena je u trajanju od 30 minuta pri sobnoj temperaturi. Kompozit s epoksidnom matricom dobiven je postupkom ručnog laminiranja. Na dobivenim epruvetama provedeno je statičko rastezno ispitivanje, savojno ispitivanje te ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće. Mehanička svojstva kompozita s tretiranim vlaknima uspoređena su sa zahtjevima propisanih od strane Hrvatskog registra brodova (HRB), ali niti jedan od izrađenih kompozita ne udovoljava zahtjevima. Uzroci lošijih svojstava su povećanje debljine od čak 60 %, čime je smanjen sadržaj vlakana u odnosu na kompozit s netretiranim vlaknima. Najbolje rezultate pokazuju kompoziti čija su vlakna tretirana u alkalnoj otopini koncentracija 2 mas.% i 5 mas.% NaOH. Usmjeravanje slojeva vlakana u različitim smjerovima i poboljšani postupak izrade kompozita mogli bi osigurati prihvatljiva svojstva za primjene u brodogradnji.

Ključne riječi: lanena vlakna, alkalna obrada, epoksidna matrica, kompozit, mehanička svojstva, brodogradnja

SUMMARY

The mechanical properties of flax fabric/epoxy composites are crucial for the acceptance of this composite in naval architecture. Due to the hydrophilicity of natural fibers and poor adhesiveness of natural fibers and polymer matrix, the mechanical properties of bio-composites can not meet the requirements for marine application. To improve the properties of natural fibers, it is necessary to carry out chemical or physical surface treatment procedures. In this paper, biaxially oriented (90°) flax fibers were treated with an alkaline solution. Alkaline solutions were with different mass fractions of 2%, 5%, 10% and 15% NaOH dissolved in distilled water. Alkaline treatment was performed for 30 minutes at room temperature. The epoxy matrix composites are produced by the hand lay-up process. The following tests were performed on the obtained samples: tensile tests, flexural tests and apparent interlaminar shear strength tests. The mechanical properties of composites reinforced with treated fibers were compared with the requirements prescribed by the Croatian Ship Registry (CSR) and none of the produced composites fulfill the requirements. An increase in thickness (of 60%) and a decrease in fiber content are the causes of the decrease in mechanical properties of the produced composites. The best properties show composites whose fibers were treated with 2 and 5 wt.% NaOH solutions. The orientation of the flax fiber layers in different directions and the improved composite production process could provide acceptable properties for marine application.

Key words: flax fibres, alkaline treatment, epoxy, composite, mechanical properties, naval architecture

1. UVOD

Kompoziti su materijali nastali spajanjem dvaju ili više materijala radi postizanja novih svojstava, odnosno svojstava koja niti jedan konstituent nema sam po sebi. Glavni konstituenti kompozita su matrica i ojačala, pri čemu je zadaća matrice prenošenje opterećenja na ojačala i zaštita ojačala od okolišnih utjecaja, a zadaća ojačala je da predstavljaju nosivi element kompozita te da imaju visoku krutost, čvrstoću i otpornost na trošenje [1].

Posljednjih nekoliko desetljeća sve veća pažnja usmjerava se na održivi razvoj pa tako i na proizvodnju i upotrebu ekološki prihvatljivih materijala. U ovom diplomskom radu bit će obrađen polimerni kompozit ojačan vlaknima iz obnovljivih izvora. Matrica ovog kompozita načinjena je od epoksidne smole, dok su vlakna lanena.

Uporabom biljnih vlakana uočene su brojne prednosti, ali i nedostaci takve vrste kompozitnih ojačala. Glavne prednosti biljnih vlakana su: biorazgradljivost, visoka čvrstoća, ali i činjenica da biljna vlakna mogu biti vrlo dobra alternativa staklenim vlaknima i tako smanjiti količinu štetnih emisija koje se ispuštaju u okoliš prilikom proizvodnje sintetskih vlakana. Međutim, nedostaci biljnih vlakana očituju se u njihovom hidrofilnom karakteru i upijanju vlage pri čemu se znatno narušavaju mehanička svojstva kompozita [2].

Nedostaci biljnih vlakana mogu se poboljšati prethodnom obradom, odnosno različitim fizikalnim i kemijskim modifikacijama prije nego što se vlakna, kao ojačala ugrade u kompozitnu matricu. Jedna od najviše istraživanih i najčešće korištenih kemijskih modifikacija biljnih vlakana je alkalna obrada. Alkalna obrada se najčešće provodi namakanjem biljnih vlakana u vodenoj otopini natrijevog hidroksida (NaOH) [3].

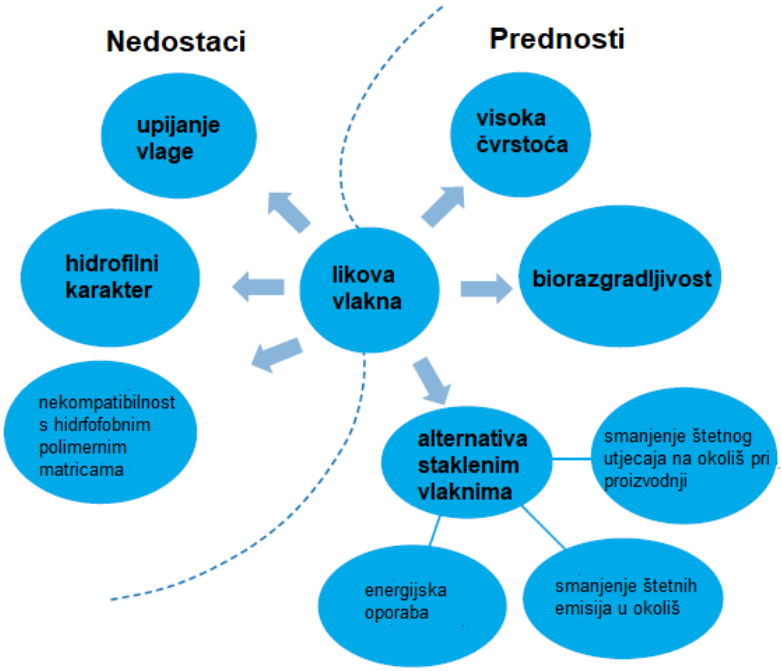
Cilj ovog rada je ispitati utjecaj različitih koncentracija natrijeve lužine, korištenih u procesu alkalne obrade lanenih vlakana, na mehanička svojstva kompozita lanena vlakna/epoksidna smola. Temperatura i vrijeme namakanja lanenih vlakana držani su na jednakim vrijednostima za sve koncentracije alkalne otopine. Usporedbom dobivenih vrijednosti mehaničkih svojstava, za izrađeni kompozit s prirodnim vlaknima, s vrijednostima za kompozite sa staklenim vlaknima, želja je prikazati kako kompoziti s prirodnim vlaknima mogu biti dobar izbor za doprinos održivom razvoju, ali i dobra alternativa konvencionalnim kompozitima za industrijske primjene.

2. PRIRODNA VLAKNA U KOMPOZITIMA

Radi sve veće brige o okolišu, posljednjih se godina velika važnost usmjerava na razvoj održivih materijala koja se koriste u inženjerskim primjenama. Zbog toga je cilj zamijeniti sintetska vlakna, koja se koriste kao ojačanje u kompozitima, s različitim prirodnim vlaknima [2].

2.1. Prednosti i nedostaci prirodnih vlakana

Najčešća sintetska vlakna, odnosno ojačala u kompozitima su staklena, ugljična i aramidna vlakna. Proizvodnja sintetskih vlakana zahtijeva veliku potrošnju fosilnih goriva, a sam proces proizvodnje navedenih vlakana s vremenom dovodi do onečišćenja okoliša i drugih negativnih pojava za prirodno okruženje pa se sve veći naglasak stavlja na pronalaženje ekološki prihvatljive alternative za sintetska vlakna [3,4]. Prirodna vlakna stječu sve veću pozornost istraživača, a neka od njihovih povoljnih svojstva su: niska gustoća, dobra mehanička svojstva, biorazgradljivost, dobra toplinska svojstva, niska cijena te ih je lako reciklirati (Slika 1) [5].



Slika 1. Prednosti i nedostaci biljnih vlakana [5].

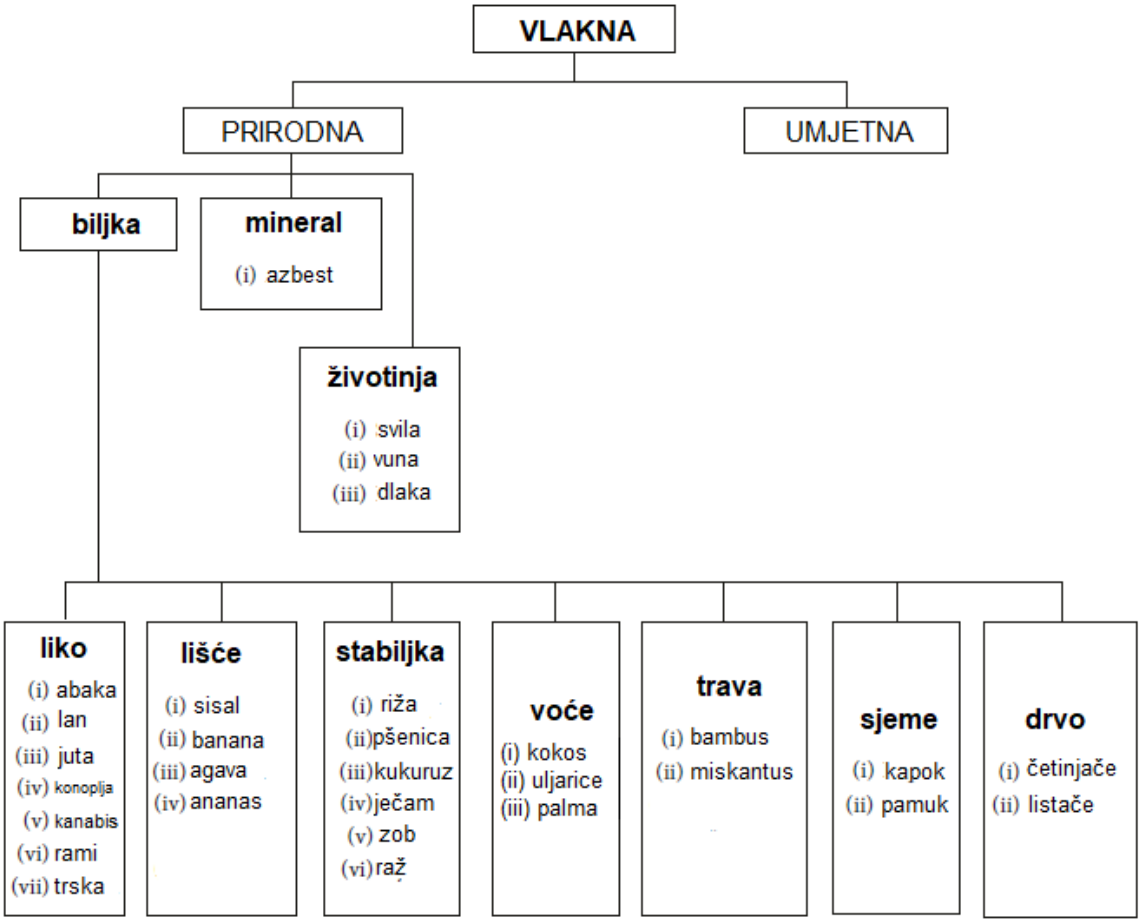
Lanena vlakna klasificiraju se u skupinu biljnih liko vlakana.

Međutim, postoji nekoliko nedostataka koji ograničavaju potencijal korištenja prirodnih vlakana kao alternative ostalim sintetskim vlaknima. Najistaknutiji problem prirodnih vlakana je to što su hidrofilne prirode. Mogući problemi zbog hidrofilnosti vlakana su nemogućnost prianjanja vlakana s hidrofobnom polimernom matricom te loša otpornost kompozita na okolišne uvjete visoke vlažnosti. Hidrofilnost vlakana, odnosno visoka apsorpcija vlage rezultira lošim mehaničkim svojstvima i dimenzijskom nestabilnošću kompozita koji su ojačani prirodnim vlaknima [4].

Površinu prirodnih vlakana moguće je modificirati fizikalnim metodama ili kemijskim obradama kako bi se prevladali nedostaci uzrokovani hidrofilnošću vlakana [3]. Najčešće fizikalne metode su jednostavne mehaničke (valjanje, istezanje, kalandriranje), ekstrakcija otapalom i električno pražnjenje (na primjer korištenje plazme) dok su najčešći kemijski postupci alkalna obrada, izbjeljivanje, korištenje različitih agensa i enzima [5].

2.2. Klasifikacija prirodnih vlakana

Uz općenitu podjelu vlakna na prirodne i sintetske, vlakna se mogu i detaljnije klasificirati. Prirodna vlakna se prvo razvrstavaju prema izvoru iz kojeg su ekstrahirani, a taj izvor može biti biljka, životinja ili mineral (Slika 2) [5]. Općenito, molekularna struktura prirodnih biljnih vlakana sastoji se od celuloze, hemiceluloze, lignina, pektina, voska i ulja, a udio navedenih tvari razlikuje se ovisno o vrsti biljnih vlakana. Veliki broj istraživačkih radova temelji se na proučavanju kompozita ojačanih vlaknima konoplje, lana, sisala, kokosa i juta [3].



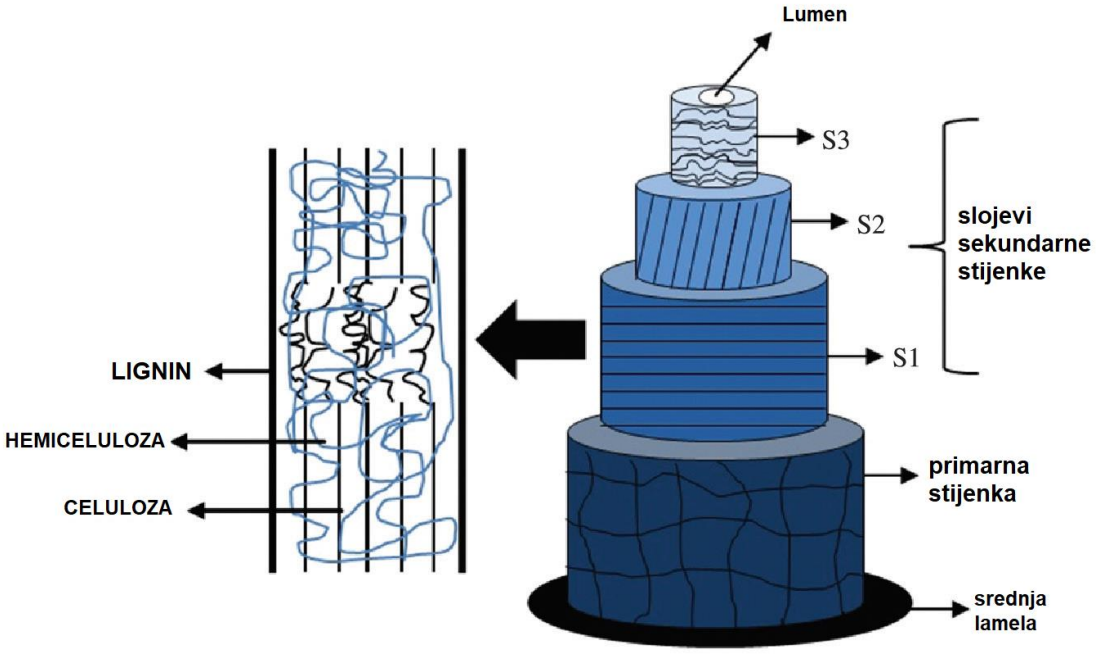
Slika 2. Klasifikacija prirodnih vlakana [5].

2.3. Struktura biljnih vlakana

Dimenzija i raspored jediničnih stanici unutar vlakna određuje strukturu i svojstva vlakana te tako posljedično utječe na svojstva kompozita. Količina pojedinih elemenata, morfologija i svojstva vlakana ovise o biljnoj vrsti, usjevu, starosti biljke, odabranom dijelu biljke te o uvjetima tla u kojima je biljka uzgojena [6]. Prirodna biljna vlakna su lignocelulozna vlakna, a takva vlakna karakteriziraju stanične strukture koje sadrže kristalna, odnosno vrlo uređena područja i amorfna, odnosno neuređena područja koja su međusobno povezana kroz dijelove lignina i celuloze [7].

Struktura biljnih vlakana formira se oko lumena biljke, odnosno središnjeg kanala čija je glavna uloga prijenos vode i hranjivih tvari kroz biljne stanice. Stijenka svakog vlakna sastoji se od: srednje lamele, tanke primarne stijenke i sekundarne stijenke, a sekundarna stijenka se još može podijeliti na vanjski (S1), srednji (S2) i unutarnji sloj (S3) (Slika 3 b)) [6,7]. Kristalne celulozne makromolekule sadržane u srednjem sloju stanične stijenke određuju mehanička svojstva vlakana [5].

Hemiceluloza, lignin, pektin i vosak, tvari su sadržane u lignocelulozi, koje čine najveće udjele kemijskih komponenti u biljnim vlaknima. Hemiceluloza osigurava povezanost materijala u staničnoj stijenki te tvori matricu koja okružuje celulozne makromolekule. Amorfni lignin pridonosi dodatnom povećanju čvrstoće vlakana, a zbog obuhvaćanje unutarnje mreže hemiceluloze i celuloze, lignin postaje zaštitna barijera vlaknima (Slika 3 a)) [5].

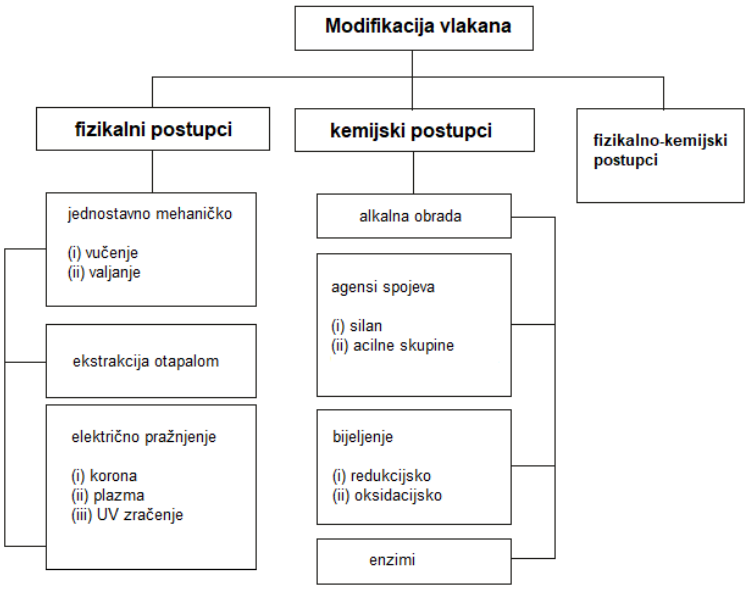


Slika 3. Shematski prikaz strukture biljnih vlakana [6].
a) Struktura lignina, hemiceluloze i celuloze, b) Srednja lamela, primarna stanična stijenka, lumen, S1 – vanjski sloj sekundarne stijenke, S2 – srednji sloj sekundarne stijenke, S3 – unutarnji sloj sekundarne stijenke

2.4. Površinska obrada biljnih vlakana

Kemijski sastav nakon površinske modifikacije vlakana ima snažan utjecaj na mehanička svojstva jer površinska obrada uzrokuje uklanjanje određenog udjela lignina i hemiceluloze koji su odgovorni za svojstvo adhezivnosti biljnih vlakana u polimernoj matrici. Zbog nedostataka biljnih vlakana poput hidrofilnog karaktera i slabe adhezivnosti s hidrofobnim polimernim matricama, provode se istraživanja o površinskim modifikacijama biljnih vlakana u svrhu postizanja boljih mehaničkih svojstava vlakana, ali i kompozita koji će biti ojačani biljnim vlaknima [5].

Površinska modifikacija biljnih vlakana može se podijeliti na fizikalne i kemijske postupke te na njihove kombinacije (Slika 4). Prema istraživanjima, fizikalni postupci površinske modifikacije značajno pridonose povećanju rastezne čvrstoće vlakana i poboljšanju mehaničkih svojstava kompozita. Dobra čvrstoća vlakana nije izravan čimbenik za dobru kompozitnu čvrstoću, već pozornost treba obratiti na orijentaciju vlakana i što bolje prianjanje između vlakana i polimerne matrice kako bi se dobile što bolje vrijednosti rastezne i savojne čvrstoće. Najveće ograničenje primjene biljnih vlakana očituje se u njihovom hidrofilnom karakteru koji može izrazito negativno utjecati na mehanička svojstva kompozita pa je površinska modifikacija obavezan korak prilikom ojačavanja kompozita biljnim vlaknima [3,5].



Slika 4. Podjela postupaka površinske modifikacije biljnih vlakana [5].

3. LANENA VLAKNA

Posljednjih godina, lanena vlakna (engl. *flax fibres*) postaju sve češći izbor ojačala u kompozitima zahvaljujući svojim mehaničkim svojstvima koja mogu konkurirati konvencionalnim vlaknima. Kompoziti ojačani lanenim vlaknima koriste se za različite industrijske proizvode, a najviše su zastupljeni u automobilskoj industriji te u proizvodnji sportske opreme. Svojstva lanenih vlakana jednaka su ili čak bolja od sintetskih vlakana, ali lanena vlakna imaju negativno svojstvo, karakteristično i za ostala biljna vlakna, a radi se hidrofilnom karakteru. Zbog tendencije upijanja vlage i bubrenja lanenih vlakana, moguće su posljedice slabe adhezivnosti između ojačala i hidrofobne polimerne matrice, što kasnije rezultira slabijim mehaničkim svojstvima kompozita [8].

Najveći proizvođač i izvoznik lana u svijetu je Kanada, a ostali vodeći proizvođači su Francuska, Belgija i Nizozemska. Klimatski uvjeti, u navedenim regijama pogodni su za uzgoj lana, a ciklus rasta lana je kratak pa je jednostavan uzgoj još jedna od prednosti lanenih vlakana. Pravilna i duga lanena vlakna prerađuju se u visokokvalitetni tekstil, a niže klase lanenih vlakana koriste se kao ojačala u kompozitima [2].

3.1. Struktura i kemijski sastav lanenih vlakana

Struktura lanenih vlakana jednaka je već objašnjenoj općenitoj strukturi biljnih vlakana, što znači da se sastoji od središnjeg lumena, tanke primarne stanične stijenke i deblje sekundarne stijenke koja se dijeli na vanjski, srednji i unutarnji sloj [2,5].

Kemijski sastav i raspored konstituenata unutar stabljike lana utječu na svojstva lanenih vlakana. Glavni konstituenti lanenih vlakana su: hemiceluloza, celuloza, lignin, pektin i vosak, zastupljeni u različitim udjelima, od kojih hemiceluloza, celuloza i lignin imaju najveći utjecaj na fizikalna svojstva vlakana. Celuloza je najčvršći organski konstituent u lanenim vlaknima, ali je polisaharid s velikom količinom hidroksilnih skupina (-OH) koje uzrokuju hidrofilni karakter biljnih vlakana [2]. Hemicelulozu čine polisaharidi povezani u kratke i razgranate lance te su povezani s molekulama celuloze. Hemiceluloza je također hidrofilne prirode. Lignin je amorfni polimer koji biljkama daje krutost kako bi mogle rasti u visinu, pektin je polisaharid koji biljkama daje fleksibilnost, a voštane tvari uglavnom utječu na vlažnost vlakana i svojstva prionjivosti [9].

Ovisno o tome iz koje biljke su ekstrahirana vlakna, razlikuju se udjeli glavnih konstituenata, stoga Tablica 1 prikazuje udjele celuloze, hemiceluloze, lignina, pektina i voštanih tvari za različita biljna vlakna, među kojima su i lanena vlakna [10].

Tablica 1. Kemijski sastav i maseni udjeli glavnih konstituenata (mas.%) lanenih vlakana i određenih celuloznih biljnih vlakana [10].

Biljka	Celuloza	Hemiceluloza	Lignin	Pektin	Vosak
Lan	64,1	16,7	2,0	1,8	1,5
Juta	64,4	12,0	11,8	0,2	0,5
Pamuk	82,7	5,7	-	5,7	0,6
Ramija	68,6	13,1	0,6	1,9	0,3
Sisal	65,8	12,0	9,9	0,8	0,3

3.2. Mehanička svojstva lanenih vlakana

Osim što su prirodna vlakna ekološki prihvatljiva, relativno jeftina i lako dostupna, biljna vlakna, a posebno ona dobivena od lika biljke kao što su lanena vlakna, vrlo lako mogu konkurirati staklenim vlaknima prema rasteznoj čvrstoći i rasteznom modulu elastičnosti (Tablica 2) [10]. Unatoč dobrim mehaničkim svojstvima vlakana, izuzetno je važno da i kompozit ojačan s lanenim vlaknima posjeduje dobra mehanička svojstva, stoga je potrebno poboljšati površinska svojstva vlakana nekom od metoda modifikacije vlakana [3].

Tablica 2. Usporedba mehaničkih svojstava lanenih vlakana i konvencionalnih vlakana [10].

Vlakna	Gustoća / g/cm^3	Istezanje / %	Rastezna čvrstoća / MPa	Rastezni modul elastičnosti / GPa
Lanena	1,5	2,7 – 3,2	345 - 1035	27,6 – 80,0
E-staklena	2,5	2,5	200 - 3500	70
Aramidna	1,4	3,3 – 3,7	300 - 3150	63 - 67
Ugljična	1,4	1,4 – 1,8	4000	230 - 240

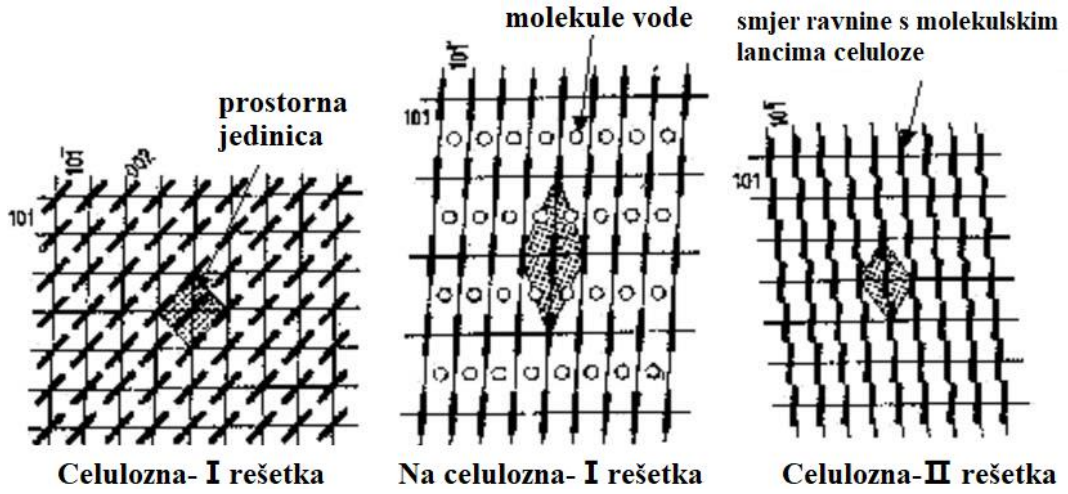
4. ALKALNA OBRADA

Alkalna obrada ubraja se u kemijske postupke površinske modifikacije vlakana. Općenito, svrha kemijske površinske modifikacije je promjena strukture prirodnih vlakana radi povećanja mehaničkih svojstava vlakana, bolje prionjivost između vlakana i polimerne matrice i smanjenja apsorpcije vlage u kompozitima. Alkalna obrada je relativno jeftina, vrlo učinkovita i najčešće korištena kemijska obrada površine prirodnih vlakana [5].

4.1. Kemijsko djelovanje lužina na prirodna vlakna

U procesu alkalne obrade, prirodna se vlakna obrađuju namakanjem u alkalnoj otopini, a jedna od najčešće korištenih je otopina natrijevog hidroksida, NaOH. Oblik celuloze, koji je zastupljen u prirodi i prirodnim vlaknima, pokazuju monoklinsku kristalnu rešetku (celulozna-I rešetka) koja se može promijeniti u različite polimorfne oblike putem kemijske obrade (Slika 5). Glavni utjecaj lužine na prirodna vlakna je pojava bubrenja, tijekom koje se prirodna kristalna struktura celuloze otpušta [11]. Za provedbu alkalne obrade mogu se koristiti otopine različitih hidroksida, poput natrijevog (NaOH), litijevog (LiOH) ili kalijevog hidroksida (KOH) [4].

Vrsta i koncentracija alkalne otopine utječu na stupanj bubrenja, a time i na stupanj pretvorbe rešetke u polimorfni oblik (celulozna-II rešetka). Nakon namakanja vlakana u alkalnoj otopini i uklanjanja viška NaOH (ako se koristi otopina natrijevog hidroksida) nastaje nova rešetka (Na celulozna-I rešetka), odnosno rešetka s relativno velikim udaljenostima između molekula celuloze, a čiji su prazni prostori ispunjeni molekulama vode. Tako se celulozne -OH skupine pretvaraju u -ONa skupine. Ispiranjem vlakana, nakon alkalne obrade, uklanjaju se povezani natrijevi ioni te nastaje novi i završni oblik celulozne rešetke (celulozna-II rešetka), koja je termodinamički stabilnija od početne rešetke (celulozna-I rešetka) [11].



Slika 5. Shematski prikaz celulozne-I rešetke i polimorfnih oblika (Na celulozna-I rešetka i celulozna-II rešetka) uzrokovanih namakanjem prirodnih vlakana u otopini NaOH [11].

Alkalna obrada uklanja određene količine voska, ulja, hemiceluloze i lignina koji prekrivaju vanjsku površinu vlakana. Kod obrade prirodnih vlakana u potpunosti se uklanja pektin iz vlakana, a preostali lignin ovisi o koncentraciji lužine. Djelomično uklonjeni lignin, vosak i hemiceluloza povećavaju efektivnu površinu vlakana pa je bolje njihovo prianjanje za polimernu matricu [12]. Gustoća prirodnih vlakana poveća se nakon alkalne obrade zbog uklanjanja konstituenata niske gustoće, poput hemiceluloze i lignina [13].

Samo pri dovoljnoj koncentraciji lužine dolazi do procesa uklanjanja lignina, ako je prisutna nedovoljna količina lužine pojavit će se reakcije kondenzacije koje stvaraju veće količine lignina koji se teže otapa. Ako parametri alkalne obrade nisu optimalni, s obzirom na vrstu prirodnih vlakana koja se tretiraju i primijenjene lužine, može doći do defibrilacije vlakana, stvaranja pora i krhkosti vlakana [12].

4.2. Utjecajni parametri alkalne obrade

Tijekom alkalne obrade ključno je bilježiti i promatrati sljedeće parametre: koncentraciju alkalne otopine, vrijeme namakanja prirodnih vlakana u alkalnoj otopini i temperaturu pri kojoj se odvija proces. Provedena su različita istraživanja o utjecaju ovih parametara na proces alkalne obrade, a optimalne vrijednosti parametra određuju se prema eksperimentalnim podacima o ovisnosti mehaničkih svojstava i parametara procesa. Važno je napomenuti kako alkalna obrada i različite vrijednosti parametara utječu i na fizikalna i na mehanička svojstva vlakana [14].

4.2.1. Varijacija vremena namakanja prirodnih vlakana u alkalnoj otopini

Postoje istraživanja u kojima se prilikom provedbe alkalne obrade, mijenja samo vrijeme namakanja prirodnih vlakana u alkalnoj otopini, dok su vrijednosti koncentracija alkalne otopine i temperature pri kojoj se odvija proces konstantne [4]. U jednom od istraživanja, alkalna obrada bila je provedena pri sobnoj temperaturi u alkalnoj otopini koncentracije 3 mas.% NaOH u vremenima namakanja od 10, 20 i 30 minuta. Utvrđeno je da se rastezna čvrstoća povećava nakon obrade od 10 minuta, a smanjuje se s porastom vremena namakanja, odnosno kod vlakana namakanih 20 ili 30 minuta izmjerena je manja rastezna čvrstoća u odnosu na netretirana vlakna. Zaključuje se kako predugo vrijeme namakanja u alkalnoj otopini može imati negativan utjecaj na mehanička svojstva vlakna te je vjerojatno uzrokovalo oštećenje strukture vlakna [15].

4.2.2. Varijacija koncentracije alkalne otopine

Također, postoji niz provedenih istraživanja u kojima je varirana koncentracija alkalne otopine dok su vrijeme namakanja i temperatura alkalne obrade držani na konstantnim vrijednostima. Prema provedenom ispitivanju mehaničkih svojstava vlakana, nakon alkalne obrade pri sobnoj temperaturi u trajanju od 30 minuta i promjenama masenog udjela alkalne otopine (mas.%) od 5%, 10% i 15% NaOH, ustanovljeno je kako su najbolje vrijednosti čvrstoća postignute za vlakna tretirana u otopini koncentracije 5 mas.% NaOH. Veće koncentracije alkalne otopine od 10 i 15 mas.% NaOH mogu biti prejake za prirodna vlakna i uzrokovati njihova oštećenja te tako smanjiti mehanička svojstva u odnosu na netretirana vlakna [16].

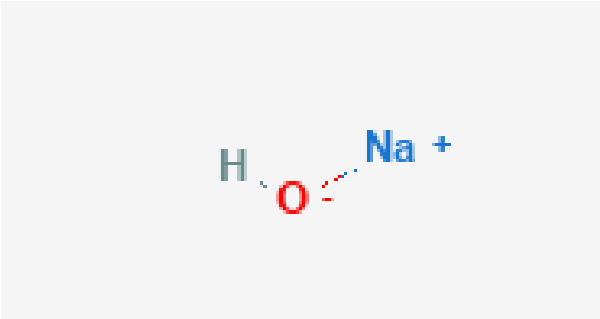
4.2.3. Varijacija temperature pri kojoj se odvija alkalna obrada

Osim pri sobnoj temperaturi, alkalna obrada može se provoditi i u pećima pri povišenim temperaturama. Istraživanje utjecaja alkalne obrade pri povišenim temperaturama, na mehanička svojstva vlakana provedeno je na temperaturama od 27 °C, 60 °C i 100 °C. Pri povišenim temperaturama dolazi do uklanjanja veće količine lignina iz prirodnih vlakana i povećanja gustoće [4]. Prirodna vlakna se rijetko izlažu temperaturama iznad 100 °C tijekom provođenja alkalne obrade jer u kombinaciji s većom koncentracijom alkalne otopine može doći do značajnih oštećenja vlakana [17].

4.3. Natrijev hidroksid (NaOH) kao medij za alkalnu obradu

Natrijev hidroksid (NaOH) je pri sobnoj temperaturi u čvrstom stanju. Bijele je boje, bez mirisa te sa sposobnošću upijanja vlage iz zraka. Da bi se mogla provoditi alkalna obrada potrebno je NaOH u čvrstom stanju otopiti u destiliranoj vodi. Otapanje NaOH u vodi je vrlo egzotermna reakcija pri kojoj dolazi do oslobađanje velike količine topline koja može uzrokovati paljenje gorivih materijala. Otopina natrijevog hidroksida je bezbojna otrovna kapljevina koja može jako iritirati kožu, oči i sluznicu [18].

Postoji izrazita kemijska sličnosti između natrijevog hidroksida (NaOH) i kalijevog hidroksida (KOH) te se mogu koristiti za iste primjene. Od svih elemenata koji mogu tvoriti hidrokside, kalij i natrij su kemijski najsličniji jer njihovi hidroksidi nastaju vezanjem alkalijskog metala za hidroksilnu skupinu (Slika 6). Prema proizvodnim troškovima, natrijev hidroksid jeftiniji je od kalijevog hidroksida. Za proizvodnju natrijevog hidroksida potreban je natrijev klorid, inače poznatiji kao kuhinjska sol, a za proizvodnju kalijevog hidroksida potreban je kalijev klorid, odnosno puno skuplja smjesa od natrijevog klorida [19].



Slika 6. Kemijska struktura natrijevog hidroksida [18].

Prema istraživanjima, natrijev hidroksid je najčešće korišteni medij za alkalnu obradu prirodnih vlakana. Lako je dostupan za upotrebu zbog svoje prihvatljive cijene, a što je najvažnije natrijev hidroksid, u optimalnim koncentracijama, uzrokuje potpuno transformaciju rešetke iz celulozne-I u celuloznu-II, dok ostale lužine omogućavaju samo djelomičnu promjenu rešetke [11].

5. POSTUPCI PRIPREME PRIRODNIH VLAKANA PRIJE ALKALNE OBRADE I PRIJE IZRADE KOMPOZITA

5.1. Pranje i sušenje prirodnih vlakana prije alkalne obrade

Prema istraživanju čiji je cilj bio pronaći optimalne parametre u pripremi prirodnih vlakana i provedbi cijelog procesa alkalne obrade, nalažu se određeni koraci koje je poželjno slijediti u samoj pripremi prirodnih vlakana prije namakanja u alkalnoj otopini. Kako se koncentracija alkalne otopine i vrijeme namakanja ne bi dodatno trošili za uklanjanje površinskih nečistoća na prirodnim vlaknima, vlakna je prije alkalne obrade potrebno oprati. Preporučuje se pranje u kontroliranoj kupelji s vodom temperature od 100 °C do 120 °C, u trajanju od 10 minuta. Vlakna se zatim vade iz kupelji i hlade na sobnu temperaturu. Zbog hidrofilnog karaktera prirodnih vlakana, važno je vlakna dodatno sušiti u peći pri visokoj temperaturi, odnosno na 100 °C u trajanju od 2 sata, jer zaostala količina vlage u vlaknima, nakon pranja može utjecati na alkalnu obradu i uzrokovati nepravilnosti u dobivenim rezultatima. Nakon sušenja u peći, vlakna se mogu podvrgnuti procesu alkalne obrade [10].

5.2. Pranje i sušenje vlakana nakon alkalne obrade i prije izrade kompozita

Tretirana vlakna potrebno je isprati u destiliranoj vodi, sve dok tragovi lužina nisu u potpunosti uklonjeni s površine vlakana. Drugim riječima, potrebno je neutralizirati vlakna, odnosno ispirati ih sve dok pH vrijednost na površini vlakana ne bude približno 7. Nakon ispiranja slijedi sušenja vlakana na zraku temperature 20 °C (± 3 °C) u periodu od 7 dana. Zbog velikog doticaja prirodnih vlakana s vlagom u procesu namakanja i ispiranja, ponovno je potrebno sušiti vlakna u peći kako bi se smanjio udio zaostale vlage. Vlakna se suše u peći pri temperaturi od 70 °C u trajanju od 3 sata. To je posljednji korak sušenja tretiranih vlakana, nakon kojeg slijedi izrada kompozita ojačanog prirodnim i tretiranim vlaknima [10].

6. KOMPOZITI NA BAZI EPOKSIDA

Uz ojačala, matrica je također važan element kompozita. Postoje dvije kategorije matrica, one na bazi plastomera i na bazi duromera. Duromerne matrice osiguravaju visoku toplinsku i dimenzijsku stabilnost, visoku krutost, otpornost na puzanje i deformacije te visoka svojstva električne i toplinske izolacije. Takve vrste matrica nastaju miješanjem dviju komponenata, smole i učvršćivača, koji stvrdnjavaju pri sobnoj temperaturi. Moguće duromerne matrice mogu se proizvesti od sljedećih smola:

- Fenolne smole
- Poliesterske smole
- Epoksidne smole
- Vinil-esterske smole
- Poliimidi
- Smole na bazi silicija.

Svaki od navedenih duromera ima svoje specifične primjene. Ovisno o zahtjevima primjene i mehaničkim svojstvima (Tablica 3) donosi se odluka o odabiru duromera kao kompozitne matrice [12].

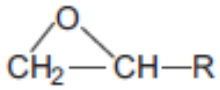
Tablica 3. Usporedba mehaničkih svojstava različitih duromernih matrica [12].

Duromer	Gustoća / g/cm^3	Rastezna čvrstoća / MPa	Modul elastičnosti / GPa	Produljenje / %
Fenolna smola	1,2	40 – 50	3	1 – 2
Poliesterska smola	1,2	50 – 65	3	2 – 3
Epoksidna smola	1,1 – 1,4	50 – 90	3	2 – 8
Vinil-esterska smola	1,15	70 – 80	3,5	4 – 6
Poliimid	1,42	70 – 150	2,5	8 – 70
Smola na bazi silicija	2,33	/	/	/

6.1. Epoksidna smola

Epoksidna smola je viskozna kapljevina koja se ubraja u skupinu sintetskih smola koje sadrže epoksidnu skupinu u svojoj kemijskoj strukturi. Karakterizira je dobra prionjivost uz ojačala, visoka kemijska postojanost, otpornost na vlagu, izvrsna mehanička svojstva, dobra otpornost na umor materijala, postojanost pri niskim i visokim temperaturama te visoki električni otpor [12].

Epoksidna smola je duromer koji ima bolja mehanička svojstva u odnosu na poliesterske i vinil-esterske smole te je najčešći duromer koji se koristi kao matrica kompozita za primjene u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji [20]. Sastavljena je od trodimenzionalnog kovalentnog lanca s ponavljajućim molekularnim jedinicama. Epoksidne smole sadrže epoksidni dio i dio za otvrdnjavanje (Slika 7). Pod utjecajem povišene temperature, epoksidna smola zadržava ponašanje čvrstog znanja jer su makromolekularni lanci povezani međusobno umreženim vezama pa na povišenim temperaturama ne dolazi do taljenja [21].



Slika 7. Kemijska struktura epoksidnih lanaca [21].

6.2. Prednosti i nedostaci epoksidne smole

Epoksidna smola ima brojne prednosti u odnosu na ostale smole, ali također ima nedostatke koji ograničavaju njenu široku primjenu (Tablica 4). Glavni zadaci epoksidne smole, kao kompozitne matrice, su prijenos mehaničkih naprezanja na vlakna i zaštita strukture od vanjskih utjecaja. Također, za dobra mehanička svojstva kompozita bitno je osigurati deformabilnost epoksidne smole te kompatibilnost između epoksidne smole i vlakana [21].

Tablica 4. Prednosti i nedostaci epoksidne smole [21].

Prednosti	Nedostaci
Izvrsna mehanička svojstva (rastezna čvrstoća, savojna čvrstoća, otpornost na tlačna opterećenja)	Dugotrajna polimerizacija
Dobra otpornost na visoke temperature	Podložnost pojavi pukotina
Dobra fizikalna svojstva (otpornost na vlagu i kemijska postojanost)	Strogi uvjeti korištenja
Jako dobra adhezivnost za široki raspon materijala ojačala	Vrlo štetna prašina uzrokovana brušenjem
Niski postotak skupljanja (≈ 1%)	Visoka cijena

6.3. Mehanička svojstva i primjena epoksidne smole

Mehanička svojstva epoksidne smole određuju njena područja primjene. Prema Tablica 5, epoksidne smole pružaju visoka mehanička svojstva, s obzirom na vrijednosti rastezne čvrstoće, savojne čvrstoće, međuslojne čvrstoće te modula elastičnosti. Uz visoka mehanička svojstva karakterizira ih otpornost na otapala i postojanost na različite okolišne degradacijske utjecaje [2,21].

Epoksidne smole koriste se u širokom rasponu primjena, od premaza i ljepila do kompozitnih matrica, zbog izvrsne kombinacije mehaničkih i kemijskih svojstava. Koriste se za izradu dijelova visokih performansi u zrakoplovnoj industriji, kao premazi za elektroničke dijelove generatora, transformatora i izolacijskih dijelova te kao temeljni premazi u automobilskoj industriji. Zbog izvrsnih mehaničkih svojstava epoksidne smole opravdana je primjena ovih duromernih matrica u industrijama koje se temelje na suvremenim i naprednim tehnologijama [12].

Tablica 5. Mehanička svojstva epoksidne smole [21].

Gustoća	1100 do 1500 kg/m^3
Modul elastičnosti	3 – 5 GPa
Rastezna čvrstoća	60 – 80 MPa
Savojna čvrstoća	100 – 150 MPa
Produljenje	2 – 5 %
Međuslojna čvrstoća	30 – 50 MPa
Temperatura postojanosti oblika pod opterećenjem	290 °C

7. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom diplomskom radu provedeno je tretiranje lanenih vlakana natrijevom lužinom prije izrade kompozita, a nakon izrade kompozita ispitan je utjecaj koncentracije natrijeve lužine na mehanička svojstva kompozita s epoksidnom matricom. Ispitivanje mehaničkih svojstava provedeno je na kidalici. U statičkom rasteznom ispitivanju mjeri se produljenje i sila, a iz izmjerenih vrijednosti dobiveni su iznosi rastezne čvrstoće (R_m) i rasteznog modula elastičnosti (E). Prilikom savojnog ispitivanja mjereni su sila i progib, te su dobivene vrijednosti savojne čvrstoće (R_{ms}) i savojnog modula elastičnosti (E_s). Također je provedeno ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće (τ). Dobiveni rezultati uspoređeni su sa svojstvima kompozita lanena vlakna/epoksidna matrica, čija vlakna nisu bila podvrgnuta prethodnom tretiranju te sa zahtjevima za mehanička svojstva kompozita propisanim od strane Hrvatskog registra brodova (HRB).

7.1. Priprema ispitnih tijela

7.1.1. Provođenje procesa alkalne obrade lanenih vlakana

Prije provođenja alkalne obrade, provedena je priprema lanenih vlakana prema postupku, objašnjenom u teorijskom dijelu diplomskog rada (Poglavlje 5). Korištena su biaksijalno orijentirana (90°) lanena vlakna proizvođača Bcomp, Fribourg iz Švicarske. Vlakna su najprije oprana u kontroliranoj kupelji pri temperaturi od 100 °C u trajanju od 10 minuta (Slika 8), a nakon pranja su ohlađena pri sobnoj temperaturi. Odlučeno je provesti proces pranja lanenih vlakana prije tretiranja natrijevom lužinom radi uklanjanja površinskih nečistoća, koje su mogle nastati u procesu skladištenja vlakana, u prostorijama Laboratorija za polimere i kompozite na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Primarni cilj je koristiti natrijevu lužinu za modifikaciju strukture lanenih vlakana, a ne za uklanjanje površinskih nečistoća, nastalih u procesu skladištenja. Za što bolje uklanjanje zaostale količine vlage nakon pranja, lanena vlakna su sušena u peći pri 100 °C u trajanju od 2 sata (Slika 9).

Slika 8. Prikaz procesa pranja lanenih vlakana; a) pranje u kontroliranoj kupelji, b) vađenje lanenih vlakana iz kontrolirane kupelji.

Slika 9. Peć za sušenje lanenih vlakana proizvođača Instrumentaria d.d..

Za provedbu alkalne obrade korišten je natrijev hidroksid, proizvođača T.T.T. d.o.o., Sveta Nedelja. Korišten natrijev hidroksid je bijela tvar u obliku sitnih granula (Slika 10), a proces dobivanja alkalne otopine proveden je otapanjem granula NaOH u destiliranoj vodi.

Slika 10. Granule natrijevog hidroksida prije otapanja u destiliranoj vodi.

U ovom diplomskog radu ispitan je utjecaj različitih koncentracija natrijeve lužine na mehanička svojstva lanenih vlakana. Alkalna obrada provedena je s četiri različite koncentracije natrijeve lužine. Početni maseni udio iznosi 2% NaOH (20 g natrijevog hidroksida otopljenog u 100 mL destilirane vode), a matematičkim izračunima mase natrijevog hidroksida i destilirane vode postepeno je povećavana koncentracija alkalne otopine. Tako su u svakom naknadnom koraku pripremljene otopine natrijeve lužine s masenim udjelima od 5%, 10% i 15% NaOH. Pripreme otopina i procesi namakanja provedeni su u polimernoj posudi (Slika 11) zbog kemijskih reakcija između stakla i natrijeve lužine.

Od tri najvažnija parametra alkalne obrade, varirana je samo koncentracija natrijeve lužine, dok su temperatura i vrijeme namakanja bili jednaki za sve koncentracije. Namakanje vlakana u lužnatoj otopini provedeno je u trajanju od 30 minuta pri sobnoj temperaturi.

Slika 11. Namakanje lanenih vlakana u natrijevoj lužini.

Nakon namakanja u natrijevoj lužini, vlakna su ispirana u destiliranoj vodi sve dok na površini vlakana nije postignuta neutralna pH vrijednost, koja je provjeravana papirnatim trakama s pH indikatorom. Oprana i tretirana vlakna sušena su pri sobnoj temperaturi u periodu od 7 dana, a prije ugradnje u kompozit, sušena su u peći pri 70 °C u trajanju od 3 sata.

Slika 12. Lanena vlakna nakon alkalne obrade i sušenja u peći.

7.1.2. Izrada kompozita lanena vlakna/epoksidna smola

Za pripremu četiri ploče kompozita iz kojih su izrađena ispitna tijela korištena su lanena vlakna te dvokomponentna smjesa (komponente epoksi smola i epoksi veza) NOVAPOX VEZA za dobivanje materijala matrice, proizvođača Nova-chem d.o.o. iz Karlovca. Prema izdanim specifikacijama od strane proizvođača, epoksi smola umrežava pri sobnoj temperaturi.

Slika 13. Dvokomponentna smjesa NOVAPOX VEZA korištena za izradu materijala matrice; komponenta A – epoksi smola, komponenta B – epoksi veza.

Kao ojačala korištena su prethodno tretirana lanena vlakna. Postupkom ručnog laminiranja napravljene su 4 ploče kompozita, od kojih svaka sadržava 3 sloja vlakna tretiranih u istoj koncentraciji natrijeve lužine.

Postupak izrade kompozita izvršen je u čeličnom kalupu, na čije je dno stavljena staklena ploča, premazana odvajalom. Slojevi vlakana slagani su uvijek na isti način orijentiranja pod ±45° te su kistom natapani materijalom matrice (Slika 14).

Slika 14. Priprema kompozita u Laboratoriju za polimere i kompozite na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Vlaknima su nakon sušenja u peći i prije izlaganja natrijevoj lužini, izmjerene mase kako bi se kasnije mogao odrediti gubitak mase i maseni udio vlakana u kompozitima. Također, mase su mjerene nakon alkalne obrade prije i poslije sušenja u peći, a na kraju su izmjerene mase gotovih kompozita (Tablica 6). Svojstva referentne ploče kompozita, odnosno kompozita s netretiranim lanenim vlaknima preuzeta su iz Završnog rada (2021., FSB) Matije Živodera [22].

Kompozit čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 2 mas.% NaOH označen je brojem 1. Analogno tome, kompozit čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 5 mas.% NaOH označen je brojem 2 dok su kompoziti čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 10 mas.% NaOH, odnosno 15 mas.% NaOH označeni brojevima 3, odnosno 4.

Tablica 6. Izmjerene mase vlakana prije i nakon alkalne obrade, mase gotovih kompozita i maseni udjeli vlakana.

broj ploče kompozita	*masena koncentracija* NaOH / %	*m* (prije izlaganja) / g	*m* (poslije izlaganja) / g	*m* (poslije izlaganja + sušenje) / g	*m* (kompozit) / g	*maseni udio vlakana* / %
0.	/	56,1			197,5	26,98
1.	2	52,70	55,09	52,74	259,6	20,31
2.	5	51,48	53,70	51,34	233,3	22,01
3.	10	51,08	52,30	49,99	268,6	18,61
4.	15	50,44	51,30	48,70	284,0	17,15

7.2. Provođenje ispitivanja mehaničkih svojstava

Iz kompozitnih ploča pripremljena su ispitna tijela, odnosno epruvete (Slika 15). Ispitivanja su provedena na kidalici u prostorijama Laboratorija za polimere i kompozite na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Provedeno je statičko rastezno ispitivanje, savojno ispitivanje te ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće, a dobiveni rezultati obrađeni su i uspoređeni s referentnom kompozitnom pločom s netretiranim vlaknima.

Važno je napomenuti kako su sva ispitivanja provedena na kidalici VEB Thuringer Industriewerk Rauenstein. Brzina deformiranja epruveta iznosi 7 mm/min, a mjerna područja su 0 – 950 N za savojno ispitivanje te 0 – 4800 N za rastezno i međuslojno ispitivanje.

Slika 15. Pripremljeni ispitna tijela; a) epruvete za statičko rastezno ispitivanje, b) epruvete za savojno ispitivanje, c) epruvete za ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće.

7.2.1. Statičko rastezno ispitivanje

Ispitivanje je provedeno sukladno normi HR EN ISO 527-4:2008. Iz svake pripremljene ploče kompozita izrezana su 3 ispitna tijela kojima su na početku izmjerene dimenzije (Tablica 7). Mjerenje produljenja provedeno je ekstenzometrom duljine 50 mm (l_0).

Vrijednosti rasteznog naprezanja računaju se prema izrazu:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1),$$

pri čemu je:

σ / MPa - rastezno naprezanje

F / N - sila

S_0 / mm^2 – površina početnog poprečnog presjeka epruvete.

Relativno produljenje ili istezanje kod statičkog rasteznog ispitivanja dobiva se iz izraza:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2),$$

Pri čemu je:

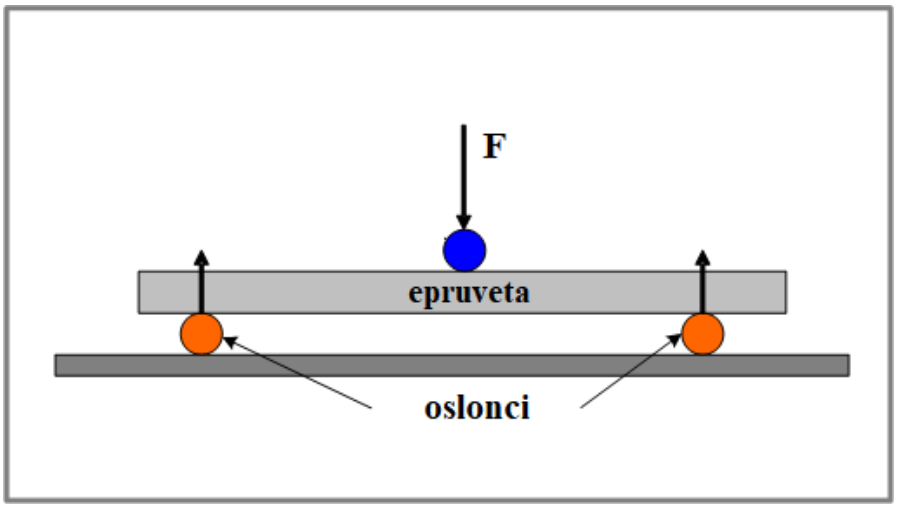
ε / $^{m}/_{m}$ - relativno produljenje (istezanje)

Δl / mm - produljenje

l_0 / mm - početna mjerna duljina.

7.2.2. Savojno ispitivanje

Provedbom savojnog ispitivanja cilj je utvrditi iznose savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti. Savojno ispitivanje provedeno je sukladno normi HRN EN ISO 14125:2005. Radi se o ispitivanju savijanja u 3 točke, a najprije su izmjerene dimenzije epruveta (Slika 16). Iz izmjerenih debljina epruvete određuje se njihova srednja vrijednost (h_{sr}), jer se izrazom $16 \cdot h_{sr}$ određuju razmaci između oslonaca (Tablica 22).



Slika 16. Shema savojnog ispitivanja [23].

Vrijednosti naprezanja savijanjem dobivaju se iz izraza:

$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (3),$$

pri čemu je:

σ / MPa - naprezanje

F / N - sila

l / mm - razmak između oslonaca

b / mm - širina epruvete

h / mm - debljina epruvete.

Vrijednosti istezanja prilikom savojnog ispitivanja računaju se prema izrazu:

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot f \cdot h}{l^2} \quad (4),$$

pri čemu je:

ε / mm - relativno produljenje (istezanje)

f / mm - progib

l / mm - razmak između oslonaca.

Savojna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$R_{ms} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (5),$$

pri čemu je:

R_{ms} / MPa - savojna čvrstoća

F_{max} / N - maksimalna sila

l / mm - razmak između oslonaca

b / mm - širina epruvete

h / mm - debljina epruvete.

7.2.3. Ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće

Međuslojnim ispitivanjem utvrđuje se iznos prividne međuslojne smične čvrstoće, odnosno dobiveni rezultati pokazuju međusobnu povezanost između matrice i vlakana. Ispitivanje se provodi na isti način kao savojno ispitivanje, pri čemu je smanjen razmak između oslonaca, pri čemu se osigurava veće smično naprezanje, što rezultira raslojavanjem laminata.

Prilikom ispitivanja međuslojne čvrstoće bilježi se maksimalna sila, a iz izraza $5 \cdot h_{sr}$, pri čemu je h_{sr} srednja vrijednost debljina pripremljenih epruveta (Tablica 29), dobiva se potreban razmak između oslonaca.

Izraz za izračun prividne međuslojne smične čvrstoće glasi:

$$\tau = \frac{3 \cdot F_{max}}{4 \cdot b \cdot h} \quad (6),$$

gdje je:

τ / MPa - prividna međuslojna smična čvrstoća

F_{max} / N - maksimalna sila

b / mm - širina epruvete

h / mm - debljina epruvete.

8. REZULTATI I ANALIZA

8.1. Rezultati statičkog rasteznog ispitivanja

Prilikom provođenja ispitivanja, na ekstenzometru su očitane vrijednosti produljenja lijeve i desne strane epruvete za određene sile kako bi se izračunalo produljenje. Na temelju tih podataka izračunate su vrijednosti rasteznog naprezanja i relativnog produljenja, odnosno istezanja. Izračunate vrijednosti prikazane su dijagramom, a zatim je provedena linearna aproksimacija u svrhu dobivanja vrijednosti rasteznog modula elastičnosti. Rastezna čvrstoća izračunata je kao omjer maksimalne sile i površine početnog poprečnog presjeka.

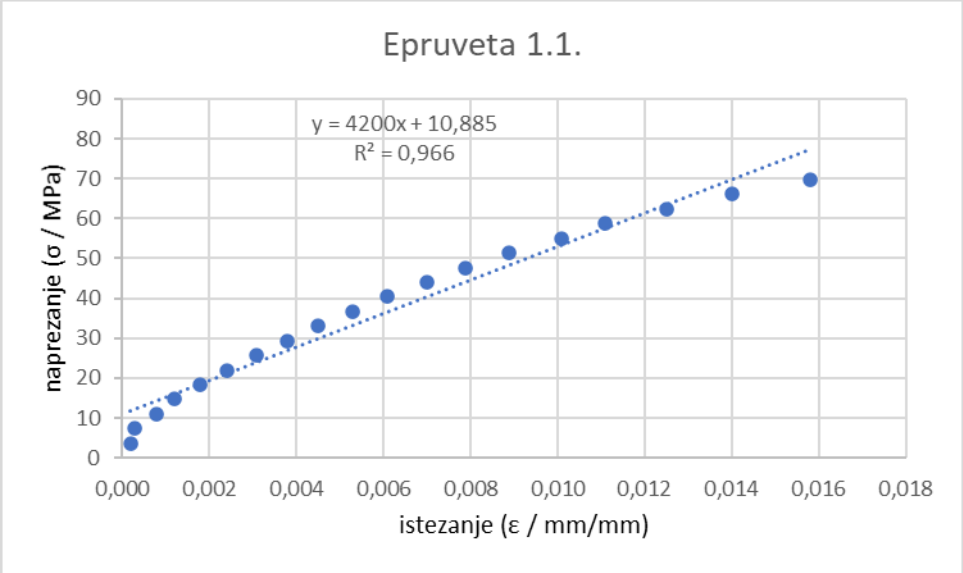
Tablica 7. Dimenzije epruveta izrezanih iz 4 ploče ojačane vlaknima tretiranim različitim koncentracijama NaOH za statičko rastezno ispitivanje; *b* - širina, *h* - debljina, S_0 - površina početnog poprečnog presjeka epruvete.

ploča	**1**			**2**			**3**			**4**		
epruveta	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
***b* / mm**	10,36	10,32	10,82	10,2	9,98	10,4	10,02	10,0	9,62	9,92	10,18	9,50
***h* / mm**	5,26	4,96	4,92	4,32	4,40	4,52	5,32	5,50	5,48	9,40	9,42	9,24
S_0 / mm^2	54,5	51,2	53,2	44,1	43,9	47,0	53,3	55,0	52,7	93,3	95,9	87,8
h_{sr} / mm	5,05			4,41			5,43			9,35		

8.1.1. Rezultati statičkog rasteznog ispitivanja za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 2 mas.% NaOH.

Tablica 8. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 1.1.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete.

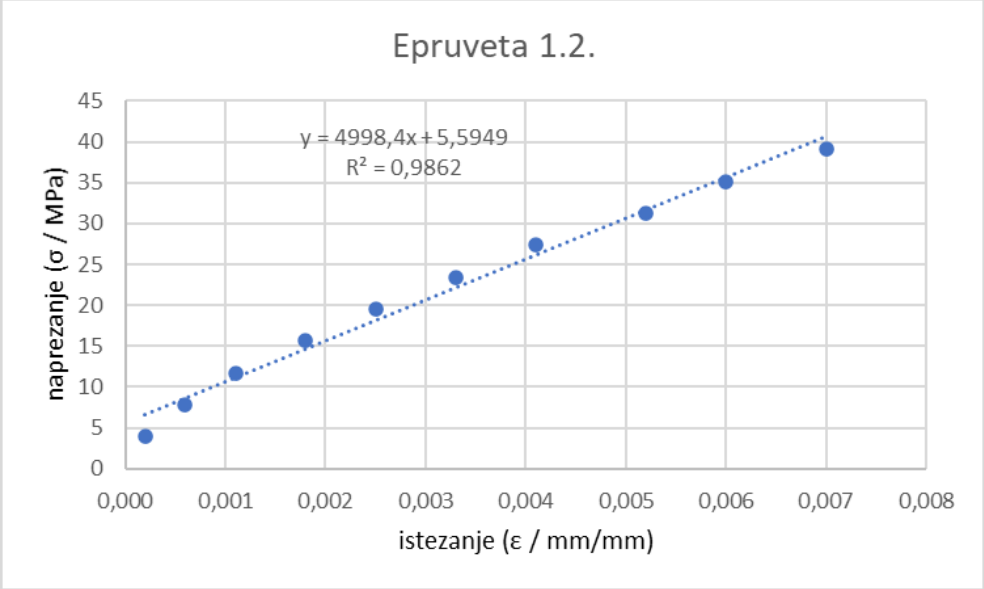
***F* / N**	***L* / mm**	***D* / mm**	***Δl* / mm**	***σ* / MPa**	***ε* / mm/mm**
200	0,01	0,01	0,01	3,67	0,0002
400	0,01	0,02	0,015	7,34	0,0003
600	0,03	0,05	0,04	11,01	0,0008
800	0,05	0,07	0,06	14,68	0,0012
1000	0,08	0,1	0,09	18,35	0,0018
1200	0,11	0,13	0,12	22,02	0,0024
1400	0,15	0,16	0,155	25,69	0,0031
1600	0,18	0,2	0,19	29,36	0,0038
1800	0,22	0,23	0,225	33,03	0,0045
2000	0,26	0,27	0,265	36,70	0,0053
F_{max} / N	6146				



Slika 17. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 1.1.

Tablica 9. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 1.2.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete.

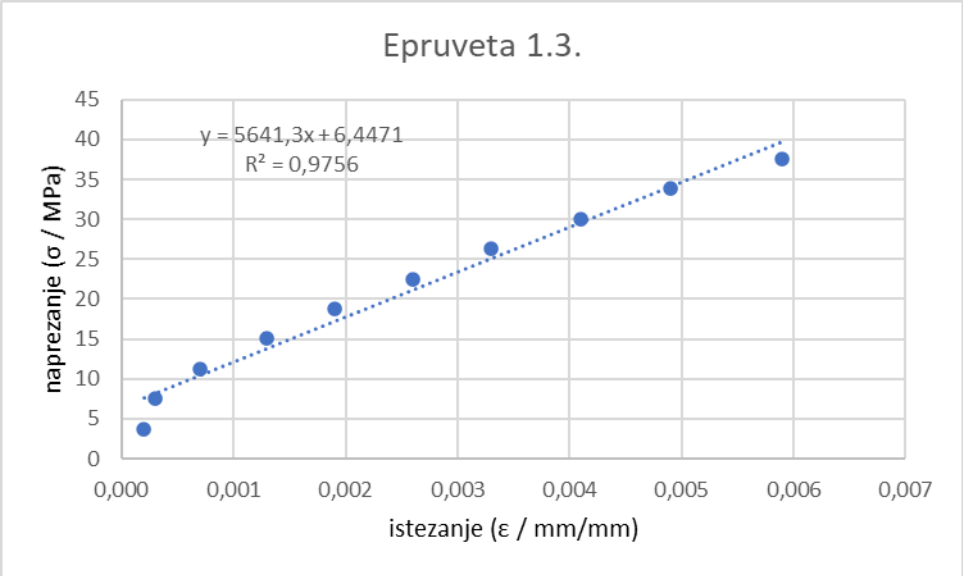
***F* / N**	***L* / mm**	***D* / mm**	***Δl* / mm**	***σ* / MPa**	***ε* / mm/mm**
200	0,01	0,01	0,01	3,91	0,0002
400	0,04	0,02	0,03	7,81	0,0006
600	0,06	0,05	0,055	11,72	0,0011
800	0,1	0,08	0,09	15,63	0,0018
1000	0,13	0,12	0,125	19,54	0,0025
1200	0,17	0,16	0,165	23,44	0,0033
1400	0,21	0,2	0,205	27,35	0,0041
1600	0,26	0,26	0,26	31,26	0,0052
1800	0,3	0,3	0,3	35,17	0,0060
2000	0,35	0,35	0,35	39,07	0,0070
F_{max} / N	**3640**				



Slika 18. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 1.2.

Tablica 10. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 1.3.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete.

***F* / N**	***L* / mm**	***D* / mm**	***Δl* / mm**	***σ* / MPa**	***ε* / mm/mm**
200	0,01	0,01	0,01	3,76	0,0002
400	0,01	0,02	0,015	7,51	0,0003
600	0,03	0,04	0,035	11,27	0,0007
800	0,05	0,08	0,065	15,03	0,0013
1000	0,09	0,1	0,095	18,78	0,0019
1200	0,12	0,14	0,13	22,54	0,0026
1400	0,15	0,18	0,165	26,30	0,0033
1600	0,19	0,22	0,205	30,06	0,0041
1800	0,23	0,26	0,245	33,81	0,0049
2000	0,28	0,31	0,295	37,57	0,0059
F_{max} / N	**3320**				

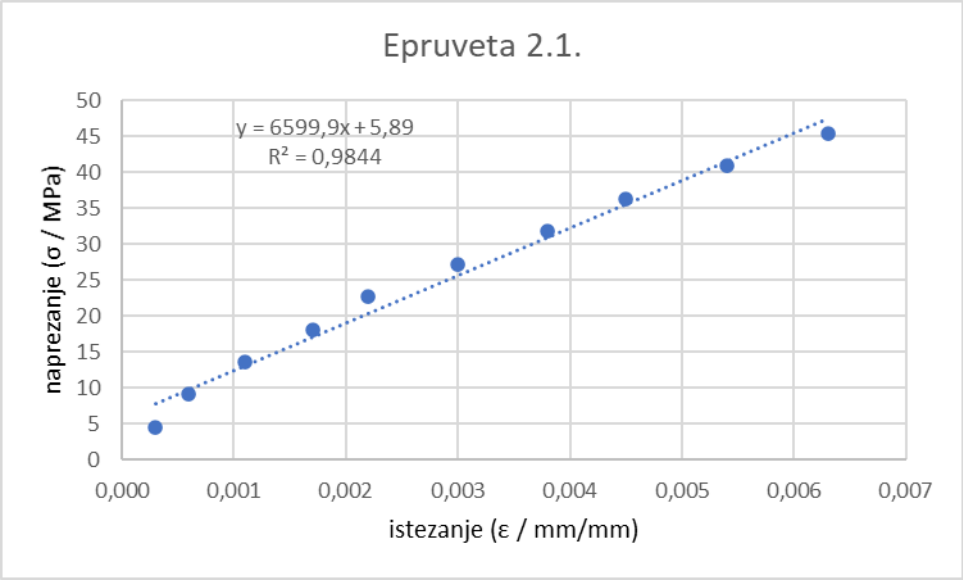


Slika 19. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 1.3.

8.1.2. Rezultati statičkog rasteznog ispitivanja za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 5 mas.% NaOH.

Tablica 11. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 2.1.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete.

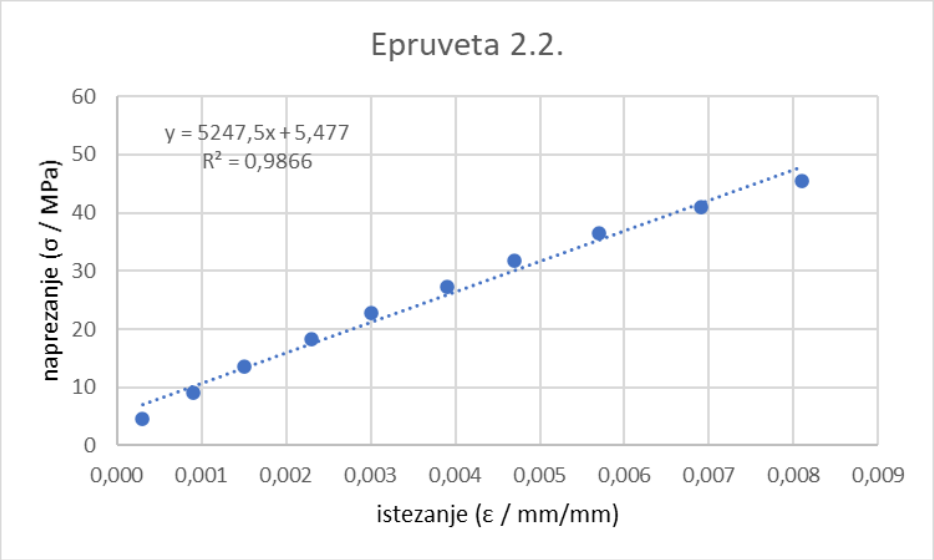
***F* / N**	***L* / mm**	***D* / mm**	***Δl* / mm**	***σ* / MPa**	***ε* / mm/mm**
200	0,02	0,01	0,015	4,54	0,0003
400	0,04	0,02	0,03	9,10	0,0006
600	0,07	0,04	0,055	13,62	0,0011
800	0,1	0,07	0,085	18,16	0,0017
1000	0,12	0,1	0,11	22,69	0,0022
1200	0,16	0,14	0,15	27,23	0,0030
1400	0,2	0,18	0,19	31,77	0,0038
1600	0,23	0,22	0,225	36,31	0,0045
1800	0,28	0,26	0,27	40,85	0,0054
2000	0,32	0,31	0,315	45,39	0,0063
F_{max} / N	**3820**				



Slika 20. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 2.1.

Tablica 12. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 2.2.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete.

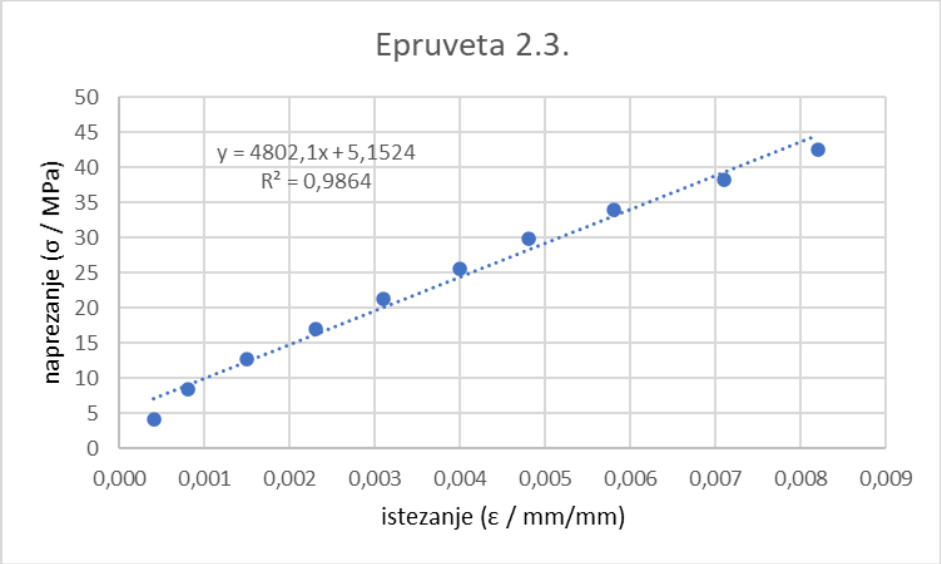
***F* / N**	***L* / mm**	***D* / mm**	***Δl* / mm**	***σ* / MPa**	***ε* / mm/mm**
200	0,02	0,01	0,015	4,55	0,0003
400	0,04	0,05	0,045	9,11	0,0009
600	0,07	0,08	0,075	13,66	0,0015
800	0,11	0,12	0,115	18,22	0,0023
1000	0,15	0,15	0,15	22,77	0,0030
1200	0,19	0,2	0,195	27,33	0,0039
1400	0,23	0,24	0,235	31,88	0,0047
1600	0,28	0,29	0,285	36,44	0,0057
1800	0,34	0,35	0,345	40,99	0,0069
2000	0,4	0,41	0,405	45,55	0,0081
F_{max} / N	**2860**				



Slika 21. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 2.2.

Tablica 13. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 2.3.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete.

***F* / N**	***L* / mm**	***D* / mm**	***Δl* / mm**	***σ* / MPa**	***ε* / mm/mm**
200	0,03	0,01	0,02	4,25459	0,0004
400	0,06	0,02	0,04	8,50919	0,0008
600	0,09	0,06	0,075	12,76378	0,0015
800	0,13	0,1	0,115	17,01838	0,0023
1000	0,17	0,14	0,155	21,27297	0,0031
1200	0,21	0,19	0,2	25,52757	0,0040
1400	0,25	0,23	0,24	29,78216	0,0048
1600	0,3	0,28	0,29	34,03676	0,0058
1800	0,36	0,35	0,355	38,29135	0,0071
2000	0,42	0,4	0,41	42,54595	0,0082
F_{max} / N	**3040**				

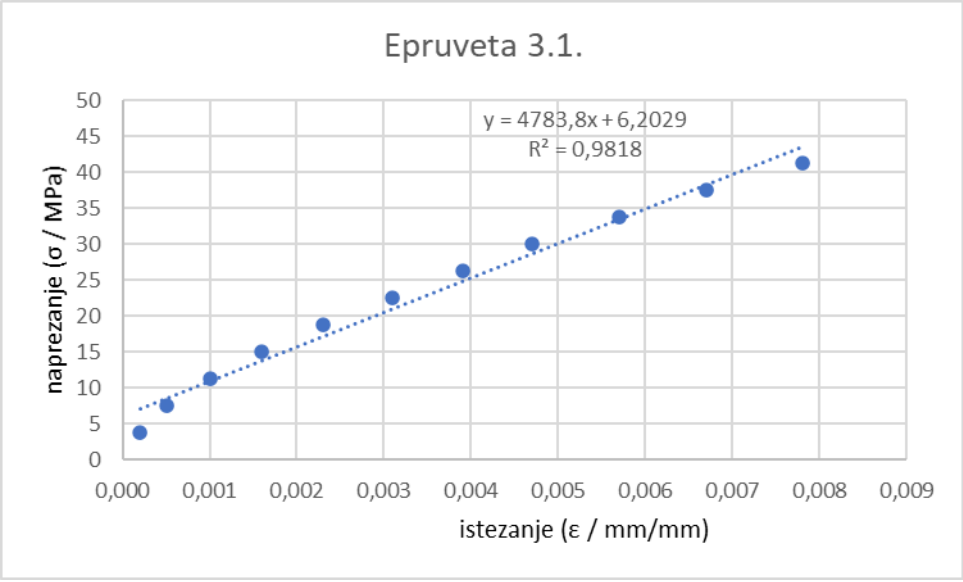


Slika 22. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 2.3.

8.1.3. Rezultati statičkog rasteznog ispitivanja za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 10 mas.% NaOH.

Tablica 14. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 3.1.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete.

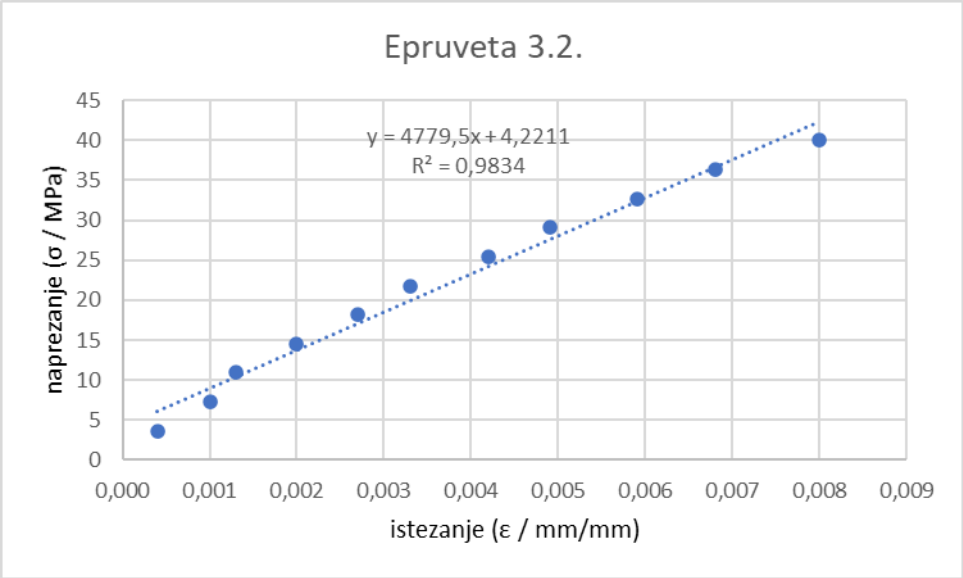
***F* / N**	***L* / mm**	***D* / mm**	***Δl* / mm**	***σ* / MPa**	***ε* / mm/mm**
200	0,01	0,01	0,01	3,75	0,0002
400	0,03	0,02	0,025	7,50	0,0005
600	0,06	0,04	0,05	11,26	0,0010
800	0,09	0,07	0,08	15,01	0,0016
1000	0,12	0,11	0,115	18,76	0,0023
1200	0,16	0,15	0,155	22,51	0,0031
1400	0,2	0,19	0,195	26,26	0,0039
1600	0,24	0,23	0,235	30,02	0,0047
1800	0,29	0,28	0,285	33,77	0,0057
2000	0,34	0,33	0,335	37,52	0,0067
2200	0,39	0,39	0,39	41,27	0,0078
F_{max} / N	**2540**				



Slika 23. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 3.1.

Tablica 15. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 3.2.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete.

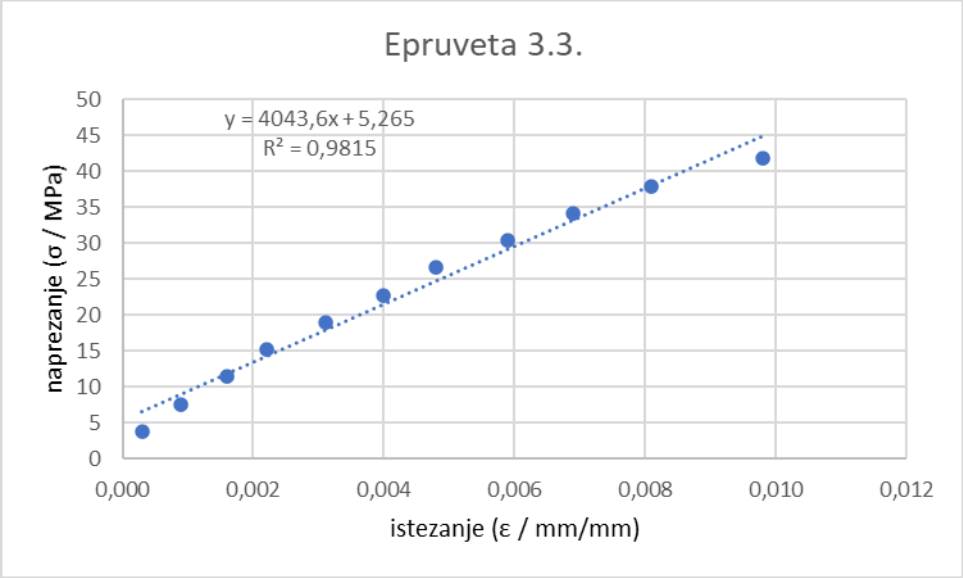
***F* / N**	***L* / mm**	***D* / mm**	***Δl* / mm**	***σ* / MPa**	***ε* / mm/mm**
200	0,01	0,03	0,02	3,64	0,0004
400	0,06	0,04	0,05	7,27	0,0010
600	0,08	0,05	0,065	10,91	0,0013
800	0,12	0,08	0,1	14,55	0,0020
1000	0,15	0,12	0,135	18,18	0,0027
1200	0,18	0,15	0,165	21,82	0,0033
1400	0,22	0,2	0,21	25,45	0,0042
1600	0,26	0,23	0,245	29,09	0,0049
1800	0,31	0,28	0,295	32,73	0,0059
2000	0,35	0,33	0,34	36,36	0,0068
2200	0,41	0,39	0,4	40,00	0,0080
F_{max} / N	**3280**				



Slika 24. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 3.2.

Tablica 16. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 3.3.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete.

***F* / N**	***L* / mm**	***D* / mm**	***Δl* / mm**	***σ* / MPa**	***ε* / mm/mm**
200	0,01	0,02	0,015	3,79	0,0003
400	0,04	0,05	0,045	7,59	0,0009
600	0,08	0,08	0,08	11,38	0,0016
800	0,11	0,11	0,11	15,18	0,0022
1000	0,15	0,16	0,155	18,97	0,0031
1200	0,2	0,2	0,2	22,76	0,0040
1400	0,24	0,24	0,24	26,56	0,0048
1600	0,29	0,3	0,295	30,35	0,0059
1800	0,35	0,34	0,345	34,14	0,0069
2000	0,41	0,4	0,405	37,94	0,0081
2200	0,5	0,48	0,49	41,73	0,0098
F_{max} / N	**2380**				

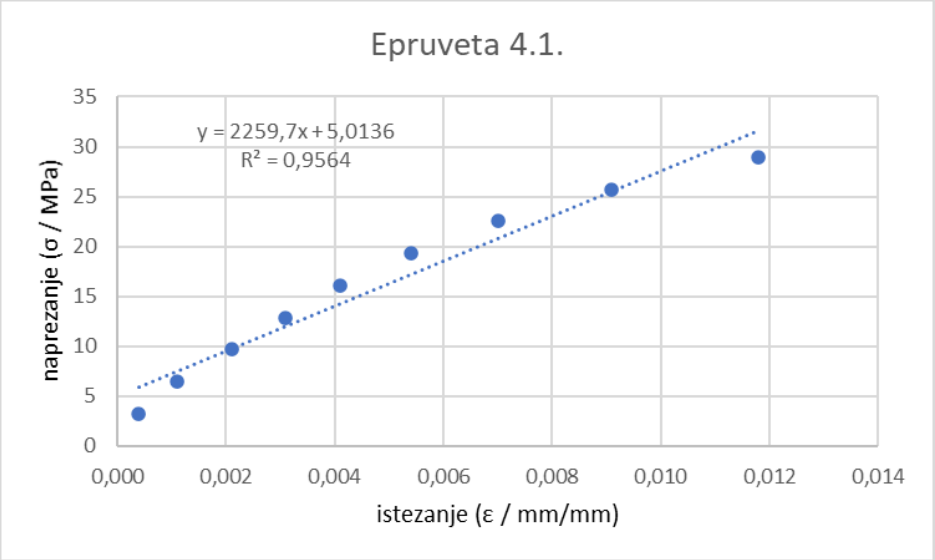


Slika 25. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 3.3.

8.1.4. Rezultati statičkog rasteznog ispitivanja za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 15 mas.% NaOH.

Tablica 17. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 4.1.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete.

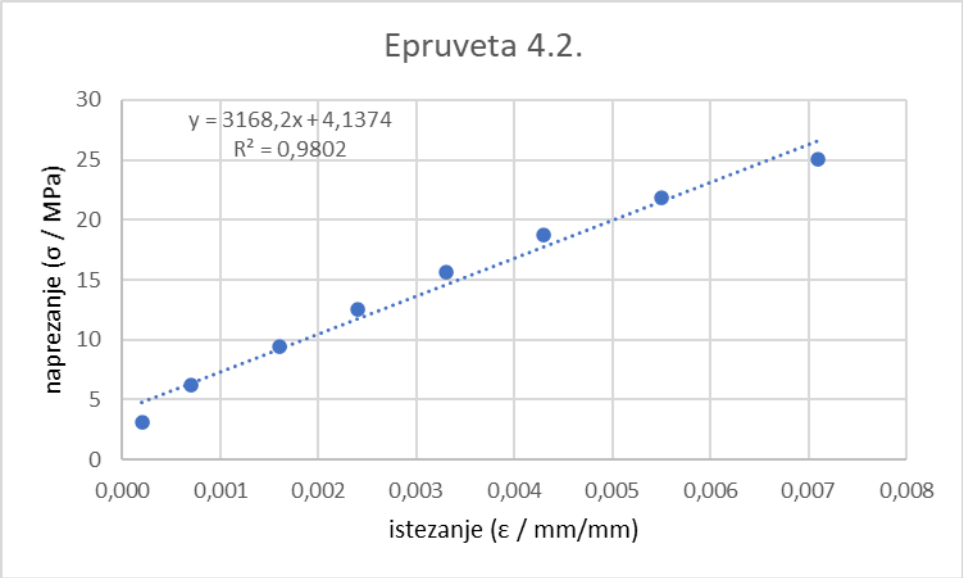
F / N	L / mm	D / mm	Δl / mm	σ / MPa	ε / mm/mm
300	0,01	0,03	0,02	3,22	0,0004
600	0,06	0,05	0,055	6,43	0,0011
900	0,11	0,1	0,105	9,65	0,0021
1200	0,16	0,15	0,155	12,87	0,0031
1500	0,21	0,2	0,205	16,09	0,0041
1800	0,27	0,27	0,27	19,30	0,0054
2100	0,35	0,35	0,35	22,52	0,0070
2400	0,45	0,46	0,455	25,74	0,0091
2700	0,58	0,6	0,59	28,96	0,0118
F_{max} / N	**2960**				



Slika 26. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 4.1.

Tablica 18. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 4.2.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete.

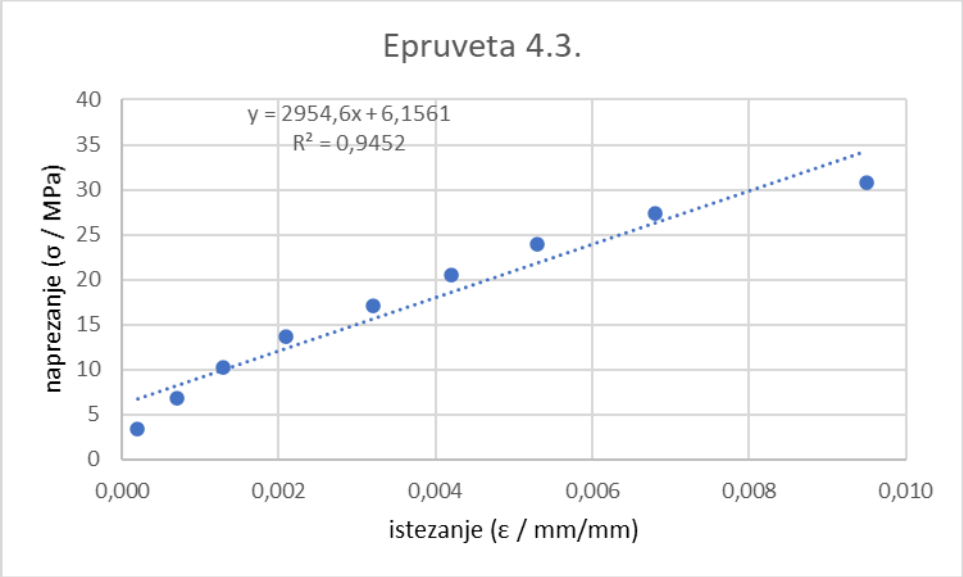
***F* / N**	***L* / mm**	***D* / mm**	***Δl* / mm**	***σ* / MPa**	***ε* / mm/mm**
300	0,01	0,01	0,01	3,13	0,0002
600	0,03	0,04	0,035	6,26	0,0007
900	0,08	0,08	0,08	9,39	0,0016
1200	0,12	0,12	0,12	12,51	0,0024
1500	0,17	0,16	0,165	15,64	0,0033
1800	0,23	0,2	0,215	18,77	0,0043
2100	0,3	0,25	0,275	21,90	0,0055
2400	0,39	0,32	0,355	25,03	0,0071
F_{max} / N	**3040**				



Slika 27. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 4.2.

Tablica 19. Rezultati izmjerenih vrijednosti za epruvetu 4.3.; *L* / mm - produljenje lijeve strane epruvete, *D* / mm - produljenje desne strane epruvete.

***F* / N**	***L* / mm**	***D* / mm**	***Δl* / mm**	***σ* / MPa**	***ε* / mm/mm**
300	0,01	0,01	0,01	3,42	0,0002
600	0,02	0,05	0,035	6,84	0,0007
900	0,05	0,08	0,065	10,25	0,0013
1200	0,09	0,12	0,105	13,67	0,0021
1500	0,15	0,17	0,16	17,09	0,0032
1800	0,2	0,22	0,21	20,51	0,0042
2100	0,26	0,27	0,265	23,92	0,0053
2400	0,34	0,34	0,34	27,34	0,0068
2700	0,47	0,48	0,475	30,76	0,0095
F_{max} / N	**2960**				



Slika 28. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvetu 4.3.

Analizom navedenih rezultata dobivene su vrijednosti rasteznog modula elastičnosti i rastezne čvrstoće za pojedine kompozitne ploče (Tablica 20, Tablica 21).

Tablica 20. Pregled vrijednosti rasteznih modula elastičnosti za 4 ploče ojačane vlaknima tretiranim različitim koncentracijama NaOH. Iz svake ploče izrezana su po 3 ispitna tijela.

$ploča/epruveta$	2 mas.% NaOH	5 mas.% NaOH	10 mas.% NaOH	15 mas.% NaOH
1	6146,2	6599,9	5023,7	2922,3
2	4998,4	5247,0	5056,6	3495,7
3	5641,3	4802,1	4350	3880,3
E_{sr} / MPa	5595,3	5549,7	4810,1	3432,8
standardna devijacija	575,281	936,337	398,798	482,091

Tablica 21. Pregled vrijednosti rasteznih čvrstoća za 4 ploče ojačane vlaknima tretiranim različitim koncentracijama NaOH. Iz svake ploče izrezana su po 3 ispitna tijela.

$ploča/epruveta$	2 mas.% NaOH	5 mas.% NaOH	10 mas.% NaOH	15 mas.% NaOH
1	62,4	64,7	45,2	33,7
2	71,1	86,7	59,6	31,7
3	112,8	65,1	47,6	31,7
$R_{m,sr}$ / MPa	82,1	72,2	50,8	32,4
standardna devijacija	26,95	12,60	7,73	1,17

Srednja vrijednost rasteznog modula elastičnosti (E_{sr}), za kompozit s netretiranim lanenim vlaknima, iznosi 6683,06 MPa uz standardnu devijaciju 734,5 MPa, a srednja vrijednost rastezne čvrstoće ($R_{m,sr}$) iznosi 67,51 MPa uz standardnu devijaciju 4,29 MPa [22].

8.2. Rezultati savojnog ispitivanja

Tablica 22. Dimenzije epruveta izrezanih iz 4 ploče ojačane vlaknima tretiranim različitim koncentracijama NaOH za savojno ispitivanje; *b*-širina, *h*-debljina, *l*-razmak između oslonaca.

ploča	**1**				**2**				**3**		**4**
epruveta	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**1**
***b* / mm**	15,5	15,54	15,72	15,5	16,02	16	16,06	16,06	15,42	15,6	15,88
***h* / mm**	5,12	5	5,02	5,08	4,62	4,52	4,5	4,52	5,6	5,84	9,38
h_{sr} / mm	5,06				4,54				5,72		9,38
***l* / mm**	80				72				92		150

Tablica 23. Rezultati mjerenja prilikom savojnog ispitivanja za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 2 mas.% NaOH.

sila	Epruveta 1.1.			Epruveta 1.2.		
F / N	f / mm	ε / mm/mm	σ / MPa	f / mm	ε / mm/mm	σ / MPa
20	0,15	0,00072	2,95	0,24	0,00113	6,18
40	0,26	0,00125	5,91	0,47	0,00220	12,36
60	0,35	0,00168	8,86	0,72	0,00338	18,53
80	0,46	0,00221	11,81	0,96	0,00450	24,71
100	0,58	0,00278	14,77	1,19	0,00558	30,89
120	0,68	0,00326	17,72	1,44	0,00675	37,07
140	0,81	0,00389	20,67	1,72	0,00806	43,24
160	0,93	0,00446	23,63	1,98	0,00928	49,42
180	1,05	0,00504	26,58	2,25	0,01055	55,60
200	1,18	0,00566	29,53	2,57	0,01205	61,78
F_{max} / N	292			370		
sila	Epruveta 1.3.			Epruveta 1.4.		
F / N	f / mm	ε / mm/mm	σ / MPa	f / mm	ε / mm/mm	σ / MPa
20	0,27	0,00127	6,06	0,20	0,00095	6,00
40	0,52	0,00245	12,12	0,47	0,00224	12,00
60	0,75	0,00353	18,17	0,68	0,00324	18,00
80	1,00	0,00471	24,23	0,90	0,00429	24,00
100	1,25	0,00588	30,29	1,12	0,00533	30,00
120	1,53	0,00720	36,35	1,40	0,00667	36,00
140	1,80	0,00847	42,41	1,68	0,00800	42,00
160	2,13	0,01002	48,47	1,96	0,00933	48,00
180	2,45	0,01153	54,52	2,25	0,01072	54,00
200	2,86	0,01346	60,58	2,60	0,01238	60,00
F_{max} / N	340			360		

Tablica 24. Rezultati mjerenja prilikom savojnog ispitivanja za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 5 mas.% NaOH.

sila	Epruveta 2.1.			Epruveta 2.2.		
F / N	f / mm	ε / mm/mm	σ / MPa	f / mm	ε / mm/mm	σ / MPa
20	0,18	0,000963	6,32	0,28	0,001465	6,61
40	0,37	0,001978	12,63	0,50	0,002616	13,22
60	0,58	0,003101	18,95	0,72	0,003767	19,82
80	0,78	0,004171	25,27	0,92	0,004813	26,43
100	0,99	0,005294	31,58	1,13	0,005912	33,04
120	1,19	0,006363	37,90	1,37	0,007167	39,65
140	1,42	0,007593	44,22	1,63	0,008527	46,25
160	1,66	0,008876	50,54	1,90	0,00994	52,86
180	1,93	0,01032	56,85	2,18	0,011405	59,47
200	2,20	0,011764	63,17	2,53	0,013236	66,08
F_{max} / N	364			340		
sila	Epruveta 2.3.			Epruveta 2.4.		
F / N	f / mm	ε / mm/mm	σ / MPa	f / mm	ε / mm/mm	σ / MPa
20	0,27	0,001406	6,64	0,34	0,001779	6,58
40	0,52	0,002708	13,28	0,5	0,002616	13,17
60	0,77	0,00401	19,93	0,73	0,003819	19,75
80	1,01	0,00526	26,57	0,92	0,004813	26,33
100	1,27	0,006615	33,21	1,12	0,005859	32,92
120	1,55	0,008073	39,85	1,35	0,007063	39,50
140	1,85	0,009635	46,49	1,56	0,008161	46,08
160	2,16	0,01125	53,13	1,79	0,009364	52,66
180	2,49	0,012969	59,78	2,07	0,010829	59,25
200	2,84	0,014792	66,42	2,35	0,012294	65,83
F_{max} / N	322			362		

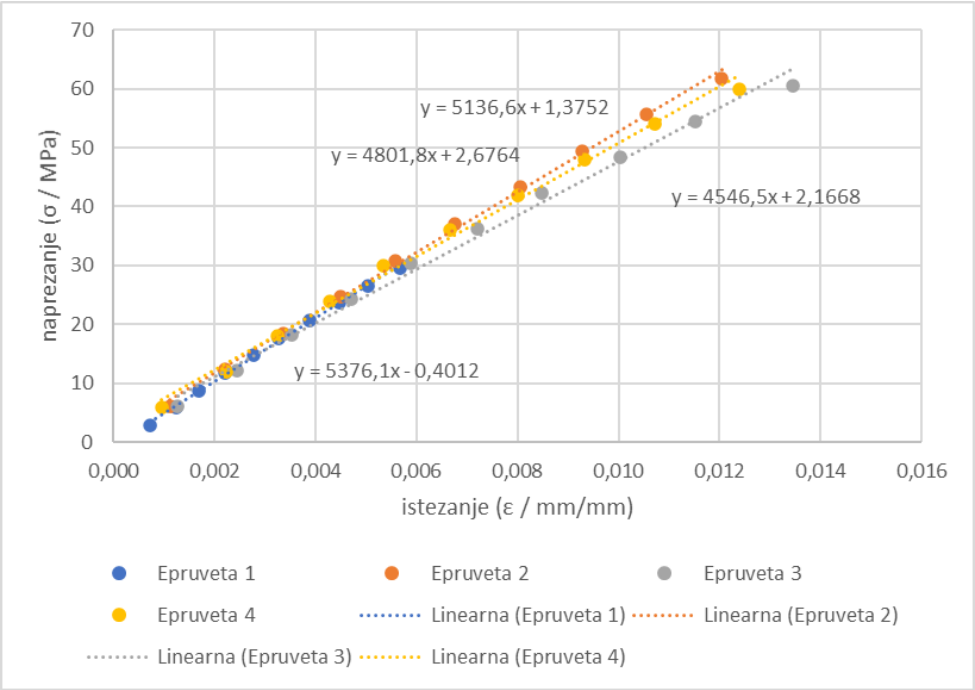
Tablica 25. Rezultati mjerenja prilikom savojnog ispitivanja za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 10 mas.% NaOH.

sila	Epruveta 3.1.			Epruveta 3.2.		
F / N	f / mm	ε / mm/mm	σ / MPa	f / mm	ε / mm/mm	σ / MPa
20	0,18	0,00135	5,71	0,28	0,001449	5,19
40	0,37	0,002302	11,42	0,50	0,002608	10,38
60	0,58	0,003454	17,12	0,72	0,003395	15,56
80	0,78	0,004764	22,83	0,92	0,004802	20,75
100	0,99	0,005875	28,54	1,13	0,006003	25,94
120	1,19	0,007026	34,25	1,37	0,007245	31,13
140	1,42	0,008257	39,95	1,63	0,008487	36,31
160	1,66	0,009607	45,66	1,90	0,009894	41,50
180	1,93	0,011036	51,37	2,18	0,011178	46,69
200	2,20	0,012505	57,08	2,53	0,012668	51,88
F_{max} / N	346			358		

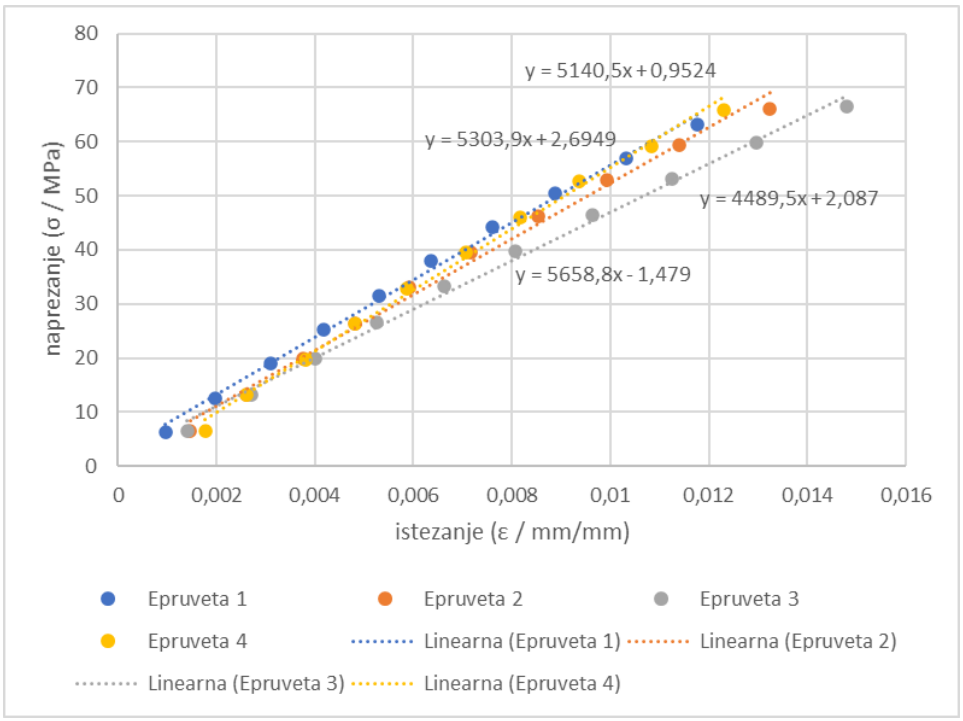
Tablica 26. Rezultati mjerenja prilikom savojnog ispitivanja za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 15 mas.% NaOH.

sila	Epruveta 4.1.		
F / N	f / mm	ε / mm/mm	σ / MPa
20	0,42	0,00105	3,22
40	0,84	0,00210	6,44
60	1,19	0,00298	9,66
80	1,64	0,00410	12,88
100	2,05	0,00513	16,10
120	2,44	0,00610	19,32
140	2,85	0,00713	22,55
160	3,27	0,00818	25,77
180	3,71	0,00928	28,99
200	4,17	0,01043	32,21
F_{max} / N	376		

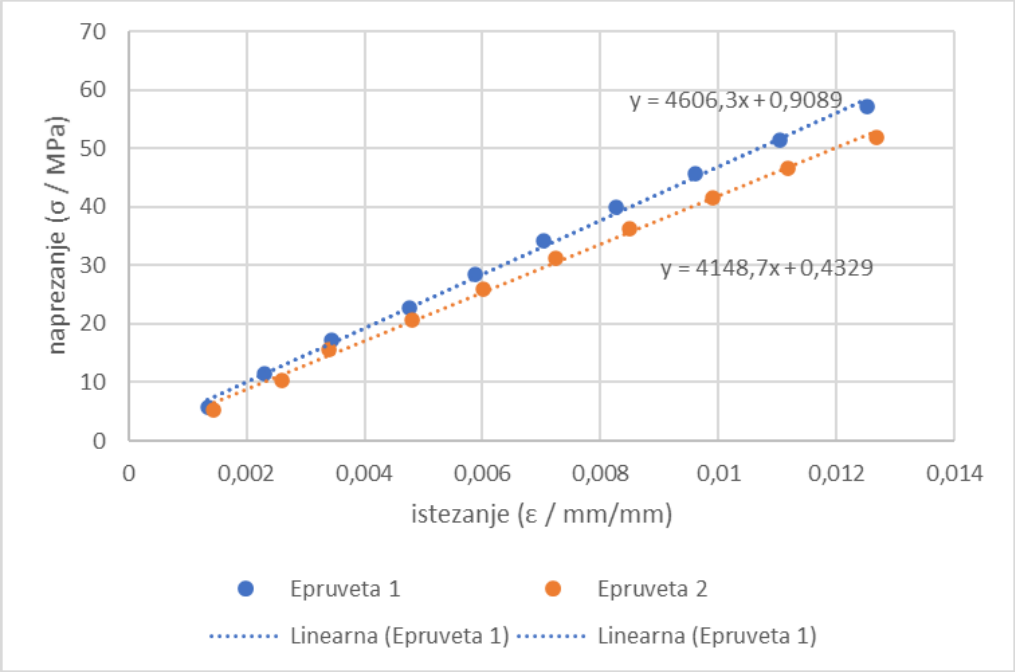
Obrada podataka dobivenih prilikom savojnog ispitivanja analogna je obradi podataka za statičko rastezno ispitivanje. Za dobivanje vrijednosti savojnog modula elastičnosti, potrebno je rezultate prikazati dijagramom i napraviti linearnu aproksimaciju, kao je što je to učinjeno u prethodnom ispitivanju, odnosno prilikom određivanja rasteznog modula elastičnosti (Poglavlje 8.1). Vrijednosti savojne čvrstoće izračunate su prema izrazu (5).



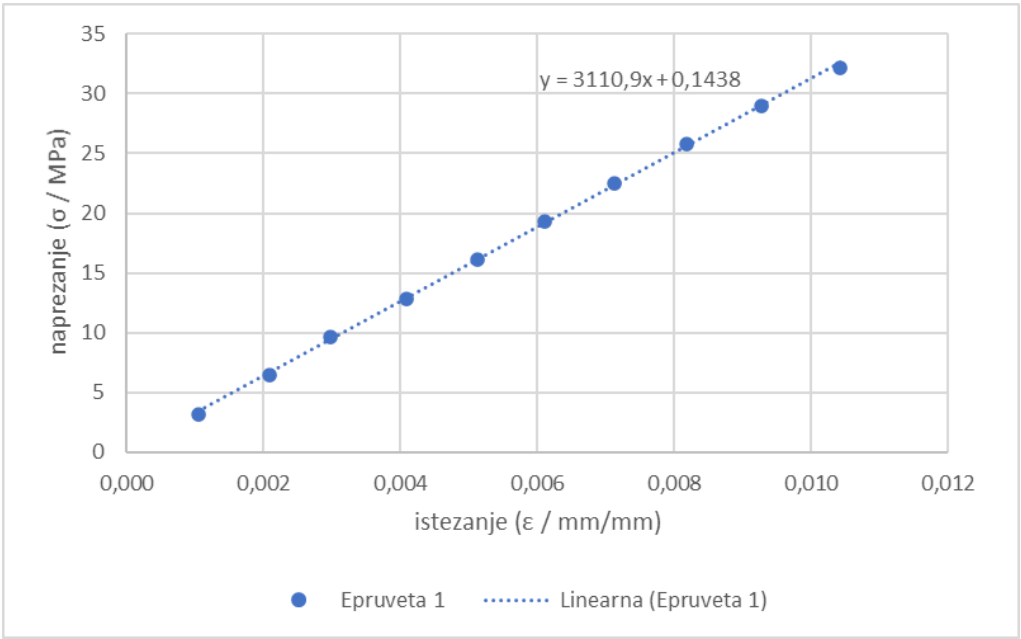
Slika 29. Krivulje naprezanje - istezanje za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 2 mas.% NaOH.



Slika 30. Krivulje naprezanje - istezanje za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 5 mas.% NaOH.



Slika 31. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 10 mas.% NaOH.



Slika 32. Krivulja naprezanje - istezanje za epruvete kompozita čija su vlakna tretirana u otopini koncentracije 15 mas.% NaOH.

Analizom navedenih rezultata izračunate su vrijednosti savojnog modula elastičnosti (E_s) i savojne čvrstoće (R_{ms}) (Tablica 27, Tablica 28).

Tablica 27. Pregled vrijednosti savojnih modula elastičnosti za 4 ploče ojačane vlaknima tretiranim različitim koncentracijama NaOH.

$ploča/epruveta$	2 mas.% NaOH	5 mas.% NaOH	10 mas.% NaOH	15 mas.% NaOH
1	5376,1	5303,9	4606,3	3110,9
2	5136,6	5140,5	4148,7	/
3	4546,5	4489,5	/	/
4	4801,8	5658,8	/	/
$E_{s,sr}$ / MPa	4965,3	5148,2	4377,5	3110,9
standardna devijacija	365,25	489,52	323,57	0

Tablica 28. Pregled vrijednosti savojnih čvrstoća za 4 ploče ojačane vlaknima tretiranim različitim koncentracijama NaOH.

$ploča/epruveta$	2 mas.% NaOH	5 mas.% NaOH	10 mas.% NaOH	15 mas.% NaOH
1	43,12	57,48	49,37	30,28
2	57,14	56,17	46,43	/
3	51,50	53,47	/	/
4	54,00	59,58	/	/
$R_{ms,sr}$ / MPa	51,44	56,67	47,90	30,28
standardna devijacija	6,01	2,56	2,08	0

Savojni modul elastičnosti za kompozit s netretiranim vlaknima iznosi 4503,53 MPa uz standardnu devijaciju 464,07 MPa, a savojna čvrstoća iznosi 106,73 MPa, uz standardnu devijaciju 3,89 MPa [22].

8.3. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće

Prividna međuslojna smična čvrstoća računa se prema izrazu (6). Rezultati su prikazani u Tablica 30.

Tablica 29. Dimenzije epruveta izrezanih iz 4 ploče ojačane vlaknima tretiranim različitim koncentracijama NaOH za ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće; *b*-širina, *h*-debljina, *l*-razmak između oslonaca.

ploča	**1**				**2**				**3**			**4**	
epruveta	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**
***b* / mm**	24,14	24,34	24,52	24,34	24,16	24,50	24,56	24,54	28,80	29,16	29,08	50,40	50,68
***h* / mm**	5,02	5,00	5,04	5,06	4,50	4,60	4,58	4,52	5,88	5,98	6,00	9,52	8,50
h_{sr} / mm	5,03				4,55				5,95			9,01	
***l* / mm**	26				22				30			46	

Tablica 30. Pregled vrijednosti prividnih međuslojnih smičnih čvrstoća za 4 ploče ojačane vlaknima tretiranim različitim koncentracijama NaOH.

$ploča/epruveta$	2 mas.% NaOH				5 mas.% NaOH				10 mas.% NaOH			15 mas.% NaOH	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	1	2
F_{max} / N	2040	1860	1660	1860	2080	960	1060	1040	2260	2460	2570	4400	4180
$F_{max,\ sr}$ / N	1855				1285				2430			4290	
τ / MPa	12,63	11,46	10,07	11,33	14,35	6,39	7,07	7,03	10,01	10,58	11,05	6,88	7,28
τ_{sr} / MPa	11,37				8,71				10,55			7,08	
standardna devijacija	1,04				3,77				0,52			0,28	

Prividna međuslojna smična čvrstoća za kompozit s netretiranim vlaknima iznosi 13,59 MPa uz standardnu devijaciju 0,12 MPa [22].

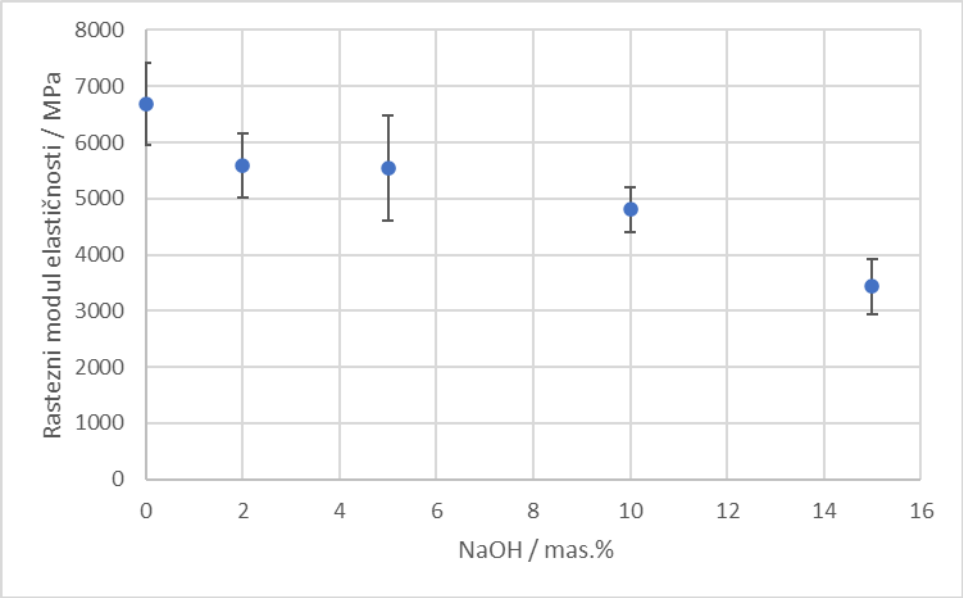
8.4. Analiza dobivenih rezultata

Za lakšu analizu dobivenih rezultata, u Tablica 31 prikazani su maseni udjeli natrijeve lužine, maseni udjeli lanenih vlakana za pojedine kompozite, srednje vrijednosti maksimalnih sila za provedena ispitivanja (statičko rastezno, savojno ispitivanje i ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće) te srednje vrijednosti debljina epruveta za odgovarajuća ispitivanja.

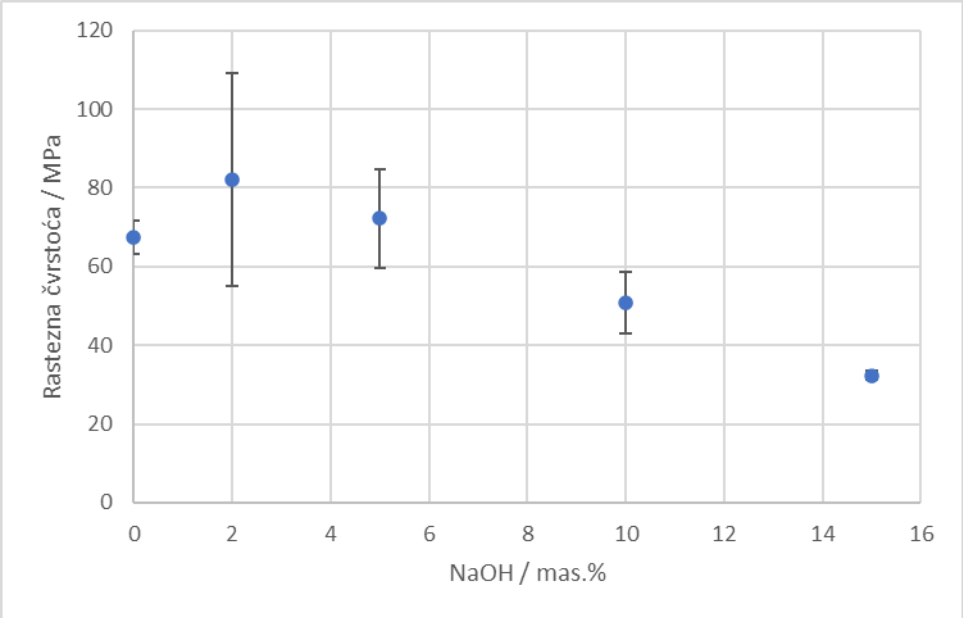
Tablica 31. Maseni udio lanenih vlakana, izloženih različitim koncentracijama NaOH, srednje vrijednosti maksimalnih sila i srednje vrijednosti debljina epruveta za provedena ispitivanja.

NaOH mas.%	vlakna mas.%	F_{max} / N (rastezno)	F_{max} / N (savojno)	F_{max} / N (međuslojno)	h / mm (rastezno)	h / mm (savojno)	h / mm (međuslojno)
0	26,98	2388	213	952	3,340	3,167	3,280
2	20,31	3869	341	1855	5,047	5,055	5,030
5	22,01	3240	347	1285	4,143	4,540	4,550
10	18,61	2733	352	2430	5,433	5,720	5,950
15	17,15	2987	376	4249	9,353	9,380	9,010

Na Slika 33 i Slika 34 prikazane su vrijednosti rasteznog modula elastičnosti i rastezne čvrstoće ovisno o koncentraciji natrijeve lužine. Vidljivo je da najvišu vrijednost rastezne čvrstoće ima kompozit, čija su vlakna tretirana u natrijevoj lužini koncentracije 2 mas.% bez obzira što ima manji maseni udio vlakana od kompozita s netretiranim vlaknima i kompozita čija su vlakna bila tretirana u natrijevoj lužini koncentracije 5 mas.%. S druge strane, rastezni modul elastičnosti za kompozit koji ima najvišu vrijednost rastezne čvrstoće, manji je u odnosu na kompozit s netretiranim vlaknima. Mogući razlog je manji udio vlakana i njihovo skupljanje što je uzrokovalo smanjenje krutosti vlakana, odnosno ojačala.



Slika 33. Ovisnost rasteznog modula elastičnosti o koncentraciji natrijeve lužine.

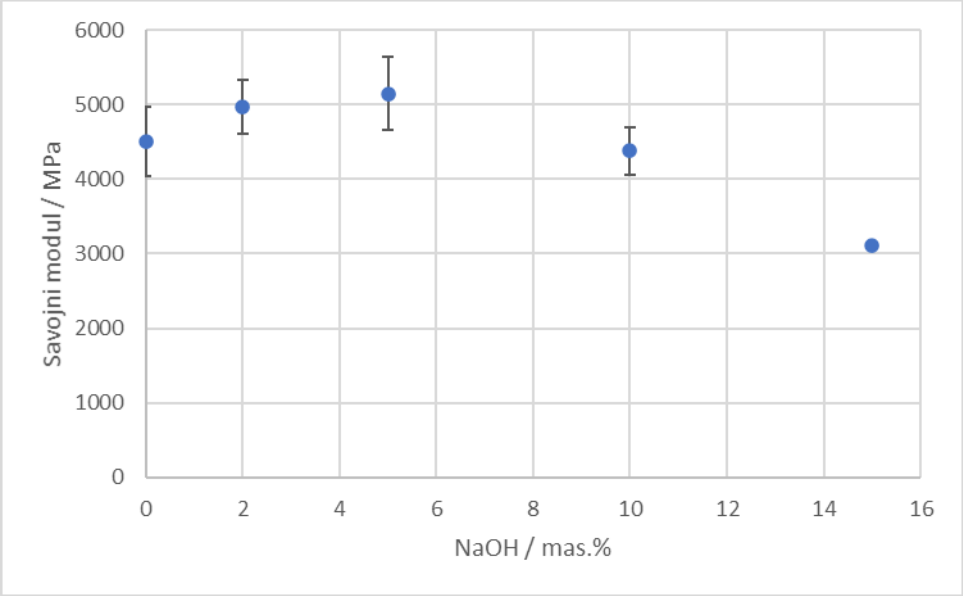


Slika 34. Ovisnost rastezne čvrstoće o koncentraciji natrijeve lužine.

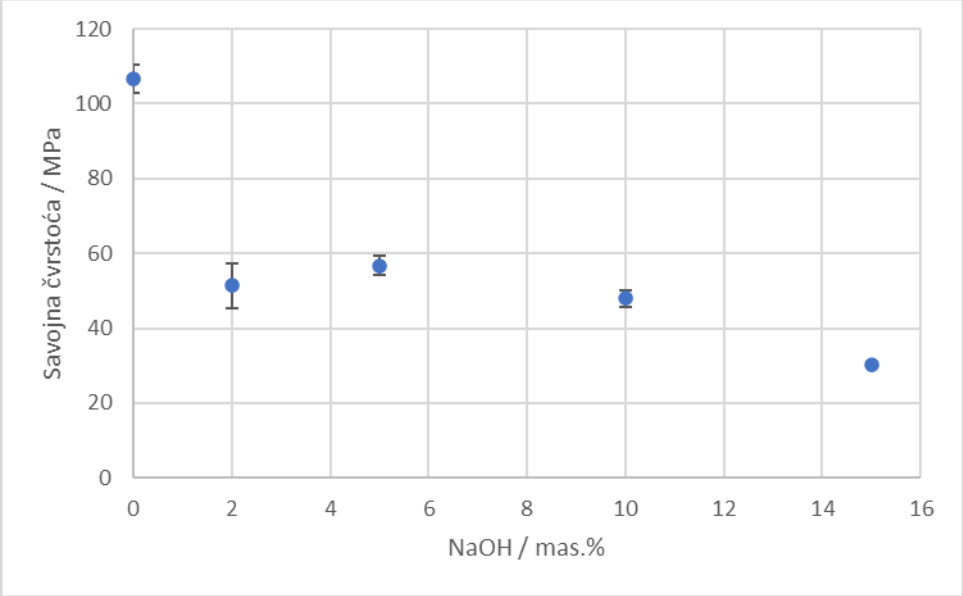
Vrijednosti savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće ovisno o koncentraciji natrijeve lužine prikazane su na Slika 35 i Slika 36. Savojni moduli kompozita, čija su vlakna tretirana natrijevom lužinom koncentracije 2 mas.% i 5 mas.%, imaju najveće vrijednosti.

Međutim, uočljivo je kako su savojne čvrstoće svih kompozita s tretiranim vlaknima, značajno niže od savojne čvrstoće kompozita čija vlakna nisu prethodno tretirana. Debljina kompozita s tretiranim vlaknima veća je od kompozita s netretiranim vlaknima (Tablica 31), iako su svi kompoziti sastavljeni od 3 sloja vlakana.

Prema izrazu za izračun savojne čvrstoće (5), vidljivo je da je savojna čvrstoća obrnuto proporcionalna kvadratu debljine (h^2) pa su veće vrijednosti debljine kompozita s tretiranim vlaknima uzrokovale niže vrijednosti savojne čvrstoće.

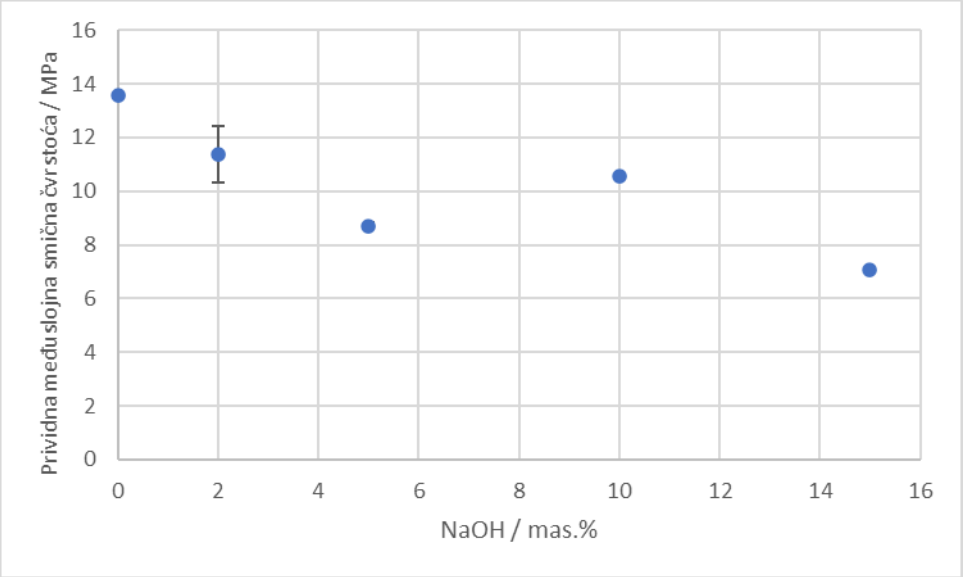


Slika 35. Ovisnost savojnog modula elastičnosti o koncentraciji natrijeve lužine.



Slika 36. Ovisnost savojne čvrstoće o koncentraciji natrijeve lužine.

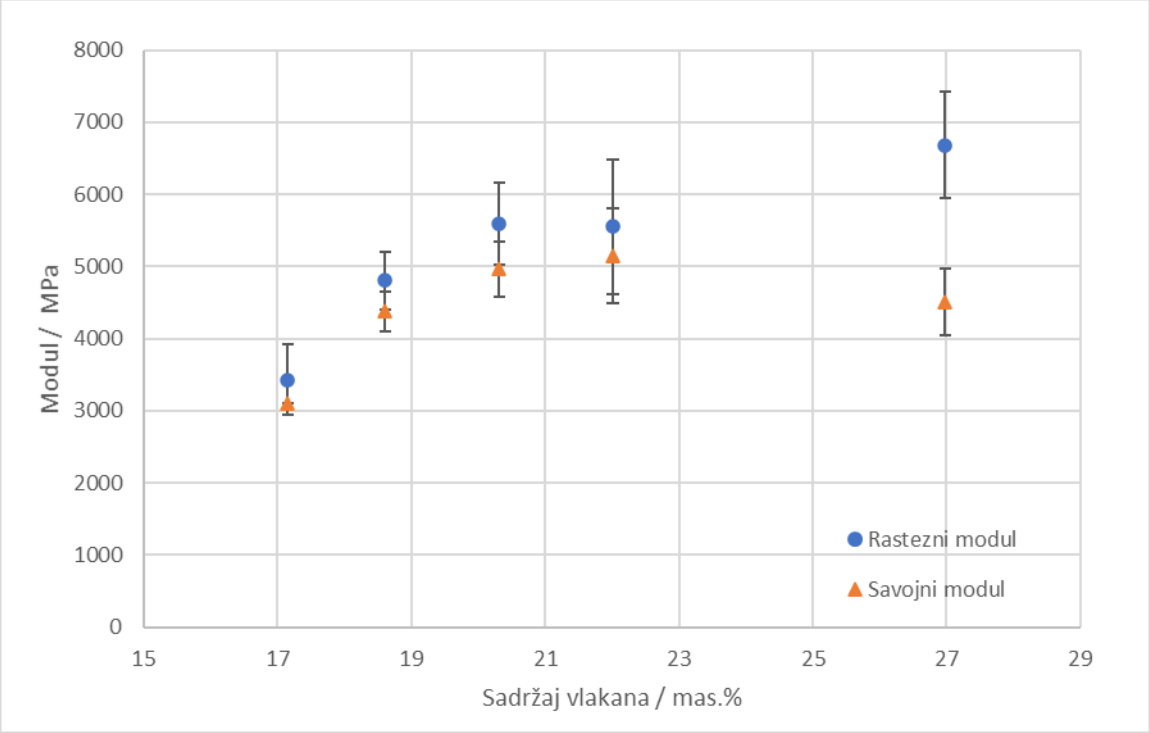
Na Slika 37 prikazane su vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće ovisno o koncentraciji natrijeve lužine. Iz prikazanih podataka, vidljivo je da kompozit čija su vlakna tretirana u natrijevoj lužini koncentracije 2 mas.% poprima vrijednosti koje su najbliže kompozitu s netretiranim vlaknima. Za ovo svojstvo vrlo je bitan utjecaj alkalne obrade. Također, uočljivo je kako prianjanje nije izravno povezano sa sadržajem smole. Za ovo ispitivanje je nedostajalo ispitnih tijela pa dobiveni rezultati nisu vrlo pouzdani.



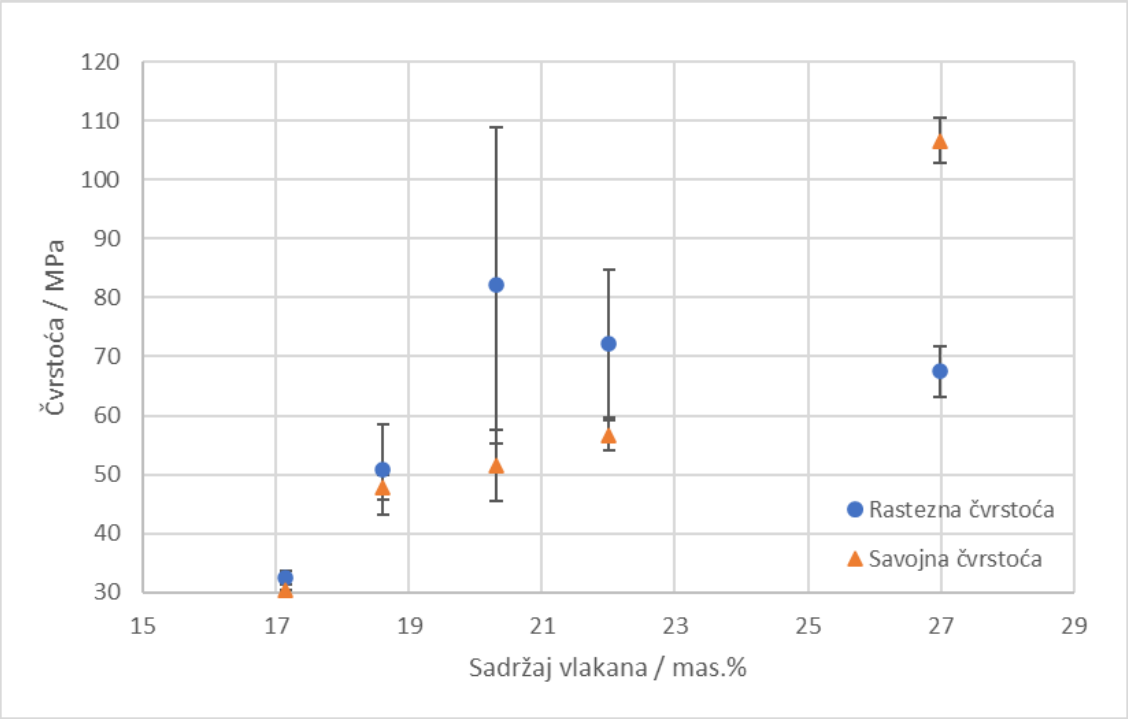
Slika 37. Ovisnost prividne međuslojne smične čvrstoće o koncentraciji natrijeve lužine.

Na Slika 38 prikazani su rastezni i savojni moduli elastičnosti ovisno o masenom udjelu vlakana. Iz rezultata je vidljivo kako kompoziti s vlaknima, tretiranim u otopinama koncentracija 2 mas.% i 5 mas.% NaOH, koji imaju sadržaj lanenih vlakana 20,01, odnosno 22,31 mas.%, pokazuju najbolje vrijednosti. Savojni modul je viši, a rastezni niži od kompozita s netretiranim vlaknima. Udio vlakana kod netretiranog kompozita je viši 35% od prvog, odnosno 25% od drugog kompozita, stoga je za očekivati da bi se povećanjem udjela vlakana vrijednosti dodatno povisile.

Sličan rezultat može se uočiti i na Slika 39, gdje su prikazane ovisnosti rasteznih i savojnih čvrstoća o masenom udjelu vlakana. Također, povećanje debljina kompozita s tretiranim vlaknima, pri čemu nije održan maseni udio vlakana, već je pao, utjecala je značajno na rezultate savojne čvrstoće. Vlakna tretiranjem bubre, kako je opisano u Poglavlju 4.1. Potrebno je provesti dodatnu mikroskopsku analizu presjeka i utvrditi točno podrijetlo velikih debljina kompozita s tretiranim vlaknima.



Slika 38. Ovisnost rasteznog i savojnog modula elastičnosti o sadržaju vlakana.



Slika 39. Ovisnost rastezne i savojne čvrstoće o sadržaju vlakana.

8.4.1. Usporedba dobivenih rezultata sa zahtjevima za mehanička svojstva kompozita propisanim od strane Hrvatskog registra brodova (HRB)

Mehanička svojstva, za kompozite ojačane staklenim vlaknima, propisana od strane Hrvatskog registra brodova su: rastezna čvrstoća 85 MPa, rastezni modul elastičnosti 6500 MPa, savojna čvrstoća 150 MPa, savojni modul elastičnosti 5500 MPa i prividna međuslojna smična čvrstoća 17 MPa.

Svojstva dobivena tretiranjem lanenih vlakana i izradom kompozita od epoksidne matrice u ovom diplomskom radu, ne udovoljavaju navedenim zahtjevima. Mogući načini poboljšanja mehaničkih svojstava su polaganje slojeva vlakana u različitim smjerovima i postizanje većeg masenog udjela vlakana u kompozitima s tretiranim vlaknima. Potreba postizanja većeg udjela vlakana naročito se odnosi na kompozit čija su vlakna tretirana u natrijevoj lužini koncentracije 2 mas.%.

Rezultati dobiveni u eksperimentalnom dijelu upućuju na prisustvo korelacije između rastezne čvrstoće i koncentracije natrijeve lužine, odnosno medija alkalne obrade. Visoke koncentracije natrijeve lužine (> 10 mas.% NaOH) mogu uzrokovati oštećenje i slabljenje vlakana te tako smanjiti rasteznu čvrstoću kompozita, dok niže koncentracije natrijeve lužine (< 10 mas.% NaOH) mogu dovesti do povećanja vrijednosti rastezne čvrstoće u usporedbi s netretiranim vlaknima.

Vrijednosti rasteznog modula elastičnosti, savojne čvrstoće i prividne međuslojne smične čvrstoće kompozita s netretiranim vlaknima više su od vrijednosti kompozita s tretiranim vlaknima. Maseni udio vlakana netretiranog kompozita je viši pa su posljedično i navedena svojstva bolja.

9. ZAKLJUČAK

Upotreba i proizvodnja prirodnih kompozita, u budućnosti će zasigurno sve više rasti za različite industrijske primjene. U eksperimentalnom dijelu ovog diplomskog rada, potvrđeno je kako pravilna obrada prirodnih vlakana prije ugradnje u kompozit pridonosi smanjenju utjecaja hidrofilnog karaktera prirodnih vlakana na mehanička svojstva čitavog kompozita. Također, utvrđeno je i kako previše agresivna alkalna obrada (koncentracije > 10 mas.% NaOH i dugo trajanje namakanja od 30 minuta) može uzrokovati oštećenja i slabljenje strukture prirodnih vlakana i tako negativno utjecati na mehanička svojstva kompozita.

Nakon provedene alkalne obrade lanenih vlakana, izrade kompozita i ispitivanja mehaničkih svojstava utvrđeno je da najbolja svojstva i najviše perspektive za korištenje pokazuju kompoziti čija su vlakna bila tretirana u natrijevoj lužini koncentracija 2 mas.% i 5 mas.%. Usporedbom sa svojstvima kompozita s netretiranim lanenim vlaknima, uočen je problem znatno smanjenog sadržaja lanenih vlakana u kompozitima s tretiranim vlaknima. Pažnju je potrebno usmjeriti na povećanje sadržaja lanenih vlakana u kompozitima s tretiranim vlaknima, a za poboljšanje mehaničkih svojstava potrebno je polagati slojeve vlakana u različitim smjerovima.

Budući da je glavni cilj ovog diplomskog rada prikazati kompozite s prirodnim vlaknima kao odličnu alternativu kompozitima sa sintetskim vlaknima i utvrditi mogućnost korištenja prirodnih kompozita u brodogradnji, dobivene vrijednosti mehaničkih svojstava uspoređene su sa zahtjevima za mehanička svojstva kompozita propisanim od strane Hrvatskog registra brodova (HRB). Usporedbom dobivenih i zahtijevanih svojstava, zaključeno je kako mehanička svojstva prirodnog kompozita ne udovoljavaju zahtjevima. Međutim, vrijednosti za kompozite čija su vlakna tretirana u natrijevoj lužini koncentracija 2 mas.% i 5 mas.%, mogle bi se približiti zahtijevanim vrijednostima. Za kompozit čija su vlakna tretirana u natrijevoj lužini koncentracije 2 mas.%, rastezni, savojni modul, rastezna, savojna čvrstoća i prividna međuslojna čvrstoća iznose 85%, 93%, 96%, 38% i 67% od vrijednosti koje zahtjeva HRB.

Uz već spomenuti postupak poboljšanja mehaničkih svojstava, odnosno polaganje slojeva lanenih vlakana u različitim smjerovima, moguće je poboljšati svojstva i optimiranjem parametara alkalne obrade. Potrebno je ispitati kakve se vrijednosti mehaničkih svojstava mogu postići za kraća vremena namakanja.

LITERATURA

[1] Campbell FC. Introduction to Composite Materials and Processes: Unique Materials that Require Unique Processes. 2004;283. doi.10.1016/B978-1-85617-415-2.50002-2

[2] Yan L, Chouw N, Jayaraman K. Flax fibre and its composites - A review. Compos Part B Eng [Internet]. 2014;56:296–317. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.014 doi.10.1016/j.compositesb.2013.08.014

[3] Chandrasekar M, Ishak MR, Sapuan SM, Leman Z, Jawaid M. A review on the characterisation of natural fibres and their composites after alkali treatment and water absorption. Plast Rubber Compos. 2017;46(3):119–36. doi.10.1080/14658011.2017.1298550

[4] Hashim MY, Amin AM, Marwah OMF, Othman MH, Yunus MRM, Chuan Huat N. The effect of alkali treatment under various conditions on physical properties of kenaf fiber. J Phys Conf Ser. 2017;914(1). doi.10.1088/1742-6596/914/1/012030

[5] Ahmad R, Hamid R, Osman SA. Physical and chemical modifications of plant fibres for reinforcement in cementitious composites. Adv Civ Eng. 2019;2019. doi.10.1155/2019/5185806

[6] Pereira PHF, De Freitas Rosa M, Cioffi MOH, De Carvalho Benini KCC, Milanese AC, Voorwald HJC, et al. Vegetal fibers in polymeric composites: A review. Polimeros. 2015;25(1):9–22. doi.10.1590/0104-1428.1722

[7] Klemm D, Heublein B, Fink HP, Bohn A. Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material. Angew Chemie - Int Ed. 2005;44(22):3358–93. doi.10.1002/anie.200460587

[8] Fehri M, Vivet A, Keller C, Dammak F, Haddar M. A characterization of the damage process under buckling load in composite reinforced by flax fibres. J Compos Sci. 2020;4(3). doi.10.3390/jcs4030085

[9] Komuraiah A, Kumar NS, Prasad BD. Chemical Composition of Natural Fibers and its Influence on their Mechanical Properties. Mech Compos Mater. 2014;50(3):359–76. doi.10.1007/s11029-014-9422-2

[10] Aly M, Hashmi MSJ, Olabi AG, Benyounis KY, Messeiry M, Hussain AI, et al.

Optimization of Alkaline Treatment Conditions of Flax Fiber Using Box-Behnken Method. J Nat Fibers. 2012;9(4):256–76. doi.10.1080/15440478.2012.738036

[11] Van de Weyenberg I, Chi Truong T, Vangrimde B, Verpoest I. Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying an alkaline fibre treatment. Compos Part A Appl Sci Manuf. 2006;37(9):1368–76. doi.10.1016/j.compositesa.2005.08.016

[12] Ouarhim W, Zari N, Bouhfid R, Qaiss AEK. Mechanical performance of natural fibers-based thermosetting composites. Mech Phys Test Biocomposites, Fibre-Reinforced Compos Hybrid Compos. 2018;43–60. doi.10.1016/B978-0-08-102292-4.00003-5

[13] Reddy BR, Dhoria SH. Effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fiber reinforced polyester composites. AIP Conf Proc. 2018;1943. doi.10.1063/1.5029673

[14] Melikoğlu AY, Bilek SE, Cesur S. Optimum alkaline treatment parameters for the extraction of cellulose and production of cellulose nanocrystals from apple pomace. Carbohydr Polym. 2019;215(January):330–7. doi.10.1016/j.carbpol.2019.03.103

[15] Symington MC, Banks WM, West OD, Pethrick RA. Tensile testing of cellulose based natural fibers for structural composite applications. J Compos Mater. 2009;43(9):1083–108. doi.10.1177/0021998308097740

[16] Boopathi L, Sampath PS, Mylsamy K. Investigation of physical, chemical and mechanical properties of raw and alkali treated Borassus fruit fiber. Compos Part B Eng [Internet]. 2012;43(8):3044–52. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.002 doi.10.1016/j.compositesb.2012.05.002

[17] Manalo AC, Wani E, Zukarnain NA, Karunasena W, Lau KT. Effects of alkali treatment and elevated temperature on the mechanical properties of bamboo fibre-polyester composites. Compos Part B Eng [Internet]. 2015;80:73–83. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.05.033 doi.10.1016/j.compositesb.2015.05.033

[18] Sodium hydroxide [Internet]. PubChem. Available from: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sodium-hydroxide (pristup 7. lipnja 2021.)

[19] Potassium Hydroxide and Sodium Hydroxide - Similarities, Differences and Use Cases

[Internet]. Noah Technologies. Available from: https://info.noahtech.com/blog/sicomparison-potassium-hydroxide-and-sodium-hydroxide (pristup 7. lipnja 2021.)

[20] Saba N, Jawaid M. Epoxy resin based hybrid polymer composites [Internet]. Hybrid Polymer Composite Materials: Properties and Characterisation. Elsevier Ltd; 2017. 57–82 p. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100787-7.00003-2 doi.10.1016/B978-0-08-100787-7.00003-2

[21] Abdellaoui H, Raji M, Bouhfid R, Qaiss A el kacem. Investigation of the deformation behavior of epoxy-based composite materials. Fail Anal Biocomposites, Fibre-Reinforced Compos Hybrid Compos. 2018;29–49. doi.10.1016/B978-0-08-102293-1.00002-4

[22] Haramina T, Žužić M, Zechner J, Živoder M. Effect of fiber treatment with NaOH solution on mechanical properties of flax fabric/epoxy composites for marine application. In: International Conference on Materials, Tribology and Recycling MATRIB 2021.

[23] SubsTech [Internet]. Available from: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=flexural_strength_tests_of_ceramics (pristup 30. lipnja 2021.)

PRILOZI

I. CD-R disk