# Svojstva i primjena lanenim vlaknima ojačanih biokompozita

**Karačić, Mihael**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*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:235:217944

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

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








SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Mihael Karačić**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

dr. sc. Irena Žmak, izv. prof.

Student:

Mihael Karačić

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem mentorici dr. sc. Ireni Žmak na susretljivosti, suradnji, iskazanoj stručnoj pomoći koja je svojim savjetima i stručnim znanjem bila poticaj pri odabiru teme, te realizaciji diplomskog rada. Hvala joj što je svojim zalaganjem ostavila veliki utisak na ovaj diplomski rad i mene osobno.

Zahvaljujem laborantu Božidaru Bušetinčanu u Laboratoriju za polimere i kompozite Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu na susretljivosti i prenesenom dugogodišnjem iskustvu koje je dodatno oplemenilo eksperimentalni dio ovoga rada.

Također zahvaljujem svojim roditeljima, sestri i prijateljima koji su mi bili oslonac i podrška tijekom cijelog studiranja kao i kod pisanja diplomskog rada.

Mihael Karačić

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<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
|---|---|
| Datum: | Prilog: |
| Klasa: | |
| Ur. broj: | |

# DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MIHAEL KARAČIĆ** Mat. br.: 0035192569

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Svojstva i primjena lanenim vlaknima ojačanih biokompozita**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Properties and applications of flax fibre reinforced biocomposites**

Opis zadatka:

Rastuća proizvodnja i potrošnja materijala dobivenih iz neobnovljivih izvora predstavlja ozbiljnu prijetnju okolišu te time i životu čovjeka na Zemlji. Stoga sve više osviješteni potrošači sve više i podržavaju nastojanja proizvođača prema održivom razvoju i zaštiti okoliša. Međutim, upotreba materijala koji manje utječu na okoliš, tj. koji su ekološki prihvatljiviji te uporaba biorazgradivih proizvoda predstavljaju nove izazove na području primjene materijala.

U ovom diplomskom radu potrebno je:
1. opisati vrste, prednosti i nedostatke kompozitnih materijala
2. opisati vrste, prednosti i nedostatke prirodnih vlakana
3. istražiti način dobivanja lanenih vlakana za primjenu u tehnici, sastav i strukturu lanenih vlakana, odgovarajuće matrice te prednosti i nedostatke lanenim vlaknima ojačanih kompozitnih materijala
4. pribaviti lanena ojačala, izabrati odgovarajuću matricu te izraditi kompozitni materijal
5. ispitati mehanička svojstva dobivenog materijala te njegovu samogasivost
6. predložiti i obrazložiti potencijalna područja primjene.

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

Zadatak zadan:
27. rujna 2018.

Rok predaje rada:
29. studenog 2018.

Predviđeni datum obrane:
05. prosinca 2018.
06. prosinca 2018.
07. prosinca 2018.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Irena Žmak

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

# SADRŽAJ

SADRŽAJ ..... I
POPIS SLIKA ..... III
POPIS TABLICA ..... V
POPIS OZNAKA ..... VI
SAŽETAK ..... VIII
SUMMARY ..... IX
1. UVOD ..... 1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI ..... 4
2.1. Povijesni razvoj kompozita ..... 4
2.2 Podjela kompozita ..... 7
2.3. Matrica kompozita ..... 8
2.4. Ojačala ..... 9
2.4.1. Vlakna kao ojačalo u polimernim kompozitima ..... 11
2.4. Prednosti i nedostaci kompozitnih materijala ..... 18
3. PRIRODNA VLAKNA KAO OJAČALO U POLIMERNIM KOMPOZITIMA ..... 19
3.1. Podjela prirodnih vlakana ..... 19
3.2. Prirodna vlakna kao zamjena sintetskim ..... 21
3.3 Prednosti prirodnih vlakana ..... 23
3.4 Nedostatci prirodnih vlakana ..... 23
3.5. Primjena prirodnih vlakana ..... 25
4. LAN KAO OJAČALO U POLIMERNIM KOMPOZITIMA ..... 28
4.1. Dobivanje vlakana lana ..... 29
4.2. Struktura vlakana lana ..... 31
4.3. Kemijska svojstva lanenog vlakna ..... 34
4.4. Mehanička svojstva vlakana lana ..... 36
4.5. Prednosti i nedostatci lana ..... 40
4.6. Primjena lana u polimernim kompozitima ..... 43
5.EKSPERIMENTALNI DIO ..... 50
5.1. Izrada kompozitnog materijala ..... 50
5.2. Statistička obrada rezultata mjerenja ..... 57
5.3. Statičko vlačno ispitivanje ..... 58
5.3.1. Opis statičkog vlačnog ispitivanja ..... 58
5.3.2. Oprema za statičko vlačno ispitivanje ..... 59

5.3.3. Rezultati statično vlačnog ispitivanja....61
5.4. Savojno ispitivanje....67
5.4.1. Opis savojnog ispitivanja....67
5.4.2. Oprema za statičko savojno ispitivanje....69
5.4.3 Rezultati savojnog ispitivanja....71
5.5. Ispitivanje žilavosti....77
5.5.1. Opis ispitivanja žilavosti....77
5.5.2. Oprema za ispitivanje žilavosti....78
5.5.3 Rezultati ispitivanja žilavosti....79
5.6. Ispitivanje tvrdoće....80
5.6.1. Opis ispitivanja tvrdoće....80
5.6.2 Uređaj za ispitivanje tvrdoće....81
5.6.3. Rezultati mjerenja....82
5.7. Ispitivanje gorivosti i samogasivosti....83
5.7.1. Opis ispitivanja gorivosti i samogasivosti....83
5.7.2. Rezultati ispitivanja....86
6. ZAKLJUČAK....89
LITERATURA....89

# POPIS SLIKA

Slika 1.1. Ukupna potrošnja prirodnih vlakana u kompozitnim materijalima u Europi .....3
Slika 2.1. Struktura kompozita .....7
Slika 2.3. Podjela kompozita prema obliku ojačala: a) kompozit ojačan česticama, b) kompozit ojačan vlaknima, c) strukturni kompoziti .....10
Slika 2.4. Primjer jednosmjernog ojačanja dugim vlaknima .....11
Slika 2.5. Primjer dvosmjernog ojačanja dugim vlaknima .....12
Slika 2.6. Primjer usmjerenog ojačanja kratim vlaknima .....12
Slika 2.7. Primjer slobodnog ojačanja kratim vlaknima .....12
Slika 2.8. Primjer rovinga od staklenih vlakana .....15
Slika 2.9. Primjer rovinga od ugljičnih vlakana .....16
Slika 2.10. Primjer aramidnog rovinga .....17
Slika 3.1. Podjela biljnih prirodnih vlakana .....20
Slika 3.2. Podjela životinjskih prirodnih vlakana .....21
Slika 3.3. Udio različite vrste vlakana u polimernim kompozitima na svjetskom tržištu 2010. .....22
Slika 3.4. Prikaz broja znanstvenih radova u razdoblju od 2000. - 2014. godine na temu prirodnih vlakana kao ojačala u polimernim kompozitima .....27
Slika 4.1. Lan na poljima općine Bosanski Petrovac, BiH .....28
Slika 4.2. Shematski prikaz strukture biljnog vlakna: primarni zid, srednja lamela, lumen, S1 - vanjski sekundarni zid, S2 - srednji sekundarni zid i S3 - vanjski unutarnji zid [19] .....32
Slika 4.3. Shematski prikaz tehničkog i elementarnog lanenog vlakna .....33
Slika 4.4. Usporedba različitih vrsta prirodnih vlakana u odnosu na specifičnu čvrstoću .....37
Slika 4.5. Usporedba različitih tipova prirodnih vlakana s obzirom na modul elastičnosti .....38
Slika 4.6. Usporedba između različitih vlakana s obzirom na istezljivost .....39
Slika 4.7. Pregled karakteristika lana, uključujući prednosti, nedostatke, potencijal i prijetnje .....42
Slika 4.8. Prikaz primjene pojedinih dijelova biljke lana .....43
Slika 4.9. Primjena lana u zimskim sportovima .....44
Slika 4.10. Upotreba lanenih vlakana u proizvodnji dijelova za automobil Mercedes-Benz E-Class [ .....45
Slika 4.11. Nova tehnologija Carboflax u izradi bicikla .....46
Slika 4.12. Stolica ojačana prirodnim vlaknima lana u PLA-matrici .....47
Slika 4.13. Gitara izrađena od kompozitnog materijala ojačanog lanenim vlaknima .....48
Slika 4.14. Profili u građevinskoj industriji izrađeni od kompozitnog materijala ojačanog lanenim vlaknima .....49
Slika 4.15. Kovčeg izrađen od kompozitnog materijala ojačanog lanenim vlaknima .....49
Slika 5.1. Laneno vlakno kupljeno u metraži .....51
Slika 5.2. Postupak pripreme platna za rezanje.....51
Slika 5.3. Platno kao ojačalo izrezano na zadane dimenzije kalupa .....52
Slika 5.4. Postupak izrade kalupa.....52
Slika 5.5. Kalup; a) dimenzije 190x190mm b) dimenzije 220x220mm.....53
Slika 5.6. Prikaz postupka laminiranja .....54
Slika 5.7. Postupak laminiranja polimernog kompozita.....55

Slika 5.8. Ploče nakon sušenja ....56
Slika 5.9. Materijal izrezan na zadane dimenzije epruveta....56
Slika 5.10. Izgled epruveta za statičko vlačno ispitivanje ....58
Slika 5.11. Kidalica za statično vlačno ispitivanje....60
Slika 5.12. Statičko vlačno ispitivanje na kidalici ....60
Slika 5.13. Dijagram sila – produljenje za epruvetu 1....61
Slika 5.14.. Dijagram sila – produljenje za epruvetu 2....62
Slika 5.15. Dijagram sila – produljenje za epruvetu 3....63
Slika 5.16. Dijagram sila – produljenje za epruvetu 4....64
Slika 5.17.. Dijagram sila – produljenje za epruvetu 5....65
Slika 5.18. Dijagram sila – produljenje za sve ispitane uzorke ....66
Slika 5.19. Savojno ispitivanje ....67
Slika 5.20. Epruveta za ispitivanje savojne čvrstoće ....68
Slika 5.21. Epruvete spremne za savojno ispitivanje ....69
Slika 5.22. Kidalica za savojno ispitivanje....70
Slika 5.23. Savojno ispitivanje na kidalici....70
Slika 5.24. Dijagram sila – progib za epruvetu 1....71
Slika 5.25. Dijagram sila - progib za epruvetu 2....72
Slika 5.26. Dijagram sila - progib za epruvetu 3....73
Slika 5.27. Dijagram sila - progib za epruvetu 4....74
Slika 5.28. Dijagram sila - progib za epruvetu 5....75
Slika 5.29. Dijagram sila - progib za sve ispitne uzorke....76
Slika 5.30. Charpyjev bat ....77
Slika 5.31. Dimenzije epruveta za ispitivanje žilavosti ....78
Slika 5.32. Charpyjev bat proizvođača Karl Frank ....79
Slika 5.33. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće prema Shoreu ....80
Slika 5.34.Tvrdomjer za ispitivanje tvrdoće....81
Slika 5.35. Ispitivanje gorivosti i samogasivosti ....84
Slika 5.36. Dimenzije epruveta za ispitivanje gorivosti i samogasivosti....84
Slika 5.37. Epruveta spremna za ispitivanje samogasivosti ....86
Slika 5.38. Epruveta prije ispitivanja samogasivosti....87
Slika 5.39. Epruveta nakon ispitivanja samogasivosti ....88

# POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva viskera .....13
Tablica 2. Svojstva staklenih, aramidnih i ugljičnih vlakana. .....18
Tablica 3. Primjena polimernih kompozita ojačanih različitim prirodnim vlaknima .....26
Tablica 4. Prirodna vlakna i njihova svjetska proizvodnja u tonama.....29
Tablica 5. Morfološka svojstva prirodnih vlakana .....34
Tablica 6. Kemijski sastav najrasprostranjenijih prirodnih vlakana .....35
Tablica 7. Pregled svojstava vlakana lana .....36
Tablica 8. Komponente kompozitnog materijala i maseni udjeli komponenata.....55
Tablica 9. Dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje .....59
Tablica 10. Produljenja epruvete 1 pri statičkom vlačnom pokusu .....61
Tablica 11. Produljenja epruvete 2 pri statičkom vlačnom pokusu .....62
Tablica 12. Produljenja epruvete 3 pri statičkom vlačnom pokusu .....63
Tablica 13. Produljenja epruvete 4 pri statičkom vlačnom pokusu .....64
Tablica 14. Produljenja epruvete 5 pri statičkom vlačnom pokusu .....65
Tablica 15. Dimenzije i mehanička svojstva pojedinih epruveta.....66
Tablica 16. Progibi epruvete 1 pri opterećenju .....71
Tablica 17. Progibi epruvete 2 pri opterećenju .....72
Tablica 18. Progibi epruvete 3 pri opterećenju .....73
Tablica 19. Progibi epruvete 4 pri opterećenju .....74
Tablica 20. Progibi epruvete 5 pri opterećenju .....75
Tablica 21. Dimenzije i mehanička svojstva pojedinih epruveta.....76
Tablica 22. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma.....79
Tablica 23. Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće.....82
Tablica 24. Klase materijala nakon ispitivanja gorivosti i samogasivosti.....85

# POPIS OZNAKA

| **Oznaka** | **Jedinica** | Opis |
|---|---|---|
| $A$ | $\mathrm{mm}^2$ | površina |
| $A_{cu}$ | $\mathrm{kJ/m}^2$ | žilavost |
| $B$ | mm | širina epruvete za ispitivanje žilavosti |
| $b_1$ | mm | širina epruvete za ispitivanje žilavosti |
| $b_2$ | mm | širina pri kraju epruvete za statičko vlačno ispitivanje |
| $D$ | mm | promjer epruvete za statičko tlačno ispitivanje |
| $E$ | $N/\mathrm{mm}^2$ | modul elastičnosti |
| $E_{vl}$ | $N/\mathrm{mm}^2$ | vlačni modul elastičnosti |
| $E_s$ | $N/\mathrm{mm}^2$ | savojni modul elastičnosti |
| $f$ | mm | progib |
| $F$ | N | sila |
| $F_{max}$ | N | maksimalna sila |
| $H$ | $N/\mathrm{mm}^2$ | tvrdoća po Shoreu |
| $\overline{h}$ | mm | srednja debljina epruvete |
| $h_1$ | mm | početna visina Charpyjevog bata |
| $h$ | mm | dubina prodiranja, |
| $h_2$ | mm | konačna visina Charpyjevog bata |
| $k$ | | broj stupnjeva slobode uzorka |
| $L$ | mm | početna udaljenost između ispitivanja |
| $L_0$ | mm | mjerna duljina epruvete za statičko vlačno ispitivanje |
| $l$ | mm | produljenje pri statičkom vlačnom ispitivanju |
| $l_1$ | mm | duljina uskog paralelnog dijela epruvete za statičko vlačno ispitivanje |
| $l_2$ | mm | udaljenost između proširenog paralelnog dijela epruvete za statičko vlačno ispitivanje |

| | | |
|---|---|---|
| $l_3$ | mm | ukupna duljina epruvete za statičko vlačno ispitivanje |
| $L_s$ | mm | razmak između oslonaca savojnog ispitivanja |
| $n$ | | veličina uzorka |
| $p$ | | vjerojatnost |
| $R$ | mm | radijus zakrivljenosti epruvete za statičko vlačno ispitivanje |
| $S$ | | standardna devijacija |
| $R_m$ | $N/mm^2$ | vlačna čvrstoća |
| $R_{ms}$ | $N/mm^2$ | savojna čvrstoća |
| $t$ | | varijabla Studentove t-razdiobe |
| $\bar{X}$ | | aritmetička sredina uzorka |
| $\alpha$ | | stupanj značajnosti |
| $\varepsilon$ | % | istezanje |
| $\mu$ | | procijenjeno očekivanje osnovnog skupa |
| $\mu_{Rm,vl}$ | | intervalna procjena vlačne čvrstoće |
| $\mu_{Rm,s}$ | | intervalna procjena savojne čvrstoće |
| $\mu_{E,s}$ | | intervalna procjena savojnog modula |
| $\mu_{E,vl}$ | | intervalna procjena vlačnog modula |
| $\mu_{Acu}$ | | intervalna procjena udarnog rada loma |
| $\mu_{H,10s}$ | | intervalna procjena tvrdoće po Shoreu za vrijeme prodiranja od 10 sekundi |
| $\mu_{H,30s}$ | | intervalna procjena tvrdoće po Shoreu za vrijeme prodiranja od 30 sekundi |
| $\mu_{H,60s}$ | | intervalna procjena tvrdoće po Shoreu za vrijeme prodiranja od 60 sekundi |

# SAŽETAK

Tema diplomskog rada su svojstva i primjena lanenim vlaknima ojačanih biokompozita.

U današnje vrijeme podizanja ekološke svijesti, upotreba prirodnih materijala koji nemaju štetan utjecaj na okoliš, te imaju mogućnost recikliranja i smanjenu potrošnju energije tijekom svoje proizvodnje, predstavljaju ekološki prihvatljivu alternativu.

Teoretski dio ovog diplomskog rada daje uvid u prednosti i nedostatke kompozitnih materijala, prednosti i nedostatke prirodnih vlakana te načine proizvodnje prirodnih vlakana. Poseban naglasak stavljen je na lanena vlakna, njihovu strukturu, mehanička svojstva, te prednosti i nedostatke.

Eksperimentalni dio opisuje izradu biokompozita ojačanog lanenim vlaknima s matricom od poliesterske smole, te mehanička ispitivanja. Osim toga, provedeno je ispitivanje zapaljivosti.

Mehaničkim ispitivanjima utvrđen je nizak vlačni modul elastičnosti i vlačna čvrstoća, visoka savojna čvrstoća i savojni modul, dobra žilavosti i tvrdoća. Ispitivani kompozitni materijal pokazao se da nije samogasiv.

Kompozitni materijal ojačan lanenim vlaknima može se primjenjivati u interijerima automobila, kao unutarnje zidne obloge u građevinarstvu, te u modernoj industriji namještaja. S obzirom da ispitivani kompozit nije samogasiv, potrebno bi bilo ispitati i utjecaj dodatka usporivača gorenja u duromernu matricu.

Ključne riječi: lanena vlakna, biokompozit, mehanička svojstva, zapaljivost.

# SUMMARY

This thesis is about properties and applications of flax fibre reinforced biocomposites. Today, when ecological consciousness grows, the use of natural materials that do not have a negative impact on the environment and have the ability to recycle and reduce energy consumption during production, is an environmentally acceptable alternative.

Theoretical part of the thesis gives an insight into the advantages and disadvantages of composite materials, advantages and disadvantages of natural fibres and the production methods of natural fibres. Special emphasis is put on the flax fibres, structure of the fibres, their mechanical properties, advantages and disadvantages.

Experimental part describes the making and mechanical testing of the composite material which consists of polyester resin based matrix and flax fibres as reinforcement. Also, a flammability test was carried out.

The results of mechanical testing are low tensile modulus and low tensile strength, high flexural strength and flexural modulus, good toughness and high hardness. The studied flax composite material was not self-extinguishing.

Potential applications of this composite material would be in the automobile industry for interior of automobile or for the modern manufacture of furniture and interior wall linings that can be used in construction industry. Considering the not self-extinguishing properties of the studied composite material, other resins with added fire retardants should be tested.

Key words: flax fibre, biocomposite, mechanical properties, flammability.

# 1. UVOD

Stopa rasta u korištenju neobnovljivih materijala na bazi fosilnih naftnih resursa predstavlja ozbiljnu prijetnju ne samo ljudskoj populaciji nego i cjelokupnoj kvaliteti života. Ljudske su aktivnosti kroz protekli niz godina uvelike odgovorne za sva ekološka pitanja koja se suvremenom čovjeku nameću u vidu onečišćenja okoliša i poboljšanja kvalitete života. Svijet u kojem živimo stalno je pod prijetnjom zagađenja. Ako se ne djeluje brzo i učinkovito na ovo pitanje, čovječanstvo će se morati nositi s velikim izazovom u nadolazećoj budućnosti poput klimatskih promjena. Smanjenje uporabe proizvoda koji nisu ekološki prihvatljivi i uporaba biorazgradivih proizvoda predstavlja izazov na području materijala, a tu svoje mjesto uvelike zauzimaju biopolimeri.[1]

Uporaba prirodnih vlakana u kompozitnoj industriji odavno se prakticirala. Tijekom posljednjih 80 godina došlo je do smanjenja interesa za uporabom prirodnih vlakana zbog razvoja sintetičkih vlakana poput staklenih i ugljičnih vlakna. Rastuća uporaba sintetskih vlakana gotovo je ugrozila razvoj i uporabu prirodnih vlakana. Međutim, posljednjih godina, porastom razine svijesti o ekološkoj održivosti u društvu uporaba prirodnih vlakana u polimernim kompozitima predstavlja održivu alternativu sintetskim vlaknima. Tako danas prirodna vlakna postaju sve popularnija u primjeni i stoga njihova proizvodnja raste na globalnoj razini.[1]

Polimerni kompoziti ojačani prirodnim vlaknima predstavljaju materijal koji kombinira najbolja svojstva oba materijala. Suvremena tehnologija uvelike je pridonijela novom i uzbudljivom razvoju u području polimernih kompozita. Europske zemlje naglašavaju uporabu biorazgradivih tvari, a tu naročito svoj doprinos daje automobilska industrija koja je pokazala veći interes za korištenje prirodnih kompozitnih materijala. Biokompozite koriste proizvođači automobila za ploče vrata, naslone sjedala, nadzorne ploče i još mnogo toga. Štoviše, prirodna vlakna dobivaju sve više na važnosti uglavnom zbog mnogih svojstava poput male mase, niske cijene i još važnije ekološke prihvatljivosti koja su pogodnija u usporedbi sa staklenim vlaknima unutar kompozitnih materijala.[1]

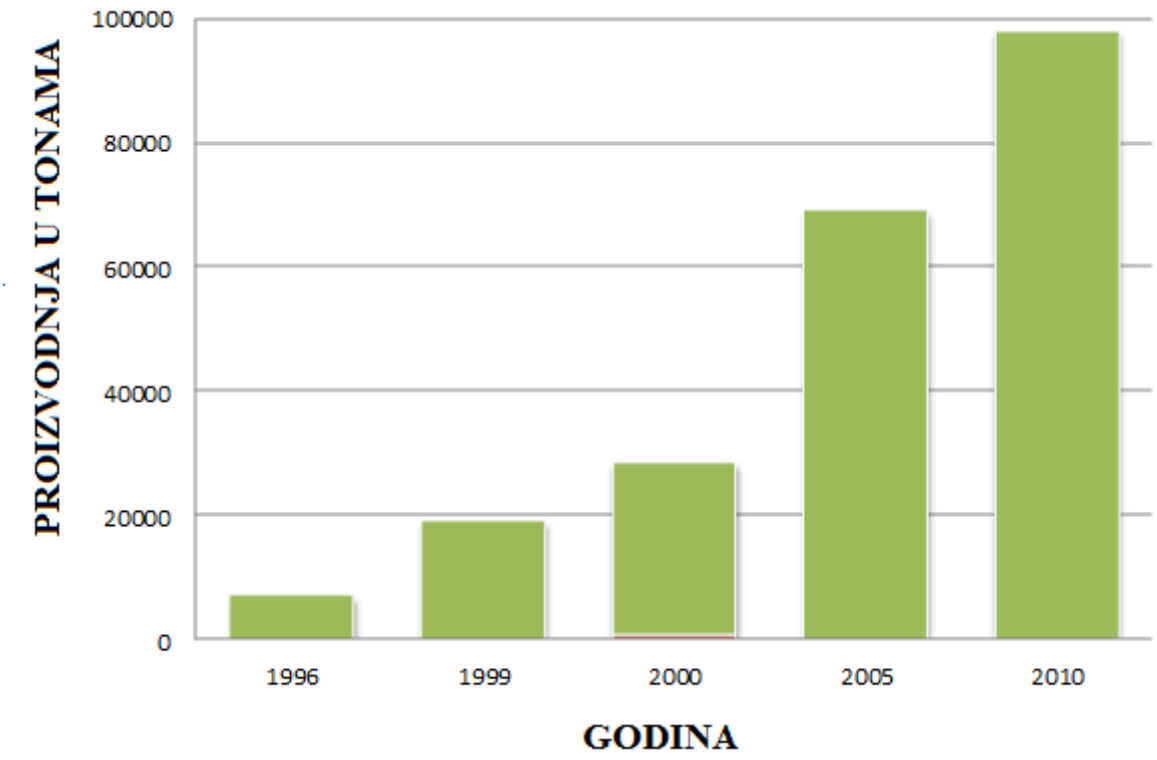
S ekološkog stajališta bio-kompoziti koji su dostupni na tržištu općenito se smatraju ekološkim zahvaljujući uporabi ojačala od biljnih vlakana, iako je u većini slučajeva njihova matrica dobivena iz fosilnih goriva. Ipak, trend u razvoju materijala na području kompozita je da matrica koja predstavlja više od polovice mase kompozita također bude napravljena od prirodnog oporabljivoga materijala.[2]

Kompoziti s prirodnim ojačalima predstavljaju potrošnju od 362,000 t u Europi u 2010., što čini oko 15 % ukupne proizvodnje kompozita, procijenjene na 2,5 milijuna tona godišnje. Očekuje se da će taj postotak doseći oko 30 % u 2020. godini od ukupne potrošnje kompozita od oko 3,2 milijuna tona. Glavni čimbenici koji doprinose ubrzanom rastu primjene tih materijala su:[2]

• ograničeni resursi fosilnih goriva koji su sve skuplji
• održivi razvoj i zabrinutost oko klimatskih promjena
• europska reindustrijalizacija djelomično utemeljena na razvoju bioekonomije
• potrošači zahtijevaju veću odgovornost prema održivom razvoju i zaštite okoliša.

Glavni čimbenik koji ograničava razvoj bioloških materijala i njihovo masovno probijanje na tržište je omjer proizvodnje i troškova koji još uvijek pogodniji kod sintetskih materijala. Nedostatak podataka o životnom ciklusu tih materijala također ograničava njihov razvoj.[2]

Europska Unija je odigrala značajnu ulogu u promicanju zaštite okoliša uporabom ekoloških kompozitnih proizvoda izdavanjem smjernica i nizom zakonskih regulativa koje potiču uporabu oporabljivih materijala. Uporaba polimernih kompozita ojačanih prirodnim vlaknima dobiva brzi zamah u cijelom svijetu. Slika 1.1. pokazuje rastući trend u potrošnji prirodnih vlaknastih kompozita tijekom proteklih 15 godina. U Europi, Njemačka dominira uporabom dvije trećine svih prirodnih vlakana u polimernim kompozitima u automobilskoj industriji.[1] Osim automobilske industrije, kompoziti ojačani prirodnim vlaknima sve se više upotrebljavaju i u ostalim granama industrije poput zrakoplovstva, brodogradnje, elektrotehnike, transporta, industrije pakiranja i sl.[1]




**Slika 1.1. Ukupna potrošnja prirodnih vlakana u kompozitnim materijalima u Europi [1]**

Polimerni kompoziti mogu se smatrati velikom inovacijom koja ima jedinstvene prednosti u odnosu na uobičajene materijale. Sadašnja tehnologija i znanstveni alati mogu igrati vitalnu ulogu u doprinosu stalnog rasta u pogledu potrošnje kompozita ojačanih prirodnim vlaknima. Štoviše, ekološki problem koji prate svijet i povoljna svojstva prirodnih vlakana stvaraju preduvjete za masovniju uporabu ovakvih materijala. Stoga je za očekivati da će u skorijoj budućnosti primjena kompozita ojačanih prirodnim vlaknima osim u automobilskoj industriji, sve se više upotrebljavaju i u ostalim granama industrije.[1]

# 2. KOMPOZITNI MATERIJALI

***Kompozitni materijali* (kompoziti)** građeni su od međusobno čvrsto spojenih različitih materijala radi dobivanja novoga, drugačijega materijala, s fizikalnim ili kemijskim svojstvima koja nadmašuju svojstva pojedinačnih komponenata ili sa svojstvima koja te komponente same nemaju. Pritom se ne radi samo o poboljšanju preradbenih i uporabnih svojstava (npr. povećanje specifične čvrstoće i specifičnoga modula elastičnosti, toplinske postojanosti, otpornosti prema abraziji i puzanju), nego i transportnih, skladišnih, recikličnih svojstava uključujući konačno i cijenu. Većina kompozita sadrži jedan materijal kao kontinuiranu fazu (matricu), a u nju su uklopljeni odvojeni dijelovi druge faze, koja najčešće ima funkciju ojačala. Razlikuju se kompoziti ojačani vlaknima, kompoziti ojačani česticama i strukturni kompoziti.[3]

## 2.1. Povijesni razvoj kompozita

Jedna od najranijih primjena kompozitnih materijala bila je u drevnoj Mezopotamiji oko 3400. godine pr. n. e. kada su se lijepile drvene trake pod različitim kutovima za izradu šperploče. Koncept "kompozitnog" graditeljstva postoji od davnih vremena. Civilizacije diljem svijeta koristile su osnovne materijale iz okoliša u izradi nastambi za stanovanje, uključujući blato/ slamu i drvo/ glinu.[4]

U 12. stoljeću, mongolski ratnici koristili su kompozitne materijale (bambus, svilu, tetive, rogove i borovu smolu) kako bi stvorili lukove u streličarstvu koji su bili moćniji od onih njihovih suparnika: upotrebljavali su tetive životinja na vanjskoj i pločice od rogova na tlačnoj (unutarnjoj) strani luka, a kao jezgru su upotrebljavali bambus. Čvrsto su omotali strukturu svilom i zapečatili je s bijelom smolom. Ispitani su neki od sačuvanih lukova, sada starih više od 900 godina i utvrđeno je da su stari lukovi gotovo jednako čvrsti i kruti kao i moderni, te da su mogli su pogoditi ciljeve daleke čak 490 metara (duljina gotovo pet nogometnih igrališta).[4]

Kasnih 1800-tih, graditelji kanua počeli su eksperimentirati s različitim materijalima za izradu papirnih laminata. Pokušali su lijepiti slojeve tzv. kraft-papira (čvrst, strojni papir načinjen od drvne pulpe) zajedno sa šelakom. Bila je to dobra ideja, ali naposljetku se kompozit raspao jer dostupni materijali nisu imali svojstva koja bi takav proizvod trebao imati. Prve sintetske (umjetne) smole koje su se mogle pretvoriti iz tekućine u krutinu (korištenjem kemijskog procesa polimerizacije) razvijene su između 1870. i 1890. Te polimerne smole transformiraju se iz tekućeg stanja u kruto stanje umrežavanjem makromolekula.[4]

1930-tih započinje nova era u proizvodnji smola, a time i za kompozitnu industriju kao cjelinu. Nezasićene poliesterske smole patentirane su 1936. godine od Carletona Ellisa. Zbog svojih svojstava stvrdnjavanja one su postale primarni izbor za smole u proizvodnji kompozita. Do kasnih tridesetih godina postale su dostupni i drugi sustavi visokih performansi, uključujući epoksidne smole.[4]

Američki kemičar Leo Hendrik Baekeland, rođen u Belgiji, uveo je suvremenu eru kompozita 1907. godine s izradom bakelita, jedne od prvih sintetičkih smola. Smola je bila izuzetno lomljiva, ali Baekeland je ustanovio da ga može omekšati i ojačati kombiniranjem s celulozom. Prva komercijalna uporaba bakelita bila je da 1917. izradom ručice mjenjača za Rolls Royce automobile. Nove i bolje smole proizvedene su tijekom 1920-ih i 1930-ih. Početkom 1930-ih dvije američke kemijske tvrtke, Američki Cyanamid i DuPont, dalje su razvijale polimerne smole. Tijekom njihovog eksperimentiranja, obje tvrtke su po prvi puta formulirale poliestersku smolu.[4]

Kompozitna industrija razvila se tijekom Drugog svjetskog rata, kada je vojska pretraživala materijale za smanjenje mase zrakoplova i plovila, istodobno povećavajući njihovu snagu, izdržljivost, otpornost na vremenske uvjete i korozivne učinke morskog zraka i vode. Do 1945. godine utrošeno je više od 7 milijuna funti na primjenu staklenih vlakana, prvenstveno za vojne primjene. Uskoro su prednosti kompozita sa staklenim vlaknima, osobito otpornost na koroziju postale poznate javnom sektoru. Na primjer, tzv. „stakloplastične“ (kompozit sa staklenim vlaknima) cijevi se prvi put uvode 1948. godine te su one postale jedno od najširih područja uporabe kompozita sa staklenim vlaknima na tržištu korozije i naftne industrije.[4]

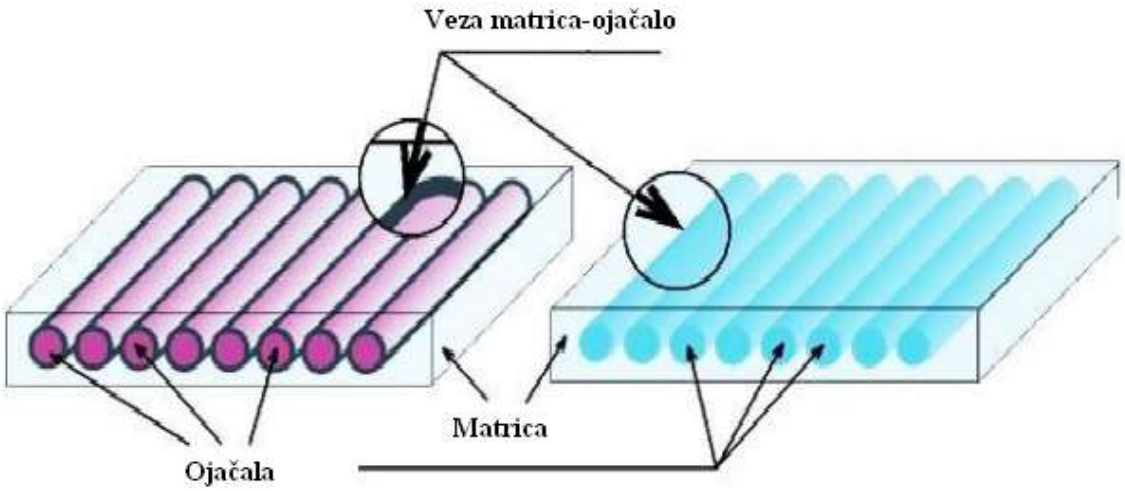
Kompozitna industrija je nastavila s brzim razvojem i nakon rata, 1950-ih: brodovi, kamioni, sportski automobili, spremnici, cijevi, kanali i mnogi drugi proizvodi izrađeni su pomoću kompozita. Godine 1953. proizveden je Chevrolet Corvette s plohama od kompozita sa staklenim vlaknima. Također u ranim pedesetim godinama razvijene su mnoge metode izrade polimernih kompozita, kao što je pultrudiranje.[4]

Korištenje ugljičnih vlakana pomoglo je unaprijediti mnoge primjene u brojnim industrijama, uključujući zrakoplovnu, automobilsku, pomorsku i potrošačku robu. Godine 1966. Stephanie Kwolek, DuPontov kemičarka, izumila je aramidno vlakno koje je dovoljno snažno da se koristi u naprednim kompozitima. Nove i poboljšane smole pomogle su u povećanju potražnje za kompozitima, posebno za upotrebu na višim temperaturama i korozivnim primjenama. Sedamdesetih godina prošlog stoljeća, automobilsko tržište nadmašilo je pomorstvo kao tržište brojnih kompozita - poziciju koju danas zadržava. Tijekom kasnih sedamdesetih i početkom 1980-ih, kompoziti su se prvi put koristili u brojnim infrastrukturnim projektima u Europi i Aziji, uključujući prvi svjetski most na autocesti pomoću kompozitnih armaturnih tetiva, a 1990-ih je napravljen prvi pješački most od kompozita u Aberfeldyju, Škotska. Brojni vlaknima ojačani kompozitni pješački mostovi sagrađeni su u američkim nacionalnim parkovima na udaljenim lokacijama koje nisu dostupne teškoj građevinskoj mehanizaciji.[4]

Industrija kompozita i dalje se razvija. Upotreba vlaknima ojačanih kompozita već je promijenila tržište pomorskog, automobilskog i zrakoplovnog prostora. Postoji ogroman potencijal za kompozitnu primjenu u arhitektonskim i građevinskim segmentima, jer industrija iskorištava fleksibilnost dizajna, čvrstoću, malu masu, otpornost na koroziju i druga svojstva koje nude kompoziti. Razvoj novih vlakana i smola pomoći će stvoriti još više proizvoda od kompozitnih materijala. Ekološki prihvatljive smole i prirodna vlakna omogućit će reciklične kompozite i ekološki prihvatljive proizvode.[4]

## 2.2 Podjela kompozita

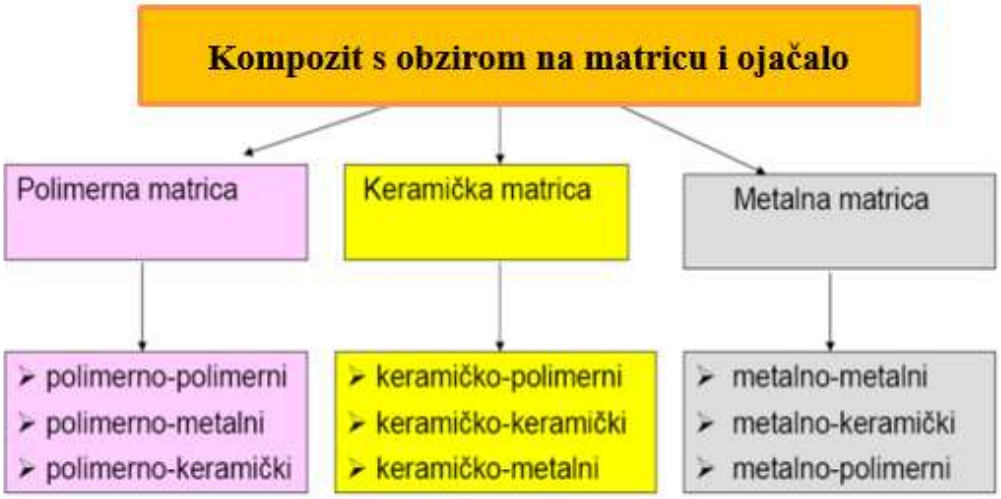
Kompozitni materijali sastoje se od dva osnovna sastojka: matrice i ojačala (slika 2.1)




**Slika 2.1. Struktura kompozita [5]**

Temeljem ove podjele pretpostavlja se da su osnova (matrica) kompozita: metali, keramika, odnosno polimeri, pa tako postoje razne vrste kompozita koji mogu biti spoj: metal-metal, metal-keramika, metal-polimer, keramika-polimer, polimer-polimer, polimer-metal.[6]

Podjela kompozita s obzirom na materijal matrice i ojačala prikazana je slikom 2.2.




**Slika 2.2. Podjela kompozita s obzirom na matricu i ojačala [6]**

## 2.3. Matrica kompozita

Zadaće matrica je da:[7]

• drži ojačala zajedno

• štiti ih od vanjskih utjecaja

• ima važnu funkciju u prijenosu opterećenja na ojačalo

• daje vanjsku formu kompozitu

• određuje njegovo ponašanje s obzirom na djelovanje atmosfere itd.

Općenito, kompozitni materijali mogu se svrstati u tri skupine na temelju materijala matrice, a one su:[8]

- kompoziti s metalnom matricom (MMC)
- kompoziti s keramičkom matricom (CMC)
- kompoziti s polimernim matricom (PMC).

### Kompoziti s metalnom matricom

Kompoziti s metalnom matricom imaju mnoge prednosti u odnosu na monolitne metale poput većeg specifičnog modula, veće specifične čvrstoće, boljih svojstava pri povišenim temperaturama. Zbog svojih svojstava kompoziti s metalnom matricom imaju širok raspon proizvoda u kojima se upotrebljavaju, npr. mlaznica komore za izgaranje (u raketnim sustavima), kućišta, cijevi, kabeli, izmjenjivači topline itd.[8]

### Kompoziti s keramičkom matricom

Jedan od glavnih ciljeva u proizvodnji kompozita s keramičkom matricom jest povećati čvrstoću. Uz to se uporabom keramičke matrice povećava i krutost kompozita.[8]

**Kompoziti s polimernim matricom**

Najčešće korišteni matrični materijali su polimerni, iako su njihova čvrstoća i krutost niže u usporedbi s metalima i keramikom. Te poteškoće su prevladane uporabom ojačala ostalih materijala s polimerima. Druga pogodnost polimerne matrice je ta da obrada polimernih kompozita ne zahtijeva visoki tlak i ne zahtijevaju visoku temperaturu. Također oprema potrebna za proizvodnju polimernih kompozita je jednostavnija. Zbog toga su se kompoziti s polimernom matricom razvili vrlo brzo, te su se počeli i široko primjenjivati.

Kompoziti s polimernom matricom se koriste zato što su ukupna svojstva kompozita superiornija u odnosu na svojstva pojedinačnih komponenata, na primjer polimera / keramike. Kompoziti imaju veći modul elastičnosti nego samo polimerna komponenta i nisu krhki kao sama duromerna matrica.[8]

Danas se najčešće koriste dvije vrste polimernih kompozita s obzirom na vrstu ojačala:

• polimerni kompoziti ojačani vlaknima (FRP)

• polimerni kompoziti ojačani česticama (PRP).

## 2.4. Ojačala

Zadaća ojačala je da budu nosivi element kompozita, tj. da osiguraju:[6]

• visoku čvrstoću

• visoki modul elastičnost – krutost

• otpornost na trošenje.

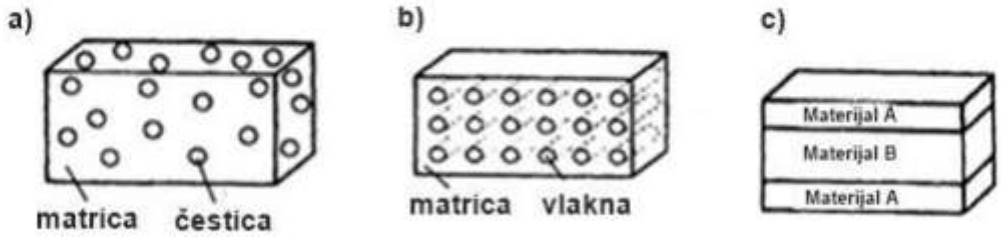
Prema obliku ojačala dijelimo na:

• čestice

• vlakna.

Strukturni kompoziti mogu biti:[6]

- slojeviti kompoziti – laminati
- sendvič konstrukcije.




**Slika 2.3. Podjela kompozita prema obliku ojačala: a) kompozit ojačan česticama, b) kompozit ojačan vlaknima, c) strukturni kompoziti [9]**

- **Čestice**

Kompoziti ojačani česticama sadrže matricu u koju su ugrađena ojačala u obliku diskretnih, jednoliko raspoređenih tvrdih i krhkih čestica. Razlikuju se kompoziti s velikim česticama te kompoziti s disperzijom, tj. ojačani vrlo malim česticama (10 do 250 nm, volumni udio do 15 %), koje povećavaju čvrstoću usporavanjem gibanja dislokacija u materijalu. Primjeri su kompozita ojačanih česticama su: beton (koji se može dodatno ojačati armiranjem), abrazivne paste za poliranje, tvrdi metali, čađom ojačana guma za pneumatike i dr. [3]

- **Vlakna**

Kompoziti ojačani vlaknima sadrže mekšu, duktilnu matricu u koju su ugrađena čvrsta, kruta i krhka vlakna. Djelotvornost ojačanja najveća je upravo u tim kompozitima. Opterećenja se s matrice prenose na vlakna, pa su ona osnovni nosioci opterećenja. Matrica je obično polimerna, metalna ili keramička, a može biti i ugljična. Najčešća je polimerna matrica od nezasićenih poliestera i vinilnih estera, za zahtjevnije primjene i od epoksidnih smola, a ojačava se staklenim (za gradnju trupa plovila), aramidnim (zaštitni neprobojni materijali) ili ugljičnim vlaknima (sportski rekviziti). Kompozit s polimernom matricom ojačan staklenim vlaknima ima u smjeru vlakana vlačnu čvrstoću približno jednaku čeliku, ali je od njega 14 puta lakši. Metalna matrica najčešće je načinjena od slitina aluminija, magnezija, titanija ili bakra ojačanih vlaknima ugljika, bora, aluminijevog oksida ili silicijeva karbida. Kompozit s aluminijskom matricom ojačanom ugljičnim vlaknima rabi se npr. za izradu dijelova motora,

zrakoplova i svemirskih letjelica. Keramička matrica ojačava se keramičkim vlaknima od silicijeva karbida ili silicijeva nitrida. Kompozit se rabi za rezne alate jer je vrlo otporan prema širenju pukotina. Ugljična matrica ojačava se ugljičnim vlaknima kod kompozita nazvanog ugljik-ugljik. Taj materijal je velike čvrstoće i na visokim temperaturama i nalazi primjenu u raketnim motorima i toplinskim turbinama. Hibridnim kompozitima nazivaju se oni kojima se jedinstvena matrica ojačava s više vrsta vlakana.[3]

- **Strukturni kompoziti**

U strukturne kompozite ubrajaju se laminati i složene kompozitne konstrukcije. Laminati su plošni slojeviti proizvodi od različitih materijala, npr. furnirske ploče ili šperploče, te kompoziti u kojima se vlakna u polimernoj matrici nalaze u slojevima. Različitom orijentacijom pojedinih slojeva mogu se smanjiti nedostaci linearne orijentiranosti kompozita ojačanih vlaknima. Složene kompozitne konstrukcije (tzv. sendvič-konstrukcije) sastoje se od tankih vanjskih slojeva između kojih se nalazi neki laki materijal u obliku pčelinjega saća (primjena u građi zrakoplova), pjene, nepravilnih vrpca ili listova (npr. valoviti karton) i sl.[10]

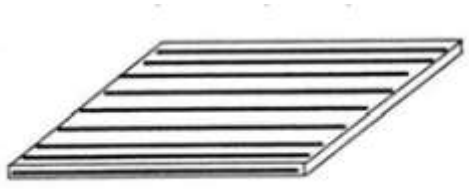
### *2.4.1. Vlakna kao ojačalo u polimernim kompozitima*

Vlakna nose opterećenje, zbog visoke čvrstoće mogu zaustaviti širenje pukotine i u mikropodručju, dok se sama vlakna ne mogu primijeniti jer bi se brzo oštetila.[7]

Kompozitni materijali ojačani vlaknima se razlikuju i po duljini vlakana koja se upotrebljavaju. Prema tome kompozite možemo podijeliti na kompozite ojačane kontinuiranim vlaknima (u ovu skupinu pripadaju duga vlakna), te ojačane diskontinuiranim vlaknima (u ovu skupinu pripadaju kratka vlakna). Diskontinuirana vlakna mogu biti slobodna ili usmjerena, dok kontinuirana vlakna mogu biti jednosmjernog ili dvosmjernog ojačanja.

**Kontinuirana vlakna (duga vlakna)**

- jednosmjerno ojačanje



**Slika 2.4. Primjer jednosmjernog ojačanja dugim vlaknima [37]**

- dvosmjerno ojačanje.



**Slika 2.5. Primjer dvosmjernog ojačanja dugim vlaknima [37]**

**Diskontinuirana vlakna (kratka vlakna)**

- usmjerena



**Slika 2.6. Primjer usmjerenog ojačanja kratim vlaknima [37]**

- slobodna.



**Slika 2.7. Primjer slobodnog ojačanja kratim vlaknima [37]**

Na osnovi promjera i svojstava vlakna su svrstana u tri skupine:[7]

• viskeri

• vlakna

• žice.

- **Viskeri**
  - Viskeri su monokristalna vlakna s vrlo malo nepravilnosti u građi kristalne rešetke. Proizvode se s dimenzijama promjera od 0,1 μm do 5 μm i duljine približno 5 mm. Moguće je pronaći viskere vrlo različitih oblika i dimenzija. Kada govorimo o iskorištenju izuzetnih mehaničkih svojstava viskera, kao jednu od osnovnih zapreka valja istaknuti činjenicu da je njihova cijena zbog skupih postupaka proizvodnje vrlo visoka.
  - Stoga se razvoj materijala ojačanih viskerima usmjerava za sada samo na primjenu u ekstremnim uvjetima (npr. u svemirskoj i vojnoj tehnologiji). U Tablica 1. su prikazana karakteristična svojstva nekih viskera.[11]

**Tablica 1. Svojstva viskera [11]**

| Pregled svojstava nekih viskera | | | |
|---|---|---|---|
| Materijal | Gustoća ($kg/m^3$) | Vlačna čvrstoća (MPa) | Modul elastičnosti (GPa) |
| $Al_2O_3$ (aluminij-oksid) | 4000 | 10000 – 20000 | 700 – 1500 |
| C (ugljik) | 2200 | 20700 | 700 |
| SiC (silicij-karbid) | 3200 | 20000 | 480 |
| $Si_3N_4$ (silicij-nitrid) | 3200 | 5000 – 7000 | 350 – 380 |

  - Prednost viskerima ojačanih polimernih materijala jest i njihova standardizirana industrijska proizvodnja te mogućnost brze montaže na mjestu gradnje bez potrebe za teškom mehanizacijom. Sve to umanjuje visoke troškove radne snage i smanjuje vrijeme ometanja ili obustave prometa prilikom popravaka već postojećih konstrukcija.[11]

- **Žice**
  - Metalne niti se obično nazivaju žice. U pogledu njihove proizvodnje valja napomenuti da se uobičajenim vučenjem teško mogu dobiti žice promjera 150 μm i manje, tj. žice su većeg promjera od niti. Zbog neusmjerenih metalnih veza žice imaju nešto nižu vlačnu čvrstoću (maks. 2900 MPa) od niti (maks. 4800 MPa) i viskera (maks. 25000 MPa), ali se ona može znatno povisiti povišenjem gustoće nepravilnosti kristalne rešetke (npr. hladnim vučenjem). Može se zaključiti da su zbog navedenih karakteristika žice od čistih metala manje pogodne za kompozite izuzev nekih iznimaka, npr. za ojačanje visokooptorećenih pneumatika vozila.[11]
  - Ograničenja navedena u vezi s viskerima i žicama mogu se većim dijelom zaobići ako se visokomodulni i visokočvrsti nemetalni anorganski materijali proizvode i primjenjuju kao niti ili kratka vlakna. Niti se definiraju kao beskonačno duga vlakna.[11]

- **Vlakna**
  - Kod vlakana beskonačne duljine vlaknasti se materijali isporučuju ne samo pojedinačno u obliku niti već i u obliku višenitnih potpuno sintetičkih vlakana (engl. *multifil*) ili višenitnih vlakana s oblogom (engl. *garn*) ili u obliku tkanine od višenitnih strukova (engl. *roving*). Roving je redovito pleteni snop vlakana s 1000 – 10000 pojedinačnih vlakana u snopu.[11]

**Neke od najraširenijih vrsta vlakana su**:[11,7]

a) staklena vlakna (vrste staklenih vlakana A, E i S-stakla)

b) ugljična (kolokvijalno poznata i kao „*karbonska*“) vlakna (ugljik; HM-visoki modul elastičnosti, HST- visoke čvrstoće i istezljivosti)

c) aramidna vlakna (aramid; HM-visoki modul elastičnosti, LM-niski visoki modul elastičnosti)

d) prirodna vlakna.

a) Staklena se vlakna proizvode najčešće od silicijevog dioksida $SiO_2$ različitim postupcima i u pravilu imaju lošija mehanička svojstva od ugljičnih vlakana. No staklena vlakna su vrlo raširena u primjeni kod mehanički manje zahtjevnih konstrukcija zbog njihove manje cijene. Mogu se znatno razlikovati po svojstvima te se stoga označavaju kao A-staklo (ovakva su bila prva proizvedena vlakna, a danas se vrlo rijetko koriste), C-staklo (koriste se zbog poboljšane otpornosti na kiseline i lužine), E-staklo (najčešće korišteno, poboljšana otpornost na vlagu i blaže kemikalije), S-staklo (povećane čvrstoće i modula elastičnosti, koriste se kod mehanički opterećenijih konstrukcija gdje su potrebni visoka specifična krutost i čvrstoća). Primjer tkanine ili rovinga od staklenih vlakana prikazan je slikom 2.8.[12]



**Slika 2.8. Primjer rovinga od staklenih vlakana [13]**

b) Danas su zasigurno ugljična vlakna najrasprostranjenija, posebice kod mehanički najopterećenijih zrakoplovnih konstrukcija. Prva ugljična vlakna bila su napravljena iz celuloznih vlakana (engl. *rayon*) kao prekursora, no postupak je ubrzo izbačen zbog malog postotka ugljika koji se na taj način dobivao, kao i lošijih mehaničkih svojstava. Većina ugljičnih vlakana koja se danas koriste u zrakoplovnim i drugim konstrukcijama su napravljena iz vlakana poliakrilonitrila (PAN) ili iz različitih smola (engl. *pitch-based*) procesom karbonizacije, pri čemu se postupci proizvodnje mogu značajno razlikovati. PAN postupkom se proizvode vlakna s udjelom ugljika do 50 % dok se vlakna iz smole odlikuju udjelom ugljika do 80 %. Prema osnovnim

mehaničkim svojstvima, ugljična se vlakna klasificiraju kao: HM (visokog modula elastičnosti prema engl. *high modulus*), HS (visoke čvrstoće prema engl. *high strength*) i IM (umjerenog modula elastičnosti prema engl. *intermediate modulus*). Ponekad se koristi i oznaka UHM (vrlo visoki modul elastičnosti prema engl. *ultra high modulus*). Vlakna dobivena iz smole općenito imaju veći modul elastičnosti, ali i manju tlačnu i vlačnu čvrstoću u odnosu na PAN-vlakna. Ova su vlakna i znatno više porozna, što dodatno utječe na njihovu čvrstoću. Vlakna od smole mogu imati i dobru električnu vodljivost, prosječnog su promjera 10-11 μm, za razliku od PAN-vlakana koja su promjera 5-10 μm. U poprečnom presjeku, ugljična vlakna mogu imati radijalni oblik (bazalne ravnine su radijalno usmjerene), oblik koncentričnih slojeva (bazalne ravnine koncentrične), transverzalno izotropni ili jezgru i vanjsku ljusku (najčešći oblik, karakterističan za PAN-vlakna).[12]



**Slika 2.9. Primjer rovinga od ugljičnih vlakana [13]**

c) Aramidna vlakna su vlakna građena od sintetskih linearnih makromolekula, koje su sastavljene od aromatskih skupina povezanih amidnim ili imidnim vezama, od kojih je najmanje 85 % neposredno vezano na dva aromatska prstena. Ako su prisutne i imidne veze, njihov broj ne prelazi broj amidnih veza. Aramidna vlakna nemaju najveće module elastičnosti ni najvišu vlačnu čvrstoću, međutim odlikuje ih optimalan omjer mehaničkih i kemijskih svojstava. Gustoća većine aramidnih vlakana pri normalnim uvjetima okoline

iznosi od 1,43 do 1,47 g/cm$^3$. U usporedbi s gustoćom PA (1,14 g/cm$^3$), ugljika (1,8 g/cm$^3$), stakla (2,55 g/cm$^3$) ili čelika (7,9 g/cm$^3$), vidljivo je da je aramid zanemarivo više gustoće od PA, nešto niže od ugljika i mnogo niže gustoće od stakla i čelika, dok su mu ostala fizikalna svojstva izvrsna. Apsorpcija vode jedan je od najčešće spominjanih nedostataka aramida i aramidnih vlakana. Ovisno o uvjetima okoline, aramidna vlakna mogu upijanjem vode povećati masu i za 7 %. Otpornost puzanju kritičan je zahtjev za vlakna koja se koriste kao ojačala kompozitnih tvorevina. Zbog visokog udjela kristalaste strukture i anizotropnih svojstava aramidna vlakna pokazuju visoku otpornost puzanju. Međutim pri izrazito visokim opterećenjima, povišenoj temperaturi i u slučajevima kada su vlakna natopljena vlagom dolazi do određenog puzanja.[14]



**Slika 2.10. Primjer aramidnog rovinga [13]**

U tablici 2. su prikaza svojstva za svako od vlakana koja su bila prethodno opisana; staklena, ugljična i aramidna vlakna. Tablica 2. nam daje tipične vrijednosti mehaničkih svojstava za svaku vrstu vlakana.

**Tablica 2. Svojstva staklenih, aramidnih i ugljičnih vlakana [13]**

| Tip vlakna | Gustoća [g/cm$^3$] | Youngov modul elastičnosti, $E$ [GPa] | Vlačna čvrstoća $R_m$ [MPa] | Istezljivost, $A$ [%] |
|---|---|---|---|---|
| E - staklena | 2,60 | 72 | 1,72 | 2,40 |
| S – staklena | 2,50 | 87 | 2,53 | 2,90 |
| Aramidna (Kevlar 29) | 1,44 | 100 | 2,27 | 2,80 |
| Aramidna (Kevlar 49) | 1,44 | 124 | 2,27 | 1,80 |
| Ugljična HS | 1,80 | 230 | 2,48 | 11,00 |
| Ugljična HM | 1,90 | 370 | 1,79 | 0,50 |

## 2.4. Prednosti i nedostaci kompozitnih materijala

Prednosti kompozitnih materijala:[6]

- mogućnost izrade vrlo složenih oblika
- smanjenje troškova naknadne obrade dijelova
- mogućnost spajanja dijelova tijekom samog postupka proizvodnje
- dimenzijska stabilnost pri ekstremnim radnim uvjetima
- otpornost na koroziju.

Nedostaci kompozitnih materijala:[6]

- popravak kompozitnih proizvoda je kompliciraniji nego kod metala
- nije nužno da su kompoziti superiorniji metalima u svim svojstvima
- konstrukcijski problemi (spajanje kompozitnih dijelova, izrada provrta i sl.)
- međuslojna naprezanja i mogući lom, anizotropna svojstva materijala i sl.

# 3. PRIRODNA VLAKNA KAO OJAČALO U POLIMERNIM KOMPOZITIMA

Prirodna vlakna već duže vrijeme privlače pažnju istraživača, te postaju predmet interesa u vidu uporabe u polimernim kompozitima zbog njihovog ekološkog aspekta, tj. zbog ekološke održivosti i obnovljivosti tih sirovina. U nastavku će biti prikazan niz prednosti, ali i nedostataka koje prirodna vlakna posjeduju. Uporaba prirodnih vlakana u polimernim kompozitima nalazi svoju primjenu jer njihove prednosti prevladavaju nedostatke.[6] Daljnjim istraživanjima i razvojem novih proizvodnih postupaka i prerade vlakana polimerni kompoziti zauzimaju bitno mjestu gotovo u svim granama industrije današnjice što će biti prikazano u nastavku.

## 3.1. Podjela prirodnih vlakana

Prirodna vlakna proizvod su prirodnih procesa žive (biljni i životinjski svijet) i nežive prirode (minerali). U prirodi se nalaze u obliku u kojem se mogu izravno upotrijebiti kao tekstilna sirovina (npr. pamuk, vuna) ili u takvu stanju da je njihova uporaba moguća nakon fizikalno-mehaničkih zahvata (npr. lan, juta, svila). Tri su glavne skupine prirodnih vlakana: biljna vlakna građena od celuloze, životinjska vlakna građena od bjelančevina, te mineralna vlakna silikatnog minerala krizotila, poznatijeg kao bijeli azbest. Biljna vlakna mogu izrastati iz sjemenki (npr. pamuk), mogu biti sastavni dio kore stabljike (npr. lan, kudjelja, juta, ramija), plodova (npr. kokos) ili lišća (npr. agava). Životinjska su vlakna dlačni pokrivač (runo) nekih životinja (npr. ovca, koza, kunić, deva, ljama, alpaka i dr.) ili ih proizvode gusjenice svilenih prelaca pri začahurivanju i tvorbi kukuljice u fazi pripreme za preobrazbu u leptira. U prirodi ima više vrsta svilenih prelaca (svilaca), a najvažniji je dudov svilac, koji proizvodi najkvalitetniju svilu. Vlakna drugih svilenih prelaca nazivaju se tusah, eria, anafe i dr., ovisno o vrsti svilenoga prelca. Jedini predstavnik prirodnih mineralnih vlakana je azbest.[15]

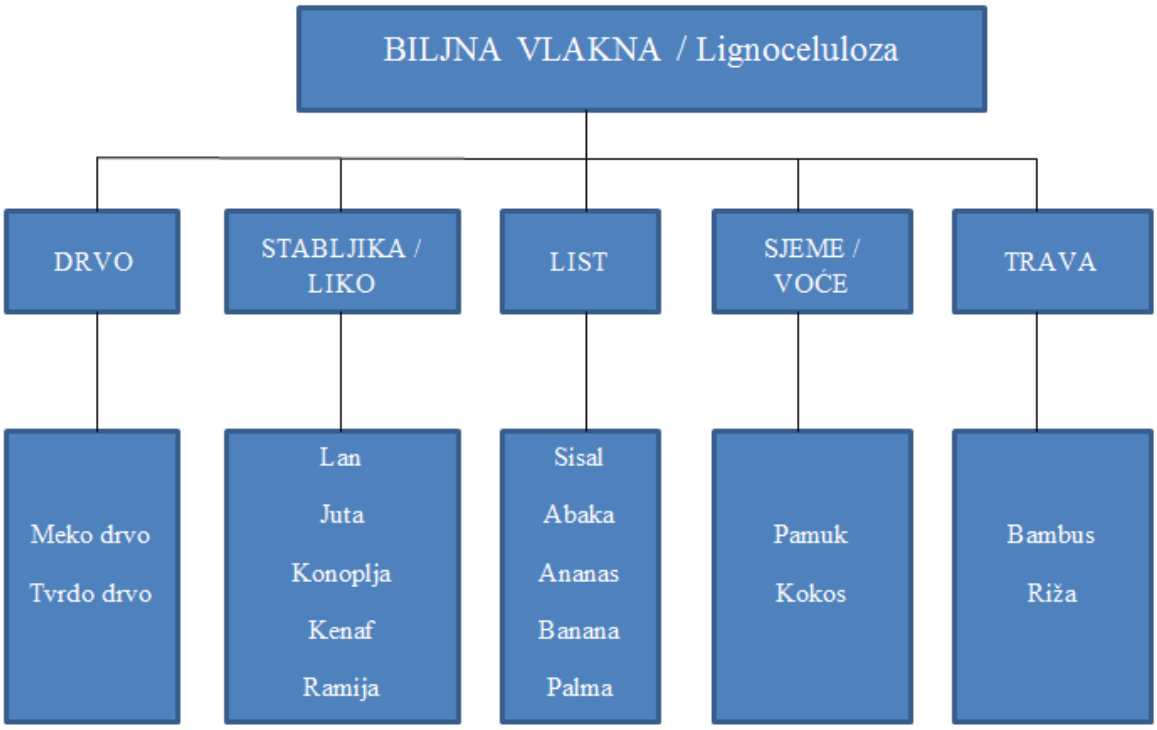
Prirodna vlakna se dijele na vlakna biljnog i životinjskog podrijetla, a detaljna podjela obje skupine prikazana je slikama 3.1. i 3.2.[7]

Vlakna biljnog podrijetla:[7]

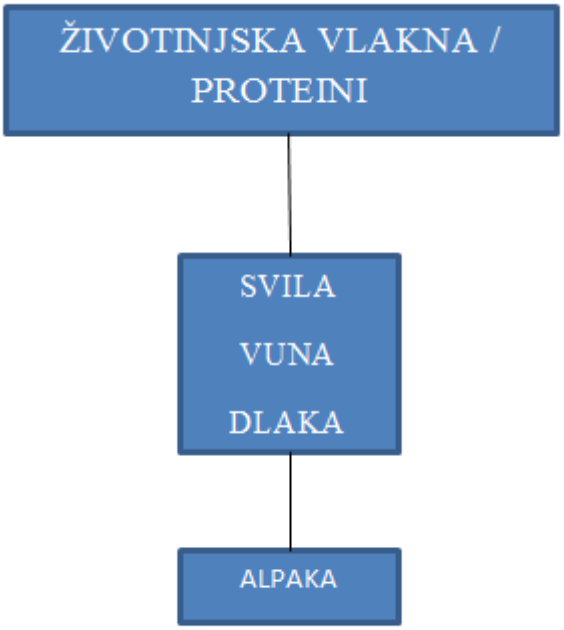
- vlakna (drva, trave, slame itd.)
- lišće
- sjeme
- voće
- liko.

Vlakna životinjskog podrijetla:[7]

- vuna
- dlaka
- svila.




**Slika 3.1. Podjela biljnih prirodnih vlakana [7]**

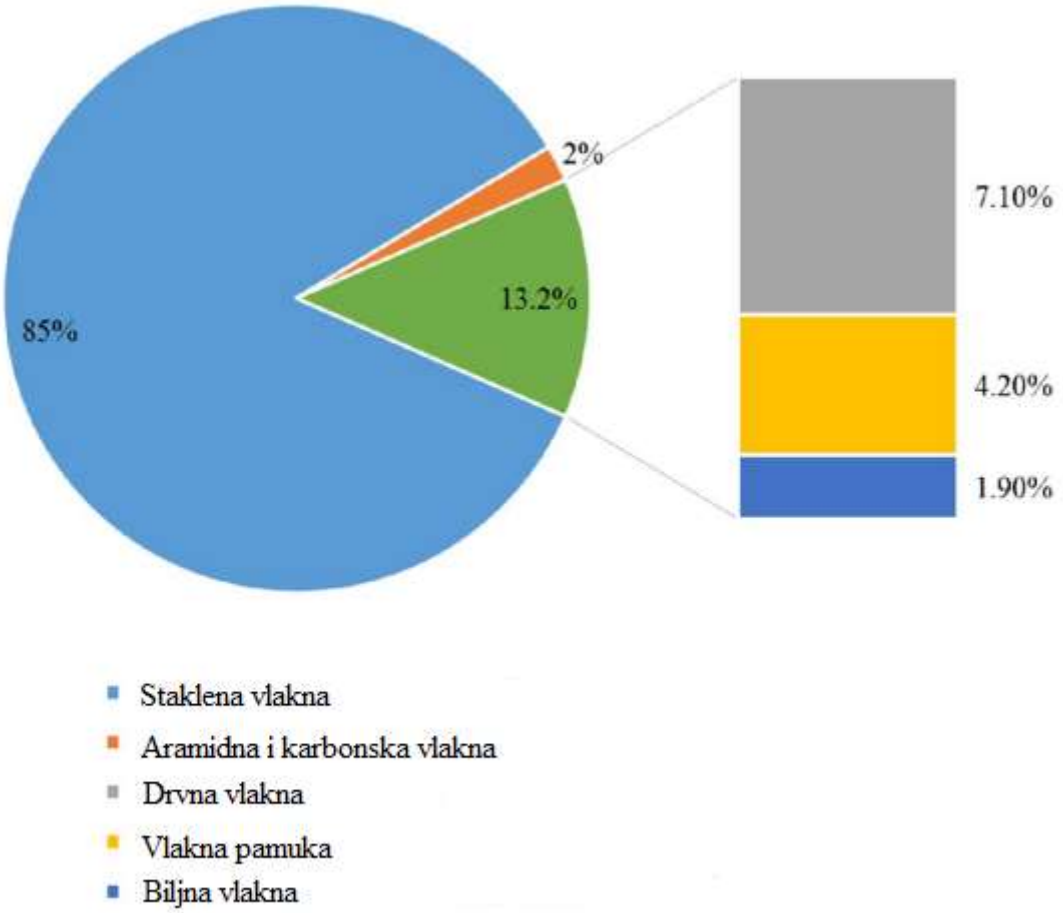



**Slika 3.2. Podjela životinjskih prirodnih vlakana [7]**

### 3.2. Prirodna vlakna kao zamjena sintetskim

Da bi se riješili izazovi o održivosti uporabe konvencionalnih vlakana u polimernim kompozitima potrebno je postupno prijeći se na obnovljive sirovine iz kojih će se dobivati prirodna vlakna. Dakle, koncept održivosti predstavljaju biljna vlakna kao obnovljiva alternativa tradicionalnim ojačalima, npr. staklenim vlaknima. Biljna vlakna također pomažu u zaobilaženju problema zbrinjavanja otpadnih staklenih vlakana. Biljna vlakna su zapaljiva i energija oslobođena pri izgaranju može se iskoristiti.[16]

Trenutno, konvencionalna vlakna, prvenstveno staklena vlakna, i dalje dominiraju svjetskim tržištem vlaknima ojačanih kompozita: ona predstavljaju 85 % od ukupno 2,4 milijuna tona od ukupno proizvedenih količina. Biljna vlakna (ne drvo i ne pamuk) obuhvaćaju samo 1,9 % (45000 tona) svjetskog tržišta (slika 3.3.).[16]




**Slika 3.3. Udio različite vrste vlakana u polimernim kompozitima na svjetskom tržištu 2010. [16]**

Međutim, biljna vlakna u polimernim kompozitima se počinju sve više upotrebljavati. Tijekom posljednjeg desetljeća korištenje biljnih vlakna u kompozitnim materijalima utrostručilo se. Predviđanjem tržišta polimera ojačanih prirodnim vlaknima, predviđa se da će uporaba takvih kompozita iznositi 830.000 tona do 2020. godine, što predstavlja 28 % očekivanih proizvedenih količina kompozita u to vrijeme[16].

### 3.3 Prednosti prirodnih vlakana

Pored obnovljivosti koja svakako predstavlja jednu od ključnih prednosti prirodnih vlakana, ona posjeduju i niz drugih prednosti bez kojih se ne bi prirodna vlakna nametnula kao adekvatna zamjena konvencionalnim ojačalima u polimernim kompozitima. Dane prednosti su ujedno i glavni čimbenici koji utječu na razvoj prirodnih vlakana kao ojačala.

Prednosti prirodnih vlakana kao ojačala:[6, 16]

- niža gustoća biljnih vlakana (~ 1,5 g/cm$^3$) u usporedbi sa staklenim vlaknima (~ 2,5 g/cm$^3$) osigurava visoku specifičnu čvrstoću i krutost u usporedbi sa staklenim vlaknima
- biljna vlakna omogućuju proizvodnju laganih konstrukcija i naknadno utječu na smanjenje potrošnje goriva u vozilu
- obnovljivi izvor sirovina
- laka dostupnost
- niska cijena i mali utrošak energije tijekom proizvodnje
- sigurnija za rukovanje i proizvodnju u odnosu prema sintetskim vlaknima
- ušteda zbog manjeg trošenja opreme jer su prirodna vlakna neabrazivna u odnosu prema sintetskim vlaknima
- visoka električna provodnost i dobra zvučna izolacija.

### 3.4 Nedostatci prirodnih vlakana

Paralelno s prednostima koje prirodna vlakna posjeduju, upotrebom u kompozitima imaju i nedostatke s obzirom na njihovu izvedbu, njihovo ponašanje u polimernim matricama i njihovu obradu. Kao prvo, prirodna vlakna nemaju sposobnost osigurati kontinuirana fizikalna svojstava kroz niz godina; svojstva vlakana mogu razlikovati od svake sezone žetve ili iz regije žetve na temelju vremenskih uvjete sunca, kiše i tla. Osim toga, ove se razlike mogu iznenađujuće primijetiti i u istoj kultiviranoj populaciji između usjeva. Preciznije, njihova svojstva bitno ovise o lokalitetu, od dijela biljke iz koje se dobivaju (list ili stabljika), zrelosti biljke i načinu na koji se vlakna obrađuju. Svi ovi čimbenici rezultiraju značajnim

razlikama u svojstvima u usporedbi s njihovim sintetičkim vlaknima. Štoviše, važni su parametri tipa zemljišta na kojem raste biljka, količini vode koju biljka prima tijekom rasta, vrijeme žetve, a što je najvažnije vrsti prerade i proizvodnje. Što se tiče varijabilnosti svojstava vlakana kroz sezone, jedno od rješenja je da se miješaju serije vlakana iz različitih žetvi.[17]

Drugi glavni negativni problem prirodnih vlakana je njihova slaba kompatibilnost s nekoliko polimernih matrica. To može rezultirati nejednolikom disperzijom vlakana unutar matrice. Njihova visoka osjetljivost na vlagu dovodi do smanjenja mehaničkih svojstava. Nadalje, niska mikrobna otpornost i osjetljivost na truljenje može djelovati kao ograničavajući faktor, osobito tijekom isporuke i dugotrajne pohrane, kao i tijekom obrade.[17]

Upotrebom prirodnih vlakana može doći do slabog prianjanja između polimera i vlakana. Kako bi se poboljšao afinitet i adhezija između ojačala i polimernih matrica moraju se upotrijebiti kemijska sredstva. Kemijska sredstva za spajanje su tvari koja se koriste u malim količinama za obradu površine kako bi se ojačala veza između obrađene površine i drugih površina. Primarni nedostatak upotrebe prirodnih vlakana je niska temperatura obrade (ograničena toplinska stabilnost). Dopuštena temperatura je do 200 °C, iznad ove granice vlakna počinju degradirati i smanjuju im se mehanička svojstva što naknadno rezultira kompozitom lošijih mehaničkih svojstava. Općenito, kada su vlakna podvrgnuta toplini, fizikalne i/ili kemijske promjene koje se javljaju su depolimerizacija, hidroliza, oksidacija, dehidratacija, dekarboksilacija i rekristalizacija, a time se ograničava uporaba različitih smola koje se mogu pomiješati s vlaknima. Kako bi se izbjegao ovaj problem, raspon temperatura mora biti ograničen, kao i vrijeme obrade.[17]

### 3.5. Primjena prirodnih vlakana

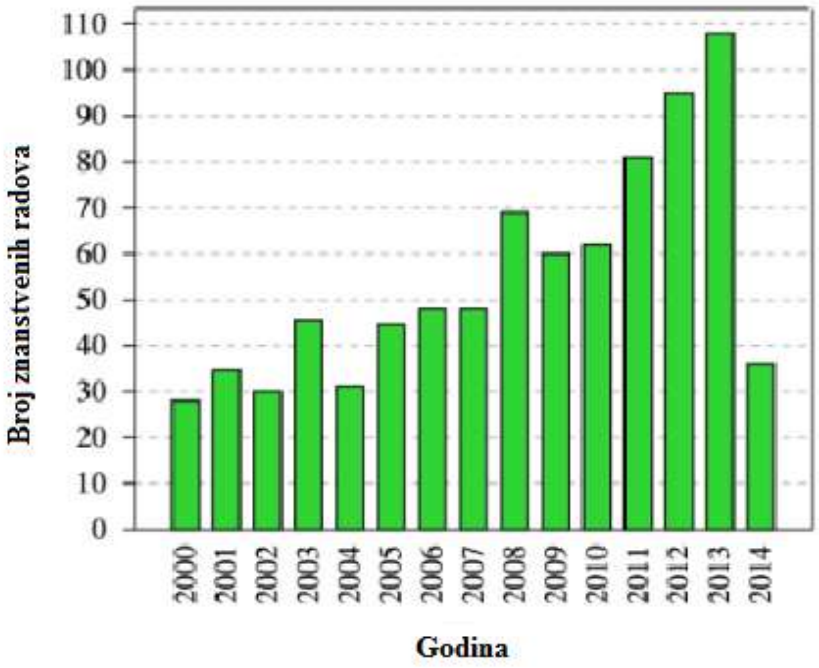
Prirodna vlakna kao ojačalo u polimernim kompozitima vrlo brzo postaju zamjena za metal ili keramiku u industrijama koje uključuju i automobilsku, zrakoplovnu, pomorsku, sportsku i elektroničku industriju .Njihova pojedinačna svojstva trebala bi biti čvrsta baza za generiranje novih proizvoda. Eksploatacija kompozita ojačanih prirodnim vlaknima u raznim primjenama otvorila je nove putove industriji za proizvodnju održivog modula za buduću primjenu ekoloških kompozita. U Sjedinjenim Državama kompozitni građevni materijali izrađuje se od slame. Upotrebljavaju se bale od slame za izgradnja zgrada. Mnoge automobilske komponente su već proizvedene prirodnim vlaknima ojačanim kompozitima, uglavnom na osnovi poliestera ili polipropilena i vlakana poput lana, konoplje ili sisala. Uporaba prirodnih vlakana u kompozitnim materijalima uglavnom je vođena cijenom materijala, smanjenjem težine i marketinga umjesto tehničkih performansi. Njemačka je lider u korištenju kompozita ojačanih prirodnim vlaknima. Njemački automobilski proizvođači; Mercedes, BMW, Audi i Volkswagen su preuzeli inicijativu za uvođenje prirodnih vlakana u kompozitne materijale za unutrašnje i vanjske dijelove. Prvi komercijalni primjer je unutarnja ploča vrata iz 1999. godine na Mercedes-Benzu, proizvedenom u Njemačkoj, od 35 % (PUR) elastomera i iz 65% mješavine lanenog, konopljinog i sisal vlakna. Treba naglasiti da se uglavnom na luksuznim proizvođačima automobila može vidjeti da se prirodni vlaknasti kompoziti koriste zbog ekološke svijesti, a ne zbog niskih troškova. Mercedes - Benz je koristio epoksidnu matricu s dodatkom juta na pločama vrata u svojoj E-klase 1996. godine.[18]

Druga paradigma primjene prirodnih vlakana u polimernim kompozitima pojavila se komercijalno u 2000. godini, kada je Audi lansirao i automobil A2 čija su vrata izgrađena panelima od poliuretana pojačanog miješanjem lana i sisal vlakana. Toyota je razvila eko kompozit izrađen od šećerne trske i upotrijebit će ga za interijere u svojim automobilima. Nadalje, iako je automobilska industrija začetnik u proizvodnji polimernih kompozita ojačanih prirodnim vlaknima, oni se počinju na velika vrata primjenjivati i u drugim industrijama u kojima daju široku paletu proizvoda, što pokazuje Tablica 3.[18]

**Tablica 3. Primjena polimernih kompozita ojačanih različitim prirodnim vlaknima [18]**

| TIP VLAKNA | PRIMJENA |
|---|---|
| Palmina vlakna | Građevni materijali kao što su prozori, okviri za vrata, izolacijski sustavi panela, ograde, krovovi, podovi i ostali građevni materijali. |
| Drvena vlakna | Okvir prozora, paneli, zatvarači vrata, ograde. |
| Konopljina vlakna | Građevinski proizvodi, tekstil, konopci, papir i ambalaža, namještaj, električni proizvodi, proizvodnja novčanica i proizvodnja cijevi. |
| Laneno vlakno | Okvir prozora, ploče,ograde, teniski reketi, okviri za bicikle, vilice, sjedište sjedala, snowboarding i laptopi. |
| Rižina vlakna | Građevni materijali kao što su građevinski paneli, cigla, okvir prozora, paneli, ograde. |
| Sisal vlakna | U građevinskoj industriji kao što su paneli, vrata, zatvarači i krovni limovi. Također, proizvodnja papira i celuloze. |
| Kenaf vlakna | Materijal za pakiranje, kutija za mobitel, vrećice, izolacije, materijali za odjeću i materijal koji apsorbira ulje i tekućine. |
| Pamučna vlakna | Materijali za industriju namještaja, tekstil i pređa i žičana roba. |
| Juta vlakna | Građevni paneli, krovni limovi, okviri za vrata, vrata, transport, ambalaža. |

Veliki doprinos širokoj primjeni prirodnih ojačala u polimernim kompozitima dala je i akademska zajednica, naročito u zadnjih nekoliko godina. U prilog tome govori broj znanstvenih radova koji su objavljeni od 2000. do 2014. godine, čiji je tijek prikazan dijagramom na slici 3.4. Velik broj znanstvenih radova na ovu temu pokazuje koliki je interes na ovome području, te da je samo daljnjim zalaganjem znanosti moguće unaprijediti proizvodnju polimernih kompozita ojačanih prirodnim vlaknima i na taj način umanjiti nedostatke prirodnih materijala, što će u konačnici omogućiti širu primjenu ovakvih materijala.[19] Na tome tragu i ovaj rad će dati svoj doprinos uporabi lana kao prirodnog ojačala.




**Slika 3.4. Prikaz broja znanstvenih radova u razdoblju od 2000. - 2014. godine na temu prirodnih vlakana kao ojačala u polimernim kompozitima [19]**

# 4. LAN KAO OJAČALO U POLIMERNIM KOMPOZITIMA

Lan je biljka koja se najčešće rabi za dobivanje prirodnih vlakana. Lan je također jedna od prvih biljaka koja se počela primjenjivati još od samih početaka civilizacije. Ova se kultura uzgaja preko 5000 godina u umjerenim i tropskim područjima, upotrebljavajući se u mnogobrojne svrhe. Tako su stari Egipćani od lanenog vlakna proizvodili posebne omotače u kojima su mumificirali svoje vladare, te se lan koristio za odjeću, za jedra, za ribarske mreže, za zavoj, za konac i užad, za laneno vlakno i plahte, za vreće, torbe i novčanike.[39,20] Danas se lan uzgaja za eksploataciju prirodnih vlakana i sjemena lana za proizvodnju visokokvalitetnog ulja. Kanada je najveći proizvođač i izvoznik lana u svijetu od 1994. godine. U 2005./2006., u Kanadi je proizvedeno oko 1,035 milijuna tona, a trenutno isporučuje 60 % svojih lanenih proizvoda izvozom u Europsku uniju, 30 % u SAD-e, a 4 % u Japan. Ostali vodeći proizvođači lana su Francuska, Belgija i Nizozemska, s gotovo 748.10 $km^2$ godišnje. U 2007. godini u Europskoj uniji proizvedeno je 122 000 tona lanenih vlakana. Lan je važan usjev i na našim prostorima, a jedan takav možemo vidjeti na slici 4.1.[20]



**Slika 4.1. Lan na poljima općine Bosanski Petrovac, BiH [21]**

### 4.1. Dobivanje vlakana lana

Lan se prilagođuje klimatskim uvjetima i tlu pa se može uzgajati u sjevernim krajevima. Podneblje jako utječe na kvalitetu lanenog vlakna. Lan je naročito osjetljiv na vlagu i važno je da je ona ravnomjerno raspoređena tijekom cijele vegetacije. Zbog toga najbolji lan potječe iz brdskih područja s vlažnom klimom.[23] Zbog svoje prilagodljivosti tlu lan pripada među najčešća komercijalna prirodna vlakna u svijetu, a njihova svjetska proizvodnja je prikazana u Tablica 4.[18]

**Tablica 4. Prirodna vlakna i njihova svjetska proizvodnja u tonama[18]**

| **Prirodna vlakna** | **Svjetska proizvodnja u svijetu ($10^3$ tona)** |
|---|---|
| Bambus | 30.000 |
| Šećerna trska | 75.000 |
| Juta | 2300 |
| Kenaf | 970 |
| Lan | 830 |
| Sisal | 375 |
| Konoplja | 214 |
| Kokos | 100 |

Sjetva lana ovisi o mjestu i vremenskim prilikama. Ozimi lan se sije u rujnu ili listopadu, a jari u ožujku i travnju. Prva faza zrenja počinje cvjetanjem lana koncem lipnja i početkom srpnja. Cvjetovi su plave boje. Zrenje završava kada stabljike počnu žutjeti. Najbolje vrijeme za žetvu je kada požuti donja trećina stabljike.[23]

Ozimi lan se žanje u lipnju, a jari u srpnju ili početkom kolovoza. Ako se čupa ručno, onda biljke moraju ostati polegnute jedan dan da se ukrute i zatim se ostavljaju na suncu i zraku da se osuše. Kada je sušenje dovršeno, stabljika se odvozi u tvornicu na preradu. Lan se može čupati i posebnim strojevima koji ga i baliraju te se tako u rolbalama odvozi u tvornicu na

preradu. Sjeme se mora sušiti na ispod 10 % vlage. U suvremenoj preradi vlakna se odvajaju strojno nakon natapanja stabljika u zagrijanoj vodi tijekom 5 dana.[24]

Danas je proizvodnja i preradba lana u svijetu visoko mehanizirana i industrijalizirana i u njoj se koriste svi dijelovi biljke. Vlakno se dobiva iz stabljika koje se čupaju u tzv. žuto-zelenoj zrelosti. Čupanje se obavlja specijaliziranim strojevima – čupaćima, koji istodobno odvajaju tobolce od stabljike. Vlakanca se izdvajaju iz lïka, kore stabljike, maceracijom (močenjem) u vodi i mehaničkom obradbom. U suvremenom postupku preradbe lana, maceracija se obavlja u bazenima s toplom vodom, u koje se dodaju enzimi (čiste kulture pektinotvornih bakterija).[20] Tijek močenja se može podijeliti u tri faze: [23]

- početna fizikalna
- početna biološka
- završna biološka.
-

Nakon močenja, ispiranja i sušenja drvenasti se dijelovi izlome na rebrastim valjcima, a potom se od vlakna odvoje izlomljene čestice (tzv. pozder). Proizvod koji tako nastaje naziva se povjesmo. Grebenanjem povjesma otpadne kučina, koja se sastoji od kratkih, međusobno isprepletenih vlakana i drvenastih čestica. Kratko vlakno (kučina) koristi se za izradbu konopa, za pakiranje, brtvljenje, te u građevinarstvu. Od kratko rezanih prirodnih vlakana odvojenih od drvenastih dijelova stabljike proizvode se role ili ploče za izolaciju krovova, potkrovlja i pregradnih zidova montažnih kuća. Lanena se vlakna upotrebljavaju i u proizvodnji polimernih kompozita i u tom smjeru će se vlakna lana proučavati u nastavku ovoga rada.[20]

Lan se može svrstati u tri klase:[23]

1. dugovlaknasti lan finoće do 25 tex
2. srednjevlaknasti lan finoće od 25 - 33 tex
3. kratkovlaknasti lan finoće od 33 tex

Teks (njem. *Tex*, izvedeno od Textil: tekstil) (znak tex), iznimno dopuštena mjerna jedinica duljinske mase tekstilnoga vlakna i pređe. Naziv je za gram po kilometru, tj. tex = g/km = $10^{-6}$ kg/m.[38]

Dobro obrađen lan ima prirodnu boju vlakana i to: blijedožućkastu, žućkastosivu, srebrnastu ili blijedosivu. Zelenkastu boju ima nedovoljno namočen lan.[23]

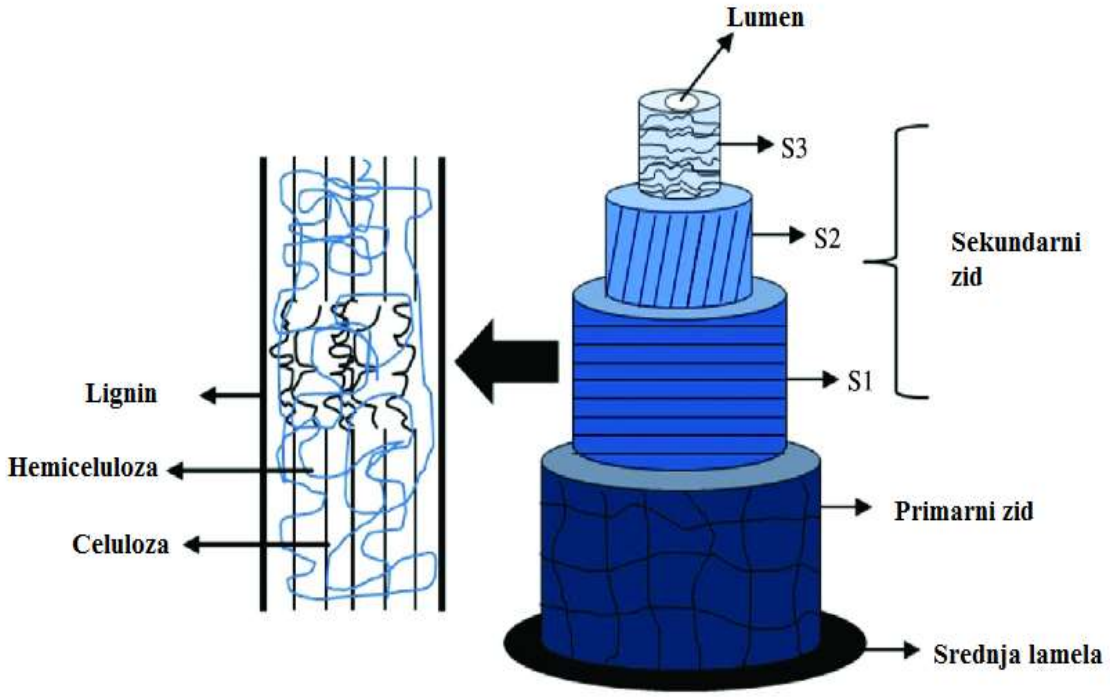
### 4.2. Struktura vlakana lana

Korijen lana je vretenast i slabe usisne snage. Glavni korijen ne prodire dublje u tlo, pa se u površinskom sloju razvija postrano korijenje. Od ukupne mase biljke na korijen otpada oko 10 %. Uljani lan ima bolje razvijen korijen od predivog. Stabljika je zeljasta, uspravna, okrugla, glatka, presvučena voštanom prevlakom. Visina joj varira od 20 - 120 cm, a najbolja debljina stabljike je 1,5 - 2 mm. List nema peteljku, pa je sjedeći, uzak i izdužen, na vrhu zašiljen, presvučen voštanom prevlakom. Cvjetovi su samooplodni s mogućom stranooplodnjom. Plod je tobolac okruglastog oblika, a na vrhu zašiljen. Ima pet pregrada podijeljenih u pet dijelova, a svaki je dio podijeljen na dva dijela u kojima se nalazi po jedna sjemenka, što znači da u tobolcu može biti 10 sjemenki. Masa 1 000 sjemenki iznosi 3 - 15 g, a hektolitarska težina (uobičajena mjera u proizvodnji sjemenja) iznosi oko 70 kg, što odgovara gustoći od 700 kg/m$^3$.[24]

Lan je jedan od najvažnijih izvora prirodnih vlakana pored pamuka, jute, sisala, konoplje i proizvoda poput kukuruza, pšenice, riže, šećerne trske, ananasa, banane i kokosa. Dimenzije i raspored jedinica ćelija u vlaknima određuju strukturu i utječu na svojstva vlakana koja utječu na svojstva kompozita. Morfologija i svojstva vlakana ovise o svakoj biljnoj vrsti zasebno, sjetvi, podneblju, biljnoj dobi, odabranoj biljnoj jedinici i uvjetima tla gdje se biljke uzgajaju. Ove varijable predstavljaju zapreke za veliku proizvodnju lignoceluloznih vlakna, a time i proizvodnje kompozita ojačanih istima, što će se u nastavku rada i proučavati.[19]

Lignocelulozna vlakna karakteriziraju njihove stanične strukture koje čine stanice koje sadrže kristalna (jednoliko poredana) i amorfna (nejednoliko poredana) područja međusobno povezana fragmentima lignina i hemiceluloze. Ova područja nemaju dobro definirane granice i predstavljaju prijelaz iz celuloznog lanca u amorfni.[19]

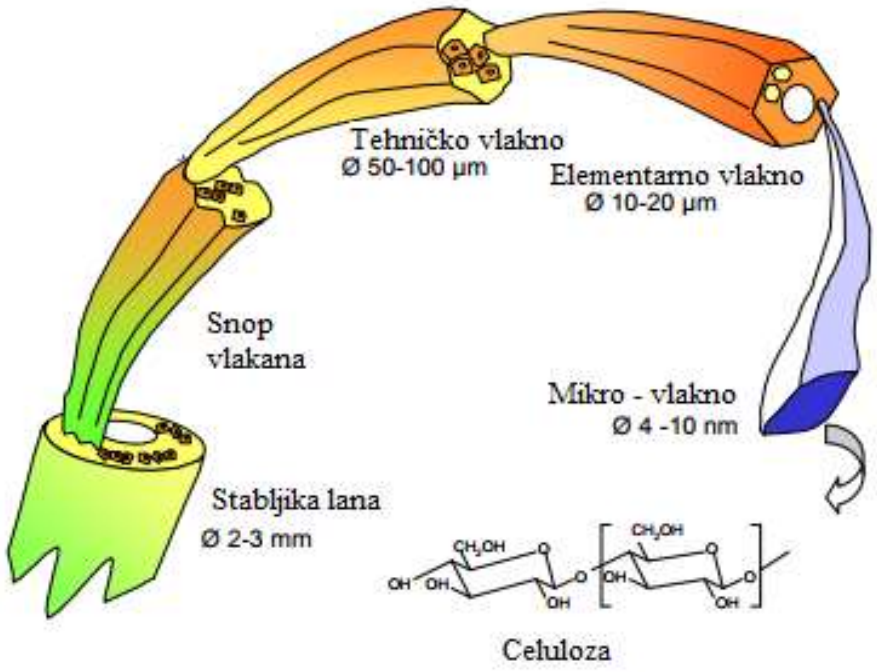
Kao što je prikazano na slici 4.2., struktura biljnih vlakana oblikovana je središnjim kanalom zvanim lumen, koji je odgovoran za transport vode i hranjivih tvari, te staničnim zidom. Stanična stijenka svakog vlakna sastoji se od nekoliko slojeva kako slijedi: srednja lamela, tanka primarna stijenka i sekundarni zid, koji je podijeljen na vanjski sekundarni zid (S1), srednji sekundarni zid (S2) i unutarnji sekundarni zid (S3). Ti se slojevi sastoje od mikrovlakana orijentiranih u prostor u definiranom obliku prema svakom sloju.[19]




**Slika 4.2. Shematski prikaz strukture biljnog vlakna: primarni zid, srednja lamela, lumen, S1 - vanjski sekundarni zid, S2 - srednji sekundarni zid i S3 - vanjski unutarnji zid [19]**

Primarni zid, koji se početno taloži tijekom rasta stanica, sastoji se u neurednog rasporeda celuloznih vlakana smještenih u matrici pektina, hemiceluloze, lignina i proteina. Sekundarni zidovi sastoje se od kristalnih celuloznih mikrovlakana organiziranih u spiralni raspored, gdje srednji sloj (S2) određuje mehanička svojstva vlakana. On se sastoji od mikrovlakana u spiralnoj konfiguraciji dugih lanaca celuloze. Mikrovlakna imaju promjer od 10 do 30 nm, a nalaze se u amorfnom obliku načinjenog od lignina i hemiceluloze. Srednja lamela, tj. Vanjski sloj stanica, sastoji se uglavnom od pektina koji djeluje kao cement između vlakana.[19]

U svim prirodnim celuloznim vlaknima stanični zid se sastoji od dugačkih tankih niti nazvanih mikrovlaknima. Za razliku od umjetnih vlakana, prirodna vlakna koja se upotrebljavaju u kompozitima sadrže različite duljine i promjere. Na primjer, snop vlakana od 1 m duljine sastoji se od elementarnih vlakana koja su duljine od 20 do 50 mm, promjera između 10 i 25 μm i prosječnog omjera oko 1500. (Slika 4.3.). Elementarna vlakna preklapaju se preko velikog dijela svoje duljine i zalijepljena su pektinom.[25]




**Slika 4.3. Shematski prikaz tehničkog i elementarnog lanenog vlakna [25]**

Visoki omjer dimenzija (duljina/ promjer) vrlo je važan u vlaknastim kompozitima na bazi celuloze jer daje naznake mogućih svojstava čvrstoće. Valja uzeti u obzir dimenzije vlakana, a one su dane u Tablica 5. Pa tako duljina lanenog vlakna se kreće od 300 do 900 mm, a promjer od 12 do 30 µm.[19]

**Tablica 5. Morfološka svojstva prirodnih vlakana [25]**

| **Vlakno** | **Tehničko vlakno (mm)** | **Elementarno vlakno (mm)** | **Promjer vlakna (µm)** |
|---|---|---|---|
| **Vlakna iz sjemena** | | | |
| Pamuk | - | 15 – 56 | 12 – 25 |
| **Vlakna iz stabljike** | | | |
| Lan | 300 – 900 | 13 - 60 | 12 – 30 |
| Juta | 1500 – 3600 | 2 – 5 | 15 – 25 |
| Konoplja | 1000 – 3000 | 5 – 55 | 16 – 50 |
| **Vlakna iz lista** | | | |
| Sisal | 600 - 1000 | 0,8 - 8 | 15 - 40 |

### 4.3. Kemijska svojstva lanenog vlakna

Kemijski sastav prirodnih vlakana također ima veliki utjecaj na karakteristike kompozita koji predstavljaju postotak celuloze, hemiceluloze, lignina i voskova. Tablica 6. prikazuje kemijski sastav nekih uobičajenih prirodnih vlakana.[18]

Celuloza je glavna strukturna komponenta koja daje čvrstoću i stabilnost vlaknima i to je jedan od najpoželjnijih organskih spojeva na Zemlji. Celuloza postoji u prirodi kao kristalna makromolekula koja pokazuje nehomogene molekulske mase u tijelu. Celuloza u drvetu imaju posebno nižu molekulsku masu u usporedbi s celulozom dobivenom iz izvora biljnih vlakana kao što je lan i pamuk. Štoviše, laneno vlakno je kristalno vlakno i sadrži uglavnom homogenu celulozu od visoke molekulske mase, dok drvena celuloza ima tendenciju da bude manje kristalna s amorfnom celuloznih dijelova. Štoviše, sadržaj celuloze u biljnim vlaknima je puno veći nego u drvnim vlaknima, na tom tragu promatrajući lan koji sadrži preko 70 %

celuloze može se pretpostaviti da će laneno vlakno biti vlakno izuzetne čvrstoće i stabilnosti.[26]

**Tablica 6. Kemijski sastav najrasprostranjenijih prirodnih vlakana[25]**

| **Vlakno** | **Celuloza** | **Hemiceluloza** | **Pektin** | **Lignin** |
|---|---|---|---|---|
| **Vlakna iz sjemene** | | | | |
| Pamuk | 91,8 | 6,4 | - | - |
| **Vlakna iz stabljike** | | | | |
| Lan | 71,2 | 18,6 | 2,0 | 2,2 |
| Juta | 71,5 | 13,4 | 0,2 | 13,1 |
| Konoplja | 74,4 | 17,9 | 0,9 | 3,7 |
| **Vlakna iz lista** | | | | |
| Sisal | 73,1 | 13,3 | 0,9 | 11,0 |

Količina prisutne celuloze jako varira s vrstom biljke i jest u prirodi je popraćeno širokim nizom drugih materijala, osobito voskova, lignina, hemi-celuloza (niža molekulska masa, razgranati polisaharid). Tablica 6. prikazuje kemijske karakteristike raznih prirodnih vlakana. Kemijski je pamuk najčišći, koji sadrži više od 90% celuloze s malo ili bez lignina. Druga vlakna sadrže 70-75% celuloze, ovisno o obrada. Lan može sadržavati više od 95% celuloza. Juta sadrži veći udio lignina koja pridonosi krutosti vlakna. Fizikalna svojstva prirodnih vlakana u osnovi su pod utjecajem sadržaja celuloze, stupnja polimerizacije, orijentacije celuloznih polimernih lanaca i kristaliničnosti, na koje utječu uvjeti tijekom rasta biljaka.[25]

### 4.4. Mehanička svojstva vlakana lana

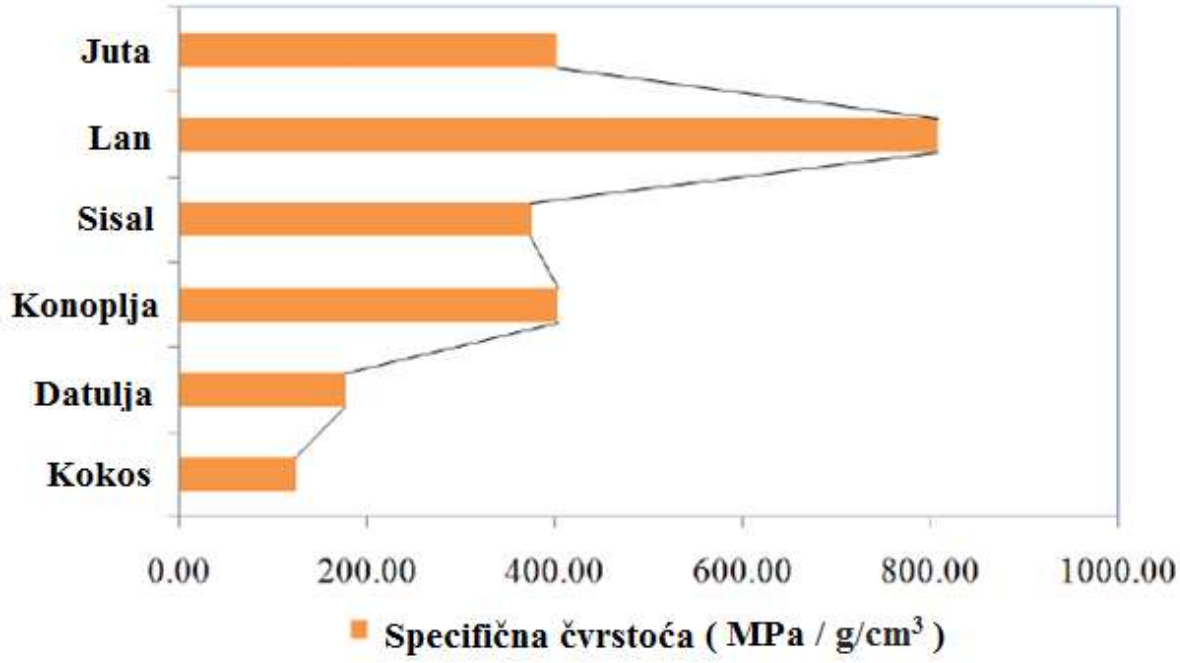
Vlakna lana su elastična, ali samo za mala istezanja. Do raspadanja vlakana dolazi pri temperaturama iznad 200 °C. Lanena vlakna su postojana u razrijeđenim slabim kiselinama te lužnatim otopinama, a na suncu postupno gube čvrstoću. Lanena su vlakna skupa zbog puno koraka u proizvodnji koji zahtijevaju ljudski rad. Primjenjuju se kao ojačala u kompozitima koji se rabe tamo gdje je potrebno podnijeti malo do srednje opterećenje. Posebno su prikladna za izradu dijelova unutrašnjosti automobila.[27]

Mehanička svojstva vlakana lana u usporedbi s drugim dostupnim prirodnim vlaknima prikazana su u Tablica 7.

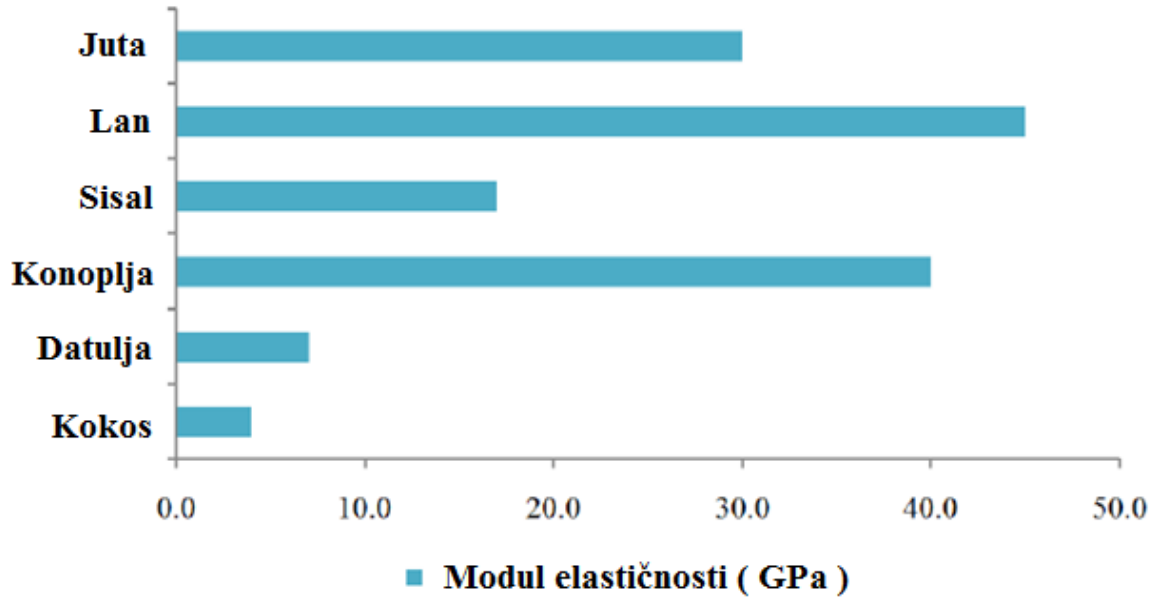
**Tablica 7. Pregled svojstava vlakana lana [27]**

| **Vlakno** | **Vrsta vlakna** | **Gustoća, g/cm$^3$** | **Rastezna čvrstoća, MPa** | **Rastezni modul elastičnosti, GPa** | **Specifična čvrstoća, MPa / g/cm$^3$** | **Istezljivost, %** | **Apsorpcija vlage, %** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Stakleno vlakno | mineral | 2,50 - 2,55 | 1800 - 3500 | 70,0 - 73-0 | 700 - 1400 | 2,5 - 3,0 | 0,0 |
| Lan | liko | 1,40 - 1,50 | 345 - 1500 | 27,6 - 80,0 | 230 - 1070 | 1,2 – 3,2 | 7,0 |
| Konoplja | liko | 1,48 | 550 - 900 | 70,00 | 370 - 610 | 1,60 | 8,0 |
| Juta | liko | 1,30 - 1,45 | 400 - 800 | 10,0 - 30,0 | 280 - 610 | 1,16 – 1,8 | 12,0 |
| Agava | list | 1,33 - 1,45 | 468 - 700 | 9,4 - 38,0 | 320 - 530 | 2,0 - 7,0 | 11,0 |
| Curaua (*Ananas erectifolius*) | list | 1,40 | 500 - 1150 | 11,8 | 360 - 820 | 3,7 – 4,3 | / |

U prikazanim usporedbama korištene su prosječne vrijednosti različitih mehaničkih svojstava. Usporedbe lana s različitim tipovima prirodnih vlakana poput; juta, sisal, konoplja, datulja i kokos provode se prema njihovim specifičnim modulima elastičnosti i specifičnom čvrstoćom kako je prikazano na slikama 4.4. i 4.5.

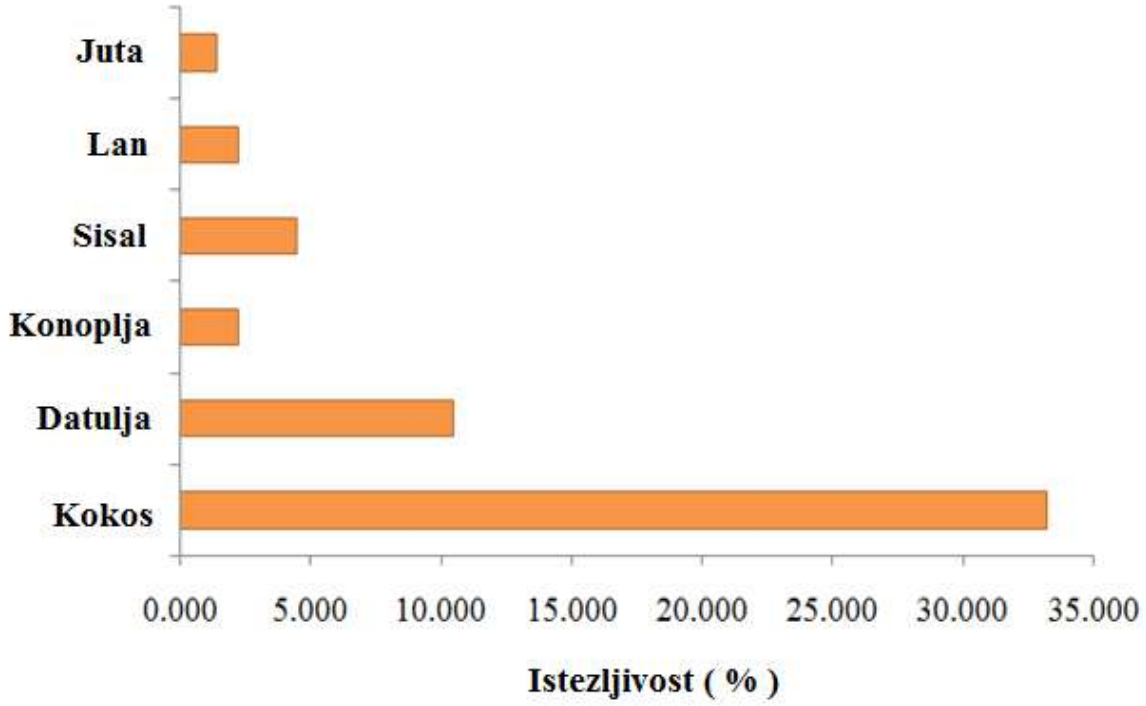



**Slika 4.4. Usporedba različitih vrsta prirodnih vlakana u odnosu na specifičnu čvrstoću [28]**




**Slika 4.5. Usporedba različitih tipova prirodnih vlakana s obzirom na modul elastičnosti [28]**

Jasno se vidi da prirodna vlakna variraju u mehaničkim svojstvima. Može se zaključiti da vlakna s višim sadržajem celuloze imaju bolja mehanička svojstva. To su sisal, konoplja, lan i juta koji imaju relativno veće vrijednosti modula elastičnosti i specifične čvrstoće (Slika 19. i 20.) jer imaju veći sadržaj celuloze. S druge strane, količina celuloznog sadržaja ima negativan učinak na druge korisne karakteristike prirodnih vlakana, kao i na istezljivost. Usporedba istezljivosti različitih prirodnih vlakana (Slika 4.6.) otkriva da kokos ima puno veću istezljivost nego što to ima lan, a to je direktno povezano s time što kokos ima niži sadržaj celuloze no što to ima lan.[28]




**Slika 4.6. Usporedba između različitih vlakana s obzirom na istezljivost [28]**

Istraživanja su pokazala da se upotrebom epoksidne matrice i lana kao ojačala dobiva kompozit veće krutosti čija se vrijednost modula elastičnosti kreće oko 40 GPa i rastezne čvrstoće oko 280 MPa. Visoka rastezna čvrstoća prirodnih vlakana lana čije su vrijednosti prikazane u tablici 7. doprinosi povećanju rastezne čvrstoće kompozita povećavanjem volumnog udjela vlakana. Opaženo je da se vlačna čvrstoća i modul elastičnosti povećavaju s povećanjem volumnog udjela vlakana (0 %, 10 %, 18 %, 20 % i 30 %). Charpyjev test pokazao je da bi se uporabom vlakana lana značajno povećala udarna žilavost kompozita.[29]

Odabir najboljeg prirodnog tipa vlakana za polimerne kompozite složen je problem s konfliktnim kriterijskim problemom. Zbog toga se još treba provesti opsežna istraživanja vlakana za bolju procjenu svojstava raspoloživih prirodnih vlakana. To bi značajno dovelo do proširenja njihovih primjena u raznim „zelenim proizvodima“ kako bi se poboljšala ekološka i industrijska održivost. Štoviše, odgovarajuće usporedne studije između svojstava vlakana olakšale bi pronalaženje novih mogućih tipova vlakana s optimalnim željenim svojstvima koja mogu poboljšati sveukupna željena svojstva bio-kompozitnih materijala Na odabir odgovarajućeg tipa prirodnog vlakna utječe nekoliko kriterija i smatra se problemom višekriterijskog odlučivanja. Bolje procjene prirodnih vlakana u širokom rasponu kriterija imaju nekoliko prednosti. To može dovesti do boljih informiranih odluka o odabiru odgovarajućeg vlakna za industrijske primjene s jedne strane i poboljšanja svojstava s druge strane. Procjene bi trebale uzeti u obzir kombinirane gospodarske i ekološke karakteristike, kao i tehničke, kako bi se postigle razumnije i sigurnije odluke. Osim toga, nove moguće vrste vlakana mogu se iskoristiti kroz bolje procjene koristeći šire željene kriterije.[28]

## 4.5. Prednosti i nedostatci lana

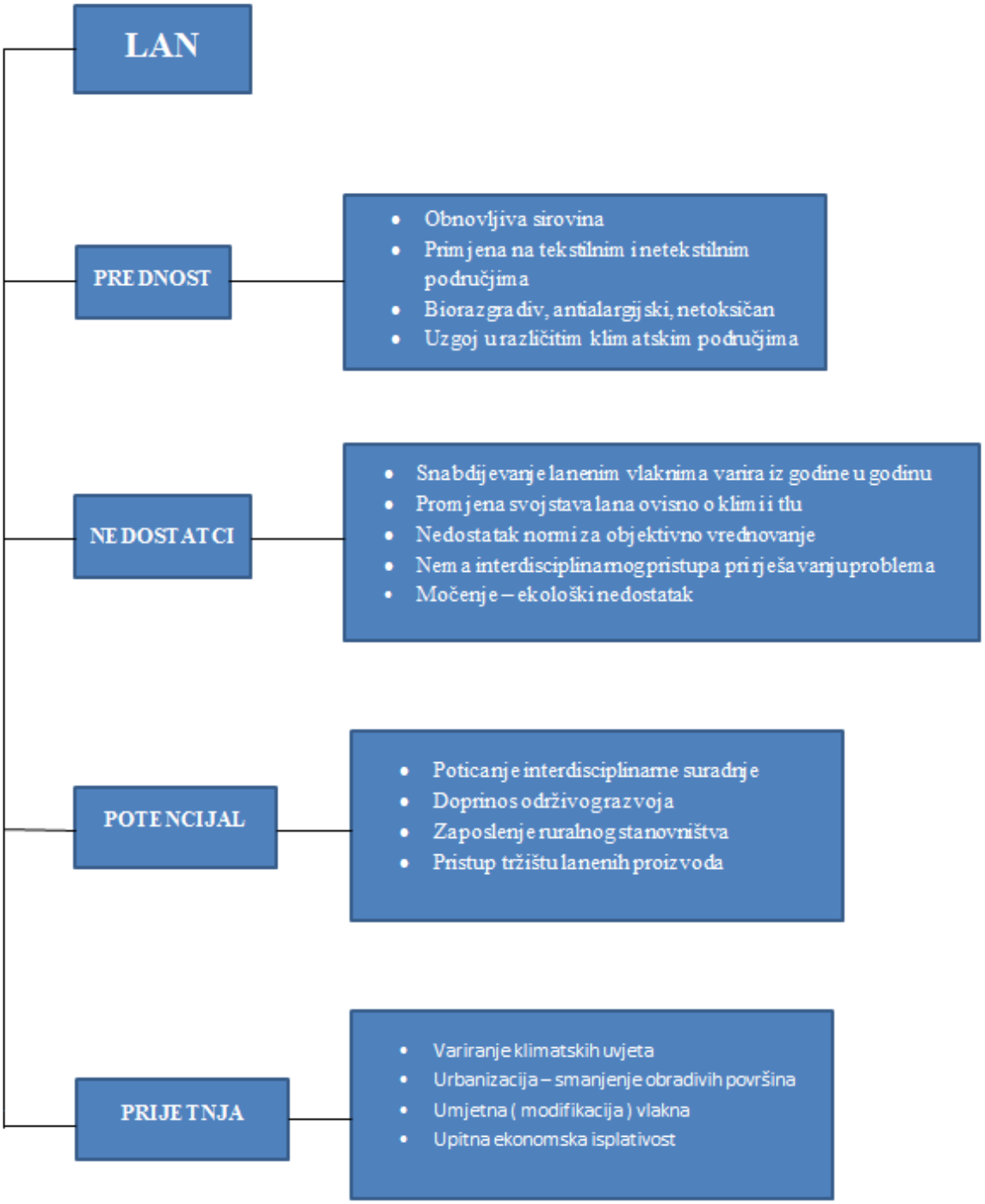
Najveća prednost biljke lana i njenih vlakana je u činjenici da je lan obnovljiva tekstilna sirovina koja se može u potpunosti iskoristiti (Slika 4.7.). Širi se područje njegove primjene u različitim granama industrije, i na tekstilnim i na netekstilnim područjima, od svakodnevnih i luksuznih proizvoda do biokompozita. Ovako široka primjena očituje se u njegovim svojstvima, a pogotovo jer je lan biorazgradljiv, antialergijski i netoksičan. Ovisno o njegovoj primjeni može se uzgajati u različitim klimatskim uvjetima.[30]

Najistaknutiji nedostatak ove industrijske grane je neredovitost snabdijevanja prerađivača zadovoljavajućim količinama lanenih vlakana, koje variraju iz godine u godinu jer ovise o klimatskim uvjetima. Nadalje, karakteristična neujednačenost geometrije lanenih vlakana otežava vrednovanje njihovih svojstava (npr. finoća, čvrstoća i dr.), pa se mjerenja često provode uz subjektivnu procjenu odabira mjesta mjerenja na vlaknu što iziskuje prilagodbu postupaka ispitivanja i veći broj mjerenja. Nezanemariva je i činjenica da postupci izdvajanja vlakana iz stabljike mogu biti ekološka prijetnja za okoliš.[30]

Nedostatnost definiranja kvalitete lanenih vlakana uočena je i prepoznata od krovnih institucija za uvođenje i razvoj normi. Tako je u okviru institucije ASTM za tekstil D13.17, 1999. godine osnovan pododbor za razvoj norma za lan pod vodstvom mikrobiologa Akina. U okviru rada pododbora D13.17 odobrene su od 2002. do 2009. svega 4 norme za lan i lanena vlakna, i to za definiranje terminologije, boje, finoće i udjela inkrusta.[30]

Bitan nedostatak, ali i potencijal je nedostatak interdisciplinarnog pristupa istraživanju biljke lana i vlakana te proizvoda od lana. Potencijal je i veća suradnja proizvođača i državnih, znanstveno-istraživačkih i drugih institucija, transfer znanja i tehnologija kroz interdisciplinarni rad. Nadalje se uočava potencijal u zaposlenju ruralnog stanovništva u obliku razvoja domaćih rukotvorina veće dodatne vrijednosti te mogućnosti njihovog izvoza.[30]

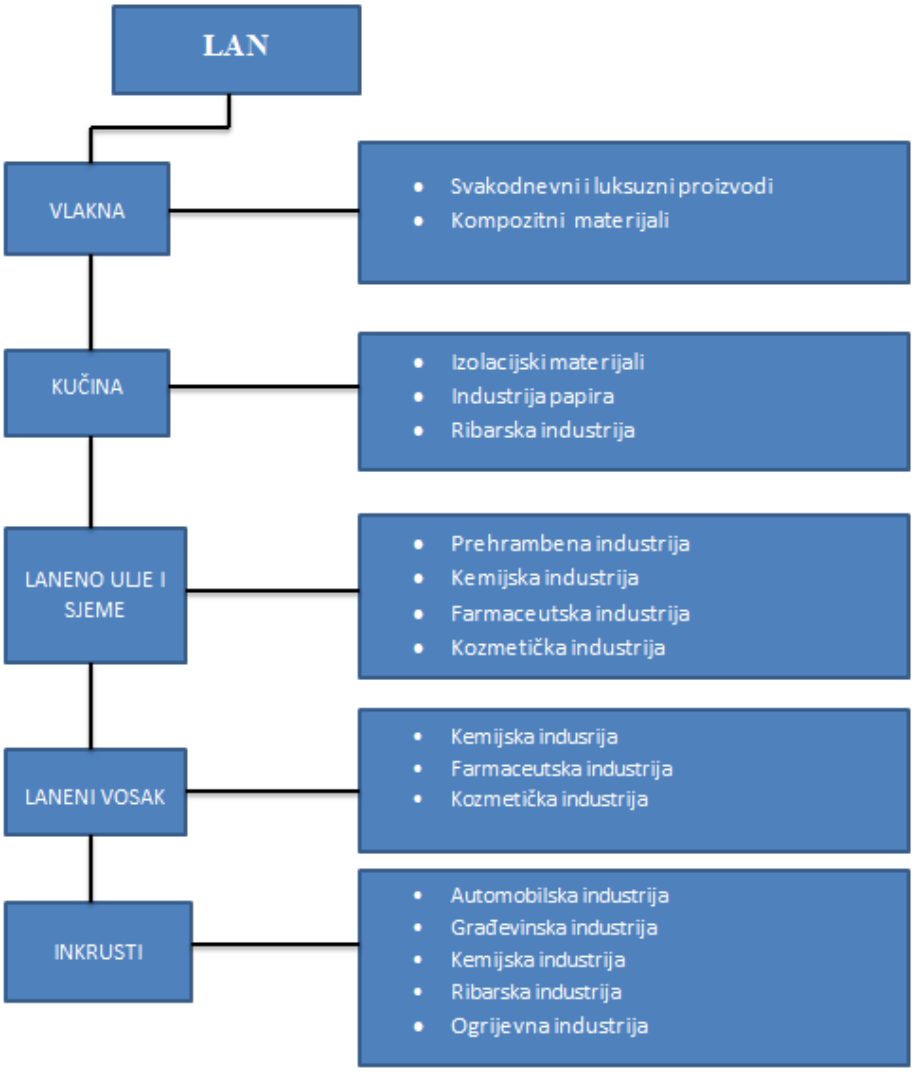
Kao najvažnija prijetnja može se istaknuti općenita kompleksnost lanenog vlakna, koja se očituje kroz njegovu neujednačenu morfologiju, variranje klimatskih uvjeta i urbanizaciju čija je posljedica smanjenje interesa za uzgoj lana. Prijetnja dolazi i od umjetnih konvencionalnih, a posebno od modificiranih vlakana koja zbog svoje dostupnosti, niže cijene i predvidivosti proizvodnje mogu umanjiti interes za lanena vlakna. Ovdje je prisutna i upitna sigurnost ekonomske isplativosti proizvodnje lana kod malih proizvođača. SWOT analiza pokazuje da su polazne osnove za razvoj ove industrijske biljke veoma kompleksne i višestruko limitirane. Međutim, uzgoj lana i prerada do vlakana, ima perspektivu za razvoj uz napore da se otklone evidentirane slabosti, izbjegnu postojeće prijetnje i iskoriste prilike koje stoje pred ovom industrijskom granom.[30]




**Slika 4.7. Pregled karakteristika lana, uključujući prednosti, nedostatke, potencijal i prijetnje [30]**

### 4.6. Primjena lana u polimernim kompozitima

Lan kao biljka je upotrebljiva u cijelosti, pa tako od raznih dijelova biljke dobivamo različite proizvode. Kada bismo potpuno iskoristili biljku lana od nje bi se dobili vlakna, kučina, laneno ulje i sjeme, laneni vosak i inkrusti. Pregled primjene različitih dijelova lana dan je slikom 4.8. Naime, često se lan uzgaja u jednu svrhu , primjerice za dobivanje lanenog ulja ili sjemena, a ostatak biljke ostaje neiskorišten. U ovome primjeru vlakna lana bi bila nusproizvod te bi se tim načinom višestrukog iskorištavanja biljke smanjila cijena bilo vlakna, bilo ulja itd. U ovome poglavlju dat će se uvid u primjenu vlakana lana u polimernim kompozitima u različitim industrijama i proizvodima.




**Slika 4.8. Prikaz primjene pojedinih dijelova biljke lana [30]**

Vlakno lana je prirodni materijal i u kompozitima utječe na smanjenje mase, povećanje čvrstoće i bolje prigušenje vibracija uzrokovanih neravnim površinama. Takva svojstva materijala rezultiraju maksimalnim učinkom i zadovoljstvom korisnika u snježnim i vodenim sportovima.[31]

Kompoziti s vlaknima lana imaju veliki potencijal da se počnu uvelike primjenjivati u vrhunskom sportu kao na slici 4.9. Ispitivanja su pokazala da su karakteristike proizvoda za sportske aktivnosti na snijegu znatno poboljšane uporabom lanenog vlakna.[31]

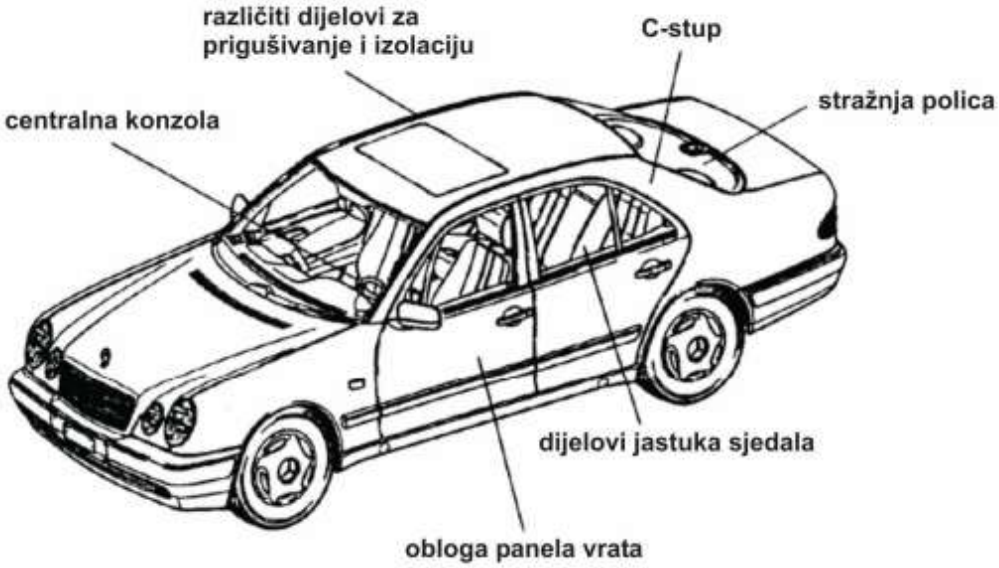


**Slika 4.9. Primjena lana u zimskim sportovima [31]**

Prednosti skija i snowboarda obogaćenih prirodnim vlaknima lana: [31]

- stalno i stabilno klizanje po snijegu
- povećana prigušenja na tvrdom i neravnom terenu
- mekani ulazak u prijelazu i ubrzanja na prijelazu
- veća stabilnost i ravnoteža na većim nagibima.

Lanena vlakna kao ojačalo u biokompozitima rabljena su već tijekom Drugog svjetskog rata u izgradnji zrakoplova tipa Spitfire. Danas takvi biokompoziti nalaze široku primjenu na području automobilske, zrakoplovne i građevinske industrije. Mnogi proizvođači automobila (npr. Mercedes-Benz, slika 4.10.) ugrađuju biokompozite s lanenim vlaknima u svoje automobile. Ovi kompoziti posebno su prikladni za izradu unutarnjih dijelova automobila, npr. zamjenjuju staklena vlakna u kompozitima od kojih su izgrađeni unutarnji paneli vrata, pregradne police, nasloni sjedala, pokrov rezervnog kotača te ostale unutarnje presvlake.[32]




**Slika 4.10. Upotreba lanenih vlakana u proizvodnji dijelova za automobil Mercedes-Benz E-Class [32]**

Prigušenje i upijanje vibracija su dvije vrlo važne karakteristike okvira i vilice koje osjetno utječu na bicikliste. Izuzetno puno varijabli je uključeno – kako atomi ili molekule određenog materijala apsorbiraju i rasipaju energiju vibracije, kako su ti materijali strukturirani, kako su ti materijali dorađeni itd. Sposobnost upijanja vibracija kompozita ojačanog ugljičnim vlaknima je neusporedivo veća od one koju imaju metali. Mirnoća vožnje bicikala izrađenih od kompozita ojačanog ugljičnim vlaknima je prvo svojstvo koju biciklisti opaze pri promjeni bicikla s metalnog na kompozitni ojačan ugljičnim vlaknima. No i tu ima mjesta za razvoj te se stoga počinju upotrebljavati i vlakna lana u izradi bicikala.[33]




**Slika 4.11. Nova tehnologija Carboflax u izradi bicikla [33]**

Slika 4.11. prikazuje novu tehnologiju Carboflax u izradi bicikla. Inovacija se sastoji u uvođenju nove komponente u kompozit: vlakna prirodnog lana, kako bi prigušila vibracije u kompozitu i tako bicikl učinila mirnijim. Lanena vlakna uslojena između slojeva ugljičnih vlakana na prednjoj vilici i na donjim stražnjim vilicama okvira upijaju vibracije i tako umiruju okvir i vilicu, te biciklisti koji dugo sjede u sjedalu takvog bicikla na kraju dana su znatno odmorniji.[33]

Svake godine diljem svijeta proizvode se milijuni polimernih stolica s niskom cijenom od polipropilena. Kao rezultat njihovog lošeg dizajna, mnogi od tih stolica brzo se slamaju i u šalju na odlagališta otpada. Polipropilen je dobiven od nafte, neobnovljivog izvora, čija uporaba negativno utječe na okoliš.[34]

U ovoj generaciji stolica koristi se PLA (polilaktična kiselina) umjesto polipropilena. PLA spada u skupinu plastomera dobivenih iz biljaka (kukuruz, šećerna trska, korijen tapioke itd.). Može se reciklirati, biorazgradiv je kompostiranjem, što rezultira ekološki prihvatljivijom stolicom.[34]

Potrošnja materijala je minimizirana, dok poboljšanja konstrukcijskog dizajna povećavaju kvalitetu i dugovječnost. Prva stolica dizajnirana za masovnu proizvodnju proizvedena je od Fibrolona F8530, izuzetno čvrstog injekcijski prešanog PLA ojačanog prirodnim vlaknima lana.[34]



**Slika 4.12. Stolica ojačana prirodnim vlaknima lana u PLA-matrici [34]**

Mnoge tehnologije razvijene za primjenu u automobilskoj industriji mogu se koristiti za izradu potrošačkih proizvoda od kompozita ojačanih lanom. Moguće je uporabom injekcijskog prešanja, ručnog laminiranja ili hibridnim postupcima proizvoditi robu široke potrošnje od kompozita lana. Takvi proizvodi uključuju namještaj (stolice za leđa ili sjedala), sportske i rekreacijske proizvode, prtljagu, glazbene instrumente i zvučne armature, građevinske elemente i slično, a nekih od tih proizvoda su prikazani na slikama 4.13. do 4.15. [35]



**Slika 4.13. Gitara izrađena od kompozitnog materijala ojačanog lanenim vlaknima [36]**



**Slika 4.14. Profili u građevinskoj industriji izrađeni od kompozitnog materijala ojačanog lanenim vlaknima [35]**



**Slika 4.15. Kovčeg izrađen od kompozitnog materijala ojačanog lanenim vlaknima [35]**

# 5. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom diplomskom radu izrađen je polimerni kompozit ojačan lanenim vlaknima. Kao matrica polimernog kompozita korištena je poliesterska smola s dodatkom katalizatora Metox-50W, dok je kao ojačalo korišteno laneno platno. Sam postupak izrade kompozita se odvijao u nekoliko faza:

- priprema materijala
- izrada kalupa
- postupak laminiranja
- sušenje kompozita.

Nakon sušenja kompozita ispitana su sljedeća mehanička svojstva; vlačna i savojna čvrstoća, vlačni i savojni modul elastičnosti, tvrdoća te samogasivost.

## 5.1. Izrada kompozitnog materijala

Izrada kompozitnog materijala se odvijala u nekoliko faza, a prije samog postupka laminiranja uslijedila je priprema. Laneno platno je kupljeno u metraži, te ga je trebalo izrezati na odgovarajuće dimenzije kalupa. S obzirom na mehanička svojstva koja će se ispitivati i na dimenzije epruveta koje su za ta ispitivanja potrebna, proračunom je utvrđeno da će za ovo ispitivanje biti potrebne dvije ploče; ploča 1. dimenzija 220x220 mm i ploča 2. dimenzija 190x190 mm.

a) Prvi korak je bilo rezanje lanenog vlakna na dimenzije kalupa. Sam postupak u sljedovima prikazan je slikama 5.1., 5.2., 5.3.



**Slika 5.1. Laneno vlakno kupljeno u metraži**



**Slika 5.2. Postupak pripreme platna za rezanje**



**Slika 5.3. Platno kao ojačalo izrezano na zadane dimenzije kalupa**

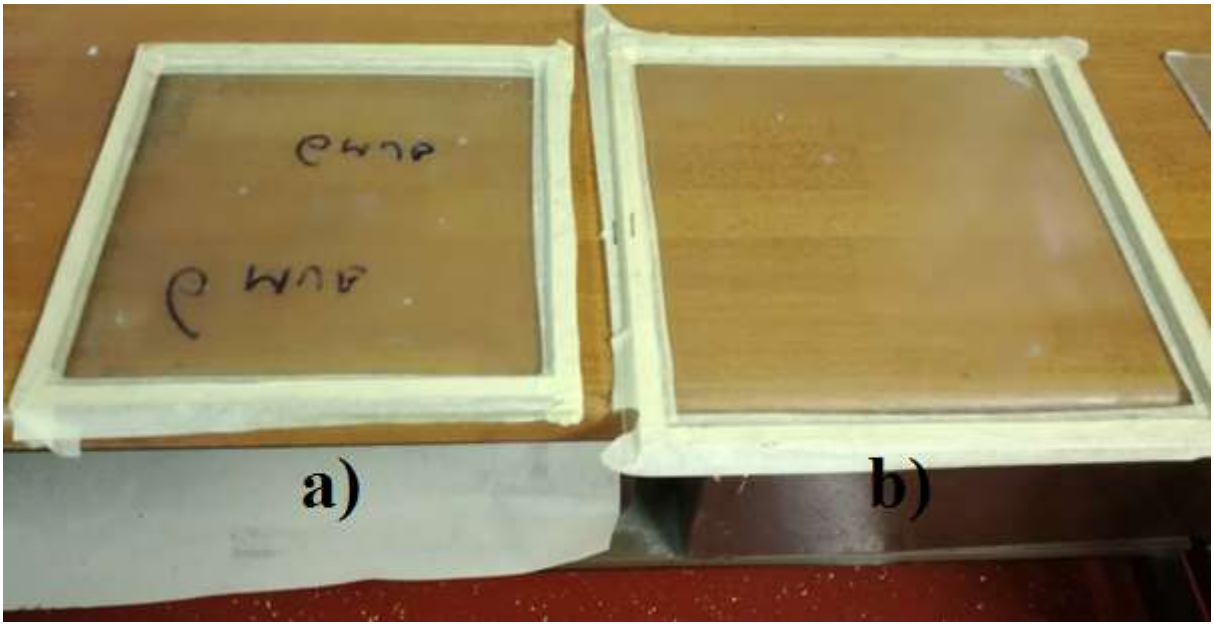
Kako bi se dobila tražena debljina ploče od 4 mm, a koja je uvjetovana propisanom debljinom epruveta za ispitivanje mehaničkih svojstava, za svaki kalup bilo je potrebno izrezati 9 slojeva lanenog vlakna.

b) Drugi korak je izrada kalupa

Kalup je izrađen na staklenoj podlozi na kojoj je napravljen okvir koji odgovara ranije utvrđenim dimenzijama. Pošto su potrebne dvije ploče, potrebno je izraditi i dva kalupa. Okvir kalupa je drveni, a dimenzije okvira odgovaraju zahtijevanim dimenzijama ispitnih ploča i to za ploču 1. dimenzija kalupa iznosi 220x220 mm i za ploču 2. dimenzija kalupa iznosi 190x190 mm.



**Slika 5.4. Postupak izrade kalupa**

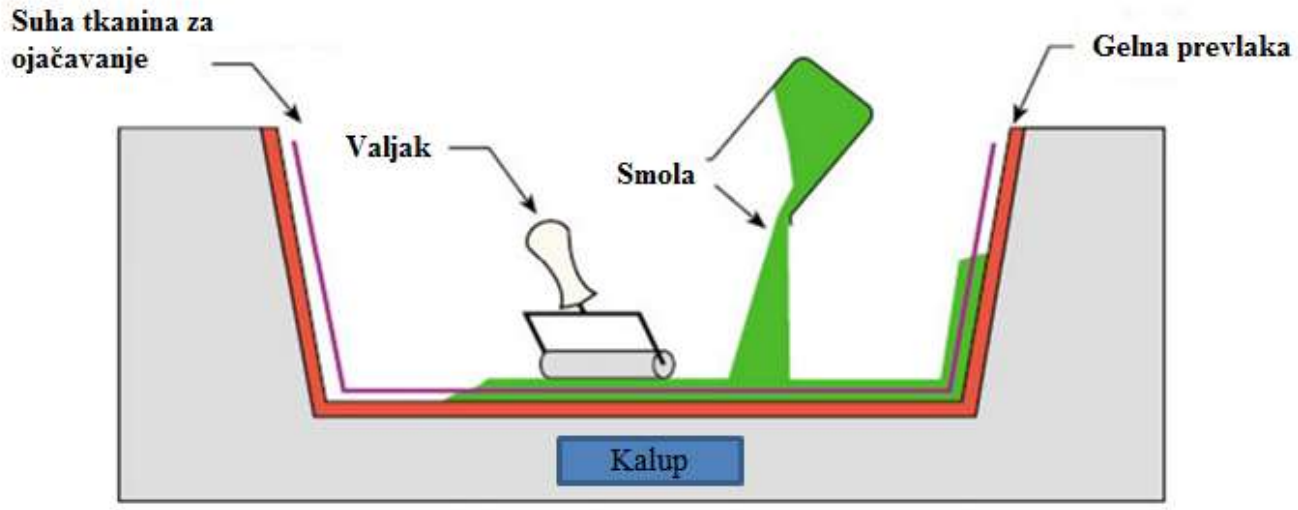



**Slika 5.5. Kalup; a) dimenzije 190x190mm b) dimenzije 220x220mm**

c) Postupak laminiranja

Kod ovog postupka vlakna povezana u tkanja različitog oblika stavljaju se u kalup. Na njih se nanosi smola koja se impregnira u ojačanja pomoću valjaka ili kistova (slika 5.6.) Do umrežavanja (skrućivanja) dolazi pri atmosferskim uvjetima.[7]

Matrice: svi materijali - poliesteri, vinil esteri, epoksidne smole, fenoli itd. Svi tipovi vlakana (problemi se jedino mogu javiti u slučaju težih aramidnih vlakana koje je teže natopiti ručno. [7]




**Slika 5.6. Prikaz postupka laminiranja [7]**

**Prednosti:** [7]

- vrlo jednostavan postupak koji se primjenjuje već dulje vrijeme
- malen trošak izrade alata
- veliki izbor vrsti materijala i dobavljača
- udio vlakana je veći i vlakna su dulja nego u slučaju polaganja naštrcavanjem.

**Nedostaci:** [7]

- kvaliteta postupka u velikoj mjeri ovisi o umješnosti radnika. Teško proizvesti kompozite s malim udjelom smole bez pukotina
- smole obično imaju manju molekularnu masu, što znači da mogu biti štetniji od proizvoda s većom molekularnom masom
- problem je uklanjanje stirena nastalog iz poliestera i vinil estera, moraju se koristiti smole male viskoznosti što znatno utječe na svojstva.

Kao matrica kompozitnog materijala korištena je nezasićena poliesterska smola na bazi ortoftalne kiseline proizvođača Sirca s dodatkom katalizatora „Metox 50 W“. Komponente kompozitnog materijala i njihovi maseni udjeli prikazani su u Tablica 8.

**Tablica 8. Komponente kompozitnog materijala i maseni udjeli komponenata**

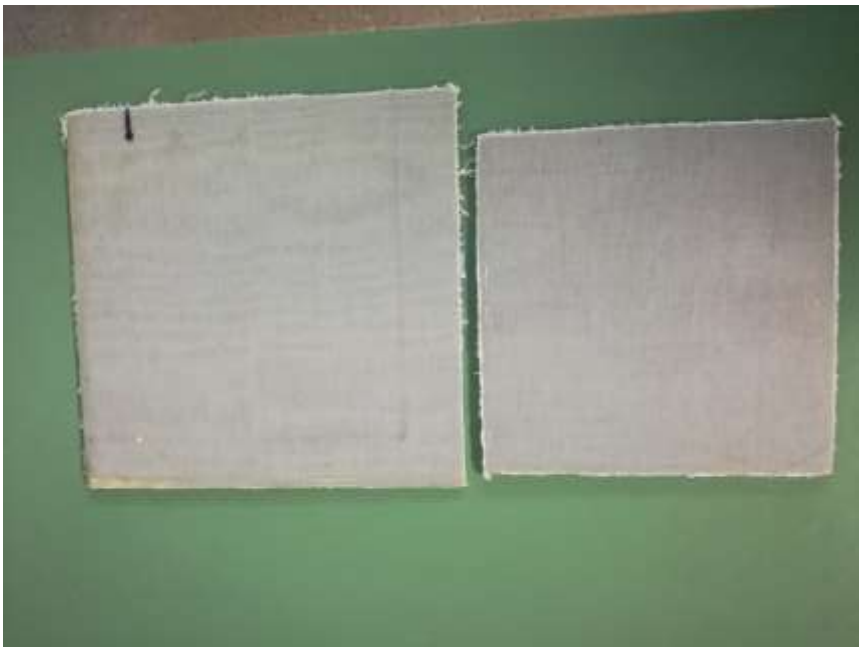
| Komponenta | Maseni udio |
|---|---|
| Matrica | 161,80 g |
| Ojačalo | 65,80 g |
| Maseni omjer komponenata | 2,49:1 ≈ 2,5:1 |
| Maseni udio ojačala | 40,67 % |

U postupku laminiranja prvo se nanosi sloj poliesterske smole, zatim se nanosi ojačalo i na ojačalo ponovno poliesterska smola. Postupak se ponavlja sve dok se ne ispuni kalup na zadanu debljinu kompozita kojeg treba dobiti. U ovom primjeru je korišten kist za nanošenje smole. Postupak je prikazan slikom 5.7.



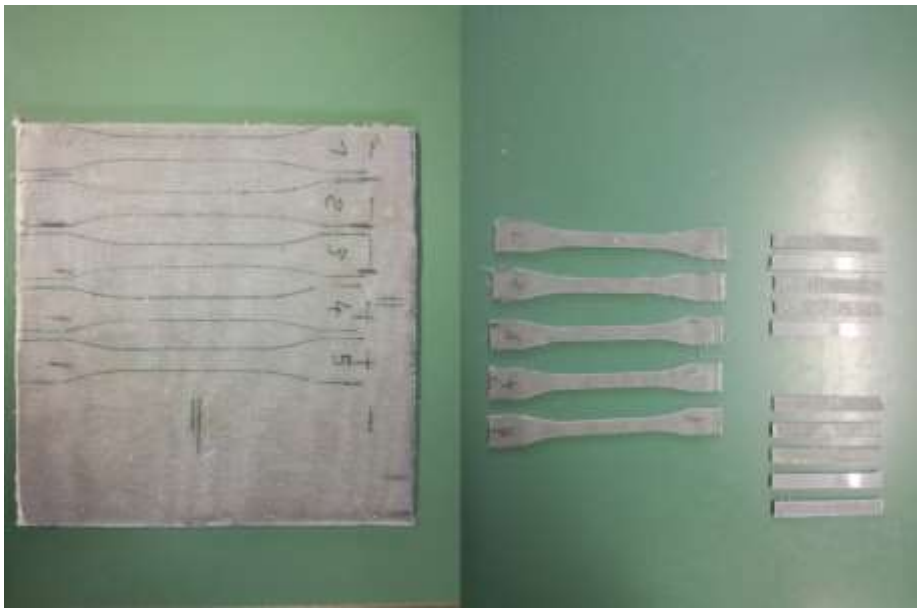
**Slika 5.7. Postupak laminiranja polimernog kompozita**

Nakon postupka laminiranja uslijedilo je sušenje kompozitnih ploča na sobnoj temperaturi.



**Slika 5.8. Ploče nakon sušenja**

Nakon sušenja može se reći da je proces proizvodnje kompozitnog materijala u potpunosti završio. Kako bi se ispitala svojstva dobivenog kompozita potrebno je materijal pripremiti za ispitivanja, tako što se epruvete izrežu na normirane dimenzije, a čije su dimenzije za pojedino ispitivanje date u nastavku. Priprema ispitnih uzoraka za ispitivanje prikazana je slikom 5.9.



**Slika 5.9. Materijal izrezan na zadane dimenzije epruveta**

## 5.2. Statistička obrada rezultata mjerenja

Prilikom ispitivanja na dobivenim rezultatima mjerenja kompozitnog materijala ojačanog lanenim vlaknima određena je nepristrana procjena parametara osnovnog skupa na temelju teorije uzoraka. Temeljem malog broja uzoraka koji su ispitivani ($n \leq 30$ elemenata, tj. podataka), potrebno je koristiti Studentovu *t*-razdiobu s parametrom $k = n - 1$ za intervalnu procjenu očekivanja osnovnog skupa iz kojeg potječe uzorak. Intervalna procjena pojedinih svojstava kompozitnog materijala uz interval vjerodostojnosti $1 - \alpha = 0{,}95$ u ovom je radu izračunata prema izrazu (1):[40]

$$\bar{X} - t_{(k,\frac{\alpha}{2})} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + t_{(k,1-\frac{\alpha}{2})} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} \qquad \textbf{(1)}$$

gdje su: [40]

$\bar{x}$ – aritmetička sredina uzorka

*t* – varijabla Studentove *t*-razdiobe

*k* –broj stupnjeva slobode uzorka od *n* podataka

*n* – veličina uzorka

$\alpha$ – stupanj značajnosti

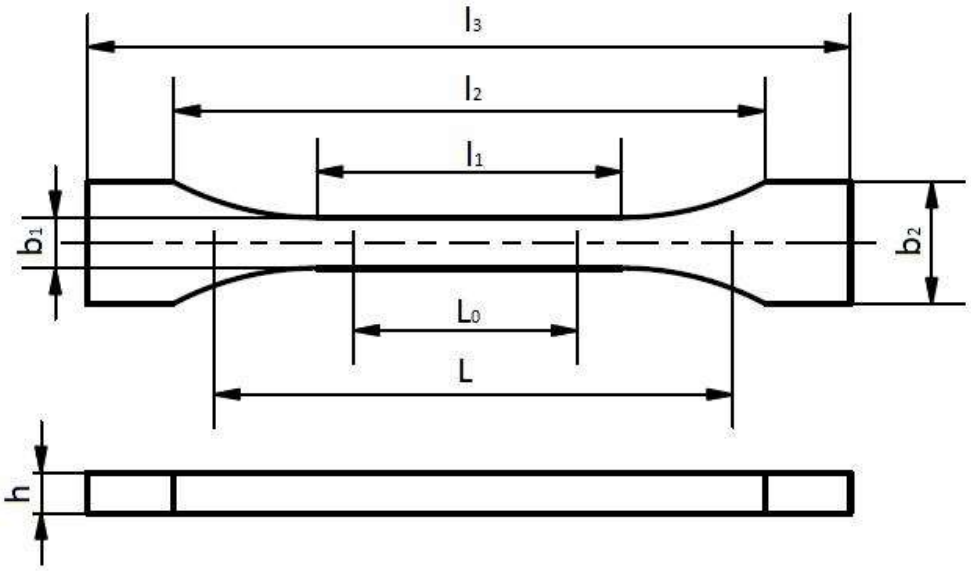
*s* – nepristrana procjena standardne devijacije

$\mu$ – procijenjeno očekivanje osnovnog skupa.

## 5.3. Statičko vlačno ispitivanje

### *5.3.1. Opis statičkog vlačnog ispitivanja*

Statičkim vlačnim ispitivanjem utvrđuje se elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičnog vlačnog naprezanja. Samo ispitivanje se provodi uređajima koji se nazivaju kidalice ili univerzalne ispitivalice. Mehanička svojstva koja je ovim putem moguće odrediti su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća itd. Tijekom ispitivanja se kontinuirano mjeri sila i produljenje epruvete te se grafički registrira dijagram „sila – produljenje“. Ispitivanje vlačne čvrstoće polimernih kompozita provodi se prema normi ISO 527. Prvi dio norme, ISO 527-1:1993 propisuje opće principe, dok drugi dio ISO 527-2:1993 propisuje uvjete ispitivanja. Epruvete za ispitivanje dijele se na A – višenamjensko ispitivanje i B – strojna ispitna tijela. Dimenzije epruveta prikazane su na Slika 5.10. i dane u Tablica 9.[41]




**Slika 5.10. Izgled epruveta za statičko vlačno ispitivanje [41]**

**Tablica 9. Dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje [41]**

| | **Dimenzije (mm)** | |
|---|---|---|
| Tip epruvete | 1A | 1B |
| $l_3$ – ukupna duljina | ≥ 150 | |
| $l_1$ – duljina uskog paralelnog dijela | 80 ± 2 | 60 ± 0,5 |
| $r$ – polumjer | 20…25 | ≥ 60 |
| $l_2$ – udaljenost između proširenog paralelnog dijela | 104…113 | 106…120 |
| $b_2$ – širina pri kraju | 20 ± 0,2 | |
| $b_1$ – širina uskog dijela | 10 ± 0,2 | |
| $h$ – debljina | 4 ± 0,2 | |
| $L_0$ – početna mjerna duljina | 50 ± 0,5 | |
| $L$ – početna udaljenost između čeljusti | 115 ± 1 | |

### *5.3.2. Oprema za statičko vlačno ispitivanje*

Za potrebe statično vlačnog ispitivanja u ovom diplomskom radu korištena je kidalica u Laboratoriju za polimere i kompozite Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Statičko vlačno ispitivanje provedeno je na univerzalnoj kidalici (Slika 5.11. i 5.12.) sljedećih karakteristika:

Proizvođač: VEB Thüringer Industriewerk

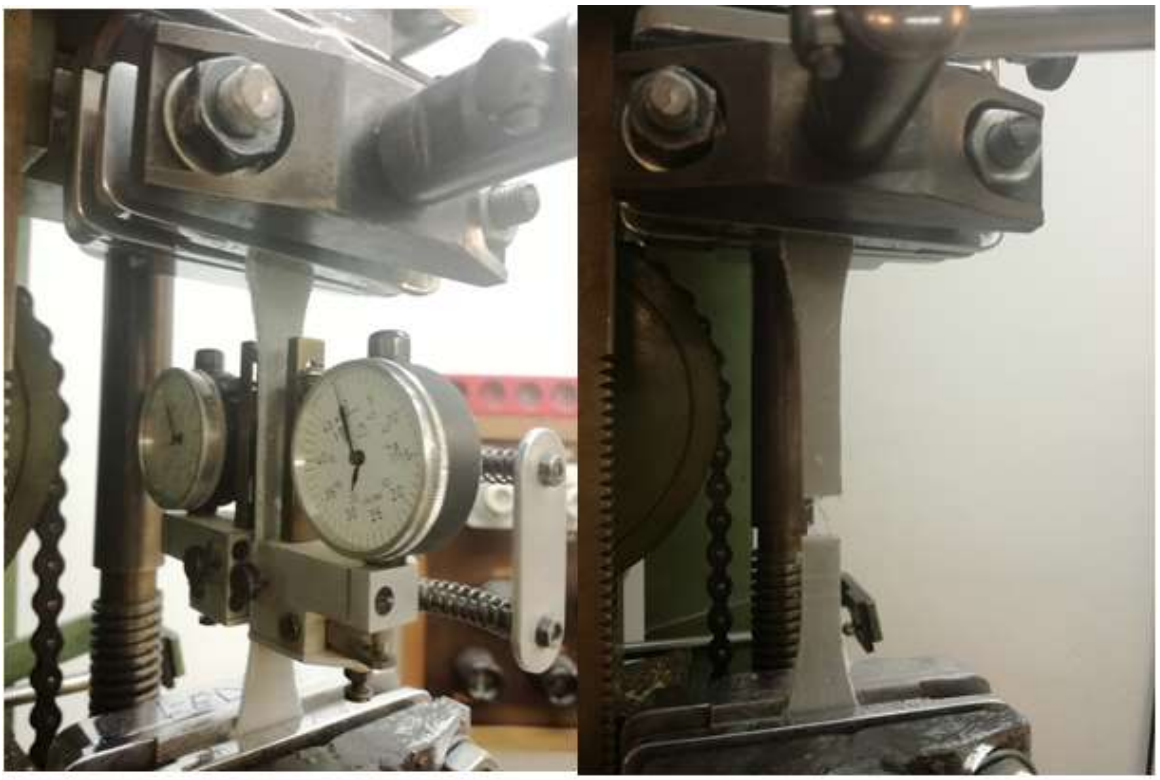
Vrsta: 2131

Nazivna sila: 0 – 2400 N

Razred točnosti: 1. Klasa



**Slika 5.11. Kidalica za statično vlačno ispitivanje**



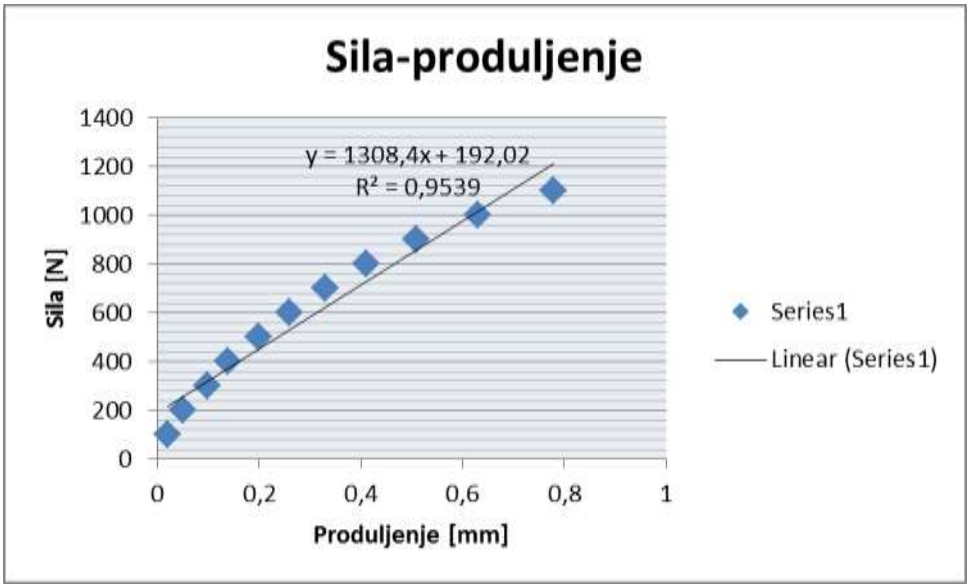
**Slika 5.12. Statičko vlačno ispitivanje na kidalici**

### *5.3.3. Rezultati statično vlačnog ispitivanja*

U Tablica 10, Tablica 11, Tablica 12, Tablica 13 i Tablica 14 i prikazane su vrijednosti produljena epruveta ojačanih lanenim vlaknima mjerene s lijeve i desne strane, te izračunate njihove srednje vrijednosti produljenja u ovisnosti o sili. Za svaku epruvetu dan je prikaz dijagrama sila-produljenje. Brzina ispitivanja je bila 5 mm/min.

**Tablica 10. Produljenja epruvete 1 pri statičkom vlačnom pokusu**

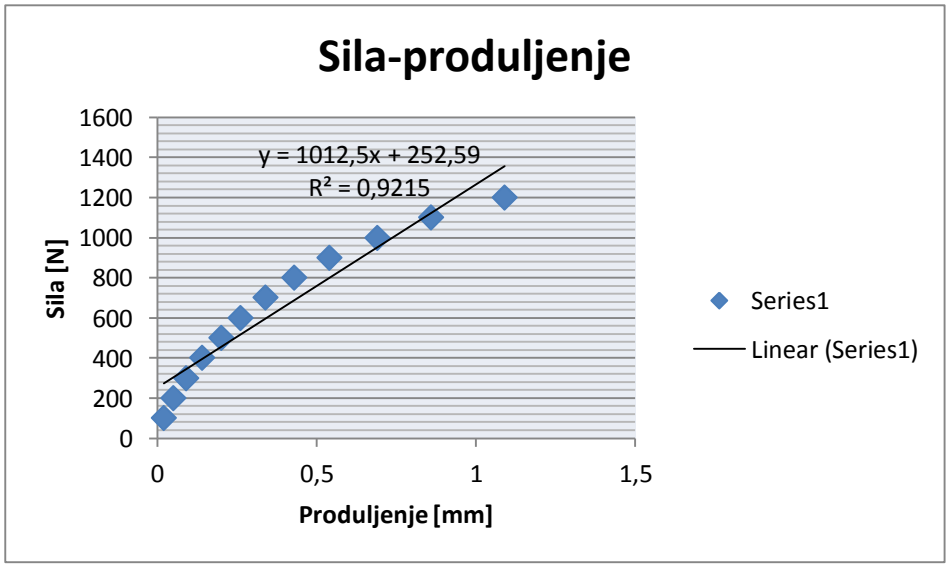
| Epruveta 1 | | | |
|---|---|---|---|
| Produljenje lijevo [mm] | Produljenje desno [mm] | Produljenje srednje [mm] | Sila *F* [N] |
| 0,03 | 0,01 | 0,02 | 100 |
| 0,06 | 0,04 | 0,05 | 200 |
| 0,11 | 0,08 | 0,10 | 300 |
| 0,16 | 0,12 | 0,14 | 400 |
| 0,22 | 0,18 | 0,20 | 500 |
| 0,28 | 0,24 | 0,26 | 600 |
| 0,34 | 0,31 | 0,33 | 700 |
| 0,42 | 0,39 | 0,41 | 800 |
| 0,53 | 0,49 | 0,51 | 900 |
| 0,65 | 0,62 | 0,63 | 1000 |
| 0,80 | 0,76 | 0,78 | 1100 |




**Slika 5.13. Dijagram sila – produljenje za epruvetu 1**

**Tablica 11. Produljenja epruvete 2 pri statičkom vlačnom pokusu**

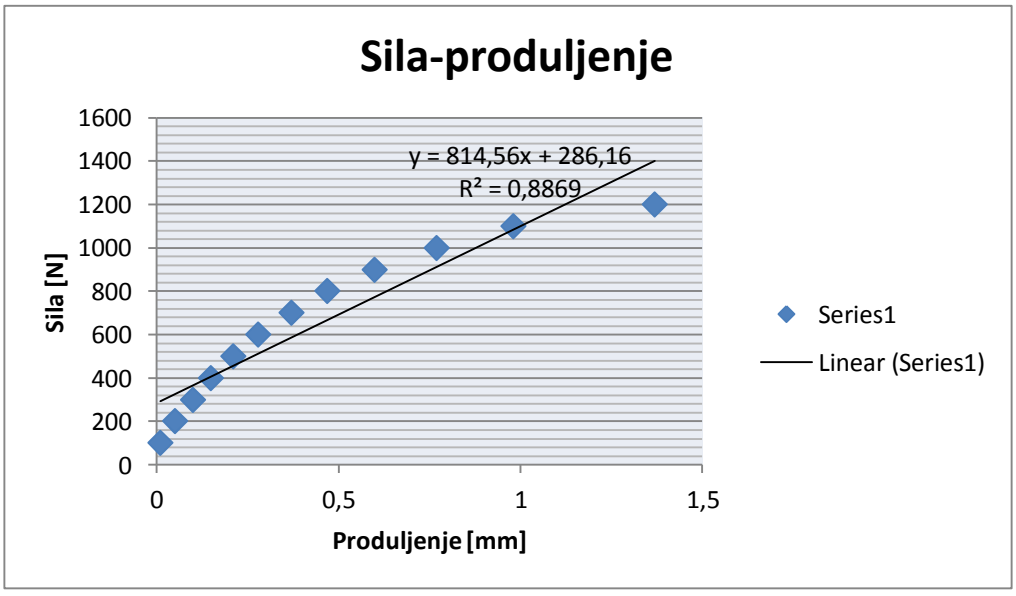
| Epruveta 2 | | | |
|---|---|---|---|
| Produljenje lijevo [mm] | Produljenje desno [mm] | Produljenje srednje [mm] | Sila *F* [N] |
| 2 | 1 | 0,02 | 100 |
| 6 | 3 | 0,05 | 200 |
| 11 | 7 | 0,09 | 300 |
| 16 | 12 | 0,14 | 400 |
| 21 | 18 | 0,20 | 500 |
| 28 | 24 | 0,26 | 600 |
| 35 | 32 | 0,34 | 700 |
| 44 | 41 | 0,43 | 800 |
| 55 | 52 | 0,54 | 900 |
| 70 | 67 | 0,69 | 1000 |
| 87 | 85 | 0,86 | 1100 |
| 110 | 108 | 1,09 | 1200 |




**Slika 5.14. Dijagram sila – produljenje za epruvetu 2**

**Tablica 12. Produljenja epruvete 3 pri statičkom vlačnom pokusu**

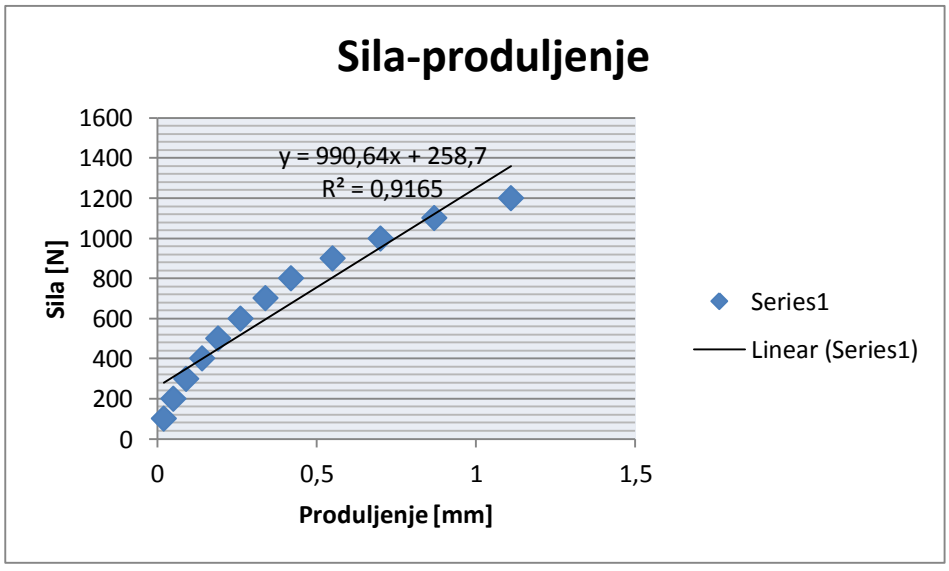
| Epruveta 3 | | | |
|---|---|---|---|
| Produljenje lijevo [mm] | Produljenje desno [mm] | Produljenje srednje [mm] | Sila *F* [N] |
| 0,01 | 0,01 | 0,01 | 100 |
| 0,06 | 0,04 | 0,05 | 200 |
| 0,11 | 0,08 | 0,10 | 300 |
| 0,16 | 0,13 | 0,15 | 400 |
| 0,22 | 0,19 | 0,21 | 500 |
| 0,30 | 0,26 | 0,28 | 600 |
| 0,38 | 0,35 | 0,37 | 700 |
| 0,48 | 0,45 | 0,47 | 800 |
| 0,62 | 0,58 | 0,60 | 900 |
| 0,79 | 0,75 | 0,77 | 1000 |
| 1,00 | 0,95 | 0,98 | 1100 |
| 1,38 | 1,35 | 1,37 | 1200 |




**Slika 5.15. Dijagram sila – produljenje za epruvetu 3**

**Tablica 13. Produljenja epruvete 4 pri statičkom vlačnom pokusu**

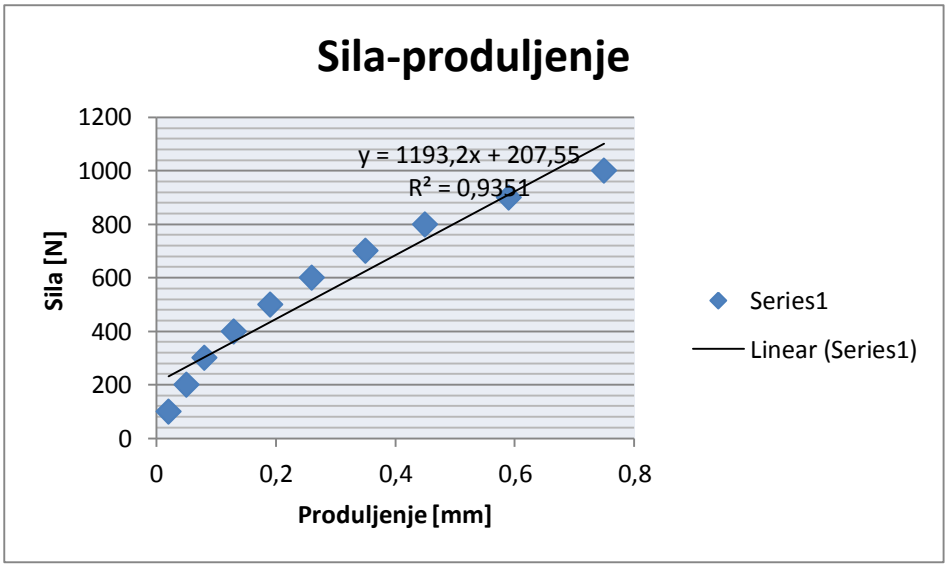
| Epruveta 4 | | | |
|---|---|---|---|
| Produljenje lijevo [mm] | Produljenje desno [mm] | Produljenje srednje [mm] | Sila *F* [N] |
| 0,02 | 0,01 | 0,02 | 100 |
| 0,07 | 0,02 | 0,05 | 200 |
| 0,11 | 0,06 | 0,09 | 300 |
| 0,16 | 0,11 | 0,14 | 400 |
| 0,22 | 0,16 | 0,19 | 500 |
| 0,29 | 0,23 | 0,26 | 600 |
| 0,37 | 0,31 | 0,34 | 700 |
| 0,44 | 0,40 | 0,42 | 800 |
| 0,57 | 0,52 | 0,55 | 900 |
| 0,72 | 0,68 | 0,70 | 1000 |
| 0,89 | 0,85 | 0,87 | 1100 |
| 1,13 | 1,09 | 1,11 | 1200 |




**Slika 5.16. Dijagram sila – produljenje za epruvetu 4**

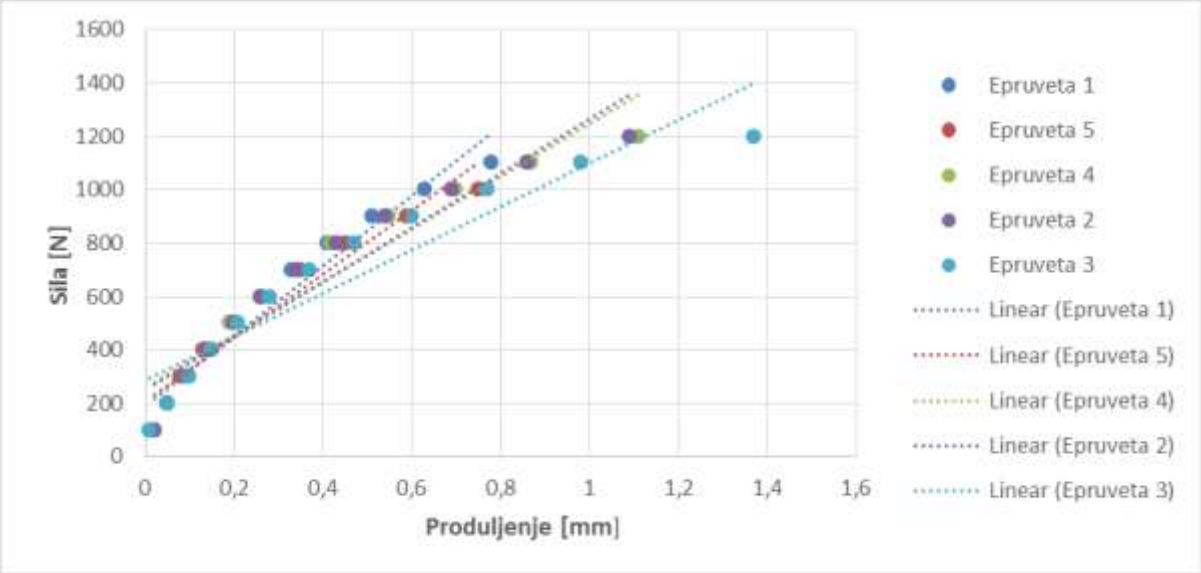
**Tablica 14. Produljenja epruvete 5 pri statičkom vlačnom pokusu**

| Epruveta 5 | | | |
|---|---|---|---|
| Produljenje lijevo [mm] | Produljenje desno [mm] | Produljenje srednje [mm] | Sila *F* [N] |
| 0,03 | 0,01 | 0,02 | 100 |
| 0,07 | 0,02 | 0,05 | 200 |
| 0,11 | 0,04 | 0,08 | 300 |
| 0,17 | 0,09 | 0,13 | 400 |
| 0,23 | 0,15 | 0,19 | 500 |
| 0,30 | 0,22 | 0,26 | 600 |
| 0,38 | 0,31 | 0,35 | 700 |
| 0,48 | 0,42 | 0,45 | 800 |
| 0,63 | 0,55 | 0,59 | 900 |
| 0,78 | 0,72 | 0,75 | 1000 |




**Slika 5.17. Dijagram sila – produljenje za epruvetu 5**

Na slici 5.18. prikazan je dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za ispitanih svih 5 epruveta. Iz dijagrama se može zaključiti kako ne postoje značajna odstupanja u ponašanju ispitnih epruveta. U Tablica 15 su prikazana mehanička svojstva pojedinih epruveta.




**Slika 5.18. Dijagram sila – produljenje za sve ispitane uzorke**

**Tablica 15. Dimenzije i mehanička svojstva pojedinih epruveta**

| Epruveta | $h$ [mm] | $b$ [mm] | $F/f$ | $L$ [mm] | $F_{max}$ [N] | $E$ [N/mm$^2$] | $R_m$ [N/mm$^2$] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3,56 | 10,14 | 1308,4 | 50 | 1270 | 1812 | 35,2 |
| 2 | 3,38 | 10,16 | 1012,5 | 50 | 1290 | 1474 | 37,6 |
| 3 | 3,48 | 9,78 | 814,56 | 50 | 1230 | 1197 | 36,1 |
| 4 | 3,48 | 9,84 | 990,64 | 50 | 1260 | 1446 | 36,8 |
| 5 | 3,56 | 9,48 | 1193,2 | 50 | 1170 | 1768 | 34,7 |
| $\bar{x}$ | | | | | | 1539,40 | 36,08 |
| $S$ | | | | | | 253,38 | 1,17 |

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena vlačne čvrstoće kompozitnog materijala, $\mu_{Rm,vl}$ uz interval vjerodostojnosti 1 - 0,95 = α .
Za kompozit ojačan lanenim vlaknima iznos intervalne procjene vlačne čvrstoće kompozitnog materijala iznosi:

$$34{,}63\ \text{N/mm}^2 < \mu_{Rm,vl} < 37{,}53\ \text{N/mm}^2 \qquad \textbf{(2)}$$

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena vlačnog modula kompozitnog materijala, $E_{vl}$ uz interval vjerodostojnosti 1 - 0,95 = α .

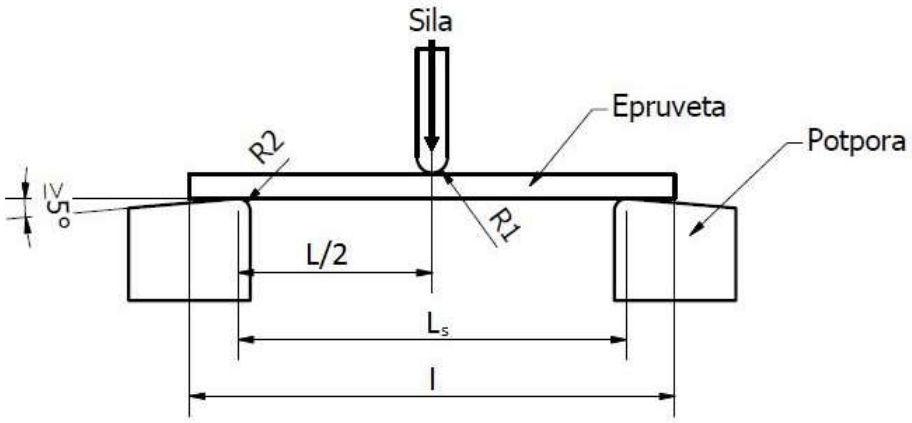
Za kompozit ojačan lanenim vlaknima iznos intervalne procjene vlačnog modula kompozitnog materijala iznosi:

$$122{,}84\ \text{N/mm}^2 < \mu_{E,vl} < 1853{,}96\ \text{N/mm}^2 \qquad \textbf{(3)}$$

## 5.4. Savojno ispitivanje

### *5.4.1. Opis savojnog ispitivanja*

Savojno ispitivanje ili ispitivanje savojne čvrstoće polimernih kompozita provodi se također na univerzalnoj kidalici i to najčešće prema normi ISO 178. Epruvete se postavljaju na napravu za trotočkasto ispitivanje savojne čvrstoće (Slika 5.19.), te se povećava sila savijanja sve do pojave loma. [41]




**Slika 5.19. Savojno ispitivanje [41]**

gdje je:
$L_s$ – razmak između oslonaca

$l$ – duljina epruvete

$R_1$ = 5 mm ± 0,1 mm

$R_2$ = 5 mm ± 0,2 mm

Razmak između oslonaca računa se prema jednadžbi (4):

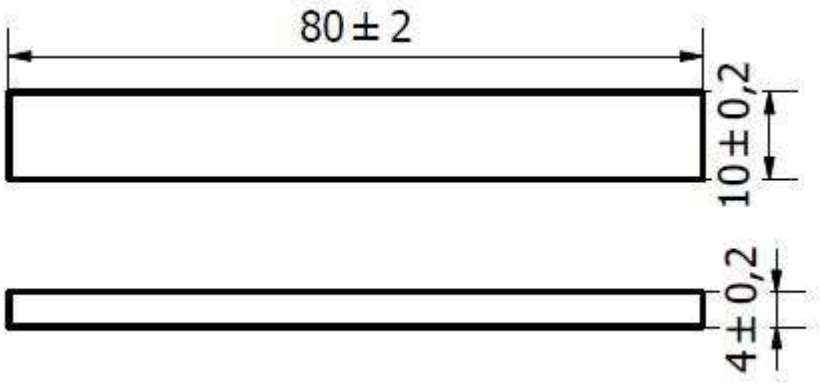
$$Ls = (16 \pm 1) \cdot \overline{h} \qquad \textbf{(4)}$$

gdje je:

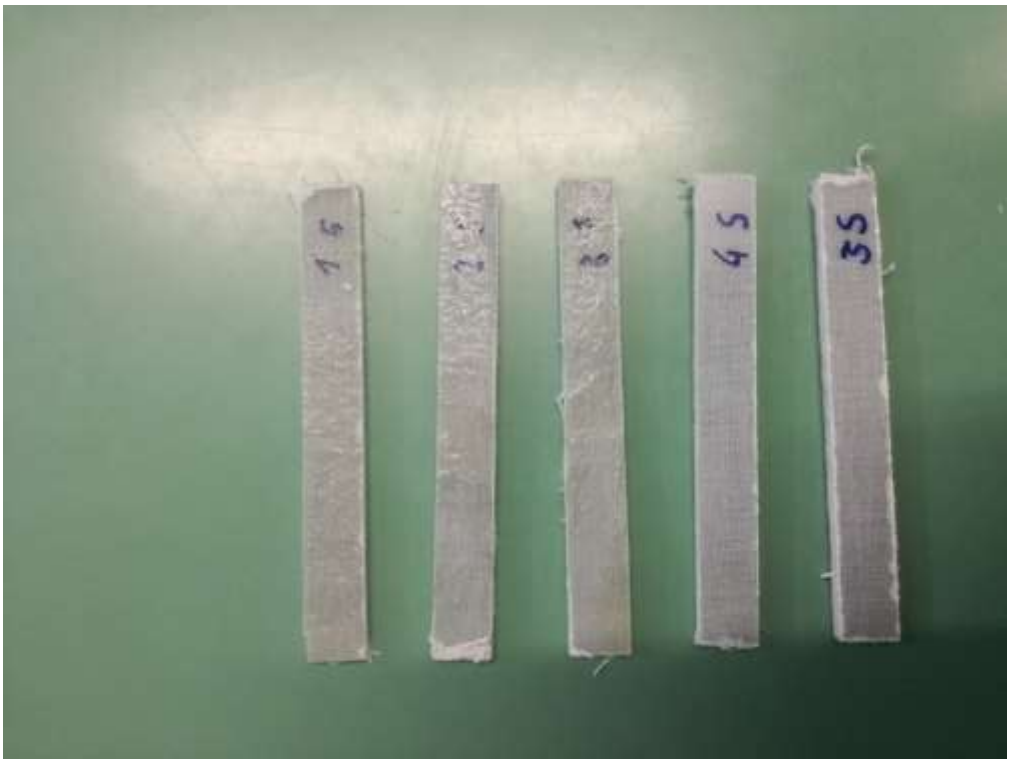
$L$s – razmak između oslonaca

$\overline{h}$ – aritmetička sredina debljina svih epruveta

Tijekom ispitivanja se bilježi progib epruvete kako bi se kasnije mogao odrediti i savojni modul elastičnosti. Savojno ispitivanje uglavnom je namijenjeno za utvrđivanje graničnog naprezanja pri kojem dolazi do loma ukoliko je materijal napregnut na savijanje.[41] Dimenzije epruveta propisuje norma i prikazane su na Slika 5.20.




**Slika 5.20. Epruveta za ispitivanje savojne čvrstoće [41]**




**Slika 5.21. Epruvete spremne za savojno ispitivanje**

### *5.4.2. Oprema za statičko savojno ispitivanje*

Za potrebe savojnog ispitivanja u ovom diplomskom radu korištena je kidalica u Laboratoriju za polimere i kompozite Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Savojno ispitivanje provedeno je na univerzalnoj kidalici (Slika 5.22. i 5.23.) sljedećih karakteristika:

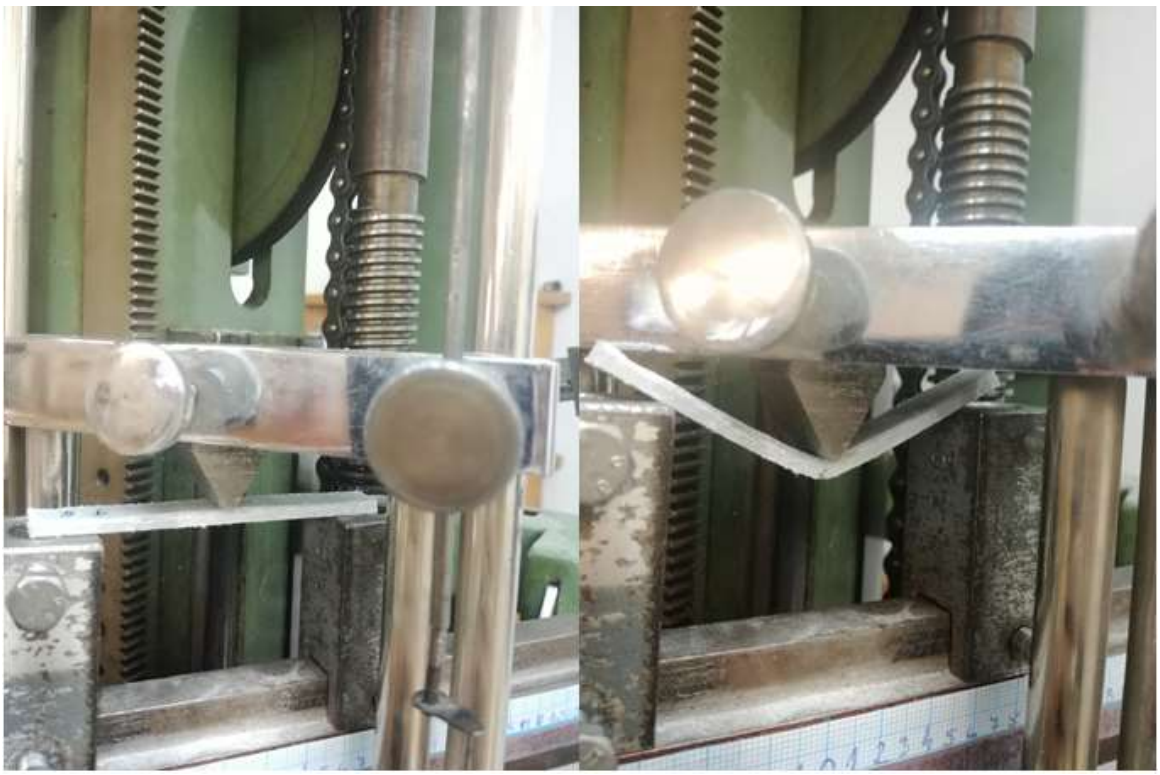
Proizvođač: VEB Thüringer Industriewerk

Mjerno područje: 0 – 950 N

Razred točnosti: 1. Klasa



**Slika 5.22. Kidalica za savojno ispitivanje**



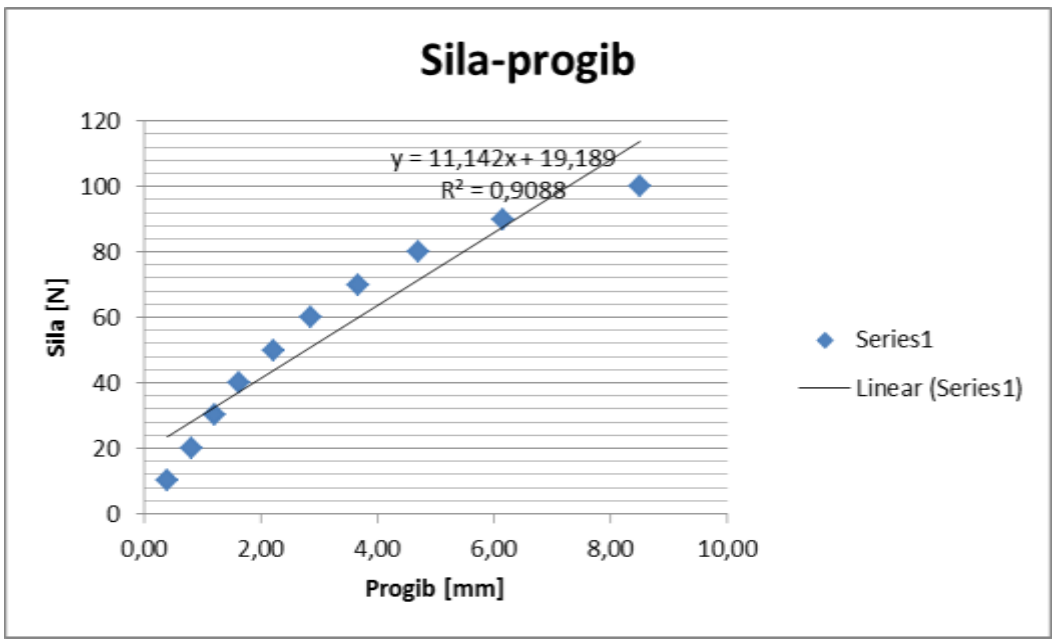
**Slika 5.23. Savojno ispitivanje na kidalici**

### *5.4.3 Rezultati savojnog ispitivanja*

U Tablica 16, Tablica 17, Tablica 18, Tablica 19 i Tablica 20. prikazani su progibi kompozitnih epruveta ojačanih lanenim vlaknima. u ovisnosti o savojnoj sili. Progibi za prvu epruvetu su izmjereni deset puta u razmaku opterećenja od 10 N, dok su progibi za preostale četiri epruvete izmjereni u razmaku opterećenja od 6 N kako bi se dobila finija podjela i preciznije mjerenje. Vrijednosti progiba i opterećenja za svaku epruvetu prikazane su dijagramima sila-progib.

**Tablica 16. Progibi epruvete 1 pri opterećenju**

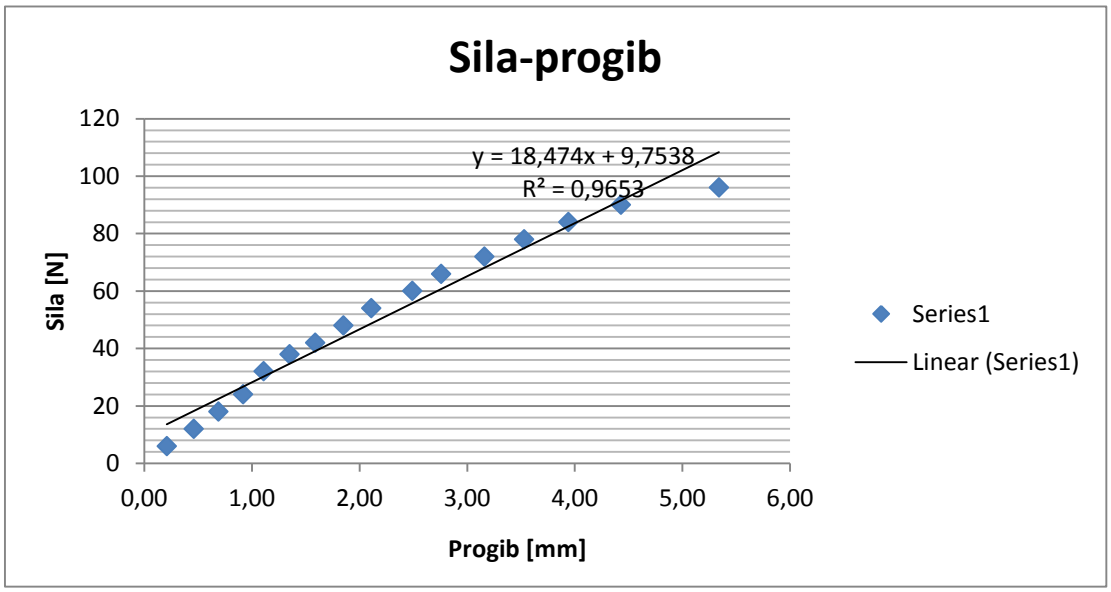
| **Epruveta 1** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ***h*** **[mm]** | ***b*** **[mm]** | ***L*** **[mm]** | **Progib,** ***f*** **[mm]** | **Sila,** ***F*** **[N]** |
| 3,48 | 9,94 | 56 | 0,40 | 10 |
| | | | 0,80 | 20 |
| | | | 1,21 | 30 |
| | | | 1,63 | 40 |
| | | | 2,22 | 50 |
| | | | 2,86 | 60 |
| | | | 3,67 | 70 |
| | | | 4,69 | 80 |
| | | | 6,16 | 90 |
| | | | 8,50 | 100 |




**Slika 5.24. Dijagram sila - progib za epruvetu 1**

**Tablica 17. Progibi epruvete 2 pri opterećenju**

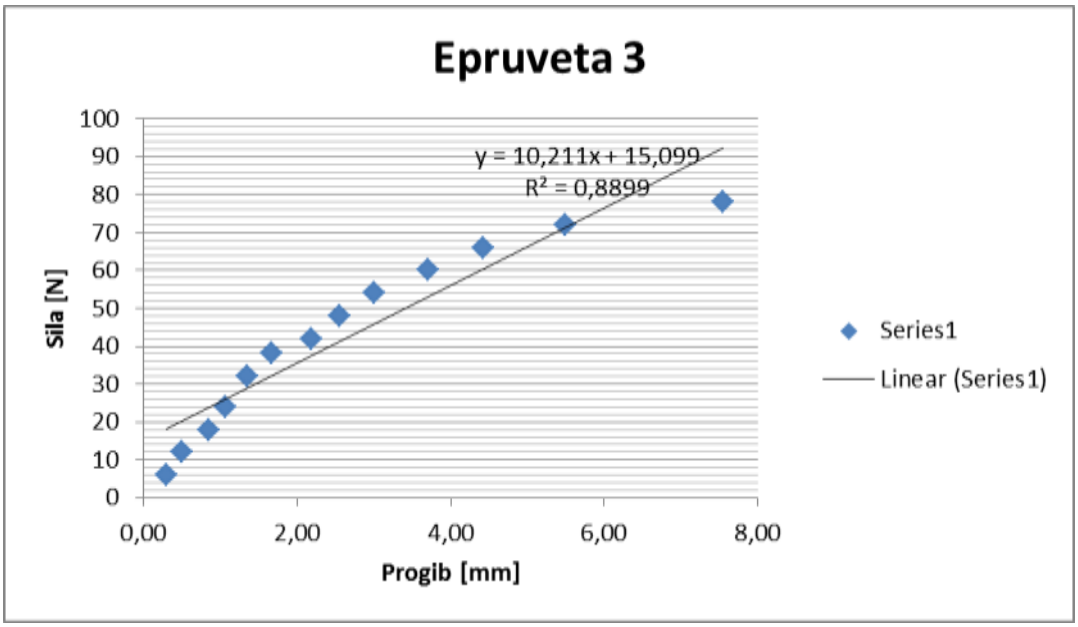
| Epruveta 2 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ***h*** **[mm]** | ***b*** **[mm]** | ***L*** **[mm]** | **Progib,** ***f*** **[mm]** | **Sila,** ***F*** **[N]** |
| 3,90 | 9,88 | 56 | 0,21 | 6 |
| | | | 0,46 | 12 |
| | | | 0,69 | 18 |
| | | | 0,92 | 24 |
| | | | 1,11 | 30 |
| | | | 1,35 | 36 |
| | | | 1,59 | 42 |
| | | | 1,85 | 48 |
| | | | 2,11 | 54 |
| | | | 2,49 | 60 |
| | | | 2,76 | 66 |
| | | | 3,16 | 72 |
| | | | 3,53 | 78 |
| | | | 3,94 | 84 |
| | | | 4,43 | 90 |
| | | | 5,34 | 96 |




**Slika 5.25. Dijagram sila - progib za epruvetu 2**

**Tablica 18. Progibi epruvete 3 pri opterećenju**

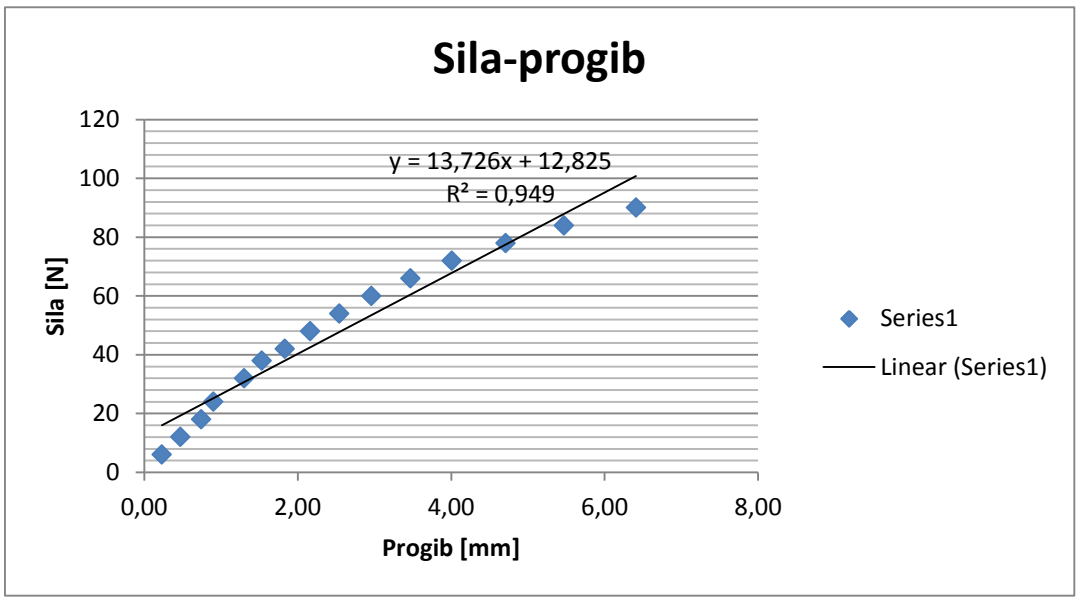
| **Epruveta 3** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ***h*** **[mm]** | ***b*** **[mm]** | ***L*** **[mm]** | **Progib,** ***f*** **[mm]** | **Sila,** ***F*** **[N]** |
| 3,30 | 9,90 | 56 | 0,29 | 6 |
| | | | 0,50 | 12 |
| | | | 0,85 | 18 |
| | | | 1,06 | 24 |
| | | | 1,35 | 30 |
| | | | 1,67 | 36 |
| | | | 2,18 | 42 |
| | | | 2,56 | 48 |
| | | | 3,00 | 54 |
| | | | 3,70 | 60 |
| | | | 4,43 | 66 |
| | | | 5,50 | 72 |
| | | | 7,55 | 78 |




**Slika 5.26. Dijagram sila - progib za epruvetu 3**

**Tablica 19. Progibi epruvete 4 pri opterećenju**

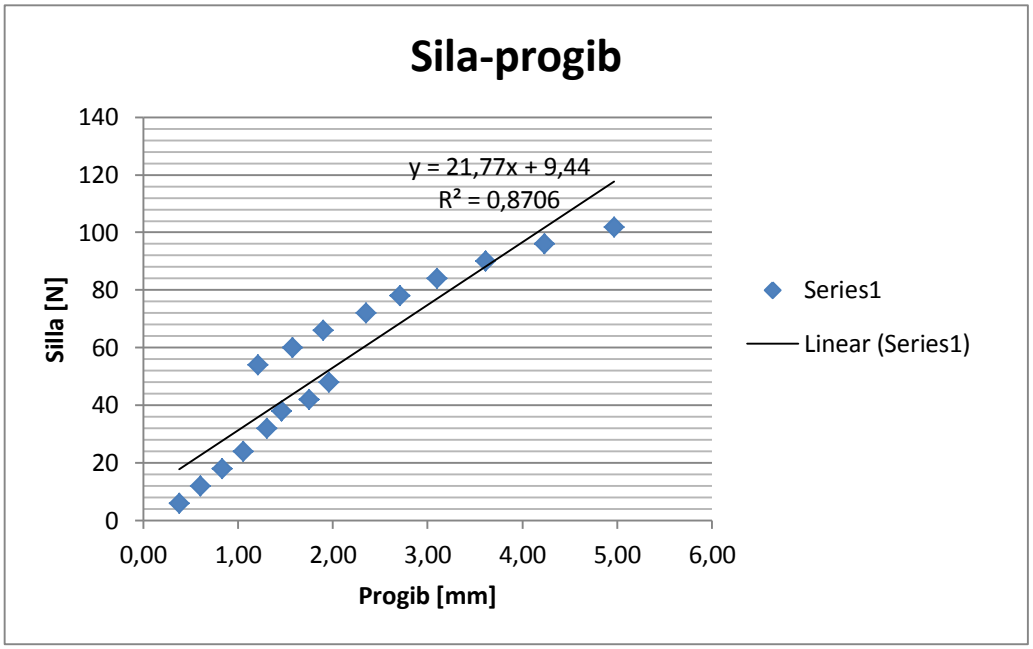
| Epruveta 4 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ***h*** **[mm]** | ***b*** **[mm]** | ***L*** **[mm]** | **Progib,** ***f*** **[mm]** | **Sila,** ***F*** **[N]** |
| 3,36 | 9,94 | 56 | 0,23 | 6 |
| | | | 0,47 | 12 |
| | | | 0,74 | 18 |
| | | | 0,90 | 24 |
| | | | 1,30 | 30 |
| | | | 1,53 | 36 |
| | | | 1,83 | 42 |
| | | | 2,16 | 48 |
| | | | 2,54 | 54 |
| | | | 2,96 | 60 |
| | | | 3,47 | 66 |
| | | | 4,01 | 72 |
| | | | 4,71 | 78 |
| | | | 5,47 | 84 |
| | | | 6,41 | 90 |




**Slika 5.27. Dijagram sila - progib za epruvetu 4**

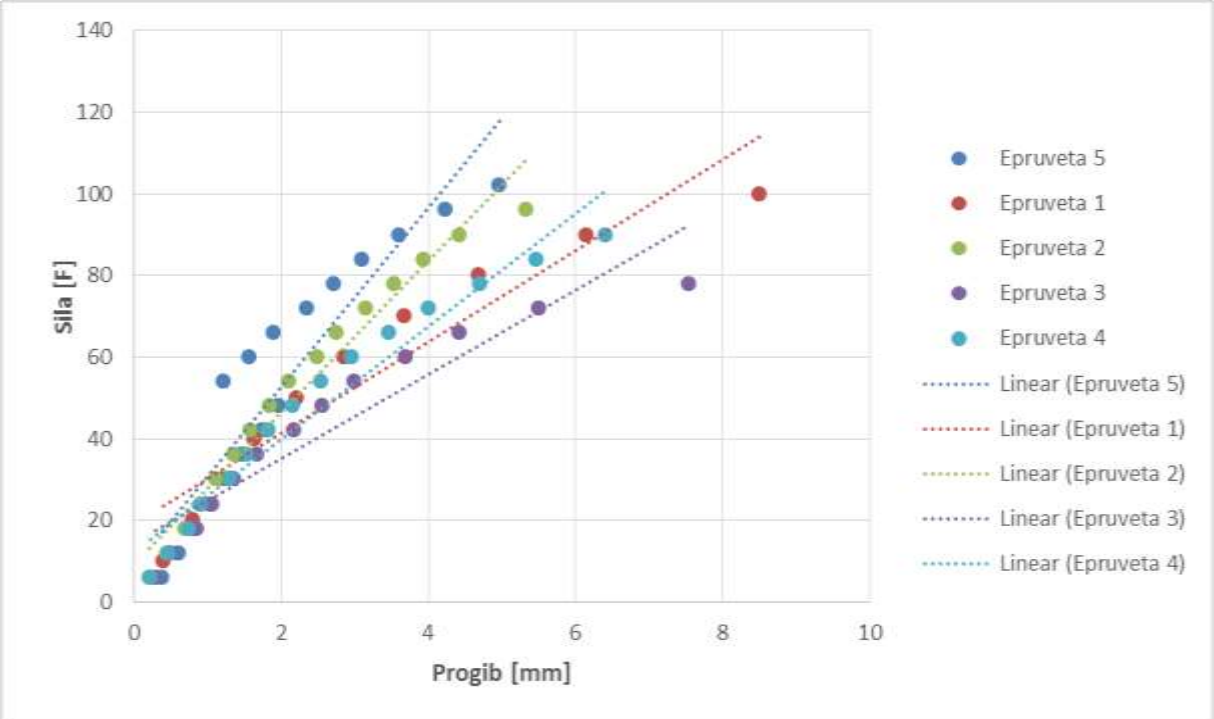
**Tablica 20. Progibi epruvete 5 pri opterećenju**

| **Epruveta 5** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ***h*** **[mm]** | ***b*** **[mm]** | ***L*** **[mm]** | **Progib** ***f*** **[mm]** | **Sila,** ***F*** **[N]** |
| 3,68 | 10,04 | 56 | 0,38 | 6 |
| | | | 0,60 | 12 |
| | | | 0,83 | 18 |
| | | | 1,05 | 24 |
| | | | 1,30 | 30 |
| | | | 1,46 | 36 |
| | | | 1,75 | 42 |
| | | | 1,96 | 48 |
| | | | 1,21 | 54 |
| | | | 1,57 | 60 |
| | | | 1,90 | 66 |
| | | | 2,35 | 72 |
| | | | 2,71 | 78 |
| | | | 3,10 | 84 |
| | | | 3,61 | 90 |
| | | | 4,23 | 96 |
| | | | 4,97 | 102 |




**Slika 5.28. Dijagram sila - progib za epruvetu 5**

Na slici 5.29. prikazan je dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za ispitanih svih 5 epruveta. Iz dijagrama se može zaključiti kako ne postoje značajna odstupanja u ponašanju ispitnih epruveta. Epruveta 5 pokazuje odstupanja, no to je vjerojatno rezultat pogreške prilikom mjerenja, ako bi se tri mjerenja za koja se pretpostavlja da su pogrešna odbacila epruveta 5 ne bi imala značajnija odstupanja od ostalih ispitnih uzoraka. U Tablica 21. su prikazana mehanička svojstva pojedinih epruveta.




**Slika 5.29. Dijagram sila - progib za sve ispitne uzorke**

**Tablica 21. Dimenzije i mehanička svojstva pojedinih epruveta**

| EPRUVETA | $h$ [mm] | $b$ [mm] | $F/f$ | $L$ [mm] | $E$ [N/mm$^2$] | $R_{ms}$ [N/mm$^2$] | $F_{max}$ [N] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3,48 | 9,94 | 11,142 | 56 | 1167,7 | 69,8 | 100 |
| 2 | 3,9 | 9,88 | 18,474 | 56 | 1383,9 | 64,8 | 116 |
| 3 | 3,3 | 9,9 | 10,211 | 56 | 1260,1 | 67,0 | 86 |
| 4 | 3,36 | 9,94 | 13,726 | 56 | 1598,2 | 80,8 | 108 |
| 5 | 3,698 | 10,04 | 21,770 | 56 | 1882,5 | 72,2 | 118 |
| $\bar{x}$ | | | | | 1458,5 | 70,9 | |
| $S$ | | | | | 286,70 | 5,54 | |

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena savojne čvrstoće kompozitnog materijala, $\mu_{Rm,s}$ uz interval vjerodostojnosti 1 - 0,95 = α .

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima iznos intervalne procjene savojne čvrstoće kompozitnog materijala iznosi:

$$64{,}02\ \mathrm{N/mm^2} < \mu_{Rm,s} < 77{,}78\ \mathrm{N/mm^2} \quad \textbf{(5)}$$

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena savojnog modula kompozitnog materijala, $E_s$ uz interval vjerodostojnosti 1 - 0,95 = α .

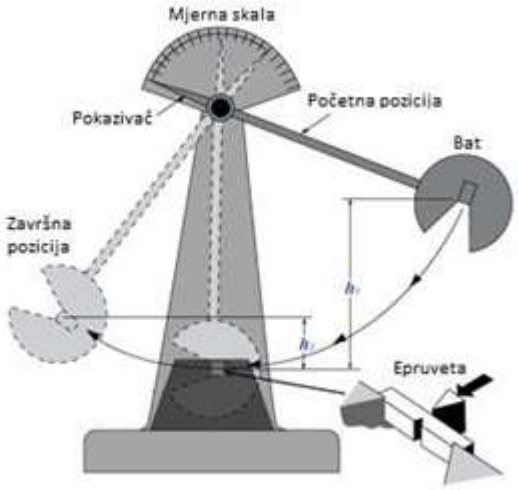
Za kompozit ojačan lanenim vlaknima iznos intervalne procjene savojnog modula kompozitnog materijala iznosi:

$$1102{,}52\ \mathrm{N/mm^2} < \mu_{E,s} < 1814{,}48\ \mathrm{N/mm^2} \quad \textbf{(6)}$$

## 5.5. Ispitivanje žilavosti

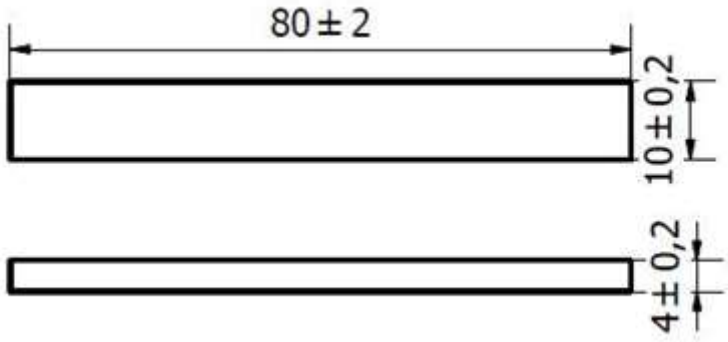
### *5.5.1. Opis ispitivanja žilavosti*

Žilavost se ispituje ukoliko su materijali u konstrukciji izloženi udarnom opterećenju. Žilavost je najlakše odrediti ispitivanjem udarnog rada loma na uređaju koji se naziva Charpyjev bat (Slika 5.30). [41]




**Slika 5.30. Charpyjev bat [41]**

Glava bata se postavlja u početnu poziciju na određenu visinu, $h_1$ te se zatim ispušta da udari epruvetu. Nakon što bat udari epruvetu, doseže određenu visinu u stanju mirovanja, $h_2$, a pritom zaustavlja pokazivač na određenoj vrijednosti na mjernoj skali. Na temelju tih dviju vrijednosti visina bata u stanju mirovanja i mase bata, na mjernoj skali se očitava iznos žilavosti. Točnije, razlika potencijalnih energija glave bata u stanju mirovanja prije i nakon udarca jednaka je energiji utrošenoj na lom uzorka, odnosno jednaka je udarnom radu loma. Ispitivanje se provodi prema normi ISO 179-1. Norma propisuje i dimenzije epruveta za ispitivanje, a koje su prikazane na Slika 5.31. [41]




**Slika 5.31. Dimenzije epruveta za ispitivanje žilavosti [41]**

### *5.5.2. Oprema za ispitivanje žilavosti*

Za potrebe ispitivanja žilavosti u ovom diplomskom radu korišten je Charpyjev bat u Laboratoriju za polimere i kompozite Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Ispitivanje žilavosti provedeno je na Charpyjevom batu (Slika 5.32) proizvođača Karl Frank nazivne udarne sile od 4 J.



**Slika 5.32. Charpyjev bat proizvođača Karl Frank**

### *5.5.3 Rezultati ispitivanja žilavosti*

Rezultati ispitivanja žilavosti kompozitnog materijala ojačanog lanenim vlaknima, tj. mjerenja udarnog rada loma Charpyjevim batom prikazani su u Tablica 22. Prilikom ispitivanja Charpyjevim batom udarna sila je iznosila 40 kpcm što odgovara sili od 4 J. Na Charpyjevom batu očitana je vrijednost energije apsorbirane uslijed loma epruvete. Očitane vrijednosti su u kpcm, te ih je kao takve trebalo pretvoriti u kJ/m$^2$.

**Tablica 22. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma**

| Epruveta | $b$ [mm] | $h$ [mm] | $L$ [mm] | $E_{cu}$ [kpcm] | $E_{cu}$ [J] | $A_{cu}$ [J/mm$^2$] | $A_{cu}$ [kJ/m$^2$] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 9,90 | 3,62 | 62 | 8,40 | 0,86 | 0,024 | 23,90 |
| 2 | 9,96 | 3,82 | 62 | 8,80 | 0,90 | 0,024 | 23,59 |
| 3 | 9,94 | 3,72 | 62 | 11,00 | 1,12 | 0,030 | 30,33 |
| 4 | 9,96 | 3,66 | 62 | 11,10 | 1,13 | 0,031 | 31,05 |
| 5 | 9,98 | 3,62 | 62 | 10,00 | 1,02 | 0,028 | 28,23 |
| $\bar{x}$ | | | | | | | 27,42 |
| $S$ | | | | | | | 3,51 |

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena udarnog rada loma kompozitnog materijala, $\mu_{Acu}$ uz interval vjerodostojnosti 1 - 0,95 = α .

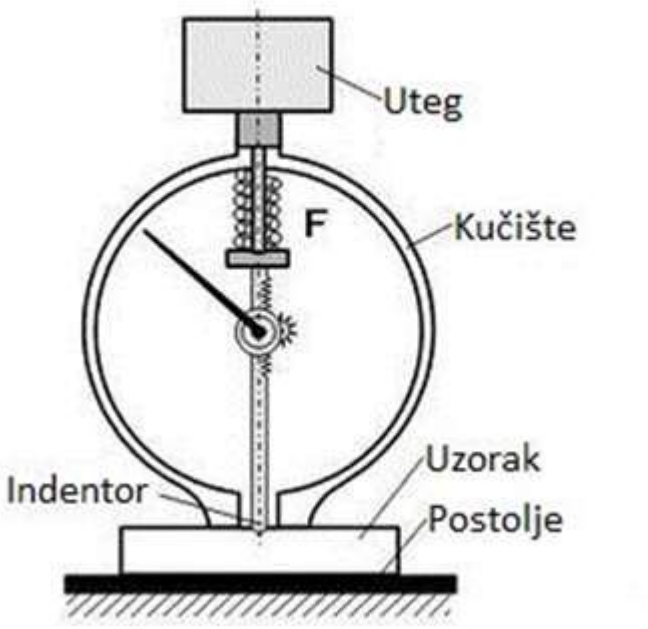
Za kompozit ojačan lanenim vlaknima iznos intervalne procjene udarnog rada loma kompozitnog materijala iznosi:

$$23{,}06\ \text{kJ/m}^2 < \mu_{Acu} < 31{,}78\ \text{kJ/m}^2 \qquad \textbf{(7)}$$

## 5.6. Ispitivanje tvrdoće

### *5.6.1. Opis ispitivanja tvrdoće*

Pod pojmom tvrdoća materijala podrazumijeva se otpor koji materijal pruža prodiranju nekog tvrđeg materijala u njegovu površinu. Tvrdoća materijala predstavlja mehaničko svojstvo materijala. Tvrdoća nije osnovno svojstvo materijala, ali je u vezi s elastičnim i plastičnim svojstvima.[42] Postoje različiti postupci mjerenja tvrdoće materijala, no za potrebe ovog diplomskog rada tvrdoća je mjerena prema Shoreu (slika 5.33.) prema normi DIN 5345.6.




**Slika 5.33. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće prema Shoreu [41]**

Tvrdoća je mjerena sukladno normi DIN 5345.6 utiskivanjem kuglice promjera 5 mm pod djelovanjem sile od 49 N. Na uređaju se očitava dubina prodiranja za vrijeme djelovanja opterećenja nakon: 10 s, 30 s, 60 s, a tvrdoća se izračunava prema:

$$H = \frac{1}{D\pi}\frac{F}{h}, \frac{N}{mm^2} \quad \textbf{(8)}$$

gdje je:

*H*- tvrdoća, [N/$mm^2$]

*D* – promjer kuglice, [mm]

*F* – sila opterećenja, [ N ]

*h* – dubina prodiranja, [mm].

### *5.6.2 Uređaj za ispitivanje tvrdoće*

Za potrebe ispitivanja tvrdoće u ovom diplomskom radu korištena je tvrdomjeru Laboratoriju za polimere i kompozite Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno na tvrdomjeru (Slika 5.34.) sljedećih karakteristika:

Proizvođač: Zwick & Co.

Sila utiskivanja: 49 N

Korekcijski faktor: 0,01



**Slika 5.34.Tvrdomjer za ispitivanje tvrdoće**

### *5.6.3. Rezultati mjerenja*

Rezultati mjerenja tvrdoće nakon 10, 30 i 60 sekundi za kompozitni materijal ojačan lanenim vlaknima prikazani su u Tablica 23. Prilikom izračuna tvrdoće prema izrazu (8) dubine prodiranja kuglice h su promijenjene za korekcijski faktor. Naime, korekcijski faktor se primjenjuje zbog deformacije kućišta uređaja, a dat je od strane proizvođača. Korekcijski faktor za silu utiskivanja od 49 N iznosi 0,01.

**Tablica 23. Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće**

| Vrijeme djelovanja opterećenja | 10 s | | 30 s | | 60 s | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Mjerenje | *h* [mm] | Tvrdoća [N/mm$^2$] | *h* [mm] | Tvrdoća [N/mm$^2$] | *h* [mm] | Tvrdoća [N/mm$^2$] |
| 1. | 0,220 | 14,93 | 0,230 | 14,25 | 0,240 | 13,63 |
| 2. | 0,170 | 19,60 | 0,175 | 19,01 | 0,185 | 17,92 |
| 3. | 0,210 | 15,68 | 0,225 | 14,59 | 0,235 | 13,94 |
| 4. | 0,180 | 18,45 | 0,205 | 16,08 | 0,210 | 15,68 |
| 5. | 0,145 | 23,23 | 0,155 | 21,63 | 0,165 | 20,23 |
| 6. | 0,180 | 18,45 | 0,205 | 16,08 | 0,215 | 15,30 |
| 7. | 0,185 | 17,92 | 0,205 | 16,08 | 0,215 | 15,30 |
| 8. | 0,185 | 17,92 | 0,210 | 15,68 | 0,220 | 14,93 |
| 9. | 0,175 | 19,00 | 0,180 | 18,45 | 0,200 | 16,51 |
| 10. | 0,155 | 21,63 | 0,165 | 20,23 | 0,170 | 19,60 |
| | | $\bar{X}$=18,68 | | $\bar{X}$=17,21 | | $\bar{X}$=16,30 |
| | | *S*=2,46 | | *S*=2,48 | | *S*=2,56 |

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena tvrdoće kompozitnog materijala, uz interval vjerodostojnosti 1 - 0,95 = α.

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima iznos intervalne procjene tvrdoće kompozitnog materijala iznosi za vrijeme penetriranja od 10 sekundi:

$$16{,}52\ \mathrm{N/mm^2} < \mu_{H,10s} < 20{,}84\ \mathrm{N/mm^2} \qquad \textbf{(9)}$$

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima iznos intervalne procjene tvrdoće kompozitnog materijala iznosi za vrijeme penetriranja od 30 sekundi:

$$15{,}03\ \mathrm{N/mm^2} < \mu_{H,30s} < 19{,}39\ \mathrm{N/mm^2} \quad \textbf{(10)}$$

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima iznos intervalne procjene tvrdoće kompozitnog materijala iznosi za vrijeme penetriranja od 60 sekundi:

$$14{,}05\ \mathrm{N/mm^2} < \mu_{H,60s} < 18{,}54\ \mathrm{N/mm^2} \quad \textbf{(11)}$$

## 5.7. Ispitivanje gorivosti i samogasivosti

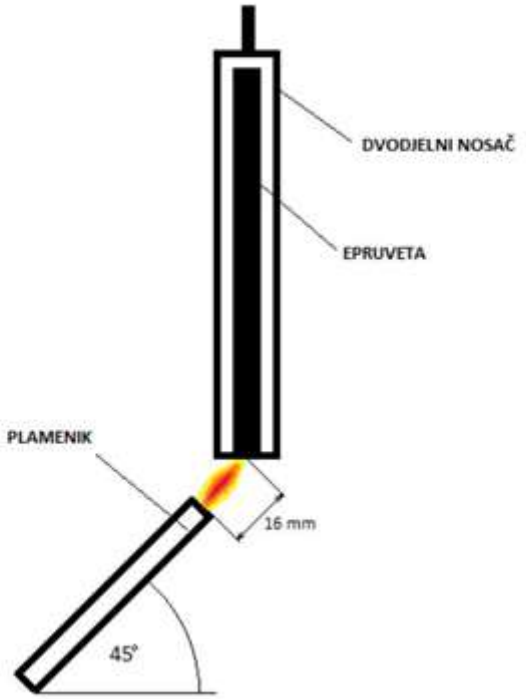
### *5.7.1. Opis ispitivanja gorivosti i samogasivosti*

Jedan od važnijih kriterija prilikom odabira materijala je njegova gorivost, odnosno zapaljivost. Organska priroda polimernih materijala uzrok je njihove nestabilnosti pri povišenim temperaturama što dovodi do promjene njihovih kemijskih i fizičkih svojstava. Kao posljedica toplinske razgradnje materijala mogu nastati niskomolekulni lako zapaljivi i otrovni spojevi, a što je s aspekta sigurnosti od posebna značaja.[43]

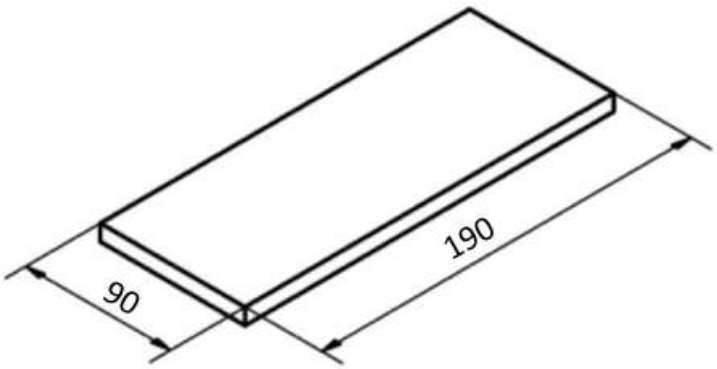
Postoji veliki broj testova namijenjenih pojedinačnim ili vrlo specifičnim namjenama polimernog materijala. Uobičajena klasifikacija materijala s obzirom na gorivost je:[43]

- **zapaljiv** - označava materijal koji je lagano upaljiv, pod normalnim uvjetima izgara brzo i burno
- **negoriv** - obično se odnosi na anorganske materijale
- **samogasiv** - materijal je zapaljiv, ali nakon odstranjivanja izvora zapaljenja dolazi do gašenja polimera. U ovu grupu spadaju i materijali koji se zagrijavanjem raspadaju na produkte koji sprječavaju dalje širenje plamena (npr. PVC).

Ispitivanje gorivosti i samogasivosti provodi se prema normi DIN 53 438. Ispitivanje se vrši prema skici sa Slika 5.35.




**Slika 5.35. Ispitivanje gorivosti i samogasivosti [41]**




**Slika 5.36. Dimenzije epruveta za ispitivanje gorivosti i samogasivosti [41]**

Uvjeti ispitivanja su sljedeći:

- ispituje se 10 epruveta propisanih dimenzija 190 mm x 90 mm (Slika 5.36.)
- debljina epruveta mora biti ujednačena po cijeloj dužini: $\pm 10\%$
- mjerne oznake na epruveti na 150 mm od donjeg ruba donja oznaka
- temperiranje 24 sata (RT 18-28 °C)
- ispituje se 5 epruveta, a ako se podaci jako rasipaju onda još 5
- plinski plamenik mora gorjeti minimalno 1 minutu prije početka ispitivanja;
- debljina epruvete se mjeri na 10, 70 i 130 mm
- izlaz plamenika mora biti udaljen 16 mm od donjeg ruba epruvete
- na epruvetu se plamenom djeluje 15 sekundi, pa se ukloni plamenik, pri tome se pazi da se ne zanemaruje plamen
- vrijeme se mjeri od $t = 0$ s, tj. od početka paljenja uzorka do gašenja vatre ili dok plamen ne dosegne mjernu oznaku na ispitnom tijelu
- ukoliko se nakon gašenja primijeti žarenje, mjeri se vrijeme dok ne prestane
- potrebno je zabilježiti razvija li se dim, kapa li rastaljeni materijal, otpadaju li komadići, čađi li, gore li i dijelovi koji su otpali, izgled ruba koji se tali, obostrano ili jednostrano gorenje, odbijanje plamena od ispitnog tijela, progorijevanje rupe, tijek gorenja
- nakon ispitivanja ohladiti okvir na sobnu temperaturu.

Rezultati ispitivanja uvrštavaju se u jednu od tri klase prikazane u Tablica 24.

**Tablica 24. Klase materijala nakon ispitivanja gorivosti i samogasivosti**

| **Klasa** | |
|---|---|
| K1 | Samogasiv (nije dosegnuta gornja mjerna oznaka) |
| K2 | Plamen dosegao gornju mjernu oznaku za $t > 20$ s |
| K3 | Plamen dosegao gornju mjernu oznaku za $t < 20$ s |

### *5.7.2. Rezultati ispitivanja*

Ispitivanje gorivosti i samogasivosti je provedeno prema normi DIN 53 438. Za potrebe ispitivanja korišten je čelični držač izrađen prema dimenziji epruvete zadane normom i plinski plamenik. Epruveta na čeličnom držaču neposredno prije ispitivanja je prikazana slikom 5.37.



**Slika 5.37. Epruveta spremna za ispitivanje samogasivosti**

Tijekom ispitivanja zabilježena su sljedeća opažanja:

- tijekom ispitivanja epruveta se zapalila
- nakon uklanjanja plamena epruveta je nastavila gorjeti i plamen je dosegao gornju oznaku nakon više od 20 sekundi
- tijekom gorenja dolazilo je do čađenja i pucketanja
- dijelovi su otpadali i uočeno je obostrano gorenje
- slojevi su popucali, došlo je do raslojavanja.

Iz ispitivanja je zaključeno da kompozit pripada klasi K2, dakle nije samogasiv. Epruvete prije i poslije ispitivanja prikazane su slikom 5.38. i 5.39.



**Slika 5.38. Epruveta prije ispitivanja samogasivosti**



**Slika 5.39. Epruveta nakon ispitivanja samogasivosti**

# 6. ZAKLJUČAK

U ovome radu izrađen je polimerni kompozit s matricom od poliesterske smole i lanenim vlaknima kao ojačalom čiji udio iznosi 40,64 %. Kompozitni materijal je izrađen postupkom laminiranja, a nakon izrade podvrgnut je mehaničkim ispitivanjima i ispitivanju samogasivosti. Lan kao ojačalo u polimernim kompozitima u ovome radu se promatrao u dva smjera. Prvi je njegov doprinos poboljšanju mehaničkih svojstava kompozitnih materijala, a drugi je ekološki aspekt. Promatrajući drugi aspekt koji je opisan u teoretskom dijelu, u današnje vrijeme globalne brige za okoliš svaki obnovljivi izvor sirovina koji će smanjiti uporabu fosilnih sirovina nalazi sve veće mjesto u primjeni. Prema tome, lan kao ojačalo u polimernim kompozitima pridonosi recikličnosti materijala.

Promatrajući kompozitni materijal ojačan lanenim vlaknima sa stajališta rezultata koji su dobiveni mehaničkim ispitivanjima, može se reći da su rezultati ispitivanja zadovoljavajući uz vrlo mala rasipanja. Rezultati ispitivanja na vlak su pokazali kako ovaj kompozit ima nizak vlačni modul elastičnosti i vlačnu čvrstoću, dok rezultati savojnog ispitivanja pokazuju visoku savojnu čvrstoću i savojni modul. Mjerenjem udarnog rada loma materijal je pokazao visok stupanj žilavosti, a rezultati ispitivanja tvrdoće su zadovoljavajući.

U eksperimentalnom dijelu je kompozitni materijal podvrgnut i ispitivanju samogasivosti, kojim je utvrđeno kako dobiveni kompozit pripada skupini materijala koji nisu samogasivi. S obzirom da ispitivani kompozit nije samogasiv, u sljedećem koraku ispitivanja svojstava trebalo bi koristiti dodatke smoli koji usporavaju gorenje.

Prema dobivenim rezultatima ovakav kompozitni materijal mogao bi se primjenjivati u interijerima automobila gdje su potrebne zakrivljene površine male mase, a izrazitih savojnih svojstava. Nadalje, uporabom lana u polimernim kompozitima smanjujemo masu dobivenog materijala što je pogodno u automobilskoj industriji, gdje svako smanjenje mase rezultira smanjenom potrošnjom goriva. Nadalje, može se primjenjivati u građevinarstvu kao unutarnje zidne obloge ili u modernoj industriji namještaja.

Nedostaci u varijaciji svojstava kompozitnih materijala ojačanih lanenim vlaknima ostavlja širok prostor za inženjere i znanstvenike, čiji će zadatak u budućnosti biti unaprijediti postojeće i razviti nove tehnologije, kako bi u skorijoj budućnosti ovu biljku mogli upotrebljavati u masovnoj industrijskoj proizvodnji.

# LITERATURA

[1] Adhikari M.: Natural fibre composites for injection moulding, Plastics Technology, 2012

[2] Composites: materials of the future, Part 8: Bio-based composites, http://www.pluscomposites.eu/sites/default/files/Technical-articles-chapter8-English.pdf. (5. 12. 2017.)

[3] Hrvatska enciklopedija, tehnički materijali, http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=60649 (5. 12. 2017.)

[4] History of Composites, Composites 101, Composites Lab, http://compositeslab.com/composites-101/history-of-composites/ (6. 12. 2017.)

[5] Fig2.JPG, http://mohan.mse.gatech.edu/Research/stereocomplex_fiber/fig2.JPG (6. 12. 2017.)

[6] Marić G.; Materijali II, autorizirano predavanje, FSB, Zagreb, 2012.

[7] Filetin T., Marić G.; Napredne tehnologije materijala, autorizirano predavanje, FSB, Zagreb, 2013.

[8] Tudu, P.; Processing and Characterization of Natural Fiber Feinforced Polymer Composites, završni rad, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, Indija, 2009. http://www.unn.edu.ng/publications/files/images/final_project%20mme%20okey.PDF (8. 12. 2017.)

[9] Kompozitni materijali, https://ironlady003.wordpress.com/2014/05/12/kompozitni-materijali/ (8. 12. 2017.)

[10] Katana B.; Životni vijek kompozitnog kliznog ležaja, disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, http://repozitorij.fsb.hr/8087/ (8. 12. 2017.)

[11] Polimerni materijali ojačani vlaknima, http://www.gradimo.hr/clanak/polimerni-materijali-ojacani-vlaknima/24555 (8. 12. 2017.)

[12] Smojver I.; Mehanika kompozitnih materijala, FSB, Zagreb, 2007., http://www.aerodamagelab.fsb.hr/books/materijali_mehanika_kompozita.pdf (8. 12. 2017.)

[13] Potyrała P. B.; Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures, 2011, project or specialty thesis, UPC Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.,

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12353/Use%20of%20Fibre%20Reinforced%20Polymer%20Composites%20in%20Bridge%20Construction.%20State%20of%20the%20Art%20in%20Hybrid%20and%20All-Composite%20Structures..pdf?sequence=1&isAllowed=y (10. 12. 2017.)

[14] Magdalenić Bujanić J., Bujanić B.; Aramidna vlakna, Polimeri, 32(2011)3-4, 130-134, https://hrcak.srce.hr/file/116682 (18. 12. 2017.)

[15] Vlakna, tekstilna, Hrvatska enciklopedija, http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=65055 (18. 12. 2017.)

[16] Deng Y; Life cycle assessment of biobased fibre – reinforced polymer composites, disertacija, KU Leuven, Nizozemska, 2014. https://lirias.kuleuven.be/retrieve/273154, (20. 12. 2017.)

[17] Balakrishnan P., John M.J, Pothen L., Sreekala M.S., Thomas S.; Natural Fibre Composites and their Applications in Aerospace Engineering, Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering, Processing, Properties and Applications, Elsevier, 2016., 365-383, https://researchspace.csir.co.za/dspace/handle/10204/9314 (20. 12. 2017.)

[18] Mohammed L., Ansari M. N. M., Pua G., Jawaid M., Islam M.S.; A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications, International Journal of Polymer Science, Vol. 2015, Article ID 243947, 15 pages, 2015. https://www.hindawi.com/journals/ijps/2015/243947/ (9. 1. 2018.)

[19] Pereira P.H.F., de Freitas Rosa M., Cioffi M.O.H., Coelho de Carvalho Benini K.C., Milanese A.C., Voorwald H.J.C., Mulinari D.R.; Vegetal fibers in polymeric composites, Polímeros, 25 (1), 9-22, São Carlos, 2015. http://www.scielo.br/pdf/po/v25n1/0104-1428-po-25-1-9.pdf (10. 1. 2018.)

[20] Lan, Hrvatska enciklopedija, http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=35276 (19. 1. 2018.)

[21] Završena žetva lana na poljima Bosanskog Petrovca, Ratarstvo Agroklub, http://www.agroklub.ba/ratarstvo/zavrsena-zetva-lana-na-poljima-bosanskog-petrovca/20143/ (19. 1. 2018.)

[22] Plastika od konoplje i kako može promeniti svet, Irka, http://irka.org.rs/plastika-od-konoplje-i-kako-moze-promeniti-svet/ (2. 2. 2018.)

[23] Prerada i korištenje lana, najvažnija svojstva lana, Narodni.NET, http://narodni.net/prerada-i-koristenje-lana-najvaznija-svojstva-lana/#prettyPhoto (19. 12. 2017.)

[24] Lan - uzgoj, gnojidba, sorte, sadnja, sjetva, berba, žetva, uporaba, Agroklub, https://www.agroklub.com/sortna-lista/uljarice-predivo-bilje/lan-85/ (19. 12. 2017.)

[25] Garkhail S.K.; Composites based on natural fibres and thermoplastic matrices, disertacija, Department of Materials, Queen Mary College, University of London, 2015., https://www.sems.qmul.ac.uk/research/honours/doc.php?id=413 (19. 12. 2017.)

[26] Aslan M.; Characterisation of Flax Fibres and Flax Fibre Composites. Being cellulose based sources of materials, disertacija, Department of Wind Energy, Technical University of Denmark, 2012., http://orbit.dtu.dk/files/74573490/PhDThesis_ MustafaAslan..PDF (15. 1. 2018.)

[27] Milardović G.; Kompoziti u automobilskoj industriji, Polimeri 32(2011), 3-4. https://hrcak.srce.hr/file/116688 (15. 1. 2018.)

[28] AL-Oqla F.M., Salit M.S., Ishak M.R., Aziz N.A.; Selecting Natural Fibers for Bio-Based Materials with Conflicting Criteria, American Journal of Applied Sciences 12(1), 64-71, 2015., https://www.researchgate.net/publication/281804914_Selecting_Natural_ Fibers_for_Bio-Based_Materials_with_Conflicting_Criteria (15. 1. 2018.)

[29] Libo Y., Jayaraman K., Chouw N.; Flax fibre and its composites, Composites: Part B, 56(2014), 296–317, https://www.academia.edu/17539176/Flax_fibre_and_its_ composites_A_review (17. 1. 2018.)

[30] Brunšek R., Tarbuk A., Butorac J.; Revitalizacija lana u Hrvatskoj, Tekstil : časopis za tekstilnu tehnologiju i konfekciju, 63 (1-2) 49-58, 2014., https://hrcak.srce.hr/file/ 210262 (19. 12. 2017.)

[31] 6th Sense, Sense, http://www.sense4.me/2012/en/rad-lab (19. 12. 2017.)

[32] Brunšek R., Pavunc M., Vujasinović E.: Tradicijski lan za sigurnu budućnost, Zbornik radova 8. znanstveno-stručnog savjetovanja Tekstilna znanost i gospodarstvo, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Tekstilno-tehnološki fakultet, 2015., 116-119, http://www.ttf.unizg.hr/advancetex/PDF/Conferences/6_Full_paper_Brunsek_Pavunc_ Vujasinovic_TZG_2015.pdf (10. 12. 2017.)

[33] Look bicikli - znanost u službi biciklista, https://keindl-sport.hr/blog/look-bicikli-znanost-sluzbi-biciklista-66/ (10. 12. 2017.)

[34] Yonghui H.; PLA apply on stool design , http://cargocollective.com/YonghuiHong/ PLA-apply-on-stool-design (12. 12. 2017.)

[35] http://www.stemergy.com/products/flaxfibre/flaxfibercomposites/ (12. 12. 2017.)

[36] Natural Linen Guitars instrument design, https://www.trendhunter.com/trends/ instrument-design (12. 12. 2017.)

[37] http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zav_teh_meh/katedre/cvr_kon/Pages/osoblje_files/Lanc/MK_predavanja_Lanc.pdf (13. 12. 2017.)

[38] Teks, Hrvatska enciklopedija, http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=60684 (8. 5. 2018.)

[39] Sve o lanu i lanenom ulju-lan-biljka, Vesna Mihajlović, https://vesnamihajlovicblog.wordpress.com/2011/11/04/sve-o-lanu-i-lanenom-ulju-enju-lan-biljka/ (10. 5. 2018.)

[40] Osnove teorije uzoraka, Inženjerska statistika, https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/30_05_2012__15718_Osnove_teorije_uzoraka_2011.pdf (29. 10. 2018.)

[41] Kupres K.; Kompozitni materijali proizveden od otpadnog papira, FSB, 2015., repozitorij.fsb.hr/4560/ (10. 5. 2018.)

[42] Određivanje tvrdoće materijala, https://vtsnis.edu.rs/wp-content/plugins/vts-predmeti/uploads/Odreivanje%20tvrdoe%20materijala-jelena.pdf (15. 5. 2018.)

[43] Hell Z.; Šimundić S.; Vulić N.; Ivanović-Surjan Z.; Primjena polimernih materijala u pomorstvu, 1988.

# PRILOZI

I. CD-R disk