

# Kompoziti ojačani staklenim i lanenim vlaknima pri savojnom opterećenju

---

**Podgorski, Dominik**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:498739>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Dominik Podgorski**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Dominik Podgorski

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Tatjani Haramini na prihvaćanju mentorstva, korisnim savjetima i pomoći koju mi je pružila prilikom pisanja ovog završnog rada. Također, želio bih se zahvaliti tehničkim suradnicima Mireli Petranović i Božidaru Bušetinčanu na ukazanoj pomoći oko izrade eksperimentalnog dijela rada. Na kraju bih se zahvalio svojoj obitelji koja mi je bila velika podrška tijekom studiranja.

Dominik Podgorski



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

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



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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dominik Podgorski** JMBAG: **0035219841**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Kompoziti ojačani staklenim i lanenim vlaknima pri savojnom opterećenju**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Composites reinforced with glass and flax fibers under flexural loading**

Opis zadatka:

Staklena vlakna u pravilu imaju bolja mehanička svojstva od lanenih vlakana. U radu je potrebno detaljno proučiti norme za ispitivanje savojnih (HRN EN ISO 14125) i međuslojnih (HRN EN ISO 14130) svojstava. Usporediti mehanička svojstva sljedećih kompozita pri savojnom opterećenju:

1. poliester/lanena vlakna
2. epoksid/lanena vlakna
3. poliester/lanena/staklena vlakna (hibrid)
4. poliester/staklena vlakna.

Pri tome treba odrediti savojni modul, savojnu čvrstoću, deformaciju prilikom loma, prividnu međuslojnu smičnu čvrstoću i maseni udio vlakana. Usporediti dobivena svojstva s pravilima Hrvatskog registra brodova za kompozite sa staklenim vlaknima.

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

Zadatak zadan:

9. 5. 2022.

Datum predaje rada:

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

Predviđeni datumi obrane:

**2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.**  
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Tatjana Haramina

*T. Haramina*

Predsjednik Povjerenstva:

*Branko Bauer*  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	2
2.1. Definicija kompozitnih materijala i njihova podjela.....	2
2.2. Osnovne komponente kompozitnih materijala .....	3
2.2.1. Svojstva matrice.....	3
2.2.2. Svojstva ojačala .....	4
2.3. Podjela kompozita prema materijalu matrice.....	6
2.3.1. Kompoziti s polimernom matricom .....	6
2.3.1.1. Polimerni kompoziti s duromernom matricom .....	6
2.3.1.1.1. Epoksidne smole .....	7
2.3.1.1.2. Poliesterske smole .....	8
2.3.1.1.3. Vinilesterske smole .....	9
2.3.1.1.4. Fenolne smole .....	9
2.4. Podjela kompozita prema obliku ojačala .....	9
2.4.1. Kompoziti ojačani vlaknima .....	9
2.4.1.1. Vrste vlakana .....	12
2.4.1.1.1. Staklena vlakna .....	13
2.4.1.1.2. Biorazgradiva vlakna.....	15
2.4.1.1.3. Lanena vlakna .....	17
2.5. Hibridni kompoziti .....	19
2.6. Mehanička svojstva kompozita .....	20
2.6.1. Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti.....	21
2.6.2. Prividna međuslojna smična čvrstoća .....	25
3. EKSPERIMENTALNI DIO .....	28
3.1. Materijali matrice i ojačala .....	28
3.2. Maseni udio vlakana .....	29
3.3. Ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće .....	30
3.4. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće .....	33
3.5. Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti.....	38
3.6. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti .....	40
3.7. Analiza rezultata dobivenih savojnim i međuslojnim ispitivanjem kompozita .....	45
3.8. Usporedba rezultata ispitivanja sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova za kompozite ojačane staklenim vlaknima .....	46
4. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA.....	53

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Podjela kompozitnih materijala [2] .....	3
Slika 2.	Dijagrami naprezanje – istežanje i specifična čvrstoća – specifični modul elastičnosti za različite vrste vlakana [2].....	5
Slika 3.	Dijagram naprezanje – istežanje vlaknima ojačanog kompozita [2].....	10
Slika 4.	Različite orijentacije vlaknastih ojačala [2] .....	11
Slika 5.	Najčešće korištena tkanja kod kompozita [8].....	12
Slika 6.	Tkanina od staklenih vlakana [9] .....	14
Slika 7.	Podjela biorazgradivih vlakana [12].....	16
Slika 8.	Lanena vlakna [14].....	18
Slika 9.	Najčešći načini slaganja vlakana kod hibridnih kompozita [16].....	20
Slika 10.	Shematski prikaz savojnog ispitivanja u tri točke [18] .....	21
Slika 11.	Shematski prikaz ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće [19].....	25
Slika 12.	Univerzalna kidalica Shimadzu AGS – X .....	30
Slika 13.	Dijagram sila – progib dobiven međuslojnim ispitivanjem za kompozit poliestar / lan .....	34
Slika 14.	Dijagram sila – progib dobiven međuslojnim ispitivanjem za kompozit poliestar / staklo .....	35
Slika 15.	Dijagram sila – progib dobiven međuslojnim ispitivanjem za kompozit epoksid / lan .....	36
Slika 16.	Dijagram sila – progib dobiven međuslojnim ispitivanjem za kompozit poliestar / lan i staklo .....	37
Slika 17.	Dijagram naprezanje – istežanje dobiven savojnim ispitivanjem za kompozit poliestar / lan .....	41
Slika 18.	Dijagram naprezanje – istežanje dobiven savojnim ispitivanjem za kompozit poliestar / staklo.....	42
Slika 19.	Dijagram naprezanje – istežanje dobiven savojnim ispitivanjem za kompozit epoksid / lan.....	43
Slika 20.	Dijagram naprezanje – istežanje dobiven savojnim ispitivanjem za kompozit poliestar / lan i staklo.....	44
Slika 21.	Srednje vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće svih kompozita i minimalna propisana granica.....	46
Slika 22.	Srednje vrijednosti savojnog modula elastičnosti svih kompozita i minimalna propisana granica.....	47
Slika 23.	Srednje vrijednosti savojne čvrstoće svih kompozita i minimalna propisana granica .....	47
Slika 24.	Srednje vrijednosti deformacije prilikom loma svih kompozita .....	48

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela staklenih vlakana i njihove karakteristike [1].....	14
Tablica 2. Svojstva staklenih i biorazgradivih vlakana [15] .....	19
Tablica 3. Najčešće kombinacije vlakana u hibridnim kompozitima i njihova svojstva [1]..	20
Tablica 4. Normirane dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje u tri točke [18] .....	22
Tablica 5. Duljina $l$ i razmak između oslonaca $L$ kao funkcije debljine $h$ [18].....	23
Tablica 6. Širina $b$ kao funkcija debljine $h$ [18] .....	23
Tablica 7. Normirane dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće [19].....	26
Tablica 8. Karakteristike izrađenih kompozita.....	29
Tablica 9. Maseni udio vlakana u kompozitima.....	30
Tablica 10. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje za kompozit poliestar / lan ...	31
Tablica 11. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje za kompozit poliestar / staklo .....	32
Tablica 12. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje za kompozit epoksid / lan ....	32
Tablica 13. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje za kompozit poliestar / lan i staklo .....	33
Tablica 14. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće za kompozit poliestar / lan .....	34
Tablica 15. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće za kompozit poliestar / staklo .....	35
Tablica 16. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće za kompozit epoksid / lan .....	36
Tablica 17. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće za kompozit poliestar / lan i staklo .....	37
Tablica 18. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje za kompozit poliestar / lan .....	38
Tablica 19. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje za kompozit poliestar / staklo.....	39
Tablica 20. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje za kompozit epoksid / lan.....	39
Tablica 21. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje za kompozit poliestar / lan i staklo .....	40
Tablica 22. Rezultati savojnog ispitivanja za kompozit poliestar / lan .....	41
Tablica 23. Rezultati savojnog ispitivanja za kompozit poliestar / staklo .....	42
Tablica 24. Rezultati savojnog ispitivanja za kompozit epoksid / lan .....	43
Tablica 25. Rezultati savojnog ispitivanja za kompozit poliestar / lan i staklo .....	44
Tablica 26. Srednje vrijednosti rezultata dobivenih savojnim i međuslojnim ispitivanjem ....	45
Tablica 27. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava kompozita uspoređeni sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova [20].....	49



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	%	Istezljivost
$b$	mm	Širina
$d$	mm	Promjer vlakna
$E$	MPa	Modul elastičnosti
$E_f$	MPa	Savojni modul elastičnosti
$f$	mm	Progib
$f_{\max}$	mm	Maksimalni progib
$F$	N	Sila
$F_{\max}$	N	Maksimalna sila
$G$	MPa	Smični modul elastičnosti
$h$	mm	Debljina
$h_{sr}$	mm	Srednja vrijednost debljine
$l$	mm	Duljina
$L$	mm	Razmak između oslonaca
$L_C$	mm	Minimalna kritična duljina vlakna
$m_k$	kg	Masa cijelog kompozita
$m_v$	kg	Masa vlakana
$R_1$	mm	Radijus pritisknog tijela
$R_2$	mm	Radijus oslonaca
$\sigma_m$	MPa	Rastezna čvrstoća
$T_g$	°C	Temperatura staklišta
$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	Gustoća
$\varepsilon$	mm/mm	Istezanje
$\varepsilon_k$	%	Deformacija prilikom loma
$\sigma$	MPa	Naprezanje

$\sigma_f$	MPa	Savojno naprezanje
$\sigma_{fM}$	MPa	Savojna čvrstoća
$\sigma_t$	MPa	Rastezna čvrstoća vlakna
$\tau$	MPa	Prividna međuslojna smična čvrstoća

## SAŽETAK

U ovom završnom radu napravljena su četiri različita polimerna kompozita za izradu kojih su korištena poliesterska i epoksidna smola te staklena i lanena vlakna. Kompoziti su bili izrađeni postupkom vakuumske infuzije te su na njima provedena ispitivanja savojnih i međuslojnih svojstava u skladu s normama HRN EN ISO 14125 : 1998 i HRN EN ISO 14130 : 1997. Ispitivanjima su određene vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće, savojnog modula elastičnosti, savojne čvrstoće, deformacije prilikom loma te masenog udjela vlakana. Dobiveni rezultati uspoređeni su sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova (HRB) za kompozite ojačane staklenim vlaknima koji se uobičajeno koriste u maloj brodogradnji. Rezultati su pokazali kako je kompozit poliesterska smola / staklena vlakna postigao najbolje rezultate i zadovoljio sva svojstva, dok su ostali ispitani kompoziti zadovoljili samo jedno mehaničko svojstvo i to je bio savojni modul elastičnosti. Preostala svojstva biokompoziti nisu zadovoljili, a najbliže propisanim podacima bili su kompozit epoksidna smola / lanena vlakna i hibridni kompozit poliesterska smola / lanena i staklena vlakna, dok je kompozit poliesterska smola / lanena vlakna postigao najlošije rezultate. Analizom je zaključeno kako kompoziti ojačani biorazgradivim vlaknima imaju potencijal postati kvalitetna zamjena kompozitima sa staklenim vlaknima, ali su potrebna daljnja istraživanja koja bi trebala poboljšati postupak izrade biokompozita i povezanost između matrice i ojačala.

Ključne riječi: biokompozit, poliesterska smola, epoksidna smola, lanena vlakna, staklena vlakna, savojni modul elastičnosti, savojna čvrstoća, prividna međuslojna smična čvrstoća

## **SUMMARY**

Four different polymer composites were made out of polyester resin, epoxy resin, glass fibers and flax fibers. Composites were produced by vacuum infusion and subjected to examinations of flexural and interlaminar properties in accordance with HRN EN ISO 14125 : 1998 and HRN EN ISO 14130 : 1997 standards. Examinations have determined the values of apparent interlaminar shear strength, flexural modulus of elasticity, flexural strength, deformation at break and mass fraction of fibers. The obtained results were compared with the requirements of the Croatian Register of Shipping (CRS) for glass fibers reinforced composites which are usually used in small shipbuilding. The results showed that the polyester resin / glass fibers composite has accomplished the best results and satisfied all the properties. On the other hand, the remaining tested composites have satisfied only one mechanical property and that was the flexural modulus of elasticity, whereas the other properties were not achieved. Epoxy resin / flax fibers composite and polyester resin / flax and glass fibers hybrid composite had the results closest to the prescribed one, whilst the polyester resin / flax fibers composite has achieved the worst results. The analysis concluded that biodegradable fibers reinforced composites have the potential to become a high-quality substitute for glass fibers reinforced composites, but further research, which will improve the production of biocomposites and connection between the matrix and the reinforcement, is needed.

Key words: biocomposite, polyester resin, epoxy resin, flax fibers, glass fibers, flexural modulus of elasticity, flexural strength, apparent interlaminar shear strength

## 1. UVOD

Posljednjih se godina u javnosti sve više naglašavaju problemi vezani uz odlaganje i zbrinjavanje nerazgradivih materijala čije količine dostižu ekstremne vrijednosti, a posljedično dovode i do sve većeg onečišćenja okoliša te porasta razina zagađenosti u naseljenim mjestima diljem svijeta. Kako ne bi došlo do daljnjeg pogoršanja situacije, brojne su industrije primorane okrenuti se korištenju ekološki prihvatljivih biorazgradivih materijala iz obnovljivih izvora. Jedna od takvih industrija je i brodogradnja u kojoj se za izradu manjih plovila sve češće upotrebljavaju biokompoziti, tj. kompoziti ojačani biorazgradivim vlaknima kojima se postepeno nastoje zamijeniti standardno korišteni kompoziti ojačani staklenim vlaknima čiji je glavni problem otežano recikliranje. Uz to što su ekološki prihvatljiva i mogu se jednostavno preraditi, biorazgradiva vlakna odlikuju se i nižom cijenom proizvodnje te malom težinom i gustoćom čime se značajno smanjuje potrošnja goriva kod plovila koja su izrađena od takvih materijala. Mehanička svojstva najčešće korištenih biljnih ojačala poput vlakana lana, konopolje, jute, agave, najvećim su dijelom usporediva sa svojstvima staklenih vlakana. Glavni nedostatak biljnih vlakana je njihova slaba adhezija s većinom polimernih matrica koja je uzrokovana hidrofilnom prirodom vlakana. Također, postupci izrade kompozita ojačanih vlaknima iz obnovljivih izvora nisu još dovoljno istraženi pa nerijetko rezultiraju lošom kvalitetom konačnog proizvoda.

U ovom završnom radu izrađena su četiri različita polimerna kompozita kod kojih su se kao matrice koristile poliesterska i epoksidna smola, dok su za ojačanje korištena staklena i lanena vlakna. Kompoziti su bili podvrgnuti ispitivanju savojnih i međuslojnih svojstava, a glavna svrha provedenih ispitivanja bila je usporediti dobivena mehanička svojstva s minimalnim propisanim vrijednostima za kompozite ojačane staklenim vlaknima koja su izdana od strane Hrvatskog registra brodova. Na taj se način nastojalo doći do zaključka mogu li kompoziti ojačani biorazgradivim, a u ovom slučaju lanenim vlaknima, biti kvalitetna alternativa uobičajeno korištenim kompozitima sa staklenim vlaknima.

Ovaj rad doprinos je istraživanjima materijala prikladnih za izradu dijelova eko-katamarana u okviru projekta ProEco. Nositelj projekta je tvrtka Marservis d.o.o. iz Kaštelira koja je ujedno bila zadužena i za izradu polimernih kompozita.

## 2. KOMPOZITNI MATERIJALI

### 2.1. Definicija kompozitnih materijala i njihova podjela

Kompozitni materijali ili kraće kompoziti su heterogeni materijali koji nastaju umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava pri čemu je jasno definirana granica između njih. Cilj ovakvog spajanja materijala je dobivanje materijala takvih svojstava, kakva ne posjeduje ni jedna komponenta sama za sebe. Kompoziti se sastoje od dva osnovna konstituenta, a to su matrica i ojačalo [1].

Proizvode se različitim tehnološkim postupcima kao što su laminiranje, pultrudiranje, namatanje, a u usporedbi s ostalim konvencionalnim konstrukcijskim materijalima ističu se po mogućnosti izrade vrlo kompliciranih oblika, reduciranju troškova naknadne obrade dijelova, mogućnosti spajanja dijelova tijekom samog postupka proizvodnje, dimenzijskoj stabilnosti pri ekstremnim radnim uvjetima te otpornosti na koroziju. Također važno je naglasiti njihova mehanička svojstva, odnosno dobar omjer svojstava u odnosu na gustoću [1].

S druge strane, neki od nedostataka kompozitnih materijala su kompliciraniji popravak, međuslojna naprezanja, nelinearno ponašanje materijala, konstrukcijski problemi koji se mogu očitovati prilikom spajanja pojedinih dijelova te prilikom izrade provrta. Isto tako, nije nužno da su kompoziti superiorniji metalnim materijalima u svim svojstvima, a to je posebno izraženo pri visokim temperaturama [2].

Kompozitni materijali najčešće se dijele prema dvama osnovnim kriterijima, a to su materijal matrice i oblik ojačala. S obzirom na materijal matrice, kompoziti mogu biti metalni, keramički i polimerni. Druga podjela je prema obliku ojačala, a prema tom kriteriju razlikujemo kompozite ojačane česticama, kompozite ojačane vlaknima te strukturne kompozite koji se dodatno mogu podijeliti na slojevite kompozite (laminati) i tzv. sendvič konstrukcije [2]. Na slici 1. prikazana je navedena podjela kompozita.



Slika 1. Podjela kompozitnih materijala [2]

## 2.2. Osnovne komponente kompozitnih materijala

Kao što je već prije spomenuto, kompoziti se sastoje od dva osnovna konstituenta, a to su matrica i ojačalo. Matrica čini veći dio kompozita, a glavne su joj zadaće da povezuje ojačala, prenosi opterećenja na ojačala i štiti ih od djelovanja vanjskih utjecaja i oštećenja. Ojačala predstavljaju manji dio kompozita i njihova zadaća je prvenstveno da budu nosivi element kompozita, tj. da osiguraju visoku čvrstoću, visoki modul elastičnosti (krutost) i visoku otpornost na trošenje [1].

Ukupno ponašanje kompozita ne ovisi samo o svojstvima matrice i ojačala, već i o sljedećim stavkama [1]:

- veličini i rasporedu konstituenata
- volumnom udjelu konstituenata
- obliku konstituenata
- prirodi i jakosti veze između konstituenata

### 2.2.1. Svojstva matrice

Svojstva matrice imaju veliku važnost prilikom određivanja pojedinih mehaničkih svojstava kao što su uzdužna tlačna čvrstoća, poprečna rastezna čvrstoća i prividna međuslojna smična čvrstoća i često se kaže da su ta svojstva uvjetovana materijalom matrice. Karakteristike materijala matrice velikim dijelom utječu i na konačno ponašanje kompozita, ali također određuju ograničenja u njegovoj eksploataciji. Tako će u slučaju izlaganja kompozita

negativnim utjecajima okoline ili kemijskim utjecajima, matrica biti prva komponenta kod koje će doći do smanjenja mehaničkih svojstava, a time i svojstava cjelokupnog kompozita. Važan utjecaj na svojstva matrice ima i temperatura prelaska iz staklastog u viskoelastično stanje matrice ( $T_g$ ). Ukoliko se kompozit primjenjuje pri temperaturi većoj od  $T_g$ , doći će do značajnog pogoršanja svojstava matrice, a posljedično i konačnog kompozitnog proizvoda [3].

Najčešći materijali koji se koriste kao matrica su metali, keramika i polimeri, a u novije vrijeme sve se više koriste i ugljik – ugljik kompoziti koji zbog svoje sposobnosti dugotrajnog izlaganja temperaturama i do 2000 °C nailaze na sve veću primjenu u svemirskoj industriji. Materijali koji se koriste za izradu matrica moraju zadovoljavati određene karakteristike, a to su prvenstveno dovoljna čvrstoća, žilavost i duktilnost koje im omogućuju ravnomjeren prijenos opterećenja na vlakna. Na taj način matrica u slučaju puknuća pojedinih vlakana sprječava daljnje propagiranje pukotina duž cijelog kompozita. Uz čvrstoću, duktilnost i žilavost, od matrice se također zahtijeva povećana otpornost na koroziju, poboljšana svojstva u poprečnom smjeru, a od iznimne je važnosti i činjenica da matrica ne smije kemijski reagirati s vlaknima te da mora dobro prianjati uz vlakna. Iz tog je razloga potrebno pravilno odabrati kombinaciju matrica – ojačalo, jer će u protivnom adhezijske sile biti nedostatne za učinkovito ponašanje kompozita. Također, ne smije se zanemariti ni odabir postupka izrade kompozita jer on mora osigurati minimalan udio šupljina. Šupljine u kompozitu predstavljaju potencijalno opasna mjesta za nakupljanje vlage što može negativno utjecati na konačna svojstva kompozitnog proizvoda [1], [3].

### **2.2.2. Svojstva ojačala**

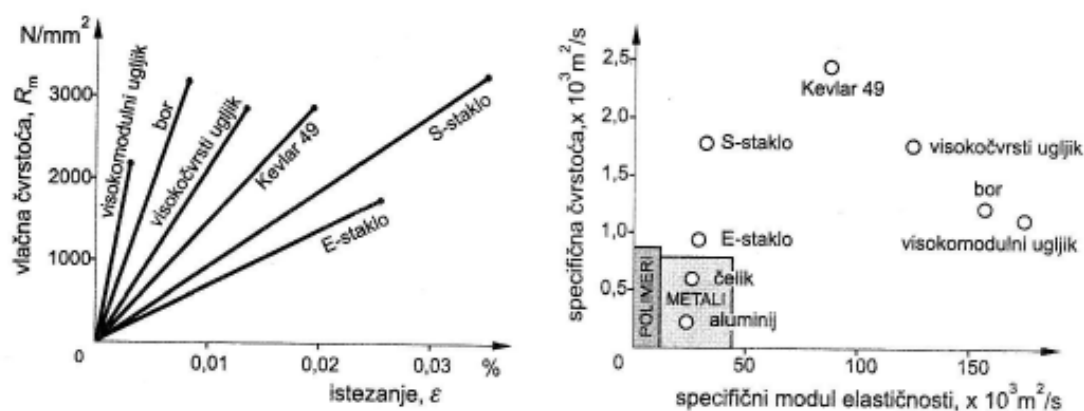
Kao ojačala kompozitnih materijala najčešće se koriste čestice i vlakna. Čestice predstavljaju jednolično raspoređen, tvrd i krhak materijal koji je obavijen mekanijom i duktilnijom matricom, a s obzirom na njihovu veličinu, volumni udjel te djelovanje na svojstva kompozita, strukturirana je i podjela kompozita ojačanih česticama na dvije skupine: kompoziti s disperzijom i kompoziti s velikim česticama. Kod kompozita s disperzijom, promjer čestica iznosi do 0,1  $\mu\text{m}$ , a volumni udio im ne premašuje 15 % ukupnog volumena, dok kod kompozita s velikim česticama, promjer čestica je u pravilu veći od 1  $\mu\text{m}$ , a njihov volumni udio premašuje 15 % ukupnog volumena. Čestice manjeg promjera sprječavaju gibanje dislokacija i smanjuju pokretljivost atoma te na taj način omogućuju ojačavanje kompozita, odnosno poboljšanje njegove čvrstoće. S druge strane, djelovanje velikih čestica



nije direktno usmjereno na otežavanje gibanja dislokacija, tj. povećanje čvrstoće, već na poboljšanje drugih svojstava [1].

Kao i sva ojačala, čestice trebaju ostvariti dobru povezanost s matricom te ne smiju s njom kemijski reagirati. Glavne prednosti česticama ojačanih kompozita su dobra obradivost, povećana tlačna čvrstoća, kompatibilnost s većinom konvencionalnih tehnologija te izotropnost mehaničkih svojstava što znači da su im svojstva jednaka u svim smjerovima. Čestice su najčešće oksidi, nitridi, karbidi (npr.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ). Primjeri kompozita ojačanih česticama su: beton, tvrdi metali, abrazivne paste za poliranje [1], [2].

Vlakna su vrsta ojačala u obliku tankih niti koje karakterizira veliki omjer duljina / promjer. Zahvaljujući svome obliku i dimenzijama, vlakna imaju značajno manje kristalnih nesavršenosti u svojoj strukturi što znači da posjeduju bolja mehanička svojstva. Kod kompozita kod kojih se kao ojačala koriste vlakna dolazi do poboljšanja čvrstoće, žilavosti, krutosti i omjera čvrstoća / gustoća. Osim što ne smiju kemijski reagirati s matricom te moraju postići dobru kompatibilnost s njom, od materijala vlakana se očekuje da budu čvrsti, lagani, kruti, toplinski stabilni te da imaju visoko talište. Također, trebali bi imati i visoku specifičnu čvrstoću i krutost. Poprečni presjek vlakna može biti kvadratnog, heksagonskog i kružnog oblika, a upravo je ovaj posljednji navedeni oblik i najzastupljeniji zbog najjednostavnije proizvodnje i rukovanja. Maksimalni volumni udio vlakana u kompozitu je u pravilu do 40 %, a ta je granica određena mogućnošću da se vlakna okruže materijalom matrice [2]. Na slici 2. prikazani su dijagram naprezanje – istezanje i dijagram specifična čvrstoća – specifični modul elastičnosti za različite vrste vlakana.



**Slika 2. Dijagrami naprezanje – istezanje i specifična čvrstoća – specifični modul elastičnosti za različite vrste vlakana [2]**

## **2.3. Podjela kompozita prema materijalu matrice**

### **2.3.1. Kompoziti s polimernom matricom**

Kompoziti s polimernom matricom, tj. polimerni kompoziti su kompoziti koji se sastoje od polimerne matrice i ojačala. Zahvaljujući prije svega relativno niskim troškovima proizvodnje, dobroj kemijskoj postojanosti te dobrim mehaničkim i preradbenim svojstvima, spadaju u skupinu danas najzastupljenijih vrsta kompozita. Među polimernim materijalima koji se koriste za izradu matrica prevladavaju duromeri i plastomeri, dok se kao ojačala najčešće koriste staklena, ugljična i aramidna vlakna, a sve se češće primjenjuju i razna biorazgradiva vlakna. Za većinu polimernih materijala temperaturno područje trajne primjene je do 100 °C s iznimkom duromera i toplinski postojanih plastomera koji mogu izdržati temperature i do 300 °C. Zbog povoljne cijene, niskih temperatura proizvodnje, niske viskoznosti prilikom proizvodnje te vrlo dobre adhezije s većinom vlakana, duromeri su vrsta polimera koja se najčešće koristi u industriji. Ipak, njihov veliki nedostatak je da zagrijavanjem ne omekšavaju značajno niti se tale, već dolazi do njihove potpune razgradnje i na taj način je onemogućeno njihovo recikliranje. Iz tog razloga primjena plastomernih matrica ojačanih najčešće staklenim vlaknima doživljava sve veći rast [1], [4].

Osim već navedenih prednosti polimernih kompozita, oni se ističu i malom gustoćom, vrlo dobrom otpornošću na trošenje, malim faktorom trenja, dobrim izolacijskim svojstvima te mogućnošću prigušivanja vibracija. Mala gustoća čini ih prikladnim materijalom za izradu lakih konstrukcija, a osim u građevinarstvu, polimerni kompoziti svoju primjenu nalaze u brojnim različitim granama industrije kao što su brodogradnja, zrakoplovstvo, automobilska industrija, industrija sportske opreme, industrija elektroničkih dijelova i mnoge druge [2].

S druge strane, glavni nedostaci polimera su mala čvrstoća, nizak modul elastičnosti, osjetljivost na visoke temperature, utjecaj preradbenih postupaka na njihova svojstva te podložnost starenju. Pojam starenje označava kemijske i fizikalne promjene do kojih dolazi u polimernom materijalu u određenom vremenskom razdoblju, a koje za posljedicu imaju nepovratnu promjenu njihovih mehaničkih svojstava [2].

#### **2.3.1.1. Polimerni kompoziti s duromernom matricom**

Duromeri ili duroplasti su sintetski umreženi polimeri amorfne strukture čije su makromolekule međusobno povezane primarnim, odnosno kovalentnim vezama. Mehanizmima polimerizacije duromeri ne polimeriziraju do umrežavanja, već samo do 1.

stupnja prilikom kojeg nastaje reaktivna duromerna smola koja je uglavnom viskozna tekućina. Do umrežavanja dolazi u 2. stupnju polimerizacije kada duromerna smola laganim zagrijavanjem te dodatkom određenih katalizatora poprima svoj konačni oblik te nastaje trodimenzionalni makromolekularni sustav koji je netaljiv, netopljiv i ne može bubriti. Budući da duromeri svojstvo tečenja i taljenja posjeduju samo u fazi dobivanja, u toj ih je fazi potrebno i pravilno oblikovati. Ukoliko prilikom oblikovanja dođe do pogreške, duromere nije moguće ponovno preoblikovati jer oni zagrijavanjem ne omekšavaju značajno niti se tale, već dolazi do njihovog umrežavanja, a u slučaju daljnjeg povišenja temperature i do termodegradacije, tj. kidanja kovalentnih veza i razgradnje [5].

Duromerne smole nailaze na veću primjenu u industriji za razliku od kompozita s plastomernom matricom, a to mogu zahvaliti tome što su pri sobnoj temperaturi u kapljevitom stanju te tako olakšavaju impregnaciju vlakana koja je nužna za dobru povezanost matrice i vlakana. Većoj uporabi također doprinose jednostavnost izrade te niža cijena sirovina i alata. Duromere karakteriziraju i visoka otpornost na puzanje, najviši modul elastičnosti od svih skupina polimera, niska žilavost te slabija otpornost na umor materijala u odnosu na plastomere. Uz već spomenutu nemogućnost reciklaže, glavni negativni aspekt u korištenju duromera je ograničeno vrijeme ulijevanja koje je uzrokovano vrlo brzim očvršćivanjem pri kojem dolazi do skupljanja materijala koje onda dovodi i do pojave zaostalih naprezanja u samom materijalu. Naravno, zaostala naprezanja pogoršavaju svojstva konačnog proizvoda [3], [4].

Najčešće duromeri koji se koriste za izradu matrica su [3]:

- epoksidne smole
- poliesterske smole
- vinilesterske smole
- fenolne smole

#### 2.3.1.1.1. Epoksidne smole

Epoksidne smole su duromeri koji se sastoje od minimalno dvije ili više epoksidnih skupina. Umrežavanje epoksidnih smola odvija se djelovanjem topline te pomoću različitih sredstava za umrežavanje koja se ovisno o svojoj namjeni mogu podijeliti na katalizatore, očvršćivače ili aktivatore. Polimerizaciju, tj. umrežavanje epoksida potrebno je izvesti pri povišenim temperaturama (po mogućnosti na 60 °C) kako bi se postigla dovoljna razina umreženosti i

bolja svojstva. Budući da je polimerizacija egzotermna reakcija, vrlo je važno odabrati pravilnu količinu očvršćivača i katalizatora jer će se u slučaju njihovog prekomjernog udjela razviti previsoka temperatura koja onda može rezultirati toplinskom degradacijom matrice [6]. Glavne pozitivne karakteristike epoksida su dobra mehanička svojstva, toplinska i dimenzijska postojanost, visoka otpornost na djelovanje agresivnih medija i drugih vanjskih utjecaja, malo skupljanje prilikom procesa umrežavanja te laka i sigurna proizvodnja prilikom koje dolazi do ispuštanja malih količina štetnih tvari. S ciljem modificiranja i dobivanja željenih svojstava epoksidima se tijekom proizvodnje mogu dodavati različiti aditivi. Na taj se način primjerice može promijeniti njihova gustoća, smanjiti viskoznost tijekom obrade ili poboljšati otpornost na širenje pukotina. U usporedbi s ostalim duromerima, epoksidne smole imaju bolja adhezijska svojstva i otpornost na vlagu te su iz tih razloga dobar materijal za izradu matrica kod kompozita ojačanih biorazgradivim vlaknima. Naime, kod kompozita kod kojih se kao ojačala koriste takva vlakna dolazi do problema povezanosti matrice i ojačala. Taj problem uzrokovan je time što su vlakna hidrofilne prirode, dok je matrica hidrofobne prirode što znači da vlakna vežu na sebe molekule vode, dolazi do njihovog bubrenja, a rezultat svega je slabljenje adhezijskih sila između matrice i ojačala [7].

Epoksidne smole najčešće se koriste za izradu konstrukcijskih dijelova u zrakoplovnoj industriji i brodogradnji, a razlog njihovoj ograničenoj primjeni je prvenstveno viša cijena u odnosu na druge polimerne smole. Uz višu cijenu, glavni nedostaci epoksidnih smola su mala otpornost na djelovanje određenih organskih spojeva kao što su npr. organske kiseline te relativno niska najviša temperatura primjene [7].

#### 2.3.1.1.2. Poliesterske smole

Poliesterske smole ili poliesteri predstavljaju skupinu najčešće korištenih duromera za izradu polimernih kompozita ojačanih vlaknima. Umrežavanje poliestera odvija se reakcijom kopolimerizacije slobodnih radikala pri kojoj uz dodatak određenog katalizatora nastaje trodimenzionalna struktura koja se sastoji od poliesterskih lanaca koji su povezani s reaktivnim lancima otapala. Kao otapalo se većinom koristi stiren koji osim za povezivanje molekula, služi i za snižavanje viskoznosti smole te na taj način olakšava izradu kompozita [6].

Glavni razlozi široke primjene poliesterskih smola su prije svega niska cijena sirovina, jednostavna i jeftina proizvodnja (kratki proizvodni ciklusi zbog sposobnosti brzog prijelaza iz kapljevito u kruto stanje bez razvijanja hlapljivih nusprodukata), mogućnost prerade pri

sobnoj temperaturi, dimenzijska stabilnost, dobra dielektrična svojstva. Zahvaljujući visokoj kemijskoj postojanosti i otpornosti na djelovanje atmosferilija, poliesteri se često koriste i kao antikorozivni materijali, tj. kao premazi za zaštitu drva i metala. Također, mogu se jednostavno bojati organskim i anorganskim bojama te tako doprinijeti estetskom izgledu konstrukcijskih elemenata [7].

Osnovni nedostaci poliesteru su veliko skupljanje tijekom polimerizacije koje dovodi do unosa zaostalih naprezanja, krhkost, niža čvrstoća u odnosu na epoksidnu smolu te intenzivan i neugodan miris [7].

#### 2.3.1.1.3. Vinilesterske smole

Vinilesterske smole umrežuju se na sličan način kao i polieterske smole, reakcijom kopolimerizacije slobodnih radikala pri relativno niskim temperaturama te uz dodatak katalizatora. Spadaju u novije generacije smola, a po svojstvima se nalaze između epoksidnih smola i poliesteru. Vinilesterske smole imaju bolja mehanička i adhezijska svojstva u odnosu na polieterske smole, ali lošija u odnosu na epokside. Zahvaljujući dobroj toplinskoj stabilnosti i visokoj postojanosti na djelovanje raznih kiselina, lužina i otapala, često se upotrebljavaju kao završni premaz [3].

#### 2.3.1.1.4. Fenolne smole

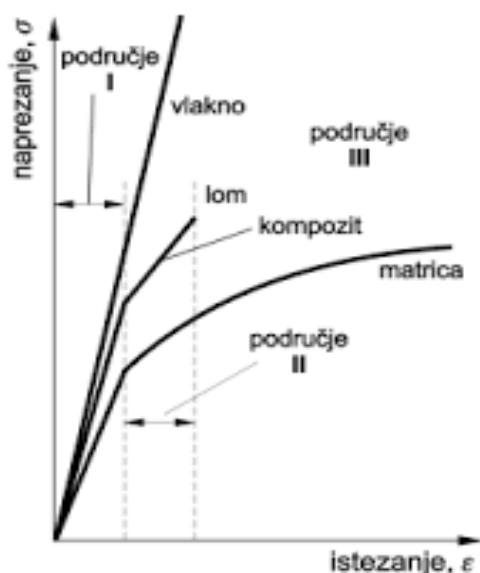
Fenolne smole nastaju procesom kondenzacije fenola i formaldehida uz djelovanje katalizatora. Odlikuje ih toplinska stabilnost pri povišenim temperaturama, sposobnost samogašenja, povećana otpornost na djelovanje organskih otapala i kiselina, sposobnost djelovanja kao električni i toplinski izolator. Glavni nedostaci fenolnih smola su veliki postotak šupljina te otpuštanje velikih količina hlapljivih tvari prilikom umrežavanja koja onda posljedično dovode do pogoršanja mehaničkih svojstava matrice [3].

## 2.4. Podjela kompozita prema obliku ojačala

### 2.4.1. Kompoziti ojačani vlaknima

Kompoziti ojačani vlaknima predstavljaju najvažniju grupu kompozita. Kod ove vrste kompozita za materijal matrice mogu se koristiti metali, keramika i polimeri, a upravo je primjena polimera najzastupljenija. Osim što osigurava žilavost i duktilnost kompozita,

matrica prenosi i opterećenja na vlakna, a za kvalitetan prijenos opterećenja od iznimne je važnosti veličina kontaktne površine između vlakana i matrice koja proizlazi iz dobre povezanosti ovih dviju komponenti. Kao nosivi element kompozita, vlakna preuzimaju opterećenje te prvenstveno doprinose poboljšanju čvrstoće i krutosti kompozita. Također, ukoliko dođe do puknuća određenog vlakna, pukotina neće dalje propagirati kroz kompozit zbog prisutnosti drugih vlakana. Konačna svojstva kompozita ovise o svojstvima obaju konstituenata (matrica i vlakna) pa tako sam kompozit predstavlja kombinaciju njihovih svojstava [1]. Slika 3. prikazuje dijagram naprezanje – istežanje vlaknima ojačanog kompozita iz kojeg je vidljivo kako kompozit posjeduje karakteristike kakve nema ni jedna komponenta sama za sebe.



**Slika 3. Dijagram naprezanje – istežanje vlaknima ojačanog kompozita [2]**

Osim o svojstvima konstituenata, konačna svojstva i ponašanje kompozita ojačanih vlaknima ovise i o [1]:

- omjeru duljina / promjer vlakana
- usmjerenosti (orijentaciji) vlakana
- volumnom udjelu vlakana

S obzirom na omjer duljina / promjer, vlakna se mogu podijeliti na kontinuirana i diskontinuirana. Za kontinuirana vlakna vrijedi omjer  $L > 15 \cdot L_C$ , dok za diskontinuirana vlakna vrijedi  $L < 15 \cdot L_C$  pri čemu  $L$  predstavlja duljinu vlakna, a  $L_C$  minimalnu kritičnu

duljinu vlakna koja je potrebna za kvalitetan prijenos opterećenja na vlakno. Minimalna kritična duljina  $L_C$  određuje se pomoću izraza [1]:

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

Gdje je:

$L_C$  [mm] – minimalna kritična duljina vlakna

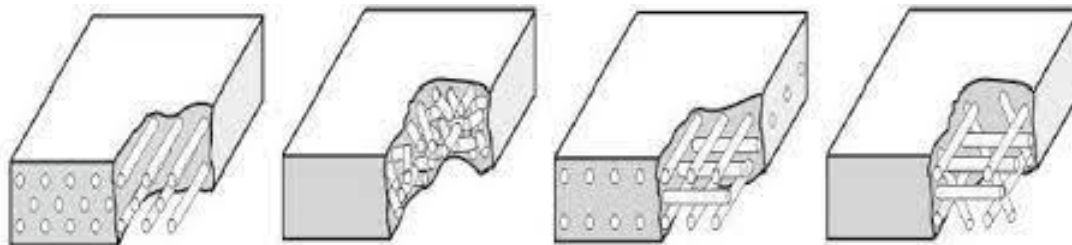
$\sigma_t$  [MPa] – rastezna čvrstoća vlakna

$d$  [mm] – promjer vlakna

$\tau_c$  [MPa] – smična čvrstoća vlakna

Kontinuirana vlakna osiguravaju najbolja svojstva, ali se ponekad teško proizvode i ugrađuju u matricu. Diskontinuirana vlakna se znatno lakše ugrađuju u matricu te poboljšavaju krutost i čvrstoću kompozita [1].

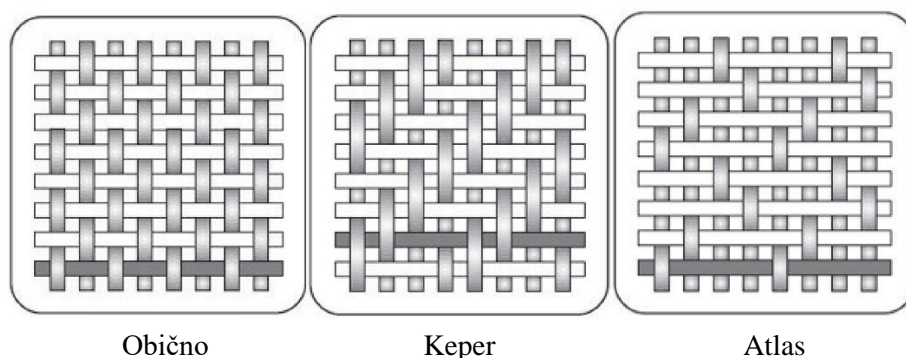
Orijentacija vlakana te način njihova slaganja također imaju značajan utjecaj na svojstva kompozita. Mehanička svojstva kompozita ojačanih kontinuiranim usmjerenim vlaknima su anizotropna što znači da je čvrstoća u smjeru vlakana maksimalna, dok je u smjeru okomitom na vlakna čvrstoća minimalna. Ako se žele postići jednoličnija svojstva, vlakna se mogu polagati ortogonalno ili pod nekim kutem. Tako će primjerice kompoziti ojačani slučajno usmjerenim diskontinuiranim vlaknima imati izotropna, odnosno mnogo ujednačenija mehanička svojstva u svim smjerovima [2]. Na slici 4. prikazane su različite orijentacije vlaknastih ojačala.



**Slika 4. Različite orijentacije vlaknastih ojačala [2]**

Međusobnim ispreplitanjem vlakana dolazi do formiranja tkanina koje zapravo predstavljaju spoj vlakana u obliku jednoslojne ili višeslojne plahte. Kompaktnost tkanina osigurana je

prvenstveno mehaničkim preplitanjem vlakana te primjenom materijala za povezivanje koji onda omogućuju zadržavanje vlakana u željenom obliku i rasporedu. S obzirom na orijentaciju vlakana razlikujemo jednosmjerno i dvosmjerno ili višesmjerno tkanje. Kao što i sam naziv govori, kod jednosmjernog tkanja je većina glavnih vlakana usmjerena u jednom smjeru, dok su kod dvosmjernog ili višesmjernog tkanja moguće tri glavne skupine orijentacije vlakana, a to su:  $0/90^\circ$  orijentirana vlakna, višesmjerno orijentirana vlakna i nasumično orijentirana vlakna [2]. Slika 5. prikazuje najčešće korištena tkanja kod kompozitnih materijala.



Slika 5. Najčešće korištena tkanja kod kompozita [8]

#### 2.4.1.1. Vrste vlakana

Vlakna se međusobno razlikuju prema duljini, promjeru, orijentaciji, hibridizaciji te vrsti materijala od kojega su izrađena. Prema promjeru ojačala se dijele na viskere, vlakna i žice. Viskeri su tanke niti keramičkih monokristala koje odlikuje ekstremno veliki omjer duljina / promjer te pravilna kristalna građa zahvaljujući kojoj imaju iznimno visoku čvrstoću. Viskeri su najčešće građeni od grafita, aluminijevog oksida i silicijevog karbida ili nitrida, a glavni razlozi njihove rijetke primjene su visoka cijena, komplicirana proizvodnja te otežana ugradnja u matricu. Žice su niti relativno velikog promjera, a većinom su izrađene od čelika, molibdena i volframa. Koriste se primjerice za ojačavanje automobilskih guma ili visokotlačnih cijevi [1], [2].

Vrsta materijala također je jedna od karakteristika po kojima se razlikuju vlakna pa tako prema ovom kriteriju razlikujemo [1]:

- staklena vlakna
- ugljična vlakna



- aramidna vlakna
- metalna vlakna
- keramička vlakna
- polimerna vlakna
- biorazgrađiva vlakna

Za očvršćivanje polimernih kompozita najčešće se koriste sintetska vlakna poput staklenih, ugljičnih i aramidnih, ali sve je zastupljenija i primjena biorazgrađivih vlakana [1].

#### 2.4.1.1.1. Staklena vlakna

Staklena vlakna predstavljaju ojačala koja su najviše zastupljena u ojačavanju polimernih kompozita s duromernom ili plastomernom matricom. Postupak proizvodnje staklenih vlakana nije pretjerano zahtjevan, a odvija se tako da se silicijev dioksid ( $\text{SiO}_2$ ) zajedno s ostalim prirodnim mineralima zagrijava na temperaturu od oko 1600 °C te dolazi do formiranja ukapljenog stakla koje se zatim odvodi u peć za izvlačenje vlakana. Tamo staklo prolazi kroz mlaznice te nakon hlađenja nastaju vlakna promjera od 3 do 20  $\mu\text{m}$ . Nakon toga vlakna se apretiraju, tj. na njih se nanosi emulzija koja dodatno štiti i poboljšava svojstva i prionjivost vlakana [6].

Uz već spomenutu jednostavnu proizvodnju, glavne pozitivne karakteristike staklenih vlakana su laka dostupnost, niska cijena, visoka čvrstoća koja omogućuje izradu kompozita visoke specifične čvrstoće, dimenzijska stabilnost, izotropnost i dielektrična svojstva. Također, zbog kemijske inertnosti stakla u polimernom okruženju, moguće je kombinacijom staklenih vlakana i polimernih matrica proizvesti kompozite postoje u korozivski agresivnim okolinama te otporne na starenje [2].

S obzirom na kemijski sastav i svojstva razlikujemo više vrsta staklenih vlakana [1]. U tablici 1. prikazana je podjela staklenih ojačala i njihova svojstva.

**Tablica 1. Podjela staklenih vlakana i njihove karakteristike [1]**

Vrsta stakla	Karakteristike
A – staklo	alkalijsko staklo, dobra kemijska postojanost, rijetka primjena
C – staklo	najveća otpornost na kemijsku koroziju, izrada antikorozivnih prevlaka
E – staklo	čini više od 90 % svih staklenih ojačala, dobra tlačna i rastezna čvrstoća, dobra izolacijska svojstva, niska cijena, otpornost na utjecaj morske vode
R – staklo	čvrstoća veća od E – stakla, bolja dinamička izdržljivost, visoka cijena, primjena u zrakoplovnoj industriji
S – staklo	najbolja otpornost na visoke temperature, čvrstoća veća od E – stakla, visoka cijena, bolja dinamička izdržljivost, primjena u zrakoplovstvu
T – staklo	visoka rastezna čvrstoća i modul elastičnosti, visoka cijena, primjena do 1050 °C

Iako imaju visoku čvrstoću, modul elastičnosti većine staklenih vlakana nije pretjerano visok. Uz nisku krutost, nedostatak staklenih ojačala je i osjetljivost na povišenje temperature. Kompoziti ojačani staklenim vlaknima primjenjuju se obično do 200 °C jer pri daljnjem rastu temperature dolazi do značajnog pogoršanja mehaničkih svojstava kao što su rastezna čvrstoća, tlačna čvrstoća i tvrdoća [1].

Polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima imaju široko područje primjene. Tako se primjerice koriste u obliku obloga u građevinskoj industriji, u brodogradnji za izradu trupova brodova, a u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji za izradu kabina. Također, upotrebljavaju se za izradu sportskih rekvizita kao što su reketi, palice, kacige [3].

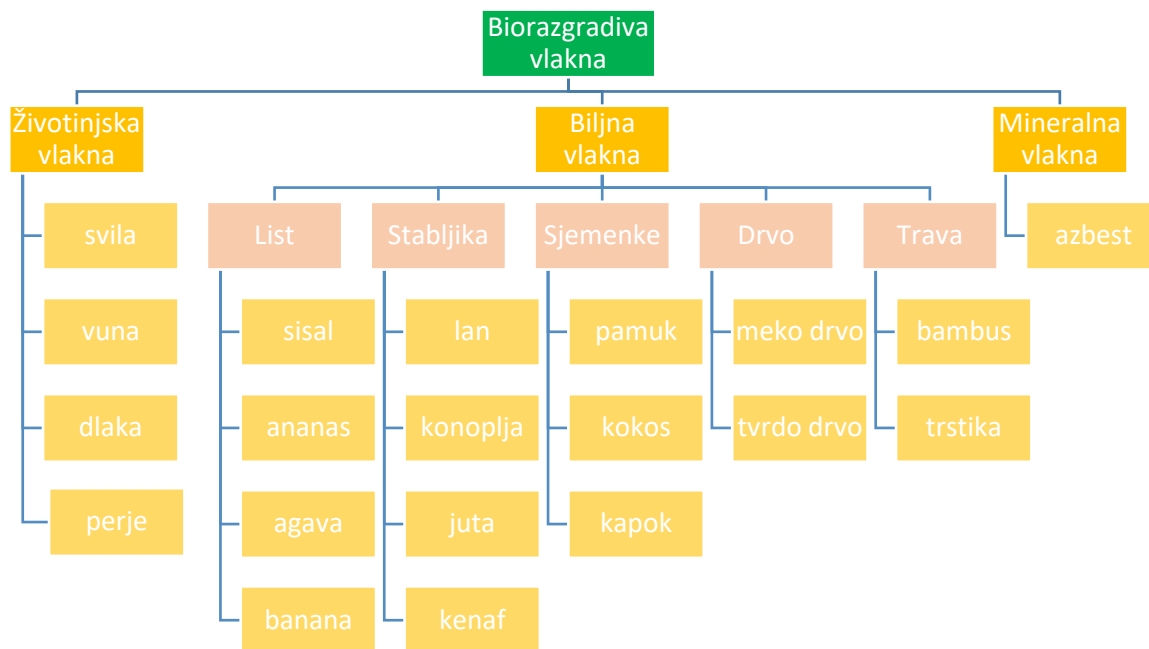
Na slici 6. prikazana je tkanina izrađena od staklenih vlakana.

**Slika 6. Tkanina od staklenih vlakana [9]**

#### 2.4.1.1.2. Biorazgradiva vlakna

Porastom broja ukupnog stanovništva, sve većim razvojem raznih industrija i općenito proizvodnje, problemi vezani uz onečišćenje okoliša, velike količine nerazgradivog materijala, visoke razine zagađenosti te odlaganje i recikliranje otpada izraženiji su nego ikada prije. Kako ne bi došlo do daljnjih komplikacija i ugrožavanja života budućih generacija diljem svijeta, potrebno je ljude ekološki osvijestiti i usmjeriti ih ka korištenju prirodnih, biorazgradivih materijala iz obnovljivih izvora. Shodno tome, posljednjih se godina kao ojačala polimernih kompozita sve više koriste biorazgradiva vlakna [10].

Biorazgradiva vlakna u kombinaciji s biološki nerazgradivim polimerima nastalim derivacijom nafte (duromeri, plastomeri) čine kompozitne materijale koji se nazivaju biokompoziti. Materijal matrice može biti i polimer dobiven iz prirodnih materijala koji je istog sastava kao odgovarajući dobiven iz naftnih derivata, kao i biorazgradivi polimer. Kompoziti koji su građeni od biorazgradivih matrica i ojačala nazivaju se još i zeleni kompoziti. Zeleni kompoziti su ekološki najpogodniji, ali njihova mehanička svojstva, odnosno prvenstveno svojstva matrice, nisu na zadovoljavajućoj razini te zbog toga još ne nailaze na širu primjenu u industriji. Prema podrijetlu biorazgradiva vlakna mogu se podijeliti na tri glavne skupine, a to su: biljna vlakna građena od celuloze, životinjska vlakna građena od bjelančevina i mineralna vlakna silikatnog minerala krizotila, poznatijeg i kao bijeli azbest. Biljna vlakna dobivaju se iz različitih dijelova biljke kao što su kora stabljike, listovi, plodovi, sjemenke, dok životinjska vlakna većinom potječu iz krzna ili čahura životinja [11], [12]. Slika 7. prikazuje navedenu podjelu biorazgradivih vlakana.



**Slika 7. Podjela biorazgradivih vlakana [12]**

Iako sintetska, odnosno prvenstveno staklena vlakna i dalje drže vodeću poziciju na tržištu vlaknima ojačanih polimernih kompozita, nemogućnost njihova recikliranja dovodi do sve veće uporabe biorazgradivih vlakana. Uz mogućnost obnovljivosti, biorazgradiva vlakna ističu se i malom gustoćom koja im osigurava visoku specifičnu čvrstoću i krutost u usporedbi sa staklenim vlaknima, zatim niskom cijenom i manjim utroškom energije prilikom proizvodnje, većom sigurnošću za rukovanje i jednostavnijom izradom u odnosu na sintetska vlakna, visokom otpornošću na koroziju te dobrim izolacijskim svojstvima. Također, važno je naglasiti ekološku održivost takvih vlakana koja se očituje u obnovljivim izvorima sirovina koje su potrebne za njihovu izradu [10], [11].

S druge strane, veliki problem biorazgradivih vlakana je njihova slaba kompatibilnost s određenim polimernim matricama koja je dodatno narušena činjenicom da su biorazgradiva vlakna higroskopna, tj. sklona su upijanju vlage koja za posljedicu ima slabljenje adhezijskih sila između hidrofobne polimerne matrice i ojačala te pogoršanje mehaničkih svojstava konačnog proizvoda. Otpornost na visoke temperature nije im pretjerano visoka tako da je maksimalna temperatura njihove primjene do 200 °C jer u protivnom dolazi do degradacije vlakana. Isto tako svojstva im uvelike ovise o klimatskim uvjetima i lokalitetu na kojem rastu i razvijaju se. Iz tog je razloga nemoguće osigurati kontinuirana svojstva vlakana, već se njihove karakteristike mogu razlikovati iz godine u godinu. Zbog osjetljivosti na truljenje i djelovanje raznih mikroorganizama, veliku pozornost treba pridati i uvjetima u kojima se vlakna pohranjuju, obrađuju i isporučuju [11], [12].

Iako imaju određene nedostatke, prednosti biorazgradivih vlakana nadilaze ih pa se tako ojačani kompoziti sve više primjenjuju u različitim granama industrije kao što su automobilska industrija, zrakoplovstvo, brodogradnja, elektronička industrija, industrija sportske opreme, tekstilna industrija. Tako se primjerice vlakna konoplje koriste za izradu papira, ambalaže, tkanina, sisal vlakna se rabe u građevinskoj industriji za izradu prozora, okvira za vrata, izolacijskih panela, kenaf vlakna služe kao izolacijski materijal i materijal koji apsorbira tekućine, dok se vlakna lana primjenjuju u automobilskoj industriji prilikom dizajniranja interijera automobila ili u industriji sportskih rekvizita za izradu okvira reketa, daski za snowboard, dijelova bicikla [11].

#### 2.4.1.1.3. Lanena vlakna

Lan je prehrambena i tekstilna biljka iz roda *Linum* koja se danas ponajviše koristi za izradu lanenih vlakana i lanenog ulja. Svoje podrijetlo vuče iz Egipta, a dosad je diljem svijeta zabilježeno više od 200 različitih vrsta lana od kojih je većina divlja. Za proizvodnju vlakana i sjemena uzgaja se jedino obični ili pravi lan. S obzirom na to da li se uzgaja za izradu vlakana ili za izradu ulja, pravi lan dijeli se još na predivi lan i na uljani lan, a oni se međusobno razlikuju prema vrsti grananja i visini stabljike. Predivi lan ima stabljiku visine od 60 do 120 cm i razgranatu pri vrhu, dok uljani lan ima kraću i jače razgranatu stabljiku visine od 40 do 60 cm. Zahvaljujući svojoj prilagodljivosti klimatskim uvjetima, lan se može uzgajati diljem svijeta, ali prvenstveno se uzgaja u područjima umjerene klime. Najveći proizvođači lana za vlakna su Francuska, Belgija, Nizozemska, Kina i Rusija, dok su najveći proizvođači uljanog lana Kanada, Indija i SAD [13].

Razvojem mehanizacije i brojnih tehnologija obrade, proces proizvodnje i prerade lana danas je uvelike automatiziran. Lanena vlakna međusobno su povezana pomoću ugljikohidrata pektina u svežnjeve koji se protežu duž cijele stabljike te čine oko četvrtinu ukupnog udjela stabljike. Kako bi se vlakna izdvojila iz stabljike potrebno je razgraditi pektin, a taj postupak započinje tako što se prvo pomoću specijaliziranih strojeva čupaju stabljike koje nisu još potpuno zrele. Zatim slijedi proces maceracije, tj. močenja stabljika u toploj vodi obogaćenoj enzimima, koji ovisno o uvjetima može trajati i do nekoliko tjedana. Nakon močenja slijedi sušenje stabljika i njihovo lomljenje pomoću rebrastih valjaka, a cijeli postupak završava grebenanjem, odnosno uklanjanjem drvenastih dijelova te razdvajanjem kratkih i dugih vlakana [5]. Na slici 8. prikazana su lanena vlakna koja se dobiju prethodno opisanim postupkom.



**Slika 8. Lanena vlakna [14]**

Lanena vlakna odlikuju se malom gustoćom, slabom istezljivošću te relativno visokim vrijednostima rastezne čvrstoće i krutosti. Također su i elastična, ali samo za mala istezanja. Pozitivna karakteristika lanenih vlakana je to što su biorazgradiva, netoksična te su postojana u slabim razrijeđenim kiselinama i lužnatim otopinama. S druge strane, osjetljiva su na djelovanje vrućih razrijeđenih i hladnih koncentriranih kiselina, a u slučaju duljeg izlaganja sunčevim zrakama dolazi i do starenja lana koje onda dovodi do smanjenja čvrstoće i drugih mehaničkih svojstava. Maksimalna temperatura primjene im je do 200 °C, a daljnjim povišenjem temperature dolazi do njihovog raspadanja. Općenito, mehanička svojstva lanenih vlakana usporediva su sa svojstvima tradicionalno korištenih staklenih vlakana te se sve više nameću kao njihova zamjena kod ojačanja polimernih kompozita. Ipak, ono što ih sprječava u još široj primjeni je neujednačenost svojstava što znači da se čak i vlakna uzgojena na istoj lokaciji mogu razlikovati u svojim obilježjima. Uzrok tome mogu biti razni čimbenici poput klimatskih uvjeta, postupka izdvajanja vlakana iz stabljike, uvjeta skladištenja, načina obrade. Isto tako, mehanička svojstva lanenih vlakana ovise i o dijelu biljke iz kojeg potječu pa će tako vlakna dobivena iz središnjeg dijela stabljike imati veću čvrstoću i krutost u odnosu na vlakna dobivena iz rubnih područja stabljike, a razlog svemu tome je veći udio celuloze u središnjem dijelu biljke [15]. U tablici 2. prikazana su određena svojstva staklenih i pojedinih biorazgradivih vlakana.

Tablica 2. Svojstva staklenih i biorazgradivih vlakana [15]

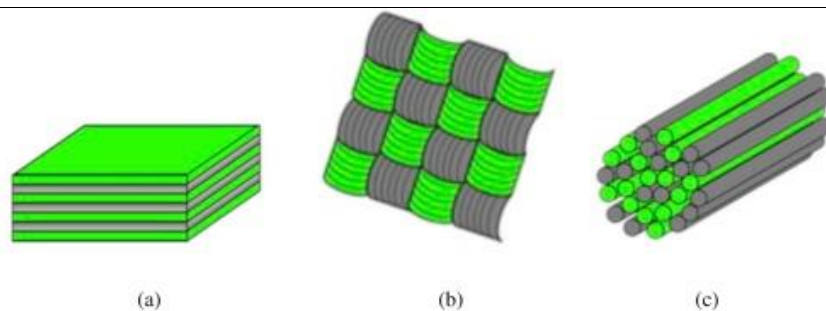
Vlakno	Gustoća $\rho$ , [g/cm <sup>3</sup> ]	Rastezna čvrstoća $\sigma_m$ , [MPa]	Modul elastičnosti $E$ , [GPa]	Istezljivost $A$ , [%]	Apsorpcija vlage, [%]
E – staklo	2,50 – 2,55	1800 – 3500	70 – 73	2,5 – 3,0	0
Lan	1,40 – 1,50	345 – 1500	30 – 80	1,2 – 3,2	7
Konoplja	1,48	550 – 900	70	1,6	8
Juta	1,30 – 1,45	400 – 800	10 – 30	1,2 – 1,8	12
Agava	1,33 – 1,45	470 – 700	9 – 38	2,0 – 7,0	11

Prve industrije koje su započele s korištenjem polimernih kompozita ojačanih vlaknima lana bile su zrakoplovna i automobilska industrija, a primjena takvih kompozita u tim je industrijama prisutna i danas. Tako se u automobilskoj industriji biokompoziti primjenjuju za izradu unutrašnjih dijelova automobila kao što su paneli vrata, pregradne police, nasloni za sjedala. Osim u već spomenutim industrijama, uporaba biokompozita sve je češća i u brodogradnji, građevinarstvu, industriji namještaja te industriji sportske opreme [13].

## 2.5. Hibridni kompoziti

Hibridni kompoziti su vrsta kompozita koja sadrži dvije ili više različitih vrsta ojačala koja se nalaze u zajedničkoj jedinstvenoj matrici. Ovakvi kompoziti razvijeni su s ciljem dobivanja materijala koji zadržava pozitivne karakteristike ojačala od kojih je građen, dok one negativne karakteristike nastoji što više ublažiti. Način slaganja vlakana u matrici također utječe na konačna svojstva kompozita. Tri najčešća načina slaganja vlakana koji su ujedno i prikazani na slici 9. su [16]:

- a) sloj po sloj različitih vrsta tkanja
- b) tkanje sastavljeno od različitih vlakana
- c) međusobno izmiješana različita vlakna



**Slika 9. Najčešći načini slaganja vlakana kod hibridnih kompozita [16]**

Najjednostavniji i najjeftiniji postupak izrade hibridnog kompozita je slaganje različitih vrsta tkanja sloj po sloj. U većini slučajeva tkanja se slažu naizmjenično, ali moguće je i uzastopno polaganje više tkanja iste vrste i tako sve dok se ne postigne željena debljina. Zahvaljujući mogućnosti istovremenog postizanja različitih mehaničkih svojstava, hibridni kompoziti nailaze na primjenu u raznim granama gospodarstva poput zrakoplovstva, brodogradnje, građevinarstva, automobilske industrije. Danas najčešće korištene kombinacije vlakana su kombinacije ugljičnih i aramidnih vlakana, aramidnih i staklenih te ugljičnih i staklenih vlakana [16]. Karakteristike tih kombinacija prikazane su u tablici 3.

**Tablica 3. Najčešće kombinacije vlakana u hibridnim kompozitima i njihova svojstva [1]**

Kombinacija vlakana	Karakteristike
ugljik / aramid	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dobra žilavost i rastezna čvrstoća od aramida</li> <li>- dobra tlačna i rastezna čvrstoća od ugljika</li> <li>- mala gustoća i visoka cijena</li> </ul>
aramid / staklo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dobra žilavost i rastezna čvrstoća od aramida</li> <li>- dobra tlačna i rastezna čvrstoća od stakla</li> <li>- mala gustoća i niska cijena</li> </ul>
ugljik / staklo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dobra tlačna i rastezna čvrstoća od ugljika</li> <li>- niska cijena od stakla</li> </ul>

## 2.6. Mehanička svojstva kompozita

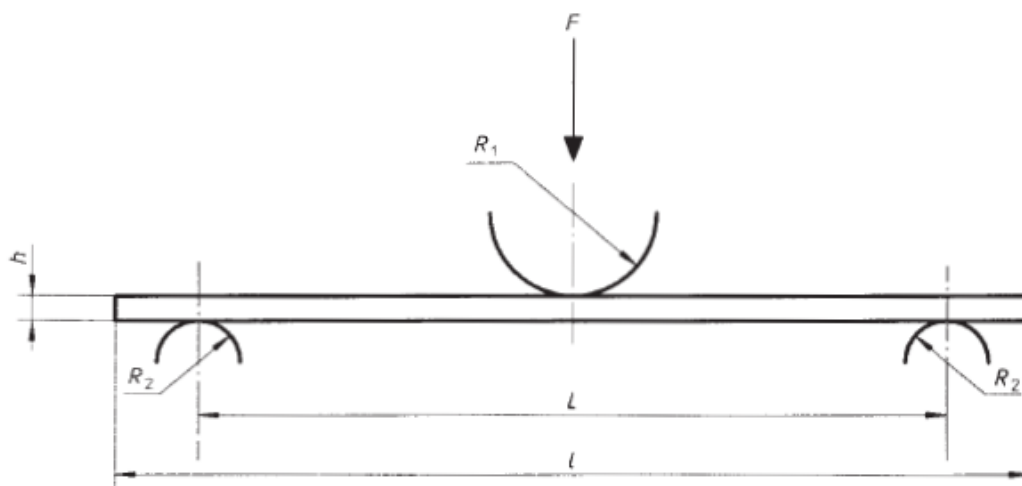
Mehanička svojstva materijala su svojstva koja definiraju mehaničko ponašanje materijala u određenim eksploatacijskim uvjetima. Kao i sva svojstva, tako i mehanička svojstva proizlaze iz strukture materijala. Kako bi se postigla željena struktura, a samim time i željena mehanička svojstva, potrebno je odabrati odgovarajući materijal i primijeniti odgovarajuće tehnološke postupke obrade materijala. Zbog raznih strukturnih nepravilnosti koje nije moguće obuhvatiti proračunom, mehanička svojstva mogu se utvrditi isključivo



eksperimentalnim putem. Mehanička svojstva imaju veliku važnost prilikom stvaranja konačnog proizvoda jer se na temelju njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i elementi konstrukcija. U mehanička svojstva kompozita ubrajaju se primjerice savojna svojstva i prividna međuslojna smična čvrstoća [17].

### 2.6.1. Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti

Savojna čvrstoća je mehaničko svojstvo materijala koje karakterizira otpornost materijala na djelovanje sila savijanja koje se primjenjuju okomito na njegovu aksijalnu os. Prilikom savijanja ispitnog tijela na njegovoj unutarnjoj strani javlja se maksimalno tlačno naprezanje, dok se na suprotnoj strani javlja maksimalno rastezno naprezanje. Upravo se ta maksimalna vrijednost rasteznog naprezanja koju materijal dosegne prije nego što dođe do loma ispitnog tijela smatra njegovom savojnom čvrstoćom. Ispitivanje savojne čvrstoće vlaknima ojačanih polimernih kompozita provodi se prema normi EN ISO 14125 : 1998. Ispitivanje se može provesti savijanjem ispitnog tijela u tri točke ili u četiri točke. Savijanje u tri točke je češći način ispitivanja, a u slučaju potrebe za detaljnijim ispitivanjem i točnošću čak i kod krhkih materijala, koristi se savijanje u četiri točke [18]. Na slici 10. nalazi se shematski prikaz savojnog ispitivanja u tri točke.



Slika 10. Shematski prikaz savojnog ispitivanja u tri točke [18]

Normom EN ISO 14125 : 1998 zadani su radijusi oslonaca i pritisknog tijela. Tako radijus  $R_1$  pritisknog tijela iznosi  $5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ , a radijus  $R_2$  oslonaca ovisan je o debljini ispitnog tijela  $h$  pa će tako za ispitna tijela debljine 3 ili manje milimetara iznositi  $2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ , a za ispitna tijela debljine veće od 3 mm iznositi će  $5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ . Isto tako normom je određena

maksimalna dopuštena pogreška izmjerenih sila i progiba koja ne smije premašiti  $\pm 1\%$  mjernog područja. Također, normom je propisano kako debljina ispitnog tijela na sredini  $1/3$  ispitnog tijela s obje strane ne smije odstupati više od  $2\%$  srednje vrijednosti debljine u centralnom području. Širina ispitnog tijela  $b$  ne smije odstupati više od  $3\%$  duž cijelog presjeka, a presjek tijela mora biti pravokutnog oblika i bez zaobljenih rubova [18]. U tablici 4. navedene su normirane dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje u tri točke koje su podijeljene u četiri klase.

**Tablica 4. Normirane dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje u tri točke [18]**

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

Ukoliko nije moguće ili poželjno koristiti standardne dimenzije, primjenjuju se normom propisane vrijednosti duljine  $l$  i razmaka između oslonaca  $L$  kao funkcije debljine ispitnog tijela  $h$ . Navedene veličine moraju biti u istom omjeru kao i standardne dimenzije [18]. Propisani omjeri tih veličina za savijanje u tri točke prikazani su u tablici 5.

**Tablica 5. Duljina  $l$  i razmak između oslonaca  $L$  kao funkcije debljine  $h$  [18]**

<b>Materijal</b>	<b><math>L/h</math></b>	<b><math>l/h</math></b>
<b>Klasa I</b>	16	20
<b>Klasa II</b>	16	20
<b>Klasa III</b>	20	30
<b>Klasa IV</b>	40	50

Nadalje, u tablici 6. nalaze se i normom određene vrijednosti širine  $b$  kao funkcije debljine  $h$ .

**Tablica 6. Širina  $b$  kao funkcija debljine  $h$  [18]**

<b>Debljina <math>h</math> [mm]</b>	<b>Širina <math>b</math> [mm] Klasa I</b>	<b>Širina <math>b</math> [mm] Klasa II, III, IV</b>
<b><math>1 &lt; h \leq 3</math></b>	25	15
<b><math>3 &lt; h \leq 5</math></b>	10	15
<b><math>5 &lt; h \leq 10</math></b>	15	15
<b><math>10 &lt; h \leq 20</math></b>	20	30
<b><math>20 &lt; h \leq 35</math></b>	35	50
<b><math>35 &lt; h \leq 50</math></b>	50	80

Prije samog provođenja ispitivanja pomoću pomičnog mjerila izmjere se sve potrebne dimenzije ispitnih tijela te se zabilježeni podaci unose u računalni program. Ispitno tijelo postavlja se simetrično na dva paralelna oslonca te se opterećuje na način da pritisno tijelo djeluje na sredini. Zbog mogućeg pomicanja pritisnog tijela, na početku ispitivanja primjenjuje se početna sila kojom se korigiraju mogući pomaci. Sila savijanja kojom djeluje pritisno tijelo povećava se tijekom ispitivanja i tako sve do pojave loma ispitnog tijela. Za svaki određeni korak povećanja sile očitava se i odgovarajući progib. Pomoću dobivenih vrijednosti sile i progiba moguće je izračunati pripadajuća naprezanja i istezanja na temelju kojih se onda konstruira dijagram naprezanje – istezanje [18].

Za izračun vrijednosti pripadajućeg savojnog naprezanja koristi se izraz [18]:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2.2)$$

Gdje je:

$\sigma_f$  [MPa] – savojno naprezanje

$F$  [N] – zadana sila

$L$  [mm] – razmak između oslonaca

$b$  [mm] – širina ispitnog tijela

$h$  [mm] – debljina ispitnog tijela

Za izračun vrijednosti pripadajućeg istežanja koristi se izraz [18]:

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot f \cdot h}{L^2} \quad (2.3)$$

Gdje je:

$\varepsilon$  [mm/mm] – istežanje uslijed savojnog opterećenja

$f$  [mm] – progib ispitnog tijela

Za izračun vrijednosti savojne čvrstoće koristi se izraz [18]:

$$\sigma_{fM} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2.4)$$

Gdje je:

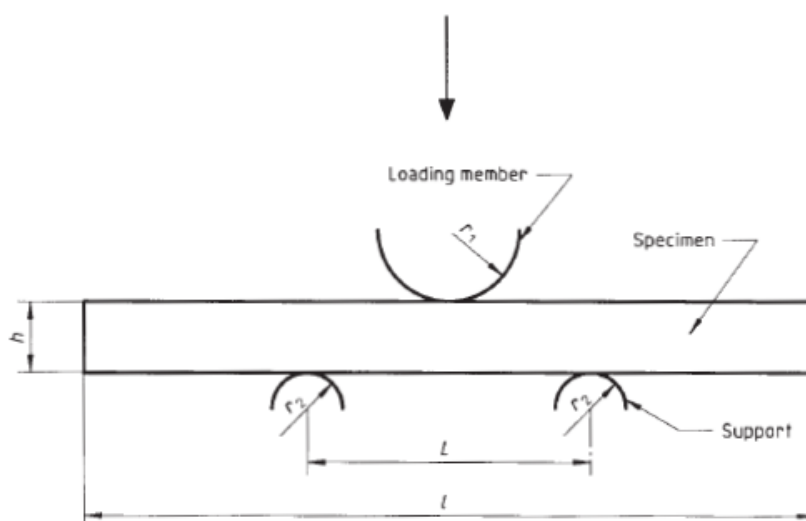
$\sigma_{fM}$  [MPa] – savojna čvrstoća

$F_{max}$  [N] – maksimalna sila

Savojni modul elastičnosti  $E_f$  je omjer savojnog naprezanja i pripadajućeg istežanja, a određuje se tako što se dobivena krivulja u dijagramu naprezanje – istežanje aproksimira linearnim pravcem, a nagib tog pravca je zapravo savojni modul elastičnosti [18].

### 2.6.2. Prividna međuslojna smična čvrstoća

Prividna međuslojna smična čvrstoća je mehaničko svojstvo materijala koje karakterizira kvalitetu graničnih površina, tj. međuslojeva. Ona ovisi o čvrstoći veza ostvarenih između matrice i ojačala kao i o ukupnoj veličini dodirnih površina tih dviju komponenti. Dobra adhezija između matrice i ojačala nužna je kako bi se ostvario kvalitetan i ravnomjeran prijenos opterećenja s matrice na ojačala te kako ne bi došlo do raslojavanja kompozita. Ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće polimernih kompozita ojačanih vlaknima provodi se prema normi EN ISO 14130 : 1997. Ispitivanje je slično ispitivanju savojne čvrstoće te se također provodi savijanjem u tri točke uz jednu bitnu razliku, a to je da je razmak između oslonaca smanjen kako bi došlo do smičnog naprezanja među slojevima kompozita [19]. Na slici 11. nalazi se shematski prikaz ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće.



**Slika 11. Shematski prikaz ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće [19]**

Normom EN ISO 14130 : 1997 zadani su radijusi oslonaca i pritisnog tijela. Tako radijus  $r_1$  pritisnog tijela iznosi  $5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ , a radijus  $r_2$  oslonaca iznosi  $2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ . Širina pritisnog tijela i oslonaca mora biti veća od širine ispitnog tijela. Ispitno tijelo mora imati ravnu površinu koja kao i rubovi ne smije biti oštećena. Debljina ispitnog tijela mora biti unutar  $\pm 5 \%$  srednje vrijednosti debljine i to duž cijelog presjeka koji mora biti pravokutnog oblika. Širina pojedinog ispitnog tijela mora biti konstantna do unutar  $0,2 \text{ mm}$  odstupanja [19]. U tablici 7. navedene su normirane dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće.

**Tablica 7. Normirane dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće [19]**

Debljina $h$ [mm]	Duljina $l$ [mm]	Širina $b$ [mm]
$2 \pm 0,2$	$20 \pm 1$	$10 \pm 0,2$

Ukoliko nije moguće ili poželjno koristiti standardne dimenzije, primjenjuju se normom propisane vrijednosti duljine  $l$  i širine  $b$  kao funkcije debljine ispitnog tijela  $h$ . Navedene veličine moraju biti u istom omjeru kao i standardne dimenzije [19]:

$$l = 10 \cdot h \quad (2.5)$$

$$b = 5 \cdot h \quad (2.6)$$

Razmak između oslonaca  $L$  određuje se pomoću srednje vrijednosti debljine ispitnih tijela uz dopušteno odstupanje od  $\pm 0,3$  mm [19]:

$$L = 5 \cdot h_{sr} \quad (2.7)$$

Prije samog provođenja ispitivanja pomoću pomičnog mjerila izmjere se sve potrebne dimenzije te se ispitno tijelo postavlja simetrično na dva paralelna oslonca i opterećuje na način da pritisno tijelo djeluje na sredini. Ispitno tijelo opterećuje se silom koja se postepeno povećava, a ispitivanje završava dosežanjem maksimalne sile, odnosno sile kod koje dolazi do loma ispitnog tijela. Pomoću maksimalne sile izračunava se prividna međuslojna smična čvrstoća i to prema izrazu [19]:

$$\tau = \frac{3 \cdot F_{max}}{4 \cdot b \cdot h} \quad (2.8)$$

Gdje je:

$\tau$  [MPa] – prividna međuslojna smična čvrstoća

$F_{max}$  [N] – maksimalna sila

$b$  [mm] – širina ispitnog tijela

$h$  [mm] – debljina ispitnog tijela

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu ovog završnog rada provedena su ispitivanja četiriju različitih polimernih kompozita ojačanih vlaknima s ciljem utvrđivanja njihovih mehaničkih svojstava pri savojnom opterećenju. Kompoziti su se međusobno razlikovali s obzirom na to da li su bili izrađeni od epoksidne ili poliesterske smole te da li su kao ojačala korištena lanena ili staklena vlakna ili njihova kombinacija. Također, pojedini kompoziti razlikovali su se i prema broju slojeva ojačala. Iz svakog kompozita izrezana su ispitna tijela odgovarajućih oblika i dimenzija koja su zatim bila podvrgnuta ispitivanju savojnih i međuslojnih svojstava. Pomoću rezultata ispitivanja bilo je potrebno odrediti savojni modul elastičnosti, savojnu čvrstoću, deformaciju prilikom loma, maseni udio vlakana te prividnu međuslojnu smičnu čvrstoću svakog kompozita. Dobivena svojstva na kraju je bilo potrebno usporediti s pravilima Hrvatskog registra brodova za kompozite sa staklenim vlaknima te na taj način ustanoviti mogu li kompoziti ojačani biorazgradivim vlaknima biti kvalitetna zamjena kompozitima ojačanim staklenim vlaknima koji se uobičajeno koriste u brodogradnji.

#### 3.1. Materijali matrice i ojačala

Za izradu kompozita korištena je poliesterska smola Synolite 1967 – G – 2 (AOC, Njemačka) i epoksidna smola InfuGreen 810 (Sicomin, Francuska), dok su kao ojačala korištena lanena vlakna ampliTEX 500 (Bcomp, Švicarska) te staklena vlakna Triaxial 1200 (SAERTEX, Njemačka). Raznolikim kombinacijama navedenih konstituenata izrađena su četiri različita kompozita sljedećeg sastava:

- 1) poliesterska smola Synolite 1967 – G – 2 / lanena vlakna ampliTEX 500
- 2) poliesterska smola Synolite 1967 – G – 2 / staklena vlakna Triaxial 1200
- 3) epoksidna smola InfuGreen 810 / lanena vlakna ampliTEX 500
- 4) poliesterska smola Synolite 1967 – G – 2 / lanena vlakna ampliTEX 500 i staklena vlakna Triaxial 1200

Svi kompoziti izrađeni su postupkom vakuumske infuzije uz 90 – postotni vakuum. Proces vakuumske infuzije kod prvog i drugog kompozita proveden je pri temperaturi od 26 °C i relativnoj vlazi zraka od 45 %, dok je kod trećeg i četvrtog kompozita proveden pri temperaturi od 25 °C te relativnoj vlazi zraka od 46 %.

U tablici 8. prikazane su određene karakteristike sva četiri izrađena kompozita.



Tablica 8. Karakteristike izrađenih kompozita

Kompozit	Smola	Tkanina	Broj slojeva tkanine	Masa tkanine [kg]	Masa cijelog kompozita [kg]	Debljina laminata [mm]
1	poliester Synolite 1967 – G – 2	lanena vlakna ampliTEX 500	4	0,683	1,164	4,4
2	poliester Synolite 1967 – G – 2	staklena vlakna Triaxial 1200	4	1,816	2,461	5,7
3	epoksid InfuGreen 810	lanena vlakna ampliTEX 500	6	0,779	1,874	6,1
4	poliester Synolite 1967 – G – 2	lanena vlakna ampliTEX 500 i staklena vlakna Triaxial 1200	4 + 2 + 4	1,749	3,177	9,5

Bitno je napomenuti da je pri izradi hibridnog kompozita za potrebe projekta došlo do pogreške te je izrađen hibrid u kojem je ojačana središnja ravnina, umjesto vanjske plohe gdje dolazi do najvećeg naprezanja prilikom savojnog opterećenja.

### 3.2. Maseni udio vlakana

Maseni udio vlakana u kompozitu određuje se pomoću izraza:

$$\text{maseni udio vlakana} = \frac{m_v}{m_k} \cdot 100 \% \quad (3.1)$$

Gdje je:

$m_v$  [kg] – masa vlakana

$m_k$  [kg] – masa cijelog kompozita

Tablica 9. prikazuje maseni udio vlakana za svaki izrađeni kompozit.

**Tablica 9. Maseni udio vlakana u kompozitima**

Kompozit	Sastav	Maseni udio vlakana [%]
1	poliester / lan	58,68
2	poliester / staklo	73,79
3	epoksid / lan	41,57
4	poliester / lan i staklo	55,05

### 3.3. Ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće

Ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće provedeno je prema normi HRN EN ISO 14130 : 1997 metodom kratke grede na univerzalnoj kidalici Shimadzu AGS – X koja je prikazana na slici 12. Kidalica je povezana s računalom i upravljana pomoću programa Trapezium X. Navedeni program omogućuje zapisivanje rezultata ispitivanja u elektronskom obliku, a prije samog provođenja ispitivanja u njega su unesene potrebne izmjerene dimenzije ispitnih tijela. Mjerno područje kidalice je od 0 do 50000 N, a brzina ispitivanja bila je 5 mm/min za prvi, treći i četvrti kompozit, dok je za drugi kompozit iznosila 2 mm/min.



**Slika 12. Univerzalna kidalica Shimadzu AGS – X**

U sljedećim tablicama prikazane su dimenzije ispitnih tijela svih kompozita i razmak između oslonaca koji izračunat prema izrazu (2.7). U oznakama za ispitno tijelo prvi broj referira se na tablicu 8. i označava kompozit iz kojeg su izrezana ispitna tijela, dok drugi broj u oznaci predstavlja redni broj ispitnog tijela. Tako primjerice oznaka 1-5 znači da se radi o prvom kompozitu (poliester / lan) i ispitnom tijelu broj pet.

**Tablica 10. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje za kompozit poliester / lan**

Ispitno tijelo	Debljina $h$ [mm]	Širina $b$ [mm]	Razmak između oslonaca $L$ [mm]
1-1	3,52	22,56	20,00
1-2	3,50	22,36	20,00
1-3	3,50	22,36	20,00
1-4	3,66	22,40	20,00
1-5	3,54	22,30	20,00
1-6	3,54	22,34	20,00
1-7	3,68	22,42	20,00
1-8	3,62	22,34	20,00
1-9	3,62	22,30	20,00
1-10	3,78	22,14	20,00
1-11	3,56	22,54	20,00
1-12	3,96	22,30	20,00
1-13	4,16	22,38	20,00
1-14	4,58	22,52	20,00
1-15	3,76	22,36	20,00
1-16	4,62	22,36	20,00
1-17	4,02	22,36	20,00

Tablica 11. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje za kompozit poliester / staklo

Ispitno tijelo	Debljina $h$ [mm]	Širina $b$ [mm]	Razmak između oslonaca $L$ [mm]
2-1	4,90	24,94	24,00
2-2	4,92	24,94	24,00
2-3	4,82	24,90	24,00
2-4	5,06	24,76	24,00
2-5	4,82	24,80	24,00
2-6	4,56	24,70	24,00
2-7	4,88	24,72	24,00
2-8	4,84	24,66	24,00
2-9	4,74	24,94	24,00
2-10	4,80	24,82	24,00
2-11	4,70	24,80	24,00

Tablica 12. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje za kompozit epoksid / lan

Ispitno tijelo	Debljina $h$ [mm]	Širina $b$ [mm]	Razmak između oslonaca $L$ [mm]
3-1	6,10	30,00	30,00
3-2	5,84	30,06	30,00
3-3	5,88	30,00	30,00
3-4	5,02	30,06	30,00
3-5	5,82	30,02	30,00
3-6	5,92	30,04	30,00
3-7	5,80	30,09	30,00
3-8	5,92	30,04	30,00
3-9	5,90	30,02	30,00
3-10	6,00	29,98	30,00
3-11	5,80	30,00	30,00
3-12	5,94	30,04	30,00
3-13	5,82	29,84	30,00
3-14	6,84	30,04	30,00

Tablica 13. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje za kompozit poliester / lan i staklo

Ispitno tijelo	Debljina $h$ [mm]	Širina $b$ [mm]	Razmak između oslonaca $L$ [mm]
4-1	9,14	42,56	46,00
4-2	9,04	42,78	46,00
4-3	9,18	42,62	46,00
4-4	8,88	42,52	46,00
4-5	9,14	42,52	46,00
4-6	8,66	42,50	46,00
4-7	10,24	42,40	46,00
4-8	9,26	42,52	46,00
4-9	8,88	42,52	46,00
4-10	8,88	42,54	46,00
4-11	8,88	42,56	46,00
4-12	10,24	42,52	46,00

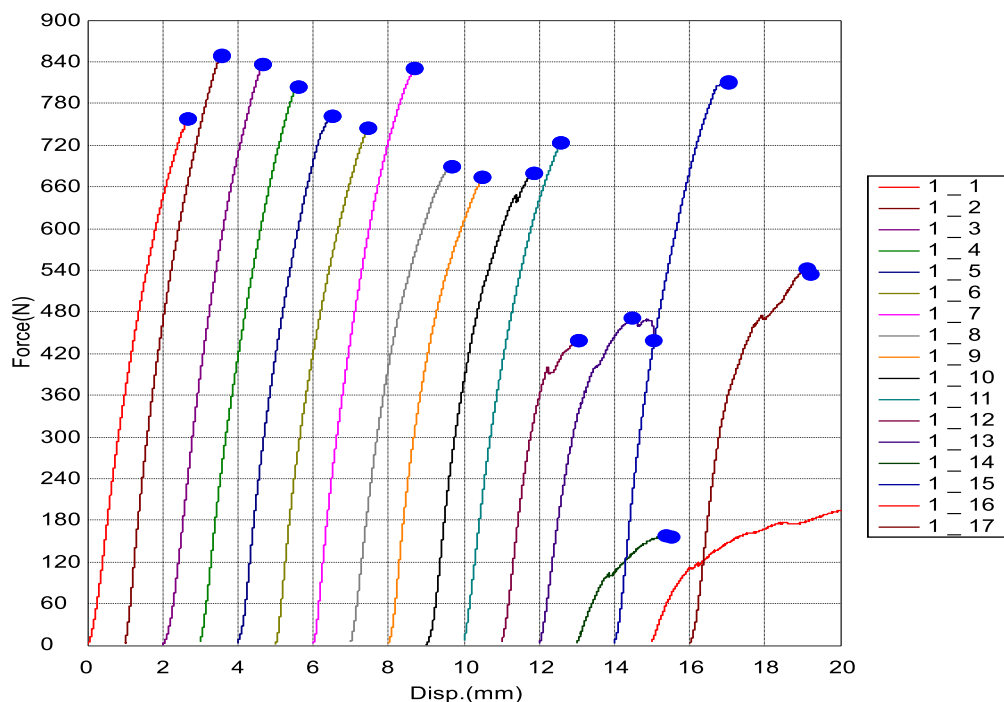
### 3.4. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće

U nastavku su prikazane tablice s dobivenim rezultatima maksimalne sile i vrijednostima prividne međuslojne smične čvrstoće koje su izračunate pomoću izraza (2.8). Također, za svaki kompozit priložen je i dijagram sila – progib dobiven u programu Trapezium X.

Tablica 14. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće za kompozit poliester / lan

Ispitno tijelo	Maksimalna sila $F_{max}$ [N]	Međuslojna smična čvrstoća $\tau$ [MPa]
1-1	757,31	7,15
1-2	849,06	8,14
1-3	835,28	8,00
1-4	803,88	7,35
1-5	761,37	7,23
1-6	743,67	7,05
1-7	830,52	7,55
1-8	689,55	6,39
1-9	674,14	6,26
1-10	678,47	6,08
1-11	722,70	6,75
1-12	438,71	3,73
1-13	470,57	3,79
1-14	158,11	1,15
1-15	811,75	7,24
1-16	208,64	1,51
1-17	542,01	4,52
<b>Srednja vrijednost</b>		7,10
<b>Standardna devijacija</b>		0,64461

Ispitna tijela 1-12, 1-13, 1-14, 1-16 i 1-17 nisu uzeta u proračun srednje vrijednosti i standardne devijacije zbog njihovih značajnih odstupanja.

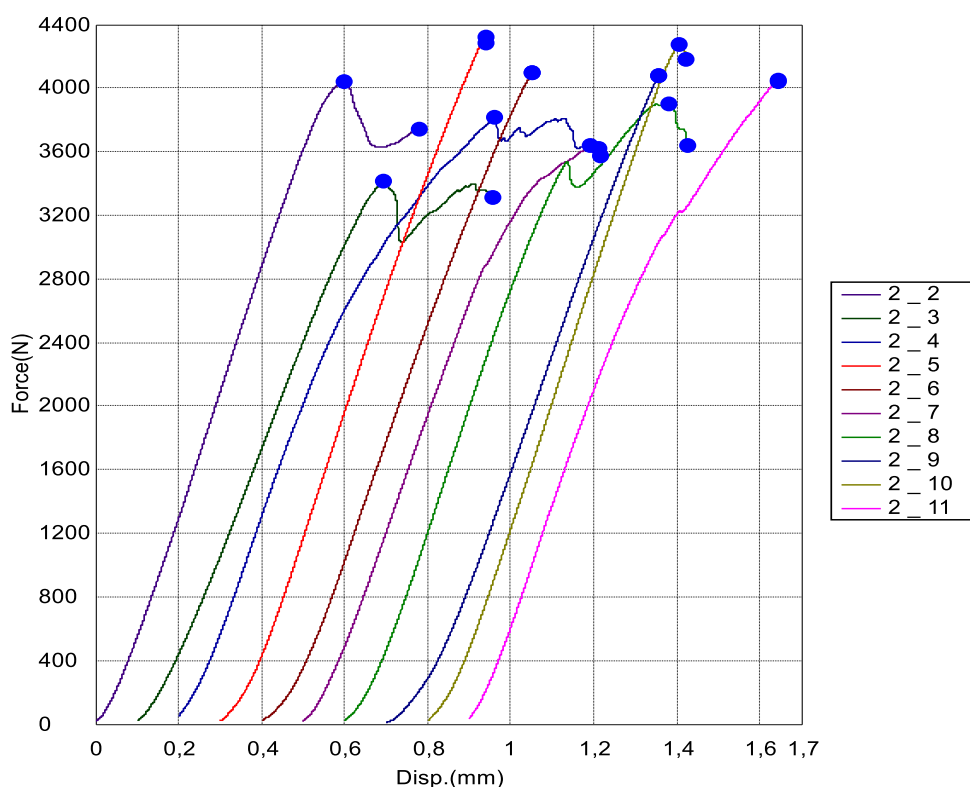


Slika 13. Dijagram sila – progib dobiven međuslojnim ispitivanjem za kompozit poliester / lan

**Tablica 15. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće za kompozit poliester / staklo**

Ispitno tijelo	Maksimalna sila $F_{\max}$ [N]	Međuslojna smična čvrstoća $\tau$ [MPa]
2-1	-	-
2-2	4036,75	24,67
2-3	3411,62	21,32
2-4	3814,41	22,83
2-5	4322,27	27,12
2-6	4092,07	27,25
2-7	3637,06	22,61
2-8	3902,02	24,52
2-9	4080,49	25,89
2-10	4275,34	26,91
2-11	4048,82	26,05
<b>Srednja vrijednost</b>		25,32
<b>Standardna devijacija</b>		1,76626

Ispitna tijela 2-1 i 2-3 nisu uzeta u proračun srednje vrijednosti i standardne devijacije zbog značajnih odstupanja.

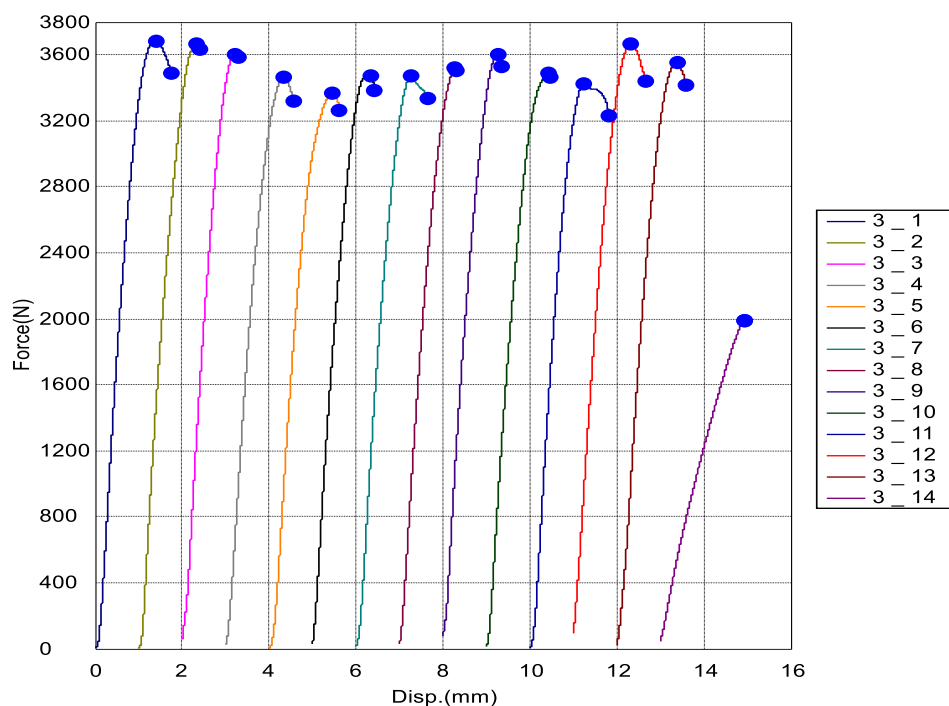


**Slika 14. Dijagram sila – progib dobiven međuslojnim ispitivanjem za kompozit poliester / staklo**

Tablica 16. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće za kompozit epoksid / lan

Ispitno tijelo	Maksimalna sila $F_{max}$ [N]	Međuslojna smična čvrstoća $\tau$ [MPa]
3-1	3683,08	15,09
3-2	3667,24	15,67
3-3	3602,87	15,32
3-4	3461,86	17,21
3-5	3367,93	14,46
3-6	3472,95	14,65
3-7	3472,82	14,92
3-8	3522,98	14,86
3-9	3600,39	15,25
3-10	3486,40	14,54
3-11	3426,64	14,77
3-12	3666,94	15,41
3-13	3554,69	15,35
3-14	1991,21	7,27
<b>Srednja vrijednost</b>		15,19
<b>Standardna devijacija</b>		0,70831

Ispitno tijelo 3-14 nije uzeto u proračun srednje vrijednosti i standardne devijacije zbog značajnih odstupanja.



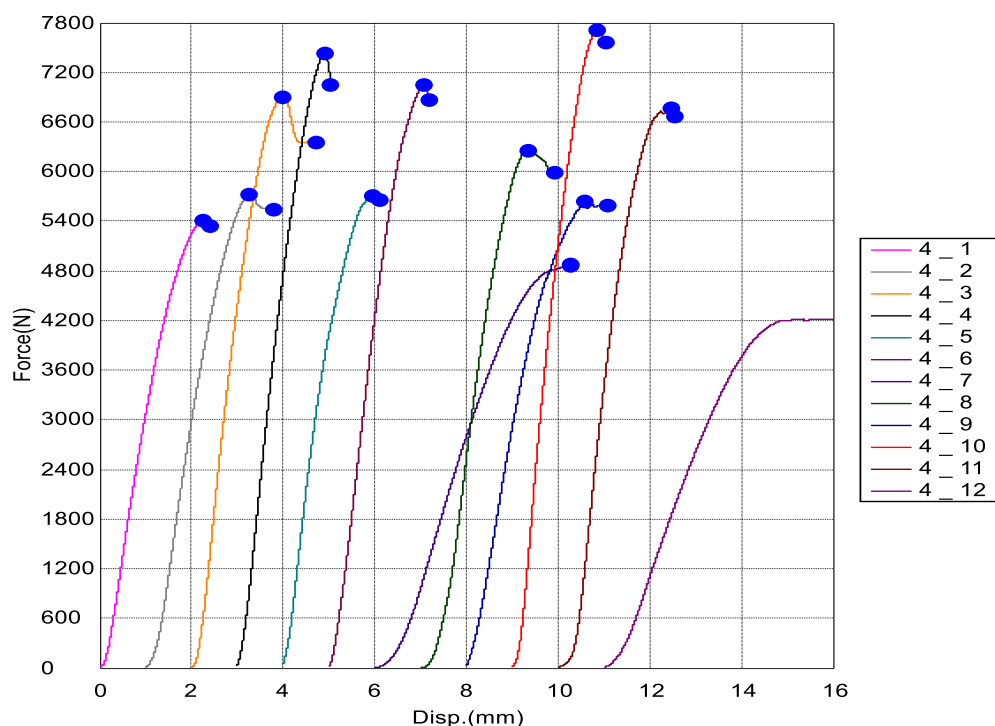
Slika 15. Dijagram sila – progib dobiven međuslojnim ispitivanjem za kompozit epoksid / lan



**Tablica 17. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće za kompozit poliester / lan i staklo**

Ispitno tijelo	Maksimalna sila $F_{max}$ [N]	Međuslojna smična čvrstoća $\tau$ [MPa]
4-1	5410,05	10,43
4-2	5719,24	11,09
4-3	6891,57	13,21
4-4	7429,05	14,76
4-5	5702,85	11,01
4-6	7044,55	14,36
4-7	4870,03	8,41
4-8	6246,46	11,90
4-9	5632,42	11,19
4-10	7705,23	15,30
4-11	6761,62	13,42
4-12	4752,84	8,19
<b>Srednja vrijednost</b>		12,67
<b>Standardna devijacija</b>		1,76535

Ispitna tijela 4-7 i 4-12 nisu uzeta u proračun srednje vrijednosti i standardne devijacije zbog njihovih značajnih odstupanja.



**Slika 16. Dijagram sila – progib dobiven međuslojnim ispitivanjem za kompozit poliester / lan i staklo**

### 3.5. Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti

Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti provedeno je prema normi HRN EN ISO 14125 : 1998 na univerzalnoj kidalici Shimadzu AGS – X. Kidalica je kao i tijekom ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće povezana s računalom te upravljana programom Trapezium X. U program su prije ispitivanja upisane potrebne izmjerene dimenzije ispitnih tijela. Mjerno područje kidalice je od 0 do 50000 N, a brzina ispitivanja bila je 5 mm/min za prvi, treći i četvrti kompozit, dok je za drugi kompozit iznosila 2 mm/min.

U sljedećim tablicama prikazane su dimenzije ispitnih tijela svih kompozita i razmak između oslonaca koji je određen prema tablici 5.

**Tablica 18. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje za kompozit poliestar / lan**

Ispitno tijelo	Debljina $h$ [mm]	Širina $b$ [mm]	Razmak između oslonaca $L$ [mm]
1-1	4,54	14,92	62,00
1-2	3,80	15,00	62,00
1-3	3,82	14,98	62,00
1-4	4,06	14,94	62,00
1-5	4,02	14,98	62,00
1-6	4,48	14,96	62,00
1-7	4,28	14,84	62,00
1-8	3,74	14,84	62,00
1-9	3,80	14,94	62,00
1-10	3,72	14,74	62,00
1-11	3,92	14,84	62,00
1-12	3,74	14,92	62,00
1-13	3,72	15,00	62,00
1-14	3,68	14,86	62,00
1-15	3,68	14,86	62,00
1-16	3,84	14,98	62,00
1-17	3,68	14,96	62,00

Tablica 19. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje za kompozit poliester / staklo

Ispitno tijelo	Debljina $h$ [mm]	Širina $b$ [mm]	Razmak između oslonaca $L$ [mm]
2-1	4,86	14,74	78,00
2-2	4,90	14,68	78,00
2-3	4,84	14,74	78,00
2-4	4,92	14,76	78,00
2-5	4,98	14,80	78,00
2-6	4,74	14,90	78,00
2-7	4,80	14,72	78,00
2-8	4,84	14,74	78,00
2-9	4,78	14,70	78,00
2-10	4,75	14,72	78,00
2-11	4,86	14,78	78,00

Tablica 20. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje za kompozit epoksid / lan

Ispitno tijelo	Debljina $h$ [mm]	Širina $b$ [mm]	Razmak između oslonaca $L$ [mm]
3-1	5,90	14,88	96,00
3-2	6,00	15,00	96,00
3-3	5,92	15,06	96,00
3-4	6,02	15,06	96,00
3-5	5,94	14,98	96,00
3-6	5,96	15,00	96,00
3-7	5,96	15,02	96,00
3-8	5,98	15,00	96,00
3-9	6,02	15,00	96,00
3-10	6,00	15,06	96,00
3-11	6,20	15,06	96,00
3-12	6,08	15,06	96,00
3-13	6,10	15,12	96,00
3-14	5,90	15,08	96,00

**Tablica 21. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje za kompozit poliester / lan i staklo**

Ispitno tijelo	Debljina $h$ [mm]	Širina $b$ [mm]	Razmak između oslonaca $L$ [mm]
4-1	8,88	15,08	144,00
4-2	9,04	15,04	144,00
4-3	9,08	15,00	144,00
4-4	8,94	15,06	144,00
4-5	8,92	14,98	144,00
4-6	8,94	14,98	144,00
4-7	9,28	15,10	144,00
4-8	8,92	15,10	144,00
4-9	9,24	15,06	144,00
4-10	9,14	14,94	144,00
4-11	9,02	15,00	144,00
4-12	8,92	14,98	144,00

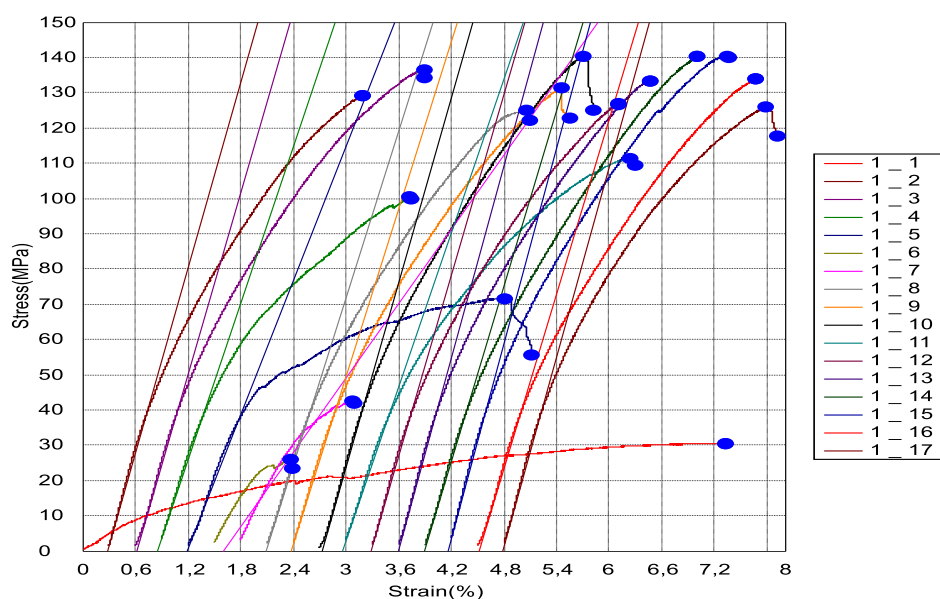
### 3.6. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti

U sljedećim tablicama prikazani su dobiveni rezultati maksimalne sile, maksimalnog progiba i savojnog modula elastičnosti te su izračunate vrijednosti deformacije prilikom loma i savojne čvrstoće prema izrazima (2.3) i (2.4). Isto tako, za svaki kompozit priložen je i dijagram naprezanje – istežanje dobiven u programu Trapezium X.

Tablica 22. Rezultati savojnog ispitivanja za kompozit poliester / lan

Ispitno tijelo	Maksimalna sila $F_{max}$ [N]	Maksimalni progib $f_{max}$ [mm]	Savojni modul elastičnosti $E_f$ [MPa]	Savojna čvrstoća $\sigma_{fM}$ [MPa]	Deformacija prilikom loma $\varepsilon_k$ [%]
1-1	100,93	10,34	-	30,52	7,33
1-2	300,99	4,86	8769,18	129,23	2,88
1-3	320,80	5,51	8588,60	136,48	3,29
1-4	266,00	4,45	7412,31	100,45	2,82
1-5	186,46	5,75	6344,48	71,63	3,61
1-6	83,30	1,24	-	25,80	0,87
1-7	123,97	1,90	3517,21	42,41	1,27
1-8	278,84	5,06	7890,29	124,93	2,95
1-9	304,49	5,15	7923,31	131,26	3,05
1-10	307,44	5,17	8742,75	140,17	3,00
1-11	273,31	5,28	7284,96	111,46	3,23
1-12	284,53	4,80	8561,92	126,79	2,80
1-13	297,44	4,93	9092,46	133,26	2,86
1-14	303,35	5,40	8306,13	140,19	3,10
1-15	303,40	5,46	9252,91	140,21	3,14
1-16	317,89	5,28	8270,16	133,84	3,16
1-17	274,42	5,20	8979,66	125,97	2,99
Srednja vrijednost			8579,76	132,94	3,02
Standardna devijacija			448,97387	5,81620	0,14629

Ispitna tijela 1-1, 1-4, 1-5, 1-6, 1-7 i 1-11 nisu uzeta u proračun srednje vrijednosti i standardne devijacije zbog značajnih odstupanja.

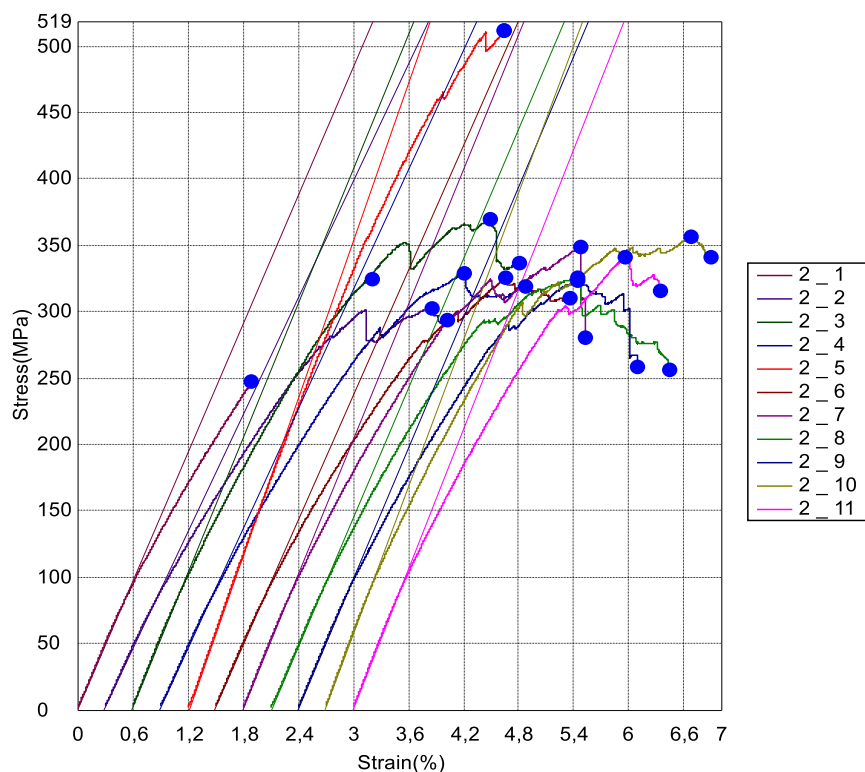


Slika 17. Dijagram naprežanje – istežanje dobiven savojnim ispitivanjem za kompozit poliester / lan

Tablica 23. Rezultati savojnog ispitivanja za kompozit poliester / staklo

Ispitno tijelo	Maksimalna sila $F_{max}$ [N]	Maksimalni progib $f_{max}$ [mm]	Savojni modul elastičnosti $E_f$ [MPa]	Savojna čvrstoća $\sigma_{fM}$ [MPa]	Deformacija prilikom loma $\varepsilon_k$ [%]
2-1	965,95	6,69	16155,46	324,62	3,21
2-2	911,99	7,36	14695,47	302,73	3,56
2-3	1092,49	8,15	16908,69	370,18	3,89
2-4	1003,04	6,82	15045,31	328,46	3,31
2-5	1604,75	7,01	19811,71	511,53	3,44
2-6	930,99	6,76	15706,74	325,38	3,16
2-7	1010,04	7,76	16970,53	348,44	3,67
2-8	959,71	6,99	16296,48	325,19	3,34
2-9	927,72	6,44	16430,59	323,17	3,04
2-10	1012,54	8,49	18512,22	356,70	3,98
2-11	1017,12	6,18	17603,84	340,89	2,96
Srednja vrijednost			16590,15	334,11	3,33
Standardna devijacija			1091,14685	12,86785	0,33865

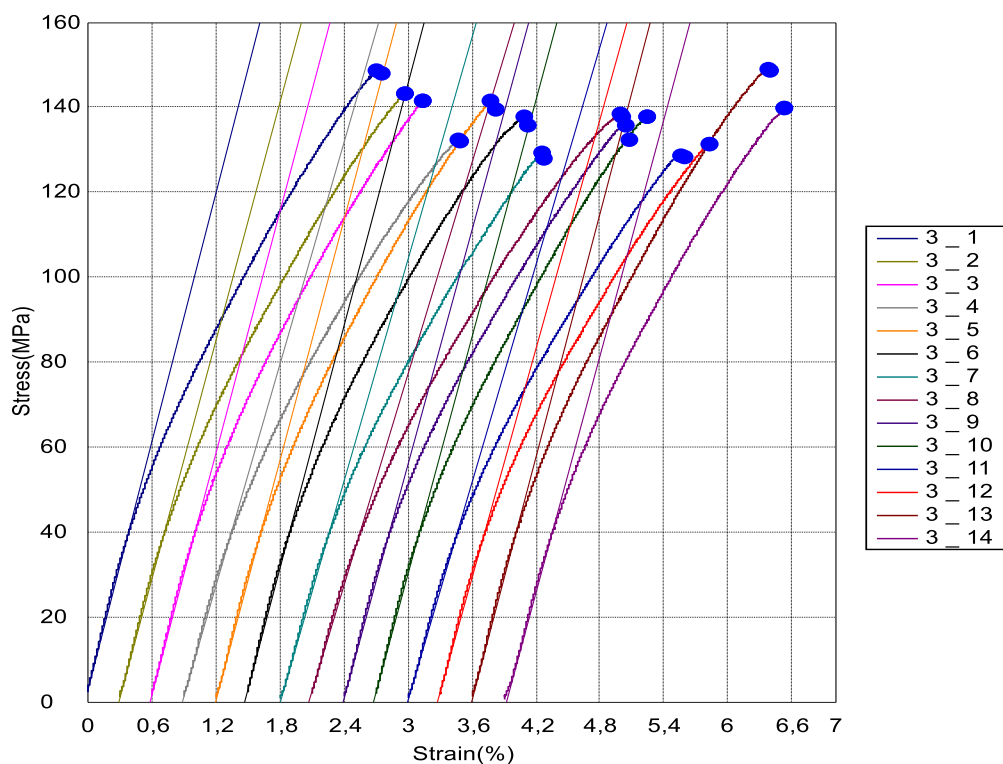
Ispitna tijela 2-2, 2-3 i 2-5 nisu uzeta u proračun srednje vrijednosti i standardne devijacije zbog značajnih odstupanja.



Slika 18. Dijagram naprežanje – istežanje dobiven savojnim ispitivanjem za kompozit poliester / staklo

Tablica 24. Rezultati savojnog ispitivanja za kompozit epoksid / lan

Ispitno tijelo	Maksimalna sila $F_{\max}$ [N]	Maksimalni progib $f_{\max}$ [mm]	Savojni modul elastičnosti $E_f$ [MPa]	Savojna čvrstoća $\sigma_{fM}$ [MPa]	Deformacija prilikom loma $\varepsilon_k$ [%]
3-1	534,03	7,04	9764,57	148,46	2,70
3-2	537,36	6,86	9366,34	143,30	2,68
3-3	518,36	6,60	9503,06	141,42	2,54
3-4	501,68	6,58	8711,49	132,36	2,58
3-5	518,78	6,67	9451,06	141,34	2,58
3-6	510,20	6,67	9524,57	137,89	2,59
3-7	479,20	6,34	8724,42	129,34	2,46
3-8	515,66	7,44	8314,74	138,43	2,90
3-9	512,05	6,74	9212,78	135,64	2,64
3-10	518,11	6,50	9320,78	137,61	2,54
3-11	517,58	6,33	8567,72	128,75	2,56
3-12	507,74	6,38	9018,60	131,33	2,53
3-13	582,52	6,98	9570,41	149,09	2,77
3-14	509,40	6,85	9315,26	139,74	2,63
<b>Srednja vrijednost</b>			9168,99	138,19	2,62
<b>Standardna devijacija</b>			433,19841	6,37678	0,11286

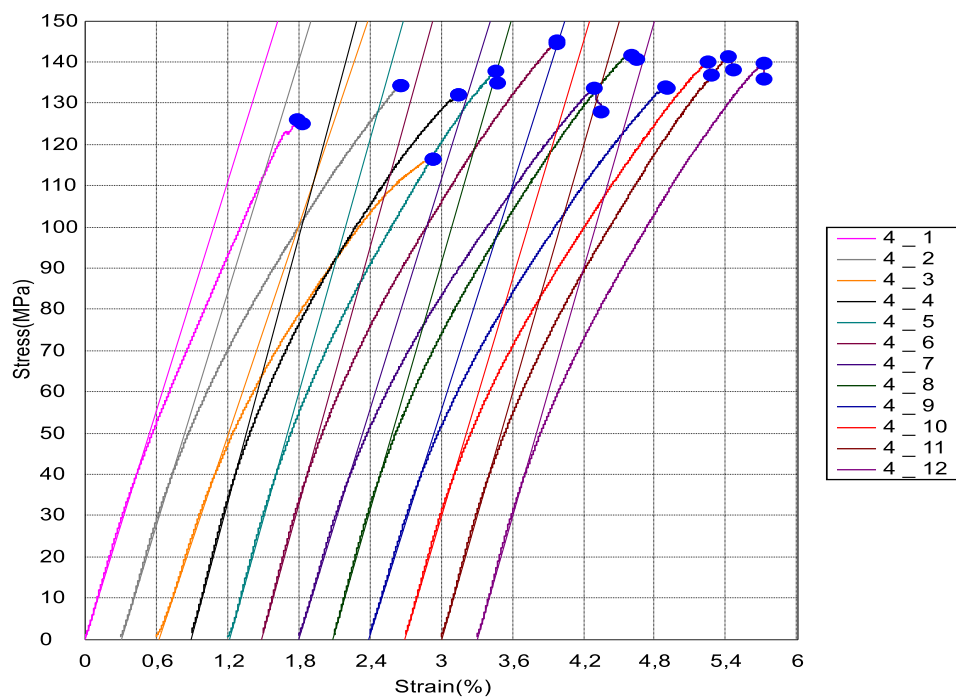


Slika 19. Dijagram naprezanje – istezanje dobiven savojnim ispitivanjem za kompozit epoksid / lan

Tablica 25. Rezultati savojnog ispitivanja za kompozit poliester / lan i staklo

Ispitno tijelo	Maksimalna sila $F_{\max}$ [N]	Maksimalni progib $f_{\max}$ [mm]	Savojni modul elastičnosti $E_f$ [MPa]	Savojna čvrstoća $\sigma_{fM}$ [MPa]	Deformacija prilikom loma $\varepsilon_k$ [%]
4-1	692,69	6,98	9253,01	125,82	1,79
4-2	764,52	9,03	9404,65	134,36	2,36
4-3	667,30	8,89	8529,84	116,55	2,34
4-4	736,03	8,72	10762,94	132,08	2,26
4-5	759,34	8,77	10249,82	137,61	2,26
4-6	803,88	9,58	10408,84	145,03	2,48
4-7	805,16	9,26	9296,26	133,74	2,49
4-8	786,81	9,74	9988,08	141,45	2,51
4-9	796,48	9,30	9083,08	133,80	2,49
4-10	809,17	9,64	9633,74	140,04	2,55
4-11	797,44	9,25	10029,10	141,14	2,41
4-12	770,87	9,36	10059,74	139,70	2,42
Srednja vrijednost			9833,57	136,80	2,37
Standardna devijacija			537,96636	5,43057	0,21389

Ispitno tijelo 4-3 nije uzeto u proračun srednje vrijednosti i standardne devijacije zbog značajnih odstupanja.



Slika 20. Dijagram naprežanje – istežanje dobiven savojnim ispitivanjem za kompozit poliester / lan i staklo



### 3.7. Analiza rezultata dobivenih savojnim i međuslojnim ispitivanjem kompozita

U tablici 26. prikazane su srednje vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće, savojnog modula elastičnosti, savojne čvrstoće i deformacije prilikom loma. Također, za svaki kompozit naveden je i maseni udio vlakana.

**Tablica 26. Srednje vrijednosti rezultata dobivenih savojnim i međuslojnim ispitivanjem**

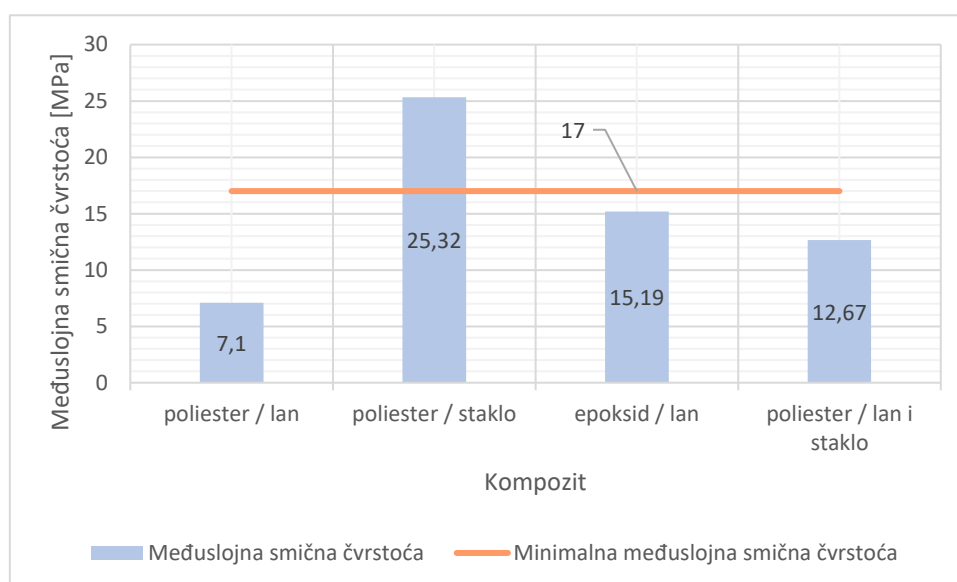
Kompozit	Maseni udio vlakana [%]	$\tau_{sr}$ [MPa]	$E_{f,sr}$ [MPa]	$\sigma_{fM,sr}$ [MPa]	$\varepsilon_{k,sr}$ [%]
<b>poliester / lan</b>	58,68	7,10	8579,76	132,94	3,02
<b>poliester / staklo</b>	73,79	25,32	16590,15	334,11	3,33
<b>epoksid / lan</b>	41,57	15,19	9168,99	138,19	2,62
<b>poliester / lan i staklo</b>	55,05	12,67	9833,57	136,80	2,37

Iz tablice 26. vidljivo je kako je uvjerljivo najveće vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće, savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće postigao kompozit sastavljen od poliesterske smole i staklenih vlakana. Postignuti rezultati su očekivani s obzirom da kombinacija poliester / staklena vlakna predstavlja uobičajen kompozit u industriji. Drugu najveću vrijednost prividne međuslojne smične čvrstoće ima kompozit epoksid / lan. Hibridni kompozit poliester / lan i staklo ima malo nižu vrijednost prividne međuslojne smične čvrstoće u odnosu na epoksid / lan, dok kompozit poliester / lan ima znatno nižu vrijednost spomenutog svojstva. Ovakvi rezultati idu u prilog činjenici da epoksidna smola ima bolja adhezijska svojstva od poliesterske smole, a to je posebno važno kod kombinacije s biorazgradivim vlaknima zbog njihove hidrofilne prirode. Gledajući samo kompozite ojačane lanenim vlaknima, najmanju vrijednost savojnog modula elastičnosti ima kompozit poliester / lan, dok najveću vrijednost, a samim tim i krutost ima hibridni kompozit s poliesterskom matricom. Krutost staklenih i lanenih vlakana nije pretjerano visoka, ali njihova kombinacija osigurava kompozitu veću vrijednost savojnog modula elastičnosti od drugih kompozita koji su ojačani samo lanenim vlaknima. Savojna čvrstoća kompozita poliester / staklo je gotovo dva i pol puta veća od vrijednosti čvrstoće preostalih triju kompozita čiji se rezultati

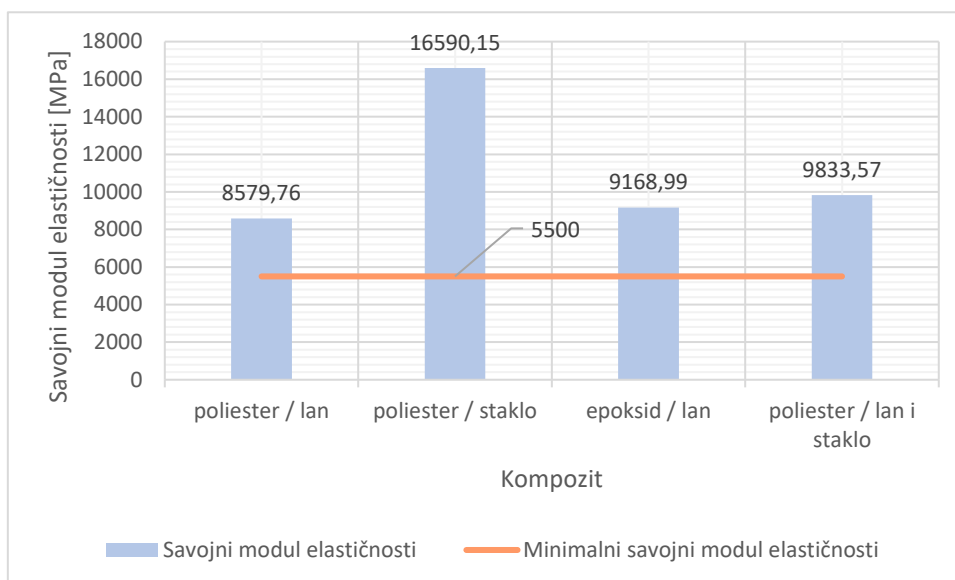
međusobno previše ne razlikuju. Najmanju deformaciju prilikom loma zabilježio je hibridni kompozit, dok je kompozit poliestar / staklo imao najveću vrijednost deformacije.

### 3.8. Usporedba rezultata ispitivanja sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova za kompozite ojačane staklenim vlaknima

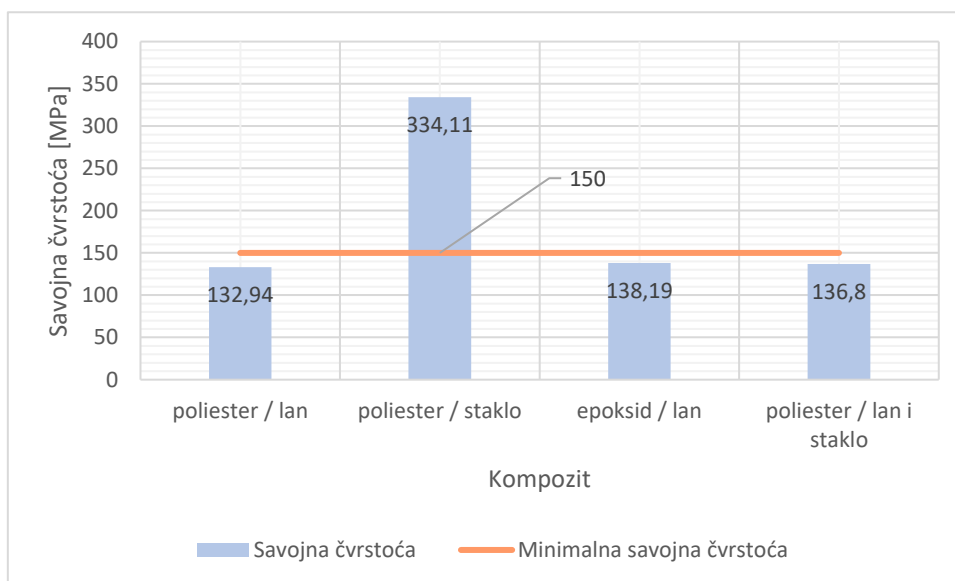
Na sljedećim slikama grafički su prikazane srednje vrijednosti rezultata dobivenih savojnim i međuslojnim ispitivanjem kompozita te je istaknuta minimalna vrijednost svakog mehaničkog svojstva koja se odnosi na kompozite sa staklenim vlaknima i koja je propisana od strane Hrvatskog registra brodova.



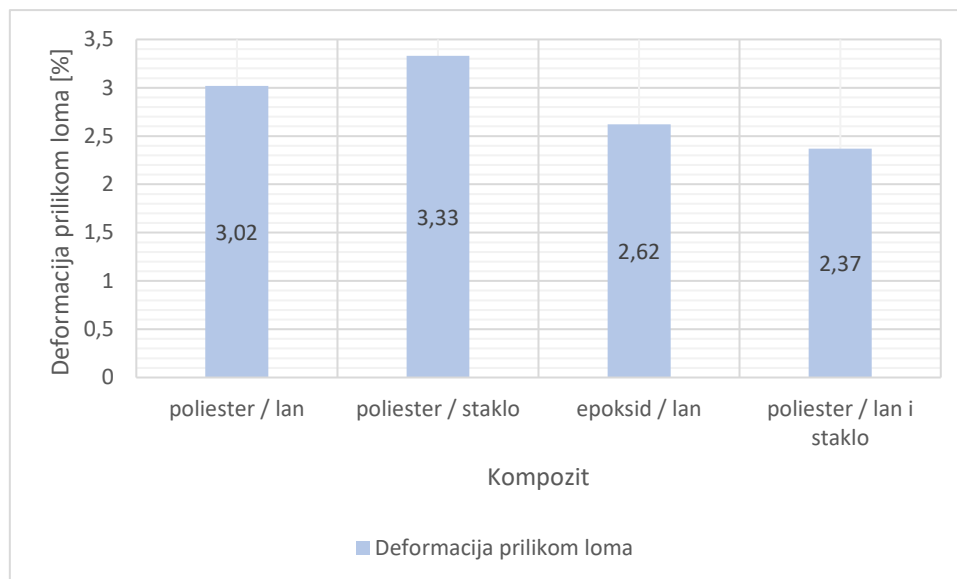
**Slika 21. Srednje vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće svih kompozita i minimalna propisana granica**



**Slika 22. Srednje vrijednosti savojnog modula elastičnosti svih kompozita i minimalna propisana granica**



**Slika 23. Srednje vrijednosti savojne čvrstoće svih kompozita i minimalna propisana granica**



**Slika 24. Srednje vrijednosti deformacije prilikom loma svih kompozita**

U tablici 27. dan je prikaz rezultata ispitivanja savojnih i međuslojnih svojstava te je prikazana njihova usporedba s pravilima Hrvatskog registra brodova. U tablici su navedene srednje vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće, savojnog modula elastičnosti, savojne čvrstoće i deformacije prilikom loma svih kompozita. Navedeni podaci uspoređeni su s minimalnim vrijednostima mehaničkih svojstava koje moraju posjedovati kompoziti ojačani staklenim vlaknima, a propisana su od strane Hrvatskog registra brodova.

**Tablica 27. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava kompozita uspoređeni sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova [20]**

Kompozit	Maseni udio vlakana [%]	$\tau_{sr}$ [MPa]	$E_{f,sr}$ [MPa]	$\sigma_{fM,sr}$ [MPa]	$\varepsilon_{k,sr}$ [%]
<b>poliester / lan</b>	58,68	7,10	8579,76	132,94	3,02
<b>poliester / staklo</b>	73,79	25,32	16590,15	334,11	3,33
<b>epoksid / lan</b>	41,57	15,19	9168,99	138,19	2,62
<b>poliester / lan i staklo</b>	55,05	12,67	9833,57	136,80	2,37
<b>HRB pravilnik</b>		<b>17</b>	<b>5500</b>	<b>150</b>	

Iz tablice 27. vidljivo je kako je drugi kompozit sastavljen od poliesterske smole i staklenih vlakana jedini ostvario rezultate iznad propisanih granica. Preostali ispitani kompoziti zadovoljavaju minimalnu propisanu vrijednost samo jednog mehaničkog svojstva, a to je savojni modul elastičnosti. Najbliže propisanim vrijednostima ostalih svojstava je kompozit epoksid / lan. Takvi rezultati proizlaze iz spoznaje da u usporedbi s poliesterskom smolom koja se koristila kao matrica za ostale kompozite, epoksidne smole posjeduju bolja mehanička i adhezijska svojstva koja su neophodna u slučaju ojačanja biorazgradivim vlaknima. Hibridni kompozit sastavljen od kombinacije staklenih i lanenih vlakana te poliesterske smole postigao je drugu najveću vrijednost savojnog modula elastičnosti te je imao najmanju deformaciju prilikom loma, dok su mu ostali rezultati bili malo niži u odnosu na kompozit epoksid / lan. Najlošije rezultate postigao je kompozit izrađen od već spomenute poliesterske smole i također spomenutih lanenih vlakana. Uz mogućnost lošeg procesa izrade, mogući razlozi najlošijih rezultata ovog kompozita su i slabija mehanička svojstva poliesterske smole te njena lošija povezanost s lanenim vlaknima. U pravilniku Hrvatskog registra brodova propisano je i pravilo da maseni udio staklenih vlakana ne smije biti veći od 50 %. Među ovdje ispitanim kompozitima, jedino kompozit epoksid / lan ima maseni udio vlakana niži od propisane granice. U slučaju smanjenja masenog udjela vlakana, kompoziti bi trebali imati

---

nižu krutost, ali bi i s takvom krutošću vjerojatno zadovoljavali propisani minimum, dok bi im se zbog većeg udjela smole poboljšala međuslojna svojstva.

## 4. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu ispitana su mehanička svojstva četiri različita polimerna kompozita ojačana vlaknima pri savojnom opterećenju. Cilj ispitivanja bio je utvrditi mogu li biorazgradiva, tj. u ovom konkretnom slučaju lanena vlakna, biti kvalitetna zamjena staklenim vlaknima koja se uobičajeno koriste pri izradi polimernih kompozita u brodogradnji. Svi kompoziti bili su izrađeni postupkom vakuumske infuzije, a međusobno su se razlikovali s obzirom na to da li je kao matrica korištena epoksidna ili poliesterska smola te da li su bili ojačani staklenim ili lanenim vlaknima. Kombinirajući navedene komponente nastala su četiri različita kompozita sljedećeg sastava:

- 1) poliester / lanena vlakna
- 2) poliester / staklena vlakna
- 3) epoksid / lanena vlakna
- 4) poliester / lanena i staklena vlakna (hibrid)

Nakon izrade kompoziti su bili podvrgnuti ispitivanju savojnih i međuslojnih svojstava prema normama HRN EN ISO 14125 : 1998 i HRN EN ISO 14130 : 1997. Ova dva tipa ispitivanja provode se na sličan način pa je tako u oba slučaja ispitno tijelo položeno na dva oslonca te je opterećeno silom koja djeluje na sredini, a jedina je razlika u razmaku između oslonaca koji se računa prema već prije spomenutim izrazima. Ispitivanjima su dobiveni podaci o prividnoj međuslojnoj smičnoj čvrstoći, savojnom modulu elastičnosti, savojnoj čvrstoći te deformaciji prilikom loma za sve ispitane kompozite. Također, za svaki je kompozit bio određen i maseni udio vlakana.

U tablici 27. istaknute su srednje vrijednosti rezultata dobivenih ispitivanjima te su one uspoređene s minimalnim propisanim vrijednostima za kompozite sa staklenim vlaknima koje se nalaze u Pravilima za klasifikaciju brodova (članak 24.), izdanim 2017. godine od strane Hrvatskog registra brodova. Pravilnikom je propisano kako je minimalan iznos prividne međuslojne smične čvrstoće 17 MPa, savojnog modula elastičnosti 5500 MPa, a savojne čvrstoće 150 MPa. Ne uzimajući u obzir kompozit poliester / staklena vlakna koji je očekivano postigao najbolje rezultate i premašio propisane granice, podaci pokazuju kako preostali kompoziti zadovoljavaju samo svojstvo savojnog modula elastičnosti. Kombinacija epoksid / lanena vlakna imala je rezultate najbliže propisanim za dva mehanička svojstva, odnosno za prividnu međuslojnu smičnu čvrstoću i savojnu čvrstoću. Hibridni kompozit imao

je nešto niže vrijednosti navedenih svojstava, dok je kompozit poliester / lanena vlakna imao najlošije rezultate. Glavni razlog lošijih svojstava hibridnog kompozita je greška u planu laminiranja, pri čemu je za potrebe projekta ProEco napravljen hibrid sa staklenim vlaknima u sredini. Budući da je prilikom savijanja u gornjoj plohi tlačno, a u donjoj plohi rastezno opterećenje, dodatnim ojačavanjem sredine zapravo se ojačava neutralna ravnina.

Analiza rezultata i njihova usporedba pokazala je kako biorazgradiva vlakna imaju potencijal postati kvalitetna zamjena staklenim vlaknima korištenima u brodogradnji. Kako bi tako ojačani kompoziti postigli još bolja svojstva potrebna su daljnja istraživanja koja bi trebala biti usmjerena na povećanje kvalitete postupka izrade ovakvih kompozita te odabir prave kombinacije matrice i ojačala.



## LITERATURA

- [1] Schauerl Z.: Kompozitni materijali – nastavni materijali, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2020.
- [2] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2011.
- [3] Smojver I.: Mehanika kompozitnih materijala – interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2007.
- [4] Chawla K. K.: Composite Materials: Science and Engineering, Third Edition, Springer, New York, 2012.
- [5] Brizić M., Janović Z., Šmit I., Štefanović D.: Polimerni materijali, Tehnička enciklopedija 10, 1986.
- [6] Hollaway L.: Handbook of polymer composites for engineers, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 1994.
- [7] SP System guide to composites (Composite Engineering Materials)
- [8] Rattan, R., Bijwe J.: Carbon fabric reinforced polyetherimide composites: Influence of weave of fabric and processing parameters on performance properties and erosive wear, 2006.
- [9] Tkanina od staklenih vlakana [slika s interneta], [pristupljeno 16. 6. 2022.]. Dostupno na: <https://unicem-trd.com/frp-raw-materials/>
- [10] Reddy T. R. K., Kim H., Park J.: Renewable Biocomposite Properties and their Applications, University of Caxias Do Sul, Brazil, 2016.
- [11] Filetin T., Marić G.: Napredne tehnologije materijala – autorizirano predavanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2013.
- [12] Deng Y.: Life cycle assessment of biobased fibre – reinforced polymer composites, KU Leuven, Nizozemska, 2014.
- [13] Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. [pristupljeno 21.6.2022.]. Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=35276>
- [14] Lanena vlakna [slika s interneta], [pristupljeno 21.6.2022.]. Dostupno na: <https://www.fibre2fashion.com/yarns/flax-yarn-buyers-20188649>
- [15] Milardović G.: Kompoziti u automobilske industriji, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2011.

- 
- [16] Swolfs Y., Gorbatikh L., Verpoest I.: Fibre hybridisation in polymer composites: A review, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014.
- [17] Ćorić D., Alar Ž.: Mehanička svojstva materijala – nastavni materijali, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2017.
- [18] EN ISO 14125 : 1998: Fibre-reinforced plastic composites – Determination of flexural properties
- [19] EN ISO 14130 : 1997: Fibre-reinforced plastic composites – Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method
- [20] Rules for the classification of ships: Part 24 – Non – metallic materials, 2017.  
[pristupljeno 24.6.2022.]. Dostupno na:  
<https://www.crs.hr/Portals/0/adam/KlasifikacijskaPravila/RzmWM1b7J0GCGcNZek0yzA/Dokument/NON-METALLIC%20MATERIALS.pdf>