

# Jarosit kao punilo za kompozite na bazi poliesterske smole

---

**Primorac, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2015**

*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:235:481652>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-25**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ivan Primorac**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Lidija Ćurković, dipl. ing.

Student:

Ivan Primorac

Zagreb, 2015

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

Zahvaljujem se mentorici prof.dr.sc. Lidiji Ćurković na iznimnoj pristupačnosti, strpljenju, zalaganju, savjetima i pomoći u izradi ovog diplomskog rada. Također se zahvaljujem doc.dr.sc. Suzani Jakovljević i tehničkom suradniku Božidaru Bušetinčanu na susretljivosti i savjetima te analizama potrebnim za realizaciju ovog rada.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za diplomске 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:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Primorac**

Mat. br.: 0035170568

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Jarosit kao punilo za kompozite na bazi poliesterske smole**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Jarosite as filler for composite based on polyester resin**

Opis zadatka:

Širom svijeta 75% metalnog cinka izdvaja se iz sfaleritne rude sljedećim procesima: hematit procesom ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), getit procesom ( $\text{FeOOH}$ ) i jarosit procesom ( $\text{XFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), gdje je X jedan od kationa kao što su  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{Ag}^+$  ili dvovalentni kation kao što je  $\text{Pb}^{2+}$ . Jarosit proces je najučinkovitiji i najčešće korišten hidrometalurški postupak industrijske prerade cinka iz rude. Čvrsti otpad nastao ovim procesom pretežito sadrži mineral jarosit. Industrijski kruti otpad najčešće se odlaze na odlagališta, odnosno deponije te predstavlja ozbiljan učinak na okoliš. Jedan od načina smanjenja količine otpada je recikliranje i uporaba kao punilo za kompozitne materijale.

U radu je potrebo:

- odrediti kemijski i fazni sastav jarosita,
- ispitati moguću uporabu otpadnog jarosita kao punila za kompozite na bazi poliesterske smole,
- prirediti uzorke kompozita na bazi poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima i s dodatkom punila jarosita,
- izmjeriti savojnu čvrstoću, savojni modul elastičnosti, prividnu međuslojnu čvrstoću i žilavost staklenim vlaknima ojačane poliesterske smole s dodatkom jarosita kao punila,
- analizirati morfologiju poprečnog presjeka dobivenih kompozitnih materijala polarizacijskim mikroskopom i pretražnim elektronskim mikroskopom uz energijsko disperzivni spektrometar (SEM-EDS).

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predviđeni datum obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Lidija Čurković

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	5
POPIS TABLICA.....	7
POPIS OZNAKA .....	9
SAŽETAK.....	10
SUMMARY .....	11
1 UVOD .....	1
2 KOMPOZITNI MATERIJALI .....	2
2.1 DEFINICIJA I PODJELA KOMPOZITNIH MATERIJALA .....	2
2.2 KOMPOZITI S ČESTICAMA.....	5
2.2.1 Kompoziti s disperzijom .....	5
2.2.2 Kompoziti s velikim česticama .....	6
2.3 VLAKNIMA OJAČANI KOMPOZITI .....	6
2.3.1 Predviđanje svojstava vlaknima ojačanih kompozita.....	8
2.3.2 Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita .....	9
2.4 FUNKCIJA KOMPONENATA KOMPOZITA .....	13
2.4.1 Funkcija matrice .....	13
2.4.2 Funkcija vlakana .....	14
2.5 SVOJSTVA I PRIMJENA KOMPOZITA S POLIMERNOM MATRICOM.....	15
2.5.1 Materijali polimernih matrica.....	15
2.5.2 Materijali vlaknastih ojačavala.....	16
2.6 PROIZVODNJA I PRERADA VLAKNIMA OJAČANIH KOMPOZITA .....	19
2.6.1 Lijevanje.....	19
2.6.2 Slojeviti kompozitni materijali (laminati) .....	19
2.7 Proizvodnja polimernih tvorevina – dodaci.....	20
2.7.1 Modifikatori mehaničkih svojstava .....	20

---

2.8	PROIZVODNJA POLIMERNIH KOMPOZITNIH TVOREVINA.....	23
2.8.1	Sastav i građa polimernih kompozita – priprava za praoblikovanje .....	23
2.8.2	Ručni dodirni postupak laminiranja .....	23
3	MATERIJALI ZA IZRADU KOMPOZITA I METODE ISPITIVANJA .....	25
3.1	Mjerenje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti.....	25
3.2	Mjerenje prividne međuslojne čvrstoće.....	28
3.3	Mjerenje tvrdoće.....	29
3.4	Mjerenje udarne žilavosti .....	30
3.5	Analiza morfologije poprečnog presjeka uzoraka kompozitnih materijala.....	32
3.6	Jarosit – dodatak čestica kao punilo u poliesterskom kompozitu ojačanom staklenim vlaknima [1] .....	32
3.6.1	Kemijski sastav jarosita.....	34
3.6.2	Poliesterska smola za izradu kompozita.....	35
3.6.3	Izrada kompozita .....	35
4	REZULTATI ISPITIVANJA .....	43
4.1	Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti.....	43
4.1.1	Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima (bez dodataka čestica jarosita kao punila).....	43
4.1.2	Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 5% čestica jarosita kao punila.....	45
4.1.3	Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 10% čestica jarosita kao punila.....	47
4.1.4	Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 20% čestica jarosita kao punila.....	49
4.1.5	Usporedba rezultata mjerenja savojnog modula elastičnosti kompozitnih uzoraka	51
4.1.6	Usporedba rezultata mjerenja savojne čvrstoće kompozitnih uzoraka .....	52
4.2	Rezultati mjerenja prividne međuslojne čvrstoće.....	53

4.2.1	Rezultati mjerenja prividne međuslojne čvrstoće poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima (bez dodatka čestica jarosita kao punila) .....	53
4.2.2	Rezultati mjerenja prividne međuslojne čvrstoće poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 5% čestica jarosita kao punila .....	53
4.2.3	Rezultati mjerenja prividne međuslojne čvrstoće poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 10% čestica jarosita kao punila .....	54
4.2.4	Rezultati mjerenja prividne međuslojne čvrstoće poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 20% čestica jarosita kao punila .....	54
4.2.5	Usporedba rezultata mjerenja prividne međuslojne čvrstoće kompozitnih uzoraka	55
4.3	Rezultati mjerenja tvrdoće .....	56
4.3.1	Rezultati mjerenja tvrdoće poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima (bez dodatka čestica jarosita kao punila).....	56
4.3.2	Rezultati mjerenja tvrdoće poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz 5 % dodatka čestica jarosita kao punila.....	57
4.3.3	Rezultati mjerenja tvrdoće poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz 10 % dodatka čestica jarosita kao punila.....	58
4.3.4	Rezultati mjerenja tvrdoće poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz 20 % dodatka čestica jarosita kao punila.....	59
4.3.5	Usporedba rezultata tvrdoće kompozitnih uzoraka .....	60
4.4	Rezultati mjerenja udarne žilavosti .....	61
4.4.1	Rezultati mjerenja udarne žilavosti poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima (bez dodatka čestica jarosita kao punila) .....	61
4.4.2	Rezultati mjerenja udarne žilavosti poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 5 % čestica jarosita kao punila.....	62
4.4.3	Rezultati mjerenja udarne žilavosti poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz 10 % dodatak čestica jarosita kao punila.....	63
4.4.4	Rezultati mjerenja udarne žilavosti poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 20 % čestica jarosita kao punila.....	63



---

4.4.5	Usporedba rezultata udarne žilavosti kompozitnih uzoraka .....	64
4.5	Analiza morfologije poprečnog presjeka kompozitnih tvorevina SEM analizom.....	65
5	ZAKLJUČAK .....	67
	LITERATURA:.....	68

## POPIS SLIKA

Slika 1. Usporedba osnovnih tipova kompozita: a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) slojeviti kompoziti [2] .....	3
Slika 2. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačavala; a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna [2].....	7
Slika 3. Dijagram "naprezanje-istezanje" vlaknima ojačanog kompozita [2].....	8
Slika 4. Utjecaj usmjerenja vlakana obzirom na naprezanje za Ti-leguru ojačanu vlaknima bora [2] .....	10
Slika 5. Karakteristike nekih materijala primjenjivih za ojačavanje vlaknima [2] .....	11
Slika 6. Svojstva vlakana: a) krivulja "naprezanje-istezanje", b) usporedba specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti nekih vlakana s metalima [2] .....	11
Slika 7. Usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće nekih kompozita s metalima [2] .....	12
Slika 8. Slaganje različito usmjerenim vlaknima ojačanih slojeva kod laminatnih konstrukcija [2] .....	19
Slika 9. Načelo dodirnoga laminiranja: a) u gnijezdu, b) na žigu [6] .....	24
Slika 10. Shematski prikaz ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti [7]...	26
Slika 11. Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti na univerzalnoj kidalici .....	26
Slika 12. Shema ispitivanja prividne međuslojne čvrstoće [7] .....	28
Slika 13. Ispitivanje tvrdoće na tvrdomjeru Zwick 3106 .....	30
Slika 14. Ispitivanje udarne žilavosti pomoću Charpyevog bata .....	31
Slika 15. Uzorak jarosita [1].....	33
Slika 16. Uređaj s ultrazvučnom sondom sa disperziju čestica jarosita u poliesterskoj smoli.	37
Slika 17. Suspenzija poliesterske smole i čestica jarosita nakon provedene homogenizacije i dispergiranja ultrazvučnom sondom .....	38
Slika 18. Staklena vlakna izrezana na odgovarajuće dimenzije .....	39

Slika 19. Izrada kompozita od poliesterske smole sa dodatkom čestica jarosita kao punila i ojačanja staklenih vlakana tehnikom ručnog laminiranja .....	40
Slika 20. Kompoziti opterećeni utezima .....	41
Slika 21. Uzorci kompozita za ispitivanje mehaničkih svojstava: A) Poliesterska smola ojačana staklenim vlaknima; B) Poliesterska smola ojačana staklenim vlaknima s dodatkom 5 % čestica jarosita kao punila; C) Poliesterska smola ojačana staklenim vlaknima s dodatkom 10 % čestica jarosita kao punila; D) Poliesterska smola ojačana staklenim vlaknima s dodatkom 20 % čestica jarosita kao punila. ....	42
Slika 22. Dijagram ovisnosti progiba o sili za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima (bez čestica jarosita) – UZORAK 1 .....	44
Slika 23. Dijagram ovisnosti progiba o sili za uzorak kompozita ojačanog staklenim vlaknima uz dodatak 5 % čestica jarosita – UZORAK 2 .....	46
Slika 24. Dijagram ovisnosti progiba o sili za uzorak kompozita ojačanog staklenim vlaknima uz dodatak 10 % čestica jarosita – UZORAK 3 .....	48
Slika 25. Dijagram ovisnosti progiba o sili za uzorak kompozita ojačanog staklenim vlaknima uz dodatak 20 % čestica jarosita – UZORAK 4 .....	50
Slika 26. Usporedba vrijednosti savojnog modula elastičnosti uzoraka bez i sa česticama jarosita kao punila u poliesterskom kompozitu .....	51
Slika 27. Usporedba vrijednosti savojne čvrstoće uzoraka bez i sa česticama jarosita kao punila u poliesterskom kompozitu .....	52
Slika 28. Usporedba vrijednosti međuslojne čvrstoće uzoraka kompozita bez i sa česticama jarosita kao punila u poliesterskom kompozitu ojačanom staklenim vlaknima .....	55
Slika 29. Usporedba vrijednosti tvrdoće kompozitnih uzoraka bez čestica i sa česticama jarosita kao punila u poliesterskom kompozitu ojačanom staklenim vlaknima .....	60
Slika 30. Uzorci nakon ispitivanja udarne žilavosti .....	61
Slika 31. Usporedba vrijednosti udarne radnje loma za uzorka kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, bez i uz dodatak čestica jarosita kao punila .....	64
Slika 32. Sem snimka uzoraka kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 10 % čestica jarosita (A i B na slici) i dodatak 20 % čestica jarosita (C i D na slici) .....	65

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav jarosita određen ICP-OES [1] .....	34
Tablica 2. Sastav kompozita na bazi poliesterske smole.....	36
Tablica 3. Progibi u ovisnosti o opterećenju za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima (bez čestica jarosita) – UZORAK 1 .....	43
Tablica 4. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće ( $R_{ms}$ , MPa) i savojnog modula elastičnosti ( $E_s$ , MPa) za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima.....	44
Tablica 5. Progibi u ovisnosti o opterećenju za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 5 % čestica jarosita – UZORAK 2 .....	45
Tablica 6. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće ( $R_{ms}$ , MPa) i savojnog modula elastičnosti ( $E_s$ , MPa) za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 5 % čestica jarosita.....	46
Tablica 7. Progibi u ovisnosti o opterećenju za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 10 % čestica jarosita – UZORAK 3 .....	47
Tablica 8. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće ( $R_{ms}$ , MPa) i savojnog modula elastičnosti ( $E_s$ , MPa) za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 10 % čestica jarosita.....	48
Tablica 9. Progibi u ovisnosti o opterećenju za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 20 % čestica jarosita – UZORAK 4 .....	49
Tablica 10. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće ( $R_{ms}$ , MPa) i savojnog modula elastičnosti ( $E_s$ , MPa) za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 20 % čestica jarosita.....	50
Tablica 11. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne čvrstoće za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima (bez dodatka punila).....	53
Tablica 12. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne čvrstoće za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 5 % dodatka čestica jarosita.....	53
Tablica 13. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne čvrstoće za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz 10 % dodatka čestica jarosita .....	54
Tablica 14. ispitivanja prividne međuslojne čvrstoće za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz 20 % dodatka čestica jarosita.....	54

---

Tablica 15. Rezultati tvrdoće kompozita od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, bez dodatka čestica jarosita kao punila .....	56
Tablica 16. Rezultati tvrdoće kompozita od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, uz dodatak 5 % čestica jarosita kao punila.....	57
Tablica 17. Rezultati tvrdoće kompozita od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, uz dodatak 10 % čestica jarosita kao punila.....	58
Tablica 18. Rezultati tvrdoće kompozita od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, uz dodatak 20 % čestica jarosita kao punila.....	59
Tablica 19. Rezultati mjerenja udarne žilavosti za uzorak poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, bez dodatka čestica jarosita kao punila.....	62
Tablica 20. Rezultati mjerenja udarne žilavosti za uzorak poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 5 % čestica jarosita kao punila .....	62
Tablica 21. Rezultati mjerenja udarne žilavosti za uzorak poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, uz dodatak 10 % čestica jarosita kao punila .....	63
Tablica 22. Rezultati mjerenja udarne žilavosti za uzorak poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, uz dodatak 20 % čestica jarosita kao punila .....	63

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A_{cu}$	$\text{kJ/m}^2$	udarna žilavost
$b_N$	mm	širina ispitnog uzorka na mjestu zareza
$D$	mm	promjer kuglice
$E_c$	J	energija loma
$E_s$	MPa	savojni modul elastičnosti
$f$	mm	progib
$F$	N	sila
$F_{max}$	N	maksimalna sila
$GF$		staklena vlakna
$h$	mm	visina ispitnog uzorka
$H$	MPa	tvrdoća kompozita
$h_k$	mm	dubina prodiranja
$L$	mm	razmak između oslonaca
$m$	g	masa
$PES$		poliester
$R_{m,s}$	MPa	savojna čvrstoća
$\tau$	MPa	prividna međuslojna čvrstoća
$\tan \alpha$		nagib pravca
$\rho$	$\text{g/cm}^3$	gustoća

## SAŽETAK

Cilj ovog rada je ispitati mogućnost primjene otpadnog jarosita kao punila u kompozitu poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima.

U prvom dijelu rada dan je opći prikaz podjele kompozita, građe polimernih kompozita, svojstva, vrste i primjene polimernih kompozita.

U eksperimentalnom dijelu rada prikazana je izrada kompozitnog materijala s matricom od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima te izrada kompozita s matricom od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak čestica jarosita kao punila masenog udjela od 5 %, 10 % i 20 %.

Pripravljenim kompozitima ispitana su sljedeća mehaničkih svojstava: savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti, međuslojna smična čvrstoća, tvrdoća i žilavost. Najbolja mehanička svojstva su postignuta za poliestersku smolu ojačanu staklenim vlaknima uz dodatak od 10 % čestica jarosita kao punila.

Ključne riječi: Jarosit, otpad, kompozit, punilo, poliesterska smola, staklena vlakna, mehanička svojstva.

## **SUMMARY**

The goal of this master thesis is investigation of the possibility of application of jarosite waste as filler in a glass fiber reinforced composite polyester resin.

In the first part of master thesis is shown general division of composite materials, structure of polymer composites, properties, types and application of polymer composites.

In the experimental part is shown the production of glass fiber reinforced composite polyester resin as well as production of glass fiber reinforced composite polyester resin with the addition of particles of jarosite as filler in various mass fraction of 5%, 10 % and 20 %.

After the production of composites, following mechanical properties were measured: bending strength and flexural modulus of elasticity, interlaminar shear strength, hardness and toughness. The best mechanical properties were obtained for the polyester resin reinforced with glass fibers with the addition of 10% jarosite particles as fillers.

**Keywords:** Jarosite, waste, composite, filler, polyester resin, glass fiber, mechanical properties



## 1 UVOD

Jarosit je naziv za otpad nastao jarosit procesom koji je najučinkovitiji i najčešće korišten hidrometalurški postupak industrijske prerade cinka iz rude. Čvrsti otpad nastao ovim procesom pretežito sadrži mineral jarosit i kategoriziran je kao opasni otpad zato što sadrži visoku koncentraciju teških metala kao što su olovo, cink, kadmij, željezo, arsen, itd.

Djelovanjem vremenskih uvjeta, kiselih kiša i sličnih pojava na ovakav otpad, povećava se pokretljivost i bioraspoloživost teških metala u tlu, vodi, zraku i organizmima životinja i biljaka. Potencijalni rizik visoke koncentracije teških metala za ljudsko zdravlje povezan je s direktnom izloženosti na mjestu zagađenja, primjerice udisanjem prašine ili putem biljaka s kontaminiranog tla. Iz tih razloga, širom svijeta odlaganje ovakve vrste industrijskog otpada na deponije predstavlja potencijalnu opasnost na okoliš. [1]

Jedan od načina da se spriječi zagađenje okoliša teškim metalima iz otpadnog jarosita je njegova uporaba i ponovna upotreba. Jedan od načina stabilizacije teških metala u jarositu je priprava polimernih kompozita uz dodatak čestica jarosita kao punila. U okviru ovog diplomskog rada ispitana je mogućnost primjene otpadnog jarosita kao punila za pripravu kompozita na bazi poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima. Za ispitivanja korišten je otpad nastao taloženjem jarosita, deponiran u Industrijskom parku Kosovske Mitrovice.

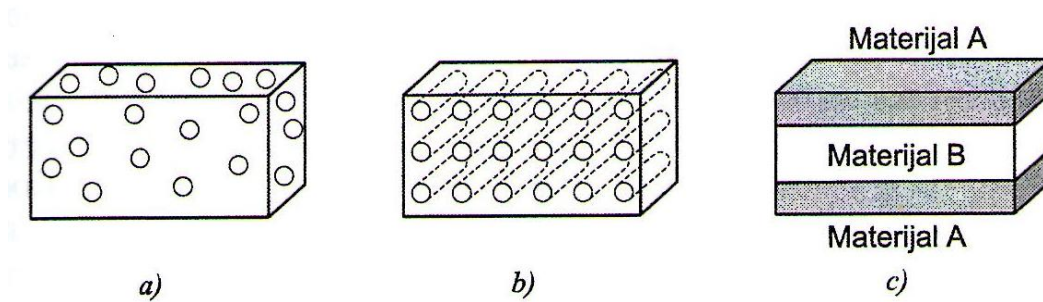
## 2 KOMPOZITNI MATERIJALI

### 2.1 DEFINICIJA I PODJELA KOMPOZITNIH MATERIJALA

Kompozitni materijali ili ukratko kompoziti materijali su dobiveni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Tim putem mogu se postići neobične, odnosno kod drugih materijala neuobičajene kombinacije svojstava, kao što su krutost, čvrstoća, težina, ponašanje pri visokim temperaturama, kemijska postojanost (antikoroziivnost), tvrdoća ili vodljivost (električna i toplinska). [2]

Kompoziti mogu biti: metalno-metalni, metalno-keramički, metalno-polimerni, keramičko-polimerni, keramičko-keramički, polimerno-polimerni, polimerno-metalni. Upravo navedeno vodi nas do temeljne podjele kompozita na metalne, keramičke i polimerne kompozite. Kod toga se pretpostavlja da su metali, keramika, odnosno polimeri osnova kojoj se pridodaju najrazličitiji dodaci u cilju modificiranja svojstava matrice, odnosno postizanja cilja koji je naveden u definiciji – da se dobije materijal svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Dakle kompoziti su umjetno proizvedeni višefazni materijali koji imaju željenu kombinaciju najboljih svojstava konstitutivnih faza. Obično, jedna faza (matrica) je kontinuirana i okružuje ostale (disperzirane faze).

Kompoziti su također razvrstani i kao: kompoziti s česticama, vlaknima ojačani kompoziti, slojeviti kompoziti i sendvič konstrukcije. [2]



**Slika 1. Usporedba osnovnih tipova kompozita: a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) slojeviti kompoziti [2]**

Ukupno ponašanje kompozita ovisi o:

- svojstvima matrice i ojačala
- veličini i rasporedu (raspodjeli) konstituenata
- volumnom udjelu konstituenata
- obliku konstituenata
- prirodi i jakosti veze među konstituentima [2]

Kompoziti ojačani velikim česticama i disperzijom pripadaju skupini kompozita s česticama. Kod kompozita s disperzijom, povećana čvrstoća postiže se ekstremno malim česticama disperzirane faze, koje usporavaju gibanje dislokacija. Razmatranje ovog mehanizma očvršćivanja je na nivou atoma. Kod kompozita s velikim česticama mehanička svojstva su poboljšana djelovanjem samih čestica. Beton je primjer kompozita s velikim česticama koji se sastoji od skupine čestica međusobno spojenih cementom. [2]

Efikasnost ojačanja najveća je kod kompozita s vlaknima (vlaknima ojačanih kompozita). Kod ovih kompozita opterećenje se prenosi i distribuira među vlaknima i to putem matrice koja je u većini slučajeva osrednje duktilna. Znatno ojačavanje ovih kompozita moguće je jedino ako je veza vlakno-matrica jaka. Prema njihovom promjeru vlaknasta ojačala dijelimo na viskere, vlakna i žice. Viskeri su vrlo tanke niti keramičkih monokristala, visoke čistoće koji imaju ekstremno velik omjer "duljina/promjer". Ukoliko su vlakna diskontinuirana, efikasnost ojačanja ovisi o duljini vlakana. Za svaku kombinaciju vlakno-matrica, postoji tzv. kritična duljina, dok duljine kontinuiranih vlakana uvelike premašuju ovu kritičnu vrijednost. [2]

Raspored vlakana bitno utječe na svojstva vlaknastih kompozita. Mehanička svojstva kompozita ojačanih kontinuiranim usmjerenim vlaknima su vrlo anizotropna. U smjeru vlakana čvrstoća je maksimalna dok je u smjeru okomitom na vlakna čvrstoća minimalna. Kod kompozita ojačanih kratkim vlaknima vlakna mogu biti ili usmjerena ili slučajno raspoređena. Značajne vrijednosti čvrstoće i krutosti moguće je postići u uzdužnom smjeru kod spomenutih kompozita. Unatoč nekim ograničenjima na efikasnost ojačavanja, kod kompozita ojačanih slučajnim usmjerenim kratkim vlaknima svojstva su izotropna. [2]

Vlaknima ojačani kompoziti se prema vrsti matrice mogu podijeliti na polimerne, metalne i keramičke kompozite. Polimerna matrica je najčešća te može biti ojačana staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima. Značajka mnogih polimernih kompozita su visoka specifična čvrstoća – (omjer čvrstoće i gustoće) i specifični modul elastičnosti (krutost) – omjer modula elastičnosti i gustoće, što se postiže primjenom matrica niske gustoće. [2]

Mehanizmi očvršnuća koji vrijede za homogene metalne legure u pravilu se teško mogu primijeniti na kompozitne materijale. Umjesto toga kompoziti se “dizajniraju“ (projektiraju, komponiraju, sastavljaju) u cilju pripremanja neobičnih (neuobičajenih) kombinacija svojstava, koja se ne mogu postići uobičajenim metodama utjecanja na mikrostrukturu i mehanička svojstva. To osobito vrijedi za laminatne kompozite i kompozite s česticama koji se velikim dijelom uvijek “dizajniraju“ u cilju ispunjavanja posebnih zahtjeva, a ne samo zahtjeva u pogledu čvrstoće. Uobičajeno je da se vlaknima ojačani kompoziti “dizajniraju“ s ciljem postizanja neobičnih (neuobičajenih) kombinacija čvrstoće, krutosti, temperaturne postojanosti male mase. Zakon miješanja prikladan je za određivanje ponašanja brojnih jednostavnih vlaknima ojačanih materijala. [2]

## 2.2 KOMPOZITI S ČESTICAMA

Kod kompozita s česticama diskretne jednolično raspoređene čestice – tvrd i krhak materijal, obavijene su mekanijom i duktilnijom matricom. U stvari struktura naliči onoj mnogih dvofaznih disperzijski ojačanih metalnih legura. Ipak, kod kompozita se za ugradnju disperziranih čestica ne primjenjuje transformacija faza.

Obzirom na veličinu čestica i način na koji čestice utječu na svojstva kompozita, kompozite s česticama možemo podijeliti u dvije velike skupine: kompozite s disperzijom i kompozite s velikim česticama. U vezi s time potrebno je definirati kriterij za ovu podjelu. Orijehtacijski to može biti promjer čestica – čestice do promjera 0,1  $\mu\text{m}$  rabe se kod kompozita s disperzijom, a čestice promjera većeg od 1,0  $\mu\text{m}$  rabe se kod kompozita s velikim česticama. Osim navedenoga, moguće je razliku između jedne i druge skupine uočiti na osnovi volumnih udjela čestica. U pravilu do volumnih udjela od  $V_p = 0,15$  može se govoriti o kompozitima s disperzijom, iznad volumnih udjela  $V_p = 0,20$  o kompozitima s velikim česticama. [2].

### 2.2.1 Kompoziti s disperzijom

Veličina čestica kod disperzijom ojačanih kompozita vrlo je mala (promjeri iznose od 10 do 250 nm). Budući da male čestice sprječavaju gibanje dislokacija, one vode do spomenutog efekta ojačavanja. Potrebna je samo mala količina disperziranog materijala – do 15 %.

Glavne varijable u određivanju učinkovitosti disperzije su:

- veličina čestica,  $d$
- volumni udio  $V_p$
- razmak između disperziranih čestica  $D_p$ .

Odnos između tih varijabli je sljedeći:

$$D_p = (1 - V_p)2d^2/V_p$$

Pri sobnoj temperaturi disperzijom ojačani kompoziti nisu čvršći od dvofaznih metalnih legura. Međutim, budući da do katastrofalnog omekšavanja disperzijom ojačanih kompozita ne dolazi pri pregrijavanju, porastu zrna ili povećanju disperzirane faze, čvrstoća kompozita postupno se smanjuje s povećanjem temperature. [2]

### **2.2.2 Kompoziti s velikim česticama**

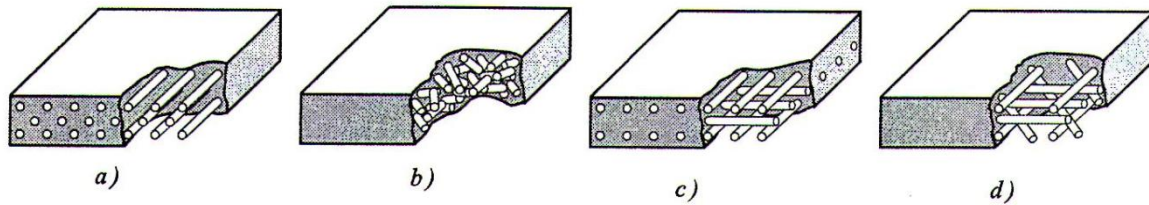
Ovi kompoziti sadrže veće udjele velikih čestica koje izravno ne djeluju na sprječavanje gibanja dislokacija. Takvi kompoziti proizvode se u cilju postizanja takvih kombinacija svojstava kojima nije prvenstvena svrha osiguranje čvrstoće. Kompoziti s česticama mogu uključivati brojne kombinacije metala, keramike i polimera.

Brojni polimerni materijali koji sadrže punila te druge oblike dodataka kompoziti su s česticama. Klasičan primjer je čađa u vulkaniziranoj gumi. Čađa doprinosi čvrstoći, krutosti, tvrdoći, otpornosti trošenju, te toplinskoj postojanosti gume. Druge vrste punila, kao npr. glina, dodaju se polimeru u cilju smanjenja potrebne količine polimera. Takvi dodaci povećavaju krutost, ali smanjuju čvrstoću i duktilnost (deformabilnost). [2]

## **2.3 VLAKNIMA OJAČANI KOMPOZITI**

Kod vlaknima ojačanih kompozita dolazi do izražaja poboljšanje čvrstoće, žilavosti, krutosti, te povećanja omjera “čvrstoća/gustoća“ uslijed ugradnje čvrstih, krutih i krhkih vlakana u mekaniju, duktilniju matricu. Materijal matrice prenosi opterećenje na vlakna te osigurava duktilnost i žilavost, budući da vlakna nose veći dio opterećenja.

U uporabi su vrlo raznoliki materijali ojačala. Stoljećima se za ojačanje glinenih opeka rabila slama. Za ojačanje betonskih konstrukcija rabe se čelične šipke. Na osnovi staklenih vlakana ugrađenih u polimernu matricu dobiva se kompozit uporabiv za transportna sredstva te primjenu u zrakoplovstvu. Vlakna načinjena od bora, ugljika i polimera osiguravaju izrazito ojačavanje. Za ojačanje se rabe i prije spomenuti viskeri. Osim toga ojačavala mogu biti raspoređena na različite načine.



**Slika 2. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačavala; a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna [2]**

Na slici 2. na primjeru a) prikazana su kontinuirana jednosmjerna vlakna kod kojih se dobivaju anizotropna svojstva vlakana, a time i kompozita. Tako usmjerenim vlaknima dobivaju se odlična mehanička svojstva u smjeru vlakana.

Na slici 2. na primjeru b) prikazana su slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna. Kratka, slučajno orijentirana staklena vlakna obično su prisutna kod tzv. “fiberglass-a“. Jednosmjerno raspoređivanje kontinuiranih vlakana može se primijeniti za izradu proizvoda promišljenih anizotropnih svojstava. Od vlakana se mogu izraditi tkanine ili trake. Slojevi traka mogu se različito usmjeravati. [2,3]

Prednosti vlaknastih polimernih kompozita su:

- znatno više specifične čvrstoće i krutosti
- relativno niska cijena proizvodnje i obrade
- velika mogućnost prigušenja vibracija

Nedostaci vlaknastih polimernih kompozita su:

- osjetljivost na raslojavanje i mrvljenje
- mogućnost širenja pukotina duž vlakna
- napetosti izazvane skupljanjem matrice pri i nakon proizvodnje tvorevine
- anizotropnost svojstava [3]

### 2.3.1 Predviđanje svojstava vlaknima ojačanih kompozita

Zakonom miješanja uvijek se može predvidjeti gustoća vlaknima ojačanih kompozita:

$$\rho_c = V_m * \rho_m + V_f * \rho_f$$

gdje se indeks "m" odnosi na matricu, a "f" na vlakno.

Osim toga, s pomoću zakona miješanja može se točno predvidjeti električna i toplinska vodljivost vlaknima ojačanog materijala u smjeru vlakana ako su vlakna kontinuirana i jednosmjerna. [2]

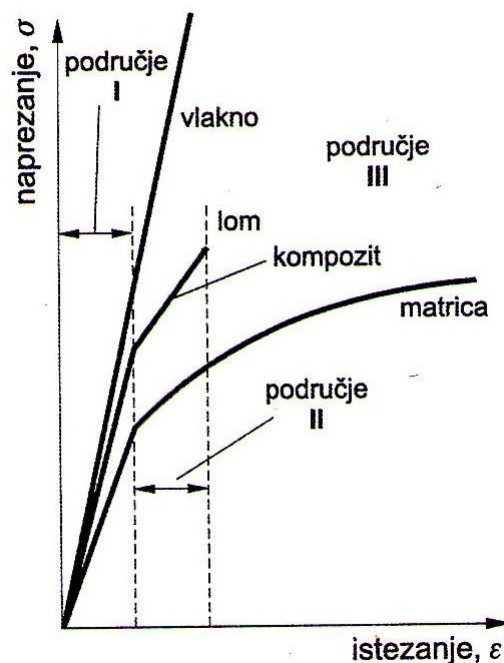
#### 2.3.1.1 Modul elastičnosti

Ako opterećenje djeluje paralelno s kontinuiranim jednosmjernim vlaknima, zakonom miješanja može se točno predvidjeti modul elastičnosti:

$$E_c = V_m * E_m + V_f * E_f$$

gdje je:  $E_c$  – modul elastičnosti kompozita,  $E_m$  – modul elastičnosti matrice,  $E_f$  – modul elastičnosti vlakna.

Pri visokim naprezanjima započinje deformiranje matrice te dijagram "naprezanje-istežanje" više nije linearan. [2]



Slika 3. Dijagram "naprezanje-istežanje" vlaknima ojačanog kompozita [2]



### 2.3.1.2 Čvrstoća

Čvrstoća kompozita ovisi o vezama između vlakana i matrice te je ograničena deformiranjem matrice. Posljedica ovih okolnosti je da je utvrđena čvrstoća gotovo uvijek manja od predviđene zakonom miješanja. Druga svojstva, kao npr. duktilnost (plastičnost), ponašanje pri udaru (žilavost), ponašanje pri dinamičkom (umor materijala) i dugotrajnom statičkom opterećenju (puzanje materijala) predviđaju se teže nego vlačna čvrstoća. [2]

### 2.3.1.3 Diskontinuirana vlakna

Svojstva vlaknastih kompozita znatno se teže predviđaju ako su vlakna diskontinuirana. Tomu je tako zbog toga što krajevi svakog vlakna nose manje opterećenja nego srednji dio vlakna.

Drugim riječima, ispitivanjem utvrđena čvrstoća biti će manja od one proračunate zakonom miješanja. Odstupanje je manje ukoliko je stvarna duljina vlakna “ $l$ ” veća od kritične veća od kritične duljine “ $l_c$ ”, odnosno preciznije ukoliko je odnos “duljina/promjer” vlakna “ $l/d$ ” veći od kritičnog. Veličina ovog omjera bitno utječe na svojstva kompozita. Npr. poliamid ojačan ugljičnim vlaknima odnosa  $l/d = 30$ , ima čvrstoću  $110 \text{ N/mm}^2$ . Vlaknima veće duljine ( $l/d = 800$ ) postiže se čvrstoća od  $240 \text{ N/mm}^2$ . [2]

## 2.3.2 Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita

Pri konstruiranju vlaknima ojačanim kompozita potrebno je uzeti u obzir brojne faktore.

### 2.3.2.1 Omjer “duljina/promjer”

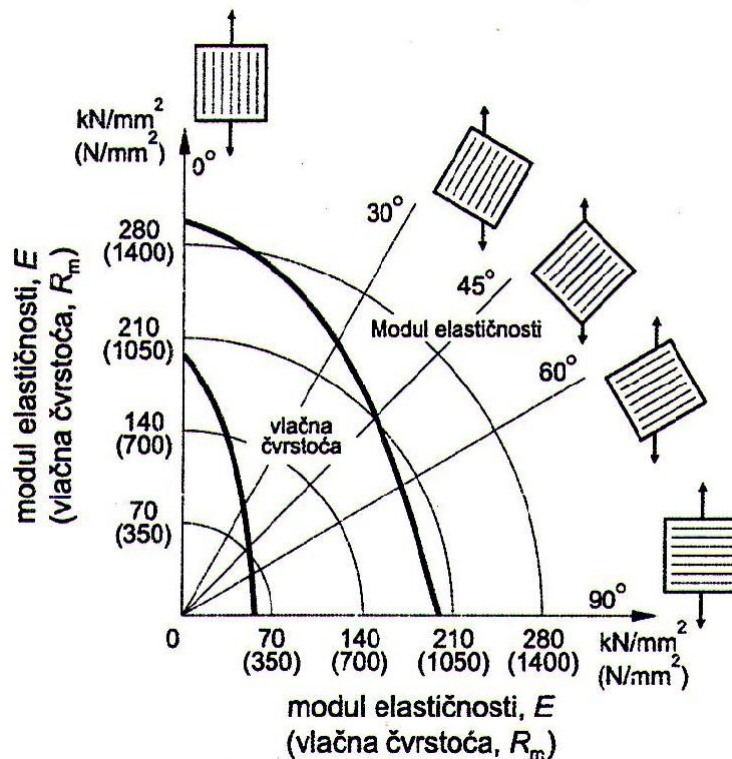
Kontinuirana vlakna koja vode do najboljih svojstava, često se teško proizvode te također teško ugrađuju u matricu. Diskontinuirana vlakna s velikim omjerom “duljina/promjer” znatno se lakše ugrađuju u matricu dovodeći tako do materijala visoke krutosti i čvrstoće.

### 2.3.2.2 Volumni udio vlakana

Veći volumni udio vlakana vodi do povećanja čvrstoće i krutosti kompozita. Gornja granica od oko 40 % određena je sposobnošću, odnosno mogućnošću da se vlakna okruže materijalom matrice.

### 2.3.2.3 Usmjerenost vlakana

Jednosmjerna vlakna imaju optimalnu krutost i čvrstoću kada je opterećenje paralelno s vlaknima što je prikazano na slici. Ipak kao što je prikazano primjerom, svojstva kompozita mogu biti vrlo anizotropna. Umjesto u jednom smjeru, vlakna možemo polagati ortogonalno ili pod nekim drugim kutom. Time ćemo žrtvovati maksimalnu čvrstoću, ali ćemo postići jednoličnija svojstva kompozita.



Slika 4. Utjecaj usmjerenja vlakana obzirom na naprezanje za Ti-leguru ojačanu vlaknima bora [2]

### 2.3.2.4 Svojstva vlakana

Vlakna trebaju biti čvrsta, kruta, lagana, a također trebaju imati visoko talište. Specifična čvrstoća i specifični modul elastičnosti materijala definirani su izrazima:

$$\text{Specifična čvrstoća} = R_m (R_e)/\rho$$

$$\text{Specifični modul elastičnosti} = E/\rho$$

gdje su:  $E$  – modul elastičnosti

$R_m$  – vlačna čvrstoća

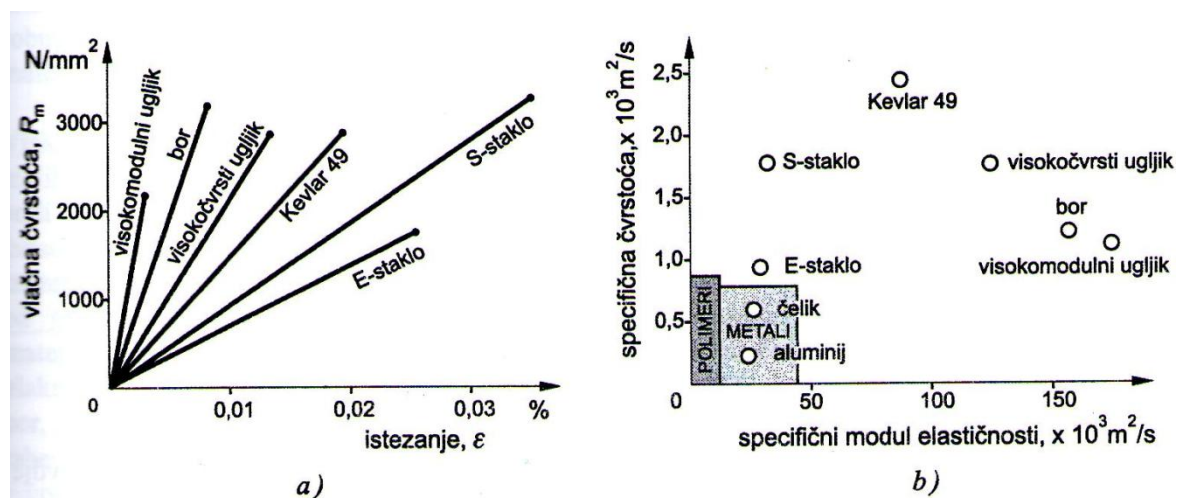
$R_e$  – granica razvlačenja

$\rho$  – gustoća.

Kao materijali za vlakna preferiraju se materijali visokog specifičnog modula elastičnosti ili čvrstoće. Neki karakteristični podaci za svojstva za ojačala navedeni su na slici 5 i slici 6.

Materijal	Gustoća, kg/m <sup>3</sup>	Vlačna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>	Specifična čvrstoća, (x10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /s)	Modul elastičnosti, kN/mm <sup>2</sup>	Specifični modul, (x10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> /s)
<b>Viskeri</b>					
Grafit	2200	20700	9,1	700	318
Silicij-nitrid (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	3200	5000...7000	1,56...2,2	350...380	109...118
Aluminij-oksidi (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4000	10000...20000	2,5...5,0	700...1500	175...375
Silicij-karbid (SiC)	3200	20000	6,25	480	150
<b>Vlakna</b>					
Aluminij-oksidi	3950	1380	0,35	379	96
Aramid (Kevlar 49)	1440	3600...4100	2,5...2,85	131	91
Ugljik <sup>a</sup>	1780...2150	1500...4800	0,70...2,70	228...724	106...407
E-staklo	2580	3450	1,34	72,5	28
Bor	2570	3600	1,40	400	156
Silicij-karbid	3000	3900	1,30	400	133
PE-UHMW (Spectra 900)	970	2600	2,68	117	121
<b>Metalne žice</b>					
Visokočvrsti čelik	7900	2390	0,30	210	26,6
Molibden	10200	2200	0,22	324	31,8
Volfram	19300	2890	0,15	407	21,1

Slika 5. Karakteristike nekih materijala primjenjivih za ojačavanje vlaknima [2]

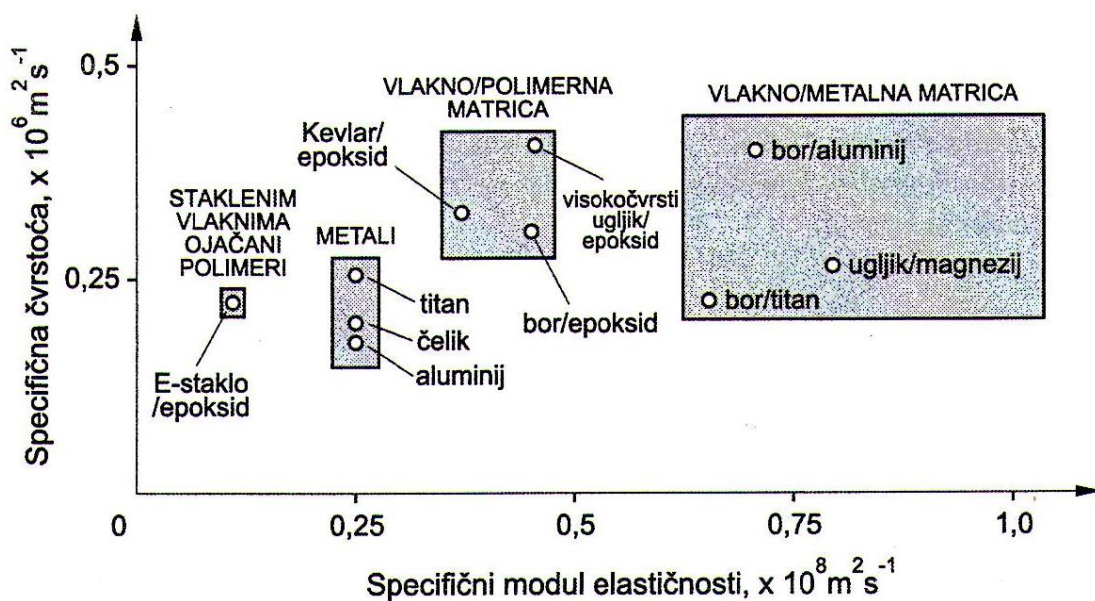


Slika 6. Svojevlastna vlakna: a) krivulja "naprezanje-istezanje", b) usporedba specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti nekih vlakana s metalima [2]

### 2.3.2.5 Svojstva matrice

Uobičajeno je da su materijali matrice žilavi i duktilni tako da prenose opterećenje na vlakna te sprječavaju da napukline od prekinutih vlakana napreduju kroz cijeli kompozit. Matrica također treba biti čvrsta tako da doprinosi sveukupnoj čvrstoći kompozita. U krajnjoj liniji na prikladnost matrice utječe talište. Polimeri se mogu primjenjivati do maksimalne temperature od 80 °C za nezasićene poliesterske smole do 315 °C za poliimide.

Na sljedećoj slici prikazana je usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće za neke od najraširenijih vlaknastih kompozita.



Slika 7. Usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće nekih kompozita s metalima [2]

## 2.4 FUNKCIJA KOMPONENATA KOMPOZITA

### 2.4.1 Funkcija matrice

Polimeri se rabe kao materijali matrice zbog toga što se zahtijeva odgovarajuća duktilnost. Kod vlaknima ojačanih kompozita matrica ima nekoliko zadaća. Najprije, ona povezuje vlakna te služi kao medij kojim se izvana nametnuto naprezanje prenosi i raspoređuje na vlakna, a samo mali dio nametnutog opterećenja nosi matrica. Osim toga materijal matrice treba biti duktilan. To znači da modul elastičnosti vlakna treba biti mnogo veći od modula elastičnosti matrice.

Sljedeća funkcija matrice je u tome da pojedinačna vlakna zaštiti od površinskog oštećivanja do kojih može doći mehaničkom abrazijom ili kemijskim reakcijama od strane okolnog medija. Takve interakcije mogu izazvati tečenje na površini koje može voditi do napuklina, a one mogu voditi do oštećivanja pri nižim vlačnim naprezanjima. Kao posljedica tog procesa matrica se odvaja od vlakna, te zbog svojstva svoje relativne mekoće i plastičnosti omogućuje propagiranje krhkog loma od vlakna do vlakna što može rezultirati lomom (katastrofalnim oštećenjem). Drugim riječima, matrica služi kao prepreka napredovanju napuklina. Iako neka pojedinačna vlakna puknu, do loma kompletnog kompozita neće doći dok god veći broj okolnih vlakana, koja su jednom pukla, oblikuje skupinu (grozd) kritične veličine.

Bitno je da su adhezijske veze između vlakna i matrice dostatne da umanje izvlačenje vlakana. U stvari, čvrstoća povezivanja važna je pretpostavka pri izboru kombinacija "matrica-vlakno". Čvrstoća kompozita u velikoj mjeri ovisi o tim vezama koje su adekvatne vezama bitnima za maksimiranje prijenosa naprezanja sa slabe matrice na čvrsta (jaka) vlakna. [2]

### 2.4.2 Funkcija vlakana

Značajna karakteristika većine materijala, osobito onih koji su krhki leži u tome da su vlakna malog promjera znatno čvršća od cijelog kompozita. Kao što je ranije navedeno, vjerojatnost prisutnosti kritične plohe tečenja koja može dovesti do loma, smanjuje se smanjenjem volumena (obujma) epruvete, a ta pojava koristi se kao prednost kod vlaknima ojačanih kompozita. Dakle, materijali koji se rabe u obliku vlakana za armiranje, imaju visoku vlačnu čvrstoću.

Na osnovi promjera i karaktera vlakna su svrstana u tri skupine: viskeri, vlakna i žice. Vlakna su ili polikristalna ili amorfna te imaju mali promjer. Vlaknasti materijali općenito mogu biti polimerni ili keramički (npr. polimer aramid, staklo, ugljik, bor, aluminij-oksidi, silicij-karbid). [2]

## 2.5 SVOJSTVA I PRIMJENA KOMPOZITA S POLIMERNOM MATRICOM

Kompoziti s polimernom matricom sastavljeni su od polimerne smole kao matrice s vlaknima kao komponentom za ojačavanje. Pojam “smola“ u ovom se kontekstu koristi za obilježavanje polimera-tvari velike molekulne mase koji treba ojačati. Ovi materijali rabe se u najvećoj mogućoj raznolikosti primjene kompozita, i to s obzirom na količinu, obzirom na svojstva pri sobnoj temperaturi, lakoću proizvodnje, te cijenu.

Ranije je opisana uloga polimerne matrice, osim toga matrica često određuje najvišu radnu temperaturu budući da je uobičajeno da materijal matrice mekša, tali se ili se razgrađuje pri znatno nižim temperaturama nego što bi se to dogodilo s vlaknastim ojačanjem.

Najraširenije i daleko najjeftinije polimerne smole su poliesteri i vinil esteri. Ovi materijali matrice prvenstveno se primjenjuju kod staklenim vlaknima ojačanih kompozita. Veliki broj formulacija navedenih smola omogućuje širok raspon svojstava ovih polimernih materijala. [2]

Obzirom na prevladavajuću ulogu vlakana kao dodataka (ojačala) kod polimernih kompozita odvojeno se razmatraju:

- staklenim vlaknima ojačani polimerni kompoziti
- ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti
- aramidnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti
- ostali vlaknasti materijali za ojačanje [2]

### 2.5.1 Materijali polimernih matrica

Materijali polimernih matrica u slučaju duromernih matrica mogu biti:

- Poliesterske smole
- Vinilesterske smole
- Epoksidne smole
- Fenolne smole

Za ovaj rad relevantne su poliesterske smole te će se navesti podaci samo o njima.

### 2.5.1.1 Duromerne matrice – poliesterske smole

Poliesterska smola je najčešće korištena vrsta smole posebice u brodograđevnoj industriji pri proizvodnji malih plovila. Koristi se mješavina poliestera i monomera, najčešće stirena. Dodatak stirena (do 50 %) snižava viskoznost smole i olakšava primjenu (stiren služi za povezivanje molekula polistirena i samim time očvršćuje materijal).

Poliesterske smole imaju ograničeni rok trajanja, pa se često u postupku proizvodnje dodaju male količine usporavala. Ova vrsta smole pogodna je zbog svoje niske cijene te relativno dobrih mehaničkih svojstava. U ovisnosti o stupnju polimerizacije kao ishodnim komponentama dobiveni produkti su od tekućine do krutine. Također ove smole se koriste za proizvodnju pjena, adheziva, premaza za drvo, metale, plastifikatore i vlakna. U građevinarstvu osnovne sirovine u proizvodnji zasićenih poliestera su adipinska kiselina, ftalna kiselina, dimerna kiselina, glikoli i trioli.

Poliesterske smole spadaju u duroplaste, te se tako odlikuju postojanošću na višim temperaturama, te su dimenzionalno stabilne za razliku od termoplasta. Pogodne su zbog toga što se mogu prerađivati i pri sobnoj temperaturi što im pojednostavnjuje primjenu.

Dodatkom staklenih ojačala, armiranjem, mogu se postići izvanredna mehanička svojstva uz malu specifičnu težinu što se rijetko može postići s ostalim materijalima. Poliesterski kompoziti ojačani staklenim vlaknima slabo provode toplinu. Često se koriste i kao antikorozivni materijali zbog svoje kemijske postojanosti i postojanosti prema atmosferilijama. [3,4]

### 2.5.2 Materijali vlaknastih ojačavala

Vlaknasta ojačavala moraju ispunjavati uvjet čvrstoće, modula elastičnosti, kompatibilnosti s matricom, gustoće, kemijske postojanosti, antikorozivnosti i neka druga tražena svojstva.

Vrste vlakana općenito mogu biti:

- staklena vlakna (E-staklo, S-staklo, R-staklo)
- poliesterska vlakna (Dacron, Terilen, itd.)
- aramidna vlakna (Kevlar, Twaron, itd.)
- ugljična vlakna (Carbon)
- metalna vlakna (žica ili žičano pletivo)
- prirodna vlakna (pamuk, sisal, lan, itd.) [4]



### 2.5.2.1 Staklenim vlaknima ojačani polimerni kompoziti

Staklena vlakna najčešće su upotrebljavana ojačanja za plastomerne i duromerne kompozite. Dobivaju se raznim tehnološkim postupcima iz staklene taline. Nanošenjem aperture vlakna dobivaju potrebna mehanička svojstva i specifičnu kompatibilnost s različitim smolama za postupke proizvodnje kompozitnih proizvoda. [3]

Stakleno ojačanje je najvažnije punilo poliestera jer je ono nosilac mehaničkih svojstava, dok je poliester zapravo vezivni materijal.

Podjela staklenih vlakana po kemijskom sastavu i svojstvima:

- E – niska električna provodljivost
- C – kemijska postojanost
- S – visoka čvrstoća
- M – visoki modul rastezljivosti
- A – alkalijsko staklo [3]

Prednosti upotrebe staklenih ojačanja su:

- visoka čvrstoća uz malu težinu
- dimenzijska stabilnost
- postojanost na povišene temperature i koroziju
- dobra električna svojstva
- relativno jednostavna proizvodnja čime je i oblikovana i pristupačna cijena [3]

Na tržištu staklo možemo naći u dva oblika, u obliku kontinuiranog rovinga te tankog isječenog rovinga.

Stakleni mat je proizvod odsječenog rovinga, sastoji se od niti dužine oko 5 cm koje su rastresene po površini i postavljene u svim pravcima. Niti su međusobno povezane pomoću ljepila na osnovi sintetskih smola. Razlikuje se po gramaturi na kvadratni metar kao i prema vezivu koje može biti emulzijsko ili praškasto na osnovi praškastog poliestera. [4]

Staklenim vlaknima ojačan polimerni kompozit sastoji se od staklenih vlakana, kontinuiranih ili diskontinuiranih, koja se nalaze u polimernoj matrici. Ovaj tip kompozita proizvodi se u najvećim količinama. Sastav stakla koje se može izvlačiti u vlakna (često nazvano E-staklo) promjera je od 3 do 20  $\mu\text{m}$ . [2]

Staklo je popularan materijal za ojačavanje iz nekoliko razloga:

- Lako ga se iz rastaljenog stanja izvlači u obliku visokočvrstih vlakana;
- Lako ga se dobavlja te se korištenjem brojnih tehnika proizvodnje kompozita ekonomično mogu proizvoditi staklenim vlaknima ojačani polimerni materijali;
- Budući da su vlakna relativno čvrsta, kada ih se uloži (ugradi) u polimernu matricu, dobiva se kompozit vrlo visoke specifične čvrstoće;
- Kombiniranjem s različitim polimerima postiže se kemijska inertnost što daje kompozite korisne za primjenu u različitim korozivnim sredinama. [2]

Površinske karakteristike staklenih vlakana izuzetno su važne budući da malo površinsko tečenje može štetno djelovati na svojstva pri vlačnom opterećenju. Do površinskog tečenja lako dolazi uslijed trenja ili abrazije površine nekim drugim tvrdim materijalom. Također, na površini stakla koja je izložena uobičajenoj atmosferi, makar samo u kratkom vremenskom periodu, stvara se slabi površinski sloj koji interferira s vezama između vlakna i matrice. [2]

Uobičajeno je da su novim načinom izvlačena vlakna prilikom izvlačenja prevučena tankim slojem tvari koja štiti površinu vlakna od oštećivanja te neželjenih interakcija s okolinom (tzv. apertura). Ovaj sloj obično se skida prije proizvodnje kompozita te se zamjenjuje vezivom ili finišom što osigurava bolje povezivanje vlakna i matrice.

Postoji nekoliko ograničenja obzirom na ovu skupinu materijala. Usprkos visoke čvrstoće vlakna nisu kruta te ne mogu pružiti krutost koja je potrebna za neke primjene (npr. dijelovi konstrukcija zrakoplova i mostova). Većina staklenim vlaknima ojačanih polimernih kompozita imaju temperaturu primjene do 200 °C, jer pri višoj temperaturi većina polimera počinje teći ili dolazi do pogoršanja njihovih svojstava.

Poznati su mnogi primjeri primjene staklenim vlaknima ojačanih polimernih kompozita: kućišta (kabine) vozila i trupovi plovila, cijevi, spremnici, te industrijski podovi. Industrija transporta primjenjuje sve veće količine staklenim vlaknima ojačanih polimernih materijala u težnji da smanji težinu vozila i poveća djelotvornost transporta tekućine (kapljevine). [2]

## 2.6 PROIZVODNJA I PRERADA VLAKNIMA OJAČANIH KOMPOZITA

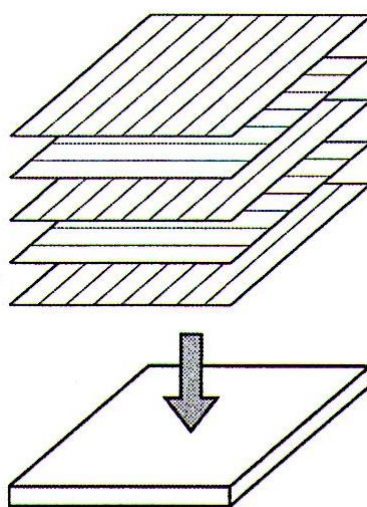
Kako bi se postigla optimalna svojstva, vlakna trebaju u matricu biti uložena na odgovarajući način (raspored, razmak). Diskontinuirana vlakna mogu se miješati s materijalom matrice kako bi se postiglo ili slučajno ili preferirano orijentiranje. Kontinuirana vlakna uobičajeno se raspoređuju jednosmjerno (npr. trake), ortogonalno (npr. tkanine) i namotavanjem. [2]

### 2.6.1 Lijevanje

Postupci lijevanja prisiljavaju kapljevina da se raspoređuje oko vlakana. Grubi primjer je lijevanje betona oko odgovarajuće raspoređenih čeličnih štapova za ojačanje. Kod filamentom ojačanih kompozita kapljevina se unosi među vlakna kapilarnim djelovanjem, vakumskom infiltracijom ili tlačnim lijevanjem. [2]

### 2.6.2 Slojeviti kompozitni materijali (laminati)

Slojevite (laminatne) konstrukcije odnosno odgovarajući kompoziti sastavljeni su od dvodimenzionalnih slojeva ili “panel“ s preferiranim smjerom visoke čvrstoće, kao što se npr. susreće kod drveta, odnosno kod usmjerenim vlaknima ojačanih polimernih materijala. Slojevi su složeni i dodatno međusobno čvrsto povezani, a svojstva variraju obzirom na orijentiranje vlakana (smjerovi visoke čvrstoće) u pojedinim slojevima, kao što je prikazano na slici 8. [2]



Slika 8. Slaganje različito usmjerenim vlaknima ojačanih slojeva kod laminatnih konstrukcija [2]

## 2.7 Proizvodnja polimernih tvorevina – dodaci

Kao dodaci polimerizatima služe različite viskomolekulne i niskomolekulne tvari. Prema definiciji DIN 8580, dodaci se ubrajaju u bezoblične tvari, što je skupni naziv za tvari u obliku plina, kapljevina, praška, vlakana, čestica, granulata, slobodnih čestica geometrijski određena oblika itd. Dodaci, kao materijalni izlaz iz proizvodnih postupaka, po svojim izmjerama rezultat su djelovanja u makromaterijalici, mikromaterijalici i nanomaterijalici. [6]

Dodataka je razmjerno mnogo i mogu se svrstati u dvije osnovne skupine: dodatke za poboljšavanje svojstava i dodatke za poboljšavanje preradljivosti.

### 2.7.1 Modifikatori mehaničkih svojstava

U tu skupinu dodataka ubrajaju se omekšavala, dodatci za povišenje žilavosti, punila, prijanjala i ojačavala (vlakna, viskeri, organska i anorganska ojačavala, celuloza, čađa). [6]

#### 2.7.1.1 Omekšavala

Mnogobrojni čvrsti i kruti materijali mogu se primijeniti samo ako im se sniženjem valentnih sila snize moduli elastičnosti. To se postiže dodavanjem omekšavala, posebne skupine dodataka za omekšavanje. [6]

#### 2.7.1.2 Prijanjala

Tvari za prijanjanje, prijanjala, upotrebljavaju se pretežno pri pravljenju staklom ojačanih materijala za oblaganje vlakna sa svrhom boljeg prijanjanja smole uz vlakno. Tako se postiže vrlo velika adhezivnost između staklenih vlakana i organskih polimera njihovim povezivanjem, reakcijom hidroksilnih skupina vlakana s vinil-triklorsilanom kao vezivom i prijanjalom, a zatim reakcijom vinilne skupine s polimernom molekulom uz nastajanje cijepljenog kopolimera vlakno-polimer. [6]

Prijanjala služe za poboljšavanje močivosti obloženog materijala i otklanjanju vodene kožice s površine. Kao prijanjala, upotrebljavaju se monomerni silicijski spojevi – silani, parafinsko ulje, ftalati, butilstearat, aceton, titanati i aluminati. [6]

### 2.7.1.3 Punila i ojačavala

Neki dodaci mogu imati dvojaku namjenu. Dodani u većim količinama, vrlo često samo snižavaju ukupnu cijenu koštanja polimernom materijalu. Istodobno mogu mijenjati i poboljšavati i njegova temeljna svojstva, npr. čvrstoću, žilavost, tečljivost taljevine, električnu i toplinsku provodnost. Ti isti dodaci u nižim koncentracijama ili u drugom obliku služe poboljšanju nekih drugih svojstava, npr. električnih (npr. kalcijev karbonat) ili za poboljšanje preradljivosti ili kao zamjena za sve skuplji polimerizat. Zato se opisuju zajednički. [6]

Punila i ojačavala su anorganski ili organski neutralni dodaci, fino dispergirane praškaste ili vlaknaste tvari u polimernoj osnovi s vrlo slabim međumolekulnim djelovanjem. Kad se dodaju u obliku kratkih ili duljih vlakana, bitno poboljšavaju čvrstoću materijala i nazivaju se ojačavalima. Zajedno s polimernom osnovom čine kompozitne materijale.

Ojačani polimeri dvofazni su sustavi sastavljeni od disperzne faze, ojačavala i temeljne polimerne faze, matrice. Ojačavalo je visoke rastezne i prekidne čvrstoće, a polimerna matrica je više prekidne čvrstoće. Čestice punila smanjuju slobodu promjene konformacija i gibanja polimernih molekula, povišujući njihovu krutost, što dovodi do poboljšanja rastezne čvrstoće kompozita. Djeluje li sila na površinu sustava polimerna matrica – punilo, dolazi do raspršivanja punila i povišenja žilavosti, za što je potrebna i dobra adhezivnost među tim fazama. [6]

#### 2.7.1.3.1 Punila

Punila u smislu dodataka kao zamjena za duromernu smolu su već odavno u uporabi. Međutim to nije slučaj kod plastomera, jer je povišenje krutosti bilo povezano sa pogoršanjem savojne žilavosti i posebno s naglim porastom viskoznosti, pa su se takvi materijali ili vrlo teško prerađivali ili ih uopće nije bilo moguće prerađivati uobičajenim postupcima. Za povezivanje punila s polimerizatom potrebna su veziva (tvari za povezivanje).

Najproširenija punila su organske soli i oksidi, osobito kalcijev karbonat (kreda), alumosilikati (kaolin), škrob u zajednici s celuloznim derivatima, kvarcni pijesak, drvena piljevina, a u manjim količinama upotrebljavaju se i otpadci pluta ili mrvljene školjke.

Promjer sintetskog taložnog kalcijeva karbonata je od 0.005 do 0,07  $\mu\text{m}$ , staklenih vlakana od 5 do 13  $\mu\text{m}$ , a viskera od 0,1 do 300  $\mu\text{m}$ .

Najpoznatija punila i ojačavala su kalcijev karbonat, silicijev dioksid, silikati, aluminijev oksid, staklena vlakna, polimerna vlakna, tehnički ugljik (čađa), drveno brašno i dr. Najrasprostranjeniji dodatak u ovoj skupini je kalcijev karbonat. Razlika djeluje li kao ojačavalo ili punilo, često ovisi o veličini površine i veličini čestica. Veličina čestica najčešće je samo nekoliko nanometara. [6]

#### 2.7.1.3.2 Ojačavala

Ta skupina dodataka služi poboljšanju čvrstoće materijala, a pokazala su se pogodnim: vlakna, monokristali (viskeri), organska i anorganska ojačavala, čađa i celuloza. [6]

#### 2.7.1.3.3 Vlakna

Za povišenje čvrstoće najčešće se upotrebljavaju staklena vlakna, posebno se rabe za nezasićene poliestere. Staklena vlakna dobivaju se izvlačenjem staklene taljevine kroz mlaznice, a pojedina vlakna mogu se međusobno povezivati u pređu s 50 do 816 jediničnih vlakana.

Vlakna kao ojačavala mogu biti: rovinzi, pređa (konci), tkanja od staklene svile, matovi, posebni oblici vlakana i kratka staklena vlakna.

Roving (struk) je naziv za ravnu pređu koja se sastoji od 10 do 100 jediničnih vlakana, najčešće od 60 ravnih vlakana. Pređa (konci) nastaje zakretanjem jednog ili više vlakana. Tkanje od staklene svile izrađuje se pletenjem konca i rovinga. Od rezane staklene vune pravi se mat. Mat se pravi u komadima duljine od oko 50 mm, a čvrstoća se poboljšava kemijskim povezivanjem, apertiranjem.

Posebni oblici vlakna jesu: stakleni papiri, staklena užad, pleteni stakleni proizvodi, tkana i pletena crijeva itd. Sve snažniji razvoj ojačanih plastomera temelji se na uporabi kratkih staklenih vlakana kraćih od 3 mm, koja su otpadni materijal pri pravljenju vlakana. Takva su vlakna jeftina i upotrebljavaju se kao ojačavalo ili punilo. Nekada se kao ojačavalo rabio azbest, ali je napušten zbog nepovoljnog utjecaja na zdravlje čovjeka tijekom proizvodnje i uporabe. [6]

## 2.8 PROIZVODNJA POLIMERNIH KOMPOZITNIH TVOREVINA

Polimernim kompozitnim tvorevinama, skraćeno polimernim kompozitima, nazivaju se proizvodi definiranog geometrijskog oblika, načinjeni od najmanje dvije tvari, polimerne matrice i tvari koja u pravilu povisuje čvrstoću i krutost tvorevine.

Od ojačanih polimera izrađuje se mnoštvo različitih proizvoda, od sitnih do velikih izradaka, kao što su trupovi čamaca, jahti, ribarskih ili ratnih brodova, kabine za cestovna vozila, cisterne, kade i sl. Među duromernim kompozitima prošireni su oni s matricom od nezasićenih poliestera i staklenih vlakana kao ojačavala. [6]

### 2.8.1 Sastav i građa polimernih kompozita – priprava za praobliskovanje

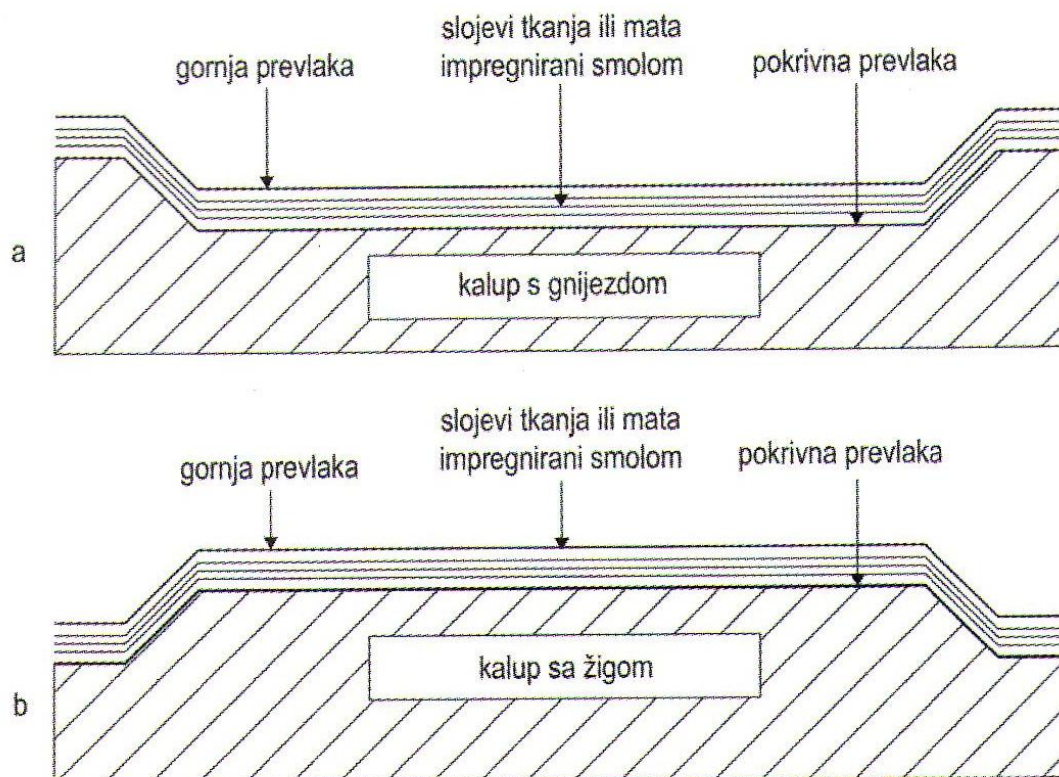
Po svojoj strukturi polimerni kompoziti mogu biti s česticama, vlaknasti te kompoziti s vlaknima i česticama i multifleksibilni kompoziti (kompoziti homogenih i nehomogenih pločastih kompozita). Najčešći su oblik ojačavala vlakna, kuglaste (globulne) čestice i kuglice. Najproširenija su staklena vlakna. Staklena vlakna upotrebljavaju se u obliku mata, tkanine ili struka (roving), runa itd. Promjer staklenih vlakana najčešće je od 10 do 15  $\mu\text{m}$ , a prije uporabe apretiraju se radi boljeg prijanjanja o polimernu matricu. Apretura obično sadržava mazivo, tvari za stvaranje filma na vlaknu i tvari za prijanjanje, prijanjala. [6]

### 2.8.2 Ručni dodirni postupak laminiranja

To je najstariji postupak proizvodnje duromernih kompozita, posebno prikladan za male proizvodne serije, srednjih do vrlo velikih izradaka. Stlačivanje i praobliskovanje obavlja se ručno i relativno je jednostavno.

Na kalup premazan tvari za lakše odvajanje, najprije se kistom nanosi sloj smole spremne za polireakciju uz umreživanje, ali bez ojačavala i punila. Zatim se redom nanose slojevi staklenog mata ili tkanine natopljeni hladno umrežujućom smolom, a valjkom se istiskuje zrak zadržan između slojeva. Smola bez ojačavala i punila čini i završni sloj u debljini dovoljnoj da pokrije stakleno ojačanje. Tako se dobije slojevit izradak, laminat. [6]

Kalupi za ručno laminiranje otvoreni su i nastoje se graditi jednostavno i od jeftinog materijala, od drva ili nekoga polimernog materijala, rjeđe od metala. Međutim, takvi se kalupi mnogo brže i troše i ne mogu se upotrebljavati u proizvodnji za više izradaka. Kalupi mogu biti s nanošenjem sastojaka u gnijezdo ili na žig što je prikazano na slici 9. [6]



Slika 9. Načelo dodirnoga laminiranja: a) u gnijezdu, b) na žigu [6]



### 3 MATERIJALI ZA IZRADU KOMPOZITA I METODE ISPITIVANJA

Izrada kompozita i potrebna ispitivanja za ovaj diplomski rad vršena su u Laboratoriju za polimere i kompozite i Laboratoriju za analizu metala pri Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Za izradu kompozita korišteni su sljedeće polazne tvari:

1. Poliesterska smola: Poliya; gustoće  $\rho=1,21 \text{ g/cm}^3$
2. Ubrzivač umreženja: Ketanok B180; COIM (Metil-etil-keton-peroksid)
3. Staklena vlakna
4. Čestice jarosita

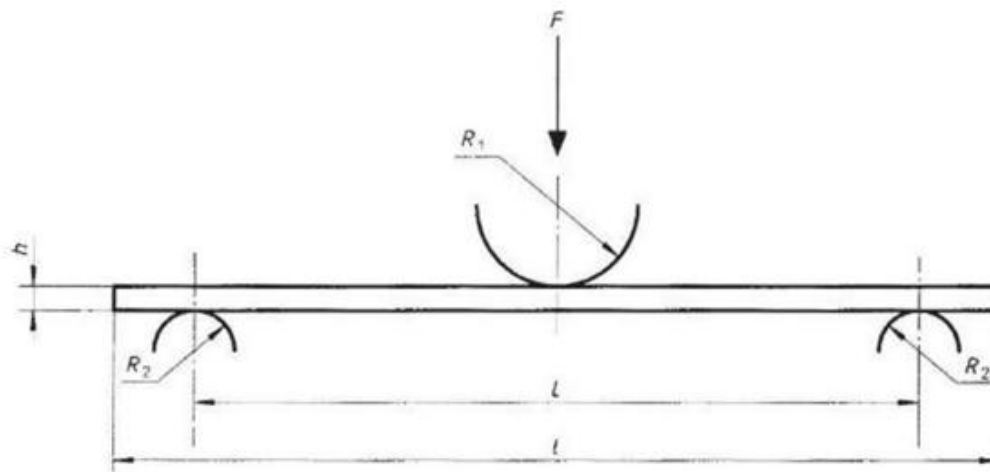
Na uzorcima pripremljenim ručnim polaganjem provedena su sljedeća ispitivanja:

- a) Mjerenje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti
- b) Mjerenje prividne međuslojne čvrstoće
- c) Mjerenje udarne žilavosti
- d) Mjerenje tvrdoće

#### 3.1 Mjerenje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti

Ispitivanja su provedena na univerzalnoj kidalici, ZMG WEB Thueringer Industriewerk Rauenstien, mjernog područja 0 – 4800 N, u Laboratoriju za polimere i kompozite. Za polimere i polimerne kompozite oblik epruvete je pravokutnog poprečnog presjeka.

Ispitivanje se vrši na način da se epruveta postavlja na dva oslonca, a po sredini epruvete se djeluje silom  $F$  koja uzrokuje posmak, odnosno progib epruvete. Prilikom ispitivanja bilježe se trenutna sila i progib. Ispitivanje se provodi do pucanja epruvete. Naziv za ovakvo ispitivanje je trotočkasto ispitivanje ili ispitivanje savijanjem u tri točke. Shema ispitivanja prikazana je na slici 10. [7]



Slika 10. Shematski prikaz ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti [7]



Slika 11. Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti na univerzalnoj kidalici

Izraz za dobivanje vrijednosti savojne čvrstoće:

$$R_{m,s} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

gdje je:

$R_{m,s}$  – savojna čvrstoća, MPa

$L$  – razmak između oslonaca, mm

$F_{max}$  – maksimalna sila, N

$b$  – širina ispitnog uzorka, mm

$h$  – debljina ispitnog uzorka, mm

U linearnom (elastičnom) dijelu vrijedi Hookeov zakon  $\sigma = E\varepsilon$ . U dijagramu naprezanje – istežanje ( $\sigma$ – $\varepsilon$ ) modul elastičnosti određuje se iz nagiba pravca približno linearnog područja. Kada se rezultati mjerenja prikazuju u dijagramu sila – progib ( $F$ - $f$ ), savojni modul elastičnosti izračunava se iz izraza:

$$E_s = \frac{\Delta F}{\Delta f} \cdot \frac{L^3}{4 \cdot b \cdot h^3}$$

Nagib pravca određuje omjer promjene sile i progiba:

$$\frac{\Delta F}{\Delta f} = \tan \alpha$$

Izraz za savojni modul elastičnosti tada se može zapisati kao:

$$E_s = \tan \alpha \cdot \frac{L^3}{4 \cdot b \cdot h^3}$$

gdje je:

$E_s$  – savojni modul elastičnosti, MPa

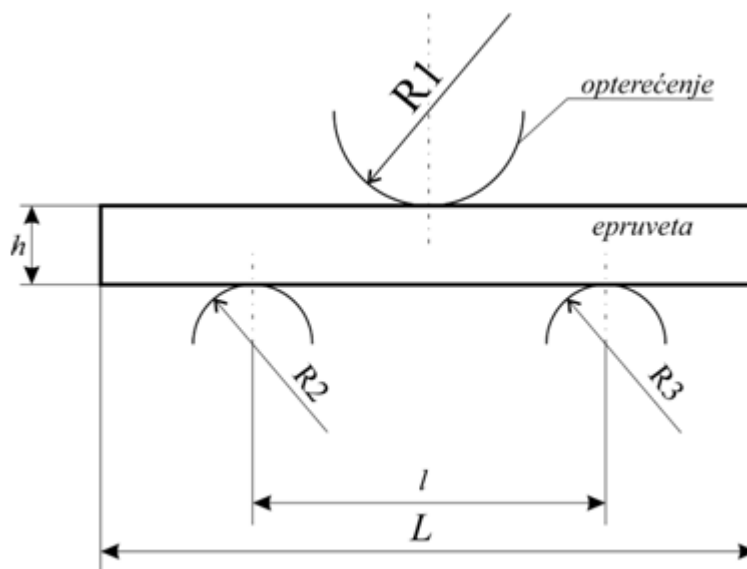
$\tan \alpha$  – nagib pravca. [7]

Ispitano je pet epruveta od svakog uzorka, prema normi HRN EN ISO 14125:2005/A1:2011, gdje su progibi očitavani u razmaku za svakih 20N opterećenja.

### 3.2 Mjerenje prividne međuslojne čvrstoće

Ispitivanje prividne međuslojne čvrstoće provedeno je na univerzalnoj kitalici ZMG VEB Thuringer Industriewerk Rauenstein u Laboratoriju za polimere i kompozite. Mjera za kvalitetu granične površine, odnosno međusloja, je prividna međuslojna smična čvrstoća koja ovisi o čvrstoći prijanjanja između vlakana za ojačanje i osnove te o veličini dodirnih površina vlakana i adhezije na tim površinama.

Dobra adhezija potrebna je duž cijele granične površine vlakana za ojačanje i osnove da bi se moglo prenijeti što veće opterećenje s polimerne osnove na vlakna korištena za ojačanje. Ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće metodom kratke grede provedena su sukladno normi EN ISO 14130 : 1997. Norma propisuje izradu epruveta pravokutnog poprečnog presjeka. Epruveta se opterećuje trotočkastim savijanjem, ali s malim razmakom oslonaca, kao što je prikazano na slici 12. [7]



Slika 12. Shema ispitivanja prividne međuslojne čvrstoće [7]

Ispitivanja se provode na univerzalnoj kitalici prilikom čega omjer debljine uzorka i razmaka među osloncima mora biti mali kako bi se povećao udio smičnih naprezanja i time potaknuo lom na dodirnoj površini između ojačala i matrice.

Prividna međuslojna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$\tau = \frac{3 \cdot F_{max}}{4 \cdot b \cdot h}$$

gdje je:

$\tau$  – prividna međuslojna čvrstoća, MPa

$F_{max}$  – maksimalna sila, N

$h$  – debljina ispitnog uzorka, mm

$b$  – širina ispitnog uzorka, mm

### 3.3 Mjerenje tvrdoće

Tvrdoća je svojstvo materijala da se protivi prodiranju stranog tijela u njegovu strukturu ili površinu. Podaci o tvrdoći materijala su neophodni kada se radi o ručnoj ili strojnoj obradi nekog materijala.

Mjerenje tvrdoće vršeno je pomoću tvrdomjera Zwick 3106 na način da su se očitavanja bilježila nakon 10, 30 i 60 sekundi opterećenja. Tvrdoća je mjerena sukladno normi EN ISO 2039-1 utiskivanjem kuglice promjera 5 mm, te opterećenjem 36,5 kP tj. 357,9 N. Vrijednosti dubine prodiranja kuglice očitane su na uređaju nakon 10, 30 i 60 sekundi. Tvrdoća se računa prema sljedećem izrazu:

$$H = \frac{1}{\pi \cdot D} \cdot \frac{F}{h_k}$$

S obzirom da je kuglica uređaja promjera 5 mm, u gornji izraz možemo uvrstiti vrijednost  $D=5$  mm, pa dobivamo formulu za računanje tvrdoće:

$$H = 0,064 \cdot \frac{F}{h_k}$$

gdje je:

$H$ - tvrdoća, MPa

$D$  – promjer kuglice, mm

$F$  – sila opterećenja, N

$h_k$  – dubina prodiranja, mm. [7]

Iako se tvrdoća ispitana metodom utiskivanja kuglice izražava u MPa, vrijednost rezultata je korisna ponajviše zbog međusobnog uspoređivanja vrijednosti, kao i u sličnim ispitivanjima poput Vickersa, Rockwella i Brinella.



Slika 13. Ispitivanje tvrdoće na tvrdomjeru Zwick 3106

### 3.4 Mjerenje udarne žilavosti

Udarne žilavost ispitivana je na uređaju Karl Frank 81 s time da su na epruvetama za mjerenje udarne žilavosti napravljeni zarezi. Udarne žilavost je svojstvo koje pokazuje kolika je otpornost materijala na udarac. Ovo svojstvo važno je za dijelove koji su opterećeni na udarne ili impulsne opterećenja. Ispitivanje udarne žilavosti materijala vrši se pomoću Charpyevog bata, na način da se epruveta fiksira na oslonce, te se s određene visine ispušta bat koji slobodnim padom lomi epruvetu.

Količina kinetičke energije utrošene za lom epruvete naziva se udarni rad loma ili udarna žilavost. [7]

Ispitivanje udarne žilavosti provedeno je prema normi HRN EN ISO 179–1:2010.

Udarni rad loma, odnosno udarna žilavost računa se prema izrazu:

$$A_{cu} = \frac{E_c}{b \cdot h} \cdot 10^3$$

gdje je:

$A_{cu}$  - udarna žilavost,  $\text{kJ/m}^2$

$E_c$  – energija loma, J

$b_N$  – širina ispitnog uzorka na mjestu zareza, mm

$h$  – debljina ispitnog uzorka, mm.



Slika 14. Ispitivanje udarne žilavosti pomoću Charpyevog bata

### 3.5 Analiza morfologije poprečnog presjeka uzoraka kompozitnih materijala

Za analizu morfologije poprečnog presjeka uzoraka kompozita upotrijebljen je pretražni elektronski mikroskop (SEM), Tescan Vega TS5136LS, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Uzorci su prije analize morfologije površine napareni u posebnom uređaju za neparivanje da bi postali vodljivi jer ih se jedino u tom slučaju može analizirati. Postupkom neparivanja nanoseni su slojevi vodljivog materijala da bi se mogli detektirati elektroni njihove površine, a materijal koji je korišten za neparivanje je legura zlata i paladija. Uređan upotrijebljen za neparivanje je SC7620 Sputter Coater Quorum.

### 3.6 Jarosit – dodatak čestica kao punilo u poliesterskom kompozitu ojačanom staklenim vlaknima [1]

Širom svijeta 75% metalnog cinka izdvaja se iz sfaleritne rude sljedećim procesima: hematit procesom ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), getit procesom ( $\text{FeOOH}$ ) i jarosit procesom ( $\text{XFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), gdje je X jedan od kationa kao što su  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{Ag}^+$  ili dvovalentni kation kao što je  $\text{Pb}^{2+}$ .

Jarosit proces je najučinkovitiji i najčešće korišten hidrometalurški postupak industrijske prerade cinka iz rude. Čvrsti otpad nastao ovim procesom pretežito sadrži mineral jarosit i opasni je otpad zato što sadrži značajnu količinu toksičnih metala.

Neovisno o uporabljenom postupku uklanjanja željeza iz procesa, u industriji cinka postoji potreba za razvojem novih čistih hidrometalurških puteva za izdvajanje cinka, srebra, olova, bakara, kadmija i željeza. Tijekom industrijske prerade rude cinka jarosit procesom nastaju velike količine otpada koji sadrži visoku koncentraciju olova, cinka, kadmija, željeza, sulfata, arsena, itd.

Zbog prisutnosti toksičnih elemenata, otpadni jarosit je kategoriziran kao opasni otpad. Obično se ovaj otpad odlaze na deponije, što nije poželjno zbog mogućeg negativnog učinka na okoliš. Djelovanjem vremenskih uvjeta, kisele kiše i slično na ovakav otpad povećava se pokretljivost i biorasploživost teških metala u tlu, vodi, zraku i organizmima životinja i biljaka. Potencijalni rizik visoke koncentracije teških metala za ljudsko zdravlje povezan je s direktnom izloženosti na mjestu zagađenja, primjerice udisanjem prašine ili putem biljaka s kontaminiranog tla.



Stoga, širom svijeta odlaganje ovakve vrste industrijskog otpada na deponije predstavlja potencijalnu opasnost za okoliš. Maksimalne razine onečišćenja toksičnim metalima i drugim anorganskim i organskim sastojcima u tlu, vodi, otpadu i prehrambenom lancu propisane su od strane brojnih organizacija, primjerice: Američke agencije za zaštitu okoliša (US EPA), Svjetske zdravstvene organizacije (WHO), Europske unije itd.

Za određivanje i procjenu utjecaja na okoliš industrijskog otpada koriste se različite eksperimentalne metode izluživanja i metode sekvencijalne ekstrakcije. Također, na temelju rezultata eksperimenta određuje se i indeks ekološkog rizika.

Rendgenskom difrakcijskom analizom utvrđeno je da otpadni jarosit iz Industrijskog parka Kosovske Mitrovice koji je nastao u procesu izdvajanja cinka u rudniku Trepča kao glavnu mineralnu fazu sadrži amonijev jarosit,  $\text{NH}_4\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ . Osim amonijevog jarosita uzorci sadrže i gips, franklinit, kvarc te barit.

Otpadni jarosit također sadrži sljedeće kemijske elemente Fe, S, Zn, Pb, Cd, Mn, Cu, Si, Al, As, Ag i Cr. Zbog prisutnih teških metala ovaj otpad predstavlja ozbiljnu opasnost po okoliš. Prema rezultatima izluživanja najveći štetni utjecaj na okoliš dolazi od sljedećih teških metala: Zn, Cd, Co, Cu, Pb i As. [1]

Rezultati izluživanja u sintetskoj kiseloj kiši i rezultati sekvencijalne BCR analize od velike su važnosti za određivanje indeksa zagađenja okoliša i faktora zagađenja otpadnog jarosita. Rezultati su također pokazali da otpadni jarosit predstavlja ozbiljnu opasnost po okoliš zbog prisutnosti brojnih toksičnih tvari (teških metala).

Na slici 15. prikazan je uzorak jarosita.



**Slika 15. Uzorak jarosita [1]**

### 3.6.1 Kemijski sastav jarosita

U tablici 1 prikazan je kemijski sastav jarosita određen ICP-OES metodom. Sadržaj oksida, te kemijskih elemenata Zn, Pb i Cu iskazan je u masenim udjelima, a ostali kemijski elementi (Ag, Ba, Co, Cd, Cr, Mn, Ni i As) iskazan je u mg/kg.

**Tablica 1. Kemijski sastav jarosita određen ICP-OES [1]**

Oksidi/elementi	Srednja vrijednost $\pm \sigma$
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, mas. %</b>	0.62 $\pm$ 0.001
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, mas. %</b>	44.37 $\pm$ 0.48
<b>SiO<sub>2</sub>, mas. %</b>	4.20 $\pm$ 0.2
<b>Zn, mas. %</b>	1.33 $\pm$ 0.01
<b>Pb, mas. %</b>	6.93 $\pm$ 0.04
<b>Cu, mas. %</b>	0.40 $\pm$ 0.00
<b>Ag, mg/kg</b>	151.87 $\pm$ 1.38
<b>Ba, mg/kg</b>	370.62 $\pm$ 64.49
<b>Co, mg/kg</b>	9.79 $\pm$ 0.65
<b>Cd, mg/kg</b>	418.25 $\pm$ 2.59
<b>Cr, mg/kg</b>	79.30 $\pm$ 1.29
<b>Mn, mg/kg</b>	1905.07 $\pm$ 20.19
<b>Ni, mg/kg</b>	6.13 $\pm$ 2.89
<b>Sr, mg/kg</b>	200.36 $\pm$ 0.57
<b>As, mg/kg</b>	2534.93 $\pm$ 0.64

### 3.6.2 Poliesterska smola za izradu kompozita

Za izradu kompozita korištena je poliesterska smola Poliya za matricu kompozita zbog svojih zadovoljavajućih svojstava nakon umreživanja, kao i zbog općenite učestalosti korištenja i dobre dobavljalivosti.

Poliesterska smola je vrsta duromernog polimera koji nastaje kombinacijom glikola s alkoholom te je jedna od najčešće korištenih smola prilikom izrade polimernih kompozita. Umrežavanje se najčešće postiže ubrzivačem ili katalizatorom na bazi metil-etil-keton-peroksida što je učinjeno i prilikom izrade kompozita u ovom diplomskom radu. Katalizator je upotrijebljen u količini 1 % masenog udjela prilikom pripreme poliesterske smole koja je služila kao matrica.

Kao prednosti poliesterske smole mogu se istaknuti:

- relativno lako rukovanje prilikom izrade kompozita
- niži troškovi nabave zbog učestalosti korištenja
- dimenzijska stabilnost
- dobra mehanička svojstva
- dobra kemijska otpornost [8]

### 3.6.3 Izrada kompozita

Za izradu kompozita iz kojega su izrezani uzorci za ispitivanje upotrijebljeni su:

1. Čestice jarosita u masnim udjelima od 5%, 10% i 20%
2. Poliya – poliesterska smola
3. Staklena vlakna
4. Sredstvo za otvrdnjavanje Ketanok B180, proizvođača COIM, na bazi metil-etil-keton-peroksida, dodanog u masenom udjelu 1% ukupne mase poliesterske smole.

Napravljene su 4 polimerne smjese koje su sadržavale:

1. Poliestersku smolu + sredstvo za otvrdnjavanje
2. Poliestersku smolu + sredstvo za otvrdnjavanje + 5% masenog udjela čestica jarosita
3. Poliestersku smolu + sredstvo za otvrdnjavanje + 10% masenog udjela čestica jarosita
4. Poliestersku smolu + sredstvo za otvrdnjavanje + 20% masenog udjela čestica jarosita

Sve 4 kompozitne tvorevine ojačane su tkanjima staklenih vlakana poslaganih u 5 slojeva između kojih su naneseni slojevi ranije navedenih polimernih smjesa. Sastav navedenih kompozitnih izradaka prikazan je u tablici 2.

**Tablica 2. Sastav kompozita na bazi poliesterske smole**

Oznaka ispitnog uzorka	Oznaka uzorka	Količina komponenti za pripremu kompozita		
		$m$ (PES <sup>1</sup> ) [g]	$m$ (jarosit <sup>2</sup> ) [g]	$m$ (ubrivač) %
Uzorak 1	PES+GF <sup>3</sup>	200	0	2
Uzorak 2	PES+5% jarosita+GF <sup>3</sup>	353,4	18,6	3,5
Uzorak 3	PES+10% jarosita+GF <sup>3</sup>	200	22,2	2
Uzorak 4	PES+20% jarosita+GF <sup>3</sup>	200	50	2

Oznake: PES<sup>1</sup> – poliesterska smola; jarosit<sup>2</sup> – čestice jarosita; GF<sup>3</sup> – staklena vlakna (eng: *Glass Fiber*).

Komponente kompozita navedene u tablici 1 odvagane su na preciznoj analitičkoj vagi. Postupak pravljenja polimerne smjese obavljen je tako da je u određenu količinu poliesterske smole dodana određena količina čestica jarosita, osim u slučaju uzorka 1 koji nije sadržavao čestice jarosita.

Potrebno je bilo postići homogenu disperziju čestica jarosita u poliesterskoj smoli te je smjesa podvrgnuta dispergiranju pomoću ultrazvučne sonde u Laboratoriju za vodu, gorivo i maziva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Korištena je sonda uređaja Hielscher UP400S, snage 400W konstantne amplitude i frekvencije 24 kHz. Postupak homogenizacije proveden je u 6 ciklusa od 1 minute s time da je između svakog ciklusa posudica sa smjesom hlađena u vodi u trajanju od 1 minute jer je uslijed ciklusa homogenizacije dolazilo do pojačanog zagrijavanja smjese. Sonda uređaja prikazana je na slici 16.



**Slika 16. Uredaj s ultrazvučnom sondom sa disperziju čestica jarosita u poliesterskoj smoli**

Ultrazvučni pretvarač pretvara električnu ili mehaničku energiju u energiju zvuka. Piezoelektrični pretvarač je najčešći oblik uređaja koji se koristi za stvaranje ultrazvuka. Materijali poput barij – titanata ili olovo – metaniobat šire se i stežu u promjenjivom električnom polju i na taj način stvaraju ultrazvučne valove. Piezoelektrični elementi koji se uobičajeno koriste u ultrazvučnim pretvaračima su potencijalno krhki te se zato ugrađuju između metalnih blokova, koji su prednji i stražnji dio sonde. Pretvarači s kapljevinom i magnetrostriktivni pretvarači se također koriste u stvaranju ultrazvuka, ali oni imaju vrlo robusnu konstrukciju i ograničen raspon frekvencija.

Kod obrade ultrazvukom, važna je činjenica da se tretiranjem ultrazvukom razvija toplina zbog nastanka kavitacije (implozije mjehurića plina) koja uzrokuje brzu promjenu temperature do čak 5227 °C i tlaka do 50 MPa. Temperatura i tlak stvaraju se u vrlo kratkim vremenskim trajanjima na mjestu gdje se događa kavitacija. Drugi naziv, nešto precizniji je akustična kavitacija, a prema definiciji ona uzrokuje rast i snažan raspad malih mjehurića ili praznina u kapljevini kao rezultat fluktuacije tlaka. Općenito, kavitacija u kapljevina može uzrokovati brzo i potpuno ozračivanje, pokretanje različitih kemijskih reakcija stvarajući slobodne kemijske ione (radikale), može ubrzati kemijske reakcije poboljšavajući miješanje reaktanata, može potaknuti reakcije polimerizacije/depolimerizacije privremenim raspršivanjem agregata ili nepovratin prekidom kemijskih veza u polimernim lancima. Upravo zahvaljujući kavitaciji se omogućuje ravnomjerno i prihvatljivo dispergiranje, odnosno homogena raspršenost čestica u poliesterskoj smoli. [8]

Na slici 17 prikazana je smjesa poliesterske smole i čestica jarosita nakon završene homogenizacije i dispergiranja ultrazvučnom sondom.



**Slika 17. Suspenzija poliesterske smole i čestica jarosita nakon provedene homogenizacije i dispergiranja ultrazvučnom sondom**

Nakon provedene homogenizacije ultrazvučnom sondom, u homogeniziranu mješavinu poliesterske smole i čestica jarosita dodano je 1% masenog udjela sredstva za otvrdnjavanje Ketanox uz miješanje, i to 1% masenog udjela preračunato na masu poliesterske smole.

Otvoreni kalup u koji su polagana staklena vlakna pripremljen je tako da je naneseo sredstvo protiv lijepljenja smole na staklenu podlogu na koju se polažu vlakna. Napravljena su 4 kompozitna izratka, od kojih jedan kompozit sa poliesterskom smolom ojačanom staklenim vlaknima nije sadržavao čestice jarosita kao punilo, dok su preostala 3 kompozita napravljena sa različitim udjelima čestica jarosita te sa staklenim vlaknima kao ojačanjima i to sa 5 slojeva prethodno izrezanih tkanja staklenih vlakana, koja su prikazana na slici 18.



**Slika 18. Staklena vlakna izrezana na odgovarajuće dimenzije**

Prvi kompozit (uzorak 1) napravljen je sa polimernom smjesom koja ne sadrži čestice jarosita, te sa staklenim vlaknima izrezanim na odgovarajuće dimenzije.

Drugi kompozit (uzorak 2) napravljen je sa polimernom smjesom koja sadrži 5 % čestica jarosita, te sa staklenim vlaknima izrezanim na odgovarajuće dimenzije.

Treći kompozit (uzorak 3) napravljen je sa polimernom smjesom koja sadrži 10 % čestica jarosita, te sa staklenim vlaknima izrezanim na odgovarajuće dimenzije.

Četvrti kompozit (uzorak 4) napravljen je sa polimernom smjesom koja sadrži 20 % čestica jarosita, te sa staklenim vlaknima izrezanim na odgovarajuće dimenzije.

Izrada kompozita ručnim laminiranjem prikazana je na slici 19.



**Slika 19. Izrada kompozita od poliesterske smole sa dodatkom čestica jarosita kao punila i ojačanja staklenih vlakana tehnikom ručnog laminiranja**



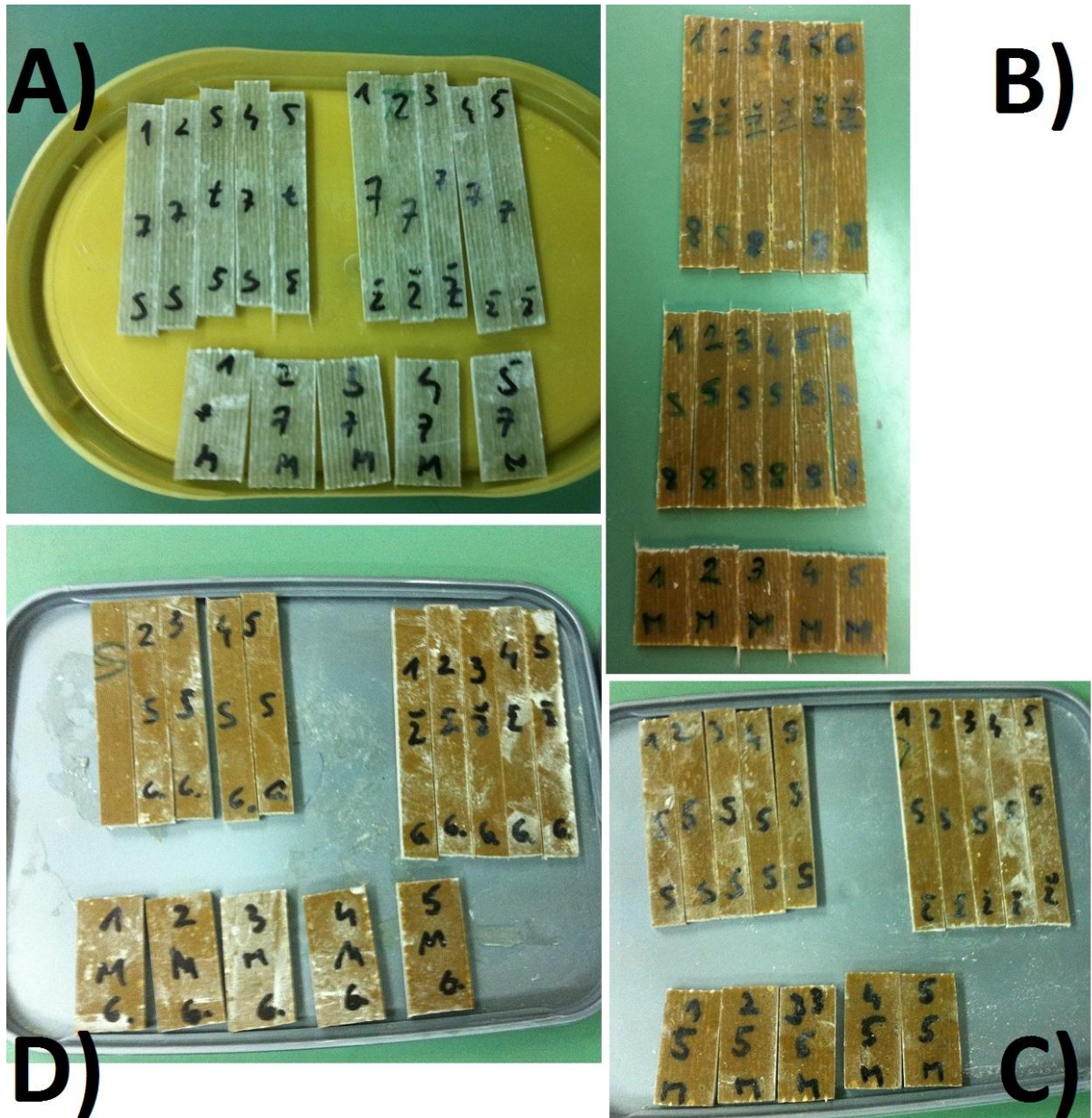
Nakon nanošenja polimerne smjese na staklena vlakna, na vrh kompozitne tvorevine stavljena je staklena ploča koja služi kao gornja polovica kalupa. Potom su kompoziti opterećeni s utezima kako bi se onemogućio ulazak zraka u slojeve staklenih vlakana i polimerne smjese, poboljšala prionjivost matrice i ojačala te smanjila mogućnost uvijanja i stvaranja nepravilnog oblika prilikom očvršćivanja kompozitne tvorevine. Kompozite je potrebno smjestiti u suhu i toplu prostoriju kako bi se polimerna smola umrežila, te kako bi sredstvo za otvrdnjavanje isparilo.

Na slici 20 prikazani su kompoziti opterećeni utezima.



**Slika 20. Kompoziti opterećeni utezima**

Nakon 72 sata umrežavanja kompozitnih tvorevina, dijamantnom pilom izrezani su uzorci za mehanička ispitivanja savojne čvrstoće, savojnog modula elastičnosti, tvrdoće i udarne žilavosti. Izrezani uzorci prikazani su na slici 21.



Slika 21. Uzorci kompozita za ispitivanje mehaničkih svojstava:

- A) Poliesterska smola ojačana staklenim vlaknima;  
 B) Poliesterska smola ojačana staklenim vlaknima s dodatkom 5 % čestica jarosita kao punila;  
 C) Poliesterska smola ojačana staklenim vlaknima s dodatkom 10 % čestica jarosita kao punila;  
 D) Poliesterska smola ojačana staklenim vlaknima s dodatkom 20 % čestica jarosita kao punila.

## 4 REZULTATI ISPITIVANJA

### 4.1 Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti

#### 4.1.1 Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima (bez dodataka čestica jarosita kao punila)

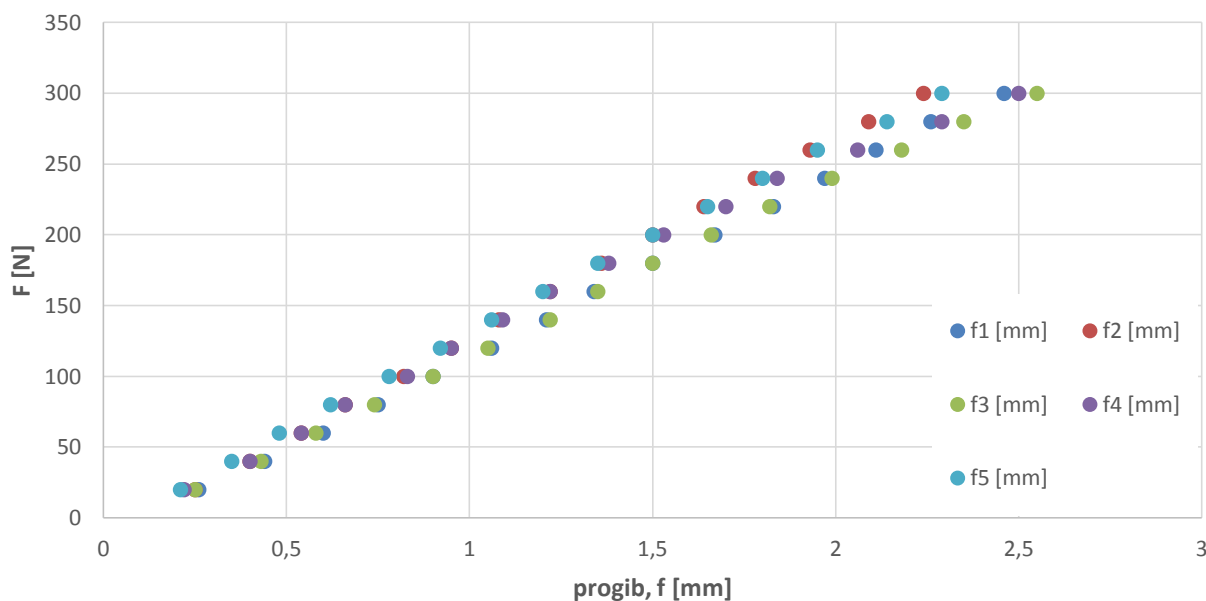
U tablici 3 prikazani su progibi u ovisnosti o opterećenju za uzorke kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, bez dodataka čestica jarosita kao punila.

Očitavani su progibi svakih 20 N do vrijednosti opterećenja u iznosu od 320 N. Zbog ograničenja uređaja nije moguće zabilježiti cijelu krivulju nego se rade podjele od 20 N.

**Tablica 3. Progibi u ovisnosti o opterećenju za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima (bez čestica jarosita) – UZORAK 1**

	$F$ [N]	$f1$ [mm]	$f2$ [mm]	$f3$ [mm]	$f4$ [mm]	$f5$ [mm]
1	20	0,26	0,25	0,25	0,22	0,21
2	40	0,44	0,40	0,43	0,40	0,35
3	60	0,60	0,54	0,58	0,54	0,48
4	80	0,75	0,66	0,74	0,66	0,62
5	100	0,90	0,82	0,90	0,83	0,78
6	120	1,06	0,95	1,05	0,95	0,92
7	140	1,21	1,08	1,22	1,09	1,06
8	160	1,34	1,22	1,35	1,22	1,20
9	180	1,50	1,36	1,50	1,38	1,35
10	200	1,67	1,50	1,66	1,53	1,50
11	220	1,83	1,64	1,82	1,70	1,65
12	240	1,97	1,78	1,99	1,84	1,80
13	260	2,11	1,93	2,18	2,06	1,95
14	280	2,26	2,09	2,35	2,29	2,14
15	300	2,46	2,24	2,55	2,50	2,29
16	320	2,74	2,48	3,05	2,98	2,46

Prema vrijednostima progiba očitanih tijekom ispitivanja savojne čvrstoće, izrađuje se dijagram koji prikazuje ovisnost progiba o opterećenju, tj. sili, te je prikazan na slici 22.



**Slika 22. Dijagram ovisnosti progiba o sili za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima (bez čestica jarosita) – UZORAK 1**

Iz dijagrama na prethodnoj slici može se provlačenjem pravca kroz približno linearno područje odrediti savojna čvrstoća. Kako se prilikom ispitivanja ekstenziometar skida s epruvete da se ne slomi, savojna čvrstoća se izračunava uz maksimalnu silu. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti prikazani su u tablici 4.

**Tablica 4. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće ( $R_{ms}$ , MPa) i savojnog modula elastičnosti ( $E_s$ , MPa) za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima**

$l = \bar{h} \times 16$ $l = 57,8 \text{ mm}$	Poliesterska smola + staklena vlakna (bez čestica jarosita) – UZORAK 1						
	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	STD.DEV
$b$ , [mm]	10,52	10,42	10,64	10,48	10,24	<b>10,46</b>	<b>0,15</b>
$h$ , [mm]	3,58	3,68	3,62	3,62	3,58	<b>3,62</b>	<b>0,04</b>
$F_{max}$ , [N]	438	458	482	412	408	<b>440</b>	<b>31,22</b>
$R_{ms}$ , [MPa]	281,9	281,6	300	260,3	269,8	<b>278,75</b>	<b>14,9</b>
$\Delta F/\Delta f$ , [N/mm]	130	142,3	124,6	127,3	135,1	<b>131,9</b>	<b>6,98</b>
$E_s$ , [MPa]	13042	13266	11955	12401	13917	<b>12916</b>	<b>763,3</b>

#### 4.1.2 Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 5% čestica jarosita kao punila

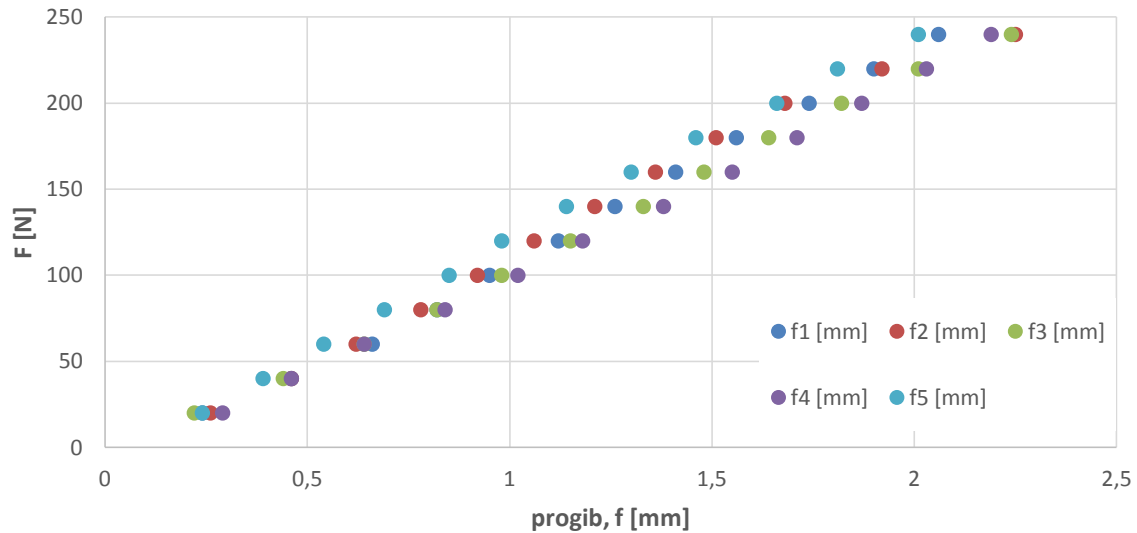
U tablici 5 prikazani su progibi u ovisnosti o opterećenju za uzorke kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 5 % čestica jarosita.

Očitavani su progibi svakih 20 N do vrijednosti opterećenja od 240 N. Zbog ograničenja uređaja nije moguće zabilježiti cijelu krivulju nego se rade podjele od 20 N.

**Tablica 5. Progibi u ovisnosti o opterećenju za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 5 % čestica jarosita – UZORAK 2**

	$F$ [N]	$f1$ [mm]	$f2$ [mm]	$f3$ [mm]	$f4$ [mm]	$f5$ [mm]
1	20	0,24	0,26	0,22	0,29	0,24
2	40	0,46	0,46	0,44	0,46	0,39
3	60	0,66	0,62	0,64	0,64	0,54
4	80	0,82	0,78	0,82	0,84	0,69
5	100	0,95	0,92	0,98	1,02	0,85
6	120	1,12	1,06	1,15	1,18	0,98
7	140	1,26	1,21	1,33	1,38	1,14
8	160	1,41	1,36	1,48	1,55	1,30
9	180	1,56	1,51	1,64	1,71	1,46
10	200	1,74	1,68	1,82	1,87	1,66
11	220	1,90	1,92	2,01	2,03	1,81
12	240	2,06	2,25	2,24	2,19	2,01

Prema vrijednostima progiba očitanih tijekom ispitivanja savojne čvrstoće, izrađuje se dijagram koji prikazuje ovisnost progiba o opterećenju, tj. sili, te je prikazan na slici 23.



**Slika 23. Dijagram ovisnosti progiba o sili za uzorak kompozita ojačanog staklenim vlaknima uz dodatak 5 % čestica jarosita – UZORAK 2**

Iz dijagrama na prethodnoj slici može se provlačenjem pravca kroz približno linearno područje odrediti savojna čvrstoća. Kako se prilikom ispitivanja ekstenziometar skida s epruvete da se ne slomi, savojna čvrstoća se izračunava uz maksimalnu silu. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti prikazani su u tablici 4.

**Tablica 6. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće ( $R_{ms}$ , MPa) i savojnog modula elastičnosti ( $E_s$ , MPa) za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 5 % čestica jarosita**

$l = \bar{h} \times 16$ $l = 45,0 \text{ mm}$	Poliesterska smola + staklena vlakna + 5 % čestica jarosita – UZORAK 2						
	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	STD.DEV
$b$ , [mm]	10,48	11,04	10,62	10,62	10,38	<b>10,63</b>	<b>0,25</b>
$h$ , [mm]	2,8	2,79	2,79	2,79	2,79	<b>2,79</b>	<b>0,004</b>
$F_{max}$ , [N]	354	353	336	350	334	<b>345,4</b>	<b>9,63</b>
$R_{ms}$ [MPa]	290,8	277,2	274,3	285,7	279	<b>281,4</b>	<b>6,715</b>
$\Delta F/\Delta f$ , [N/mm]	124,7	118,8	113,3	114,7	125,6	<b>119,46</b>	<b>5,6</b>
$E_s$ , [MPa]	12352	11289	11194	11338	12695	<b>11774</b>	<b>679</b>

#### 4.1.3 Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 10% čestica jarosita kao punila

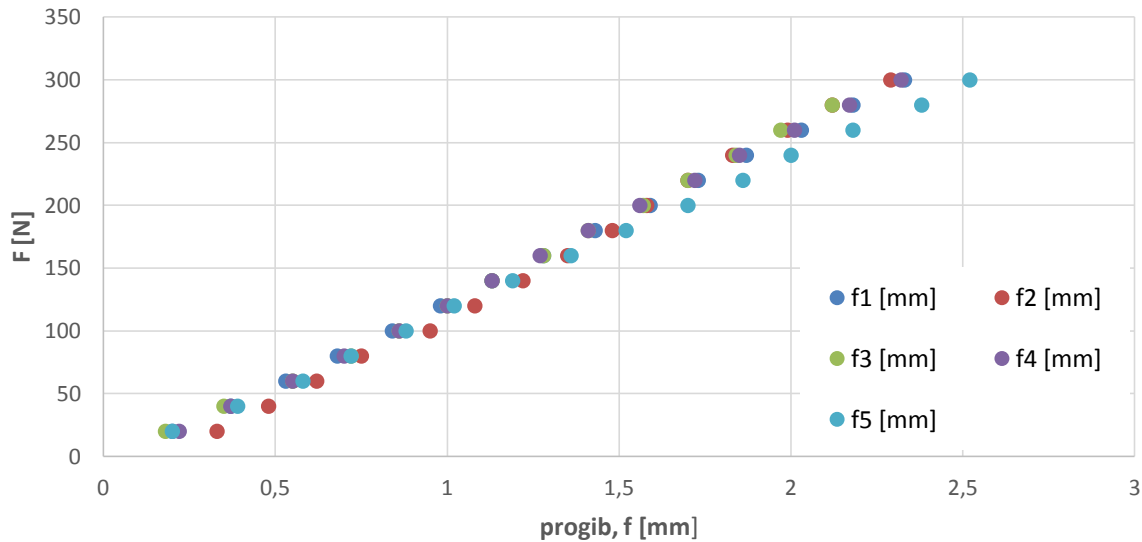
U tablici 7. prikazani su progibi u ovisnosti o opterećenju za uzorke kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 10 % čestica jarosita.

Očitavani su progibi svakih 20 N do vrijednosti opterećenja od 300 N. Zbog ograničenja uređaja nije moguće zabilježiti cijelu krivulju nego se rade podjele od 20 N.

**Tablica 7. Progibi u ovisnosti o opterećenju za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 10 % čestica jarosita – UZORAK 3**

	$F$ [N]	$f1$ [mm]	$f2$ [mm]	$f3$ [mm]	$f4$ [mm]	$f5$ [mm]
1	20	0,20	0,22	0,18	0,22	0,20
2	40	0,37	0,48	0,35	0,37	0,39
3	60	0,53	0,62	0,55	0,55	0,58
4	80	0,68	0,75	0,72	0,70	0,72
5	100	0,84	0,95	0,86	0,86	0,88
6	120	0,98	1,08	1,00	1,00	1,02
7	140	1,13	1,22	1,13	1,13	1,19
8	160	1,28	1,35	1,28	1,27	1,36
9	180	1,43	1,48	1,41	1,41	1,52
10	200	1,59	1,58	1,57	1,56	1,70
11	220	1,73	1,70	1,70	1,72	1,86
12	240	1,87	1,83	1,84	1,85	2,00
13	260	2,03	1,99	1,97	2,01	2,18
14	280	2,18	2,12	2,12	2,17	2,38
15	300	2,33	2,29	2,31	2,32	2,52

Prema vrijednostima progiba očitanih tijekom ispitivanja savojne čvrstoće, izrađuje se dijagram koji prikazuje ovisnost progiba o opterećenju, tj. sili, te je prikazan na slici 24.



**Slika 24. Dijagram ovisnosti progiba o sili za uzorak kompozita ojačanog staklenim vlaknima uz dodatak 10 % čestica jarosita – UZORAK 3**

Iz dijagrama na prethodnoj slici može se provlačenjem pravca kroz približno linearno područje odrediti savojna čvrstoća. Kako se prilikom ispitivanja ekstenziometar skida s epruvete da se ne slomi, savojna čvrstoća se izračunava uz maksimalnu silu. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti prikazani su u tablici 4.

**Tablica 8. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće ( $R_{ms}$ , MPa) i savojnog modula elastičnosti ( $E_s$ , MPa) za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 10 % čestica jarosita**

$l = \bar{h} \times 16$ $l = 57,0 \text{ mm}$	Poliesterska smola + staklena vlakna + 10 % čestica jarosita – UZORAK 3						
	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	STD.DEV
$b$ , [mm]	10,36	10,26	10,26	10,26	10,32	<b>10,29</b>	<b>0,05</b>
$h$ , [mm]	3,56	3,62	3,52	3,48	3,56	<b>3,548</b>	<b>0,052</b>
$F_{max}$ , [N]	438	470	418	402	402	<b>426</b>	<b>28,71</b>
$R_{ms}$ , [MPa]	284	297,6	280	275,5	261,7	<b>279,79</b>	<b>13,06</b>
$\Delta F/\Delta f$ , [N/mm]	132,6	146,1	136,6	135,2	121,8	<b>134,51</b>	<b>8,71</b>
$E_s$ , [MPa]	12976	13732	13967	14306	11969	<b>13390</b>	<b>932</b>



#### 4.1.4 Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 20% čestica jarosita kao punila

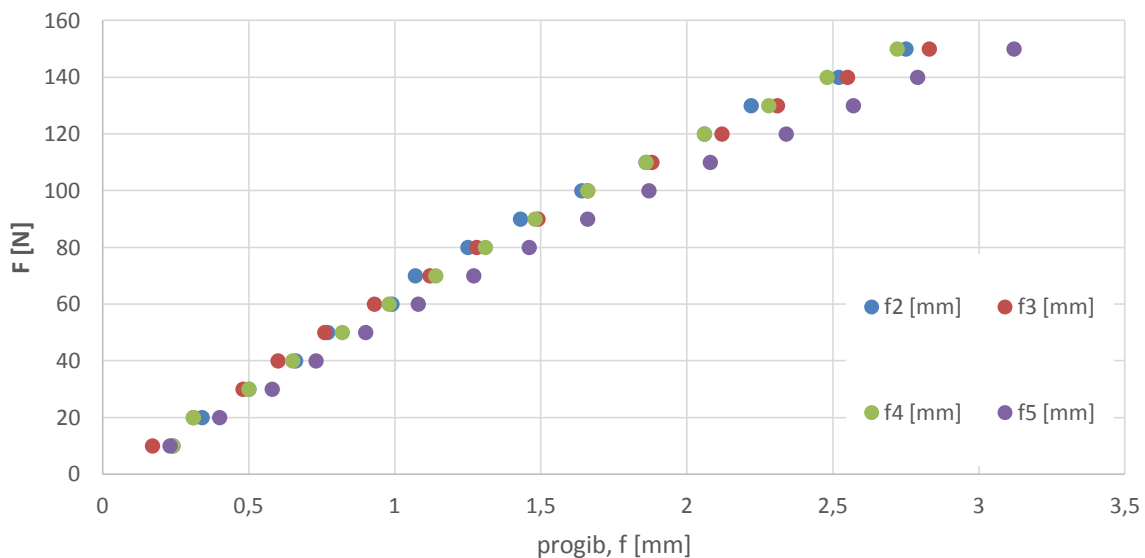
U tablici 9 prikazani su progibi u ovisnosti o opterećenju za uzorke kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 20 % čestica jarosita.

Očitavani su progibi svakih 10 N do vrijednosti opterećenja od 150 N. Rezultati prvog uzorka (od 5 uzoraka) nisu uzeti u obzir zbog pogrešnog odabira vrijednosti pri kojoj će se vršiti očitavanja progiba (prvotno je očitavano svakih 20 N), što je dovelo do brzog dostizanja sile početka tečenja materijala te rezultati nisu bili usporedivi sa ispitivanjima ostalih uzoraka. Zbog ograničenja uređaja nije moguće zabilježiti cijelu krivulju nego se rade podjele od 10 N.

**Tablica 9. Progibi u ovisnosti o opterećenju za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 20 % čestica jarosita – UZORAK 4**

	$F$ [N]	$f_2$ [mm]	$f_3$ [mm]	$f_4$ [mm]	$f_5$ [mm]
1	10	0,24	0,17	0,24	0,23
2	20	0,34	0,31	0,31	0,40
3	30	0,50	0,48	0,50	0,58
4	40	0,66	0,60	0,65	0,73
5	50	0,77	0,76	0,82	0,90
6	60	0,99	0,93	0,98	1,08
7	70	1,07	1,12	1,14	1,27
8	80	1,25	1,28	1,31	1,46
9	90	1,43	1,49	1,48	1,66
10	100	1,64	1,66	1,66	1,87
11	110	1,86	1,88	1,86	2,08
12	120	2,06	2,12	2,06	2,34
13	130	2,22	2,31	2,28	2,57
14	140	2,52	2,55	2,48	2,79
15	150	2,75	2,83	2,72	3,12

Prema vrijednostima progiba očitanih tijekom ispitivanja savojne čvrstoće, izrađuje se dijagram koji prikazuje ovisnost progiba o opterećenju, tj. sili, te je prikazan na slici 25.



**Slika 25. Dijagram ovisnosti progiba o sili za uzorak kompozita ojačanog staklenim vlaknima uz dodatak 20 % čestica jarosita – UZORAK 4**

Iz dijagrama na prethodnoj slici može se provlačenjem pravca kroz približno linearno područje odrediti savojna čvrstoća. Kako se prilikom ispitivanja ekstenziometar skida s epruvete da se ne slomi, savojna čvrstoća se izračunava uz maksimalnu silu. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti prikazani su u tablici 4.

**Tablica 10. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće ( $R_{ms}$ , MPa) i savojnog modula elastičnosti ( $E_s$ , MPa) za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 20 % čestica jarosita**

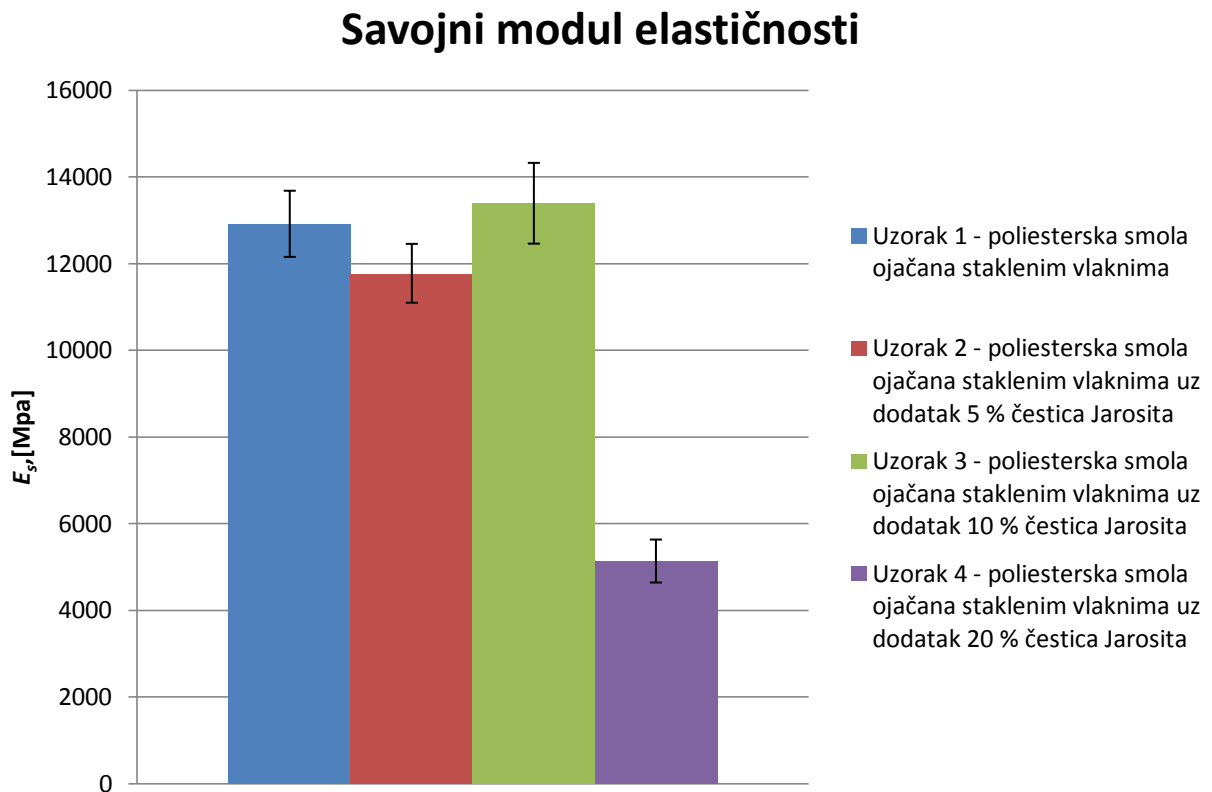
$l = \bar{h} \times 16$ $l = 58,4 \text{ mm}$	Poliesterska smola + staklena vlakna + 20 % čestica jarosita – UZORAK 4					
	1	2	3	4	$\bar{x}$	STD.DEV
$b$ , [mm]	10,24	10,36	10,54	10,40	<b>10,34</b>	<b>0,12</b>
$h$ , [mm]	3,74	3,66	3,56	3,70	<b>3,65</b>	<b>0,077</b>
$F_{max}$ , [N]	180	174	196	180	<b>177,20</b>	<b>9,43</b>
$R_{ms}$ , [MPa]	110,1	109,8	128,6	110,8	<b>112,6</b>	<b>9,16</b>
$\Delta F/\Delta f$ , [N/mm]	55,64	52,94	56	49,24	<b>51,80</b>	<b>3,12</b>
$E_s$ , [MPa]	5180	5198	5873	4662	<b>5133</b>	<b>496</b>

#### 4.1.5 Usporedba rezultata mjerenja savojnog modula elastičnosti kompozitnih uzoraka

Na temelju rezultata ispitivanja savojnog modula elastičnosti vidljivo je da prilikom različitih udjela čestica Jarosita u kompozitima dolazi do promjene vrijednosti.

U slučaju savojnog modula elastičnosti, kao referentna vrijednost smatrane su vrijednosti savojnog modula elastičnosti uzorka 1 koji ne sadrži dodatak čestica jarosita kao punila. Porastom udjela čestica jarosita kao punila očekivao se pad vrijednosti savojnog modula elastičnosti, ali u slučaju uzorka 3 koji sadrži 10 % masenog udjela punila u obliku čestica jarosita nije došlo do smanjenja vrijednosti savojnog modula elastičnosti što pokazuje povoljnu mogućnost korištenja dodatka punila, u ovom slučaju, čestica jarosita, bez narušavanja vrijednosti savojnog modula elastičnosti.

Pri vrijednosti od 20 % masenog udjela čestica jarosita kao punila u kompozitu došlo je do značajnog pada vrijednosti savojnog modula elastičnosti što je i očekivano jer je povećan udio čestica jarosita na račun smanjenja udjela poliesterske smole, te su uzorci postali krhkiji.



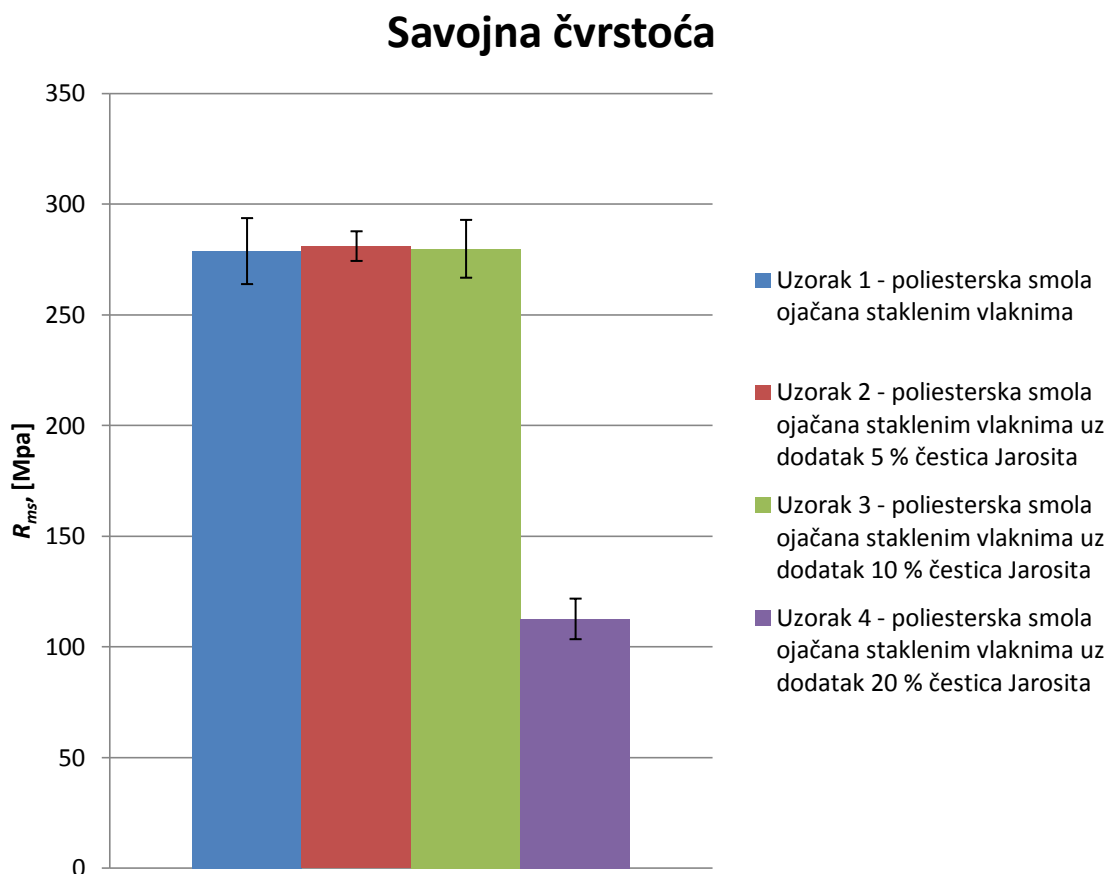
Slika 26. Usporedba vrijednosti savojnog modula elastičnosti uzoraka bez i sa česticama jarosita kao punila u poliesterskom kompozitu

#### 4.1.6 Usporedba rezultata mjerenja savojne čvrstoće kompozitnih uzoraka

Na temelju rezultata ispitivanja savojne čvrstoće vidljivo je da prilikom različitih udjela čestica jarosita u kompozitima dolazi do promjene vrijednosti.

U slučaju savojne čvrstoće, kao referentna vrijednost smatrane su vrijednosti savojnog modula elastičnosti uzorka 1 koji ne sadrži dodatak čestica jarosita kao punila. Porastom udjela čestica jarosita u kompozitu do vrijednosti 10 % nije došlo do promjene rezultata vrijednosti savojne čvrstoće, dok u slučaju udjela čestica jarosita u kompozitu u iznosu od 20 % je došlo do značajnog pada vrijednosti savojne čvrstoće kompozitnih uzoraka.

Prema tome, kao i u slučaju savojnog modula elastičnosti, čestice jarosita je moguće iskoristiti kao punilo u kompozitu u iznosu od 10 % masenog udjela, bez negativnog utjecaja na vrijednosti savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće.



**Slika 27. Usporedba vrijednosti savojne čvrstoće uzoraka bez i sa česticama jarosita kao punila u poliesterskom kompozitu**

## 4.2 Rezultati mjerenja prividne međuslojne čvrstoće

### 4.2.1 Rezultati mjerenja prividne međuslojne čvrstoće poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima (bez dodatka čestica jarosita kao punila)

U tablici 11 prikazani su rezultati mjerenja prividne međuslojne čvrstoće za uzorke kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima.

**Tablica 11. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne čvrstoće za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima (bez dodatka punila)**

$l = \bar{h} \times 5$ $l = 17,70 \text{ mm}$	Poliesterska smola + staklena vlakna (bez čestica jarosita) – UZORAK 1						
	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	Std. Dev.
$b$ , [mm]	17,92	17,74	17,98	18	17,88	17,904	0,1
$h$ , [mm]	3,54	3,54	3,56	3,6	3,48	3,54	0,04
$F_{max}$ [N]	2300	2380	2180	2320	2140	2264	100,40
$\tau$ , [MPa]	27,19	28,42	25,54	26,85	<b>25,79</b>	<b>26,76</b>	1,15

### 4.2.2 Rezultati mjerenja prividne međuslojne čvrstoće poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 5% čestica jarosita kao punila

U tablici 12 prikazani su rezultati mjerenja prividne međuslojne čvrstoće za uzorke kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 5 % čestica jarosita.

**Tablica 12. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne čvrstoće za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 5 % dodatka čestica jarosita**

$l = \bar{h} \times 5$ $l = 14 \text{ mm}$	Poliesterska smola + staklena vlakna uz 5 % dodatka čestica jarosita – UZORAK 2						
	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	Std. Dev.
$b$ , [mm]	16,40	15,70	15,98	15,42	15,62	15,82	0,37
$h$ , [mm]	2,78	2,81	2,80	2,78	2,79	2,79	0,01
$F_{max}$ [N]	1670	1550	1520	1480	1480	1540	78,42
$\tau$ , [MPa]	27,19	26,35	25,48	25,89	<b>25,47</b>	<b>26,13</b>	0,83

#### 4.2.3 Rezultati mjerenja prividne međuslojne čvrstoće poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 10% čestica jarosita kao punila

U tablici 13 prikazani su rezultati mjerenja prividne međuslojne čvrstoće za uzorke kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 10 % čestica jarosita.

**Tablica 13. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne čvrstoće za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz 10 % dodatka čestica jarosita**

$l = \bar{h} \times 5$ $l = 17,5 \text{ mm}$	Poliesterska smola + staklena vlakna uz 10 % dodatka čestica jarosita – UZORAK 3						
	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	Std. Dev.
$b$ , [mm]	17,52	16,9	16,9	17,30	17,52	17,2	0,31
$h$ , [mm]	3,48	3,52	3,48	3,52	3,48	3,50	0,02
$F_{max}$ [N]	2130	2290	2180	2220	2160	2196	61,88
$\tau$ , [MPa]	26,20	28,87	27,80	27,34	26,57	<b>27,36</b>	1,05

#### 4.2.4 Rezultati mjerenja prividne međuslojne čvrstoće poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 20% čestica jarosita kao punila

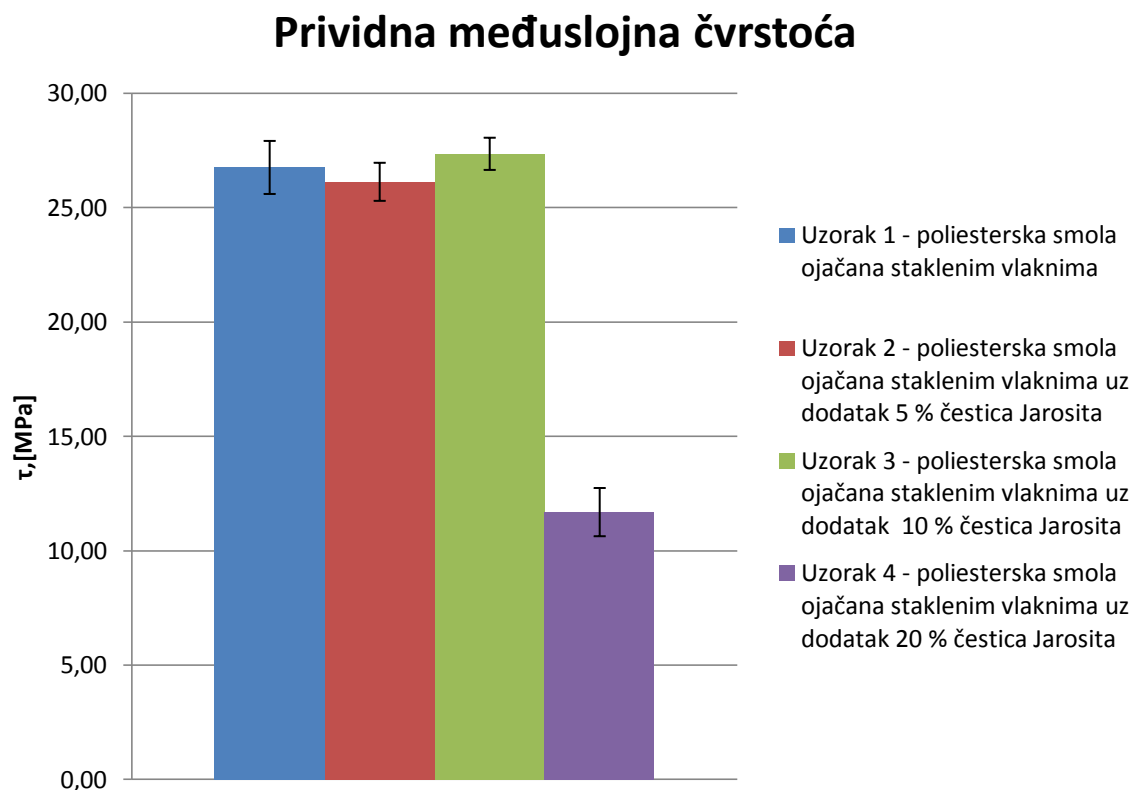
U tablici 14 prikazani su rezultati mjerenja prividne međuslojne čvrstoće za uzorke kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 20 % čestica jarosita.

**Tablica 14. ispitivanja prividne međuslojne čvrstoće za uzorak kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz 20 % dodatka čestica jarosita**

$l = \bar{h} \times 5$ $l = 18,5 \text{ mm}$	Poliesterska smola + staklena vlakna uz 20 % dodatka čestica jarosita – UZORAK 4						
	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	Std. Dev.
$b$ , [mm]	18,04	17,96	18,08	18,22	18,10	18,10	0,09
$h$ , [mm]	3,78	3,88	3,54	3,68	3,62	3,70	0,13
$F_{max}$ [N]	1040	1160	980	1100	940	1044	88,77
$\tau$ , [MPa]	11,44	12,48	11,48	12,30	10,76	<b>11,69</b>	0,70

#### 4.2.5 Usporedba rezultata mjerenja prividne međuslojne čvrstoće kompozitnih uzoraka

Na slici 28 prikazana je usporedba vrijednosti međuslojne čvrstoće kompozita napravljenih od poliesterske smole kao matrice i staklenih vlakana kao ojačavala, te bez i sa dodatkom punila čestica jarosita.



**Slika 28. Usporedba vrijednosti međuslojne čvrstoće uzoraka kompozita bez i sa česticama jarosita kao punila u poliesterskom kompozitu ojačanom staklenim vlaknima**

Kao i u mjerenjima savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće, dodatkom 10 % čestica jarosita kao punila u poliesterski kompozit ojačan staklenim vlaknima, nije došlo do negativnog utjecaja na vrijednosti međuslojne čvrstoće kompozita. To pokazuje povoljnu mogućnost korištenja dodatka punila, u ovom slučaju, čestica jarosita, bez narušavanja vrijednosti prividne međuslojne čvrstoće kompozitnih uzoraka.

### 4.3 Rezultati mjerenja tvrdoće

#### 4.3.1 Rezultati mjerenja tvrdoće poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima (bez dodatka čestica jarosita kao punila)

U tablici 15 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće uzoraka kompozita sa poliesterskom smolom kao matricom i staklenim vlaknima kao ojačanjima, bez dodatka čestica jarosita kao punila.

**Tablica 15. Rezultati tvrdoće kompozita od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, bez dodatka čestica jarosita kao punila**

UZORAK 1 - Bez dodatka čestica jarosita kao punila			
Br. mjerenja	10"	30"	60"
1	0,300	0,305	0,310
2	0,285	0,290	0,295
3	0,280	0,285	0,285
4	0,270	0,275	0,280
5	0,260	0,265	0,270
6	0,250	0,255	0,260
7	0,280	0,285	0,285
8	0,250	0,255	0,260
9	0,235	0,240	0,245
10	0,225	0,230	0,235
$\bar{x}$	0,264	0,269	0,273
<b>H [MPa]</b>	<b>86,9</b>	<b>85,3</b>	<b>84,1</b>
$F = 357,9 \text{ N}$			



#### 4.3.2 Rezultati mjerenja tvrdoće poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz 5 % dodatka čestica jarosita kao punila

U tablici 16 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće uzoraka kompozita sa poliesterskom smolom kao matricom i staklenim vlaknima kao ojačanjima, uz dodatak čestica jarosita kao punila.

**Tablica 16. Rezultati tvrdoće kompozita od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, uz dodatak 5 % čestica jarosita kao punila**

UZORAK 2 – Poliesterska smola + staklena vlakna uz dodatak 5 % čestica jarosita kao punila			
Br. mjerenja	10"	30"	60"
1	0,240	0,250	0,255
2	0,215	0,220	0,225
3	0,195	0,200	0,205
4	0,220	0,225	0,230
5	0,175	0,180	0,185
6	0,220	0,225	0,230
7	0,210	0,215	0,220
8	0,200	0,205	0,210
9	0,200	0,205	0,210
10	0,190	0,195	0,200
$\bar{x}$	0,207	0,212	0,217
<b>H [MPa]</b>	<b>110,9</b>	<b>108,0</b>	<b>105,6</b>
$F = 357,9 \text{ N}$			

### 4.3.3 Rezultati mjerenja tvrdoće poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz 10 % dodatka čestica jarosita kao punila

U tablici 17 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće uzoraka kompozita sa poliesterskom smolom kao matricom i staklenim vlaknima kao ojačanjima, uz dodatak čestica jarosita kao punila.

**Tablica 17. Rezultati tvrdoće kompozita od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, uz dodatak 10 % čestica jarosita kao punila**

UZORAK 3 - Poliesterska smola + staklena vlakna uz dodatak 10 % čestica jarosita kao punila			
Br. mjerenja	10"	30"	60"
1	0,220	0,225	0,230
2	0,195	0,200	0,205
3	0,170	0,175	0,175
4	0,165	0,170	0,175
5	0,170	0,175	0,180
6	0,155	0,155	0,160
7	0,160	0,170	0,175
8	0,160	0,165	0,170
9	0,150	0,155	0,160
10	0,155	0,160	0,165
$\bar{x}$	0,170	0,175	0,180
$H$ [MPa]	134,7	130,9	127,6
$F = 357,9$ N			

#### 4.3.4 Rezultati mjerenja tvrdoće poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz 20 % dodatka čestica jarosita kao punila

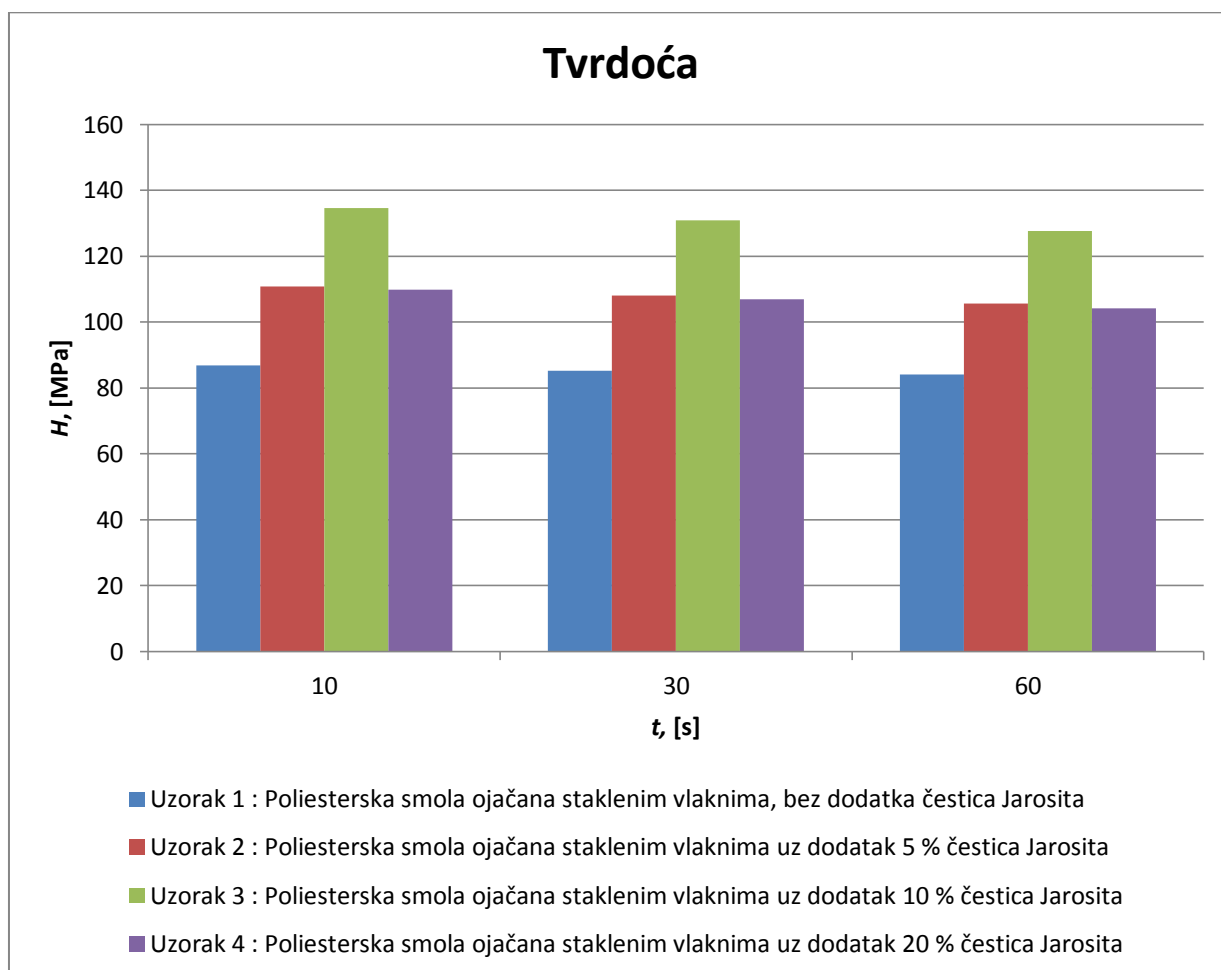
U tablici 18 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće uzoraka kompozita sa poliesterskom smolom kao matricom i staklenim vlaknima kao ojačanjima, uz dodatak čestica jarosita kao punila.

**Tablica 18. Rezultati tvrdoće kompozita od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, uz dodatak 20 % čestica jarosita kao punila**

UZORAK 4 - Poliesterska smola + staklena vlakna uz dodatak 20 % čestica jarosita kao punila			
Br. mjerenja	10"	30"	60"
1	0,225	0,230	0,240
2	0,210	0,215	0,225
3	0,195	0,200	0,205
4	0,250	0,255	0,260
5	0,240	0,245	0,250
6	0,200	0,205	0,210
7	0,185	0,190	0,195
8	0,180	0,185	0,190
9	0,205	0,215	0,220
10	0,195	0,200	0,205
$\bar{x}$	0,209	0,214	0,220
<b>H [MPa]</b>	<b>109,9</b>	<b>107,0</b>	<b>104,1</b>
$F = 357,9 \text{ N}$			

#### 4.3.5 Usporedba rezultata tvrdoće kompozitnih uzoraka

Na slici 29 prikazani su usporedbeni dijagrami tvrdoće kompozitnih uzoraka nakon 10, 30 i 60 sekundi ispitivanja. Vidljiv je očekivani rast tvrdoće porastom udjela čestica jarosita kao punila u kompozitu do vrijednosti 10 % čestica jarosita, dok u slučaju 20 % čestica jarosita vrijednost tvrdoće pada na približnu vrijednost tvrdoće u slučaju 5 % dodanih čestica jarosita. U sva 3 slučaja gdje su čestice jarosita korištene kao punilo u kompozitu došlo je do povećanja vrijednosti tvrdoće.



Slika 29. Usporedba vrijednosti tvrdoće kompozitnih uzoraka bez čestica i sa česticama jarosita kao punila u poliesterskom kompozitu ojačanom staklenim vlaknima

#### 4.4 Rezultati mjerenja udarne žilavosti

Udarne žilavost ispitivala se na Charpyevom batu, u Laboratoriju za polimere i kompozite. Na uzorcima za ispitivanje udarne žilavosti napravljeni su zarezi na sredini uzorka, koji su vidljivi na sljedećoj slici koja prikazuje epruvete nakon ispitivanja. Svrha zareza na ispitnom uzorku je postizanje koncentracije naprezanja.



Slika 30. Uzorci nakon ispitivanja udarne žilavosti

##### 4.4.1 Rezultati mjerenja udarne žilavosti poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima (bez dodatka čestica jarosita kao punila)

U tablici 19 prikazani su rezultati mjerenja udarne žilavosti, odnosno udarnog loma, za uzorak 1 koji se sastoji od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, bez dodatka čestica jarosita kao punila. Uzorak 1 ne sadrži dodatak čestica jarosita u svrhu punila te služi kao referentni uzorak za usporedbu vrijednosti udarne žilavosti sa vrijednostima udarne žilavosti u slučaju uzoraka koji sadrže dodane čestice jarosita kao punila.

**Tablica 19. Rezultati mjerenja udarne žilavosti za uzorak poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, bez dodatka čestica jarosita kao punila**

UZORAK 1 – Poliesterska smola + Staklena vlakna , bez dodatka čestica jarosita kao punila							
	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	Std.dev.
<i>b</i> , [mm]	8,09	7,85	8,10	8,01	7,78	7,97	0,144
<i>h</i> , [mm]	3,62	3,64	3,62	3,66	3,64	3,64	0,016
<i>Ec</i> [J]	37,5	38,5	37,5	37,5	37	37,6	0,54
<i>Acu</i> , [kJ/m <sup>2</sup> ]	1280,5	1347,4	1278,9	1279,1	1306,5	1298,5	29,73

#### 4.4.2 Rezultati mjerenja udarne žilavosti poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 5 % čestica jarosita kao punila

U tablici 20 prikazani su rezultati mjerenja udarne žilavosti, odnosno udarnog loma, za uzorak 2 koji se sastoji od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz 5 % čestica jarosita kao punila.

**Tablica 20. Rezultati mjerenja udarne žilavosti za uzorak poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 5 % čestica jarosita kao punila**

UZORAK 2 - Poliesterska smola + staklena vlakna uz dodatak 5 % čestica jarosita kao punila							
	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	Std.dev.
<i>b</i> , [mm]	7,91	7,52	7,48	7,93	7,78	7,72	0,212
<i>h</i> , [mm]	2,81	2,78	2,8	2,79	2,8	2,80	0,011
<i>Ec</i> [J]	22,5	25,5	30	30	32,5	28,1	4,02
<i>Acu</i> , [kJ/m <sup>2</sup> ]	1012,3	1219,8	1432,4	1356	1491,9	1302,4	191,49

#### 4.4.3 Rezultati mjerenja udarne žilavosti poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz 10 % dodatak čestica jarosita kao punila

U tablici 21 prikazani su rezultati mjerenja udarne žilavosti, odnosno udarnog loma, za uzorak 3 koji se sastoji od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, uz 10 % dodatka čestica jarosita kao punila.

**Tablica 21. Rezultati mjerenja udarne žilavosti za uzorak poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, uz dodatak 10 % čestica jarosita kao punila**

UZORAK 3 - Poliesterska smola + staklena vlakna uz dodatak 10 % čestica jarosita kao punila						
	1	2	3	4	$\bar{x}$	Std.dev.
<i>b</i> , [mm]	7,86	7,76	7,87	8,21	7,925	0,196
<i>h</i> , [mm]	3,5	3,5	3,58	3,6	3,545	0,052
<i>E<sub>c</sub></i> [J]	39,5	36,5	37	39,8	38,2	1,69
<i>A<sub>cu</sub></i> , [kJ/m <sup>2</sup> ]	1435,8	1343,9	1313,2	1346,6	1359,9	52,84

#### 4.4.4 Rezultati mjerenja udarne žilavosti poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 20 % čestica jarosita kao punila

U tablici 22 prikazani su rezultati mjerenja udarne žilavosti, odnosno udarnog loma, za uzorak 4 koji se sastoji od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, uz dodatak 20 % čestica jarosita kao punila.

**Tablica 22. Rezultati mjerenja udarne žilavosti za uzorak poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, uz dodatak 20 % čestica jarosita kao punila**

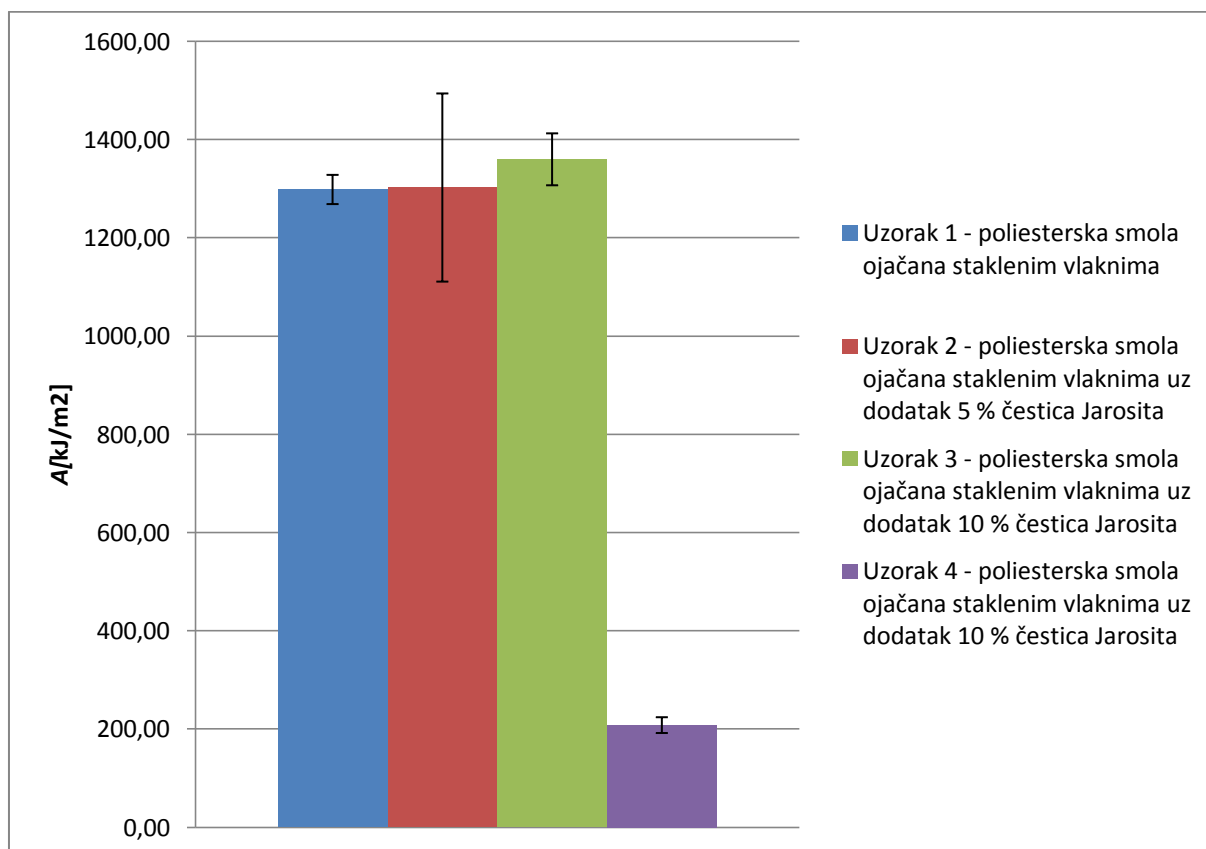
UZORAK 4 - Poliesterska smola + staklena vlakna uz dodatak 20 % čestica jarosita kao punila							
	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	Std.dev.
<i>b</i> , [mm]	8,20	7,30	7,92	8,14	7,72	7,86	0,36
<i>h</i> , [mm]	3,72	3,74	3,68	3,52	3,7	3,67	0,08
<i>E<sub>c</sub></i> [J]	6	5,5	6,5	5,5	6,5	6	0,5
<i>A<sub>cu</sub></i> , [kJ/m <sup>2</sup> ]	196,7	201,5	223	192	227,6	208,13	16,09

#### 4.4.5 Usporedba rezultata udarne žilavosti kompozitnih uzoraka

Na slici 31 vizualno su pomoću grafa uspoređene srednje vrijednosti rezultata udarne žilavosti za kompozite od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, bez i uz dodatak čestica jarosita kao punila.

Iz grafa je vidljivo da je do drastičnog pada žilavosti došlo pri dodatku 20 % čestica jarosita u kompozitu, dok pri vrijednostima do 10 % udjela čestica jarosita kao punila u kompozitu nema negativnog utjecaja na vrijednosti žilavosti kompozita. Razlog drastičnom padu žilavosti pri udjelu 20 % čestica jarosita je taj što je udio čestica povećan na račun poliesterske smole, što znači da usred manjeg udjela smole nije došlo do jednako dobre povezanosti smole i vlakana kao u slučaju kada je manji udio čestica jarosita, a veći udio poliesterske smole.

Općenito, čestice punila smanjuju slobodu promjene konformacija i gibanja polimernih molekula, povisujući njihovu krutost ali pri tom smanjujući žilavost kompozita.



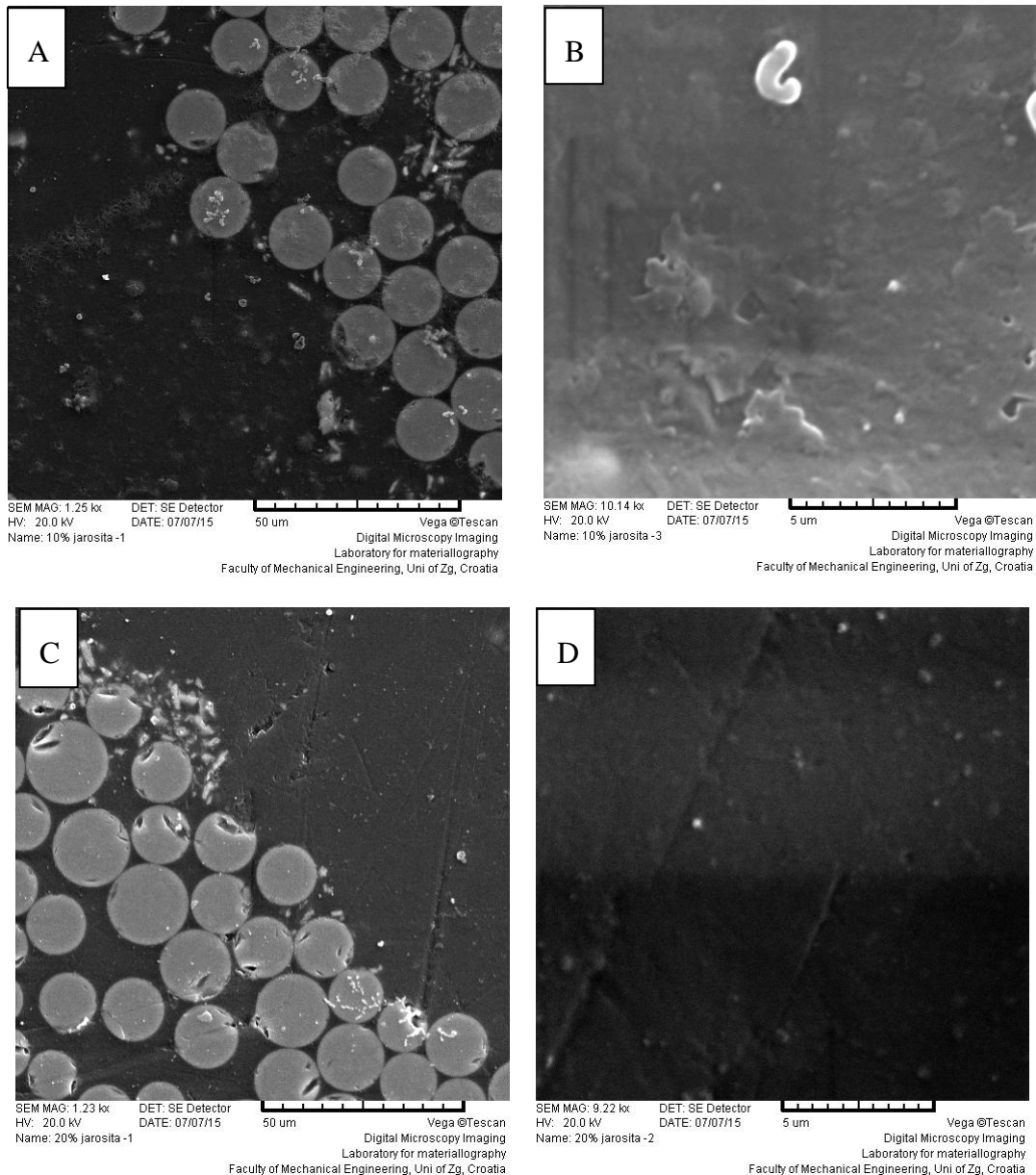
**Slika 31. Usporedba vrijednosti udarne radnje loma za uzorka kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, bez i uz dodatak čestica jarosita kao punila**



#### 4.5 Analiza morfologije poprečnog presjeka kompozitnih tvorevina SEM analizom

Morfologija poprečnog presjeka analizirana je pretražnim elektronskim mikroskopom. Prije SEM analize uzorci su napareni s tankim slojem legure zlata i paladija pomoću naparivača SC7620 Sputter Coater Quorum.

Na slici 32. prikazane su SEM snimke uzoraka kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 10 % i 20 % čestica jarosita.



**Slika 32. Sem snimka uzoraka kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodatak 10 % čestica jarosita (A i B na slici) i dodatak 20 % čestica jarosita (C i D na slici)**

Poprečni presjek staklenih vlakana u oba uzorka kompozita je cca. 15  $\mu\text{m}$  (slika 32.A i C.). Na slici 32.B i D izdvojeno je područje poliesterske smole s česticama jarosita, čestice jarosita nisu jasno vidljive jer su presitne, s time da se na pojedinim mjestima može uočiti nakupine čestica jarosita, što znači da čestice nisu dovoljno dobro dispergirane. Bolja dispergiranoost čestica jarosita može se poboljšati kemijskom obradom.

## 5 ZAKLJUČAK

Iz dobivenih rezultata mehaničkih svojstava kompozita od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, bez i sa dodatkom čestica jarosita kao punila može se zaključiti sljedeće:

- Jarosit kao punilo za kompozite na bazi poliesterske smole, moguće je u obliku čestica dispergirati u poliesterskoj smoli, tretiranjem s ultrazvučnom sondom.
- Čestice jarosita mogu se koristiti kao punilo za poliestersku smolu uz dodatak staklenih vlakana kao ojačalo.
- Vrijednosti savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće pri dodatku do 10 % čestica jarosita kao punila se ne smanjuju, dok uz dodatak 20 % čestica jarosita kao punila se smanjuju u odnosu na kompozit poliesterske smole ojačan staklenim vlaknima bez dodanih čestica jarosita.
- Vrijednosti prividne međuslojne čvrstoće pri dodatku 10 % čestica jarosita kao punila se također ne smanjuju, dok se pri dodatku 20 % čestica jarosita kao punila smanjuju u odnosu na kompozit poliesterske smole ojačan staklenim vlaknima bez dodanih čestica jarosita.
- Vrijednosti tvrdoće polimernih kompozita poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima i dodanim česticama jarosita kao punila, povećavaju se u odnosu na kompozit poliesterske smole ojačan staklenim vlaknima bez dodanih čestica jarosita. Najviše vrijednost tvrdoće postigute su za kompozit poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima u koji je dodano 10 % čestica jarosita.
- Vrijednosti udarne žilavosti pri dodatku 10 % čestica jarosita kao punila se ne smanjuju, dok se pri dodatku čestica jarosita od 20 % drastično smanjuju u odnosu na kompozit poliesterske smole ojačan staklenim vlaknima bez dodanih čestica jarosita.
- Dobiveni rezultati pokazuju da su najbolja mehanička svojstva postignuta za kompozit poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima uz dodataka od 10 % čestica jarosita kao punila.
- SEM snimke pokazuju da su čestice jarosita homogeno raspoređene ali disperziranost se može još dodatno poboljšati kemijskom obradom čestica.

**LITERATURA:**

- [1] Mihone Kerolli-Mustafa, *Characterization and environmental impact assessment of jarosite process tailing waste*, Doctoral thesis, Zagreb, 2014.
- [2] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala :čelici i željezni ljevovi, laki i obojeni metali, konstrukcijska keramika, polimerni materijali, kompozitni materijali i drvo.*; 2. izdanje. Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2002.
- [3] M. Šercer: Predavanja – Prerada kompozitnih tvorevina, FSB, Zagreb, 2008./2009.
- [4] W. Kunej: Poliesterski kompoziti, 2. Prošireno izdanje, Zagreb, 2006.
- [5] I. Grubišić: Konstrukcija malih brodova, [www.fsb.hr/kmb](http://www.fsb.hr/kmb), 25.5.2015.
- [6] Čatić, I. : *Proizvodnja polimernih tvorevina.* ; 6. izdanje. Zagreb, Društvo za plastiku i gumu, 2006
- [7] M. Franz, F. Kovačiček, M. Novosel i J. Indof, Inženjerski priručnik ip4, 1. svezak,, Zagreb: Školska knjiga, 1998
- [8] D. Putak-Ivić: *Ljuske jajeta kao bio-punilo za kompozite na bazi poliestersje smole*, rad za rektorovu nagradu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2015