

Utjecaj morske vode na svojstva izabranih kompozita

Zovko, Toni

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:753361>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Toni Zovko

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Neven Hadžić, izv. prof.

Student:

Toni Zovko

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Nevenu Hadžiću, mag. ing. na savjetima i pomoći oko izrade ovog završnog rada.

Zahvaljujem laborantu Božidaru Bušetinčanu na susretljivosti, pomoći i prenesenom znanju prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se tvrtkama Barracuda brodovi, Tehnotrik Zagreb i Waterjet service na pruženoj potpori nabavom materijala i olakšanju provođenja eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se kolegi Tinu Blažeki na nesebičnoj pomoći i savjetima oko provođenja eksperimentalnog dijela rada.

Na posljetku, zahvaljujem svojoj obitelji, prijateljima, kolegama i svojoj djevojci Regini na potpori tijekom studija!

Toni Zovko



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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Toni Zovko** JMBAG: **0035204532**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj morske vode na svojstva izabranih biokompozita**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of seawater on the properties of selected biocomposites**

Opis zadatka:

Morska voda predstavlja prirodno okruženje svih pomorskih plovila te pučinskih objekata općenito. Takvo okruženje karakteriziraju brojni utjecajni faktori koji svojim sinergijskim djelovanjem uvelike utječu na svojstva materijala trupa brodova tijekom njihovog operativnog vijeka. Taj je utjecaj od osobitog značaja u slučaju biokompozitnih materijala. Međutim, postojeća znanstvena i stručna literatura spomenuti problem navodi tek rubno uz svega nekoliko dostupnih specifičnih istraživanja. Stoga je osnovni zadatak ovog završnog rada ispitati utjecaj morske vode na fizikalna, kemijska i mehanička svojstva izabranih biokompozitnih materijala, odnosno u radu je potrebno:

1. Prikazati osnovne značajke i područja primjene biokompozita
2. Pripremiti plan ispitivanja fizikalnih, kemijskih i mehaničkih svojstava izabranih biokompozita
3. Provesti ispitivanja fizikalnih, kemijskih i mehaničkih svojstava izabranih biokompozita
4. Dobivene rezultate usporediti s odgovarajućima u slučaju ispitivanja biokompozita u normalnim atmosferskim uvjetima.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. - 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. - 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Neven Hadžić

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. Kompozitni materijali.....	3
2.1. Općenito o kompozitima.....	3
2.2. Matrica kompozita	4
2.2.1. Kompoziti s polimernom matricom	4
2.2.2. Kompoziti s metalnom matricom.....	4
2.2.3. Kompoziti s keramičkom matricom.....	4
2.3. Ojačala	5
3. BIOKOMPOZITI	8
3.1. Podjela biokompozita.....	8
3.1.1. Biokompoziti ojačani celulozom	8
3.1.2. Biokompoziti ojačani lanom i konopljom.....	8
3.1.3. Biokompoziti ojačani jutom.....	8
3.1.4. Ostali biokompoziti.....	8
3.2. Matrice u biokompozitima	9
3.3. Prednosti i nedostaci prirodnih vlakana	9
3.4. Područja primjene biokompozita	10
4. PRIPREMA ZA EKSPERIMENTALNI DIO.....	11
4.1. Izrada ispitnih uzoraka	12
4.1.1. Nabava materijala i izrada kompozitnih ploča.....	12
4.1.1.1. Postupak laminiranja.....	14
4.1.1.2. Izrada ploča za ispitivanje otpornosti na obraštanje.....	14

4.1.1.3. Izrada kompozitnih ploča za izrezivanje epruveta za ispitivanje mehanička mehaničkih svojstva.....	16
4.2. Priprema ispitinih uzoraka	18
4.2.1. Definiranje dimenzija ispitnih epruveta.....	18
4.2.2. Izrezivanje ispitnih epruveta	20
4.3. Priprema za ispitivanje.....	22
5. ISPITIVANJA I REZULTATI ISPITIVANJA.....	23
5.1. Statistička obrada rezultata mjerenja	23
5.2. Rezultati ispitivanja mehanički svojstava	24
5.2.1. Oprema i mjerni instrumenti	24
5.2.2. Statičko vlačno ispitivanje	26
5.2.2.1. Usporedba rezultata	30
5.2.3. Ispitivanje savojne čvrstoće	31
5.2.3.1. Usporedba rezultata	34
5.2.4. Ispitivanje međuslojne čvrstoće	34
5.2.4.1. Usporedba rezultata	40
5.2.5. Ispitivanje žilavosti	40
5.2.5.1. Usporedba rezultata	43
5.3. Test higroskopnosti	43
5.4. Ispitivanje obraštanja kompozitnih ploča uronjenih u morsku vodu	46
6. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA.....	52
PRILOZI.....	54

POPIS SLIKA

Slika 1.1 Usporedba cijene izrade staklenih i prirodnih vlakana, [2]	1
Slika 1.2 Prikaz ukupne proizvodnje biokompozita u Europi s procjenom proizvodnje do 2028. godine, [3]	2
Slika 2.1. Prikaz spoja ojačala i matrice, [3].....	3
Slika 2.2 Usporedba svojstva čelika, aluminija i kompozita [7].....	5
Slika 2.3 Primjer jednosmjernog ojačanja dugim vlaknima, [6].....	5
Slika 2.4 Primjer dvosmjernog ojačanja dugim vlaknima, [6].....	6
Slika 2.5 Primjer slobodno orijentiranih kratkih vlakana, [6].....	6
Slika 2.6 Primjer dvosmjerno ojačanja kratkim vlaknima, [6]	6
Slika 4.1 Tkanina lana.....	12
Slika 4.2 Tkanina jute.....	12
Slika 4.3 Bioepoksidna smola	12
Slika 4.4. Raskroj ploče 400x400mm s epruvetama za izrezivanje	13
Slika 4.5 Prikaz procesa laminiranja	14
Slika 4.6 Proces laminiranja.....	15
Slika 4.7 Završetak laminiranja.....	15
Slika 4.8 Ploče nakon sušenja	16
Slika 4.9 Kalup s folijom.....	16
Slika 4.10 Priprema vlakana za laminiranje	17
Slika 4.11 Završetak laminiranja i priprema sušenja	17
Slika 4.12 Dimenzije epruvete za vlačno testiranje	18
Slika 4.13 Dimenzije epruveta za savojno ispitivanje po ISO 14125	19
Slika 4.14 Dimenzije epruveta za ispitivanje međuslojne čvrstoće	19
Slika 4.15 Dimenzije epruvete za ispitivanje žilavosti	20
Slika 4.16 "Premium cut" stroj za rezanje vodenim mlazom.....	20
Slika 4.17 Epruvete za ispitivanje mehaničkih svojstva	21
Slika 4.18 Izgled ploče nakon izrezivanja epruveta.....	21
Slika 5.1 Dijagram studentove t-razdiobe	23

Slika 5.2 Shimadzu kidalica	25
Slika 5.3 Charpyev bat	25
Slika 5.4 Dijagram "sila-produljenje" za epruvetu LV1-S.....	27
Slika 5.5 Dijagram "sila-produljenje" za epruvetu LV1-M	27
Slika 5.6 Dijagram "sila-produljenje" za epruvetu JV1-S.....	28
Slika 5.7 Dijagram "sila-produljenje" za epruvetu JV1-M	28
Slika 5.8 Dijagram "sila-progib" za epruvetu LS1-S	32
Slika 5.9 Dijagram "sila-progib" za epruvetu LS1-M.....	32
Slika 5.10 Dijagram "sila-progib" za epruvetu JS1-M.....	33
Slika 5.11 Dijagram "sila-progib" za epruvetu JS1-S	33
Slika 5.12 Dijagram "sila-progib" za epruvetu LM1-S.....	36
Slika 5.13 Dijagram "sila-progib" za epruvetu LM1--M	37
Slika 5.14 Dijagram "sila-progib" za epruvetu JM1-S.....	38
Slika 5.15 Dijagram "sila-progib" za epruvetu JM1-M	39
Slika 5.16 Charpyjev bat	41
Slika 5.17 Dijagram apsorpcije morske vode za epruvete LV1-M	44
Slika 5.18 Dijagram apsorpcije morske vode za epruvetu JV1-M.....	45
Slika 5.19 Ploče za ispitivanje otpornosti na obraštanje 1 i 2 (juta)	46
Slika 5.20 Ploče za ispitivanje otpornosti na obraštaj 3 i 4 (lan)	46
Slika 5.21 Temeljni premaz i premaz protiv obraštaja.....	47
Slika 5.22 Test ploče nakon nanošenja temeljnog premaza.....	47
Slika 5.23 Test ploče nakon nanošenja premaza protiv obraštaja.....	48
Slika 5.24 Test ploče nakon 120 dana.....	49
Slika 5.25 Test ploča jute bez zaštitnog premaza nakon 180 dana.	49

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Svojstva staklenih, ugljičnih i aramidnih vlakna, [9].....	7
Tablica 3.1 Usporedba mehaničkih svojstva prirodnih, staklenih i ugljičnih vlakana.....	10
Tablica 4.1 Prikaz masenih udjela vlakana u kompozitu.....	14
Tablica 4.2 Maseni udio vlaka u pločama za ispitivanja mehaničkih svojstva.....	18
Tablica 4.3 Podjela epruveta po ispitivanjima i njihove oznake.....	22
Tablica 5.1 Studentova razdioba.....	24
Tablica 5.2 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće.....	26
Tablica 5.3 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće.....	31
Tablica 5.4 Rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće.....	35
Tablica 5.5 Rezultati ispitivanja žilavosti za lan.....	42
Tablica 5.6 Rezultati ispitivanja žilavosti za jutu.....	42
Tablica 5.7 Rezultati ispitivanja higroskopsnosti epruvete LV1-M.....	44
Tablica 5.8 Rezultati ispitivanja higroskopsnosti za epruvetu JV1-M.....	45
Tablica 5.9 Masa mokrog obraštaja.....	50

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>A</i>	mm ²	površina
<i>A_{cu}</i>	kJ/m ²	žilavost
<i>B</i>	mm	širina epruvete za ispitivanje žilavosti
<i>b₁</i>	mm	širina vrata epruvete za ispitivanje žilavosti
<i>b₂</i>	mm	širina pri kraju epruvete za statičko vlačno ispitivanje
<i>disp</i>	mm	istezanje, progib
<i>E</i>	N/mm ²	modul elastičnosti
<i>E_{CU}</i>	J	energija udarnog loma
<i>E_{vl}</i>	N/mm ²	vlačni modul elastičnosti
<i>E_s</i>	N/mm ²	savojni modul elastičnosti
<i>Force</i>	N	sila
<i>h</i>	mm	srednja debljina epruvete
<i>h₁</i>	mm	početna visina Charpyjevog bata
<i>h₂</i>	mm	konačna visina Charpyjevog bata
<i>m</i>		broj stupnjeva slobode uzorka
<i>L</i>	mm	Početna udaljenost između čeljusti kidalice
<i>L₀</i>	mm	mjerna duljina epruvete za statičko vlačno ispitivanje
<i>l</i>	mm	produljenje pri statičkom vlačnom ispitivanju
<i>l₁</i>	mm	duljina uskog paralelnog dijela epruvete za statičko vlačno ispitivanje
<i>l₂</i>	mm	udaljenost između proširenog paralelnog dijela epruvete za statičko vlačno ispitivanje
<i>l₃</i>	mm	ukupna duljina epruvete za statičko vlačno ispitivanje
<i>L_s</i>	mm	razmak između oslonaca savojnog ispitivanja
<i>n</i>	mm	količina uzoraka
<i>p</i>		vjerojatnost
<i>R</i>	mm	radijus zakrivljenosti epruvete za statičko vlačno ispitivanje

S		standardna devijacija
R_m	N/mm^2	vlačna čvrstoća
R_{ms}	N/mm^2	savojna čvrstoća
R_{mm}	N/mm^2	međuslojna čvrstoća
t		varijabla Studentove t-razdiobe
\bar{X}		aritmetička sredina uzoraka
α		stupanj značajnosti
ε	mm/mm	istezanje
μ		procijenjeno očekivanje osnovnog skupa
$\mu_{R_m, vl}$		intervalna procjena vlačne čvrstoće
$\mu_{R_m, s}$		intervalna procjena savojne čvrstoće
μ_{R_m}		intervalna procjena međuslojne čvrstoće
$\mu_{E, s}$		intervalna procjena savojnog modula
$\mu_{E, vl}$		intervalna procjena vlačnog modula
$\mu_{A_{cu}}$		intervalna procjena udarnog rada loma
σ	N/mm^2	naprezanje
m_{vl}	g	masa vlakana
n_{sl}		broj slojeva
m_{uk}	g	ukupna masa jednog uzorka
w_t	$\%$	maseni udio ojačala u kompozitu

SAŽETAK

Upotreba kompozita obuhvaća širok raspon primjene, od konstrukcijskih i dekorativnih elemenata automobilske, zrakoplovne i brodograđevne industrije, primjene u medicini, elektrotehnici pa sve do proizvoda široke potrošnje. Međutim, široka primjena kompozitnih materijala postala je značajan problem zbog negativnog utjecaja na okoliš. Većina kompozita danas dobiveno je iz fosilnih izvora te nisu biorazgradivi, a povećana upotreba kompozita i nemar ljudi doveo je do povećanja i gomilanja plastičnog otpada. Time se javila potreba za upotrebom kompozita dobivenih iz prirodnih izvora, istraživanja njihovih svojstva u raznim okruženjima te mogućnost veće razgradivosti proizvoda nakon upotrebe. Morska voda predstavlja specifično okruženje za upotrebu biokompozita koje svojim brojnim utjecajnim karakteristikama utječe na svojstva biokompozita. U ovom radu cilj je istražiti utjecaj morske vode na mehanička, fizikalna i kemijska svojstva izabranih biokompozita.

U teoretskom dijelu predstavljen je uvid u prednosti i nedostatke biokompozitnih materijala u odnosu na sintetički dobivene kompozite, njihovu primjenu i uvid u probleme morskog okruženja. U eksperimentalnom dijelu opisuje se način izrade odabranih biokompozita, ispitivanje mehaničkih, kemijskih i fizikalnih svojstva istih pod utjecajem morske vode i konačno se daje usporedba dobivenih rezultata ispitanih biokompozita s biokompozitima ispitanim u normalnih atmosferskim uvjetima. Posljednji dio eksperimentalnog rada obuhvaća ispitivanja higroskopnosti ispitnih uzoraka te pregled dugoročnog utjecaja morske vode na uronjeni kompozit. Odabrani su kompoziti ojačani lanenim i jutenim vlaknima s matricom od bioepoksidne smole s visokim udjelom biorazgradivog sadržaja.

U zaključnom dijelu rada pokazuje se presjek dobivenih rezultata i postavljaju se temelji za buduća istraživanja biokompozita.

Ključne riječi: lanena vlakna, jutena vlakna, biokompozit, mehanička svojstva, kemijska svojstva, fizikalna svojstva, primjena biokompozita

SUMMARY

The application of composites has a wide range, like structural and decorative elements of the automotive, aerospace and shipbuilding industries, applications in medicine, electrical engineering, and consumer products. However, the wide range of application of composites materials has become a significant problem due to the negative impact on the environment. Most composites today are derived from fossil sources and are not biodegradable, and the increased use of composites and human negligence has led to an increase and accumulation of plastic waste. This created the need for the use of composites obtained from green sources, research into their properties in various environments and the possibility of greater degradability of products after use. Sea water is a specific environment for the use of biocomposites which, due to their numerous influencing factors, affects the properties of biocomposites. In this bachelor thesis, the goal is to investigate the influence of seawater on the mechanical, physical, and chemical properties of selected biocomposites.

In the theoretical part, an insight into the advantages and disadvantages of biocomposite materials in relation to synthetically obtained composites, their application and insight into the problems of the marine environment is presented. The experimental part describes the fabrication of selected biocomposites, mechanical, chemical, and physical properties due to the influence of sea water and finally gives a comparison of the results concerning properties of biocomposites tested in normal atmospheric conditions. The last part of experimental work includes hygroscopicity testing and the long-term impact of seawater on the immersed composite. Composites reinforced with flax and jute fibers with a bioepoxy resin matrix of a high content of biodegradable content were selected.

Conclusion of this bachelor thesis shows a review of the obtained results and describes the need for future research of biocomposites.

Key words: flax fibers, jute fibers, biocomposite, mechanical properties, chemical properties, physical properties, application of biocomposites

1. UVOD

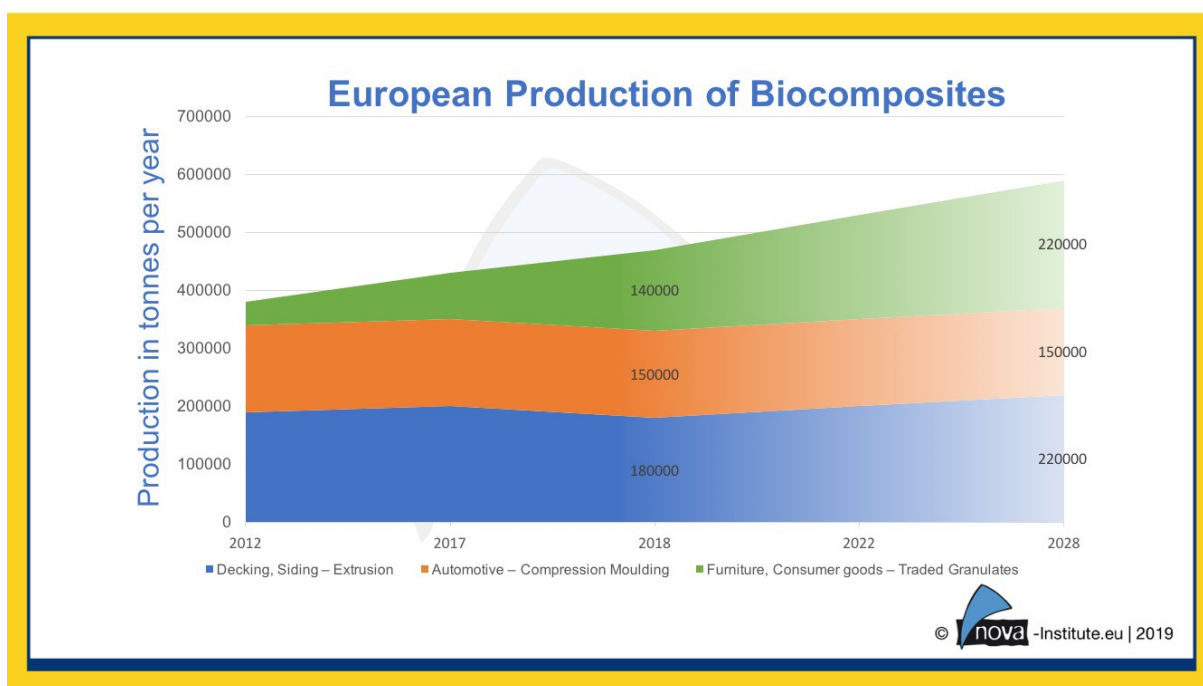
Prva upotreba kompozita kakve poznajemo danas nije započela dok znanstvenici nisu razvili prvu plastiku. Do tada su prirodne smole dobivene prirodnim putem od životinja i biljaka bile jedini izvor ljepila i veziva. Početkom 1900-ih počinje upotreba sintetičkih materijala kao što su vinil, poliester i fenol. Iako je upotreba novih smola nadmašila upotrebu smola dobivenih iz prirodnih izvora, nije bilo moguće osigurati dovoljnu čvrstoću potrebno za konstrukcijsku primjenu. Javila se potreba za ojačanjima kako bi se osigurala zahtijevana mehanička svojstva konstrukcija. Godine 1935. Owens Corning predstavio je prva staklena vlakna koja su u kombinaciji s poliesterskom smolom stvorila izrazito čvrstu, a laganu strukturu, [1].

Razvoj polimernih kompozita je unaprijedilo društvenu zajednicu u mnogo pogleda. Takvi materijali su integrirani u našu svakodnevnicu i gotovo je nezamislivo u bilo kojoj industriji funkcionirati bez njih, ali utjecaj na ekosustav ne može više biti zanemaren. Sve veća briga za okoliš i negativan utjecaj ljudskih aktivnosti na ekosustav motiviraju nova istraživanja i razvoj novih tehnologija i sustava s ciljem očuvanja energije, pa tako i upotrebom prirodnih vlakana u izradi kompozita. Tako bi razvoj novih materijala, a posebice kompozita, trebao uzeti u obzir ne samo zahtijevana mehanička, fizikalna i kemijska svojstva, već i mogućnost ponovne upotrebe, prenamjene i recikliranja. Za takav razvoj potrebno je okrenuti se obnovljivim ili razgradivim sirovinama, bilo ojačalima ili smolama. Biokompoziti su po svojim svojstvima su među prvim materijalima koji odgovaraju takvim zahtjevima. Svojim ojačalima od prirodnih vlakana i ekološki prihvatljive matrice sve više privlače pažnju malom masom, razgradivosti, niskom cijenom obrade itd. Na slici 1.1 je prikazana usporedba staklenih i prirodnih vlakana u cijeni izrade i prosječno smanjenje mase proizvoda u usporedbi s metalnim materijalima, [2]. Na slici 1.2 prikazan je porast proizvodnje biokompozita u Europi.

Fiber	Economic	Weight reduction
Glass fib.	~US \$2/kg	2.5–2.8 g/cm ³
Natural fib.	~US \$0.44–0.55/kg	1.2–1.5 g/cm ³

Slika 1.1 Usporedba cijene izrade staklenih i prirodnih vlakana, [2]

Morska voda predstavlja prirodno okruženje svih pomorskih plovila te pučinskih objekata. Iako će u klasičnoj brodogradnji konstrukcijski kompoziti i biokompoziti biti slabije zastupljeni u odnosu na čelik i ostale metale, važno je naglasiti njihovu primjenu kao korak ka osviještenju korištenja razgradivih i/ili obnovljivih materijala. Obzirom da morsko okruženje predstavlja spoj brojnih utjecajnih faktora koji utječu na svojstvo trupa broda tijekom njegove eksploatacije, a taj je utjecaj od velikog značaja u slučaju biokompozitnih materijala, u ovom će se radu osvrnuti na ispitivanje mehaničkih, kemijskih i fizikalnih svojstva biokompozitnih materijala.

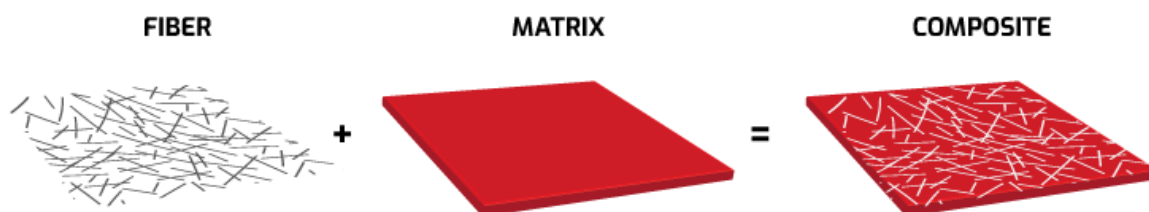


Slika 1.2 Prikaz ukupne proizvodnje biokompozita u Europi s procjenom proizvodnje do 2028. godine, [3]

2. Kompozitni materijali

2.1. Općenito o kompozitima

Kompoziti su materijali nastali spajanjem dva ili više različitih materijala, neovisnih i različitih svojstva. Povezivanjem tih materijala dobiva se novi materijal novih svojstva, ne nužno svojstva materijala koji sudjeluju kao komponente u spoju zasebno. Komponente koje sudjeluju u spoju najčešće se mogu lako vizualno identificirati jer se komponente međusobno ne otapaju, [4].



Slika 2.1. Prikaz spoja ojačala i matrice, [3]

Možemo ih podijeliti na temelju ojačala, kao kompozite ojačane vlaknima, kompozite ojačane česticama i strukturne kompozite. Druga podjela će biti prema matrici koja se koristi, gdje se u današnjoj primjeni koriste kompoziti s polimernom matricom, kompoziti s metalnom matricom i kompoziti s keramičkom matricom, [4].

Uloga matrice je da s ojačalom tvori kompaktnu strukturu, da štiti ojačalo od vanjskih utjecaja, da prenosi opterećenje na ojačalo, dok je uloga ojačala da osigura čvrstoću, krutost i otpornost na trošenje i atmosferske uvjete, [5].

2.2. Matrica kompozita

2.2.1. Kompoziti s polimernom matricom

Ukupna svojstva kompozita s polimernom matricom su bolja u odnosu na svojstva pojedinačnih komponenata. Imaju veći modul elastičnosti nego sama polimerna matrica i nisu krhki kao duromerne matrice, [6]. Na slici 2.2 su prikazana svojstva čelika, aluminija i kompozita.

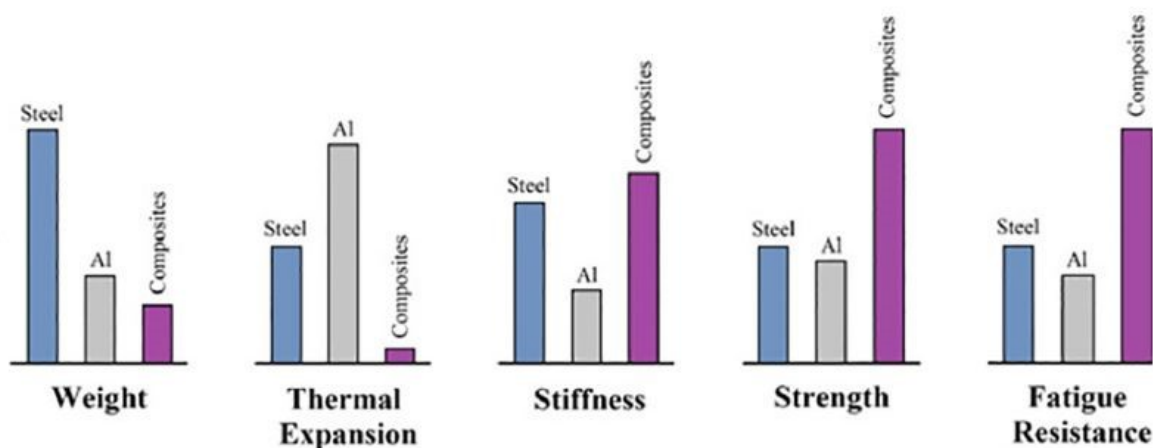
Najčešće korišteni matrični materijali su polimeri. U usporedbi s kompozitima s metalnom i keramičkom matricom imaju lošija mehanička svojstva. Međutim, korištenjem raznih ojačala mehanička svojstva se mijenjaju. Druga pogodnost polimerne matrice je obrada polimernih kompozita koja ne zahtijeva visoku temperaturu i tlak. Također oprema potrebna za proizvodnju polimernih kompozita je jednostavnija. Zbog toga su se kompoziti s polimernom matricom razvili vrlo brzo kao i njihova primjena. Najčešće korištene matrice su poliesteri, vinil esteri, a za zahtjevnije pripreme se koriste epoksidne smole, [6].

2.2.2. Kompoziti s metalnom matricom

Kompoziti s metalnom matricom imaju mnoge posebnosti u odnosu na monolitne metale poput većeg specifičnog modula elastičnosti, veće specifične čvrstoće ili boljih svojstava pri povišenim temperaturama. Zbog svojih svojstava kompoziti s metalnom matricom imaju širok raspon proizvoda u kojima se upotrebljavaju. Metalna matrica se sastoji od slitina aluminija, magnezija, titanija ili bakra. Najčešće se koristi za izradu dijelova motora, zrakoplova i svemirskih letjelica, [6]

2.2.3. Kompoziti s keramičkom matricom

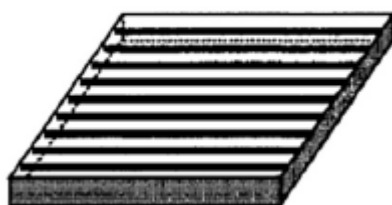
Glavni cilj proizvodnje kompozita s keramičkom matricom je povećati čvrstoću. Uz to se upotrebom keramičke matrice povećava i krutost kompozita. I vlakna i matrica mogu se sastojati od bilo kojeg keramičkog materijala, pri čemu je zanimljivo da se ugljik i ugljična vlakna mogu smatrati keramičkim materijalom, [6].



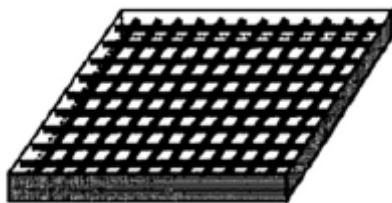
Slika 2.2 Usporedba svojstva čelika, aluminija i kompozita [7]

2.3. Ojačala

Kompozit ojačani vlaknima sadrže mekšu matricu u kojoj su ugrađena čvrsta, kruta i krhka vlakna. Djelotvornost ojačanja najveća je upravo u tim kompozitima. Opterećenje se s matrice prenosi na vlakna pa su ona osnovni nosioci opterećenja. Najraširenija je primjena staklenih, ugljičnih i armadinih vlakana. U tablici 2.1 prikazana su određena svojstva tih tipova vlakana. Na nosivost opterećenja može se utjecati orijentacijom i dužinom vlakana u matrici, [8]. Prema tome kompozite možemo podijeliti na kompozite ojačane dugim (kontinuiranim) i kompozite ojačane kratkim (diskontinuiranim) vlaknima. Kratka vlakna mogu biti slobodna, slika 2.5, ili usmjerena, slika 2.6, dok kontinuirana vlakna mogu biti jednosmjernog, slika 2.3, ili dvosmjernog ojačanja, slika 2.4. Kombinacijom više orijentacija vlakana mogu se postići bolja svojstva kompozita, [6].



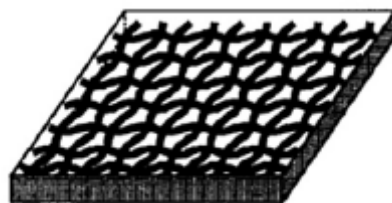
Slika 2.3 Primjer jednosmjernog ojačanja dugim vlaknima, [6]



Slika 2.4 Primjer dvosmjernog ojačanja dugim vlaknima, [6]



Slika 2.5 Primjer slobodno orijentiranih kratkih vlakana, [6]



Slika 2.6 Primjer dvosmjerno ojačanja kratkim vlaknima, [6]

Tablica 2.1 Svojstva staklenih, ugljičnih i aramidnih vlakna, [9]

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

3. BIOKOMPOZITI

Održivi razvoj je vrlo važan te se na njemu temelji suvremena industrija u kojoj biokompoziti sve više zauzimaju bitnu ulogu. Biokompozitom se smatra svaki kompozit ojačan prirodnim vlaknima. Upotreba biokompozita u polimernoj industriji svojim prednostima dokazuje svoje mjesto te oni postaju sve češći predmet novih istraživanja.

3.1. Podjela biokompozita

3.1.1. *Biokompoziti ojačani celulozom*

Proučavanje kompozita ojačanih celulozom prepoznato je kao važno područje istraživanja više prije od desetljeća. Kompoziti ojačani celulozom u industriji se koriste za širok raspon primjena, ali se danas biljna vlakna građena od celuloze više koriste kao sirovina za izradu smola, [10].

3.1.2. *Biokompoziti ojačani lanom i konopljom*

Lan i konoplja spadaju u najzanimljivija ojačala u biokompozitnim materijalima. Po određenim istraživanjima se tvrdi da je tvrtka Daimler-Benz (danas poznatiji kao Mercedes Benz za izradu dijelova unutrašnjosti svojih vozila koristila baš lan kao ojačalo. Uz današnje tehnologije izrade kompozita, takva su ojačanja postala odlična zamjena staklenim vlaknima, [10].

3.1.3. *Biokompoziti ojačani jutom*

Juta je specifična po svojoj visokoj vlačnoj čvrstoći, ali i kratkom produljenju vlakana prije pucanja. Uzme li se u obzir mala gustoća od $1,45 \text{ g/cm}^3$, onda vrijedi uzeti u obzir usporedbu s staklenim vlaknima kao najčešćim ojačalom u kompozitima današnjice. U usporedbi sa kompozitima ojačanim staklenim vlaknima specifična granica razvlačenja takvih kompozita je daleko veća, [10].

3.1.4. *Ostali biokompoziti*

U ovu skupinu možemo svrstati kompozite ojačane životinjskim i mineralnim vlaknima, ali za potrebe ovog rada neće biti razmatrane.

3.2. Matrice u biokompozitima

Glavni uloga matrice je da s ojačalom tvori kompaktnu strukturu, štiti ojačalo od vanjskih utjecaja i prenosi opterećenje na ojačalo. Kao matrica se koriste plastomeri i duromeri, među kojima su najširu primjenu stekli epoksi i poliesterske smole. Radi problema zbrinjavanja smola nakon radnog vijeka kompozita ili same smole, sve više se proizvođača okreće bioepoksi smolama, koje karakterizira visok udio razgradivih elemenata u smoli, [2].

3.3. Prednosti i nedostaci prirodnih vlakana

Sam pojam prirodnih vlakana asocira na jednostavnost nabave i obnovljivost sirovine. Manja gustoća u odnosu na staklena vlakna osigurava visoku specifičnu čvrstoću i krutost u odnosu na staklena vlakna. Time vlakna biljnog i životinjskog porijekla osiguravaju uštede u mnogim pogledima:

- Niska cijena
- Široka dostupnost
- Obnovljivosti na godišnjoj razini
- Povoljnoj specifičnoj čvrstoći i maloj gustoći
- Dobroj obradivosti
- Maloj potrošnji energije pri izradi.

Neki od nedostataka su:

- Zahtjevna kompatibilnost s matricom
- Higroskopnost
- Osjetljivost na povišenim temperaturama (iznad 100 °C)
- Degradacija u prisutnosti mikroorganizama, [11,12].

3.4. Područja primjene biokompozita

Prirodna vlakna kao ojačalo u polimernim kompozitima vrlo brzo postaju zamjena za metal ili keramiku u industrijama koje uključuju automobilsku, zrakoplovnu, pomorsku, sportsku i elektroničku industriju. Njihova pojedinačna svojstva trebala bi biti čvrsta baza za generiranje novih proizvoda. Mnoge automobilske komponente su već proizvedene kao kompoziti ojačani prirodnim vlaknima, uglavnom na osnovi poliestera ili polipropilena i vlakana poput lana ili konoplje. Uporaba prirodnih vlakana u kompozitnim materijalima uglavnom je uvjetovana cijenom materijala i smanjenjem mase. Njemačka predvodi u korištenju kompozita ojačanih prirodnim vlaknima. Njemački automobilski proizvođači: Mercedes, BMW, Audi i Volkswagen su preuzeli inicijativu za uvođenje prirodnih vlakana u kompozitne materijale za unutrašnje i vanjske dijelove, [13].

U brodogradnji, najveća primjena bi mogla postojati u gradnji malih brodova. Slabija zastupljenost kod ovih industrija je iz dva ključna razloga: veoma agresivno morski okruženje i UV zračenje. Zbog nedostatka ispitivanja, staklena vlakna i dalje prevladavaju svojom boljom otpornošću prema agresivnim mediju kao što je more, otpornija su na razgradivost te manje higroskopnija u odnosu na prirodna vlakna. [14].

Tablica 3.1 Usporedba mehaničkih svojstva prirodnih, staklenih i ugljičnih vlakana

Tip vlakna	Vlačna čvrstoća, R_m [GPa]	Youngov modul, E [GPa]	Specifična čvrstoća [GPa/gcm ³]	Specifični modul [GPa/gcm ³]
Lan	2,00	85	1,60	71
Konoplja	0,70	35	0,50	25
E-staklo	3,50	72	1,35	28
Ugljična vlakna	3,00	235	1,71	134

4. PRIPREMA ZA EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu završnog rada provedena su laboratorijska ispitivanja dva različita kompozita, s ciljem ispitivanja mehaničkih svojstva. Provedena ispitivanja su:

- Ispitivanje vlačne čvrstoće materijala
- Ispitivanje savojne čvrstoće
- Ispitivanje međuslojne čvrstoće
- Ispitivanje žilavosti.

Uz laboratorijska ispitivanja, provedeno je još i testiranje higroskopsnosti te test otpornosti na obraštanje u morskoj vodi. Za testiranja je bilo potrebno izraditi ispitne uzorke, a sam postupak se odvijao u nekoliko faza:

- Određivanje broja ispitnih uzoraka te proračun dimenzija ploča kompozita
- Nabava materijala
- Izrada kalupa
- Laminiranje kompozitnih ploča
- Sušenje kompozitnih ploča
- Izrezivanje ispitnih uzoraka iz kompozitnih ploča
- Sušenje uzoraka.

4.1. Izrada ispitnih uzoraka

4.1.1. Nabava materijala i izrada kompozitnih ploča

Izrađene su dvije vrste kompozita, s lanenim i jutenim vlaknima. Vlakna lana, slika 4.1, nabavljena su kao otpadak krojenog materijala, a vlakna jute, slika 4.2, u obliku grubo pletenih jutenih vreća. Kao matrica kompozita odabrana je dvokomponentna bioepoksidna smola Artpro bio, slika 4.3. Smola se sastoji od minimalno 40% obnovljivih materijala.



Slika 4.1 Tkanina lana



Slika 4.2 Tkanina jute

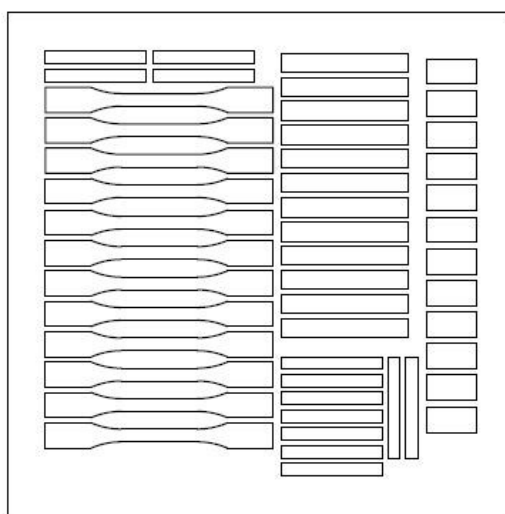


Slika 4.3 Bioepoksidna smola

Dimenzije ploča, tj. kalupa za jednu vrstu kompozita određene su proračunom dimenzija i broja epruveta. Potreban broj epruveta i ploča je sljedeći:

- Statičko vlačno ispitivanje (2x6 epruveta)
- Savojno ispitivanje (2x6 epruveta)
- Ispitivanje žilavosti (2x6 epruveta)
- Međuslojna čvrstoća (2x6 epruveta)
- Test obraštanja (2x1 ploča)

Dimenzije epruveta prikazane su u odlomku 4.2.1. Određeno je da je potrebno izraditi 4 ploče dimenzija 250x250 mm za ispitivanje otpornosti na obraštanje i dvije ploče dimenzija 400x400 mm za izrezivanje epruveta iz njih.

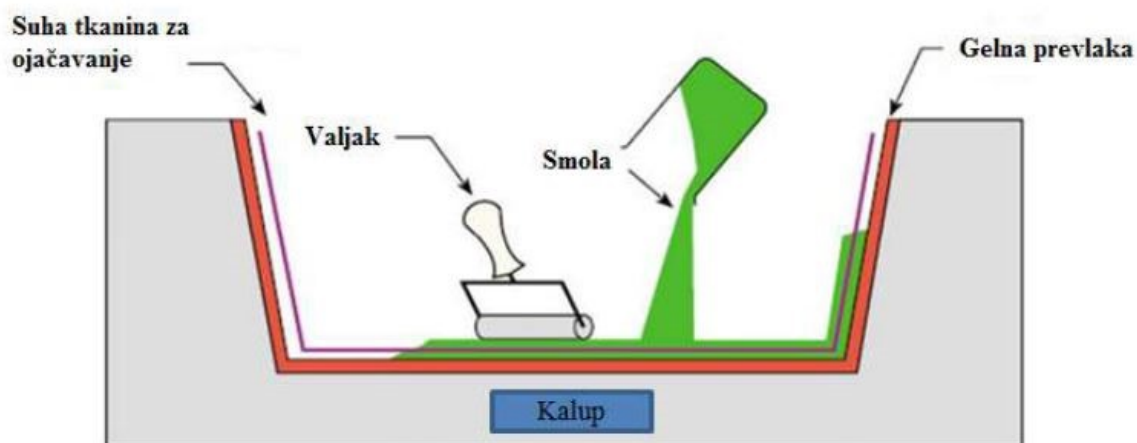


Slika 4.4. Raskroj ploče 400x400mm s epruvetama za izrezivanje

Nakon izračuna dimenzija ploča, izrađen je kalup pripremljen za postupak laminiranja. Kako za test otpornosti na obraštaje nije važna debljina ploče, postupak laminiranja navedene ploče odrađen je prvi kako bi se prilikom laminiranja ploča za mehaničko ispitivanje izbjegle eventualne greške koje mogu dovesti do pogrešnih rezultata mjerenja.

4.1.1.1. Postupak laminiranja

Kod ovog postupka se vlakna kao ojačalo stavljaju u kalup na koji je već postavljen jedan sloj matrice, u ovom slučaju smole. Nakon postavljenog prvog sloja ojačala u kalup, na njega se nanosi novi sloj matrice i tako ponovno dok se ne umetne željeni broj slojeva ojačala. Za potrebe ovog rada, tražena debljina ploče iznosi 4 mm, a maseni udio vlakna približno 40%. Slika 4.5 prikazuje ilustracijski postupak laminiranja.



Slika 4.5 Prikaz procesa laminiranja

4.1.1.2. Izrada ploča za ispitivanje otpornosti na obraštanje

U ovoj izradi nije korišten kalup. Smola je nanosena na staklenu površinu, slika 4.6, a vlakna su izrezana na dimenzije 300x300 mm. Traženi maseni udio je približno 40%. Određen je broj slojeva u kompozitu i izvagana ukupna masa vlakna kako bi se dobio traženi maseni udio vlakana. Rezultati su dani u tablici 4.1.

Tablica 4.1 Prikaz masenih udjela vlakana u kompozitu

Ploča	m_{vl} [g]	n_{sl}	m_{uk} [g]	w_t [%]
Lan 3	108,4	10	410	0,264
Lan 4	111	10	373	0,298
Juta 1	105	7	295	0,356
Juta 2	93	7	279,5	0,333

Nakon postupka laminiranja, ploče su poklopljene drugim staklom na koje su postavljeni utezi kako bi osigurao dovoljan pritisak materijala i osigurala željena debljina ploče, slika 4.7.

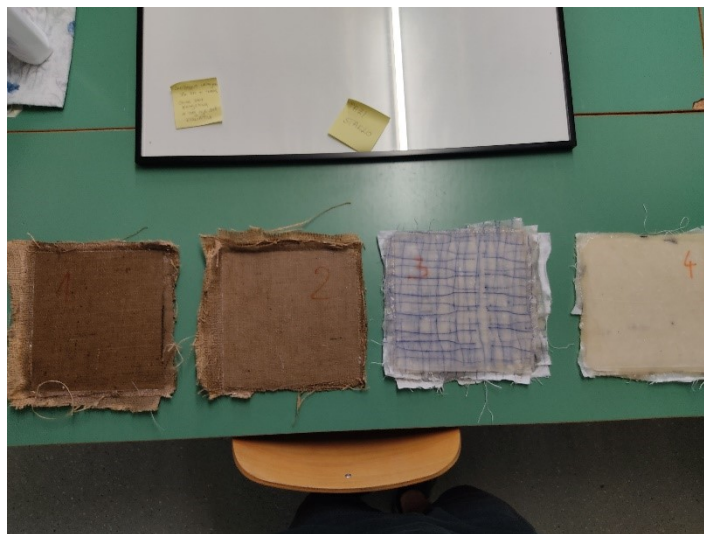


Slika 4.6 Proces laminiranja



Slika 4.7 Završetak laminiranja

Dobivene su četiri ploče potrebne za test otpornosti na obraštanje, slika 4.8. Kako je početna dimenzija vlakana bila 300x300 mm, Ploče su cirkularom odrezane na dimenziju 200x200 mm.



Slika 4.8 Ploče nakon sušenja

4.1.1.3. Izrada kompozitnih ploča za izrezivanje epruveta za ispitivanje mehanička mehaničkih svojstva

Kako je u tablici 4.1 vidljivo da je maseni udio manji pri prvom laminiranju, za ovaj proces laminiranja smanjena je masa smole. Proces se izvodio na ravnom drvenom stolu, a umjesto stakla korištena je folija protiv lijepljenja smole za površinu. Napravljen je kalup od letvica debljine 4 mm, slika 4.9, kako bi se osigurala tražena debljina konačnog kompozita. Na okvir kalupa zalijepljena je traka kako bi se osiguralo zadržavanje smole u kalupu.



Slika 4.9 Kalup s folijom

Ponovljen je postupak laminiranja, slika 4.10 i 4.11, i sušenja kao u odlomku 4.1.1.2.



Slika 4.10 Priprema vlakana za laminiranje



Slika 4.11 Završetak laminiranja i priprema sušenja

Mjerenjem mase nakon sušenja, dobiveni su sljedeći rezultati prikazani u tablici 4.2. Zbog preslabog pritiska prilikom sušenja, debljina nije zadovoljila traženih 4 mm te će biti prikazana za svaku epruvetu posebno.

Tablica 4.2 Maseni udio vlaka u pločama za ispitivanja mehaničkih svojstva

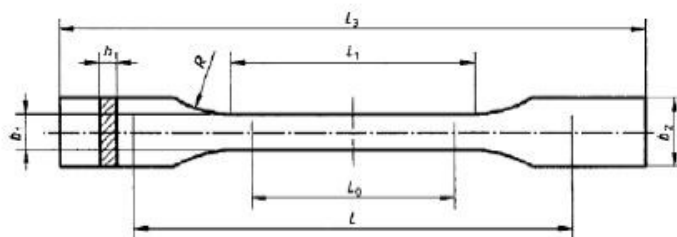
Ploča	m_{vl} [g]	n_{sl}	m_{uk} [g]	w_t [%]
Lan	290	10	733	0,396
Juta	212	7	553	0,383

4.2. Priprema ispitinih uzoraka

4.2.1. Definiranje dimenzija ispitnih epruveta

1. Statičko vlačno ispitivanje prema ISO 527-4

Odabrane dimenzije epruveta su: $L_3=180\text{mm}$, $h=4\text{mm}$ i $R=60\text{mm}$



Dimensions in millimetres		
L_3	Overall length	≥ 150 1)
L_1	Length of narrow parallel-sided portion	$60 \pm 0,5$
R	Radius	≥ 60 2)
b_2	Width at ends	$20 \pm 0,2$
b_1	Width of narrow portion	$10 \pm 0,2$
h	Thickness	2 to 10
L_0	Gauge length (recommended for extensometer)	$50 \pm 0,5$

Slika 4.12 Dimenzije epruvete za vlačno testiranje

Dimenzije su u skladu s kapacitetom kitalice, na temelju približnog proračuna čvrstoće kompozita. Dimenzije su također u skladu s ISO-527-4 normom, slika 4.12.

2. Ispitivanje savojne čvrstoće po ISO 14125

Material	Specimen length (<i>l</i>)	Outer span (<i>L</i>)	Width (<i>b</i>)	Thickness (<i>h</i>)
Class I Discontinuous-fibre-reinforced thermoplastics	80	64	10	4
Class II Plastics reinforced with mats, continuous matting and fabrics, as well as mixed formats (e.g. DMC, BMC, SMC and GMT)	80	64	15	4
Class III Transverse (90°) unidirectional composites; unidirectional (0°) and multidirectional composites with $5 < E_{\parallel}/G_{13} \leq 15$ (e.g. glass-fibre systems)	60	40	15	2
Class IV Unidirectional (0°) and multidirectional composites with $15 < E_{\parallel}/G_{13} \leq 50$ (e.g. carbon-fibre systems)	100	80	15	2
Tolerances	-0 +10	±1	±0,5	±0,2
NOTE To reduce variability in data for specimens using coarse reinforcements, a specimen width of 25 mm may be used.				

Slika 4.13 Dimenzije epruveta za savojno ispitivanje po ISO 14125

Dimenzije ispitnih uzoraka za savojno ispitivanje su određene po normi za „Class II“ skupinu prikazanu na Slika 4.13. Radi lakše provedbe ispitivanja, dimenzija duljine povećana je s 80 mm na 100 mm.

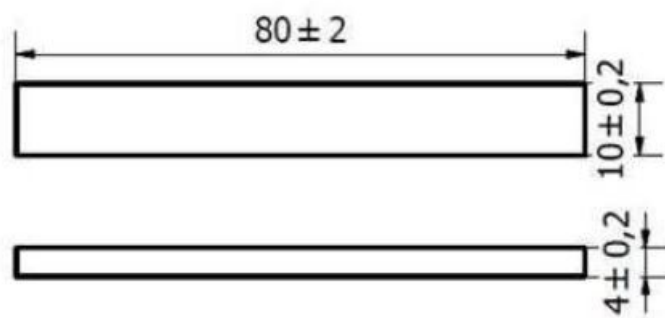
3. Ispitivanje međuslojne čvrstoće prema ISO 14130

EN ISO 14130		
Quantity	Typical Dimensions	Other Dimensions
Thickness h	2 ± 0.2	>2
Support span L	10 ± 0.3	$5h \pm 0.3$
Specimen length l	20 ± 1	$10h$
Specimen width b	10 ± 0.2	$5h$

Slika 4.14 Dimenzije epruveta za ispitivanje međuslojne čvrstoće

Odabrane dimenzije epruveta su $L=40$ mm, $b=20$ mm, $h=4$ mm. Dimenzije su u skladu s ISO 14130 normom, slika 4.14.

4. Ispitivanje žilavost epruveta prema ISO 179-1



Slika 4.15 Dimenzije epruvete za ispitivanje žilavosti

Odabrane dimenzije epruvete su kao na slici 4.15.

5. Test higroskopnosti

Za ovaj test nisu važne dimenzije epruveta, već vrsta ojačala u kompozitu.

6. Test otpornosti na obraštanje

Za test otpornosti na obraštanje određene su četiri ploče dimenzija 200x200 mm.

4.2.2. Izrezivanje ispitnih epruveta

Nakon definiranja dimenzija ploča, a time i dimenzija i izrada kompozitnih ploča, najpraktičnija tehnologija izrezivanja pokazala se rezanje vodenim mlazom. Testom higroskopnosti je pokazano da utjecaj vode u periodu rezanja od 30 minuta ima zanemariv utjecaj na dodatnu masu epruvete i vjerodostojnosti ispitivanja. Epruvete su izrađene u tvrtki Waterjet Service na „Premium cut“ stroju, slika 4.16. Visoka preciznost rezanja omogućila je da dimenzije epruveta ne odstupaju više od dozvoljenih ISO normi, slika 4.17 i 4.18.



Slika 4.16 "Premium cut" stroj za rezanje vodenim mlazom



Slika 4.17 Epravete za ispitivanje mehaničkih svojstva



Slika 4.18 Izgled ploče nakon izrezivanja epruveta

4.3. Priprema za ispitivanje

Posljednja faza prije ispitivanja je označavanje epruveta. Kako će se promatrati utjecaj morske vode na kompozite, polovica svih epruveta biti će uronjeno u morsku vodu. Tako je određena nomenklatura ispitnih epruveta, tablica 4.3. Za test higroskopsnosti odabrane su epruvete LV1-M i JV1-M.

Tablica 4.3 Podjela epruveta po ispitivanjima i njihove oznake

KOMPOZIT OJAČAN LANOM							
VLAK		SAVIJANJE		MEĐUSLOJNO		ŽILAVOST	
LV1-S	LV1-M	LS1-S	LS1-M	LM1-S	LM1-M	LZ1-S	LZ1-M
LV2-S	LV2-M	LS2-S	LS2-M	LM2-S	LM2-M	LZ2-S	LZ2-M
LV3-S	LV3-M	LS3-S	LS3-M	LM3-S	LM3-M	LZ3-S	LZ3-M
LV4-S	LV4-M	LS4-S	LS4-M	LM4-S	LM4-M	LZ4-S	LZ4-M
LV5-S	LV5-M	LS5-S	LS5-M	LM5-S	LM5-M	LZ5-S	LZ5-M
LV6-S	LV6-M	LS6-S	LS6-M	LM6-S	LM6-M	LZ6-S	LZ6-M
KOMPOZIT OJAČAN JUTOM							
VLAK		SAVIJANJE		MEĐUSLOJNO		ŽILAVOST	
JV1-S	JV1-M	JS1-S	JS1-M	JM1-S	JM1-M	JZ1-S	JZ1-M
JV2-S	JV2-M	JS2-S	JS2-M	JM2-S	JM2-M	JZ2-S	JZ2-M
JV3-S	JV3-M	JS3-S	JS3-M	JM3-S	JM3-M	JZ3-S	JZ3-M
JV4-S	JV4-M	JS4-S	JS4-M	JM4-S	JM4-M	JZ4-S	JZ4-M
JV5-S	JV5-M	JS5-S	JS5-M	JM5-S	JM5-M	JZ5-S	JZ5-M
JV6-S	JV6-M	JS6-S	JS6-M	JM6-S	JM6-M	JZ6-S	JZ6-M

5. ISPITIVANJA I REZULTATI ISPITIVANJA

5.1. Statistička obrada rezultata mjerenja

Prilikom ispitivanja na dobivenim rezultatima mjerenja kompozitnih materijala ojačanih lanenim i jutenim vlaknima određena je nepristrana procjena parametara osnovnog skupa na temelju teorije uzoraka. Temeljem malog broja uzoraka koji su ispitivani ($n \leq 30$ elemenata, tj. podataka), potrebno je koristiti Studentovu t-razdiobu s parametrom $m = n - 1$ za intervalnu procjenu očekivanog osnovnog skupa iz kojeg potječe uzorak. Intervalna procjena pojedinih svojstava kompozitnih materijala uz interval vjerodostojnosti $1 - \alpha = 0,95$ u ovom je radu izračunato prema izrazu, [15]:

$$\bar{x} - t_{(m, \frac{\alpha}{2})} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{(m, 1 - \frac{\alpha}{2})} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (5.1)$$

Gdje su:

\bar{x} - aritmetička sredina uzorka

t - varijabla Studentove razdiobe

m - broj stupnjeva slobode uzorka od n podataka

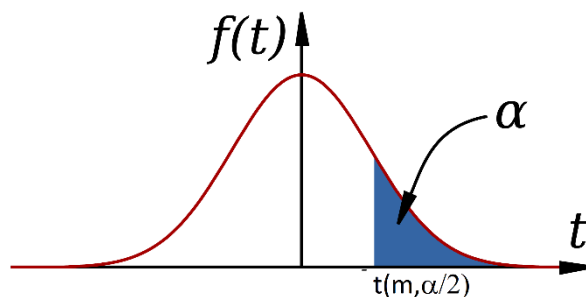
n - veličina uzorka

α - stupanj značajnosti

S - nepristrana procjena standardne devijacije

μ - procijenjeno očekivanje osnovnog skupa

Varijabla t dobivena je iz tablice studentove razdiobe, tablica 5.1, a distribucija razdiobe je prikazana na slici 5.1.



Slika 5.1 Dijagram studentove t-razdiobe

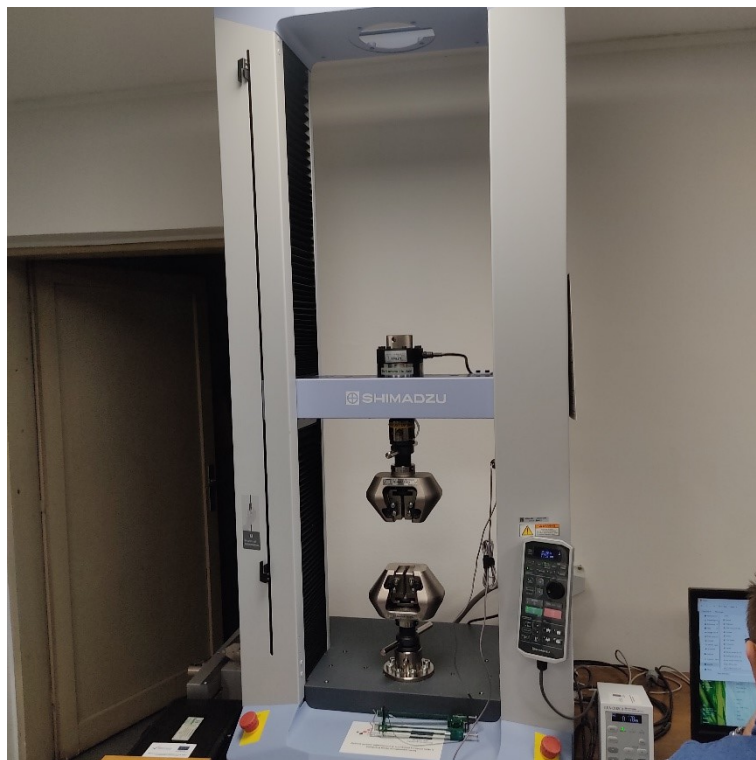
Tablica 5.1 Studentova razdioba

m	α	0.1	0.05	0.025	0.0125	0.01	0.005	0.0025	0.0015	0.001	0.0005
1		3.0777	6.3138	12.7062	25.4517	31.8205	63.6567	127.3213	212.2050	318.3088	636.6192
2		1.8856	2.9200	4.3027	6.2053	6.9646	9.9248	14.0890	18.2163	22.3271	31.5991
3		1.6377	2.3534	3.1824	4.1765	4.5407	5.8409	7.4533	8.8915	10.2145	12.9240
4		1.5332	2.1318	2.7764	3.4954	3.7469	4.6041	5.5976	6.4348	7.1732	8.6103
5		1.4759	2.0150	2.5706	3.1634	3.3649	4.0321	4.7733	5.3760	5.89343	6.8688
6		1.4398	1.9432	2.4469	2.9687	3.1427	3.7074	4.3168	4.8002	5.2076	5.9588
7		1.4149	1.8946	2.3646	2.8412	2.9980	3.4995	4.0293	4.4421	4.7853	5.4079
8		1.3968	1.8595	2.3060	2.7515	2.8965	3.3554	3.8325	4.1991	4.5008	5.0413
9		1.3830	1.8331	2.2622	2.6850	2.8214	3.2498	3.6897	4.0240	4.2968	4.7809
10		1.3722	1.8125	2.2281	2.6338	2.7638	3.1693	3.5814	3.8920	4.1437	4.5869
11		1.3634	1.7959	2.2010	2.5931	2.71808	3.1058	3.4966	3.7890	4.0247	4.4370
12		1.3562	1.7823	2.1788	2.5600	2.6810	3.0545	3.4284	3.7065	3.9296	4.3178
13		1.3502	1.7709	2.1604	2.5326	2.6503	3.0123	3.3725	3.6389	3.8520	4.2208
14		1.3450	1.7613	2.1448	2.5096	2.6245	2.9768	3.3257	3.5827	3.7874	4.1405
15		1.3406	1.7531	2.1314	2.4899	2.6025	2.9467	3.2860	3.5350	3.7328	4.0728
16		1.3368	1.7459	2.1199	2.4729	2.5835	2.9208	3.2520	3.4942	3.6862	4.0150
17		1.3334	1.7396	2.1098	2.4581	2.5669	2.8982	3.2224	3.4589	3.6458	3.9651
18		1.3304	1.7341	2.1009	2.4450	2.5524	2.8784	3.1966	3.4279	3.6105	3.9216
19		1.3277	1.7291	2.0930	2.4334	2.5395	2.8609	3.1737	3.4007	3.5794	3.8834
20		1.3253	1.7247	2.0860	2.4231	2.5280	2.8453	3.1534	3.3764	3.5518	3.8495
21		1.3232	1.7207	2.0796	2.4138	2.5176	2.8314	3.1352	3.3548	3.5272	3.8193
22		1.3212	1.7171	2.0739	2.4055	2.5083	2.8188	3.1188	3.3353	3.5050	3.7921
23		1.3195	1.7139	2.0687	2.3979	2.4999	2.8073	3.1040	3.3176	3.4850	3.7676
24		1.3178	1.7109	2.0639	2.3909	2.4922	2.7969	3.0905	3.3016	3.4668	3.7454
25		1.3163	1.7081	2.0595	2.3846	2.4851	2.7874	3.0782	3.2870	3.4502	3.7251
26		1.3150	1.7056	2.0555	2.3788	2.4786	2.7787	3.0669	3.2736	3.4350	3.7066
27		1.3137	1.7033	2.0518	2.3734	2.4727	2.7707	3.0565	3.2613	3.4210	3.6896
28		1.3125	1.7011	2.0484	2.3685	2.4671	2.7633	3.0469	3.2499	3.4082	3.6739
29		1.3114	1.6991	2.0452	2.3638	2.4620	2.7564	3.0380	3.2394	3.3962	3.6594
30		1.3104	1.6973	2.0423	2.3596	2.4573	2.7500	3.0298	3.2296	3.3852	3.6460
∞		1.2816	1.6449	1.9510	2.2414	2.3264	2.5758	2.8070	2.9677	3.0902	3.2905

5.2. Rezultati ispitivanja mehanički svojstava

5.2.1. Oprema i mjerni instrumenti

Za potrebe ispitivanja vlačne, savojne i međuslojne čvrstoće korištena je kidalica Laboratoriju za polimere i kompozite Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Korištena je Shimadzu univerzalna kidalica, Slika 5.2, na kojoj su mjereni podaci ispitivanja vlačne, savojne i međuslojne čvrstoće. Ispitivanje žilavosti provedeno je na Charpyevom batu, slika 5.3.



Slika 5.2 Shimadzu kidalica



Slika 5.3 Charpyev bat

5.2.2. Statičko vlačno ispitivanje

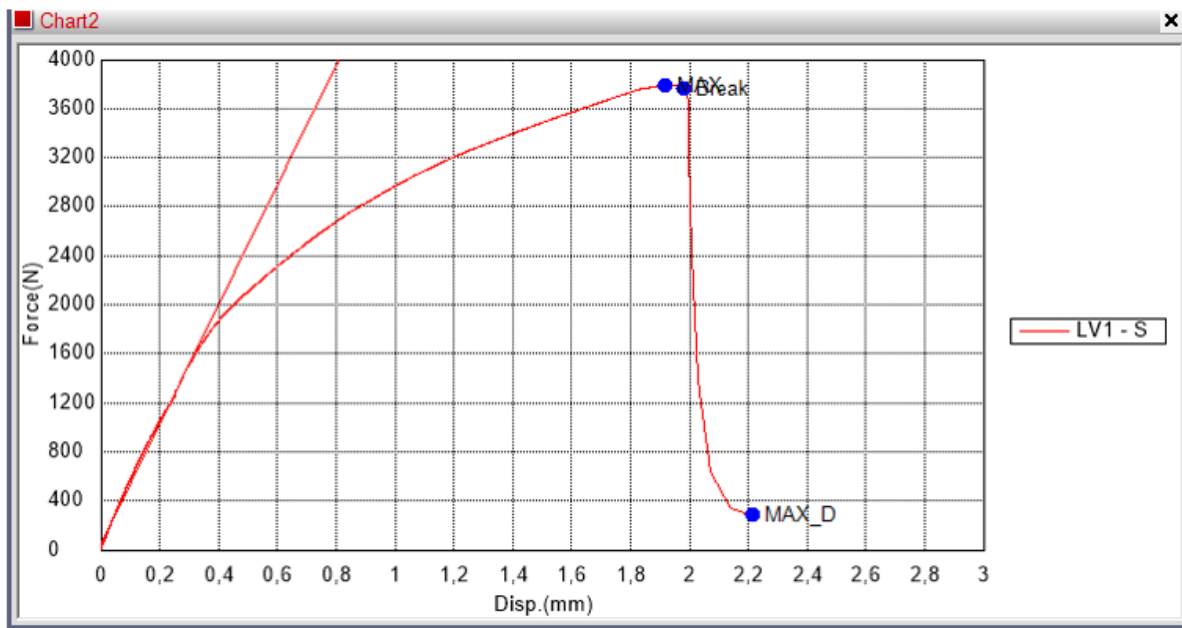
Za navedeno ispitivanje u tablici 5.2 su prikazani rezultati s ključnim podacima ispitivanja kao što su sila pucanja i maksimalno produljenje. Kasnije je prikazano samo nekoliko tipičnih dijagrama, slike 5.4 – 5.7, s vidljivim karakterističnim točkama.

Tablica 5.2 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće

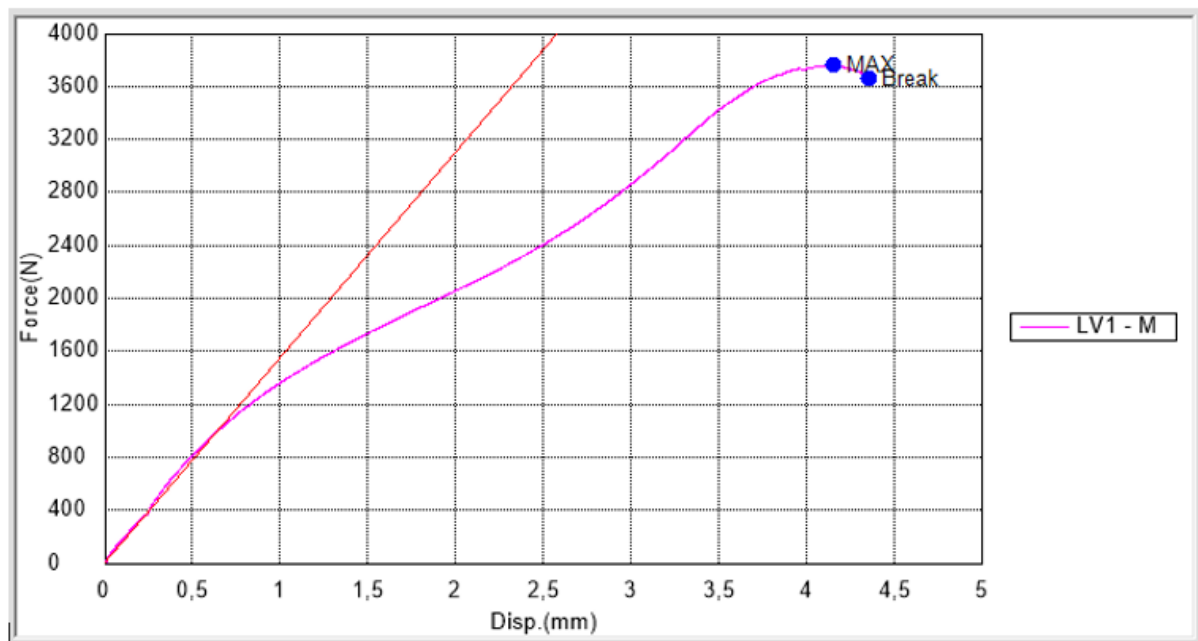
Vlačni modul: EN ISO 5274

Key Word	Product Name		
Test File Name	Lan i juta_rastezno.xtas	Method File Name	VI_mod_en_iso527_4.xmas
Report Date	9.2.2022.	Test Date	9.2.2022.
Test Mode	Single	Test Type	Tensile
Speed	2mm/min	Shape	Plate
No of Batches:	4	Qty/ Batch:	6

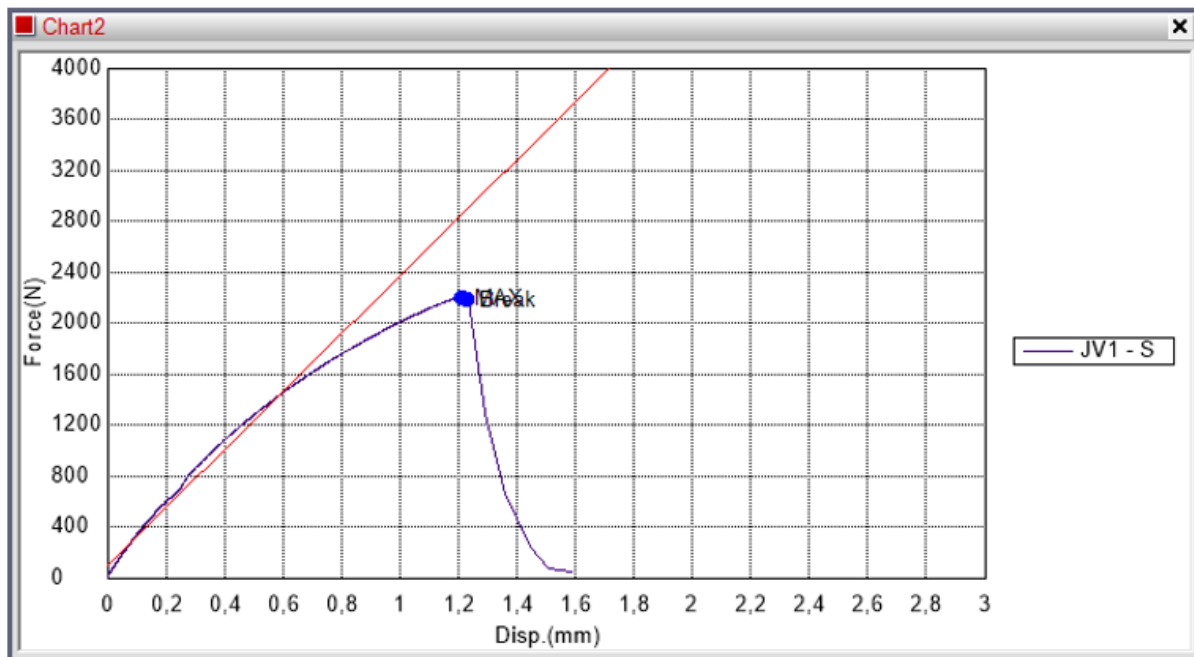
Name	Break_Stress	Break_Strain	Elastic	Max_Force	Max_Stress	Max_Displacement
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Stress 1 – 35 MPa	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	
Unit	MPa	%	GPa	N	MPa	mm
LV1 – S	75,41	4,0	4,9	3794	76,12	2,22
LV2 – S	66,99	4,1	3,6	3639	67,44	2,74
LV3 – S	63,50	3,8	3,7	3628	63,81	1,92
LV4 – S	72,71	3,5	4,9	3685	72,71	2,68
LV5 – S	69,76	3,5	4,5	3588	69,81	3,19
LV6 – S	60,56	3,7	3,5	3315	61,78	2,74
LV1 – M	73,22	8,7	1,2	3761	75,13	4,55
LV2 – M	63,80	9,5	0,9	3682	65,40	6,25
LV3 – M	63,11	8,7	1,1	3789	70,40	5,53
LV4 – M	70,48	8,5	1,1	3780	72,82	5,97
LV5 – M	68,66	8,6	1,0	3707	69,76	5,99
LV6 – M	67,97	8,3	1,0	3874	68,82	6,33
JV1 – S	44,32	2,5	2,3	2200	44,66	1,59
JV2 – S	47,06	2,3	2,5	2284	47,06	1,67
JV3 – S	50,41	2,3	2,8	2289	50,41	1,82
JV4 – S	48,26	2,1	3,0	2209	48,26	1,50
JV5 – S	44,04	2,5	2,2	2255	44,21	1,69
JV6 – S	39,84	1,9	2,5	1927	39,84	1,56
JV1 – M	29,18	3,4	1,2	1562	29,91	2,31
JV2 – M	34,24	3,7	1,2	1729	34,35	3,05
JV3 – M	27,69	3,3	1,2	1577	29,37	2,07
JV4 – M	32,68	3,6	1,3	1718	33,13	2,72
JV5 – M	29,92	3,7	1,1	1625	30,51	2,67
JV6 – M	29,74	3,4	1,2	1576	30,72	1,74



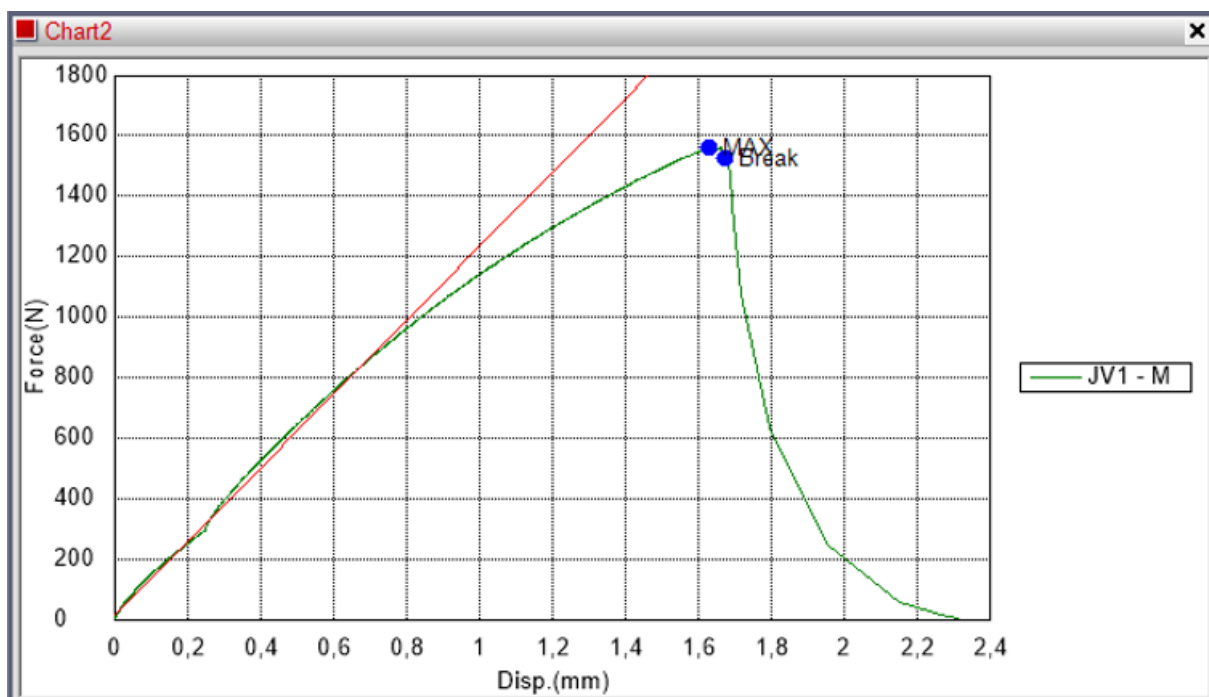
Slika 5.4 Dijagram "sila-produljenje" za epruvetu LV1-S



Slika 5.5 Dijagram "sila-produljenje" za epruvetu LV1-M



Slika 5.6 Dijagram "sila-produljenje" za epruvetu JV1-S



Slika 5.7 Dijagram "sila-produljenje" za epruvetu JV1-M

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena vlačne čvrstoće kompozitnog materijala, $\mu_{Rm,vl}$ i procjena vlačnog modula kompozitnog materijala, E_{vl} , uz interval vjerodostojnosti $1 - 0,95 = \alpha$.

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima koji nije bio uronjen u morsku vodu iznos intervalne procjene vlačne čvrstoće kompozitnog materijala iznosi:

$$66,94 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \mu_{Rm,vl} < 74,27 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$
$$4157,16 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \mu_{Evl} < 4874,42 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima koji je bio uronjen u morsku vodu iznos intervalne procjene vlačne čvrstoće kompozitnog materijala iznosi:

$$69,36 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \mu_{Rm,vl} < 73,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$
$$1041,68 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \mu_{Evl} < 1160,66 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Za kompozit ojačan jutenim vlaknima koji nije bio uronjen u morsku vodu iznos intervalne procjene vlačne čvrstoće kompozitnog materijala iznosi:

$$44,33 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \mu_{Rm,vl} < 49,61 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$
$$2534,64 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \mu_{Evl} < 2866,57 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Za kompozit ojačan jutenim vlaknima koji je bio uronjen u morsku vodu iznos intervalne procjene vlačne čvrstoće kompozitnog materijala iznosi:

$$30,43 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \mu_{Rm,vl} < 33,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$
$$1192,14 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \mu_{Evl} < 1357,11 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

5.2.2.1. Usporedba rezultata

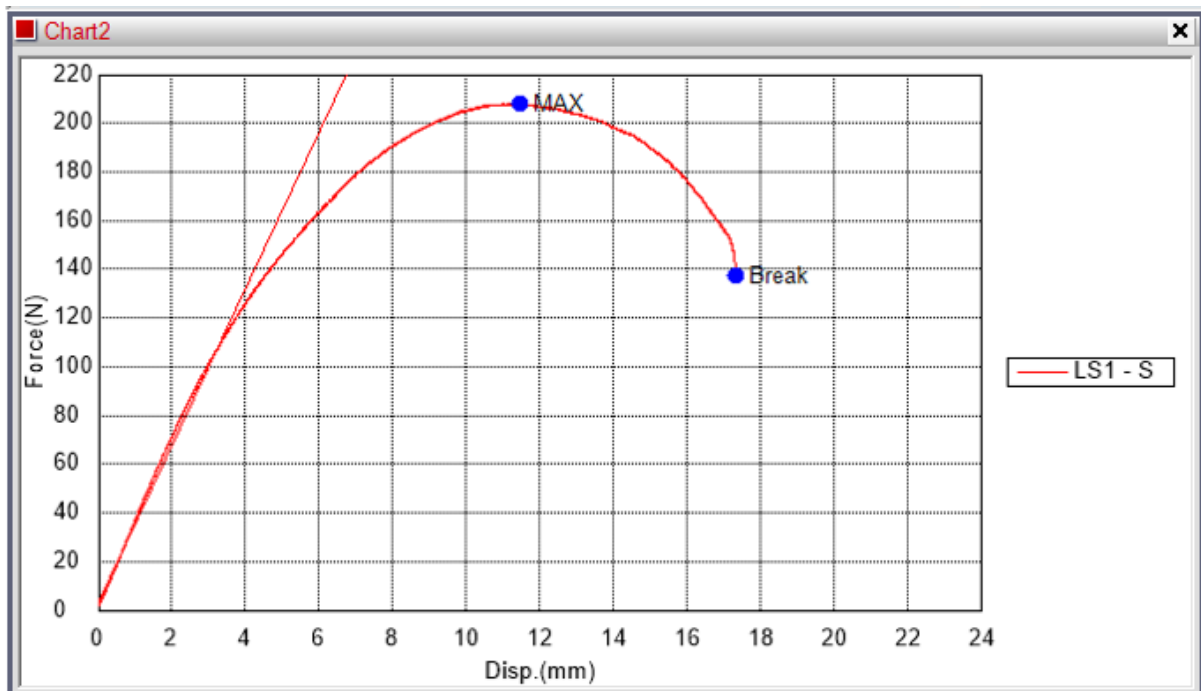
Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je u ovom ispitivanju materijal ojačan lanenim vlaknima pokazao bolja svojstva nego materijal ojačan jutenim vlaknima. Upijanje morske vode odrazilo se na sva ispitivana svojstva. Produljenje epruveta povećano je za preko 50% kod oba materijala u odnosu na suhe epruvete. Modul elastičnosti kod lanenog kompozita zbog utjecaja morske vode je do 4 puta manji u odnosu na suhe epruvete, dok je kod jute taj pad dvostruko manji. Granica razvlačenja kod lanenog kompozita se nije značajno mijenjala, dok je kod jute oko 25% manja u odnosu na suhe epruvete.

5.2.3. Ispitivanje savojne čvrstoće

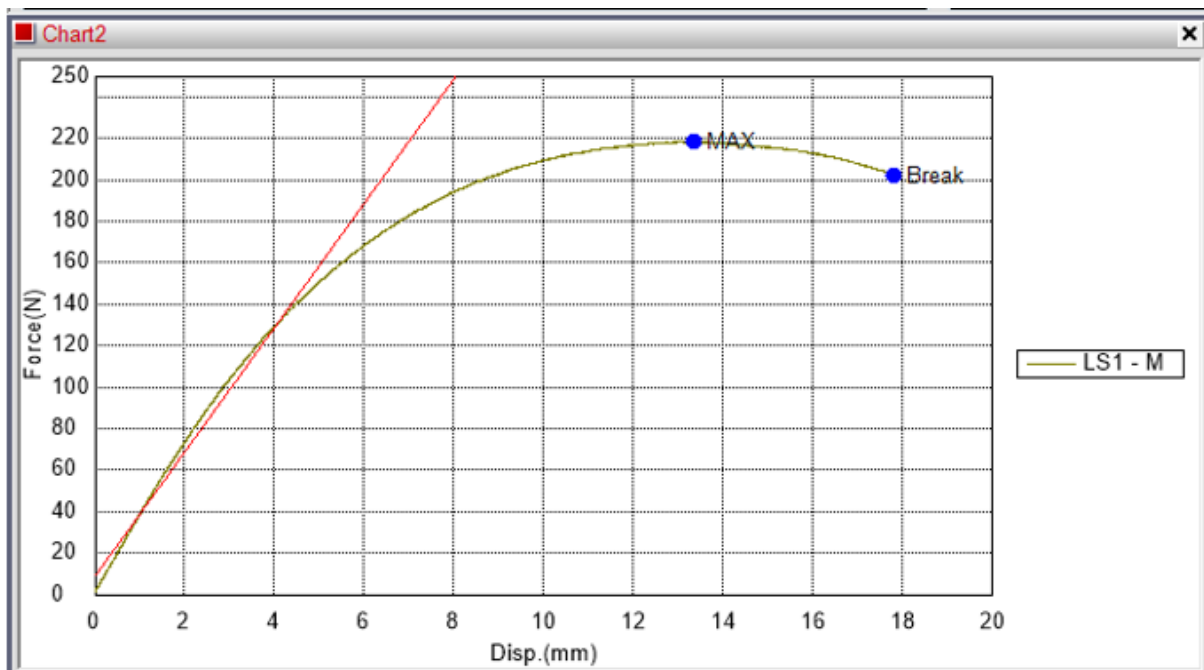
Za navedeno ispitivanje u tablici su prikazani rezultati, tablica 5.3, a kasnije su prikazani dijagrami „sila-progib“ za određene epruvete, slike 5.8 – 5.10.

Tablica 5.3 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće

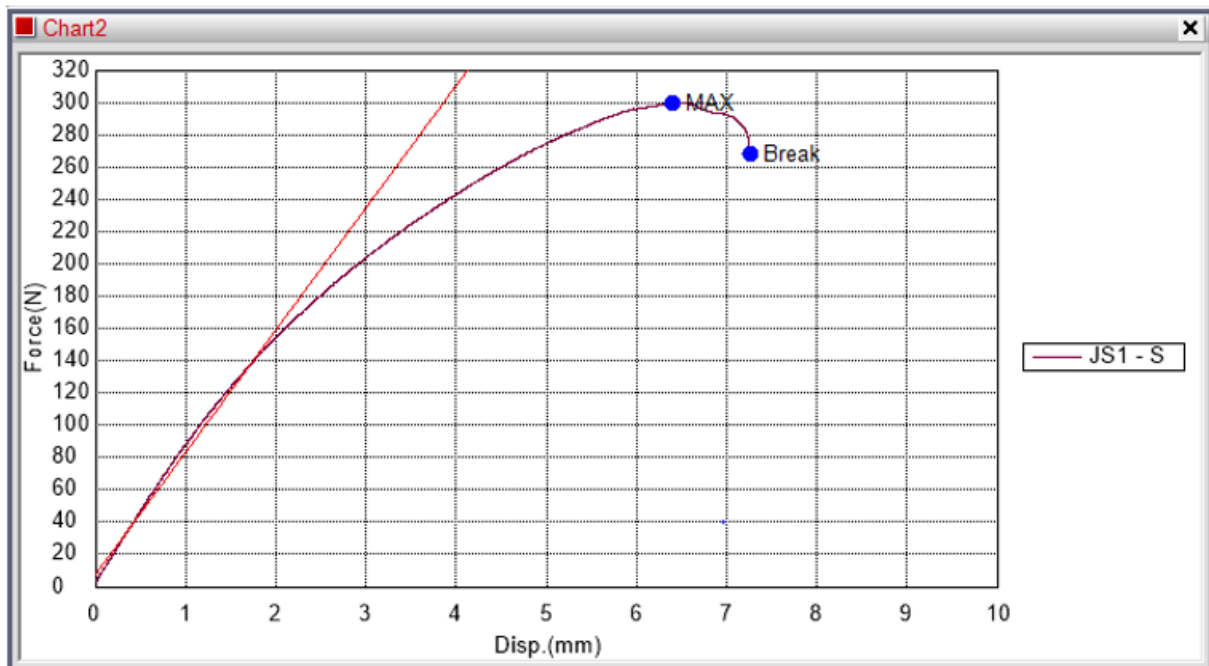
Name Parameters Unit	Elastic Stress 1 – 40 MPa MPa	Max_Displ. Calc. at Entire Areas mm	Max_Force Calc. at Entire Areas N	Max_Strain Calc. at Entire Areas %
LS1 – S	2862,46	11,45	207,94	4,30
LS2 – S	3395,64	10,86	190,59	4,00
LS3 – S	4385,91	10,04	200,36	3,55
LS4 – S	4336,79	11,93	234,66	4,39
Average	3745,20	11,07	208,39	4,06
Standard Deviation	744,292	0,81425	18,9001	0,37868
LS5 – S	4423,99	10,60	217,24	3,86
LS6 – S	1508,06	13,35	218,42	7,04
LS1 – M	1013,39	19,78	123,50	9,52
LS2 – M	754,42	15,97	107,84	8,24
Average	1924,97	14,93	166,75	7,17
Standard Deviation	1695,10	3,90936	59,3295	2,42489
LS3 – M	995,68	19,92	111,21	9,23
LS4 – M	871,26	18,09	111,55	9,07
LS5 – M	857,72	17,82	101,55	8,42
JS1 – S	4319,54	6,40	299,54	2,88
Average	1761,05	15,56	155,96	7,40
Standard Deviation	1706,79	6,17586	95,8305	3,03362
JS3 – S	7628,62	5,72	269,70	2,16
JS4 – S	2778,25	6,96	231,54	3,14
JS5 – S	5768,04	7,08	271,54	2,84
Average	5391,64	6,59	257,59	2,71
Standard Deviation	2446,99	0,75295	22,5816	0,50213
JS6 – S	6051,81	5,46	258,95	2,19
JS1 – M	4637,38	7,48	255,08	3,17
JS2 – M	1565,52	10,74	204,44	4,85
JV3 – M	2123,22	9,74	204,17	4,21
Average	3594,48	8,36	230,66	3,61
Standard Deviation	2114,03	2,36313	30,4733	1,17011
JS4 – M	3019,49	10,36	208,10	4,10
JS5 – M	1033,04	13,23	166,77	5,93
JS6 – M	1761,91	10,29	197,70	4,48
6_4	--	11,15	186,69	669259,10
Average	1938,15	11,26	189,82	167318,40
Standard Deviation	1004,88	1,37160	17,6763	334627
TotalAverage	3004,19	11,50	199,09	29103,07
TotalStandard Deviation	1968,37	4,32503	56,6059	139549



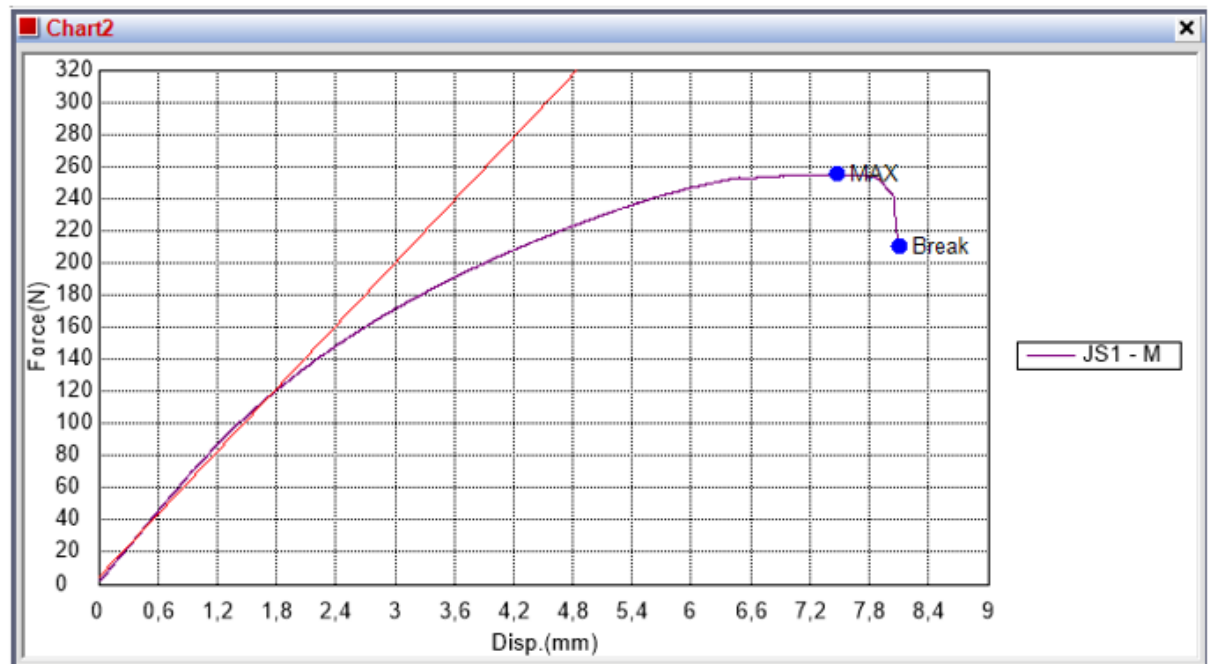
Slika 5.8 Dijagram "sila-progib" za epruvetu LS1-S



Slika 5.9 Dijagram "sila-progib" za epruvetu LS1-M



Slika 5.11 Dijagram "sila-progib" za epruvetu JS1-S



Slika 5.10 Dijagram "sila-progib" za epruvetu JS1-M

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

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima koji nije bio uronjen u morsku vodu iznos intervalne procjene modula savijanja kompozitnog materijala iznosi:

$$3434,98 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \mu_{E_s} < 4702,342 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima koji je bio uronjen u morsku vodu iznos intervalne procjene modula savijanja kompozitnog materijala iznosi:

$$888,58 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \mu_{E_s} < 1031,37 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Za kompozit ojačan jutenim vlaknima koji nije bio uronjen u morsku vodu iznos intervalne procjene modula savijanja kompozitnog materijala iznosi:

$$5137,81 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \mu_{E_s} < 6947,22 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Za kompozit ojačan jutenim vlaknima koji je bio uronjen u morsku vodu iznos intervalne procjene modula savijanja kompozitnog materijala iznosi:

$$1853,56 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \mu_{E_s} < 2818,47 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

5.2.3.1. Usporedba rezultata

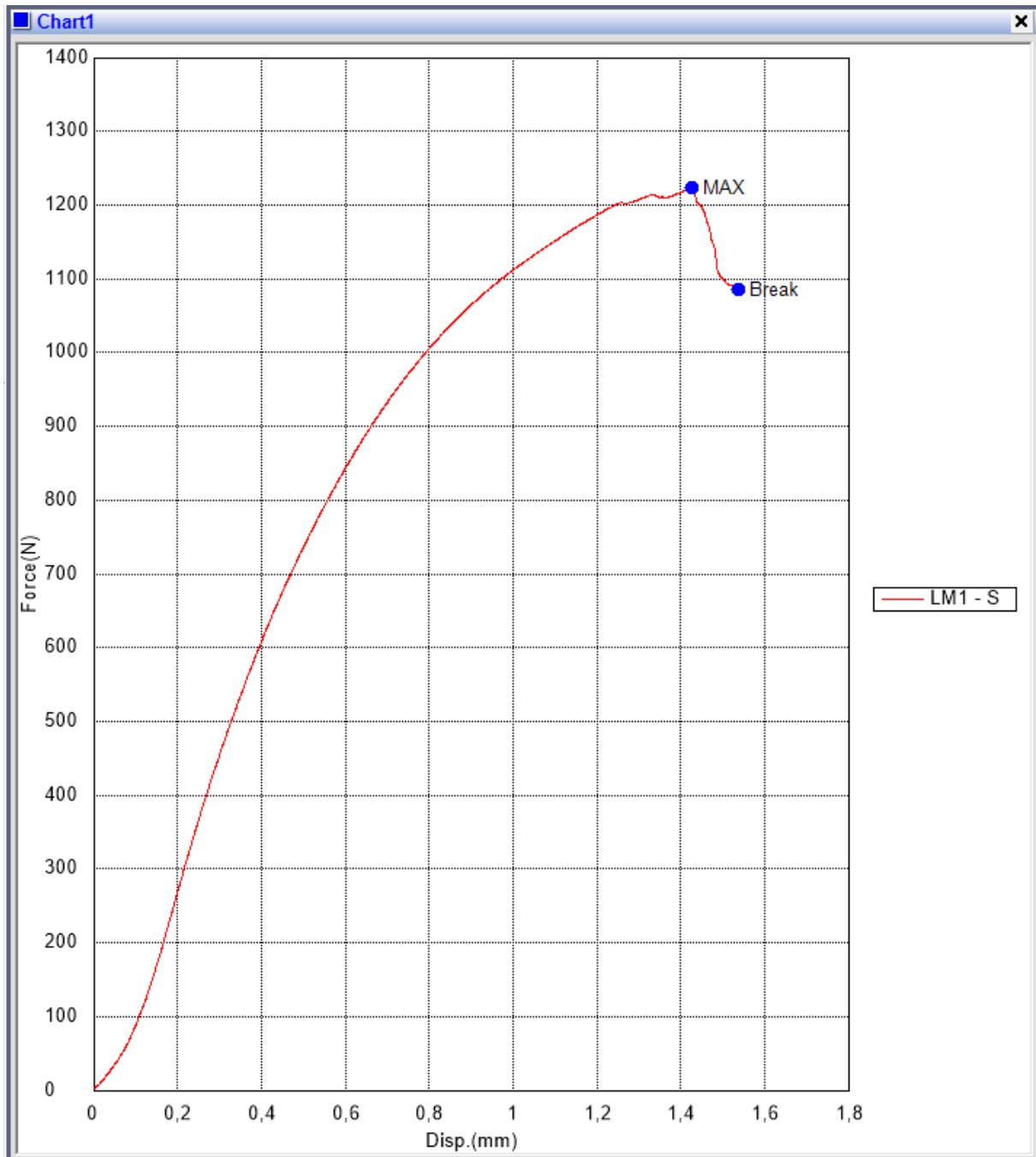
Iz dobivenih rezultata vidljivo je da na oba materijala utjecaj morske vode ima veliku ulogu. Kod lanenih kompozita uočen je pad od 70% savojne čvrstoće, ali se duktilnost vlakana povećala za 40%. Kod jutenih vlakana pad savojne čvrstoće je oko 63%.

5.2.4. Ispitivanje međuslojne čvrstoće

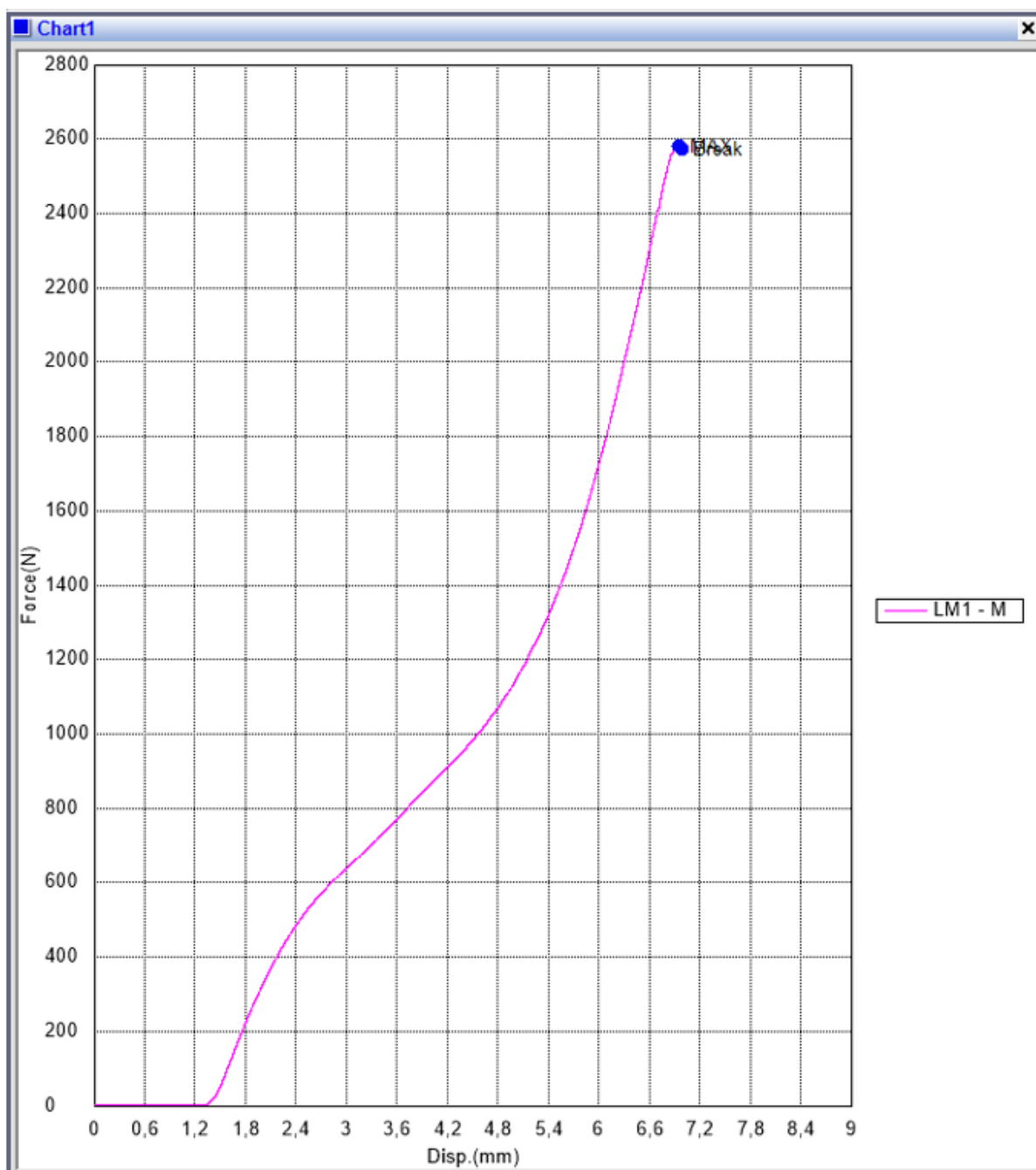
Za navedeno ispitivanje u tablici 5.4 su prikazani rezultati, a na slikama su prikazani dijagrami „sila-progib“ za određene epruvete, slike 5.12 – 5.15.

Tablica 5.4 Rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće

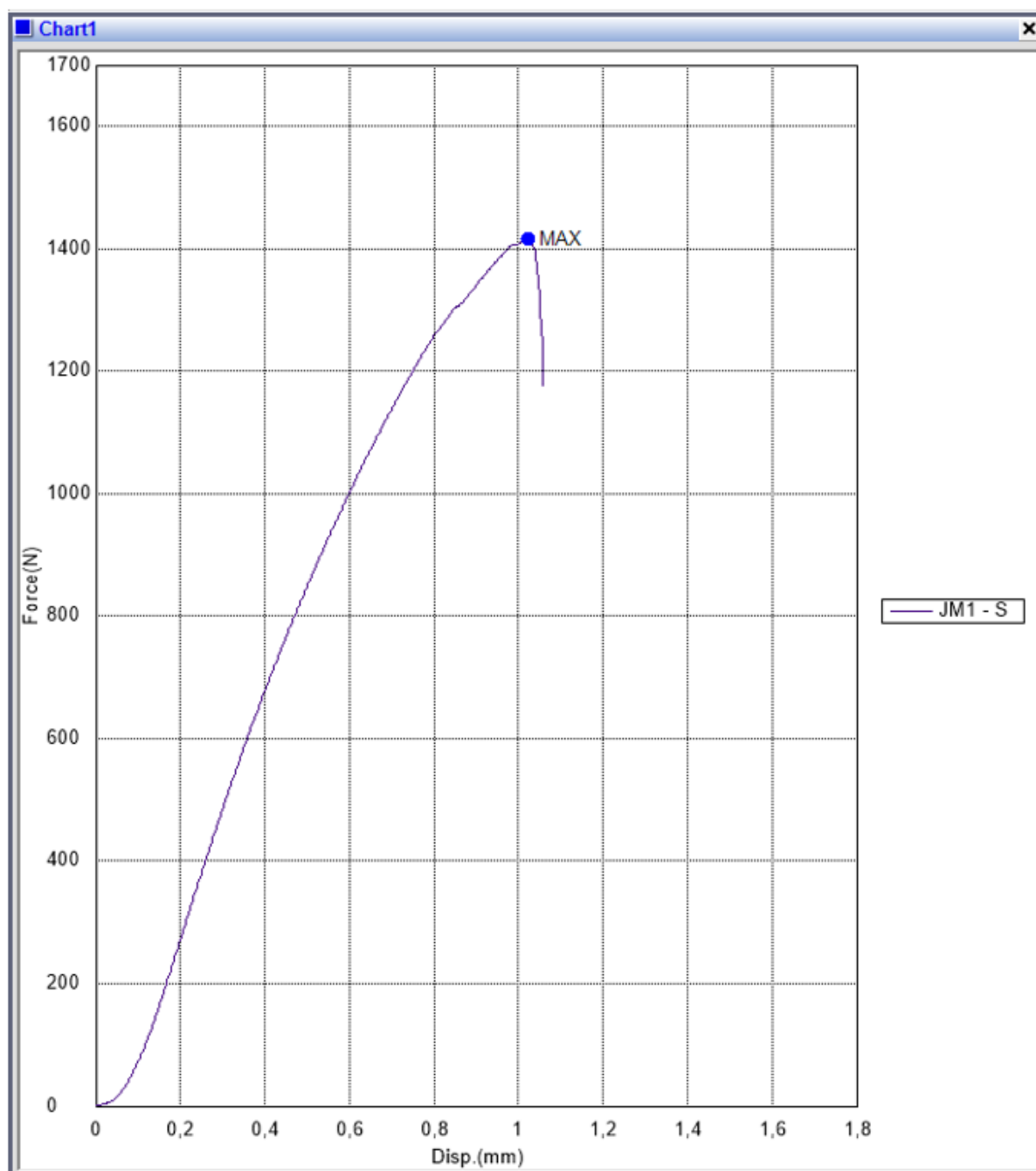
Name Parameters Unit	Max_Force Calc. at Entire Areas N	Break_Force Sensitivity: 10 N	Max_Displ. Calc. at Entire Areas mm	Međuslojna N/mm2
LM1 – S	1223,03	–.–	1,43	10,20
LM2 – S	1248,69	–.–	1,52	10,73
LM3 – S	1277,65	–.–	3,17	10,69
LM4 – S	1492,65	–.–	3,99	12,65
LM5 – S	1087,07	–.–	1,80	8,80
LM6 – S	1288,49	–.–	1,81	10,22
LM1 – M	2581,42	–.–	6,95	21,09
LM2 – M	2809,93	–.–	6,79	23,92
LM3 – M	2561,56	–.–	6,95	23,28
LM4 – M	1873,52	–.–	7,10	16,39
LM5 – M	2234,28	–.–	8,15	18,63
LM6 – M	1139,23	–.–	6,19	9,15
JM1 – S	1416,00	–.–	1,02	10,83
JM2 – S	1338,51	–.–	0,99	10,15
JM3 – S	1257,59	–.–	0,95	9,21
JM4 – S	1394,26	1292,35	1,16	10,65
JM5 – S	924,94	–.–	1,15	7,06
JM6 – S	1079,43	–.–	1,47	7,72
JM1 – M	719,13	–.–	3,07	5,27
JM2 – M	555,34	–.–	2,41	4,00
JM3 – M	818,59	–.–	3,08	6,57
JM4 – M	664,76	–.–	2,76	5,47
JM5 – M	766,01	–.–	3,26	6,63
JM6 – M	749,73	–.–	2,33	6,12



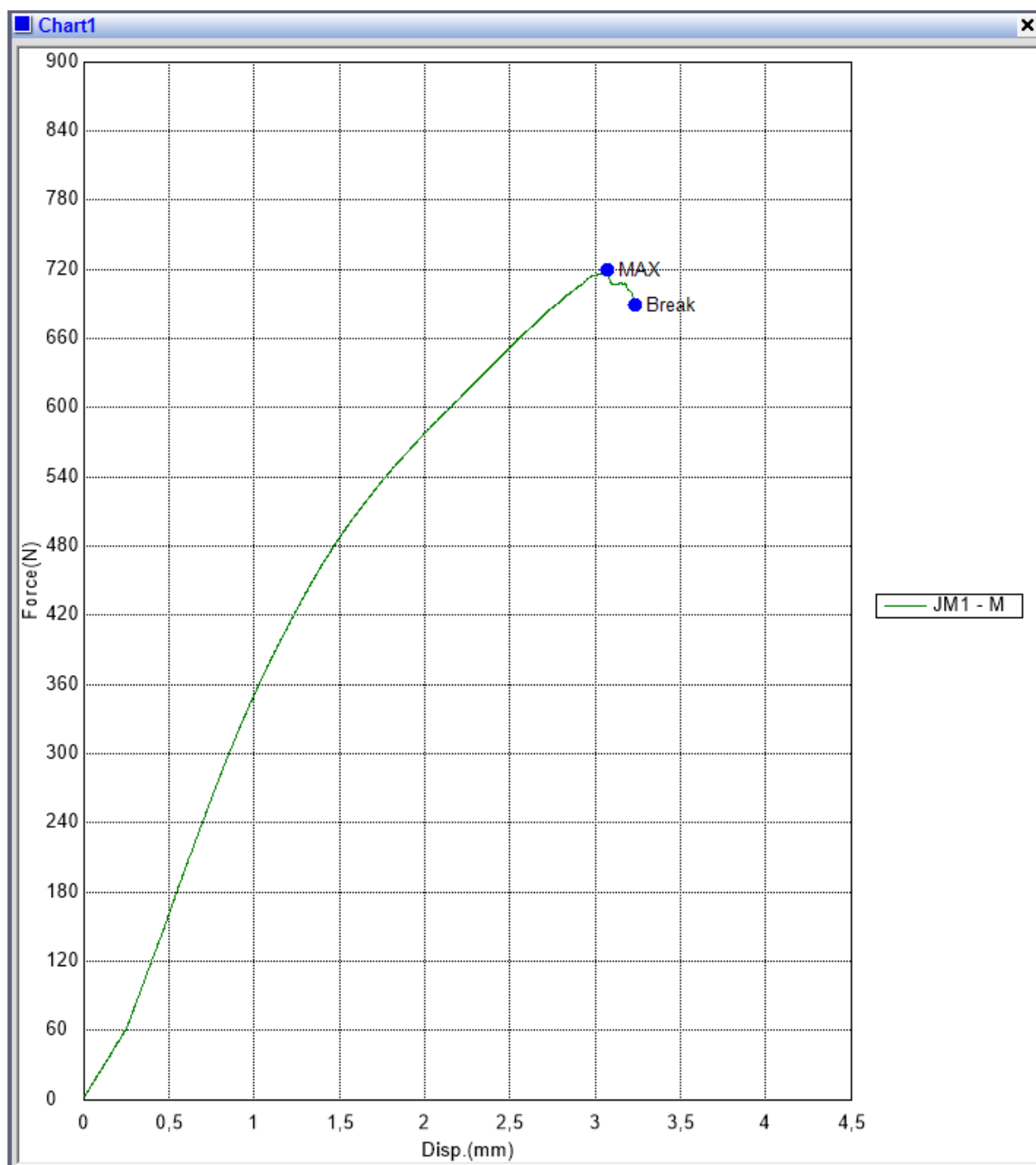
Slika 5.12 Dijagram "sila-progib" za epruvetu LM1-S



Slika 5.13 Dijagram "sila-progib" za epruvetu LM1--M



Slika 5.14 Dijagram "sila-progib" za epruvetu JM1-S



Slika 5.15 Dijagram "sila-progib" za eprvetu JM1-M

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena smične čvrstoće kompozitnog materijala, μ_{Rm} , uz interval vjerodostojnosti $1 - 0,95 = \alpha$.

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima koji nije bio uronjen u morsku vodu iznos intervalne procjene smične čvrstoće kompozitnog materijala iznosi:

$$9,56 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \mu_{Rm} < 11,85 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima koji je bio uronjen u morsku vodu iznos intervalne procjene smične čvrstoće kompozitnog materijala iznosi:

$$15,48 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \mu_{Rm} < 24,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Za kompozit ojačan jutenim vlaknima koji nije bio uronjen u morsku vodu iznos intervalne procjene smične čvrstoće kompozitnog materijala iznosi:

$$7,94 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \mu_{Rm} < 10,92 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Za kompozit ojačan jutenim vlaknima koji je bio uronjen u morsku vodu iznos intervalne procjene smične čvrstoće kompozitnog materijala iznosi:

$$4,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \mu_{Rm} < 6,72 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

5.2.4.1. Usporedba rezultata

Lan je pokazao veću međusobnu čvrstoću u odnosu na jutu. Utjecaj vode odrazio se na veći progib epruveta prilikom ispitivanja kod oba materijala. Međuslojna čvrstoća kod lana porasla je za 50%, dok se kod jute smanjila za 50%.

5.2.5. Ispitivanje žilavosti

U ovom ispitivanju koristio se Charpyjev bat, slika 5.16. Glava bata se postavlja na početnu visinu h_1 s koje se pušta prema epruveti, lomi ju i odlazi na novu visinu h_2 . Na temelju razlike tih dviju visina se određuje utrošena potencijalna energija koja je jednaka energiji utrošenoj na lom epruvete. Rad loma je mjera žilavosti materijala.



Slika 5.16 Charpyjev bat

Charpyjev bat koji je korišten u ovom pokusu sadrži skalu za očitavanje u kpcm, a utrošena energija loma se računa u omjeru 1 J je približno iznosu 10 kpcm. Zbog toga je potrebno preračunati rezultate. U tablici 5.5 i tablici 5.6 u prikazani rezultati.

Tablica 5.5 Rezultati ispitivanja žilavosti za lan

OZNAKA	b [mm]	h [mm]	$kpcm$	E_{cu} [J]	A_{cu} [J/mm ²]	A_{cu} [KJ/m ²]
LU1-S	10,24	5,17	18	1,835	0,035	34,671
LU2-S	10,38	5,13	17	1,734	0,033	32,555
LU3-S	10,12	5,18	20	2,039	0,039	38,904
LU4-S	10,28	5,32	16	1,632	0,030	29,833
LU5-S	10,32	5,27	9,5	0,969	0,018	17,812
LU6-S	10,22	5,33	20,5	2,090	0,038	38,376
LU1-M	10,2	5,47	39,5	4,028	0,072	72,192
LU2-M	10,22	4,23	36,5	3,722	0,086	86,096
LU3-M	10,14	5,32	38,8	3,956	0,073	73,343
LU4-M	10,18	5,05	38,5	3,926	0,076	76,366
LU5-M	10,14	5,08	38,5	3,926	0,076	76,215
LU6-M	10,2	5,29	27,5	2,804	0,052	51,970

Tablica 5.6 Rezultati ispitivanja žilavosti za jutu

OZNAKA	b [mm]	h [mm]	$kpcm$	E_{cu} [J]	A_{cu} [J/mm ²]	A_{cu} [KJ/m ²]
JU1-S	10,16	5,17	9,5	0,969	0,018	18,442
JU2-S	10,04	5,33	7	0,714	0,013	13,339
JU3-S	10,2	5,47	7	0,714	0,013	12,794
JU4-S	10,24	5,27	6,5	0,663	0,012	12,282
JU5-S	10,28	5,36	6	0,612	0,011	11,104
JU6-S	10,28	5,33	8,5	0,867	0,016	15,819
JU1-M	10,16	5,45	8	0,816	0,015	14,733
JU2-M	10,04	5,37	7,5	0,765	0,014	14,185
JU3-M	10,16	5,47	7	0,714	0,013	12,844
JU4-M	10,04	5,3	9	0,918	0,017	17,247
JU5-M	10,2	5,42	7	0,714	0,013	12,912
JU6-M	10,1	5,39	7	0,714	0,013	13,112

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena udarnog rada loma kompozitnog materijala, μ_{Acu} , uz interval vjerodostojnosti $1 - 0,95 = \alpha$. Procjena je provedena posebno za suhe, a posebno za epruvete koje su bile uronjene u morsku vodu.

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima koji nije bio uronjen u morsku vodu iznos intervalne procjene udarnog rada loma kompozitnog materijala iznosi:

$$23,87 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} < \mu_{Acu} < 40,18 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$$

Za kompozit ojačan lanenim vlaknima koji je bio uronjen u morsku vodu iznos intervalne procjene udarnog rada loma kompozitnog materijala iznosi:

$$60,86 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} < \mu_{Acu} < 84,53 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$$

Za kompozit ojačan jutenim vlaknima koji nije bio uronjen u morsku vodu iznos intervalne procjene udarnog rada loma kompozitnog materijala iznosi:

$$11,14 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} < \mu_{Acu} < 16,79 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$$

Za kompozit ojačan jutenim vlaknima koji nije bio uronjen u morsku vodu iznos intervalne procjene udarnog rada loma kompozitnog materijala iznosi:

$$12,4 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} < \mu_{Acu} < 15,94 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$$

5.2.5.1. Usporedba rezultata

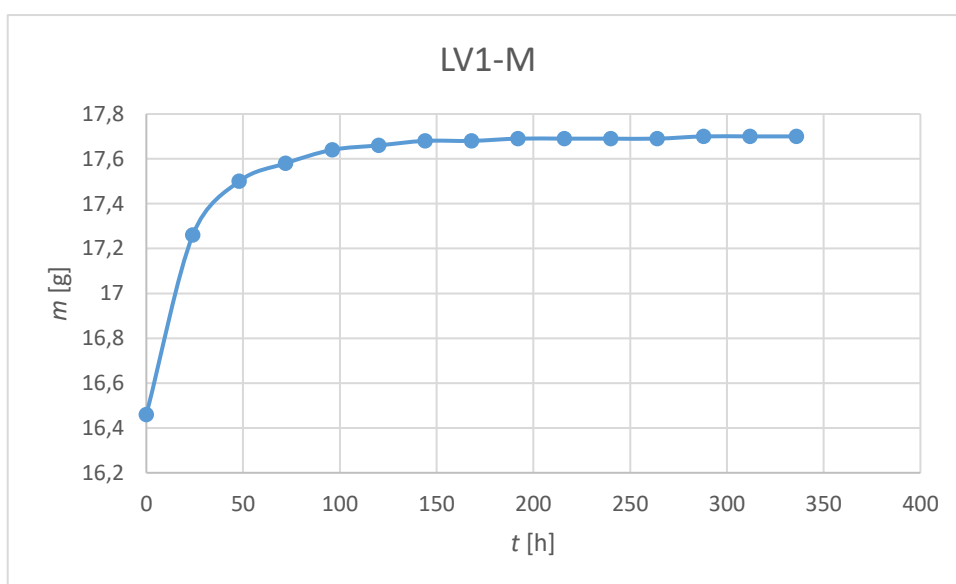
Oba materijala imaju malu otpornost na udarni lom, ali lan se pokazao boljim izborom. Utjecaj vode povećao je žilavost lanenog kompozita za 50% prosječno, dok kod jutelog kompozita nije došlo do veće razlike.

5.3. Test higroskopsnosti

Za potrebe istraživanja korištene su dvije epruvete. Cilj istraživanja je vidjeti masu upijene vode kroz određeno vrijeme. Epruvete su izvagane prije uronjavanja u morsku vodu i ostavljene 336 sati. Svakih 24 sata su bile vagane, a rezultati su prikazani u tablici 5.7 i tablici 5.8 te na slikama 5.17 i 5.18.

Tablica 5.7 Rezultati ispitivanja higroskopsnosti epruvete LV1-M

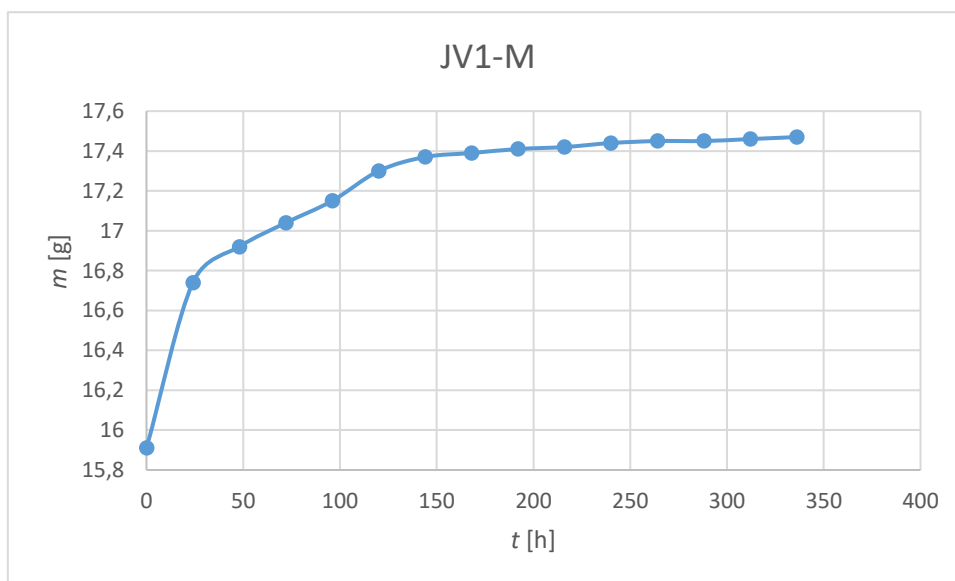
LV1-M		
t [h]	m_{ep} [kg]	Δ_m [%]
0	16,46	
24	17,26	4,635
48	17,5	1,371
72	17,58	0,455
96	17,64	0,340
120	17,66	0,113
144	17,68	0,113
168	17,68	0,000
192	17,69	0,057
216	17,69	0,000
240	17,69	0,000
264	17,69	0,000
288	17,7	0,056
312	17,7	0,000
336	17,7	0,000



Slika 5.17 Dijagram apsorpcije morske vode za epruvete LV1-M

Tablica 5.8 Rezultati ispitivanja higroskopsnosti za epruvetu JV1-M

JV1-M		
t [h]	m_{ep} [kg]	Δ_m [%]
0	15,91	
24	16,74	4,958
48	16,92	1,064
72	17,04	0,704
96	17,15	0,641
120	17,3	0,867
144	17,37	0,403
168	17,39	0,115
192	17,41	0,115
216	17,42	0,057
240	17,44	0,115
264	17,45	0,057
288	17,45	0,000
312	17,46	0,057
336	17,47	0,057



Slika 5.18 Dijagram apsorpcije morske vode za epruvetu JV1-M

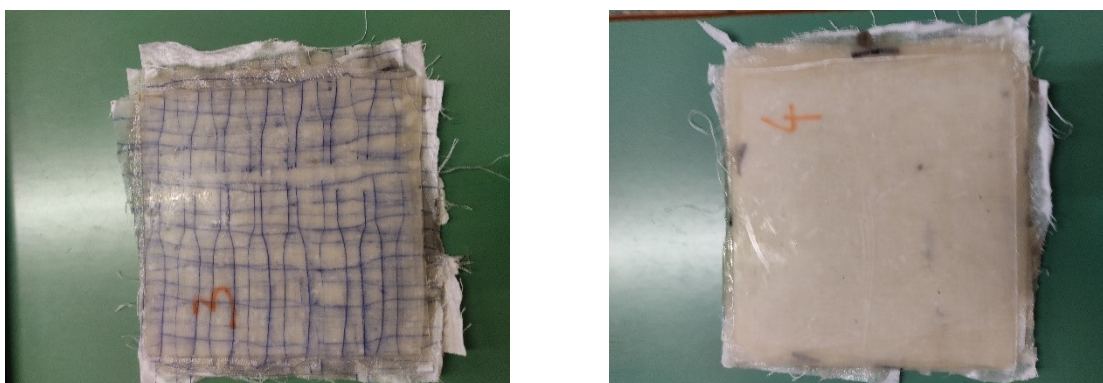
Analizom dobivenih rezultata vidljivo je da se najveći prirast mase dogodio u prvih 24 sata. To govori dovoljno da dođe li do havarije, npr. nekog sportskog plovila, popravak bez većih posljedica je moguć pravovremenom reakcijom. Ukupno povećanje mase je za 7% kod kompozita ojačanih lanom, dok kod kompozita ojačanih jutom taj je postotak iznosio 8,93%.

5.4. Ispitivanje obraštanja kompozitnih ploča uronjenih u morsku vodu

Za potrebe ovog ispitivanja napravljene su četiri test ploče, dvije kao kompozit ojačan lanenim vlaknima i dvije kao kompozit ojačan jutenim vlaknima. Izrađene su dvije ploče kako bi se jedna obojala bojom za zaštitu protiv obraštaja, dok je druga ostavljena bez ikakvih premaza ili dodataka. Test ploče prije i poslije nanošenja premaza prikazane su na slikama 5.19 i 5.20.



Slika 5.19 Ploče za ispitivanje otpornosti na obraštanje 1 i 2 (juta)



Slika 5.20 Ploče za ispitivanje otpornosti na obraštaj 3 i 4 (lan)

Prije uranjanja u more, na ploče 2 i 4 nanesen je temeljni premaz i premaz protiv obraštanja. Temeljni premaz služi kako ne bi došlo do pucanja i ljuštenja premaza protiv obraštaja. Uz konzultacije s tvrtkom Barracuda brodovi d.o.o. na slikama 5.21 i 5.22 je vidljivo nanošenje temeljnog premaza i premaza protiv obraštanja.



Slika 5.21 Temeljni premaz i premaz protiv obraštaja

Nakon sušenja premaza, slika 5.23, test ploče su sredinom srpnja uronjene u more u uvali Stupin. Tako se tijekom šest mjeseci promatralo kompozit i nastanak njegovog obraštaja.



Slika 5.22 Test ploče nakon nanošenja temeljnog premaza

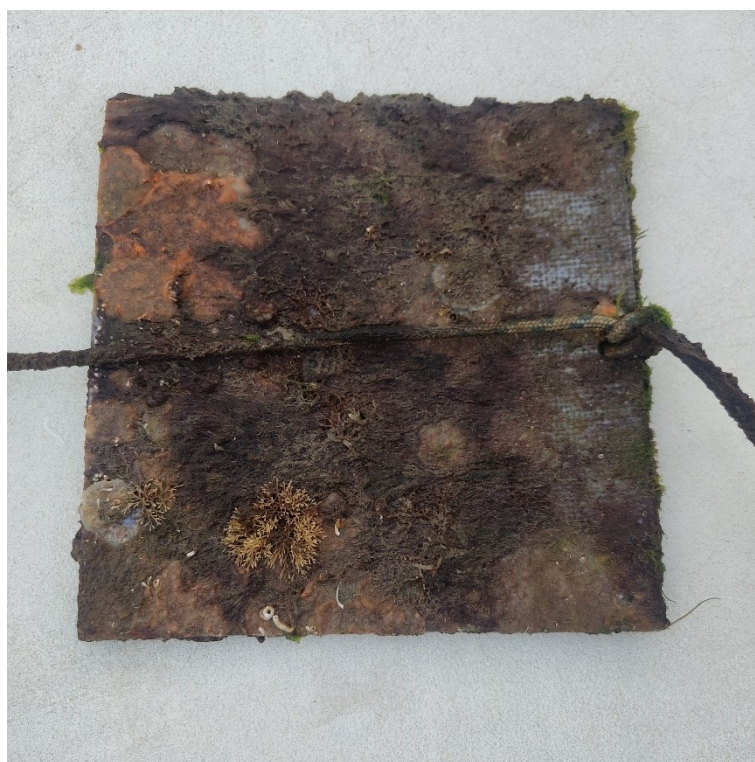


Slika 5.23 Test ploče nakon nanošenja premaza protiv obraštaja

Kao i kod ispitivanja higroskopnosti, nakon 10 dana uočeno je povećanje mase kod ploča bez premaza na sebi. Također je uočen sluzav sloj na svim pločama. Nakon 60 dana zapaženo je početno formiranje biomasa na nezaštićenim pločama, nedovoljno za vaganje bilo kakve mase. Na slici 5.24 vidljiv je izgled test ploča nakon 120 dana. Zanimljivo je da se na zaštićenim pločama biomasa primjećuje tek kao dio sluzi, dok je kod kompozita ojačanog jutom prisutna najveća biomasa obraštaja. Kako je u periodu od 60 do 120 (rujan i listopad) dana došlo do pojačanog rasta, skidanjem obraštaja ponovno bi bilo potrebno čekati minimalno 60 dana do ponovno mjerljivog obraštaja. S toga je odlučeno da će ploče biti uronjene još 60 dana. Nakon 180 dana ploče su izvađene iz mora. Stanje kompozita vidljivo je na slici 5.25. U tablici 5.9 su dani rezultati masa obraštaja nakon 180 dana.



Slika 5.24 Test ploče nakon 120 dana



Slika 5.25 Test ploča jute bez zaštitnog premaza nakon 180 dana.

Tablica 5.9 Masa mokrog obraštaja

Ploča	m_{obr} [g]
Lan	82,74
Juta	115,17
Lan premaz	42,27
Juta premaz	6,59

Rezultati daju uvid da je potrebno postaviti neku vrstu premaza protiv obraštaja, jer on daleko više štiti od bilo kakvih oštećenja prilikom izrade kompozita i naknadne obrade, ali i obavlja svoj primarni zadatak, sprečavanje nastanka obraštaja. Mana premaza je upravo utjecaj na ekosustav. Sama svrha premaza je zaštita od obraštaja, ali time treba obratiti pažnju u daljnjem razvoju ovakvih tehnologija koliki učinak ostavlja na more i morsko okruženje te kako ublažiti taj utjecaj uz ispunjenje iste zadaće.

6. ZAKLJUČAK

Morska voda predstavlja veoma agresivno i zahtjevno okruženje za bilo koju vrstu materijala. Kompoziti ojačani prirodnim vlaknima, izloženi tako zahtjevnom radnom okruženju se brže razgrađuju s vremenom i gube svoja mehanička svojstva. S nedostatkom istraživanja ovog područja, cilj ovoga rada bio je prikazati utjecaj morske vode na mehanička, kemijska i fizikalna svojstva odabranih kompozita. Budući da je higroskopnost prirodnih vlakana izraženija nego kod drugih vrsta vlakana, prije ispitivanja mehaničkih svojstva napravljen je test higroskopnosti kako bi se mogla napraviti usporedba s kompozitima tretiranim pri normalnim atmosferskim uvjetima.

Kao materijal s boljim svojstvima pokazao se kompozit ojačan lanenim vlaknima naspram kompozita ojačanog jutenim vlaknima. Navedeni kompoziti pokazali su značajan gubitak mehaničkih svojstva prodorom vode. Također je primijećen značajan pad modula elastičnosti i modula savijanja. Navedeni kompoziti nemaju dobra mehanička svojstva žilavost pri atmosferskim uvjetima, a s povećanjem duktilnosti nakon prodora vode došlo je do povećanja žilavosti istih. Test obraštaja daje jasan prikaz problema nezaštićenosti materijala u agresivnom okruženju. S upijanjem vode došlo je i do razvoja organizama unutar samoga kompozita, što dovodi do bržeg raspada materijala, a razvoj obraštaja po samom materijalu mijenja hrapavost i izgled površine koja je u doticaju s morskom vodom.

Rezultati ovog rada ukazuju na značajan gubitak mehaničkih svojstva kompozita ojačanih prirodnim vlaknima izloženih agresivnoj okolini, osobito slabu otpornost na udarna opterećenja. Obzirom na ograničeni opseg ovog istraživanja, preporuka je provesti dodatna istraživanja s drugačijom orijentacijom vlakana ili u kombinaciji s drugim vrstama prirodnih vlakana. Nužna ja pažljiva obrada nakon izrade materijala radi sprječavanja oštećenja nastalih prilikom same izrade te nanošenje zaštite određenim lakovima ili premazima radi povećanja otpornosti na razvoj obraštaja kako bi se spriječilo nepotrebno povećanja mase cijele konstrukcije ili povećanja otpora ukoliko se kompozit koristi za gradnju plovila.

LITERATURA

- [1] Nagavally R. R.: Composite materials – History, types, fabrication, techniques, advantages and applications, Kakatiya Institute of Technology & Science, Warangal, Telangana, India, 2006.
- [2] Kessler M. R., Thakur V. K.: Green biorenewable biocomposites, Apple Academic Press, Oakville, Kanada, 2016
- [3] <https://renewable-carbon.eu/publications>, (pristupljeno 18.02.2022.)
- [4] Rosato D.V.: Handbook of composites, An overview of composites, stranice 1 – 14, Springer, Boston, Ma, SAD, 1982.
- [5] Marić G.; Materijali II, autorizirano predavanje, FSB, Zagreb, 2012.
- [6] Tawfik B. E., Leheta H.: Weight reduction and strengthening of marine hatch International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, vol 14, stranica 1 – 6, 2016.
- [7] Egbo K. M.: A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering, Department of Mechanical Engineering, Wichita State University, Wichita 67260, KS, SAD.
- [8] <https://romeorim.com/what-are-composites> (pristupljeno 18.02.2022)
- [9] Potyrała P. B.; Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures, Universitat Politècnica de Catalunya, Bachelona, Španjolska 2011
- [10] A. K. Mohanty, M. Misra, G. Hinrichsen: Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview, CRC Press, Boca Raton, SAD, 2005
- [11] Balakrishnan P., John M.J, Pothan L., Sreekala M.S., Thomas S.: Natural Fibre Composites and their Applications in Aerospace Engineering, Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering, Processing, stranice 365 – 383, 2016.
- [12] Hadžić N.: Tehnologija brodogradnje I, FSB, Zagreb, 2018.

-
- [13] Mohammed L., Ansari M. N. M., Pua G., Jawaid M., Islam M.S.: A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications, International Journal of Polymer Science, Vol. 2015, stranice 1 - 15, 2015.
- [14] Testoni G. A.: In situ long-term durability analysis of biocomposites in the marine environment, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Pariz, 2015
- [15] Osnove teorije uzoraka, Inženjerska statistika, https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/30_05_2012__15718_Osnove_teorije_uzoraka_2011.pdf (21.02.2022.)

PRILOZI

I. CD-R disc