

# Utjecaj prirodnih vlakana na mehanička svojstva kompozita

---

**Tucman, Ines**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:023144>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-28**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ines Tucman**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Ana Pilipović, dipl. ing.

Student:

Ines Tucman

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći se znanjima stečenim tijekom studija i navedenom literaturom.

Zahvaljujem svojoj mentorici, izv. prof. dr. sc. Ani Pilipović na ideji, savjetima i velikoj pomoći pri pisanju ovog rada. Također zahvaljujem Maji Rujnić Havstad na pomoći pri pisanju i Bruni Krajačiću pri izradi silikonskih kalupa.

Zahvaljujem i dr. sc. Zorani Kovačević s Tekstilno tehnološkog fakulteta koja je omogućila mljevenje vlakana i Josipu Puljku, mag. ing. str. iz tvrtke Agroproteinka d.d. za donaciju vlakana.

Zahvaljujem svojim prijateljima i kolegama na podršci i potpori.

Na kraju, hvala velika mojim roditeljima i sestri na savjetima, podršci i potpori te svemu što su učinili za mene tijekom studiranja i pisanja ovog rada.

Ines Tucman



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **INES TUCMAN**

Mat. br.: 0035208456

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj pripreme prirodnih vlakna na mehanička svojstva kompozita**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of natural fiber preparation on mechanical properties of composites**

Opis zadatka:

Polimerni kompoziti već dugi niz godina imaju veliku primjenu u transportnoj industriji, no s obzirom na resurse za proizvodnju, industrija se okreće primjeni kompozitnih tvorevina gdje ojačavalo čine prirodna vlakna, bilo da su životinjskog ili biljnog podrijetla ili mineralna vlakna ili čestice.

Nažalost takva prirodna vlakna osim što nemaju mehanička svojstva kao i staklena, ugljična, aramidna itd. vlakna, kompatibilnost s matricom je loša. Najčešće je to zbog same prirode prirodnih vlakana, te ih je potrebno kemijski ili fizikalno modificirati.

U teorijskom dijelu rada potrebno je opisati prirodna vlakna koja se upotrebljavaju u kombinaciji s polimernim matricama, njihove načine modifikacije s težištem na kokosova vlakna. Također je potrebno opisati proces proizvodnje i prerade kokosovih vlakana, te prerade kompozita s tim vlaknima. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno kemijski modificirati vlakna s različitim koncentracijama lužine te umiješati takva modificirana kokosova vlakna u duromernu matricu na temelju plana pokusa uz različite postotke vlakana u matrici.

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

Zadatak zadan:  
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:  
7. srpnja 2022.

Predviđeni datum obrane:  
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao: *Ana Pilipović*  
prof. dr. sc. Ana Pilipović

Predsjednica Povjerenstva:  
*Runje*  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	10
2. PRIRODNI KOMPOZITI .....	11
2.1. Prirodna vlakna .....	11
2.1.1. Mehanička svojstva i kemijski sastav pojedinih prirodnih vlakana .....	13
2.2. Sintetske matrice .....	14
2.2.1. Epoksidna smola .....	14
3. KOKOSOVA VLAKNA .....	16
3.1. Proces proizvodnje kokosovih vlakana .....	19
3.2. Prerada kokosovih vlakana .....	20
3.2.1. Kemijske modifikacije kokosovih vlakana .....	21
3.2.2. Fizikalne modifikacije kokosovih vlakana .....	24
4. KOMPOZITI OD KOKOSOVIH VLAKANA .....	26
4.1. Primjena kompozita ojačanih kokosovim vlaknima .....	32
4.2. Prirodna vlakna i okoliš .....	35
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	36
5.1. Izrada kalupa .....	36
5.2. Priprema vlakana .....	42
5.2.1. Fizikalno obrađivanje vlakana .....	43
5.2.2. Kemijsko obrađivanje vlakana .....	44
5.3. Izrada kompozita .....	44
5.4. Ispitivanje mehaničkih svojstava kompozita .....	47
5.4.1. Ispitivanje savojne žilavosti .....	47
5.4.2. Ispitivanje rasteznih svojstava .....	49
5.4.3. Mikrostruktura presjeka kompozita .....	51
5.5. Statistička analiza podataka .....	54
5.5.1. Modul rasteznosti .....	55
5.5.2. Rastezna čvrstoća .....	58
5.5.3. Istezanje .....	59

---

5.5.4. Savojna žilavost .....	61
5.5.5. Optimizacija.....	64
5.6. Rasprava o rezultatima pokusa .....	66
6. ZAKLJUČAK.....	67
LITERATURA.....	68
PRILOZI .....	70

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Jutena vlakna [3].....	12
Slika 2. Vlakna abake [4].....	12
Slika 3. Vlakna ananasa [5] .....	12
Slika 4. Kokosova palma i plod [10] .....	16
Slika 5. Bijela kokosova vlakna [11].....	17
Slika 6. Sastav kokosovog vlakna [12].....	17
Slika 7. Struktura prirodnih vlakana [12] .....	18
Slika 8. Stroj za odvajanje vlakna od ljuske [13] .....	19
Slika 9. Sastav vlakna: 1) prije i 2) poslije obrađivanje nekom od kemijskih modifikacija. [12] .....	21
Slika 10. Shematski prikaz stroja u kojem se odvija obrađivanje plazmom [18] .....	25
Slika 11. Ručno polaganje [19].....	26
Slika 12. Shematski prikaz oblikovanja naštrcavanjem [21] .....	27
Slika 13. Jednopusni ekstruder [19] .....	28
Slika 14. Zone pužnog vijka [19] .....	29
Slika 15. RTM postupak [19].....	29
Slika 16. Čestice od ljuske kokosa [22].....	30
Slika 17. Sjedalo od polimera ojačanog kokosovim vlaknima [23].....	32
Slika 18. Industrija navodnjavanja [24].....	33
Slika 19. Prostirka od kokosovih vlakana [24] .....	33
Slika 20. Posuđe za jelo [25].....	34
Slika 21. Posude za spremanje [25].....	34
Slika 22. Kanta od kokosovih vlakana [25] .....	34
Slika 23. Pramodel za ispitivanje rasteznih svojstava .....	36
Slika 24. Pramodel za ispitivanje savojne žilavosti .....	37
Slika 25. Pramodel u računalnom programu <i>SolidWorks</i> .....	37
Slika 26. 3D ispis pramodela .....	38
Slika 27. 3D ispis pramodela .....	38
Slika 28. Naknadno čišćenje pramodela vodenim mlazom .....	39
Slika 29. Priprema kalupa .....	39
Slika 30. Premazivanje kalupa vazelinom .....	40
Slika 31. Prskanje kalupa PTFE sprejom .....	40



---

Slika 32. Izrada kalupa .....	41
Slika 33. Kalup .....	41
Slika 34. Vlakna kokosa iz tvrtke <i>Agroproteinka</i> .....	42
Slika 35. Mlin <i>MIXER MILL MM 200</i> .....	43
Slika 36. Tresilica za sito .....	43
Slika 37. Postupak dodavanja vlakana u smolu .....	45
Slika 38. Popunjavanje kalupnih šupljina.....	45
Slika 39. Popunjavanje kalupnih šupljina.....	46
Slika 40. Charpyjev bat.....	47
Slika 41. Charpyjev bat.....	47
Slika 42. Usporedba srednjih vrijednosti savojne žilavosti (stanja od 1 do 11 su stanja pokusa, a stanje 12 se odnosi na čistu epoksidnu smolu).....	49
Slika 43. Dijagram rasteznog naprezanja – istezanja (stanja od 1 do 11 su stanja pokusa, a stanje 12 se odnosi na čistu epoksidnu smolu) .....	51
Slika 44. Mikrostruktura ispitka 1 – 20 % neobrađivanih vlakana .....	52
Slika 45. Mikrostruktura ispitka 4 – 10 % neobrađivanih vlakana.....	52
Slika 46. Mikrostruktura ispitka 7 – 10 % vlakana obrađivanih 5 dana u 15 %-tnoj otopini...53	
Slika 47. Prikaz ovisnosti modula rasteznosti o promjenama udjela vlakana i vremena uranjanja pri koncentraciji otopine od 10 % .....	57
Slika 48. Prikaz ovisnosti rastezne čvrstoće o promjenama udjela vlakana i vremena uranjanja pri koncentraciji otopine od 10 % .....	59
Slika 49. Prikaz ovisnosti istezanja o promjenama udjela vlakana i vremena uranjanja pri koncentraciji otopine od 10 % .....	61
Slika 50. Prikaz ovisnosti savojne žilavosti o promjenama udjela vlakana i vremena uranjanja pri koncentraciji otopine od 10 % (srednja razina koncentracije otopine). .....	63

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Mehanička svojstva pojedinih prirodnih vlakana [6].....	13
Tablica 2. Kemijski sastav pojedinih prirodnih vlakana [7] .....	13
Tablica 3. Primjeri obrađivanja i načina proizvodnje polimernih kompozita od kokosovih vlakana [20] .....	31
Tablica 4. Potpuni faktorski plan pokusa s tri faktora na dvije razine i s tri ponavljanja u centru .....	54
Tablica 5. Provedeni plan pokusa i vrijednosti odziva .....	55
Tablica 6. Popis faktora .....	55
Tablica 7. Rezultati analize varijance – modul rasteznosti.....	56
Tablica 8. Statistički podaci o modelu.....	56
Tablica 9. Rezultati analize varijance – rastezna čvrstoća.....	58
Tablica 10. Statistički podaci o modelu.....	58
Tablica 11. Rezultati analize varijance – istežanje.....	60
Tablica 12. Statistički podaci o modelu.....	60
Tablica 13. Rezultati analize varijance – savojna žilavost .....	62
Tablica 14. Statistički podaci o modelu.....	62
Tablica 15. Uvjeti optimiranja .....	64
Tablica 16. Rješenja optimiranja.....	64
Tablica 17. Uvjeti optimiranja .....	65
Tablica 18. Rješenja optimiranja.....	65
Tablica 19. Rezultati ispitivanja savojne žilavosti kompozita .....	70
Tablica 20. Rezultati ispitivanja savojne žilavosti čiste epoksidne smole .....	74
Tablica 21. Rezultati ispitivanja rasteznih svojstava kompozita .....	74
Tablica 22. Rezultati ispitivanja rasteznih svojstava čiste epoksidne smole .....	81

**POPIS KRATICA**

---

Kratika	Oznaka
H <sub>2</sub> O	voda
HCO <sub>3</sub>	bikarbonat
MAPP	metil-acetilen-propadien
NaHCO <sub>3</sub>	natrijev hidrogenkarbonat
NaOH	natrijev hidroksid
OH	hidroksid
PLA	polilaktidna kiselina
PP	polipropilen
PTFE	politetrafluoretilen
RTM	injekcijsko-posredno prešanje
SEM	skenirajući elektronski mikroskop

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$a_{cu}$	$\text{kJ/m}^2$	savojna žilavost
$A$	$\text{mm}^2$	površina poprečnog presjeka ispitnog tijela
$b$	mm	širina ispitnog tijela
$E$	MPa	modul rasteznosti
$E_c$	J	apsorbirana energija tijekom loma
$F$	N	sila
$F_{\max}$	N	maksimalna sila
$F_P$	N	prekidna sila
$h$	mm	debljina ispitnog tijela
$L$	mm	razmak između čeljusti kidalice
$L_0$	mm	mjerno područje
$R_m$	$\text{N/mm}^2$	rastezna čvrstoća
$R_P$	$\text{N/mm}^2$	prekidna čvrstoća
$\varepsilon$	mm/mm	istezanje
$\sigma$	$\text{N/mm}^2$	naprezanje

---

**SAŽETAK**

Polimerni kompoziti se primjenjuju već dugi niz godina u raznim industrijama, a pogotovo u transportnoj. S obzirom na resurse za proizvodnju, industrija se sve više okreće primjeni kompozitnih tvorevina gdje ojačavalo čine prirodna vlakna ili čestice. Za razliku od konvencionalnih vlakana (staklenih, ugljičnih ili aramidnih), vlakna prirodnog porijekla imaju lošu kompatibilnost s polimernom matricom pa te je često potrebna predobrada vlakana kako bi se poboljšala kompatibilnost. U teorijskom dijelu rada težište je na kokosovim vlaknima te su opisana njihova svojstva, prerada i način proizvodnje. U praktičnom dijelu rada opisano je kemijsko i fizikalno tretiranje vlakana, izrada kompozitne tvorevine i ispitivanje mehaničkih svojstava. Osim navedenog, uspoređena su mehanička svojstva kompozitnih ispitaka i ispitaka od čiste epoksidne smole, materijala matrice kompozita.

Ključne riječi: prirodni kompoziti, prirodno ojačavalo, kokos, vlakna

---

**SUMMARY**

Polymer composites have been used for many years in various industries, especially in transport. Considering the resources for production, the industry is turning more and more to the application of composite products where the reinforcement consists of natural fibres or particles. Unlike conventional fibres (glass, carbon or aramid), fibres of natural origin have poor compatibility with the polymer matrix, so fibre pretreatment is often required to improve compatibility. In the theoretical part of the work, the focus is on coconut fibres; their properties, processing and production methods are described. The practical part of the work describes chemical and physical treatment of fibres, making of a composite product and testing of mechanical properties. In addition to the above, mechanical properties of composite tests and tests made of pure epoxy resin, the matrix material of the composite, were compared.

Key words: natural composites, natural reinforcement, coconut, fiber

## 1. UVOD

Proizvodnja sirovina, materijala i na kraju samog proizvoda, zatim njihova uporaba i odlaganje imaju veliki gospodarski i ekološki utjecaj na ljudski život. Iskoristivost sirovina i ekološka prihvatljivost može se povećati zatvaranjem kruga, tj. stvaranjem oporabljivoga i trajnoga proizvoda, ali isto tako i primjenom obnovljivih izvora sirovina. Konvencionalni kompoziti iziskuju puno energije za proizvodnju i prilikom proizvodnje ispuštaju štetne emisije. Zbog toga je proizvodnja i uporaba prirodnih kompozita u neprestanom rastu. Industrija se sve više okreće primjeni prirodnih kompozitnih tvorevina gdje ojačavalo čine prirodna vlakna ili čestice. Prirodna vlakna mogu biti biljnog, životinjskog i mineralnog porijekla. Trenutno se najviše primjenjuju biljna vlakna kao što su lanena, jutena, agavina i kokosova. Kokosova vlakna ističu se dobrim prekidnim istežanjem te odličnom otpornošću na vanjske utjecaje, a posebno na morsku vodu. Kokosova vlakna u usporedbi s konvencionalnim nemaju tako dobra rastezna svojstva, a kako bi se ista poboljšala često se kombiniraju s polimernim matricama. Za razliku od konvencionalnih vlakana (staklenih, ugljičnih ili aramidnih), vlakna prirodnog porijekla imaju lošu kompatibilnost s polimernom matricom pa je često potrebna predobrada vlakana kako bi se poboljšala kompatibilnost, pa se vlakna obrađuju fizikalnim ili kemijskim metodama. Jedna od najčešće primjenjivanih kemijskih obrada kokosovih vlakana je obrada lužinama, odnosno alkalna obrada. Obrađivanje lužinama se najčešće provodi uranjanjem vlakna u otopinu natrijevog hidroksida. Ipak, za okoliš je prihvatljiviji natrijev bikarbonat pa se istraživanja okreću utjecaju otopina natrijevog bikarbonata.

Cilj ovog rada je ispitati utjecaj različitih vremena uranjanja i koncentracija otopine natrijevog bikarbonata te udjela vlakana u polimernoj matrici. Dakle, kao materijal ojačavala primjenjuju se kokosova vlakna, a kao materijal matrice epoksidna smola.

## 2. PRIRODNI KOMPOZITI

Prirodni kompoziti su kompozitni materijali načinjeni od: [1]

1. Prirodnih ojačavala i sintetskih matrica (najčešće polimernih)
2. Prirodnih matrica (biopolimera) i sintetskih ojačavala
3. Prirodnih ojačavala i prirodnih matrica.

U slučaju da je kompozit načinjen i od prirodnih ojačavala i od prirodne matrice onda se takva vrsta kompozita naziva *zeleni* kompozit.

### 2.1. Prirodna vlakna

Prirodna vlakna su proizvod prirodnih procesa žive (biljni i životinjski svijet) i nežive prirode (minerali). U prirodi se mogu pronaći u obliku u kojem se mogu izravno uporabiti kao tekstilna sirovina (npr. pamuk, vuna) ili u takvu stanju da je njihova uporaba moguća nakon fizikalno-mehaničkih obrada (npr. lan, juta, svila). Tri su glavne skupine prirodnih vlakana, a to su: biljna vlakna građena od celuloze, životinjska vlakna građena od bjelančevina, te mineralna vlakna silikatnog minerala krizotila. Biljna vlakna mogu izrastati iz sjemenka (npr. kokos i pamuk), biti sastavni dio kore stabljike (npr. lan, konoplje i juta) ili lišća (npr. sisal, agava i banana). Životinjska su vlakna dlačni pokrivač (runo) nekih životinja (ovca, koza, kunić, deva, ljama, alpaka, vikunja i dr.) ili ih proizvode gusjenice svilenih prelaca pri začahurivanju i tvorbi kukuljice, u fazi pripreme za preobrazbu u leptira. U prirodi ima više vrsta svilenih prelaca (svilaca), a najvažniji je dudov svilac, koji proizvodi najkvalitetniju svilu. Vlakna drugih svilenih prelaca nazivaju se tusah, eria, anafe i dr., ovisno o vrsti svilenoga prelca. Jedini je predstavnik prirodnih mineralnih vlakana azbest. Prilikom razvoja bilo koje industrijske grane potrebno je imati na umu dugoročnu dostupnost sirovina. [2]

Kako bi se osigurala trajna opskrba prirodnim vlaknima, nužno je poticati razvoj poljoprivredne proizvodnje i zdravih ekosustava. Takva poljoprivreda označava ravnotežu između očuvanja prirodnih dobara i njihove primjene, kako na lokalnom tako i na globalnom planu. To pretpostavlja trajni uzgoj biljaka s prirodnim vlaknima, skrb o primjeni poljoprivrednih dobara i očuvanje ekosustava. [2] Na slikama 1, 2, 3 prikazana su prirodna vlakna jute, abake i ananasa.





Slika 1. Jutena vlakna [3]



Slika 2. Vlakna abake [4]



Slika 3. Vlakna ananasa [5]

### 2.1.1. Mehanička svojstva i kemijski sastav pojedinih prirodnih vlakana

U tablicama 1 i 2 prikazana su mehanička svojstva i kemijski sastav kokosovih vlakana u usporedbi s drugim prirodnim vlaknima.

Tablica 1. Mehanička svojstva pojedinih prirodnih vlakana [6]

Vlakno	Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )	Duljina (mm)	Prekidno istezanje (%)	Rastezna čvrstoća (MPa)	Rastezni modul (GPa)
Ramija	1,5	900 - 1200	2 - 3,8	400 - 938	44 - 128
Lan	1,5	5 - 900	1,2 - 3,2	345 - 1830	27 - 80
Konoplja	1,5	5 - 55	1,6	550 - 1110	58 - 70
Juta	1,3	1,5 - 120	1,5 - 1,8	393 - 800	10 - 55
Agava	1,5	900	2 - 2,5	507 - 855	9,4 - 28
Pamuk	1,5	10 - 60	3 - 10	287 - 800	5,5 - 13
<b>Kokos</b>	<b>1,2</b>	<b>20 - 150</b>	<b>15 - 30</b>	<b>131 - 220</b>	<b>4 - 6</b>
Svila	1,3	Neprekidna	15 - 60	100 - 1500	5 - 25
Vuna	1,3	38 - 152	13,2 - 35	50 - 315	2,3 - 5
Meko drvo	1,5	-	-	1000	40

Tablica 2. Kemijski sastav pojedinih prirodnih vlakana [7]

Vlakno	Celuloza (mas. %)	Hemiceluloza (mas. %)	Lignin (mas. %)	Vosak (mas. %)
Bambus	26 - 43	30	21 - 31	-
Lan	71	18,6 - 20,6	2,2	1,5
Kenaf	72	20,3	9	-
Juta	61 - 71	14 - 20	12 - 13	0,5
Konoplja	68	15	10	0,8
Ramija	68,6 - 76,2	13 - 16	0,6 - 0,7	0,3
Abaka	56 - 63	20 - 25	7 - 9	3
Sisal	65	12	9,9	2
<b>Kokos</b>	<b>32 - 43</b>	<b>0,15 - 0,25</b>	<b>40 - 45</b>	<b>-</b>
Uljna palma	65	-	29	-

Ananas	81	-	12,7	-
Pšenična slama	38 - 45	15 - 31	12-20	-

Iz tablica 1 i 2 može se uočiti da kokosova vlakna sadrže vrlo visoki udio lignina, najviše od svih navedenih prirodnih vlakana, a mehanička svojstva (rastezna čvrstoća i modul rasteznosti) su lošija od većine vlakana.

## 2.2. Sintetske matrice

Iako se teži postići primjena kompozitnih tvorevina ojačanih prirodnim ojačavalima u prirodnim matricama, nažalost takve kombinacije nisu dovoljno dobro istražene i ispitane pa se najčešće kombiniraju prirodna vlakna i sintetske matrice. To su najčešće biološki nerazgradivi polimeri nastali derivacijom nafte, duromeri (epoksidna smola, fenolna smola) i plastomeri (polietilen, polipropilen, poli(vinil-klorid), polistiren).

### 2.2.1. Epoksidna smola

Epoksidne smole se primjenjuju kao matrice u kompozitima zbog jednostavne primjene, relativno niske cijene, odličnih mehaničkih svojstava, dobre kemijske postojanosti, te zadržavanja dobrih mehaničkih svojstava i dimenzija pri povišenoj temperaturi i vlazi. Nadalje, epoksidna smola dobro reagira (ostvaruje dobru adheziju) s većinom vrsta vlakana, pa tako i s prirodnima. Budući da pri proizvodnji, epoksidne smole prolaze kroz period vrlo niske viskoznosti, mogu se prerađivati brojnim postupcima prerade. Epoksidi su najčešće dvokomponentni, pri čemu se u procesu proizvodnje dodaje umreživalo koji postaje sastavni dio strukture matrice. Nakon miješanja epoksida i umreživala, pod djelovanjem topline dolazi do očvršćivanja, što se događa nekoliko sati. Konačna svojstva epoksidne matrice pokazuju izrazitu krhkost, što dovodi do znatne osjetljivosti s obzirom na pojavu pukotina. Još neki nedostaci su viša cijena proizvodnje u odnosu na npr. poliestere (posebice specijalne vrste epoksida koje se primjenjuju u zrakoplovstvu), osjetljivost na vlagu, spora polimerizacija i mala postojanost na neke organske spojeve (npr. organske kiseline i fenole). Glavne prednosti epoksida su mogućnost modificiranja svojstava prema postavljenim zahtjevima, mogućnost kontrole žilavosti te lagana i sigurna proizvodljivost zbog male količine štetnih tvari koje se pri tome oslobađaju. Uz to su dobre kemijske postojanosti te dobre dimenzijske i toplinske stabilnosti. Epoksidi se primjenjuju u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji, na primjer kod zrakoplovnih dijelova izloženih visokim temperaturama i vlazi kao što su vrata pomoćne

---

pogonske jedinice (eng. APU) i aerodinamičko kućište motora, odnosno gondola motora (eng. engine nacelle). [8]

### 3. KOKOSOVA VLAKNA

Kokos (*lat. Cocos nucifera*) je drvenasta biljka iz porodice palmi (*lat. Areaceae, Palmae*). Premda se podrijetlo kokosa ne može točno utvrditi, smatra se da potječe iz jugoistočne Azije, a najviše ga ima na obalama i otocima Tihog i Indijskog oceana. Indija je zajedno sa Šri Lankom glavni izvoznik, a uz njih veliku količinu kokosovih vlakana izvoze Tajland, Vijetnam i Filipini. [9]

Stablo kokosa je vrlo tanko i visoko te može narasti do 30 metara. Unatoč visini i vitkosti, stablo je iznimno čvrsto i savitljivo, ima duboke bočne korijene koji sežu sve do podzemnih voda. Zbog tih karakteristika sama biljka odolijeva jakim nanosima vjetra, pa čak i tsunamijima. Krošnja je gusta s perastim listovima i širi se na vrhu stabla, a listovi su uski i mogu biti dugački do 4 m. [9]

Sam plod se sastoji od usplođa, mjesta između tankog vanjskog ovoja koji je nepropustan, i čvrstog unutarnjeg sloja. Usplođe skriva bijelu sjemenku i dragocjenu mliječnu tekućinu, tj. kokosovo mlijeko. [9] Kokosova palma i plod prikazani su slikom 4.



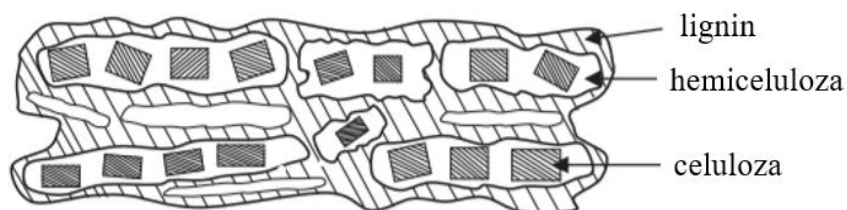
Slika 4. Kokosova palma i plod [10]

Kokosova vlakna se nalaze između ljuske, koja odvaja mesnati dio voća, i vanjskog ovoja. Razlikuju se dvije vrste kokosovih vlakana ovisno o zrelosti kokosa – smeđa i bijela vlakna. Smeđa vlakna kokosa dolaze od zrelih, već ubranih kokosa, čvrsta su ali ne toliko savitljiva. Nasuprot smeđim vlaknima, bijela se dobivaju iz nezrelih kokosa i nisu toliko čvrsta, ali su savitljivija. Bijela kokosova vlakana prikazana su na slici 5. Zbog visokog udjela lignina u kokosovim vlaknima ona su izdržljiva, otporna na vremenske uvjete i morsku vodu. Vlakna također imaju veliko prekidno istežanje, odnosno mogu biti rastegnuta izvan granice elastičnosti bez puknuća. [9]



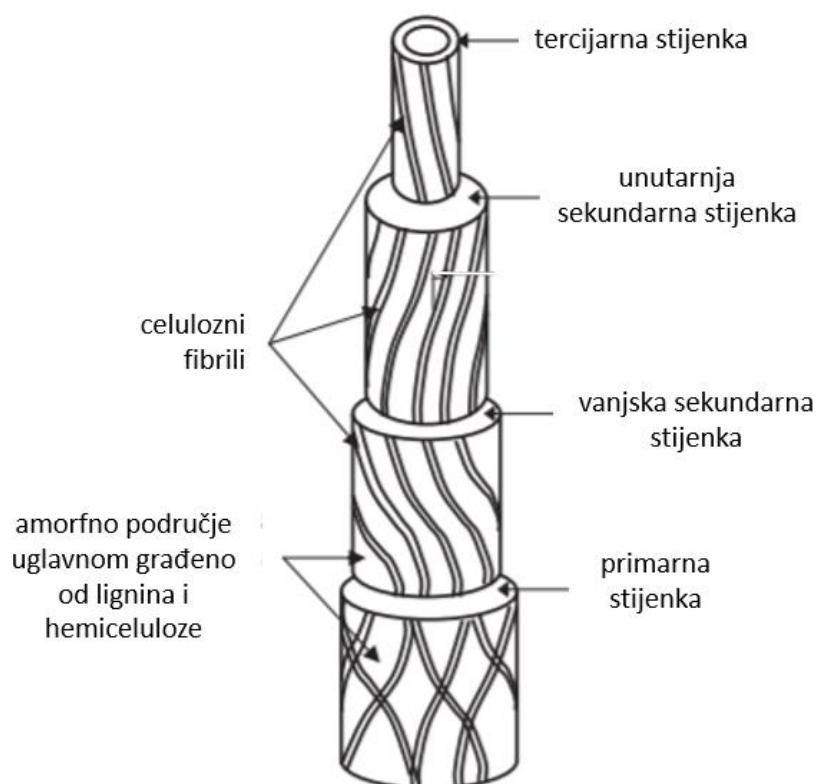
Slika 5. Bijela kokosova vlakna [11]

Kemijski se kokosova vlakna sastoje uglavnom od lignina, hemiceluloze i celuloza. U tablici 2 prikazan je kemijski sastav neobrađenih vlakana kokosa. Iz tablice je vidljivo da se (slika 6) kokosovo vlakno sastoji od 32 do 43 % celuloze, 0,15 do 25 % hemiceluloze, 40 do 45 % lignina i oko 3 do 4 % pektina. Razlike u svojstvima vlakana se mogu pripisati načinu na koji su vlakna ekstrahirana ili o metodi ekstrakcije. [12]



Slika 6. Sastav kokosovog vlakna [12]

Toplinska stabilnost vlakana odnosi se na najveću moguću temperaturu na kojoj vlakno može ostati otporno na raspadanje. Toplinska razgradnja vlakana povezana je s razgradnjom hemiceluloze/pektina i celuloze/lignina. Celuloza se razgrađuje između 240 i 350 °C, lignin između 280 i 500 °C, a hemiceluloza između 200 i 260 °C. Utvrđeno je da obrađivanje vlakana lužinama, o čemu će detaljnije biti riječ u nastavku rada i hibridizacija kompozita učinkovito poboljšavaju toplinsku stabilnost vlakana i samog kompozita. Mikrostruktura vlakana se promatra na poprečnom presjeku SEM mikroskopom gdje se vidi amorfna mikrostruktura, kao i šupljina u sredini vlakna. Neobrađena vlakna kokosa imaju hrapavu površinu i podjednako razmaknute jame (rupice). Takav tip jama naziva se sferne praznine. [12] Općenita struktura većine prirodnih celuloznih vlakana prikazana je slikom 7.



Slika 7. Struktura prirodnih vlakana [12]

Dok je plod još zelen, odnosno dok jezgra nije u potpunosti zrela, on daje zdravi mliječni napitak bogat kalijem i mineralnim sastojcima. Osušen i nariban plod poznat je pod nazivom korpa i primjenjuje se kao brašno za kruh ili kao osnova za neka druga peciva, ulje ili maslac. Kokos se primjenjuje i u kozmetičkoj industriji za kreme ili sapune i u kemijskoj industriji za proizvodnju eksploziva. Od vlaknastih dijelova ploda dobivaju se čvrste niti od kojih je nekoć

upredana užad, tkani tepisi i pravljene četke, a danas služe i za izradu izolacijskog materijala u građevini i kao ojačavala u kompozitnim materijalima. Ljuske su vrlo čvrste i drvenaste pa su se oduvijek upotrebljavale kao posuđe za domaćinstvo i ukrasni predmeti. Danas se od njih oblikuje dugmad i razni nakit. Lišće se od davnina upotrebljavalo za pokrivanje krovova i izradu pletenih rukotvorina, odlična je zaštita od komaraca pa se prerađuje u insekticide. Debla su našla široku primjenu kao građevinski materijal. Pored greda, od njih se prave i sve vrste zidnih obloga, namještaj, a kora se prerađuje u gumu. [13]

### 3.1. Proces proizvodnje kokosovih vlakana

Proces proizvodnje kokosovih vlakana sastoji se od nekoliko glavnih koraka. Prvi korak je berba plodova, a nakon toga slijedi ljuštenje. Razlikuju se kokosi koji sazrijevaju pa sami padnu sa stabla te se pokupe s tla, te oni koji ne padnu na tlo pa se ljudi penju na stabla i ručno beru plodove. Ova metoda je najučinkovitija, ali i najopasnija s obzirom na visinu stabala od oko 30 metara. Kako bi ubrzali ovaj proces penjači su napravili noževe od kamena i trske koje pričvrste uz stopalo. Tako je moguće očistiti 250 stabla dnevno. Unatrag nekoliko godina ljudi su krenuli dresirati majmune koji sada to obavljaju umjesto njih. [14]

Zreli kokosi se odmah ljušte, prilikom čega se upotrebljava oštri nož koji odvaja vlakna od ljuske. Oni kokosi koji nisu dovoljno zreli se pohranjuju na suha mjesta te se čeka njihovo dozrijevanje. Ručno se oljušti oko 2000 kokosa dnevno, dok moderni strojevi za ljuštenje oljušte 2000 kokosa u jednom satu. [14] Jedan takav stroj prikazan je na slici 8.



Slika 8. Stroj za odvajanje vlakna od ljuske [13]



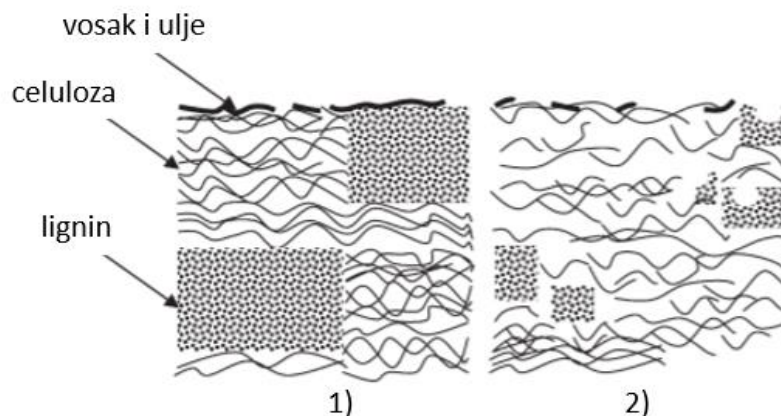
Nakon odvajanja vlakana od ljuske slijedi namakanje vlakana u vodi. Vlakna zrelih kokosa se namaču u običnoj vodi, najčešće u rijekama ili velikim spremnicima i to traje nekoliko mjeseci. Vlakna onih kokosa koji nisu potpuno zreli namaču se u slanoj vodi 8 do 10 mjeseci. Prilikom namakanja na vlakna djeluju mikrobi i ona se otpetljavaju i odvajaju te se mijenja njihova struktura površine. Danas su se razvile tehnike (npr. kemijsko modificiranje) kako bi se ubrzao proces namakanja ili u potpunosti izbjegao. [14]

### **3.2. Prerada kokosovih vlakana**

Glavni nedostaci većine prirodnih vlakana, pa tako i kokosovih, su loša kompatibilnost vlakna i matrice u kompozitu i njihova izrazita tendencija apsorpiranju vlage. Iz tog razloga se razmatraju razni načini obrade i modifikacije kokosovih vlakana. Najčešće se pokušava različitim fizikalnim i kemijskim postupcima izmijeniti svojstva površine vlakana kako bi se poboljšalo njihovo prijanjanje s različitim matricama. [15]

Fizikalni procesi uključuju obrađivanje koronom, plazmom i toplinsku obradu. Fizikalnim procesima se ne mijenja u velikim mjerama kemijski sastav vlakana, ali zato dolazi do strukturnih promjena i promjene površinskih svojstava vlakana, a time i do poboljšanja kompatibilnosti vlakana i matrice. [15]

Celulozna vlakna, kakvo je i kokosovo vlakno, su jako polarizirana i nisu kompatibilna s hidrofobnim polimerima zbog svoje hidrofilne prirode. U mnogim slučajevima moguće je poboljšati kompatibilnost te dvije teško spojive komponente uvođenjem trećeg materijala koji ima svojstva koje polimeri i vlakna ne posjeduju. Dakle samo kemijsko vezivanje vlakna i matrice je često nedovoljno pa se razvijaju različiti mehanizmi spajanja s pomoću dodatnih sredstava. To uključuje morfologiju interfaze, kiselobazne reakcije na sučelju, pojavu površinske energije i pojavu vlaženja odnosno sposobnost tekućine da održava kontakt s čvrstom površinom. Kemijske modifikacije usmjerene su poboljšavanju prijanjanja prirodnih vlakana unutar polimerne matrice i dijele se na obrađivanje silanom, alkalno obrađivanje, acetilaciju, obrađivanje maleinskom kiselinom i enzimsko obrađivanje. [15] Na slici 9 prikazan je sastav vlakna prije i poslije obrađivanja nekom od kemijskih modifikacija.



Slika 9. Sastav vlakna: 1) prije i 2) poslije obrađivanje nekom od kemijskih modifikacija. [12]

### 3.2.1. Kemijske modifikacije kokosovih vlakana

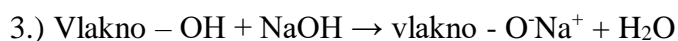
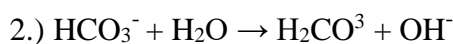
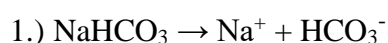
Najčešće kemijske modifikacije kokosovih vlakana uključuju: obrađivanje lužinama, acetilaciju, obrađivanje silanom i obrađivanje maleinskom kiselinom.

#### 3.2.1.1. *Obrađivanje lužinama (alkalno obrađivanje) ili mercerizacija*

Postupak mercerizacije poznat je još iz 1850. godine kada ga je patentirao engleski kemičar John Mercer, a značajnije se počeo primjenjivati početkom 20. stoljeća. Tada se primjenjivao za namakanje tkanine (npr. pamuka), pletiva ili konaca u koncentriranoj (obično 25 %-tnoj) natrijevoj lužini uz istodobno istežanje, kojim bi se postigla veća čvrstoća. [15]

Danas se alkalno obrađivanje ili mercerizacija najčešće primjenjuje kod obrađivanja prirodnih vlakana. Prilikom tog postupka dolazi do uklanjanja određene količine lignina, voska i ulja koja prekrivaju vanjsku površinu stanične stijenke. To rezultira povećanom hrapavošću površine vlakna čime se postiže bolja prionjivost prirodnih vlakna u polimernu matricu, odnosno bolja kompatibilnost matrice i vlakna. Postupak mercerizacije se može razlikovati ovisno o razdoblju koliko traje obrađivanje i o količini koncentracije kojom su vlakna obrađena. Najčešće matrice koje se trenutno primjenjuje u kompozitima ojačanim kokosovim vlaknima su polimerne, uključujući plastomere i duromere. Iako plastomeri imaju prednost nad duromerima jer se lakše recikliraju, općenito se bolja mehanička svojstva postižu duromerima, poput epoksidne smole i poliestera. [15]

Proveden je velik broj istraživanja koja se svode na to da se mercerizacijom poboljšava kompatibilnost vlakana i matrice, a samim time i svojstva kompozita. Međutim nakon obrađivanje vlakna dolazi do odlaganja kemijskog otpada što uvelike šteti okolišu. Zbog toga je razvijen jednostavan, ekonomičan i ekološki prihvatljiviji postupak na bazi natrijevog bikarbonata. Osim što je taj postupak prihvatljiviji za okoliš, dolazi do značajnog poboljšanja vlačnih, savojnih i posmičnih svojstava obrđivanih vlakana, odnosno čitavog kompozita. Otopina natrijevog bikarbonata je blago alkalna zbog stvaranja iona ugljične kiseline i hidroksida (reakcije 1 i 2) Zato je interakcija između hidroksilnih skupina prisutnih u vlaknu i iona  $\text{Na}^+$  slična onoj koja se događa tijekom tradicionalne alkalne obrade (reakcija 3). [15,16]



Provedena su ispitivanja i uspoređivanja vlakna obrađenih natrijevim bikarbonatom i vlakna obrađenih natrijevom hidroksidom. Ispitivanja su se provodila na dva različita kompozita, od poliesterske matrice i od epoksidne. Za ojačavalo su se u oba slučaja primjenjivala vlakna kokosa duljine od 20 do 180 mm. [15,16]

Kokosova vlakna su se uronila u 10 %-tnu otopinu  $\text{NaHCO}_3$ , što odgovara najvećoj topljivosti ovog spoja u vodi na sobnoj temperaturi. Vlakna su bila uronjena 24, 96 i 168 sati na sobnoj temperaturi. Budući da je otopina  $\text{NaHCO}_3$  blago lužnata, potrebno je duže vrijeme obrade da otopina reagira i da željene rezultate u usporedbi s visoko lužnatom otopinom  $\text{NaOH}$ . Kokosova vlakna se nakon toga vade i uranjaju u običnu vodu na 30 minuta (bez dodavanja kiseline za neutralizaciju). Zatim se suše u pećnici na 50 °C 24 sata. [16]

U kompozitu vlakna mogu biti kontinuirano usmjerena, slučajno usmjerena diskontinuirana, ortogonalno raspoređena ili višesmjerno usmjerena. U ovom slučaju kokosova vlakna su bila diskontinuirana slučajno usmjerena. Kompoziti su bili proizvedeni ručnim polaganjem i hladnim jednoosnim prešanjem. Zatim su ispitna tijela bila izrezana prema normama te su se provela razna ispitivanja. U zaključku je navedeno da analiza rentgenskom difrakcijom otkriva da postupak obrađivanja s  $\text{NaHCO}_3$  nije značajno povećao hrapavost vlakana, međutim došlo je do razgradnje hemiceluloze i pektina iz površine vlakana. Zabilježeno je blago povećanje gustoće kokosovih vlakana, ali i smanjenje njihove toplinske stabilnosti povećanjem ranije

spomenutog vremena uranjanja u  $\text{NaHCO}_3$ . Također je i modul rasteznosti značajno porastao. Vrijeme obrade odnosno uranjanja nije utjecalo na rasteznu čvrstoću. Što se tiče razlike u matricama, krutost i otpornost na udarce je veća za kompozite s poliesterskom matricom u odnosu na epoksidnu. Obrada ne utječe na mehaničku čvrstoću kompozita budući da je  $\text{NaHCO}_3$  blago lužnata otopina, koja ne mijenja značajno površinu vlakana, a time i prijanjanje vlaknaste matrice. Međutim, postižu se poboljšani moduli rastezanja i savitljivosti pogotovo u slučaju kada se vrijeme obrađivanja povećalo na 96 ili 168 sati. Zaključno obrađivanje  $\text{NaHCO}_3$  nije toliko kemijski agresivno kao obrađivanje tradicionalnim  $\text{NaOH}$  i nije toliko učinkovito u povećanju hrapavosti vlakana i poboljšanju prijanjivosti vlakna i matrice. Međutim i dalje je učinkovito u povećanju krutosti kokosovih vlakana, a samim time i cijelog kompozita uz manje štete za okoliš nakon odlaganja. [16]

### 3.2.1.2. Acetilacija

Acetilacija je još jedna od metoda mijenjanja površine prirodnih vlakana u svrhu da budu što hidrofobnija. Acetilacija uvodi acetilnu skupinu u kemijski spoj kao funkcionalnu skupinu. Glavna ideja acetilacije je premazivanje OH skupina vlakana koje su odgovorne za njihov hidrofilni karakter s molekulama koje su više hidrofobne prirode. Osim za postizanje bolje kompatibilnosti, acetilacijom se povećavaju vrijednosti rastezne čvrstoće i modula rasteznosti. Savojna čvrstoća vlakana se također povećava acetilacijom, ali u usporedbi sa sintetskim vlaknima, npr. staklenim, i dalje se bolja svojstva postižu sa staklenim vlaknima. Istraživanja su pokazala da savojna žilavost ostaje ista ili slična uspoređujući kompozite s obrađenim vlaknima i kompozite s neobrađenim. [17]

### 3.2.1.3. Obradivanje silanom

Površinska energija vlakana usko je povezana s njihovom hidrofilnom prirodom. Stoga se istraživanja temelje na proučavanju površinske energije i smanjenju hidrofилности. obradivanje silanom i sredstva za spajanje bazirana na silanu mogu tome pridonijeti. Postoje hidrofilni i hidrofobni silani, hidrofilne silane treba miješati s hidrofobnim kao što su npr. feniltrimetoksisilan. Mješoviti siloksanski prajmeri kojima se obrađuju vlakna imaju poboljšanu toplinsku stabilnost. Obradivanjem silanom se također postiže bolja kompatibilnost matrice i vlakna te se povećavaju vrijednosti istezanja i modula elastičnosti. [15]

#### *3.2.1.4. Obradivanje maleinskom kiselinom*

Danas se ovakav način obradivanja široko primjenjuje ukoliko se želi ojačati kompozite s prirodnim vlaknima. Temeljna razlika prema drugim kemijskim modifikacijama je da se anhidrid maleinske kiseline ne primjenjuje samo za modifikaciju površine vlakana već se njime obrađuje i polimerna matrica. Tako se postiže bolja kompatibilnost vlakana i matrice te poboljšana mehanička svojstva. Prilikom obradivanja vlakana najčešće se primjenjuje smjesa metilaceten-propadiena (MAPP). To je bezbojni plin snažnog, karakterističnog i neugodnog mirisa. [15]

#### *3.2.2. Fizikalne modifikacije kokosovih vlakana*

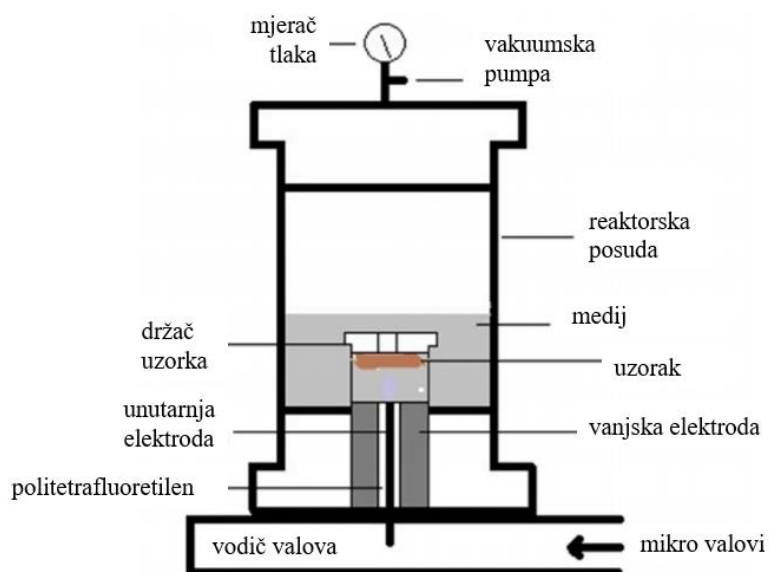
Najčešće fizikalne modifikacije kokosovih vlakana uključuju: korona-obradivanje i plazma-obradivanje.

##### *3.2.2.1. Korona-obradivanje*

Obrada vlakana koronom jedan je od najzanimljivijih načina aktivacije površinske oksidacije. Ovaj proces mijenja površinsku energiju celuloznih vlakana kao što su kokosova. Korona-obradivanjem se otpušta odnosno smanjuje udio celuloze i hemiceluloze. Obrada je učinkovita za poboljšanje kompatibilnosti između hidrofilnih vlakana i hidrofobnih matrica, dovodi do značajnog povećanje rastezne čvrstoće i modula rasteznosti. [15]

##### *3.2.2.2. Plazma-obradivanje*

Obradivanje plazmom je još jedna metoda fizikalnog modificiranja vlakana i vrlo je slična obradivanju koronom. Primjenjuje se za izazivanje promjena na površini materijala, a time se mijenjaju i svojstva. Površinske modifikacije se razlikuju prema vrsti i prirodi plinova. Mogu se proizvesti reaktivni slobodni radikali i skupine ovisno o kojima će se površinska energija povećati ili smanjiti. Nakon što je proveden postupak tekućom plazmom u vodenoj otopini i otopini natrijeva bikarbonata kao mediju, utvrđeno je poboljšanje prijanjanja kokosovih vlakana i matrice u usporedbi sa sirovim kokosovim vlaknima i poboljšanje krutosti kompozita. Rastezna čvrstoća kokosovih vlakana neznatno se smanjuje nakon oba obradivanja, neovisno o vremenu koliko su se obrađivala vlakna. [18] Shematski prikaz stroja u kojem se odvija postupak obradivanja plazmom prikazan je slikom 10.

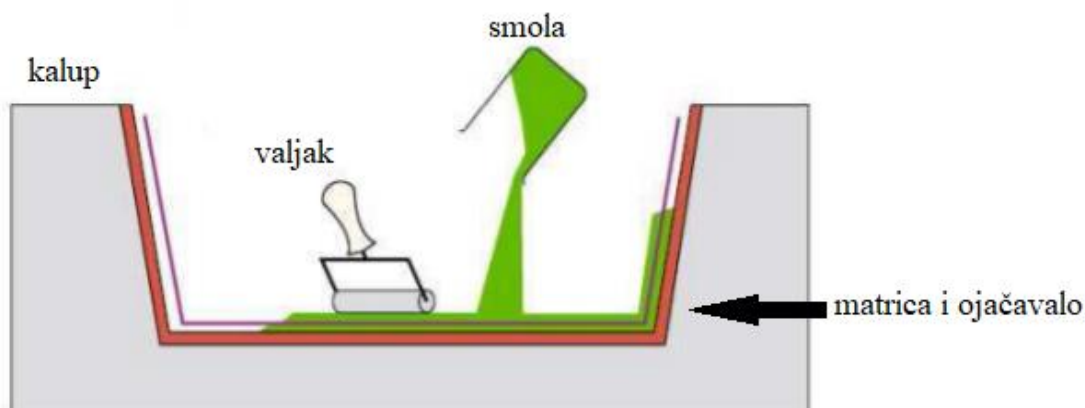


Slika 10. Shematski prikaz stroja u kojem se odvija obrađivanje plazmom [18]

#### 4. KOMPOZITI OD KOKOSOVIH VLAKANA

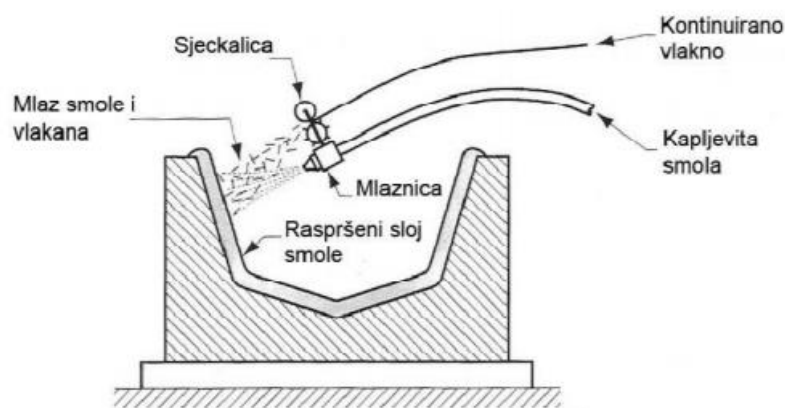
U plastičarskoj industriji kao dodatak polimerima pretežno se rabio talk, kalcijev karbonat, tinjac te staklena i ugljikova vlakna. Godišnje se trošilo oko 2,5 milijuna tona tih dodataka i ojačavala. Postojao je svojevrsni otpor prerađivača prema uporabi prirodnih vlakana, ponajviše zbog njihove velike nasipne gustoće, niske toplinske postojanosti i sklonosti prema upijanju vode, te neprikladnosti opreme za preradu kompozita s prirodnim vlaknima. Do značajne je promjene došlo zadnjih desetak godina. Veće je poznavanje svojstava prirodnih vlakana u plastičarskoj industriji, razvijena je nova oprema za preradu polimera ojačanih prirodnim vlaknima, a postoje i bolja veziva. Sve je to povećalo interes plastičarske industrije za preradu tih kompozita. [19]

Najjednostavniji i najstariji postupak proizvodnje kompozita općenito je ručno polaganje (slika 11). Vlakna povezana u tkanja različitog oblika stavljaju se u donju polovicu kalupa. Na njih se nanosi smola koja se impregnira u ojačavala s pomoću valjaka ili kistova. Do skrućivanja dolazi pri atmosferskim uvjetima. Prednosti su ovog postupka jednostavnost, mali trošak izrade alata (jer postoji samo donja polovica kalupa), veliki izbor vrsta materijala (moguće je preraditi sve vrste matrica i vlakana) i dobavljača, udio vlakana je veći i vlakna su dulja nego u slučaju oblikovanja naštrcavanjem. Nedostaci su: kvaliteta postupka u velikoj mjeri ovisi o spretnosti radnika, teško je proizvesti kompozite s malim udjelom smole bez pukotina, smole koje se ručno polažu obično imaju manju molekulnu masu, što znači da mogu biti štetnije od proizvoda s većom molekulnom masom, upotrebljavaju se smole niske viskoznosti što loše utječe na mehanička svojstva, završna površina je lošije kvalitete. [19]



Slika 11. Ručno polaganje [19]

Sličan postupak ručnom polaganju je oblikovanje naštrecavanjem prikazan slikom 12. To uključuje istovremeno miješanje smole i vlakana dok izlaze iz pištolja za naštrecavanje. Kada se kalup napuni smjesa se zbija valjcima, koji su najčešće metalni. Oblikovanje naštrecavanjem je postupak koji se široko primjenjuje već dugi niz godina, vrlo je jeftin način oblikovanja kompozitne tvorevine, a uz to je cijena izrade alata niska. Najveći nedostatak je taj što se za ojačanja upotrebljavaju samo kratka i sječena vlakna, što uvelike utječe i ograničava mehanička svojstva kompozita. Također, smole moraju imati nisku viskoznost kako bi se mogle što lakše naštrecavati, a to isto tako ide na štetu mehaničkim i toplinskim svojstvima. Potrebna je nešto veća količina smole u usporedbi s drugim postupcima što rezultira povećanjem mase kompozitne tvorevine. [20]

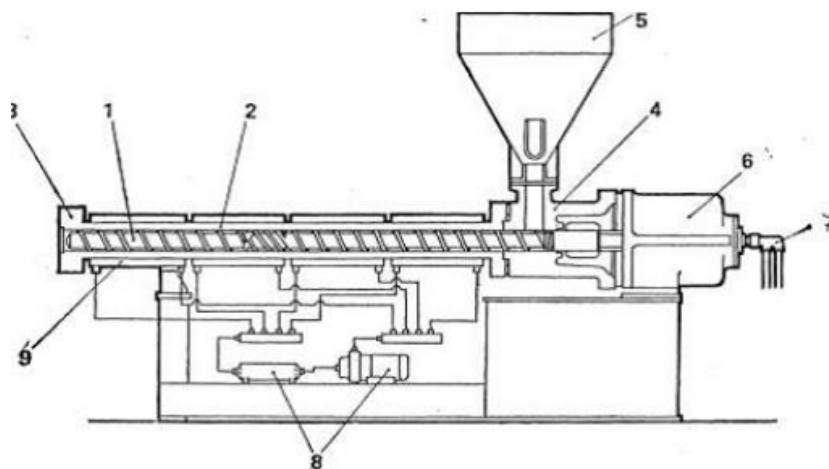


Slika 12. Shematski prikaz oblikovanja naštrecavanjem [21]

Prerada plastomernih kompozita ojačanih prirodnim vlaknima obično se provodi u dva koraka. Prvo se sastojci smješavaju, a zatim se od smjese oblikuje pripremak ili konačni proizvod. Smješavanje komponenata može se obaviti kontinuirano u ekstruderu, s time da se vlakna mogu dodati zajedno s plastomerom ili u plastomernu taljevinu. Moguće je cikličko smješavanje komponenata u miješalicama, ali se mogu pojaviti odstupanja u kvaliteti od šarže do šarže. Za proizvodnju plastomernih kompozita primjenjuje se ekstrudiranje, injekcijsko prešanje, kalandriranje, toplo oblikovanje i pultrudiranje. Za proizvodnju plastomernih kompozita najviše se primjenjuje ekstrudiranje, i to za razne pune i šuplje profile. Postoje razni tipovi ekstrudera. To može biti ekstruder s jednim pužnim vijkom (slika 13) ili dvopužni ekstruder. Osi dvopužnog ekstrudera mogu biti paralelne ili pod kutom. U nekim postupcima primjenjuju se ekstruderi u tandemu: prvi za smješavanje, a drugi za protiskivanje taljevine. Voda iz vlakana koja čini njihovu mokrinu odstranjuje se u ekstruderu tijekom prerade. Injekcijsko se prešanje primjenjuje rjeđe, i to za oblikovanje proizvoda složenijih oblika. Sastojci se prvo smješavaju,



a zatim se od smjese oblikuje pripremak ili konačni proizvod. Osim smještavanja u miješalici, smještavanje se može provesti ekstrudiranjem nakon čega se pravi granulat. Tako pripravljen granulat injekcijski se preša. Prednosti ekstrudiranja u odnosu na injekcijsko prešanje su manja osjetljivost na mokrinu materijala i dobivanje gotovog proizvoda u jednom koraku jer se smještavanje komponenata može obaviti u istom ekstruderu u kojim se oblikuje profil. No to zahtijeva ekstruder s dva pužna vijka. Princip rada ekstrudera s dva paralelna pužna vijka je takav da vijci rotiraju u cilindru u istom ili suprotnom smjeru što omogućava miješanje i kapacitet homogenizacije puno bolji nego kod jednopužnih ekstrudera. Nedostatak je to što je njegova cijena viša od jednopužnoga. [19]

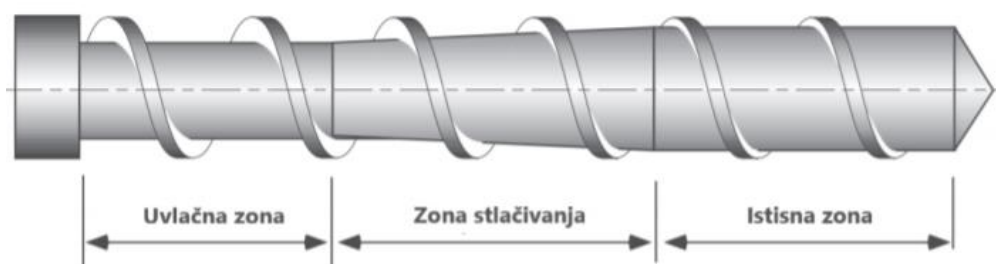


Slika 13. Jednopužni ekstruder [19]

U svom najjednostavnijem obliku ekstruder se sastoji od lijevka, otvora za doziranje sirovine (4), cilindra (7) u kojem se kreće rastaljena masa i u kojem je smješten pužni vijak (6), koji ima zadatak da transportira masu duž cilindra do otvora (1) na koji se postavlja alat za dobivanje željenog proizvoda. Za pogon se upotrebljava motor koji preko sustava prijenosnika i reduktora (5) vrši okretanje pužnog vijka (6). Za temperiranje cilindra primjenjuju se električna grijala (8) i sustav cirkulacije vode ili zraka (3). Pri preradi nekih tipova plastomera primjenjuje se sustav za otplinjavanje i izvlačenje vlage podtlakom (2), dok se za ispravan rad pužnog vijeka, naročito dijela koji se spaja s reduktorom, primjenjuju specijalni ležajevi (9) radi sprječavanja eventualnih vibracija, a vrši se i temperiranje tog djela pužnog vijka. [19]

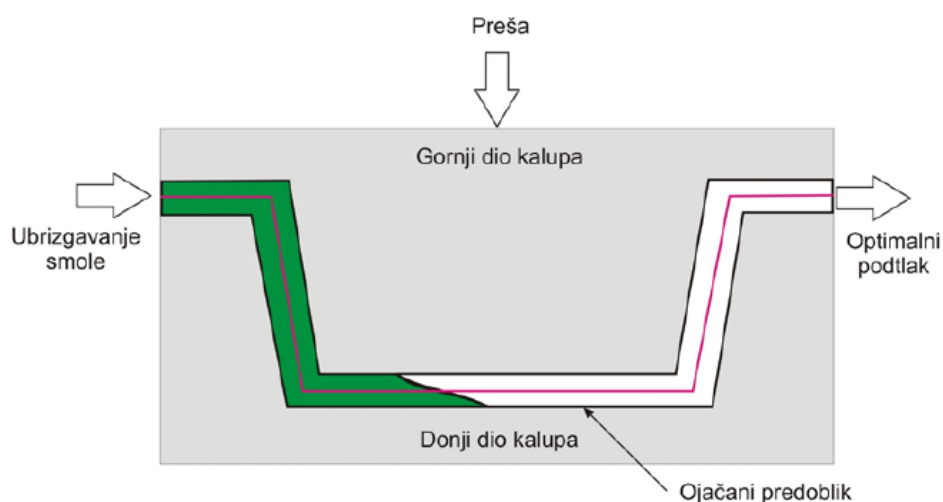
Pužni vijci su najčešće trozonski, a svaka zona obavlja svoju specifičnu funkciju. Prva zona se naziva uvlačna zona i ona ima zadaću uvlačenja polimernog materijala (granulata, praha, itd.) te daljnjeg transporta polurastaljenog materijala prema idućoj zoni, zoni stlačivanja. U zoni stlačivanja pužni vijak stlačuje polimer i pretvara ga u taljevinu. U posljednjoj, istisnoj zoni

zadaća pužnog vijka je da jednoliko izmiješa te toplinski i mehanički homogenizira polimernu taljevinu. [19] Skica takvog pužnog vijka s označenim zonama prikazana je na slici 6.4.



Slika 14. Zone pužnog vijka [19]

Injekcijsko-posredno prešanje kapljevite smole s uloženim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom – RTM (slika 15) je postupak gdje se predoblik načinjen od vlakana postavlja u kalup u kojemu se stvaraju različiti oblici koji se drže vezivom. Nakon što se predoblik postavi u kalup, kalup se zatvara te se u njega ubrizgava smola. Kad se kalup popuni zatvaraju se mjesta na kojima je ubrizgana smola i dolazi do skrućivanja (umreživanja) pri povišenim ili sobnim temperaturama. Budući da je moguće skrućivanje pri sobnim temperaturama, ovaj postupak je prikladan za prirodna vlakna koja su inače osjetljiva na visoke temperature. Osim prirodnih vlakana mogu se upotrijebiti gotovo sve vrste matrica i vlakana. Prednosti ovog postupka su proizvodnja kompozita s visokim udjelom vlakana i s niskim udjelom pukotina u materijalu, ekološki je prihvatljiv postupak jer je smola zatvorena u kalupu. Također, bolji je izgled površine jer se kalup sastoji od dvije polovice. Nedostaci su: visoka cijena i masa alata, proizvodnja je ograničena na manje komade te se mogu pojaviti mjesta na proizvodu koja nisu popunjena smolom, što može dovesti do velikog škarta. [19]



Slika 15. RTM postupak [19]

Kao što je prethodno spomenuto, prilikom odvajanja vlakana od ljuske, ljuska se melje i dobivaju se sitne čestice. Mljevena masa nakon toga prolazi vibracijska sita s mrežicom od fosforne bronce. Te se čestice također mogu iskoristiti kao ojačavalo.

Nakon mljevenja slijedi miješanje usitnjenih ljuskica najčešće s nekim polimerom u ekstruderu. Najbolje je primijeniti dvopužni ekstruder. Zatim dolazi do ponovnog usitnjavanja u granulatoru i na kraju prešanje u kalupu željenih dimenzija. Kokosov se prah kao ojačavalo primjenjuje u polimernim matricama, kao na primjer u matrici od polietilena visoke gustoće. Istraživanja su pokazala da se tvrdoća kompozita povisuje s povećanjem sadržaja praha, a žilavost, duktilnost i gustoća kompozita se smanjuju. Na slici 16 prikazane su čestice usitnjenih ljusaka i ljuske. [19]



Slika 16. Čestice od ljuske kokosa [22]

U tablici 3 dani su primjeri obrađivanja i načina proizvodnje polimernih kompozita od kokosovih vlakana s obzirom na vrstu polimerne matrice. Postoji i mogućnost dodavanja nekih drugih prirodnih vlakana uz kokosova vlakna, npr. jutenih vlakana. Najčešće se primjenjuje kemijsko modificiranje odnosno alkalno obrađivanje, a zbog nižih troškova proizvodnje najčešće se primjenjuje ručno polaganje. [20]

Tablica 3. Primjeri obrađivanja i načina proizvodnje polimernih kompozita od kokosovih vlakana [20]

Materijal matrice	Način obrađivanja	Način proizvodnje
Polipropilen (PP)	NaOH, octena kiselina i stiren-etilen/butilen-stiren blok kopolimer cijepjen s 1,4 – 2mas. % anhidrida maleinske kiseline	Ekstrudiranje i injekcijsko prešanje
Polietilen (PE)	3 mas. % maleirani polietilen	Ekstrudiranje s dva pužna vijka
Epoksidna smola	5 % NaOH na 20 °C u trajanju od 30 minuta	Ručno polaganje
Epoksidna smola	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> u trajanju od 2 sata	RTM i ručno polaganje
Poliaktid (PLA)	2 % NaOH na 70 °C u trajanju od 1 sat	Ručno polaganje (laminiranje)
PP (uz dodatak jutenih vlakna)	5 i 10 % otopine NaOH	Vruće prešanje
Prirodni kaučuk modificiran epoksidacijom (uz dodatak jutenih vlakna)	5 % otopine NaOH na 50 °C u trajanju od dva sata	Ručno polaganje i injekcijsko prešanje

#### 4.1. Primjena kompozita ojačanih kokosovim vlaknima

Općenito, proizvodnja kokosovih vlakana ekološki je prihvatljivija u odnosu na proizvodnju sintetskih vlakana. Uz to su postupak proizvodnje, prerada i skladištenje vlakana pa tako i samih kompozita bitno ekonomičniji u odnosu na konvencionalne kompozitne tvorevine. Iz tih razloga kokosova vlakna imaju široku primjenu. Od autoindustrije (dijelovi karoserije, volani, branici, sjedišta, navlake), građevinarstva (zidovi, krovovi, izolacija) do interijera (tepisi, posude, namještaj). [20]

Proizvođač automobila *Ford* u nekim modelima primjenjuje polimere ojačane kokosovim vlaknima radi smanjenja mase automobila. Najčešće kod hibridnih automobila ili automobila koji u potpunosti idu na struju kako bi se baterija što sporije trošila. Takvi kompoziti se mogu primjenjivati u cijeloj karoseriji. Na slici 17 prikazano je sjedalo od polimera ojačanog kokosovim vlaknima. Osim što se primjenom prirodnih vlakana štedi energija, ona također stvaraju prirodni izgled površine čime se postiže ljepši dizajn interijera. *Ford* je s američkom tvrtkom *Scotts Miracle-Gro* dogovorio da će iskoristiti ostatke kokosa, odnosno kokosova vlakna, koja ta tvrtka inače baci i zapali. [23]



Slika 17. Sjedalo od polimera ojačanog kokosovim vlaknima [23]

Vlakna su našla primjenu i kao amortizeri u transportnoj industriji, pogotovo za prijevoz robe na veće udaljenosti jer su izdržljiva, jeftina i mogu se ponovo koristiti.

Kokosova vlakna se primjenjuju i u industriji navodnjavanja (zbog mogućnosti zadržavanja vode) pa se na taj način stvaraju razni sustavi za navodnjavanje u poljoprivredi (slika 18). Također se zbog zadržavanja vode primjenjuju i u hidroponskoj industriji diljem svijeta. [24]



Slika 18. Industrija navodnjavanja [24]

Prostirke na bazi kokosovih vlakana (slika 19) danas su vrlo popularne zbog svoje jedinstvene kvalitete i vrlo učinkovitog uklanjanja prljavštine. U kućnom okruženju vlakna se mogu primijeniti i kao četka za kosu, a većina četki na bazi kokosovih vlakana pokazala se bolja u usporedbi s drugim četkama sa sintetskim vlaknima. Kokosova vlakna se ipak najviše primjenjuju za stvaranje užadi. Budući da su postojana na morsku vodu i izdržljiva, naširoko se primjenjuju kao pribor u čamcima i kao ribarske mreže. [24]



Slika 19. Prostirka od kokosovih vlakana [24]

Neki od primjera primjene kokosovih vlakana prikazani su na slikama 20, 21 i 22.



Slika 20. Posuđe za jelo [25]



Slika 21. Posude za spremanje [25]



Slika 22. Kanta od kokosovih vlakana [25]

## 4.2. Prirodna vlakna i okoliš

Prirodna vlakna sve se više primjenjuju i njihov udio u raznim industrijama je u porastu. Glavna prednost prirodnih naspram konvencionalnih vlakana je njihova ekološkičnost, svojstvo materijala kojem se danas posvećuje puno pažnje radi održivosti i zaštite okoliša.

Zemlje s visokom proizvodnjom i potrošnjom kokosa suočavaju se s problemom prikladnog odlaganja ostataka kokosa. Najčešće se ostaci (vlakna, ljuske) pale ili odlažu, a to uvelike šteti okolišu. Kako bi se to izbjeglo traže se različite mogućnosti što boljeg iskorištavanja tih ostataka. Istraživanja se usmjeravaju primjeni kokosovih vlakana kao prirodna ojačavala u kombinaciji sa sintetskim matricama u kompozitnoj tvorevini. Cilj svake industrije je koristiti takve kompozite koji pokazuju vrlo dobra svojstva i koji mogu konkurirati konvencionalnim. Važno je naglasiti da su kokosova vlakna oporabljiva (kao i većina prirodnih vlakana), odnosno mogu se ponovno upotrebiti za neku novu ili istu svrhu. Ukoliko recikliranje nije prva opcija koja dolazi u obzir kokosova vlakna se mogu primijeniti u neke druge svrhe, npr. zbog svojih svojstava se primjenjuju kao izolator zvuka ili neugodnih mirisa.[26]

Uzimanjem u obzir navedenog postiže se bolja ekonomičnost i ekološkičnost, čuvanje zaliha neobnovljivih (primarnih) izvora sirovina, ušteda energije, smanjenje količine deponiranog otpada i zaštita okoliša.



## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

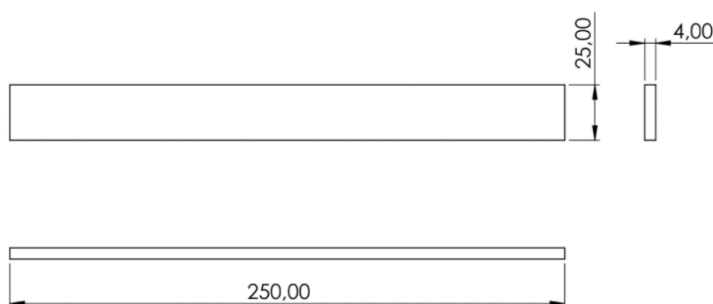
Cilj ovog diplomskog rada bio je opisati prirodna vlakna koja se upotrebljavaju s polimernim matricama, točnije, opisati kokosova vlakna u kombinaciji s epoksidnom smolom. Također, prikazati proces proizvodnje i prerade kokosovih vlakana te prerade kompozitne tvorevine s tim vlaknima. Eksperimentalni dio prikazuje i uspoređuje mehanička svojstva kompozita s epoksidnom matricom i različitim udjelima kokosovih vlakana. Osim udjela, uspoređivao se i način obrađivanja vlakana prije miješanja s epoksidnom smolom.

### 5.1. Izrada kalupa

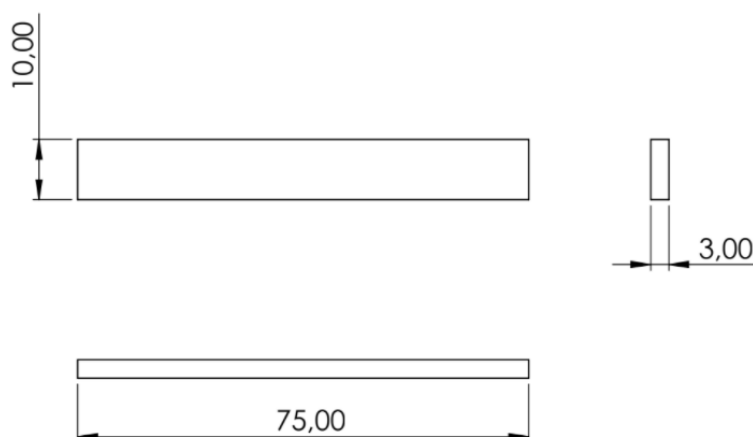
Kako bi se dobila ispitna tijela za ispitivanje željenih svojstava, prije svega bilo je potrebno napraviti kalup. Prvi korak kod izrade kalupa je modeliranje pramodela, koji su kasnije služili za izradu ispitnih tijela zadanih dimenzija. Za modeliranje pramodela rabio se računalni program *SolidWorks*.

Cilj eksperimentalnog dijela je bio ispitati mehanička svojstva kompozita kojem je matrica epoksidna smola, a ojačavalo kokosova vlakna te usporediti dobivena svojstva sa svojstvima epoksidne smole koja nije ojačana. Ispitana su rastezna svojstva i savojna žilavost. Iz norma HRN EN ISO 527-4:2022 (Plastika - Određivanje rasteznih svojstava - 4. dio: Uvjeti ispitivanja izotropnih i ortotropnih plastičnih kompozita ojačanih vlaknima) i HRN EN ISO 179-1:2010 (Određivanje svojstava žilavosti po Charpyju - 1. dio: Ispitivanje žilavosti bez instrumenta) preuzete su dimenzije potrebne za izradu ispitka koje su poslužile kao temelj za modeliranje pramodela u u *SolidWorks*-u.

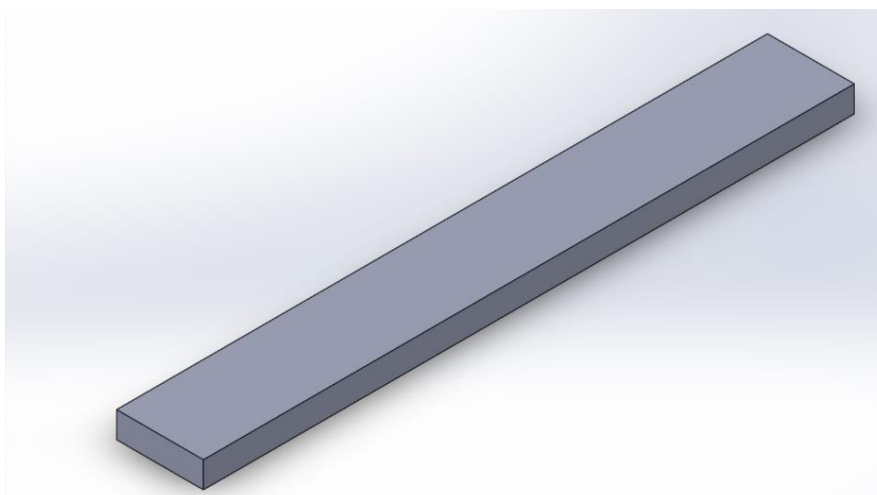
Na slikama 23 i 24 prikazane su dimenzije i oblik pramodela. Slika 23 prikazuje pramodel za ispitivanje rasteznih svojstava, a slika 24 za ispitivanje savojne žilavosti. Na slici 25 prikazan je pramodel u računalnom programu.



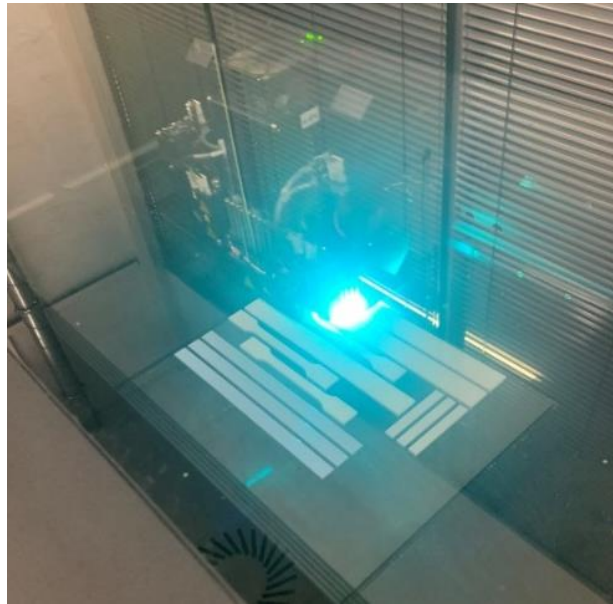
Slika 23. Pramodel za ispitivanje rasteznih svojstava



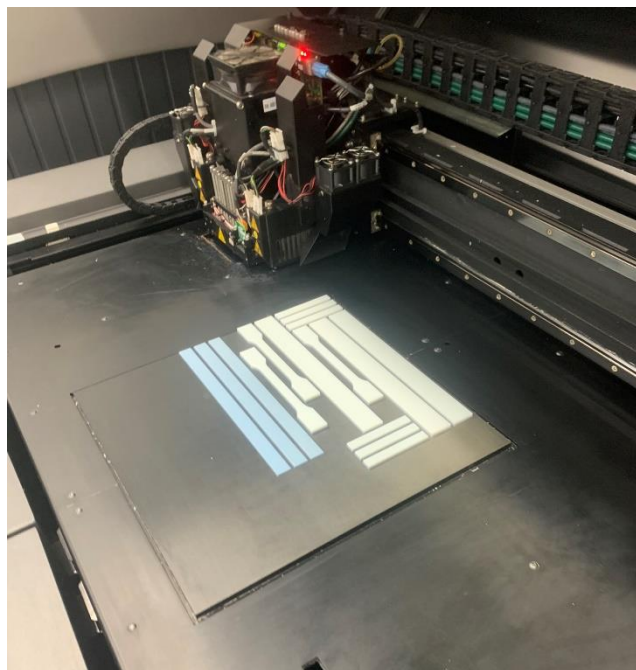
Slika 24. Pramodel za ispitivanje savojne žilavosti

Slika 25. Pramodel u računalnom programu *SolidWorks*

Nakon što su pramodeli modelirani, uređajem za 3D ispis *Connex 350* postupkom *PolyJet Matrix* izrađeni su pramodeli. Sama izrada trajala je jedan sat i 45 minuta. Kada su pramodeli bili gotovi, jakim mlazom vode uklonio se višak materijala i nečistoće te su bili spremni za primjenu, odnosno za izradu kalupa. Postupak izrade i naknadnog čišćenja pramodela prikazan je na slikama 26, 27 i 28.



Slika 26. 3D ispis pramodela



Slika 27. 3D ispis pramodela



Slika 28. Naknadno čišćenje pramodela vodenim mlazom

Kod izrade kalupa, prvo je bilo potrebno izraditi okvir kalupa i za to su poslužile drvene letvice, a dno je bilo metalno. Na metalno dno lijepili su se pramodeli koji su zatim kistom premazivani vazelinom sa svih strana kako bi se kasnije omogućilo lakše odvajanje kalupa. Osim vazelinom poprskani su i PTFE sprejom (teflonski sprej). Na slikama 29, 30 i 31 prikazana je priprema kalupa i postupak premazivanja i prskanja.



Slika 29. Priprema kalupa



Slika 30. Premazivanje kalupa vazelinom



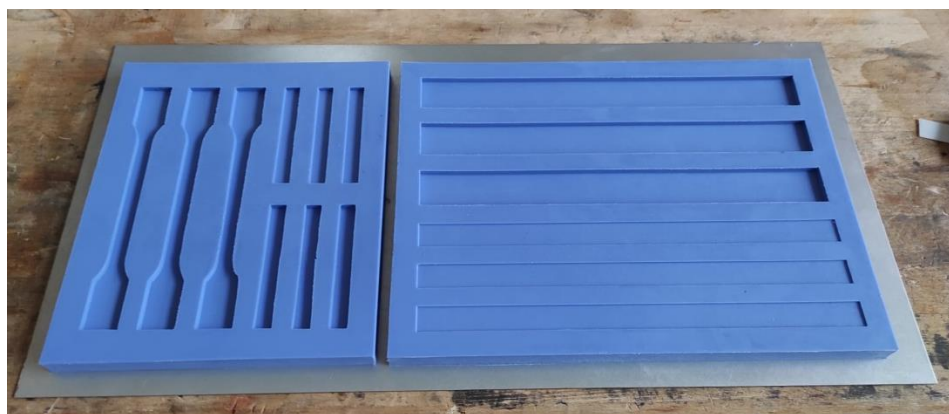
Slika 31. Prskanje kalupa PTFE sprejom

Nakon pripreme prikazane prethodnim slikama bilo je potrebno pomiješati silikonsku bazu i u nju dodati katalizator. Katalizatori su spojevi koji ubrzavaju odvijanje određene kemijske reakcije, ali u njima ne sudjeluju. Dodaje se 1,5 % katalizatora što znači da npr. na 100 grama silikonske baze ide 1,5 % katalizatora. Smjesa je zatim ulivena između drvenih letvica (okvir) i pramodela kako bi se dobio kalup za izradu ispitnih tijela u obliku napravljenih pramodela. Na slici 32 prikazana je izrada kalupa.



Slika 32. Izrada kalupa

U konačnici su napravljena dva kalupa. Prvi kalup ima 9 kalupnih šupljina, a za potrebe ovog eksperimenta su se primjenjivale 3 (za ispitivanje savojne žilavosti). Drugi kalup ima 6 kalupnih šupljina, a primjenjivale su se također 3, no u ovom slučaju za ispitivanje rasteznih svojstava. Prikaz gotovog kalupa spremnog za lijevanje ispitnih tijela je na slici 33.



Slika 33. Kalup

## 5.2. Priprema vlakana

Vlakna su preuzeta iz tvrtke *Agroproteinka*. *Agroproteinka* je moderna hrvatska tvrtka koja se bavi ekološkim zbrinjavanjem nusproizvoda životinjskog podrijetla i biorazgradivog otpada. Skladištenje i sakupljanje svih vrsta otpada i nusproizvoda od velikog je ekološkog i zdravstvenog značaja za čitavu Hrvatsku i šire jer otpad i nusproizvodi koji nisu zbrinuti na odgovarajući način predstavljaju ekološku prijetnju. U *Agroproteinki* kokosova vlakna upotrebljavaju kao izolaciju od neugodnih mirisa koji se oslobađaju prilikom zbrinjavanja otpada. Na slici 34 je prikazan dio iz kojeg su uzeta vlakna koja su se kasnije fizikalno i kemijski obrađivala, miješala s matricom i ispitivala.



Slika 34. Vlakna kokosa iz tvrtke *Agroproteinka*

Vlakna koja su uzeta iz *Agroproteinke* bila su različitih duljina i onečišćena te ih je bilo potrebno očistiti i modificirati. Prvi korak u tom postupku bio je skraćivanje vlakana i dobivanje vlakana podjednake dužine, odnosno fizikalno obrađivanje (modificiranje) vlakana.

Drugi je korak izrada plana pokusa s tri faktora, odnosno tri varijable pokusa. U nastavku će detaljnije biti opisan svaki korak.

### 5.2.1. Fizikalno obrađivanje vlakana

Kao što je već spomenuto, vlakna preuzeta iz *Agroproteinke* su bila predugačka, odnosno različitih duljina i debljina (između 5 i 15 cm). Također, vlakna su bila onečišćena i puna zemlje i sitnih čestica od ljuska kokosa. Kako bi se dobila vlakna približno jednakih duljina i debljine (promjera) koristio se mlin *MIXER MILL MM 200* tvrtke *Retsch* (slika 35), koji je usitnio vlakna na otprilike 0,5 do 2 cm. Parametri mljevenja su bili namješteni po programu broj 5 koji je usitnjavao vlakna frekvencijom od 30 Hz u 5 minuta. Postupak usitnjavanja vlakana provodio se u laboratoriju Tekstilno-tehnološkog fakulteta u Zagrebu.



Slika 35. Mlin *MIXER MILL MM 200*

Nakon usitnjavanja, neka vlakna su i dalje bila deblja ili duža u odnosu na većinu. Zbog toga su se dodatno odijelila s pomoću tresilice za vibracijska sita *Prufsieb JEL 200* (slika 36). Tako su se dobila vlakna podjednake duljine od 0,5 do 2 mm i promjera između 0,4 i 0,6 mm.



Slika 36. Tresilica za sito



### 5.2.2. Kemijsko obrađivanje vlakana

U poglavlju 3.2.1.1. obrađivanje lužinama opisano je kemijsko obrađivanje (modificiranje) vlakana i svojstva koja se time mogu postići. Prema istim smjernicama provodio se postupak koji će biti opisan u nastavku.

Kokosova vlakna su obrađivana natrijevim hidrogenkarbonatom  $\text{NaHCO}_3$ . Natrijev hidrogenkarbonat ili natrijev bikarbonat je bijeli kristalni prah, slabo topljiv u vodi. U kućanstvima se može prepoznati i pod nazivom soda bikarbona. Prilikom obrađivanja vlakana korišten je 100 %tni natrijev hidrogenkarbonat proizvođača *Encian*. Vlakna su obrađivana u otopini  $\text{NaHCO}_3$  različitih koncentracija – od 5, 10 i 15 % i u različitim vremenskim razdobljima – od 0, 2,5 i 5 dana. Prah  $\text{NaHCO}_3$  se ručno miješao s vodom sobne temperature dok se nije u potpunosti otopio. Npr. ukoliko se htjela postići otopina s 10 % natrijevog hidrogenkarbonata u 1 l vode se umiješalo 100 g  $\text{NaHCO}_3$ . Nakon što je prošlo određeno vrijeme, odnosno 0, 2,5 i 5 dana, vlakna su uronjena u vodu na 30 minuta bez dodavanja kiselina radi neutralizacije. Zatim su vlakna sušena na sobnoj temperaturi 3 dana.

### 5.3. Izrada kompozita

Nakon što su vlakna obrađivana fizikalno i kemijski, slijedio je postupak izrade ispitnih tijela od kompozitnih materijala gdje su ojačavala bila kokosova vlakna, a matrica je bila epoksidna smola. Izrada kompozita odvijala se u Laboratoriju za preradu polimera na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Kao matrica kompozita upotrebljavala se epoksidna smola *Novapox* koja se miješala s umreživalom u omjeru 2:1. Otvoreno vrijeme rada smole je 40 minuta pri sobnoj temperaturi. Prema volumenu kalupnih šupljina izračunati su omjeri komponenata smole i ojačavala. Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rasteznih svojstava su dimenzija  $250 \times 25 \times 4$  mm, a su za ispitivanje savojne žilavosti  $80 \times 10 \times 4$  mm.

S obzirom na to da su se promatrala tri faktora (vrijeme uranjanja, koncentracija otopine i udio vlakana), za potpuni faktorski pokus s tri ponavljanja u centru bila su potrebna 11 stanja (tablica 4).

Pritom su granice bile sljedeće:

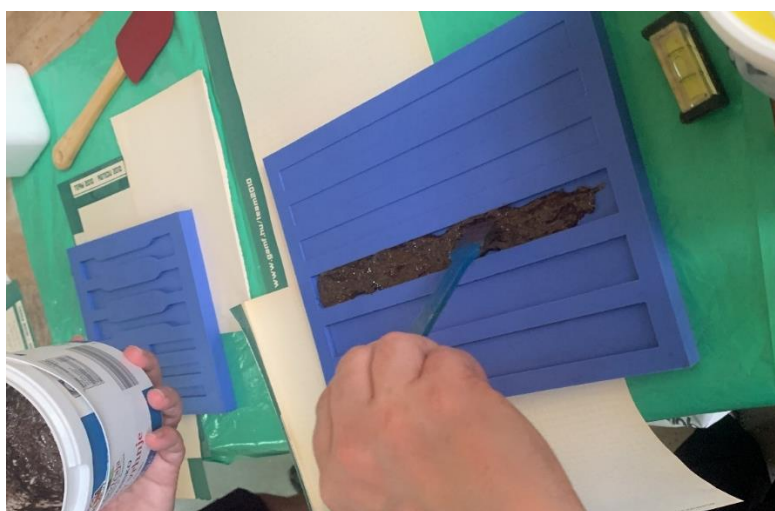
- vrijeme uranjanja: 0 – 5 dana (2,5 centar),
- koncentracija otopine: 5 – 15 % (10 % centar),
- udio vlakana: 10 – 20 % (15 % centar).

Prvi korak kod izrade kompozita je bio miješanje smole i umrežavala prvo ručno, a zatim na miješalici. Miješalica je proizvod tvrtke *TEHTNICA ŽELEZNIKI JUGOSLAVIJA*, a parametri koje postiže su: 200 V, 0,35 A, 40 W, 4000 okretaja u minuti i 50 Hz. Nakon što su smola i umrežavalo bili umiješani u odgovarajućem omjeru i potrebnoj masi postupno su se dodavala vlakna. Kako bi se izračunao odgovarajući omjer mase i vlakana, za gustoću vlakana primjenjivao se podatak iz literature prema kojem vlakno kokosa ima gustoću od  $1,2 \text{ g/cm}^3$ , što je gustoća istovjetna gustoći eposkidne smole.

Na slici 37 prikazan je postupak dodavanja vlakna u smolu. Kada su vlakna i smola, odnosno ojačavalo i matrica bili dovoljno dobro promiješani, slijedilo je lijevanje u kalup i popunjavanje kalupnih šupljina (slike 38 i 39).



Slika 37. Postupak dodavanja vlakana u smolu



Slika 38. Popunjavanje kalupnih šupljina



Slika 39. Popunjavanje kalupnih šupljina

Bilo je potrebno oko 24 sata da ispitna tijela budu spremna za vađenje iz kalupa. Nakon vađenja iz kalupa ispitna tijela su se stavljala u peć kako bi se postiglo naknadno očvršćivanje. Postupak naknadnog očvršćivanja provodi se na povišenim temperaturama kako bi se ubrzao proces stvrdnjavanja i maksimirala neka od svojstava materijala. Ispitna tijela su bila u peći *STF-NR 52 NAT. VENT WITH RAMPS* tvrtke *Falc*. Temperatura grijanja iznosila je 50 °C, a vrijeme grijanja 8 sati.

## 5.4. Ispitivanje mehaničkih svojstava kompozita

### 5.4.1. Ispitivanje savojne žilavosti

Žilavost je otpornost materijala krhkom lomu te ju je najlakše odrediti ispitivanjem udarnog rada loma na uređaju koji se naziva Charpyjev bat (slika 40 i 41). Dakle, žilavost predstavlja energiju koja je utrošena za lom ispitnog tijela kod ispitivanja.



Slika 40. Charpyjev bat



Slika 41. Charpyjev bat

Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za preradu polimera na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, prema normi HR EN ISO 179-1:2010 (Plastika - Određivanje svojstava žilavosti po Charpyju - 1. dio: Ispitivanje žilavosti bez instrumenata).

Ispitivanje žilavosti provedeno je na Charpyjevom batu proizvođača *Karl Frank* pri sobnoj temperaturi, a tip ispitnog tijela je 2. Nazivna vrijednost bata iznosila je 0,5 J. Razmak između oslonaca bio je  $L = 60$  mm. Prilikom ispitivanja žilavosti na ispitnom tijelu prvi korak je postavljanje bata u početnu poziciju na određenu visinu. Zatim se bat ispušta i udara ispitno tijelo. Nakon udara, bat doseže određenu visinu u stanju mirovanja. Na temelju razlika u visini bata u stanju mirovanja i završne pozicije nakon udara, na mjernoj skali očitava se iznos energije potrebne za lom ispitnog tijela. Točnije, razlika potencijalnih energija u stanju mirovanja prije i nakon udarca jednaka je energiji utrošenoj na lom ispitnog tijela. Dimenzije ispitnih tijela mjerene su na 3 različita mjesta i izračunata je srednja vrijednost debljine i širine. Ispitivanje je provedeno na po 3 ispitna tijela za svako stanje kompozita i na 3 ispitna tijela epoksidne smole, a žilavost  $a_{cu}$ , kJ/m<sup>2</sup> je izračunata prema jednadžbi:

$$a_{cu} = \frac{E_c}{\bar{h} \cdot \bar{b}} \cdot 10^3 \quad (1.)$$

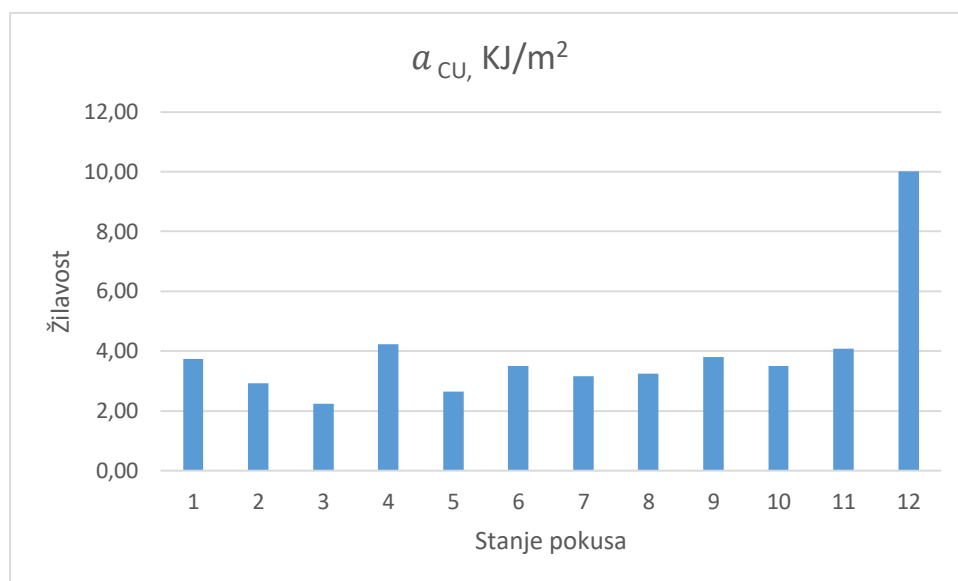
Pri čemu su:

$E_c$ , J – apsorbirana energija tijekom loma,

$\bar{h}$ , mm - srednja vrijednost debljine,

$\bar{b}$ , mm – srednja vrijednost širine.

Na slici 42 prikazana je usporedba srednjih vrijednosti savojne žilavosti za svih 11 stanja kompozitne tvorevine i srednja vrijednost savojne žilavosti epoksidne smole. Rezultati ispitivanja navedeni su u Prilogu u tablicama 19 i 20.



Slika 42. Usporedba srednjih vrijednosti savojne žilavosti (stanja od 1 do 11 su stanja pokusa, a stanje 12 se odnosi na čistu epoksidnu smolu)

#### 5.4.2. Ispitivanje rastezних svojstava

Rastezna čvrstoća mehaničko je svojstvo materijala koje pokazuje otpornost materijala na rastezna naprezanja. Predstavlja omjer maksimalne sile pri rasteznom ispitivanju i površine početnog presjeka ispitnog tijela.

Ispitivanje rastezних svojstava kompozita također je provedeno u Laboratoriju za preradu polimera na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu prema normi HRN EN ISO 527-4:2022 (Plastika - Određivanje rastezних svojstava - 4. dio: Uvjeti ispitivanja izotropnih i ortotropnih plastičnih kompozita ojačanih vlaknima).

Prilikom ispitivanja rastezних svojstava koristila se kidalica *Shimadzu AGS-X* maksimalne sile 10 kN. Ispitivanje se provodilo pri sobnoj temperaturi. Brzina je iznosila 2 mm/min. Razmak između čeljusti kidalice iznosio je  $L = 150$  mm, a mjerno područje  $L_0 = 50$  mm. Kao i kod ispitivanja žilavosti ispitivanje se provelo na 3 ispitna tijela za svako stanje nakon čega je izračunata srednja vrijednost rezultata. Prilikom ispitivanja mjerila se sila i produljenje ispitnog tijela, naprezanje, istežanje i modul rasteznosti. Navedene vrijednosti mogu se dobiti računom iz sljedećih jednadžbi, za računanje rastezних naprezanja:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.)$$

Pri čemu je:

$\sigma$ , MPa - rastezno naprezanje,

$F$ , N - sila,

$A$ , mm<sup>2</sup> - površina poprečnog presjeka ispitnog tijela.

Relativno produljenje ili istežanje kod rasteznog ispitivanja dobiva se iz izraza:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.)$$

Pri čemu je:

$\varepsilon$ , mm/mm - relativno produljenje (istežanje),

$\Delta L$ , mm - produljenje,

$L_0$ , mm - početna mjerna duljina.

Jednadžba za računanje modula rasteznosti prema normi HRN EN ISO 527-4:2022 je:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (4.)$$

Pri čemu je:

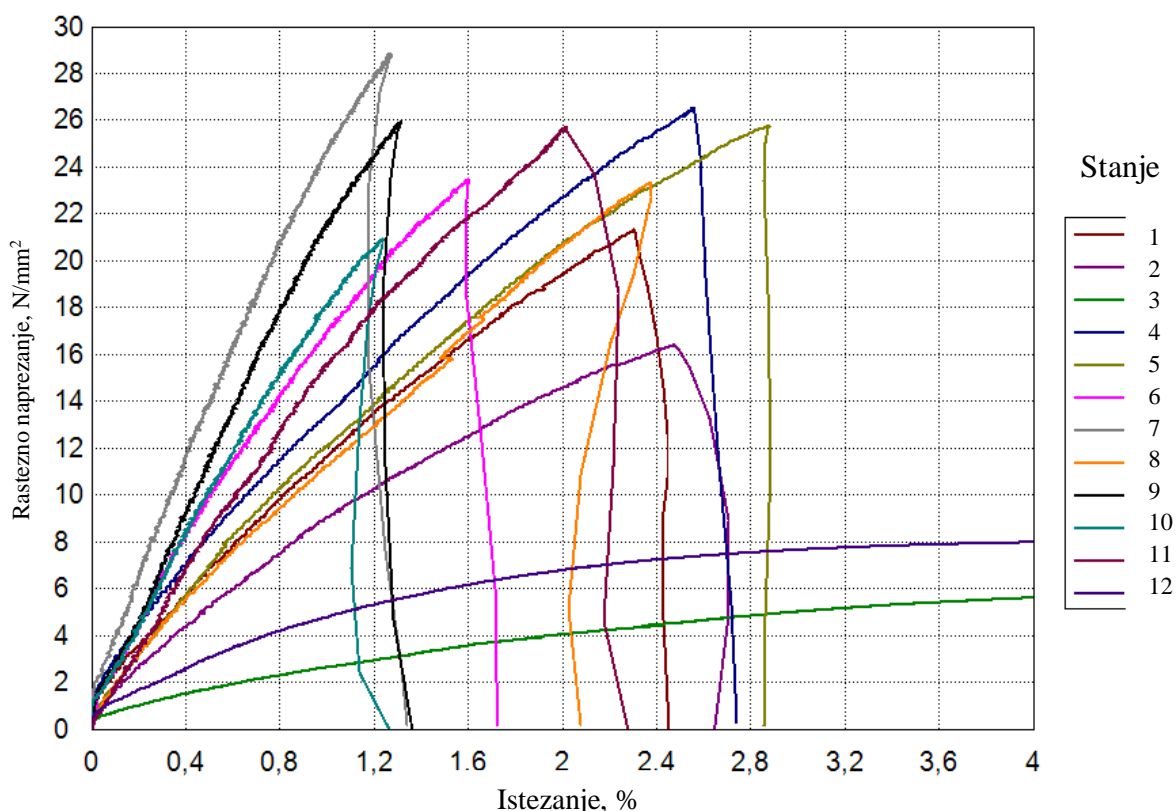
$E$ , MPa - modul rasteznosti,

$\sigma_1$  i  $\sigma_2$  – naprežanja pri  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$

$\varepsilon_1$  – istežanje od 0,05 %,

$\varepsilon_2$  – istežanje od 0,25 %.

Na slici 43 prikazani su dijagrami rasteznog naprežanja – istežanja za svih 11 stanja kompozita te epoksidne smole. U Prilogu u tablicama 21 i 22 prikazani su rezultati svih ispitivanja.



Slika 43. Dijagram rasteznog naprezanja – istezanja (stanja od 1 do 11 su stanja pokusa, a stanje 12 se odnosi na čistu epoksidnu smolu)

#### 5.4.3. Mikrostruktura presjeka kompozita

Na sljedećim slikama prikazani su presjeci kompozitnih ispitnih tijela. Za snimanje mikrostrukture uporabljena je kamera *Axiocam* spojena na mikroskop *Stemi 508*. Osim položaja i raspodjele vlakana u epoksidnoj smoli, mogu se vidjeti i uključine zraka koje se nisu mogle izbjeći jer su se vlakna ručno umješavala u smolu. Slika 44 prikazuje ispitno tijelo s 20 % neobrađivanih kokosovih vlakana (stanje 1), a slika 45 s 10 % (stanje 4). Na slici 45 izmjerene su i dimenzije vlakana i uključina zraka. Slika 46 prikazuje mikrostrukturu ispitnog tijela stanja 7, s vremenom umakanja 5 dana u 15 %-tnoj otopini natrijevog bikarbonata i s 10 % vlakana, a može se primijetiti zamućenje epoksidne smole, što je najvjerojatnije posljedica reakcije s obrađivanim vlaknima.





Slika 44. Mikrostruktura ispitka 1 – 20 % neobrađivanih vlakana



Slika 45. Mikrostruktura ispitka 4 – 10 % neobrađivanih vlakana



Slika 46. Mikrostruktura ispitka 7 – 10 % vlakana obrađivanih 5 dana u 15 %-tnoj otopini

### 5.5. Statistička analiza podataka

Kada su ispitivanja završena, slijedila je analiza podataka s pomoću softverskog programa za statističku obradu podataka *DesignExpert* 13, kako bi se ustanovilo kako pojedini faktori utječu na svojstva kompozita (modul rasteznosti, rasteznu čvrstoću, istežanje i savojnu žilavost). Utjecajni faktori označeni su slovima A, B i C kao što je prikazano u tablici 6.

Odabran je faktorski plan pokusa s 3 faktora na 2 razine. Uz tri ponavljanja u centru kako bi se odredila greška pokusa, bilo je potrebno provesti 11 stanja pokusa (tablica 4). U tablici 5 prikazan je provedeni, modificirani plan pokusa s odzivima. Pokus nije ortogonalan jer varijabla A i B nisu mogle biti u potpunosti nezavisne, tj. uz odabir vremena uranjanja 0 dana nije bilo moguće postaviti koncentraciju otopine od 5 do 15 %, odnosno postavljena je koncentracija od 0 %. U tablici 6 prikazani su faktori i njihove razine.

Tablica 4. Potpuni faktorski plan pokusa s tri faktora na dvije razine i s tri ponavljanja u centru

Stanje pokusa	Vrijeme uranjanja, dani	Koncentracija otopine, %	Udio vlakana, %
1	0	0	20
2	5	5	20
3	0	0	20
4	5	15	10
5	0	0	20
6	5	5	15
7	0	0	10
8	5	15	15
9	2,5	10	10
10	2,5	10	15
11	2,5	10	10

Tablica 5. Provedeni plan pokusa i vrijednosti odziva

Stanje pokusa	A:Vrijeme uranjanja, dani	B:Koncentracija otopine, %	C:Udio vlakana, %	Modul rasteznosti, N/mm <sup>2</sup>	Rastezna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>	Istezanje, %	Savojna žilavost, kJ/m <sup>2</sup>
1	0	0	20	1163,67	21,3526	2,30867	3,73
2	5	15	20	982,939	16,3771	2,47667	2,92
3	5	5	20	280,39	6,83068	13,9953	2,23
4	0	0	10	1456,4	26,5253	2,56467	4,22
5	0	0	20	1310,47	25,7471	2,88267	2,64
6	2,5	10	15	2124,35	23,1102	1,59867	3,51
7	5	15	10	2590,56	28,8222	1,27667	3,16
8	2,5	10	15	1331,97	23,334	2,37467	3,24
9	0	0	10	2249,32	25,9394	1,31467	3,79
10	2,5	10	15	1959,03	20,9105	1,23867	3,5
11	5	5	10	1617,53	25,713	2,01933	4,08

Tablica 6. Popis faktora

Faktor	Ime	Jedinica	Minimum	Maksimum	Kodirane minimalne vrijednosti	Kodirane maksimalne vrijednosti	Srednja vrijednost	Stadardna devijacija
A	Vrijeme uranjanja	dani	0,0000	5,00	-1 ↔ 0,00	+1 ↔ 5,00	2,50	2,24
B	Koncentracija otopine	%	0,0000	15,00	-1 ↔ 5,00	+1 ↔ 15,00	6,36	5,95
C	Udio vlakana	%	10,00	20,00	-1 ↔ 10,00	+1 ↔ 20,00	15,00	4,47

### 5.5.1. Modul rasteznosti

U tablici 7 prikazani su rezultati obrade u programskom paketu *DesignExpert* modulom ANOVA (analiza varijance). Vrijednost omjera  $F$  od 7,65, te  $p$ -vrijednost od 0,0154 pokazuje da je model signifikantan.  $P$ -vrijednost, uz razinu signifikantnosti od 5 %, pokazuje da rizik odbacivanja nulte hipoteze (nema signifikantnog utjecaja faktora) iznosi 1,54 %, tj. nulta hipoteza se može odbaciti. Drugim riječima, razlike na promatranom uzorku su statistički značajne. Podebljano su označeni faktori koji imaju signifikantni utjecaj.

Tablica 7. Rezultati analize varijance – modul rasteznosti

	Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Omjer F	p- vrijednost
<b>Model</b>	$3,57 \cdot 10^6$	4	$8,925 \cdot 10^5$	7,65	0,0154
<b>A-Vrijeme uranjanja</b>	$8,12 \cdot 10^5$	1	$8,12 \cdot 10^5$	6,97	0,0386
<b>B-Koncentracija otopine</b>	$9,6 \cdot 10^5$	1	$9,60 \cdot 10^5$	8,23	0,0285
<b>C-Udio vlakana</b>	$2,18 \cdot 10^6$	1	$2,18 \cdot 10^6$	18,69	0,0050
AC	$3,6 \cdot 10^5$	1	$3,67 \cdot 10^5$	3,15	0,1265
<b>Ostatak</b>	$6,998E \cdot 10^5$	6	$1,17 \cdot 10^5$		
Odstupanje od modela	25244,84	2	12622,42	0,0748	0,9292
Pogreška	$6,75 \cdot 10^5$	4	$1,69 \cdot 10^5$		
<b>Ukupno</b>	$4,27 \cdot 10^6$	10			

U tablici 8 prikazani su osnovni statistički podatci o modelu. Koefficient determiniranosti  $r^2$  je mjera odstupanja od aritmetičke sredine koja je objašnjena modelom. Što je  $r^2$  bliži 1, to model bolje slijedi podatke, odnosno pojava je bolje objašnjena.

Tablica 8. Statistički podaci o modelu.

<b>Standardno odstupanje</b>	2,43
<b>Aritmetička sredina</b>	22,24
<b>Koefficient determiniranosti <math>r^2</math></b>	0,9057

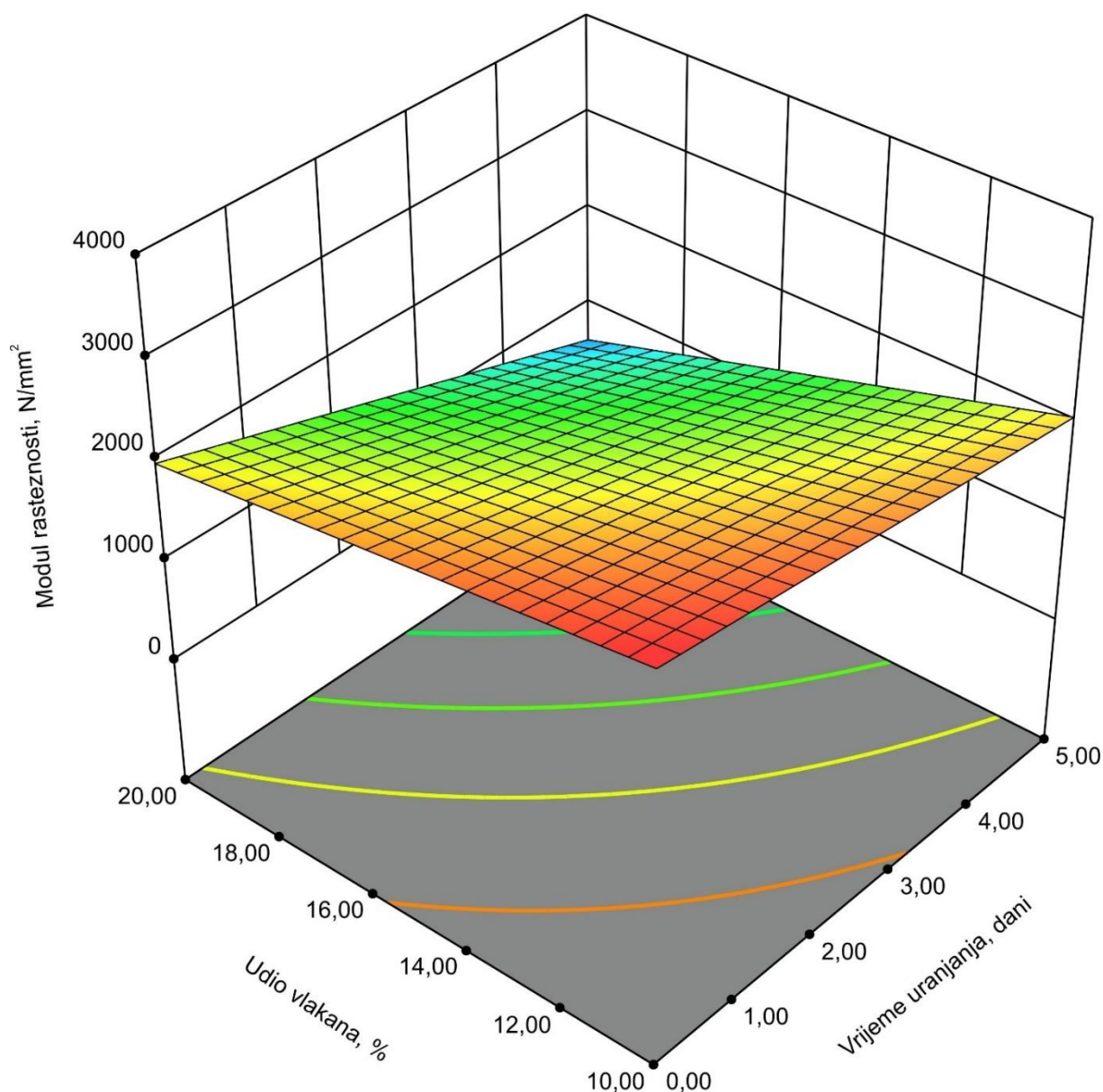
Model se za varijablu modul rasteznosti može opisati sljedećom jednadžbom (vrijednosti A, B i C upisuju se u kodiranom obliku):

$$E_r = 1838,15 - 482,68A + 394,12B - 522,04C \quad (5.)$$

Model za varijablu modul rasteznosti kada su vrijednosti A, B i C upisuju sa stvarnim vrijednostima glasi:

$$E_r = 2456,26 + 63,91 \cdot \text{Vrijeme uranjanja (dani)} + 78,82 \cdot \text{Koncentracija otopine (\%)} - 65,58 \cdot \text{Udio vlakana (\%)} - 17,13 \cdot \text{Vrijeme uranjanja (dani)} \cdot \text{Udio vlakana} \quad (6.)$$

Slika 47 prikazuje ovisnost modula rasteznosti o promjenama udjela vlakana i vremena uranjanja pri koncentraciji otopine od 10 % (srednja razina koncentracije otopine).



Slika 47. Prikaz ovisnosti modula rasteznosti o promjenama udjela vlakana i vremena uranjanja pri koncentraciji otopine od 10 %

### 5.5.2. Rastezna čvrstoća

U tablici 9 prikazani su rezultati obrade modulom ANOVA (analiza varijance). Vrijednost omjera  $F$  od 14,41, te  $p$ -vrijednost od 0,0031 pokazuje da je model signifikantan.

Tablica 9. Rezultati analize varijance – rastezna čvrstoća

	Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Omjer F	p- vrijednost
<b>Model</b>	340,62	4	85,15	14,41	0,0031
<b>A-Vrijeme uranjanja</b>	<b>82,93</b>	<b>1</b>	<b>82,93</b>	<b>14,04</b>	<b>0,0095</b>
B-Koncentracija otopine	28,55	1	28,55	4,83	0,0703
<b>C-Udio vlakana</b>	<b>168,29</b>	<b>1</b>	<b>168,29</b>	<b>28,48</b>	<b>0,0018</b>
AC	84,26	1	84,26	14,26	0,0092
<b>Ostatak</b>	35,45	6	5,91		
Odstupanje od modela	22,03	2	11,02	3,29	0,1432
Pogreška	13,41	4	3,35		
<b>Ukupno</b>	376,07	10			

U tablici 10 prikazani su osnovni statistički podatci o modelu.

Tablica 10. Statistički podatci o modelu

<b>Standardno odstupanje</b>	341,53
<b>Aritmetička sredina</b>	1551,51
<b>Koeficijent determiniranosti <math>r^2</math></b>	0,8361

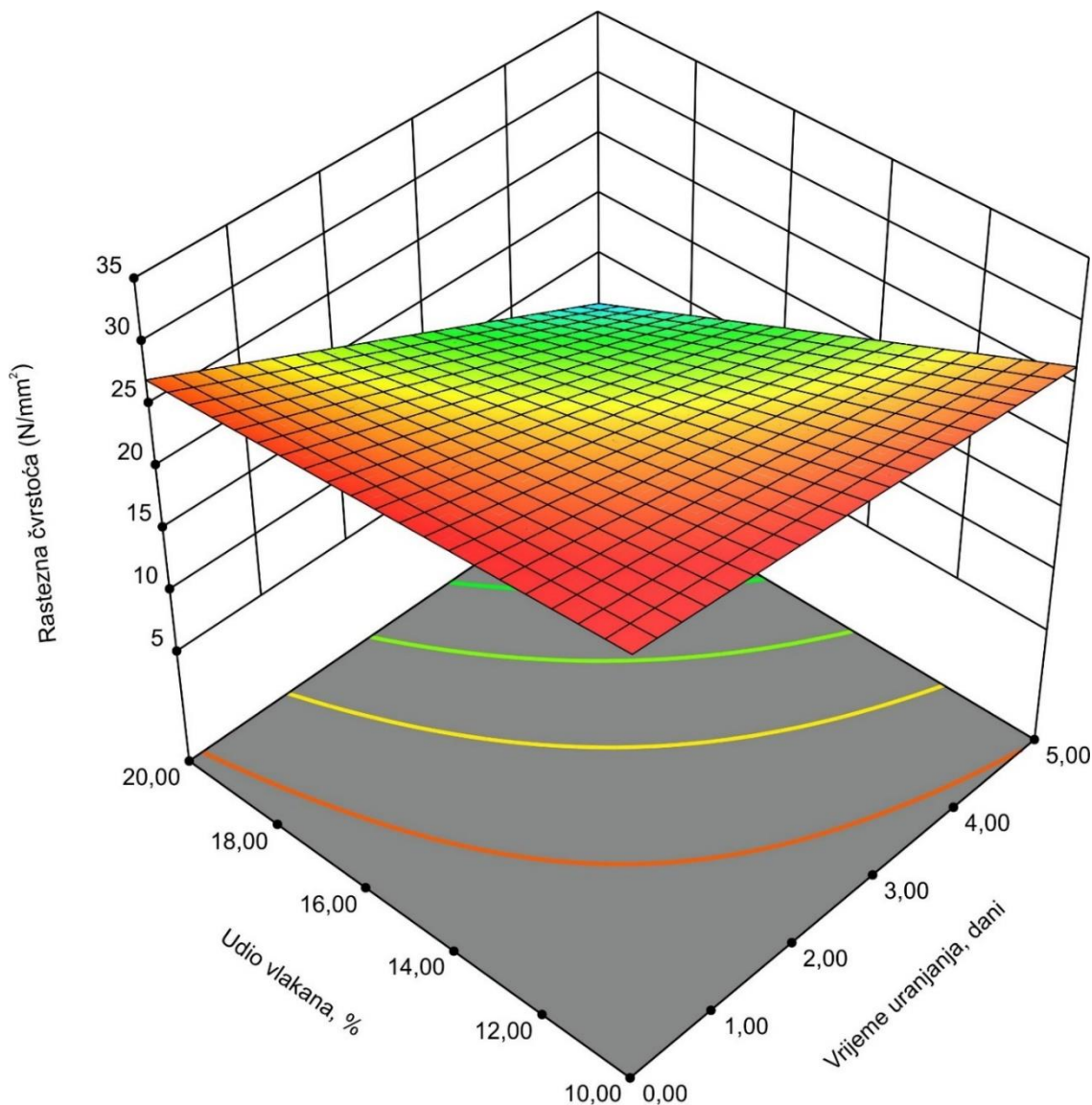
Model se za varijablu rastezne čvrstoće može opisati sljedećom jednadžbom (vrijednosti A, B i C upisuju se u kodiranom obliku):

$$R_m = 23,80 - 4,88A + 2,15B - 4,59C - 3,25AC \quad (7.)$$

Model za varijablu rastezne čvrstoće kada su vrijednosti A, B i C upisuju sa stvarnim vrijednostima glasi:

$$R_m = 28,41 + 1,94 \cdot \text{Vrijeme uranjanja (dani)} + 0,43 \cdot \text{Koncentracija otopine (\%)} - 0,268 \cdot \text{Udio vlakana (\%)} - 0,26 \cdot \text{Vrijeme uranjanja} \cdot \text{Udio vlakana} \quad (8.)$$

Slika 48 prikazuje ovisnost rastezne čvrstoće o promjenama udjela vlakana i vremena uranjanja pri koncentraciji otopine od 10 % (srednja razina koncentracije otopine).



Slika 48. Prikaz ovisnosti rastezne čvrstoće o promjenama udjela vlakana i vremena uranjanja pri koncentraciji otopine od 10 %

### 5.5.3. Istezanje

U tablici 11 prikazani su rezultati obrade modulom ANOVA (analiza varijance). Vrijednost omjera  $F$  od 35,75, te  $p$ -vrijednost od 0,0006 pokazuje da je model signifikantan.



Tablica 11. Rezultati analize varijance – istežanje

	<b>Suma kvadrata odstupanja</b>	<b>Stupnjevi slobode</b>	<b>Srednji kvadrat odstupanja</b>	<b>Omjer F</b>	<b>p- vrijednost</b>
<b>Model</b>	130,33	5	26,07	35,75	0,0006
<b>A-Vrijeme uranjanja</b>	<b>55,23</b>	<b>1</b>	<b>55,23</b>	<b>75,75</b>	<b>0,0003</b>
<b>B-Koncentracija otopine</b>	<b>43,17</b>	<b>1</b>	<b>43,17</b>	<b>59,21</b>	<b>0,0006</b>
C-Udio vlakana	2,08	1	2,08	2,85	0,1521
AC	46,53	1	46,53	63,81	0,0005
BC	29,03	1	29,03	39,81	0,0015
<b>Ostatak</b>	3,65	5	0,7291		
Odstupanje od modela	2,03	1	2,03	5,00	0,0890
Pogreška	1,62	4	0,4050		
<b>Ukupno</b>	133,98	10			

U tablici 12 prikazani su osnovni statistički podatci o modelu.

Tablica 12. Statistički podatci o modelu

<b>Standardno odstupanje</b>	0,8539
<b>Aritmetička sredina</b>	3,10
<b>Koeficijent determiniranosti <math>r^2</math></b>	0,9728

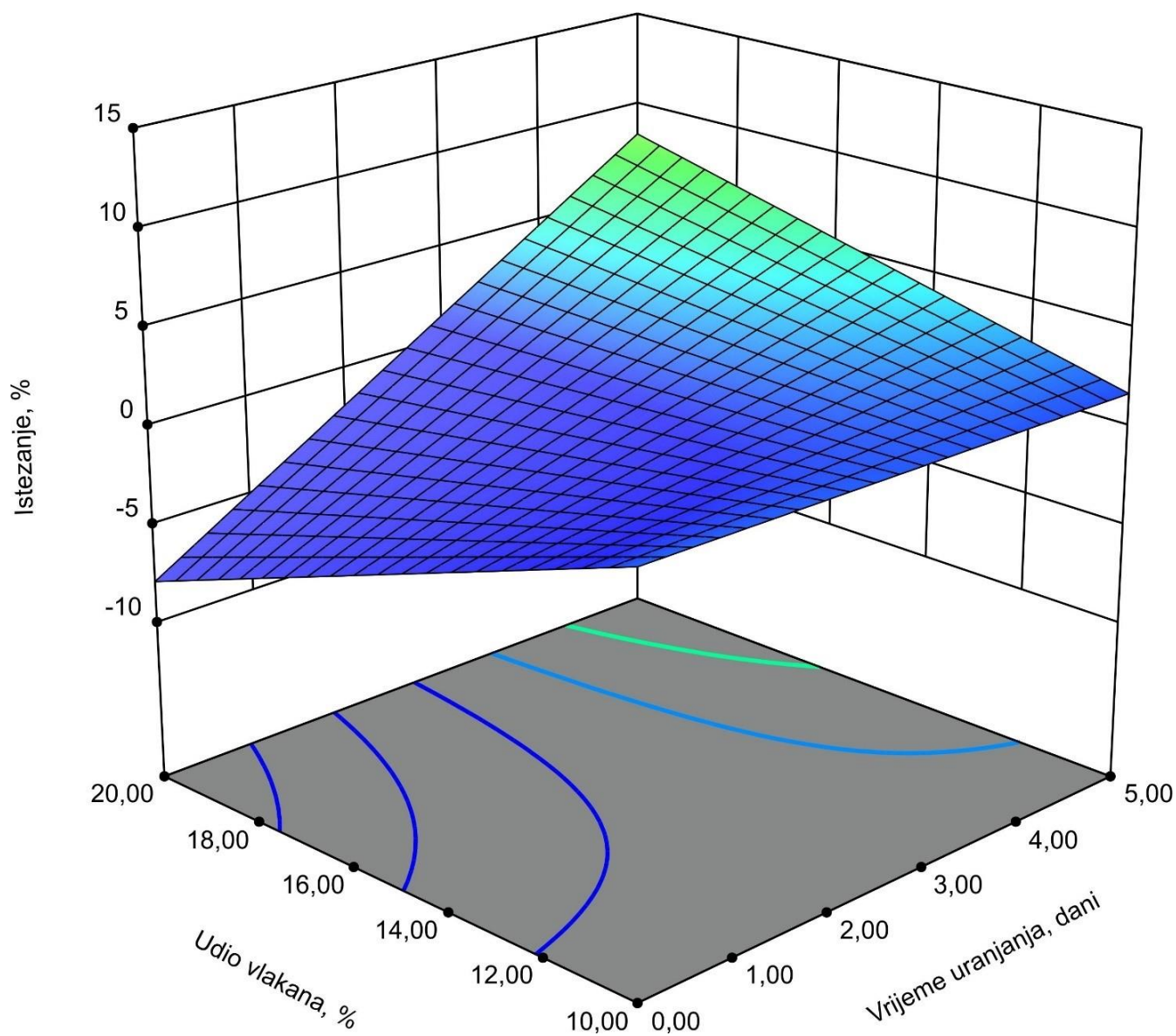
Model se za varijablu istežanja može opisati sljedećom jednadžbom (vrijednosti A, B i C upisuju se u kodiranom obliku):

$$\text{Istežanje} = 1,17 + 3,98A - 2,64B - 0,8830C + 4,18AC - 2,69BC \quad (9.)$$

Model za varijablu istežanja kada su vrijednosti A, B i C upisuju sa stvarnim vrijednostima glasi:

$$\begin{aligned} \text{Istežanje} = & 1,495 - 3,42 \cdot \text{Vrijeme uranjanja (dani)} + 1,088 \cdot \text{Koncentracija otopine (\%)} + \\ & 0,0656 \cdot \text{Udio vlakana (\%)} + 0,334 \cdot \text{Vrijeme uranjanja (dani)} \cdot \text{Udio vlakana (\%)} - \\ & 0,1078 \cdot \text{Koncentracija otopine (\%)} \cdot \text{Udio vlakana (\%)} \end{aligned} \quad (10.)$$

Slika 49 prikazuje ovisnost istežanja o promjenama udjela vlakana i vremena uranjanja pri koncentraciji otopine od 10 % (srednja razina koncentracije otopine).



Slika 49. Prikaz ovisnosti istežanja o promjenama udjela vlakana i vremena uranjanja pri koncentraciji otopine od 10 %

#### 5.5.4. Savojna žilavost

U tablici 13 prikazani su rezultati obrade modulom ANOVA (analiza varijance). Vrijednost omjera  $F$  od 3,84, te  $p$ -vrijednost od 0,0829 pokazuje da model nije signifikantan.

Tablica 13. Rezultati analize varijance – savojna žilavost

	<b>Suma kvadrata odstupanja</b>	<b>Stupnjevi slobode</b>	<b>Srednji kvadrat odstupanja</b>	<b>Omjer F</b>	<b>p- vrijednost</b>
<b>Model</b>	2,91	5	0,5817	3,84	0,0829
A-Vrijeme uranjanja	0,1949	1	0,1949	1,29	0,3079
B-Koncentracija otopine	0,0009	1	0,0009	0,0062	0,9401
C-Udio vlakana	0,0108	1	0,0108	0,0716	0,7997
AC	0,5612	1	0,5612	3,71	0,1121
BC	0,6480	1	0,6480	4,28	0,0933
<b>Ostatak</b>	0,7565	5	0,1513		
Odstupanje od modela	0,0231	1	0,0231	0,1260	0,7405
Pogreška	0,7334	4	0,1833		
<b>Ukupno</b>	3,66	10			

U tablici 14 prikazani su osnovni statistički podatci o modelu.

Tablica 14. Statistički podatci o modelu

<b>Standardno odstupanje</b>	0,3890
<b>Aritmetička sredina</b>	3,37
<b>Koeficijent determiniranosti <math>r^2</math></b>	0,7936

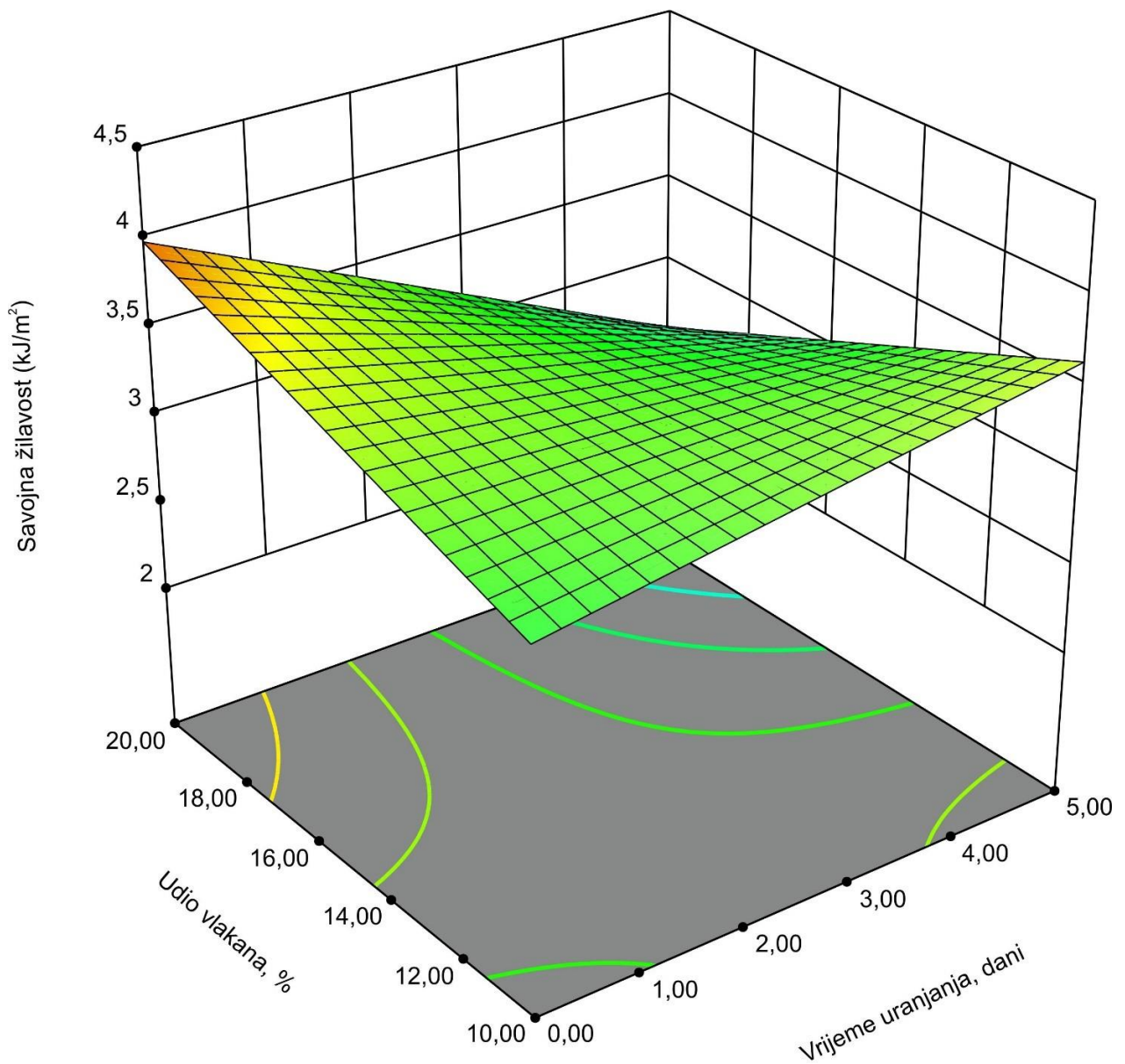
Model se za varijablu savojne žilavosti može opisati sljedećom jednadžbom (vrijednosti A, B i C upisuju se u kodiranom obliku:

$$\text{Savojna žilavost} = 3,36 - 0,2364A - 0,0124B - 0,0638C - 0,4587AC + 0,4025BC \quad (11.)$$

Model za varijablu savojne žilavosti kada su vrijednosti A, B i C upisuju sa stvarnim vrijednostima glasi:

$$\begin{aligned} \text{Savojna žilavost} = & 4,85 + 0,456 \cdot \text{Vrijeme uranjanja (dani)} - 0,244 \cdot \text{Koncentracija otopine (\%)} \\ & - 0,082 \cdot \text{Udio vlakana (\%)} - 0,037 \cdot \text{Vrijeme uranjanja (dani)} \cdot \text{Udio vlakana (\%)} + \\ & 0,0161 \cdot \text{Koncentracija otopine (\%)} \cdot \text{Udio vlakana (\%)} \end{aligned} \quad (12.)$$

Slika 50 prikazuje ovisnost savojne žilavosti o promjenama udjela vlakana i vremena uranjanja pri koncentraciji otopine od 10 % (srednja razina koncentracije otopine).



Slika 50. Prikaz ovisnosti savojne žilavosti o promjenama udjela vlakana i vremena uranjanja pri koncentraciji otopine od 10 % (srednja razina koncentracije otopine)

### 5.5.5. Optimizacija

U tablici 15 prikazani su uvjeti optimiranja za slučaj traženih maksimalnih svojstava modula rasteznosti i rastezne čvrstoće.

Tablica 15. Uvjeti optimiranja

Faktor/odziv	Cilj	Donja granica	Gornja granica
Vrijeme uranjanja, dani	u rasponu	0	5
Koncentracija otopine, %	u rasponu	5	15
Udio vlakana	u rasponu	10	20
Modul rasteznosti, N/mm <sup>2</sup>	maksimalan	280,39	2590,56
Rastezna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>	maksimalna	6,83	28,82
Istezanje, %	nema zahtjeva	1,24	14,00
Savojna žilavost, kJ/m <sup>2</sup>	nema zahtjeva	2,23	4,22

U tablici 16 prikazano je 10 rješenja optimiranja uz postavljene zahtjeve. Može se primijetiti da će se tražene vrijednosti rastezne čvrstoće i modula rasteznosti najčešće moći postići pri vremenu uranjanja od oko 1 dan uz koncentraciju otopine od 10 do 14 % i uz udio vlakana od oko 10 %.

Tablica 16. Rješenja optimiranja

Broj	Vrijeme uranjanja, dani	Koncentracija otopine, %	Udio vlakana, %	Modul rasteznosti, N/mm <sup>2</sup>	Rastezna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>	Istezanje, %	Savojna žilavost, kJ/m <sup>2</sup>	Poželjnost
<b>1</b>	<b>0,590</b>	<b>13,813</b>	<b>10,637</b>	<b>2820,281</b>	<b>31,008</b>	<b>1,466</b>	<b>3,010</b>	<b>1,000</b>
2	3,855	14,997	10,025	2605,310	29,623	1,995	3,127	1,000
3	0,011	9,986	10,302	2607,744	29,927	1,949	3,224	1,000
4	2,117	14,541	10,754	2685,499	29,976	1,535	3,065	1,000
5	2,852	14,606	10,238	2659,204	29,902	1,944	3,081	1,000
6	0,268	14,460	10,855	2894,887	31,476	1,080	2,972	1,000
7	0,055	10,573	10,486	2637,605	30,096	1,742	3,197	1,000
8	1,639	14,248	10,644	2729,836	30,333	1,575	3,047	1,000
9	0,491	10,664	10,126	2619,473	29,938	2,106	3,196	1,000

10	1,804	12,798	10,059	2650,051	30,005	2,099	3,130	1,000
----	-------	--------	--------	----------	--------	-------	-------	-------

U tablici 17 prikazani su uvjeti optimiranja za slučaj traženih maksimalnih svojstava istežanja i savojne žilavosti.

Tablica 17. Uvjeti optimiranja

Faktor/Odziv	Cilj	Donja granica	Gornja granica
Vrijeme uranjanja, dani	u rasponu	0	5
Koncentracija otopine, %	u rasponu	5	15
Udio vlakana	u rasponu	10	20
Modul rasteznosti, N/mm <sup>2</sup>	u rasponu	280,39	2590,56
Rastezna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>	u rasponu	6,83	28,82
Istežanje, %	maksimalno	1,24	14,00
Savojna žilavost, kJ/m <sup>2</sup>	maksimalno	2,23	4,22

U tablici 18 prikazano je 10 rješenja optimiranja uz postavljene zahtjeve. Može se primijetiti da će se tražene vrijednosti istežanja i savojne žilavosti najčešće moći postići pri vremenu uranjanja od 5 dana uz koncentraciju otopine od 5 % i uz udio vlakana od oko 15 %.

Tablica 18. Rješenja optimiranja

Broj	Vrijeme uranjanja, dani	Koncentracija otopine, %	Udio vlakana, %	Modul rasteznosti, N/mm <sup>2</sup>	Rastezna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>	Istežanje, %	Savojna žilavost, kJ/m <sup>2</sup>	Poželjnost
<b>1</b>	<b>5,000</b>	<b>5,000</b>	<b>14,703</b>	<b>1005,105</b>	<b>17,245</b>	<b>7,440</b>	<b>3,187</b>	<b>0,484</b>
2	5,000	5,000	14,741	999,437	17,185	7,486	3,180	0,484
3	5,000	5,000	14,656	1012,055	17,319	7,383	3,196	0,484
4	5,000	5,000	14,541	1028,900	17,498	7,246	3,217	0,483
5	5,000	5,004	14,914	974,349	16,916	7,691	3,148	0,483
6	4,990	5,000	14,840	986,792	17,049	7,589	3,163	0,483
7	5,000	5,041	14,747	1001,781	17,193	7,473	3,179	0,483
8	5,000	5,000	15,078	949,828	16,657	7,890	3,118	0,482

9	5,000	5,066	14,703	1010,342	17,273	7,407	3,187	0,482
10	5,000	5,089	14,792	998,998	17,144	7,502	3,170	0,482

### 5.6. Rasprava o rezultatima pokusa

Pregledom dobivenih podataka statističkom analizom i optimizacijom, za slučaj traženih maksimalnih svojstava modula rasteznosti i rastezne čvrstoće najviše vrijednosti se postižu pri udjelu vlakana od oko 10 % i koncentraciji otopine od minimalno 10 %, dok vrijeme uranjanja nema bitan utjecaj. Optimiranje uz uvjet najviših vrijednosti istežanja i savojne žilavosti pokazuje da su oni najveći pri koncentraciji otopine od 5 %, vremenu uranjanja 5 dana i udjelu vlakana od oko 15 %. Što je manji udio kokosovih vlakana u polimernoj matrici (epoksidna smola), bolja su rastezna svojstva. Općenito, vlakna uronjena u otopinu natrijevog bikarbonata poboljšavaju i rastezna svojstva i savojnu žilavost u odnosu na vlakna koja nisu uronjena.

U usporedbi s čistom epoksidnom smolom, rastezna svojstva kao što su modul rasteznosti i rastezna čvrstoća su se poboljšala dodavanjem vlakana, a savojna žilavost se smanjila, kao i istežanje, koje je puno bolje u slučaju čiste epoksidne smole.

## 6. ZAKLJUČAK

Pronalazak obradivih i iskoristivih materijala za izradu kompozitnih tvorevina od prirodnih materijala od važnosti je kako bi se sačuvao okoliš i kako bi potrošnja energije bila što manja. Uz ekološku prihvatljivost, dostupnost, nisku cijenu i malu masu prirodni kompoziti sve više konkuriraju konvencionalnim. Posebice u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji gdje raste potreba za lakim konstrukcijama. Nažalost, bez obzira na brojne prednosti prirodnih vlakana ona još uvijek ne mogu u potpunosti zamijeniti umjetna. Potrebno je provesti detaljnija istraživanja i istražiti kombinacije kokosovih vlakana s nekim drugim utjecajnim faktorima ili nekim drugim matricama. Dakle, u budućnosti provedbom detaljnijeg i kompleksnijeg ispitivanja stručnjaka, prirodna vlakna će se moći koristiti u industrijama i time poboljšati očuvanje okoliša i kvalitetu života.

Cilj ovog diplomskog rada bio je ispitati svojstva prirodnog kompozita čiji su sastavni dijelovi epoksidna smola kao matrica i kokosova vlakna kao ojačavalo. U teoretskom dijelu diplomskog rada opisani su prirodni kompoziti, njihova svojstva, proizvodnja, prednosti i nedostaci u odnosu na konvencionalne i njihova primjena s naglaskom na kokosova vlakna kao ojačavalo u kompozitu.

Drugi dio rada temeljio se na modificiranju kokosovih vlakana. Vlakna se trebaju modificirati kako bi se postigla što bolja svojstva pa su tako kemijske modifikacije usmjerene su poboljšavanju prijanjanja prirodnih vlakana unutar polimerne matrice. Bolja kompatibilnost polimerne matrice i vlakna rezultira većom čvrstoćom.

Kako bi se mogao pratiti utjecaj kemijske modifikacije na vlakna, napravio se plan pokusa. Plan pokusa se sastoji od tri promjenjiva faktora: vrijeme uranjanja (dani), koncentracija otopine (%) i udio vlakana (%). Pritom se ispitalo 11 različitih kombinacija navedenih faktora. Promatrana svojstva su bila: modul rasteznosti, rastezna čvrstoća, istežanje i savojna žilavost.

Ispitivanja su pokazala da svi faktori imaju utjecaj na promatrana mehanička svojstva. U usporedbi s čistom epoksidnom smolom, dodatak kokosovih vlakana povisio je vrijednosti rastezne čvrstoće i modula rasteznosti, a smanjilo vrijednosti istežanja i savojne žilavosti. Osim toga, pokazalo se da i koncentracija otopine natrijevog bikarbonata, kao i vrijeme uranjanja vlakana u otopinu također utječe na svojstva.



---

**LITERATURA**

- [1] Filetin T, Kovačićek F, Indof J. Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje. 2011th ed. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje;
- [2] <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=65055>.
- [3] <https://narodni.net/wp-content/uploads/2013/06/sadnja-i-ru%C4%8Dna-obrađa-jute.jpg>.
- [4] [https://en.wiktionary.org/wiki/abaka#/media/File:Abaca\\_sachsenleinen\\_01.jpg](https://en.wiktionary.org/wiki/abaka#/media/File:Abaca_sachsenleinen_01.jpg).
- [5] <https://www.scielo.br/j/mr/a/6VHLx376V4pNvznXmBrLVzc/?lang=en>.
- [6] Ashori A, Nourbakhsh A. A comparative study on mechanical properties and water absorption behavior of fiber-reinforced polypropylene composites prepared by OCC fiber and aspen fiber. *Polymer Composites*. 2008 May;29(5):574–8.
- [7] Friedrich K, Breuer U. *Multifunctionality of Polymer Composites*. Elsevier; 2015.
- [8] [http://www.aerodamagelab.fsb.hr/books/materijali\\_mehanika\\_kompozita.pdf](http://www.aerodamagelab.fsb.hr/books/materijali_mehanika_kompozita.pdf).
- [9] <https://www.vrtlarica.hr/sadnja-uzgoj-kokosa/>.
- [10] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Kokosova\\_palma#/media/Datoteka:Cocos\\_nucifera\\_-\\_K%C3%B6hler%E2%80%9393s\\_Medizinal-Pflanzen-187.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Kokosova_palma#/media/Datoteka:Cocos_nucifera_-_K%C3%B6hler%E2%80%9393s_Medizinal-Pflanzen-187.jpg).
- [11] <https://www.exportersindia.com/product-detail/white-coir-fibre-ramanathapuram-india-1911633.htm>.
- [12] Kabir MM, Wang H, Lau KT, Cardona F. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*. 2012 Oct;43(7):2883–92.
- [13] <https://machinodelta.com/index.php/products/>.
- [14] <https://sosopoetry.blogspot.com/2015/06/an-overview-of-kokosnoot-coir-fiber.html?m=0>.
- [15] Kabir MM, Wang H, Lau KT, Cardona F. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*. 2012 Oct;43(7):2883–92.
- [16] Santos JC dos, Oliveira LÁ de, Gomes Vieira LM, Mano V, Freire RTS, Panzera TH. Eco-friendly sodium bicarbonate treatment and its effect on epoxy and polyester coir fibre composites. *Construction and Building Materials*. 2019 Jun;211:427–36.
- [17] Hill CAS, Abdul Khalil HPS. Effect of fiber treatments on mechanical properties of coir or oil palm fiber reinforced polyester composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2000 Nov 28;78(9):1685–97.

- 
- [18] Putra AEE, Renreng I, Arsyad H, Bakri B. Investigating the effects of liquid-plasma treatment on tensile strength of coir fibers and interfacial fiber-matrix adhesion of composites. *Composites Part B: Engineering*. 2020 Feb;183:107722.
- [19] Tucman I. *Prirodni kompoziti*. Zagreb; 2020.
- [20] Adeniyi AG, Onifade DV, Ighalo JO, Adeoye AS. A review of coir fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*. 2019 Nov;176:107305.
- [21] Mišura I. *Izrada kompozitne tvorevine postupkom LRTM*. Zagreb; 2015.
- [22] <https://www.exportersindia.com/k-a-v-m-traders-3751312/>.
- [23] <https://www.extremetech.com/extreme/99249-ford-to-complement-soy-car-seats-with-coconut-composite-body-parts>.
- [24] <https://coconutvietnam.com.vn/news/15-amazing-uses-of-coconut-fibre-which-you-dont-believe/1159.html>.
- [25] <https://www.pinterest.com/vyvu1516/product-coconut-coir/>.
- [26] Adeniyi AG, Onifade DV, Ighalo JO, Adeoye AS. A review of coir fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*. 2019 Nov;176:107305.

**PRILOZI**

Tablica 19. Rezultati ispitivanja savojne žilavosti kompozita

1. STANJE				
	1-1	1-2	1-3	srednja vrijednost od $a_{cu}$
$b_1$ , mm	9,86	9,88	9,84	
$b_2$ , mm	9,87	9,88	9,89	
$b_3$ , mm	9,93	9,73	9,85	
$h_1$ , mm	3,03	2,44	2,75	
$h_2$ , mm	2,89	2,57	2,78	
$h_3$ , mm	2,98	2,86	2,89	
srednja vrijednost od $b$ , mm	9,89	9,83	9,86	
srednja vrijednost od $h$ , mm	2,97	2,62	2,81	
$E_c$ , kpcm	1,1	0,8	1,2	
$E_c$ , J	0,11	0,08	0,12	
$a_{cu}$ , kJ/m <sup>2</sup>	3,75	3,10	4,34	3,73
2. STANJE				
	2-1	2-2	2-3	
$b_1$ , mm	9,96	9,90	9,93	
$b_2$ , mm	9,97	10,00	9,95	
$b_3$ , mm	9,93	9,89	9,91	
$h_1$ , mm	3,60	3,66	3,40	
$h_2$ , mm	3,44	3,59	3,47	
$h_3$ , mm	3,53	3,79	3,09	
srednja vrijednost od $b$ , mm	9,95	9,93	9,93	
srednja vrijednost od $h$ , mm	3,52	3,68	3,32	
$E_c$ , kpcm	1,10	0,95	1,00	
$E_c$ , J	0,11	0,10	0,10	
$a_{cu}$ , kJ/m <sup>2</sup>	3,14	2,60	3,03	2,92
3. STANJE				
	3-1	3-2	3-3	
$b_1$ , mm	10,01	9,99	10,00	

$b_2$ , mm	9,97	9,98	9,81	
$b_3$ , mm	9,95	9,90	9,78	
$h_1$ , mm	3,90	3,72	4,03	
$h_2$ , mm	3,31	3,46	3,50	
$h_3$ , mm	3,70	3,39	3,54	
srednja vrijednost od $b$ , mm	9,98	9,96	9,86	
srednja vrijednost od $h$ , mm	3,64	3,52	3,69	
$E_c$ , kpcm	0,50	0,90	1,00	
$E_c$ , J	0,05	0,09	0,10	
$a_{cu}$ , kJ/m <sup>2</sup>	1,38	2,57	2,75	2,23
4. STANJE				
	4-1	4-2	4-3	
$b_1$ , mm	9,99	9,91	9,95	
$b_2$ , mm	10,01	9,92	10,02	
$b_3$ , mm	9,98	9,92	10,01	
$h_1$ , mm	3,55	3,01	3,40	
$h_2$ , mm	3,49	3,02	3,40	
$h_3$ , mm	3,50	3,00	3,15	
srednja vrijednost od $b$ , mm	9,99	9,92	9,99	
srednja vrijednost od $h$ , mm	3,51	3,01	3,32	
$E_c$ , kpcm	1,00	1,40	1,70	
$E_c$ , J	0,10	0,14	0,17	
$a_{cu}$ , kJ/m <sup>2</sup>	2,85	4,69	5,13	4,22
5. STANJE				
	5-1	5-2	5-3	
$b_1$ , mm	9,92	9,95	9,99	
$b_2$ , mm	9,98	9,93	10,00	
$b_3$ , mm	9,88	9,91	9,90	
$h_1$ , mm	4,29	4,40	4,05	
$h_2$ , mm	4,46	3,97	3,83	
$h_3$ , mm	4,50	4,04	4,20	
srednja vrijednost od $b$ , mm	9,93	9,93	9,96	
srednja vrijednost od $h$ , mm	4,42	4,14	4,03	

$E_c$ , kpcm	1,10	1,20	1,00	
$E_c$ , J	0,11	0,12	0,10	
$a_{cu}$ , kJ/m <sup>2</sup>	2,51	2,92	2,49	2,64
6. STANJE				
	6-1	6-2	6-3	
$b_1$ , mm	9,85	9,95	9,99	
$b_2$ , mm	9,98	9,93	10,00	
$b_3$ , mm	9,88	9,91	9,90	
$h_1$ , mm	4,29	4,40	4,05	
$h_2$ , mm	4,46	3,97	3,83	
$h_3$ , mm	4,50	4,04	4,20	
srednja vrijednost od $b$ , mm	9,90	9,93	9,96	
srednja vrijednost od $h$ , mm	4,42	4,14	4,03	
$E_c$ , kpcm	1,70	1,70	1,00	
$E_c$ , J	0,17	0,17	0,10	
$a_{cu}$ , kJ/m <sup>2</sup>	3,89	4,14	2,49	3,51
7. STANJE				
	7-1	7-2	7-3	
$b_1$ , mm	10,06	9,95	9,94	
$b_2$ , mm	10,05	9,98	9,94	
$b_3$ , mm	9,90	9,94	9,95	
$h_1$ , mm	3,47	3,80	3,46	
$h_2$ , mm	3,41	3,80	3,75	
$h_3$ , mm	3,40	3,50	3,75	
srednja vrijednost od $b$ , mm	10,00	9,96	9,94	
srednja vrijednost od $h$ , mm	3,43	3,70	3,65	
$E_c$ , kpcm	1,00	1,10	1,30	
$E_c$ , J	0,10	0,11	0,13	
$a_{cu}$ , kJ/m <sup>2</sup>	2,92	2,99	3,58	3,16
8. STANJE				
	8-1	8-2	8-3	
$b_1$ , mm	9,89	9,85	9,85	
$b_2$ , mm	9,90	9,93	9,94	

$b_3$ , mm	9,87	9,85	9,86	
$h_1$ , mm	3,60	3,81	4,01	
$h_2$ , mm	3,90	3,46	3,85	
$h_3$ , mm	3,60	3,42	3,88	
srednja vrijednost od $b$ , mm	9,89	9,88	9,88	
srednja vrijednost od $h$ , mm	3,70	3,56	3,91	
$E_c$ , kpcm	1,00	1,00	1,60	
$E_c$ , J	0,10	0,10	0,16	
$a_{cu}$ , kJ/m <sup>2</sup>	2,73	2,84	4,14	3,24
9. STANJE				
	9-1	9-2	9-3	
$b_1$ , mm	9,96	10,00	9,91	
$b_2$ , mm	9,93	10,05	9,85	
$b_3$ , mm	9,86	10,02	9,90	
$h_1$ , mm	3,02	3,60	3,20	
$h_2$ , mm	2,87	3,59	3,31	
$h_3$ , mm	3,12	3,48	3,33	
srednja vrijednost od $b$ , mm	9,92	10,02	9,89	
srednja vrijednost od $h$ , mm	3,00	3,56	3,28	
$E_c$ , kpcm	1,40	0,95	1,30	
$E_c$ , J	0,14	0,10	0,13	
$a_{cu}$ , kJ/m <sup>2</sup>	4,70	2,66	4,01	3,79
10. STANJE				
	10-1	10-2	10-3	
$b_1$ , mm	9,97	9,81	9,82	
$b_2$ , mm	9,87	9,90	9,83	
$b_3$ , mm	9,93	9,83	9,86	
$h_1$ , mm	3,20	3,19	3,30	
$h_2$ , mm	3,18	3,44	3,18	
$h_3$ , mm	3,05	3,40	3,23	
srednja vrijednost od $b$ , mm	9,92	9,85	9,84	
srednja vrijednost od $h$ , mm	3,14	3,34	3,24	
$E_c$ , kpcm	1,20	0,85	1,30	

$E_c$ , J	0,12	0,09	0,13	
$a_{cu}$ , kJ/m <sup>2</sup>	3,85	2,58	4,08	3,50
11. STANJE				
	11-1	11-2	11-3	
$b_1$ , mm	9,93	9,90	10,18	
$b_2$ , mm	9,88	9,86	9,89	
$b_3$ , mm	9,97	9,92	10,03	
$h_1$ , mm	2,96	3,13	3,16	
$h_2$ , mm	2,79	3,16	3,20	
$h_3$ , mm	3,00	3,18	3,18	
srednja vrijednost od $b$ , mm	9,93	9,89	10,03	
srednja vrijednost od $h$ , mm	2,92	3,16	3,18	
$E_c$ , kpcm	1,20	1,45	1,10	
$E_c$ , J	0,12	0,15	0,11	
$a_{cu}$ , kJ/m <sup>2</sup>	4,14	4,64	3,45	4,08

Tablica 20. Rezultati ispitivanja savojne žilavosti čiste epoksidne smole

EPOKSIDNA SMOLA				
	1	2	3	srednja vrijednost od $a_{cu}$
$b_1$ , mm	10,50	10,00	10,00	
$b_2$ , mm	10,00	10,00	10,50	
$b_3$ , mm	10,00	10,00	10,00	
$h_1$ , mm	3,00	3,00	3,50	
$h_2$ , mm	3,00	3,00	3,00	
$h_3$ , mm	3,00	3,00	3,50	
srednja vrijednost od $b$ , mm	10,17	10,00	10,17	
srednja vrijednost od $h$ , mm	3,00	3,00	3,33	
$E_c$ , kpcm	2,30	3,20	4,00	
$E_c$ , J	0,23	0,32	0,40	
$a_{cu}$ , kJ/m <sup>2</sup>	7,54	10,67	11,80	10,00

Tablica 21. Rezultati ispitivanja rasteznih svojstava kompozita

1. STANJE				srednja vrijednost	standardna devijacija
	1-1	1-2	1-3		
$b_1$ , mm	24,84	24,77	24,87	24,83	0,05
$b_2$ , mm	25,04	24,78	24,89	24,90	0,13
$b_3$ , mm	24,96	24,88	24,88	24,91	0,05
$h_1$ , mm	4,36	4,02	3,83	4,07	0,27
$h_2$ , mm	4,14	3,82	4,11	4,02	0,18
$h_3$ , mm	4,31	4,44	4,20	4,32	0,12
srednja vrijednost od $b$ , mm	24,95	24,77	24,88	24,87	0,09
srednja vrijednost od $h$ , mm	4,27	4,09	4,05	4,14	0,12
$A$ , mm <sup>2</sup>	106,54	101,31	100,76	102,87	3,19
$F_{\max}$ , N	1987,01	2086,20	2500,42	2191,21	272,34
$F_P$ , N	1987,01	2086,20	2500,42	2191,21	272,34
$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	18,65	20,59	24,81	21,35	3,15
$R_P$ , N/mm <sup>2</sup>	18,65	20,59	24,81	21,35	3,15
$\varepsilon$ , %	1,73	2,17	3,03	2,31	0,66
$E$ , N/mm <sup>2</sup>	1213,43	977,56	1300,02	1163,67	166,89
2. STANJE					
	2-1	2-2	2-3		
$b_1$ , mm	25,13	24,97	25,14	25,08	0,10
$b_2$ , mm	24,87	24,54	4,89	18,10	11,44
$b_3$ , mm	25,07	24,84	25,08	25,00	0,14
$h_1$ , mm	5,38	5,50	5,09	5,32	0,21
$h_2$ , mm	4,76	4,54	4,96	4,75	0,21
$h_3$ , mm	5,89	5,46	5,04	5,46	0,43
srednja vrijednost od $b$ , mm	25,02	24,78	25,04	24,95	0,14
srednja vrijednost od $h$ , mm	5,34	5,17	5,03	5,18	0,16
$A$ , mm <sup>2</sup>	133,61	128,11	125,95	129,22	3,95
$F_{\max}$ , N	2054,14	2095,39	2191,69	2113,74	70,59
$F_P$ , N	2054,14	2095,39	2191,69	2113,74	70,59
$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	15,37	16,36	17,40	16,38	1,01
$R_P$ , N/mm <sup>2</sup>	15,37	16,36	17,40	16,38	1,01



$\varepsilon$ , %	2,41	2,21	2,80	2,48	0,30
$E$ , N/mm <sup>2</sup>	877,13	1018,21	1053,48	982,94	93,32
3. STANJE					
	3-1	3-2	3-3		
$b_1$ , mm	25,14	25,20	25,05	25,13	0,08
$b_2$ , mm	24,88	24,93	25,16	24,99	0,15
$b_3$ , mm	24,86	25,06	24,97	24,96	0,10
$h_1$ , mm	5,50	5,50	5,52	5,51	0,01
$h_2$ , mm	4,45	4,45	3,30	4,07	0,66
$h_3$ , mm	4,38	4,38	4,71	4,49	0,19
srednja vrijednost od $b$ , mm	25,06	25,06	25,06	25,06	0,00
srednja vrijednost od $h$ , mm	4,96	4,78	4,51	4,75	0,23
$A$ , mm <sup>2</sup>	123,80	119,72	113,02	118,85	5,44
$F_{\max}$ , N	1048,44	701,63	696,89	815,65	201,61
$F_P$ , N	793,37	300,40	273,42	455,73	292,71
$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	8,47	5,86	6,17	6,83	1,43
$R_P$ , N/mm <sup>2</sup>	6,41	2,51	2,42	3,78	2,28
$\varepsilon$ , %	12,35	15,70	13,94	14,00	1,68
$E$ , N/mm <sup>2</sup>	330,42	247,13	263,62	280,39	44,11
4. STANJE					
	4-1	4-2	4-3		
$b_1$ , mm	24,87	24,82	24,99	24,89	0,09
$b_2$ , mm	24,88	24,76	24,87	24,84	0,07
$b_3$ , mm	24,87	24,80	24,88	24,85	0,04
$h_1$ , mm	4,11	4,11	4,20	4,14	0,05
$h_2$ , mm	4,00	4,03	4,30	4,11	0,17
$h_3$ , mm	4,18	4,06	4,05	4,10	0,07
srednja vrijednost od $b$ , mm	24,87	24,79	24,91	24,86	0,06
srednja vrijednost od $h$ , mm	4,10	4,07	4,18	4,12	0,06
$A$ , mm <sup>2</sup>	101,97	100,90	104,12	102,33	1,64
$F_{\max}$ , N	2750,30	2757,02	2632,03	2713,12	70,30
$F_P$ , N	2750,30	2757,02	2632,03	2713,12	70,30
$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	26,97	27,33	25,28	26,53	1,09

$R_P$ , N/mm <sup>2</sup>	26,97	27,33	25,28	26,53	1,09
$\varepsilon$ , %	2,68	2,66	2,35	2,56	0,18
$E$ , N/mm <sup>2</sup>	1422,59	1482,04	1464,56	1456,40	30,55
5. STANJE					
	5-1	5-2	5-3		
$b_1$ , mm	24,79	24,99	24,66	24,81	0,17
$b_2$ , mm	24,83	24,92	24,69	24,81	0,12
$b_3$ , mm	24,70	24,96	24,70	24,79	0,15
$h_1$ , mm	4,41	4,19	4,21	4,27	0,12
$h_2$ , mm	4,14	4,20	4,30	4,21	0,08
$h_3$ , mm	4,19	4,32	4,25	4,25	0,07
srednja vrijednost od $b$ , mm	24,79	24,96	24,68	24,81	0,14
srednja vrijednost od $h$ , mm	4,25	4,24	4,25	4,25	0,01
$A$ , mm <sup>2</sup>	105,36	105,83	104,89	105,36	0,47
$F_{\max}$ , N	2715,50	2933,37	2459,27	2702,71	237,31
$F_P$ , N	2715,50	2933,37	2459,27	2702,71	237,31
$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	25,77	28,02	23,45	25,75	2,29
$R_P$ , N/mm <sup>2</sup>	25,77	28,02	23,45	25,75	2,29
$\varepsilon$ , %	2,98	2,82	2,84	2,88	0,09
$E$ , N/mm <sup>2</sup>	1244,53	1506,08	1180,81	1310,47	172,37
6. STANJE					
	6-1	6-2	6-3		
$b_1$ , mm	24,77	24,86	24,99	24,87	0,11
$b_2$ , mm	24,78	25,04	24,65	24,82	0,20
$b_3$ , mm	24,84	25,01	24,75	24,87	0,13
$h_1$ , mm	4,16	5,00	4,78	4,65	0,44
$h_2$ , mm	4,46	4,60	5,13	4,73	0,35
$h_3$ , mm	4,74	4,38	4,54	4,55	0,18
srednja vrijednost od $b$ , mm	24,80	24,97	24,80	24,86	0,10
srednja vrijednost od $h$ , mm	4,51	4,66	4,82	4,66	0,16
$A$ , mm <sup>2</sup>	112,30	116,36	119,54	116,07	3,63
$F_{\max}$ , N	2867,19	2513,55	2762,50	2714,41	181,66
$F_P$ , N	2867,19	2513,55	2762,50	2714,41	181,66

$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	25,63	21,60	23,11	23,45	2,04
$R_P$ , N/mm <sup>2</sup>	25,63	21,60	23,11	23,45	2,04
$\varepsilon$ , %	1,12	1,06	2,62	1,60	0,88
$E$ , N/mm <sup>2</sup>	2784,72	2332,05	1256,29	2124,35	785,10
7. STANJE					
	7-1	7-2	7-3		
$b_1$ , mm	24,61	24,90	24,70	24,74	0,15
$b_2$ , mm	24,63	24,67	24,70	24,67	0,04
$b_3$ , mm	24,66	24,77	24,62	24,68	0,08
$h_1$ , mm	4,05	4,14	3,99	4,06	0,08
$h_2$ , mm	4,33	4,36	4,14	4,28	0,12
$h_3$ , mm	4,18	4,47	4,42	4,36	0,16
srednja vrijednost od $b$ , mm	24,63	24,78	24,69	24,70	0,08
srednja vrijednost od $h$ , mm	4,19	4,32	4,18	4,23	0,08
$A$ , mm <sup>2</sup>	103,20	107,05	103,20	104,48	2,22
$F_{\max}$ , N	2989,06	3229,43	2821,09	3013,19	205,24
$F_P$ , N	2989,06	3229,43	2821,09	3013,19	205,24
$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	28,96	30,17	27,34	28,82	1,42
$R_P$ , N/mm <sup>2</sup>	28,96	30,17	27,34	28,82	1,42
$\varepsilon$ , %	1,30	1,34	1,18	1,28	0,08
$E$ , N/mm <sup>2</sup>	2439,07	2579,58	2753,04	2590,56	157,27
8. STANJE					
	8-1	8-2	8-3		
$b_1$ , mm	24,89	24,88	24,70	24,82	0,11
$b_2$ , mm	24,86	24,95	24,64	24,82	0,16
$b_3$ , mm	24,90	24,79	24,83	24,84	0,06
$h_1$ , mm	4,87	4,73	4,33	4,64	0,28
$h_2$ , mm	4,59	4,00	5,00	4,53	0,50
$h_3$ , mm	4,61	4,81	4,74	4,72	0,10
srednja vrijednost od $b$ , mm	24,88	24,87	24,72	24,82	0,09
srednja vrijednost od $h$ , mm	4,69	4,51	4,69	4,63	0,10
$A$ , mm <sup>2</sup>	116,69	112,16	115,94	114,93	2,43
$F_{\max}$ , N	2765,03	2021,37	3279,20	2688,53	632,39

$F_P$ , N	2765,03	2021,37	3279,20	2688,53	632,39
$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	23,70	18,02	28,28	23,33	5,14
$R_P$ , N/mm <sup>2</sup>	23,70	18,02	28,28	23,33	5,14
$\varepsilon$ , %	2,52	1,66	2,94	2,37	0,65
$E$ , N/mm <sup>2</sup>	1321,49	1320,92	1353,49	1331,97	18,64
9. STANJE					
	9-1	9-2	9-3		
$b_1$ , mm	24,99	24,78	24,79	24,85	0,12
$b_2$ , mm	24,85	24,77	25,02	24,88	0,13
$b_3$ , mm	24,95	24,90	24,96	24,94	0,03
$h_1$ , mm	4,65	4,09	4,45	4,40	0,28
$h_2$ , mm	4,74	4,35	3,98	4,36	0,38
$h_3$ , mm	3,90	4,90	4,87	4,56	0,57
srednja vrijednost od $b$ , mm	24,93	24,82	24,92	24,89	0,06
srednja vrijednost od $h$ , mm	4,43	4,45	4,43	4,44	0,01
$A$ , mm <sup>2</sup>	110,44	110,45	110,40	110,43	0,03
$F_{\max}$ , N	2894,50	2974,11	2732,44	2867,02	123,16
$F_P$ , N	2894,50	2974,11	2732,44	2867,02	123,16
$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	26,21	26,93	24,68	25,94	1,15
$R_P$ , N/mm <sup>2</sup>	26,21	26,93	24,68	25,94	1,15
$\varepsilon$ , %	1,24	1,34	1,36	1,31	0,06
$E$ , N/mm <sup>2</sup>	2218,76	2376,33	2152,87	2249,32	114,82
10. STANJE					
	10-1	10-2	10-3		
$b_1$ , mm	24,83	24,87	24,85	24,85	0,02
$b_2$ , mm	25,02	24,92	24,68	24,87	0,17
$b_3$ , mm	25,00	24,90	24,85	24,92	0,08
$h_1$ , mm	4,35	4,87	4,55	4,59	0,26
$h_2$ , mm	4,14	4,70	4,47	4,44	0,28
$h_3$ , mm	5,02	4,43	5,00	4,82	0,34
srednja vrijednost od $b$ , mm	24,95	24,90	24,70	24,85	0,13
srednja vrijednost od $h$ , mm	4,50	4,67	4,67	4,61	0,10
$A$ , mm <sup>2</sup>	112,28	116,28	115,35	114,64	2,09

$F_{\max}$ , N	2753,39	2523,76	1903,75	2393,63	439,51
$F_P$ , N	2753,39	2523,76	1903,75	2393,63	439,51
$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	24,52	21,70	16,50	20,91	4,07
$R_P$ , N/mm <sup>2</sup>	24,52	21,70	16,50	20,91	4,07
$\varepsilon$ , %	1,40	1,44	0,87	1,24	0,32
$E$ , N/mm <sup>2</sup>	1876,96	2046,62	1953,50	1959,03	84,96
11. STANJE					
	11-1	11-2	11-3		
$b_1$ , mm	24,97	24,97	24,97	24,97	0,00
$b_2$ , mm	24,94	24,44	24,99	24,79	0,30
$b_3$ , mm	24,97	24,99	24,97	24,98	0,01
$h_1$ , mm	4,70	4,90	4,84	4,81	0,10
$h_2$ , mm	4,64	4,53	4,61	4,59	0,06
$h_3$ , mm	4,90	4,49	4,50	4,63	0,23
srednja vrijednost od $b$ , mm	24,96	24,80	24,98	24,91	0,10
srednja vrijednost od $h$ , mm	4,75	4,64	4,65	4,68	0,06
$A$ , mm <sup>2</sup>	118,56	115,07	116,16	116,60	1,79
$F_{\max}$ , N	2800,76	3029,55	2986,26	2938,86	121,54
$F_P$ , N	2800,76	3029,55	2986,26	2938,86	121,54
$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	25,10	26,33	25,71	25,71	0,61
$R_P$ , N/mm <sup>2</sup>	25,10	26,33	25,71	25,71	0,61
$\varepsilon$ , %	2,07	1,34	2,64	2,02	0,65
$E$ , N/mm <sup>2</sup>	1586,90	2091,33	1174,37	1617,53	459,25

Tablica 22. Rezultati ispitivanja rasteznih svojstava čiste epoksidne smole

EPOKSIDNA SMOLA					
	1	2	3	srednja vrijednost	standardna devijacija
$b_1$ , mm	25,50	25,50	24,50	25,17	0,58
$b_2$ , mm	25,50	25,20	25,00	25,23	0,25
$b_3$ , mm	25,00	25,00	25,00	25,00	0,00
$h_1$ , mm	4,60	4,50	4,00	4,37	0,32
$h_2$ , mm	4,50	4,50	4,00	4,33	0,29
$h_3$ , mm	4,20	4,50	4,00	4,23	0,25
srednja vrijednost od $b$ , mm	25,33	25,23	24,83	25,13	0,26
srednja vrijednost od $h$ , mm	4,43	4,50	4,00	4,31	0,27
$A$ , mm <sup>2</sup>	112,31	113,55	99,33	108,40	7,87
$F_{\max}$ , N	1215,7 7	1176,6 1	944,99	1112,46	146,35
$F_P$ , N	1206,1 4	1159,8 8	934,08	1100,03	145,57
$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	10,90	10,43	9,51	10,28	0,71
$R_P$ , N/mm <sup>2</sup>	10,82	10,28	9,40	10,17	0,71
$\varepsilon$ , %	41,85	38,34	38,06	39,42	2,11
$E$ , N/mm <sup>2</sup>	421,83	486,55	318,56	408,98	84,73