

# Termoizolacijski kompozitni materijali na bazi otpadne bio mase

---

**Parać, Martina**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Textile Technology / Sveučilište u Zagrebu, Tekstilno-tehnološki fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:201:939999>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Textile Technology University of Zagreb - Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**TEKSTILNO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**  
**TEKSTILNA TEHNOLOGIJA I INJŽENJERSTVO**

**DIPLOMSKI RAD**

**TERMOIZOLACIJSKI KOMPOZITNI MATERIJALI NA BAZI OTPADNE  
BIOMASE**

**MARTINA PARAĆ**

**Zagreb, listopad 2018.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**TEKSTILNO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**  
**TEKSTILNA TEHNOLOGIJA I INJŽENJERSTVO**  
**PROJEKTIRANJE I MENADMENT TEKSTILA**

**DIPLOMSKI RAD**

**TERMOIZOLACIJSKI KOMPOZITNI MATERIJALI NA BAZI OTPADNE  
BIOMASE**

**Prof. dr. sc. Budimir Mijović**  
**Prof. dr. sc. Zenun Skenderi**

**Martina Parać, 10 739 / TTI PMT**

**Zagreb, listopad 2018.**

Ovaj rad je izrađen pod mentorstvom prof. dr. sc. Budimira Mijovića, prof. dr. sc. Zenuna Skenderija i neposredne voditeljice dr. sc. Emilije Zdraveve.

Broj stranica: 50

Broj slika: 34

Broj tablica: 5

Broj grafova: 7

Broj literaturnih izvora: 31

Broj matematičkih izraza: 1

Sastav povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zenun Skenderi, predsjednik povjerenstva

Prof. dr. sc. Budimir Mijović, član

Izv. prof. dr. sc. Snježana Firšt Rogale, članica

Izv. prof. dr. sc. Sanja Ercegović Ražić, zamjenica člana

Datum predaje rada: 02.10.2018.

Datum obrane rada: 04.10.2018.

## ZAHVALA

*Zahvaljujem svom mentoru prof. dr. sc. Budimiru Mijoviću na strpljenju i pomoći kod izrade mog diplomskog rada.*

*Zahvaljujem neposrednoj voditeljici dr. sc. Emiliji Zdravevoj na dostupnosti u svakom trenutku te pomoći u praktičnom i teorijskom dijelu diplomskog rada.*

*Zahvaljujem svom komentoru prof. dr. sc. Zenunu Skenderiju na mjerenjima na vrućoj ploči.*

*Zahvaljujem se svojim roditeljima na neizmjerljivoj podršci tijekom cijelog mog studiranja.*

## SAŽETAK

Područja primjene kompozitnih materijala su mnogobrojna uključujući: automobilsku industriju, aeronautiku, medicinu, građevinarstvo, sport itd. U novije vrijeme istraživanja ovih materijala prvenstveno uključuju izradu biokompozita na bazi prirodnih punila (ojačanja), što rezultira prednostima poput: ekološke prihvatljivosti, dostupnosti, niske cijene, niske gustoće, niskog abrazivnog trošenja u strojevima i manje oslobađanje ugljičnog dioksida.

U ovom radu pripremljeni su biokompozitni filmovi, na bazi otpadne biomase, postupkom lijevanja mješavine vodene otopine polietilen oksida (PEO) i ljuske riže (LJR). Ljuske riže su poznate po tome da kompozitnim materijalima daju bolja termoizolacijska svojstva. Rižine ljuske mljevene su u tri razine na sitno, srednje i krupno mljevene, dok su koncentracije bile od 25, 50 i 100 % u odnosu na masu polimera. Biokompozitnim materijalima ispitana su mehanička i termoizolacijska svojstva. Rezultati su pokazali da je za poboljšanje vlačne čvrstoće, dodatkom punila u matricu potrebno ostvariti jaku adheziju između matrice i punila. Manja veličina punila rezultira većom specifičnom površinom odnosno boljom interakcijom s matricom. Zbog toga je jedino kod biokompozita sa sitno mljevenim rižinim ljuskama uz povećanje punila potrebna veća maksimalna sila istezanja do pucanja za razliku od uzoraka sa srednje mljevenim i krupno mljevenim ljuskama. Dodatak krupno mljevenih rižinih ljuski rezultirao je smanjenjem otpora prolazu topline kod svih koncentracija punila. Puno veći otpor prolazu topline u odnosu na čisti PEO filma ( $0,049 \text{ m}^2\text{C/W}$ ) imaju biokompoziti sa sitno mljevenim i srednje mljevenim (najveće povećanje od 120 % kod PEO/LJR=100/25) rižinim ljuskama. Rezultati pokazuju da se smanjenjem veličine rižinih ljuski poboljšava interakcija rižinih ljuski s PEO polimernom matricom, što rezultira poboljšanjem termoizolacijskih svojstava biokompozita.

**Ključne riječi:** kompozitni materijali, otpadna biomasa, rižine ljuske, mehanička svojstva, termoizolacija

# SADRŽAJ

<b>SAŽETAK</b>	i
<b>Popis slika</b>	iv
<b>Popis tablica</b>	vi
<b>Popis grafova</b>	vii
<b>1. UVOD</b>	2
<b>2. TEORIJSKI DIO</b>	4
2.1. Kompozitni materijali	4
2.1.1. Podjela kompozitnih materijala	5
2.1.1.1. Kompozitni materijali prema vrsti matrice	6
2.1.1.2. Kompozitni materijali prema vrsti ojačala	9
2.1.2. Podjela kompozitnih materijala prema procesu izrade	11
2.1.2.1. Otvoreno oblikovanje	11
2.1.2.2. Zatvoreno oblikovanje	13
2.3. Primjena kompozitnih materijala	17
2.4. Biokompozitni materijali (punila na bazi bio mase)	19
2.4.1. Dosadašnja istraživanje vezana uz biokompozitne materijale	21
2.4.2. Primjena biokompozitnih materijala	22
2.4.3. Primjeri primjene prirodnih materijala u termoizolaciji	24
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO</b>	29
3.1. Materijali	29
3.2. Metoda rada	29
3.2.1. Priprema biokompozitnih materijala	29
3.3. Karakterizacija pripremljenih biokompozitnih materijala	32
3.3.1. Određivanje debljine biokompozitnih materijala	32
3.3.2. Mehaničko ponašanje biokompozitnih materijala – vlačni test	33
3.3.3. Određivanje otpora prolazu topline – ispitivanje vrućom pločom	33
<b>4. REZULTATI I RASPRAVA</b>	36
4.1. Ovisnost debljine biokompozitnih materijala o koncentraciji i veličini punila	36
4.2. Ovisnost mehaničkog ponašanja biokompozitnih materijala o koncentraciji i veličini punila	37

4.3. Ovisnost otpora prolazu topline biokompozitnih materijala o koncentraciji i veličini punila	42
<b>5. ZAKLJUČAK</b>	46
<b>6. LITERATURA</b>	48
<b>ŽIVOTOPIS</b>	51



## Popis slika

**Slika 2.1.1.** Prikaz sastava kompozitnih materijala [4], str. 4

**Slika 2.1.1.1.** Kompozitni materijali ojačani sa: a) kratkim vlaknima, b) filamentima, c) česticama i d) pahuljicama [5], str. 5

**Slika 2.1.2.1.** Različite orijentacije vlakana kod vlaknima ojačanih kompozitnih materijala a) kratka, proizvoljno orijentirana vlakna b) duga, u jednom pravcu c) vlakna orijentirana u dva pravca d) duga, proizvoljno orijentirana vlakna [10], e) laminatni kompoziti s orijentacijom vlakana u dva smjera [9], str. 9

**Slika 2.1.1.2.2.** Sendvič konstrukcije s jezgrom saća [9], str. 11

**Slika 2.1.2.1.1.** Ručno laminiranje [11], str. 12

**Slika 2.1.2.1.2.** Tehnika prskanja [11], str. 12

**Slika 2.1.2.1.3.** Tehnika namatanja vlakana, [11] str. 13

**Slika 2.1.2.2.1.** Postupak izrade kompozita putem zatvorenog oblikovanja [11], str. 13

**Slika 2.1.2.2.2.** Vakumiranje [11], str. 14

**Slika 2.1.2.2.3.** Vakuumska infuzija [11], str. 14

**Slika 2.1.2.2.4.** Ubrizgavanje smole u kalup [11], str. 15

**Slika 2.1.2.2.5.** Izravno prešanje [11], str. 15

**Slika 2.1.2.2.6.** Pultruzija [11], str. 16

**Slika 2.1.2.2.7.** Centrifugalno lijevanje [11], str. 16

**Slika 2.3.1.** Airbus A 310 [15], str. 17

**Slika 2.3.2.** Protetičko sportsko stopalo [17], str. 18

**Slika 2.3.3.** Umjetno proizvedena krvna žila kompozitnog sastava [18], str. 19

**Slika 2.4.2.1.** Automobilski dijelovi načinjeni od biokompozitnih materijala [22], str. 23

**Slika 2.4.2.2.** Kanu proizveden pomoću *Biotex* lanene tkanine [22], str. 23

**Slika 2.4.2.3.** Daska za *snowboard* proizvedena pomoću *Biotex* lanene tkanine [22], str. 24

**Slika 2.4.3.1.** Paneli od trske [24], str. 25

**Slika 2.4.3.2.** Šećerna trska (lijevo), otpad šećerne trske (desno) [24], str. 25

**Slika 2.4.3.3.** Panel od recikliranog pamuka (lijevo) i denim (desno) [24], str. 25

**Slika 2.4.3.4.** Biljka rogoza (lijevo), paneli od rogoza (desno) [24], str. 26

**Slika 2.4.3.5.** Panel od slame [24], str. 26

**Slika 2.4.3.6.** Kukuruzni klip (lijevo), mljeveni kukuruzni klip (u sredini) panel (desno) [24], str. 27

**Slika 3.2.1.1.** Rižine ljuske: prije mljevenja a), krupno mljevene b), srednje mljevene c) i sitno mljevene d) [26], str. 30

**Slika 3.2.1.2.** Biokompozitni filmovi nakon lijevanja u kalupe s dimenzijama od 150 x 250 mm sa: krupno a), srednje b) i sitno c) mljevenim ljuskama riže i omjerima matrica/punilo: PEO/LJR=100/25, 100/50, 100/100, str. 30-31

**Slika 3.2.1.3.** Biokompozitni filmovi nakon sušenja u kalupe s dimenzijama od 305 x 305 mm sa: krupno a), srednje b) i sitno c) mljevenim ljuskama riže i omjerima matrica/punilo: PEO/LJR=100/25, 100/50, 100/100, str. 31-32

**Slika 3.3.1.1.** Debljinomjer – mikrometar, str. 32

**Slika 3.3.2.1.** Dinamometar Tenso Lab 3000, str. 33

**Slika 3.3.3.1.** Vruća ploča – Thermetrics, SAD [29], str. 34

**Slika 4.2.1.** Vlačni test čistog PEO (a) i termoizolacijskih biokompozita PEO/LJR (b i c), str. 37

**Slika 4.2.2.** Izgled rižine ljuske nakon mljevenja: krupno (a) i srednje mljevene ljuske (b), slike dobivene optičkim mikroskopom, str. 42

## **Popis tablica**

**Tablica 2.1.1.1.1.** Mehanička svojstva kompozita s matricom aluminija ojačanog česticama silikonskog karbida, 6061-T6 aluminija, 6Al-4V titana i 4340 željeza [3], str. 6

**Tablica 2.1.1.1.2.** Otpornost na lom strukturnih legura, monolitne keramike i kompozita s keramičkom matricom [4], str. 7

**Tablica 2.4.1.** Kemijski sastav i fizikalna svojstva rižinih ljuski [20, 21], str. 20

**Tablica 4.1.1.** Srednje vrijednosti i SD debljina biokompozitnih filmova, str. 36

**Tablica 4.2.1.** Srednje vrijednosti i SD maksimalne sile, istezanja i vlačne čvrstoće PEO/LJR biokompozita, str. 38

## **Popis grafova**

**Graf 4.2.1.** Dijagram kidanja (sila – istežanje) PEO/ljuske riže = 100/25 krupno, srednje i sitno mljevene, str. 39

**Graf 4.2.2.** Dijagram kidanja (sila – istežanje) PEO/ljuske riže = 100/50 krupno, srednje i sitno mljevene, str. 39

**Graf 4.2.3.** Dijagram kidanja (sila – istežanje) PEO/ljuske riže = 100/100 krupno, srednje i sitno mljevene, str. 40

**Graf 4.2.4.** Dijagram kidanja (sila – istežanje) PEO/ljuske riže - sitno mljevene s udjelom od 25, 50 i 100 %, str. 40

**Graf 4.2.5.** Dijagram kidanja (sila – istežanje) PEO/ljuske riže - srednje mljevene s udjelom od 25, 50 i 100 % , str. 41

**Graf 4.2.6.** Dijagram kidanja (sila – istežanje) PEO/ljuske riže - krupno mljevene s udjelom od 25, 50 i 100 %, str. 41

**Graf 4.3.1.** Otpor prolazu topline biokompozitnih PEO/LJR materijala, str. 43

**UVOD**

## 1. UVOD

Kompozitni se materijali upotrebljavaju tisućljećima. Jedan od najranijih primjera upotrebe kompozitnih materijala je izrada šperploča pomoću lijepljenja drvenih traka 3400. g. pr. Kr. Oko 1500 g. pr. Kr se za gradnju nastambi počinju upotrebljavati slamom ojačane cigle od blata. Pronađeno je 10 knjiga o arhitekturi starih više od 2000 godina gdje su opisane upotrebe različitih tipova vapna i morta. Cement koji se opisuje u tim knjigama je vrlo sličan cementu koji se danas upotrebljava. Oko 1200. godine Mongoli su izumili prve kompozitne materijale izrađene od kombinacije drva, bambusa, kostiju i rogova. Navedeni kompozitni materijali su bili lukovi koji su služili kao oružje, sve do izuma vatrenog oružja u 14. stoljeću. Od 1870. do 1890. dolazi do napretka u kemijskoj industriji i sukladno time u proizvodnji kompozitnih materijala. Nove sintetičke smole su kroz proces polimerizacije transformirane iz tekućine u krutinu u umreženu molekularnu strukturu. Početkom 1900. godine dolazi do razvoja materijala kao što su: polistiren, poliester, vinil, i fenol. Ti materijali su trebali osigurati poboljšanu čvrstoću i krutost. 1935. godine Owens Corning je izumio prvo stakleno vlakno. Kod izrade kompozita staklena vlakna u kombinaciji s polimerom daju izuzetno jaku i laganu strukturu. Tako je započela proizvodnja kompozitnih materijala na temelju vlaknima ojačanih polimera. 1938. godine postali su dostupni i drugi sustavi npr. epoksidi ili visoko učinkovite smole. 1940. godine počinje nagli razvoj i primjena kompozitnih materijala. U to doba polimerna industrija bilježi nagli rast kada raste i potražnja za vojnim proizvodima. 1950. godine kompoziti se počinju proizvoditi pultruzijom (kontinuiranim izvlačenjem), tehnikom namatanja i vakumiranjem. Takve tehnike proizvodnje su se zadržale do danas. 1961. godine prvo ugljikovo vlakno je patentirano i nekoliko godina poslije postaje komercijalno dostupno. Idućih dvadeset godina tržište kompozitnih materijala se proširivalo. Kompozitni materijali se počinju koristiti u zrakoplovnim komponentama i medicinskim uređajima [1].

**TEORIJSKI DIO**

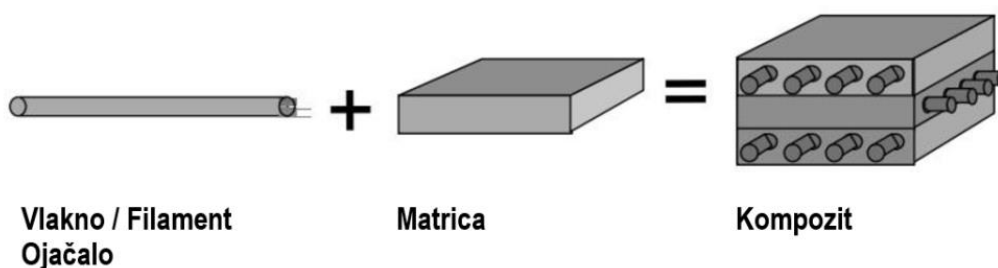
## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. Kompozitni materijali

Kompozitni materijali su sastavljeni od dva ili više sastavna materijala različitih fizikalnih i kemijskih svojstava koji kombinacijom daju materijal koji ima drugačije karakteristike od individualnih komponenti. Kompozitni materijali imaju bolja svojstva od individualnih komponenti od kojih su građeni. Najčešće se koriste u građevinskoj, automobilskoj, avio industriji i industriji korištenja energije vjetra. Kompozitni materijali nalaze primjenu u komercijalnom strojarstvu kao što su: motori s unutarnjim izgaranjem, komponente strojeva, toplinsko upravljanje i elektroničko pakiranje, automobili, vlakovi i zrakoplovne strukture. Kompozitni materijali trebaju omogućivati laku izradu dijelova složene konstrukcije, i zadovoljavati određena svojstva kao što su: otpornost na udarce, kemijska otpornost, otpornost na trošenje i mala masa [2].

Kompoziti su građeni od matrice i ojačala (ili punila). Slika 2.1.1. prikazuje kompozit čije je ojačalo vlakno. Matrica služi kao vezivo ojačala, koje drži stabilnim fizički oblik i dimenzije materijala. Matrica štiti ojačalo od štetnih vanjskih utjecaja. Ojačalo je kod kompozitnih materijala glavni nosivi element, a njegova funkcija je poboljšanje mehaničkih svojstava kompozita [2]. Punila u matrici imaju ulogu poboljšanja bilo kojeg svojstva osnovnog materijala odnosno matrice, npr. električnih svojstava, toplinskih svojstava, ostalih kemijskih svojstava i sl.

Kompoziti su jaki heterogeni materijali. Ta se svojstva kompozita razlikuju od točke do točke u materijalu. Kompozitni materijali mogu biti izotropni i anizotropni. Izotropija je svojstvo tvari da u svim svojim smjerovima imaju jednaka fizikalna svojstva. Za razliku od izotropije, anizotropija je svojstvo tvari da u svim svojim smjerovima nemaju jednaka svojstva. Mnogi umjetni kompoziti, posebice kompoziti ojačani vlaknima imaju anizotropna svojstva. Drvo kao prirodni kompozit ima anizotropna svojstva [3].



**Slika 2.1.1.** Prikaz sastava kompozitnih materijala [4].

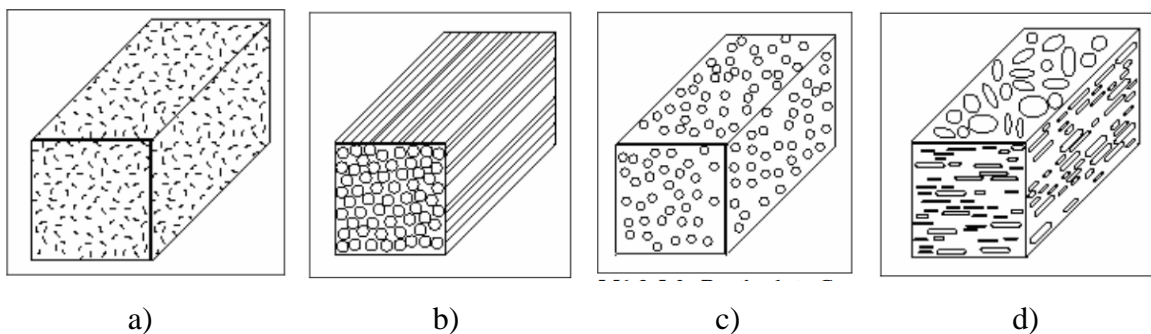


Primjeri prirodnih kompozitnih materijala su drvo, kosti, zubi, bambus i školjke. Drvo je kompozitni materijal koji se sastoji od celuloze i lignina. Dugačka vlakna celuloze koja imaju funkciju ojačala zadržavaju se za lignin čija je uloga matrice. Vezivna čvrstoća lignina čini dijelove drveta puno jačim od pamuka čiji je sastav celuloza. Kostu su kompozitni materijal čiju matricu čini vrlo krhki materijal Hydroxyapatite, dok fleksibilni materijal kolagen čini ojačalo [2].

### 2.1.1. Podjela kompozitnih materijala

Kompozitne materijale možemo razlikovati prema vrsti matrice i prema vrsti ojačala.

- Prema vrsti matrice (kemijski sastav):
  1. organska:
    - polimerna (engl. *polymer matrix composites*),
    - ugljična (engl. *carbon matrix composites*).
  2. metalna (engl. *metal matrix composites*),
  3. keramička (engl. *carbon matrix composites*),
  
- Prema vrsti ojačala (oblik ojačala):
  1. vlakna,
  2. viskeri (monokristalna vlakna),
  3. tanke ploče ili slojeve vlakana (laminatni kompoziti),
  4. čestice,
  5. pahuljice, slika 2.1.1.1. [2, 5].



**Slika 2.1.1.1.** Kompozitni materijali ojačani sa: a) kratkim vlaknima, b) filamentima, c) česticama i d) pahuljicama [5].

### 2.1.1.1. Kompozitni materijali prema vrsti matrice

#### - Svojstva kompozita sa metalnom matricom

Kod kompozita sa metalnom matricom, većinom matricu čini legura, a manjim dijelom čisti metal. Ojačala čine 10-60 % volumena kompozita, a mogu biti silicijev karbid (SiC), aluminijev oksid ( $Al_2O_3$ ), bor (B), ugljik (C) i metali visokog tališta. Kompoziti s metalnom matricom imaju brojne prednosti kao što su bolja toplinska vodljivost, veća čvrstoća i krutost, nezapaljivost, otpornost na puzanje i abraziju i dimenzijska stabilnost [6].

Kompozitni materijali kod kojih je aluminij ojačan česticama silicijeva karbida je jedan od najbitnijih kompozita s metalnom matricom. Svojstva ovog kompozita ovise o vrsti čestice, volumnom udjelu čestica, vrsti matrice i procesu proizvodnje. Tablica 2.1.1.1. prikazuje usporedna fizikalna svojstva aluminijskog, titana, i željeza s kompozitnim materijalom gdje je matrica aluminijska ojačana česticama silicijeva karbida. U tablici 2.1.1.1. su prikazana fizikalna svojstva kompozita ovisno o volumnom udjelu silicijeva karbida od 25, 55 i 70 %. Iz tablice 2.1.1.1. se primjećuje da aluminij ima najlošija fizikalna svojstva tj. najmanje vrijednosti modula elastičnosti (GPa), vlačne čvrstoće (MPa), krajnje vlačne snage (MPa) i gustoće ( $g/cm^3$ ). Aluminij jedino ima najveći postotak produljenja od 15 %. Kod kompozita s aluminijskom matricom primjećujemo da se povećanjem volumnog udjela čestica silicijeva karbida povećava se gustoća, smanjuje se produljenje i povećava se vrijednost elastičnog modula (GPa). Povećanjem volumnog udjela čestica silicijeva karbida na 55 % povećavaju se vrijednosti vlačne čvrstoće (MPa) i vlačne čvrstoće kod prekida (MPa), dok povećanjem vrijednosti na 70 % navedene vrijednosti opadaju [3].

**Tablica 2.1.1.1.1.** Mehanička svojstva kompozita s matricom aluminijskog ojačanog česticama silikonskog karbida, 6061-T6 aluminijskog, 6Al-4V titana i 4340 željeza [3].

	Aluminij	Titan	Željezo	Silicij karbid Čestice ojačane aluminijem		
	( 6061 – T6 )	( 6Al – 4V )	(4340 )	Volumni udio čestice		
				25	55	70

Modul, GPa	69	113	200	114	186	265
Vlačna čvrstoća, MPa	275	1000	1480	400	495	225
Krajnja vlačna snaga, MPa	310	1100	1790	485	530	225
Produljenje %	15	5	10	3.8	0.6	0.1
Gustoća g/cm <sup>3</sup>	2.77	4.33	7.76	2.88	2.96	3.00
Specifični modul, GPa	25	26	26	40	63	88

### - Svojstva kompozita s keramičkom matricom

Glavna svojstva keramike su visoka krutost i tvrdoća, otpornost na visoke temperature, koroziju i oksidaciju. Nedostatak keramike je niska otpornost na lom što je čini vrlo osjetljivom. To rezultira velikom jačinom loma i slabom mehaničkom i toplinskom otpornošću. Kod kompozita sa keramičkom matricom, vlakna, viskeri ili čestice se kombiniraju sa keramičkom matricom kako bi se poboljšala otpornost na lom, toplinska i mehanička otpornost. Tablica 2.1.1.1.2. prikazuje usporedbu otpornosti na lom (MPa·m<sup>1/2</sup>) metalnih legura sa monolitnom keramikom i kompozitima s keramičkom matricom ojačanim viskerima i vlaknima. Iz tablice se primjećuje da se dodatkom ojačala poboljšava otpornost na lom. Dodatkom vlakana silicijeva karbida u matricu silicijeva karbida otpornost na lom dostiže otpornost aluminija [3].

**Tablica 2.1.1.1.2.** Otpornost na lom strukturnih legura, monolitne keramike i kompozita s keramičkom matricom [3].

Matrica	Ojačalo	Otpornost na lom (MPa·m <sup>1/2</sup> )
Aluminij	-	30 – 45
Željezo	-	40 – 65 <sup>a</sup>
Glinica	-	3 – 5
Silicijev karbid	-	3 – 4
Glinica	Čestice cirkonijeva oksida <sup>b</sup>	6 – 15
Glinica	Viskeri silicijeva karbida	5 – 10

Silicijev karbid	Kontinuirana vlakna silicijeva karbida	25 – 30
------------------	--	---------

<sup>a</sup> Jačina legure može biti puno veća

<sup>b</sup> Ojačanje nakon transformacije

#### - Svojstva kompozita s polimernom matricom

Glavna svojstva polimernih matrica su niska čvrstoća, krutost i viskoelastičnost. Čvrstoća i krutost kompozita s polimernom matricom dolaze iz ojačala. U izradi kompozita se koriste dvije vrste polimera: termostabilni i termoplastični materijali. Danas se termostabilni materijali koriste daleko više za strukturne primjene. Termostabilni materijali imaju puno veću otpornost na otapala i koroziju od termoplastičnih materijala. Termostabilni materijali se podvrgavaju procesu stvrdnjavanja poslije kojih su kruti i ne mogu se deformirati. Za razliku od termostabilnih materijala, termoplastični polimeri u više navrata omekšavaju nanosom voska. Ključni problem u izboru polimerne matrice je maksimalna temperatura procesa obrade. Elastičnost i čvrstoća polimera opadaju s rastom temperature. Temperatura staklastog prijelaza  $T_g$  je približna mjera temperature pri kojoj polimer prelazi iz relativno krutog materijala u gumeni materijal [3].

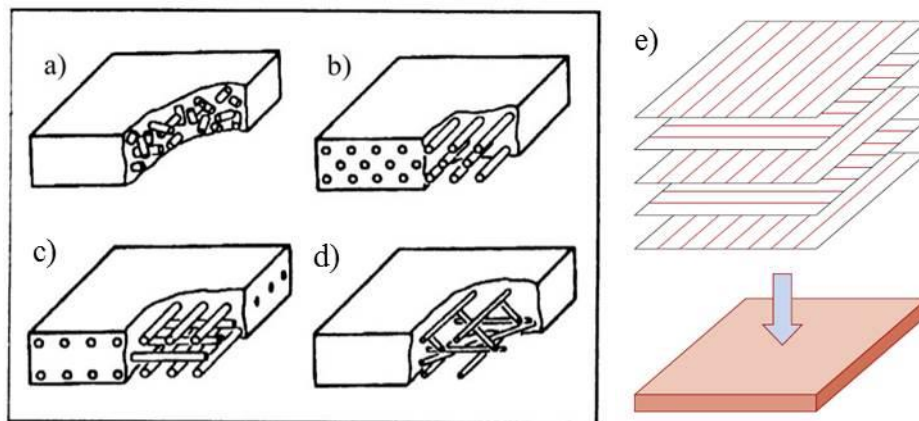
#### - Svojstva kompozita sa ugljičnom matricom

Kompoziti sa ugljikovom matricom sastoje se od keramičkih ili ugljičnih vlakana koja su ugrađena u ugljikovu matricu. Najvažnija vrsta ovih kompozita su kompoziti čije su ojačalo ugljikova vlakna. Svojstva kompozita s ugljičnom matricom su visoka toplinska vodljivost i visoki modul elastičnosti. Ovi kompoziti su se prvi koristili zbog izvrsne otpornosti na eroziju pri visokim temperaturama. Mehanička svojstva kao što su čvrstoća i tvrdoća su kod prvih primjenjivanih kompozita s ugljikovom matricom bile niske, no tijekom godina su se povećale [3].

### 2.1.1.2. Kompozitni materijali prema vrsti ojačala

#### - Vlaknima ojačani kompozitni materijali

Vlaknima ojačani kompoziti su kompozitni materijali kod kojih je matrica ojačana ugrađenim vlaknima [7]. Kod kompozita ojačanih vlaknima, vlakna su glavni nosioci opterećenja, a zbog visoke čvrstoće mogu zaustaviti širenje pukotine. Matrica prenosi opterećenje na vlakna i zaštićuje ih od vanjskih utjecaja. Vrlo je bitno da matrica dobro prijanja uz vlakno i da kemijski ne reagira sa vlaknom. Kod ovakvih kompozita matrica je najčešće polimerna, a sastoji se od: nezasićenih poliestera, vinil estera i epoksidnih smola. Ojačalo čine staklena, aramidna ili ugljična vlakna. Kod ovakvih kompozita razlikujemo laminate i hibride [8]. Laminati su kompoziti koji se sastoje od više slojeva kompaktno pozicioniranih vlakana kod kojih svaki sljedeći sloj ima drugačiji smjer orijentacije vlakana [9]. Laminati imaju samo jednu vrstu vlakana, dok hibridi kao ojačanje imaju više vrsta vlakana. Čvrstoća kompozita ojačanog vlaknima ovisi o: samoj čvrstoći vlakana, udjelu vlakana u kompozitu, orijentaciji vlakana i odnosu dužine i promjera vlakana. Slika 2.1.1.2.1. prikazuje 4 vrste orijentacije vlakana kao kod vlaknima ojačanih kompozita, kao i laminatne kompozite [8].



**Slika 2.1.1.2.1.** Različite orijentacije vlakana kod vlaknima ojačanih kompozitnih materijala a) kratka, proizvoljno orijentirana vlakna b) duga, u jednom pravcu c) vlakna orijentirana u dva pravca d) duga, proizvoljno orijentirana vlakna [10], e) laminatni kompoziti s orijentacijom vlakana u dva smjera [9].

Kompoziti kod kojih se vlakna nalaze samo u jednom pravcu posjeduju optimalnu čvrstoću i krutost ako opterećenje djeluje usporedno sa pravcem vlakana, dok su kod okomitog djelovanja sile na vlakna čvrstoća i krutost kompozitnog materijala manje. Kako bi se postigla

visoka čvrstoća i krutost u svim pravcima tkanjem vlakana izrađuju se slojevi sa različitom orijentacijom. Kompozit sa polimernom matricom ojačan staklenim vlaknima, u smjeru vlakana ima vlačnu čvrstoću približnu čeliku, a od njega je 14 puta lakši [8].

#### - **Česticama ojačani kompozitni materijali**

Kompoziti ojačani česticama sadrže matricu u koju su ugrađena ojačala u obliku tvrdih i krhkih čestica. Kompozitni materijali ojačani česticama se razlikuju prema:

- materijalu matrice
- veličinama dodanih čestica koje mogu biti:

#### **1. Dispergirane**

Dispergirane čestice se dodaju matrici kako bi svojom prisutnošću ometale gibanje dislokacije matrice, te na taj način ojačavaju matricu. Dimenzije dispergiranih čestica su 10-250 nm.

#### **2. Velike**

Velike čestice se dodaju matrici kako bi se smanjila cijena materijala. Velike čestice ne ojačavaju matricu budući da ne mogu spriječiti gibanje dislokacija matrice. Velikim česticama se smatraju čestice čiji je promjer  $> 0,1$  nm, a volumni udio je veći od 15 %. Primjer kompozita s dodatkom velikih čestica je beton. Beton se sastoji od keramičke matrice (cement) i krupne keramičke čestice (pijesak ili šljunak) [2].

#### - **Strukturni kompozitni materijali**

Strukturne kompozite formiraju homogeni materijali i kompoziti. Strukturni kompoziti se dijele na slojevite kompozite, stanične kompozite i sendvič konstrukcije.

#### **1. Slojeviti kompoziti**

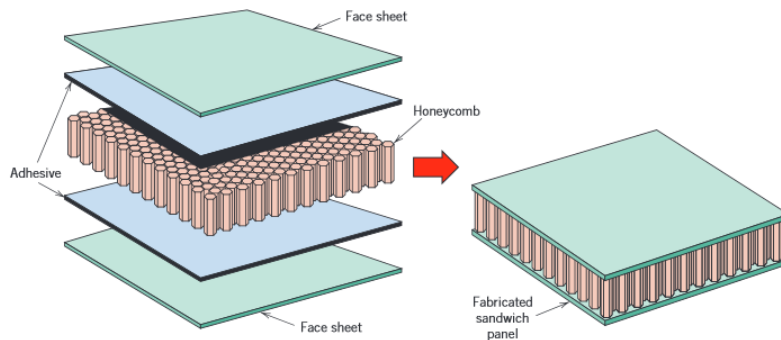
Slojeviti kompoziti su formirani od slojeva materijala različitih fizikalnih i kemijskih karakteristika. Slojeviti kompoziti služe kod izrade skija i medija za pohranu podataka (cd).

#### **2. Stanični kompoziti**

Strukturu staničnih kompozita formiraju sjedinjene ćelije s tankim krutim stijenkama (matrica) koje su ispunjene plinom (ojačalo).

### 3. Sendvič konstrukcije

Sendvič konstrukcije uključuju složene trodimenzionalne dodatke – jezgru koja je za obje strane vezana za oblogu [2], slika 2.1.1.2.2.



Slika 2.1.1.2.2. Sendvič konstrukcije s jezgrom saća [9].

### 2.1.2. Podjela kompozitnih materijala prema procesu izrade

Postoje tri tipa proizvodnje kompozitnih materijala:

#### 1. Otvoreno oblikovanje

- Ručno laminiranje (engl. *handlayup*)
- Lijevanje (engl. *casting*)
- Tehnika prskanja (engl. *sprayup*)
- Tehnika namatanja vlakana (engl. *filament winding*)

#### 2. Zatvoreno oblikovanje

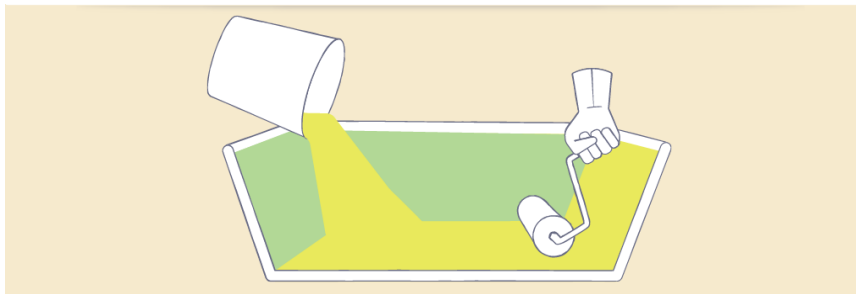
- Vakumiranje (engl. *vacuum bag molding*)
- Vakuumska infuzija (engl. *vacuum infusion processing*)
- Uvođenjem smole u kalup (engl. *resin transfer molding*)
- Izravno prešanje (engl. *compression molding*)
- Pultruzija ili kontinuirano izvlačenje (engl. *pultrusion*)
- Centrifugalno lijevanje (engl. *centrifugal casting*) [11].

#### 2.1.2.1. Otvoreno oblikovanje

Kompozitni materijali su smješteni u otvoreni kalup, gdje se stvrdnjavaju dok su izloženi zraku. Trošak alata za otvorene kalupe je često nizak što omogućava korištenje ove tehnike za kratke produkcijske radove [11].

### - Ručno laminiranje

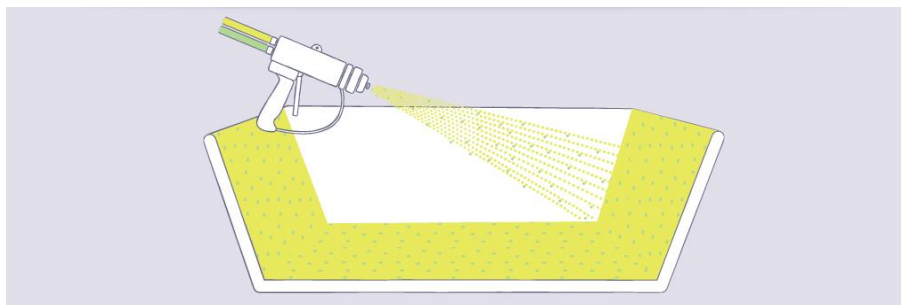
Prvo je potrebno gel premaz nanijeti na kalup pomoću pištolja za prskanje. Nakon što se gel dovoljno dobro osuši, vlakna koja služe kao ojačalo se ručno polažu u kalup. Zatim se na vlakna nanosi smola koja se impregnira u ojačalo pomoću valjka ili kistova. Do skrućivanja dolazi pri atmosferskim uvjetima. Prednost ovakvog postupka su: jednostavnost, niski troškovi izrade, veći udio vlakana i duljina nego kod tehnike prskanja. Iako je tehnika ovog postupka vrlo jednostavna teško se proizvode kompoziti s malim udjelom smole bez pukotina [11].



Slika 2.1.2.1.1. Ručno laminiranje [11].

### - Tehnika prskanja

Prvo je potrebno na kalup nanijeti gel premaz i ostaviti ga da se osuši. Zatim se vlakna polažu u ručni pištolj u kojem se režu na manje duljine i izrezana vlakna se dodaju u struju tekuće smole. Mješavinu vlakana i smole koja se nalazi u spremniku pištolja se ručno uštrcava u kalup gdje se umrežava (skrućuje) u atmosferskim uvjetima. Ovaj postupak se primjenjuje dugi niz godina. Prednost postupka su niski troškovi, dok su nedostaci smanjena mehanička svojstva zbog korištenja kratkih vlakana kao ojačala [11].

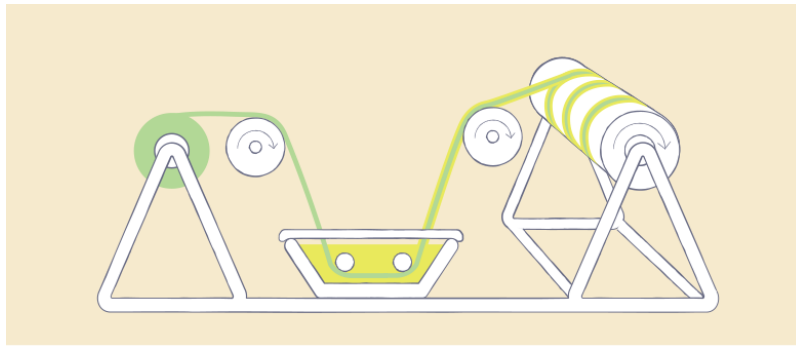


Slika 2.1.2.1.2. Tehnika prskanja [11].



### - Tehnika namatanja vlakana

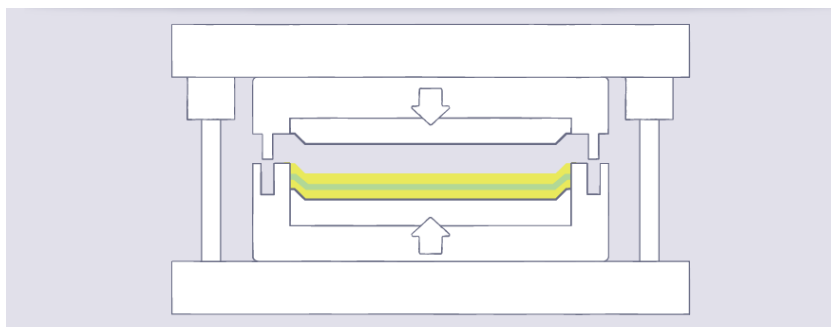
Tehnika namatanja vlakana je automatski proces gdje se smola i vlakna istovremeno nanose preko cilindričnih valjaka. Pređa kontinuirano prolazi kroz kupelj i namata se na rotirajući svornjak. Ova se metoda koristi za stvaranje šupljih proizvoda poput kućišta raketnih motora, cijevi, stakala i kemijskih spremnika [11].



Slika 2.1.2.1.3. Tehnika namatanja vlakana [11].

### 2.1.2.2. Zatvoreno oblikovanje

Kod zatvorenog oblikovanja kompozitni materijali se obrađuju unutar vakuumske vrećice ili dvostranog kalupa zatvorenog u atmosferu. Proces zatvorenog oblikovanja se provodi u dva slučaja: kada je potrebna dvostrana obrada i kod masovne proizvodnje [11].

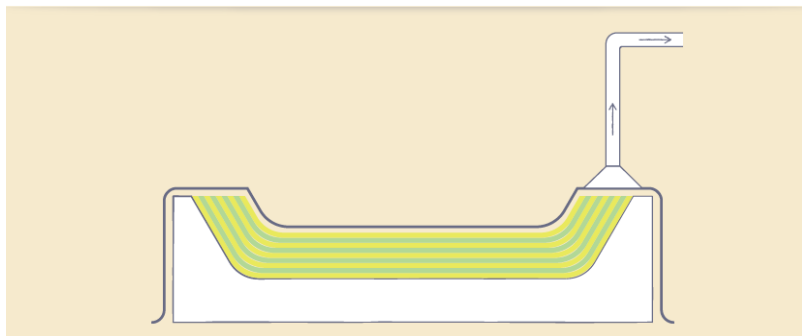


Slika 2.1.2.2.1. Postupak izrade kompozita putem zatvorenog oblikovanja [11].

### - Vakumiranje

Ovaj proces je dizajniran kako bi se poboljšala mehanička svojstva laminata. Vakuumska vrećica se koristi kod mokro položenih laminata i prethodno impregniranih visoko učinkovitih

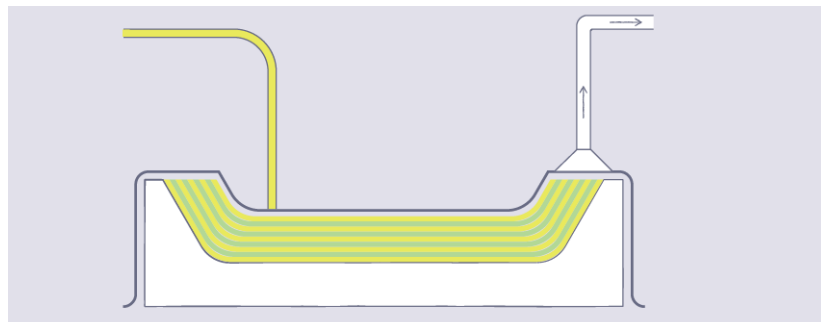
vlaknima ojačanih kompozita. Vakuumska vrećica je postavljena na kalup te se koristi za kompaktno pozicioniranje laminata i uklanjanje zračnih praznina. U slučaju prethodno impregniranog visokoučinkovitog vlaknastog kompozita prethodno impregnirani materijal je postavljen na kalup, kao i vakuumska vrećica, te je kalup postavljen u autoklav koji koristi toplinu i vanjski tlak dodajući snagu atmosferskog tlaka. Smanjivanjem tlaka unutar vakuumske vrećice vanjski atmosferski tlak djeluje na vrećicu. Pritisak na laminat uklanja zatvoreni zrak, višak smole i komprimira laminat što rezultira višim postotkom vlaknastog ojačanja [11].



**Slika 2.1.2.2.2.** Vakumiranje [11].

#### - **Vakuumska infuzija**

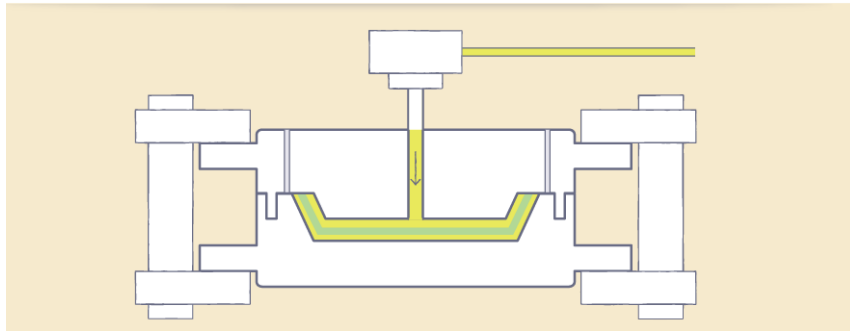
Proces vakuumske infuzije je izvedba procesa vakumiranja gdje se smola u kalup uvodi prije nego vakuum povuče vrećicu i komprimira laminat. Ojačanje i materijali se ručno polažu u kalup. Kada se smola povuče u kalup laminat je već sabijen te nema mjesta za višak smole. Proces vakuumske infuzije omogućava vrlo visok omjer smole/stakla, dok su mehanička svojstva laminata superiornija. Vakuumska infuzija prikladna je za oblikovanje vrlo velikih konstrukcija i smatra se postupkom niskog volumena kalupljenja [11].



**Slika 2.1.2.2.3.** Vakuumska infuzija [11].

#### - Ubrizgavanje smole u kalup

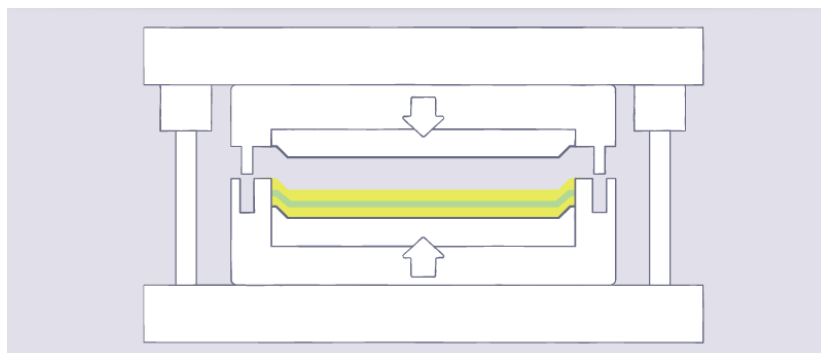
Ubrizgavanje smole u kalup je metoda zatvorenog oblikovanja gdje se ojačalo nalazi unutar zatvorenog kalupa, kalup se pričvršćuje i smola se pumpa kroz injekcijske otvore pod pritiskom. Nakon ubrizgavanja smole u kalup zatvaraju se mjesta na kojima je ubrizgana smola i dolazi do skrućivanja pri sobnim ili povišenim temperaturama [11].



**Slika 2.1.2.2.4.** Ubrizgavanje smole u kalup [11].

#### - Izravno prešanje

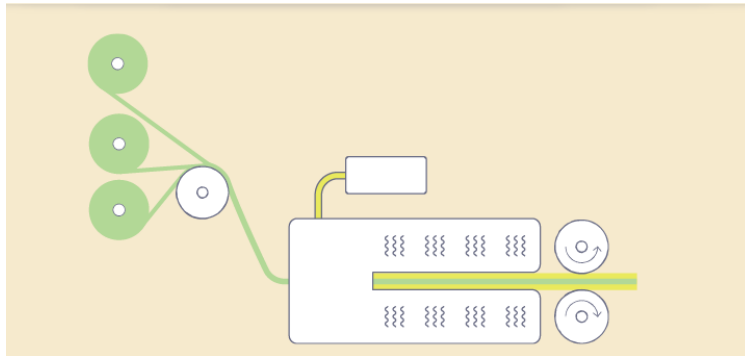
Izravno prešanje je proizvodni proces gdje su kompozitni materijali umetnuti između dvaju podudarnih kalupa pod jakim pritiskom i toplinom (od 250 do 400 °C) sve dok određeni dijelovi ne očvrstnu. Postoji hladno i toplo prešanje. Kod hladnog izravnog prešanja kalup je prvo potrebno premazati gelom. Zatim se ulaže predoblik tkanine koji služi kao ojačalo. Nakon toga se u kalup ulijeva smola. Nakon ulijevanja smole kalup se zatvara te se smola umrežuje pri sobnoj temperaturi. Kod toplog izravnog prešanja vlaknaste prethodno impregnirane komponente se ulažu u grijani kalup preše. Pomoću visoke temperature i tlaka postiže se tečenje smole i vlakana. Nakon što se kalup popuni dolazi do umrežavanja [11, 12].



**Slika 2.1.2.2.5.** Izravno prešanje [11].

### - Pultruzija ili izravno izvlačenje

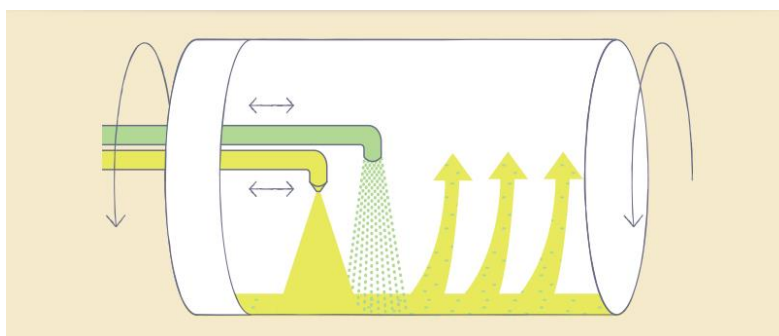
Postupak se koristi za oblikovanje kompozita u dugim oblicima poput šipki. Ojačala se najprije provlače kroz smolu, a zatim se provlače kroz grijane čelične kalupe koji oblikuju kompozite u neprekidne duljine. Ovaj proces se koristi za izradu proizvoda kao što su: grede, kanali, cijevi, štapovi i osovine golf klubova [10].



**Slika 2.1.2.2.6.** Pultruzija [11].

### - Centrifugalno lijevanje

Kod postupka centrifugalnog lijevanja ojačala i smole se nanose na unutarnju površinu rotirajućeg kalupa. Centrifugalne sile drže materijal na mjestu sve dok ne očvrstne. Ovim postupkom se proizvode cijevi za postrojenje nafte, instalacije u kemijskoj industriji i kemijski spremnici [8].



**Slika 2.1.2.2.7.** Centrifugalno lijevanje [11].

## 2.3. Primjena kompozitnih materijala

Kompozitni materijali se primjenjuju u raznim industrijama kao što su:

### 1. Automobilska industrija

Kompoziti se u automobilskoj industriji primjenjuju od 50-ih godina 20. stoljeća. Razlog primjene kompozita u automobilskoj industriji je smanjenje mase uz bolju iskoristivost goriva, poboljšana kvaliteta vožnje i postojanost na koroziju. Dijelovi automobila načinjeni od kompozita su: karoserija (izrađena od epoksidnih smola ojačanih staklenim ili ugljikovim vlaknima), poklopci motora, dijelovi krova, blatobrani, branici i zaštitni dijelovi podvožja (uporaba kompozita na ovim dijelovima smanjuje ukupnu masu automobila) sjedala, paneli vrata. Jeftiniji kompoziti koji se koriste se sastoje od plastomerne matrice punjene staklenim vlaknima, dok se kompoziti koji se primjenjuju za skuplje primjene sastoje od epoksidne smole i ugljikovih vlakana. Kako bi se postigla dobra mehanička svojstva matrice, koristila su se staklena vlakna koja se danas sve više zamjenjuju biljnim vlaknima [13].

### 2. Aeronautika

Temperaturno otporni kompoziti smanjuju operativne troškove zrakoplova, potrošnju goriva i poboljšavaju ekonomičnost. Prve značajne primjene kompozitnih materijala počela je tvrtka Airbus 1983. Udio kompozitnih materijala u ukupnoj masi zrakoplova Airbus A320 je 28 %. Od kompozitnih materijala izgrađena je cijela repna konstrukcija, podne obloge i ostali elementi. Kompozitni materijali se koriste kod izrade sljedećih konstruktivnih elemenata zrakoplova: oplata, upravljačke površine, poklopci strojnog trapa, podne grede i ploče, komponente interijera, primarne strukture krila i trupa na novijim generacijama zrakoplova, lopatice ventilatora mlaznog motora i rotori [14].



**Slika 2.3.1.** Airbus A 310 [15].

### 3. Građevinarstvo

U građevinarstvu se primjenjuju kompozitni materijali čija je matrica epoksidna smola koja je ojačana ugljičnim, aramidnim ili staklenim vlaknima. Namjene za koje se koriste kompozitni materijali su: betonske konstrukcije, kupole, prozori, unutrašnji zidovi, vrata, namještaj i kupaonice [2].

### 4. Sport i rekreacija

Kompozitni materijali se upotrebljavaju u sportskoj opremi kao što su: reketi za tenis, skije, pecaljke, jedrilice, daske za jedrenje, lukovi i strijele, zaštitne kacige, oprema za golf i sportske proteze. Kompozitni materijali se upotrebljavaju za izradu pomagala osobama s invaliditetom (sportske proteze, sportska kolica) koje osobama s invaliditetom omogućuju uspješno bavljenje sportom. Za proizvodnju sportskih proteza koriste se kompozitni materijali dobiveni vakuurom laminacijom karbonskih vlakana. Tako se uz vrlo nisku masu postiže čvrstoća i izdržljivost pomagala [16].



Slika 2.3.2. Protetičko sportsko stopalo [17].

### 5. Elektrotehnika i elektronika

Kompozitni materijali se koriste u izradi električne izolacije dijelova, oklopa, kućišta, poklopaca, satelitskih antena, izolacija od utjecaja elektromagnetskih valova itd. [2].

### 6. Medicina

Kompoziti se u medicini koriste kod zamjene ili obnavljanja oštećenog tkiva i organa. U tu se svrhu koriste implantanti od polimera. Kompozitni materijali imaju prednost u odnosu na konvencionalne materijale kao što su metali, polimeri i biokeramika. Metali su kruti i korodiraju, biokeramika je lomljiva i neprikladna dok su polimeri slabi i savitljivi. Za razliku od navedenih materijala kompozitni materijali su optimalni za upotrebu u ljudskom

organizmu. Neka od područja primjene polimernih kompozita u medicini su: infuzijske igle, intravenozni kateteri, vaskularni implatanti, implatanti grudi, leće i sl. [18].



**Slika 2.3.3.** Umjetno proizvedena krvna žila kompozitnog sastava [18].

## **7. Željeznice**

Kompozitni materijali se koriste kod izrade čeonih dijelova lokomotiva, konstrukcijskih dijelova vagona, sjedalica, vrata, unutrašnje pregrade vagona i kućišta ventilatora [2].

### **2.4. Biokompozitni materijali (punila na bazi bio mase)**

Kompozitni materijali se sastoje od ojačala koje je uloženo u matricu. Zadnjih godina raste ekološka svijest, te se s time podiže svijest o upotrebi prirodnih vlakana kao ojačala u polimernim kompozitima. Prirodna vlakna bi zamjenila upotrebu staklenih vlakana koja su najčešće upotrebljavana sintetička vlakna. Prednosti prirodnih vlakana uključuju nisku cijenu, nisku gustoću, održivu dostupnost, nisko abrazivno trošenje u strojevima i manje oslobađanje ugljičnog dioksida. Zbog zaštite okoliša dolazi do razvoja novog materijala od recikliranog polimera koji sadrži biorazgradive materijale. Takvoj vrsti materijala pripadaju lignocelulozni plastični kompoziti koji imaju brojne prednosti s kojima su ispred tradicionalnih plastičnih kompozita kao što su biorazgradivost, niska gustoća, obnovljivost i niska cijena. Dodatkom lignoceluloznog punila dolazi do bitnog poboljšanja krutosti, tvrdoće i dimenzijske stabilnosti polimerne matrice. Nedostatak prirodnih vlakana kao ojačala u kompozitima je degradacija na vrlo niskim temperaturama koja ovisi o prisutnosti celuloze i hemiceluloze. Rana toplinska degradacija ograničava dopuštenu temperaturu prerade na manje od 200°C, i ograničava broj termoplastičnih materijala koji se mogu koristiti kao matrica. Za izradu biokompozitnih materijala se koristi otpadna biomasa dobivena procesima obrade rižinih ljuski, sisala, jute, listova ananasa, stabljike banane, palminog ulja itd. U svijetu riža pokriva 1 % površine zemlje te predstavlja drugi glavni izvor hrane. Prošle godine je uzgojeno skoro 482 miliona

tona riže. Na svaku tonu riže prilikom proizvodnje dobije se 0,23 tone rižinih ljuski. Prema *Marti-Ferrer* sadržaj hemiceluloze i lignina u rižinih ljuskama je manji nego u drvetu, dok je sadržaj celuloze podjednak. Iz tog razloga se rižine ljuske mogu obraditi na višim temperaturama od drveta. Kemijski sastav i fizikalna svojstva rižinih ljuski navedeni su u tablici 2.4.1. Rižine ljuske sadrže od 75-90 % organske tvari (celuloza, hemiceluloza, lignin), dok ostatak čine mineralne komponente (silicijev dioksid, lužina, vlaga). Prisutnost visokog postotka silicijevog dioksida čini rižine ljuske kvalitetnim materijalom za industrijske primjene. Ostali sastojci pepela riže kao što su: CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> su dostupni manje od 1 % [19].

**Tablica 2.4.1.** Kemijski sastav i fizikalna svojstva rižinih ljuski [20, 21].

Sastav rižinih ljuski	%	Fizikalna svojstva	
Celuloza	25 – 35	Veličina čestice ( μm)	26,64
Hemiceluloza	18 – 21	Specifična površina (g/m <sup>2</sup> )	0,92
Lignin	26 – 31	Gustoća ( g/m <sup>3</sup> )	1,00
SiO <sub>2</sub>	15 – 17		
Topljive tvari	2 – 5		
Vlaga	5 – 10		

Rižine ljuske se mogu iskoristiti za razne namjene kao što su: gnojivo i substrat (rižine ljuske se zahvaljujući visokom udjelu lignina u sadržaju mogu kompostirati, industrijsko gorivo (u sektoru malih industrija koriste se kao gorivo u nisko temperiranom kotlu. Za proizvodnju 1 MWH elektriciteta potrebna je 1 tona rižinih ljuski. Kod izrada opeke, (što opeka sadrži veći postotak rižinih ljuski to ima bolju termoizolaciju i veću poroznost), proizvodnje hrane za kućne ljubimce (služi kao izvor vlakana), kao zubnu pastu (rižine ljuske su se stoljećima prije proizvodnje zubne paste koristile za oralnu higijenu), za popunjavanje jastuka, kao aditiv za gume, te ostale namjene: građevinski materijal, izolacijski materijal za ploče, materijal za punjenje te za čišćenje u metalnoj i strojnoj industriji [19].



### 2.4.1. Dosadašnja istraživanje vezana uz biokompozitne materijale

Prema dosadašnjim istraživanjima utvrđeno je da prirodna vlakna koja se koriste kao ojačala trebaju prikladno obraditi kako bi se poboljšala njihova svojstva. Razne površinske obrade vlakana poboljšavaju graničnu adheziju između površine vlakana i matrice dajući time dobra mehanička svojstva polimernim kompozitima. Postoje dvije metode površinske obrade vlakana: fizikalna i kemijska metoda [19].

#### **Fizikalna metoda:**

Razne fizikalne metode kao što su istezanje, termo obrada i proizvodnja hibridne pređe nemaju utjecaja na kemijski sastav vlakana ali ipak mijenjaju strukturna i površinska svojstva vlakana, a samim time utječu na mehaničko lijepljenje polimera.

#### **Kemijska metoda:**

*Zeynab E. i sur.* navode slučaj zamjene kemijskog agenta za uklanjanje vlage s rižinim ljuskama koje su obrađene u alkalnoj i kiselinskoj otopini. Nakon zamjene kompozitni su uzorci pokazali veću apsorpciju vode koja se pripisuje poroznosti i poboljšanju adhezijskih svojstava [19].

#### **- Polimerni kompoziti ojačani rižinim ljuskama**

*Atuanya C. U.* je u svom radu utvrdio utjecaj punila odnosno riže na mehanička svojstva recikliranog polietilena niske gustoće i mješavina sa frakcijom nerekicliranog polietilena. Zabilježeno je da se vlačna čvrstoća povećala za 10 % težinskog udjela rižinih ljuski, a poslije se je smanjila za otprilike 10 % težine punila. Elastični modul, čvrstoća na savijanje i tvrdoća po *Brinell-u* se povećavaju, dok se otpornost na udarce smanjuje povećanjem količine punila [19].

*Nwanonyi S. C. i sur.* analizirali su mehanička svojstva polietilena (niske gustoće)/rižinih ljuski koristeći mikro-matematički model jednadžbi i rezultati su pokazali da postoji neznatna varijacija između eksperimentalnih rezultata i rezultata koji su dobiveni pomoću mikro-matematičkih modela jednadžbi. Mehanička svojstva kompozita upućuju da su kompoziti korisni u svrhe koje zahtijevaju nisku čvrstoću, visoku tvrdoću i krutost [19].

*Nwanonyi S.C.* u drugom radu istražuje efekt punila rižinih ljuski na mehanička svojstva i krajnju upotrebu polietilena niske gustoće. Rezultati su pokazali da se modul elastičnosti povećava s povećanjem količine punila, dok vlačna čvrstoća i % produljenja opadaju s povećanjem količine punila. Također je uočeno da se krajnja svojstva kao što su absorpcija,

specifična gravitacija i otpornost na gorenje, povećavaju sa povećanjem količine punila, odnosno rižinih ljuski [19].

*Dimzoski* je proučavao svojstva polipropilenskih kompozita (PP) punjenih rižinim ljuskama. Koristeći koncept linearnog elastičnog prijeloma, uvođenje ljuski riže u polipropilensku matricu je rezultiralo smanjenjem maksimalnog naprezanja i povećanjem modula elastičnosti i modula savijanja. *Simone Maria Leal Rosa* i sur. su proučavali svojstva polipropilenskog kompozita s rižinim ljuskama sa maleinskim anhidrom modificiranog propilena (MAPP) kao sredstva za vezanje. Dodatkom rižinih ljuski vlačna čvrstoća je opala. Dodatkom MAPP-a poboljšana je vlačna čvrstoća. *Nak-Woon Choi* i sur. razvili su novu metodu recikliranja rižinih ljuski i ekspaniranog polistirena s otpadom, s ciljem korištenja stirenskih otopina otpadnog ekspaniranog polistirena kao veziva za plastične kompozite od riže. Njihova apsorpcija vode i ekspanzija u debljini se smanjuju sa povećanjem omjera veziva i omjera vezivnog punila jer takvi kompoziti imaju visoku vodootpornost [19].

Iz navedenih radova može se zaključiti da polietilen ojačan rižinim ljuskama pokazuje povećanje vlačnog modula, fleksibilne snage i tvrdoće, dok su se otpornost na vlak i udarce smanjili u raznim fazama opterećenja. Kod polistirena i polipropilena dodavanjem rižinih ljuski modul elastičnosti i fleksibilna snaga su se povećali, a dodatno poboljšanje je postignuto dodatkom sredstva za vezanje [19].

## **2.4.2. Primjena biokompozitnih materijala**

Biokompozitni materijali na bazi prirodnih ojačala imaju veliko područje primjene poput: automobilske industrije, industrije proizvodnje sportskih rekvizita kao i ostalih potrošačkih dobara.

### **1. Automobilski dijelovi**

U automobilskom sektoru od svih biokompozitnih materijala najviše se upotrebljavaju drveni polimerni kompoziti. Drveni polimerni kompoziti se upotrebljavaju kod izrade: kontrolne ploče, leđa počiva, unutarnje obrade ploče vrata. 2012. godine Europska automobilska industrija je imala potrošnju od 90,000 tona biokompozita sa prirodnim vlaknima i 60,000 tona drvenih polimernih kompozita. Od ukupno potrošenih 150,000 tona na prvom mjestu potrošnje se nalaze drvena vlakna, zatim slijedi reciklirani pamuk (25 %), lan (19 %), kenaf (8 %), konoplje (5%) i ostali (juta, sisal, abaka) koji zajedno čine 7 %. Prosječni automobil proizveden u Europi prosječno sadrži 4 kg prirodnih vlakana u kompozitima. Upotreba

drvenih polimernih kompozita u automobilskoj industriji je značajno porasla zahvaljujući: niskoj težini, fleksibilnosti dizajna, otpornosti na koroziju i financijskoj isplativosti. Drvena, konopljina i lanena vlakna se primjenjuju u izradi nestrukturnih dijelova kao što su unutarnje ploče, police za parcele itd. [22]. Na slici 2.4.2.1. dani su dijelovi automobila izrađeni iz biokompozitnih materijala.



**Slika 2.4.2.1.** Automobilski dijelovi načinjeni od biokompozitnih materijala [22].

## 2. Sportski rekviziti

Biokompoziti se najviše koriste za sportske rekvizite koji su namijenjeni za sportove na otvorenom. Daske za *snowboard*, kanui, daske za surfanje i okviri bicikala su proizvedeni pomoću kompozita ojačanog lanenim vlaknima. Na slici 2.4.2.2. prikazan je kanu proizveden pomoću *Biotex* lanene tkanine, dok je na slici 2.4.2.3. prikazana daska za *snowboard* koja je napravljena pomoću kompozita koji se sastoji od drvene laminirane jezgre umetnuta između dva sloja lanene *Biotex* tkanine i gornjeg i donjeg polimernog sloja. Svi slojevi su povezani zajedno pomoću epoksidne smole [22].



**Slika 2.4.2.2.** Kanu proizveden pomoću *Biotex* lanene tkanine [22].



**Slika 2.4.2.3.** Daska za *snowboard* proizvedena pomoću *Biotex* lanene tkanine [22].

### **3. Tradicionalni drveni biokompoziti**

- Iverica

Kod drvenih kompozita ojačala su čestice drva. Grube čestice drva se nalaze u sredini dok se fine čestice nalaze na površini kompozita. Ovakvi kompoziti imaju visoku masu i nisku stabilnost vlage. Koriste se kod izrade namještaja i vrata.

- Vlaknasta ploča srednje gustoće

Kod ovakvih kompozita ojačala su drvena vlakna. Adhezivni sadržaj zauzima 20 %.

- Troslojna iverica
- Drveni termoplastični kompoziti

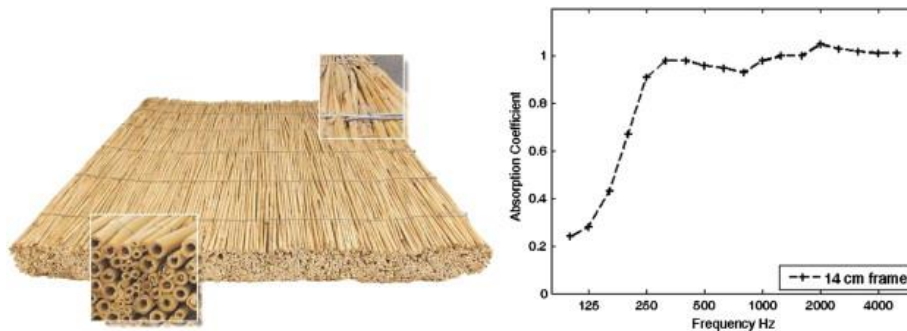
Koriste se za izradu građevinskih proizvoda i namještaja. Udio drvenog sadržaja u kompozitima iznosi 50-80 %. Kompoziti imaju bolju otpornost na vlagu od samog drveta [23].

### **2.4.3. Primjeri primjene prirodnih materijala u termoizolaciji**

Termoizolacijski proizvodi se mogu podijeliti na: ploče (tvrde i polutvrde), role (smotci, bale) i rasute materijale i posebne oblike (smjese za upuhivanje, pjene za uštrcavanje, toplinsko izolacijski nasipi). Biokompozitni termoizolacijski materijali se mogu sastojati od:

#### **1. Trska**

Paneli od trske se koriste kao termoizolacijski materijali u krovovima i zidovima kao unutarnja i vanjska izolacija koja je prekrivena sa žbukom. Upotreba ovakvih materijala je slabo raširena. Na slici 2.4.3.1. dan je primjer izrade panela od trske [24].



Slika 2.4.3.1. Paneli od trske [24].

## 2. Otpaci u preradi šećerne trske

U područjima gdje se uzgaja šećerna trska, pri proizvodnji postoje velike količine otpada koji sadrži celulozu. Celuloza koja smanjuje upotrebu sintetičkih veziva potaknula je nekoliko istraživačkih radova na razvoj inovativnih termoizolacijskih pločica od ovog materijala [24].



Slika 2.4.3.2. Šećerna trska (lijevo), otpad šećerne trske (desno) [24].

## 3. Stabljike pamuka

Termoizolacijski materijali od pamuka se koriste kao respiratorna i kožna zaštita. Ovi materijali sadrže 85 % recikliranog pamuka i 15 % polimernih vlakana. Ovaj materijal nije u potpunosti prirodan, ali je ekološki jer se može u potpunosti reciklirati za proizvodnju nove izolacije [24].



Slika 2.4.3.3. Panel od recikliranog pamuka (lijevo) i denim (desno) [24].

#### 4. Rogoz

Kompozitni materijali s vlaknima rogoza dobivaju se miješanjem vlakna rogoza s odgovarajućom količinom jutinih vlakana i vlakna od polipropilenske smole. Zatim se provodi grebenanje mješanih vlakana, laminiranje i termički pritisak [24].



**Slika 2.4.3.4.** Biljka rogoza (lijevo), paneli od rogoza (desno) [24].

#### 5. Bale od slame

Slama je nusproizvod uzgoja žitarica. Dostupna je u velikoj količini i po niskim cijenama u velikom broju zemalja. Bale od slame se koriste kao toplinska izolacija u zgradama [24].



**Slika 2.4.3.5.** Panel od slame [24].

#### 6. Kukuruzni klip

Kukuruzni klipovi nastaju kao ostaci kukuruza u prerađivačkoj industriji. U 18. i 19. stoljeću u Portugalu je bila široko rasprostranjena tehnika gradnje pomoću kukuruznih klipova i zemlje kao materijala za punjenje [24].



**Slika 2.4.3.6.** Kukuruzni klip (lijevo), mljeveni kukuruzni klip (u sredini) panel (desno) [24].

## **7. Datulja**

Datulja se uzgaja u polusušnim područjima. Otpadom datulje se smatraju ostaci kao što su lišće i peteljke (13 po biljci godišnje) i grozdovi (7 po biljci godišnje) [24].

## **8. Palmina vlakna**

Palmino lišće je nusprodukt procesa proizvodnje palminog ulja. U 2005. Godini oko 6 miliona palminog lišća je sakupljeno na Tajlandu. Obzirom da lišće palme ima velike količine ligno-celuloznih komponenata i visoki prinos vlakana, danas se koristi za izradu madraca, kompozitnih panela i ploča. Termoizolacijske ploče od palminog lišća i drvnog ljepila u granulama, imaju toplinsku vodljivost od 0,127 W/mK [25].

## **9. Ostali materijali**

U ostale materijale se ubrajaju: lišće od ananasa, riža, vlakna sanseverije, suncokret i biljka durian [24].

**EKSPERIMENTALNI DIO**



### **3. EKSPERIMENTALNI DIO**

Izrada biokompozitnih materijala provedena je na Zavodu za temeljne prirodne i tehničke znanosti, dok su vlačni test te određivanje otpora prolazu topline biokompozitnih materijala, provedeni na Zavodu za projektiranje i menadžment tekstila na Tekstilno-tehnološkom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu.

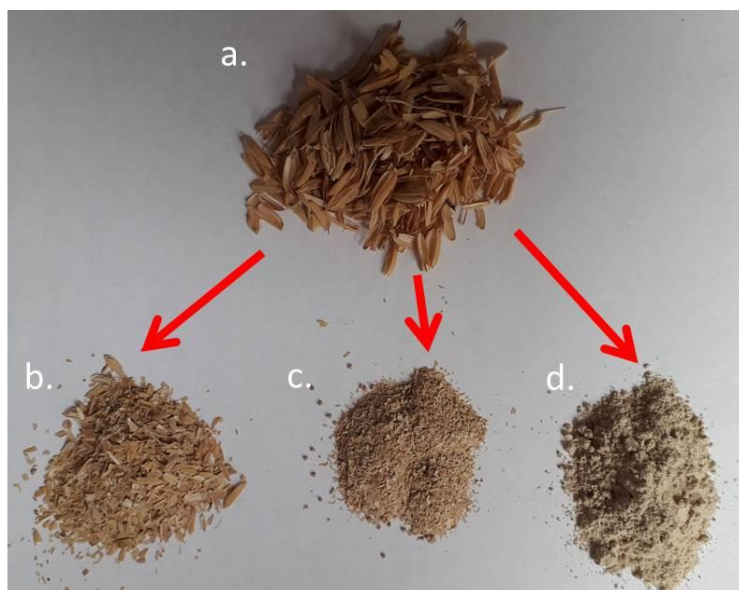
#### **3.1. Materijali**

U ovom radu za pripremu polimernih biokompozita korišteni su polimer polietilen oksid (PEO) i punilo na bazi otpadne bio mase, tj. ljuske riže (LJR). Polietilen oksid je biorazgradivi vodotopivi polimer sa  $M_v=300.000$  iz Sigmee Aldrich. Ljuske riže dobivene su čišćenjem riže, tip Sant Andrea Italija, a uzgoj riže je bio u gradu Kočani, Makedonija.

#### **3.2. Metoda rada**

##### **3.2.1. Priprema biokompozitnih materijala**

Biokompoziti u obliku tankih filmova pripremljeni su lijevanjem mješavine, polimerne otopine PEO/voda i biopunila ljuske riže, u kalupe s dimenzijama od: 150 x 250 mm i 305 x 305 mm. Ovisno o koncentraciji i veličini punila pripremljeni su 3 skupine x 3 uzorka. Prema koncentraciji punila podjela je napravljena s omjerima matrice/punila i to: 100/25, 100/50 i 100/100. Prema veličini punila podjela je napravljena na sitno, srednje i krupno mljevene ljuske riže, slika 3.2.1.1. Ljuske riže mljevene su pomoću mlinca za kavu, Petra – electric M55, Njemačka. Kao kontrolni uzorak pripremljen je čisti PEO film. Za izradu termoizolacijskih biokompozita pripremljena je 8 % polimerna otopina PEO otopljenog u destiliranoj vodi. Otopina je homogenizirana na magnetskoj miješalici konstantnim miješanjem uz grijanje na temperaturi od 30 °C u vremenu od 24 sata. Za dimenzije biokompozita od 150 x 250 mm, 12 g PEO otopljen je u 150 mL vode, dok za dimenzije biokompozita od 305 x 305 mm, 29,7 g PEO otopljen je u 371 mL destilirane vode. U homogeniziranu polimernu otopinu dodane su krupno, srednje i sitno mljevene ljuske riže u omjeru s polimernom matricom od PEO/LJR: 100/25, 100/50 i 100/100. Prije lijevanja u kalupe ljuske riže je potrebno dobro umiješati u polimernu otopinu radi homogenizacije. Nakon lijevanja, sušenje uzoraka provedeno je na sobnoj temperaturi u vremenu od 72 sata.



**Slika 3.2.1.1.** Rižine ljuške: prije mljevenja a), krupno mljevene b), srednje mljevene c) i sitno mljevene d) [26].

Na slici 3.2.1.2. (a-c) dane su slike ljevenih biokompozitnih filmova prije sušenja.



a)



b)



c)

**Slika 3.2.1.2.** Biokompozitni filmovi nakon lijevanja u kalupe s dimenzijama od 150 x 250 mm sa: krupno a), srednje b) i sitno c) mljevenim ljuskama riže i omjerima matrica/punilo: PEO/LJR=100/25, 100/50, 100/100.

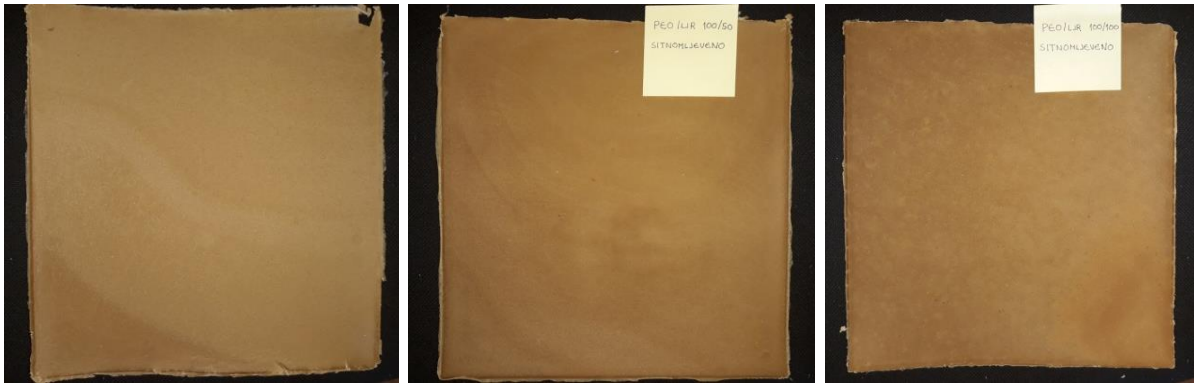
Na slici 3.2.1.3. (a-c) dane su slike biokompozitnih filmova nakon sušenja, a pripremljenih s kalupima dimenzija 305 x 305 mm.



a)



b)



c)

**Slika 2.2.1.3.** Biokompozitni filmovi nakon sušenja u kalupe s dimenzijama od 305 x 305 mm sa: krupno a), srednje b) i sitno c) mljevenim ljuskama riže i omjerima matrica/punilo: PEO/LJR=100/25, 100/50, 100/100.

### 3.3. Karakterizacija pripremljenih biokompozitnih materijala

#### 3.3.1. Određivanje debljine biokompozitnih materijala

Debljina biokompozitnih filmova određena je pomoću mikrometra: Digi Micrometer Mitutoyo, broj 393-340-30, debljina mjerenja: 0-25 mm, točnost: 0,001 mm, slika 3.3.1.1. Debljina je izražena kao srednja vrijednost na temelju do devet mjerenja nasumičnih mjesta na svakom uzorku. Tablica 3.3.1.1. prikazuje srednje vrijednosti debljina biokompozitnih materijala s dimenzijama od 150 x 250 mm i 305 x 305 mm.



**Slika 3.3.1.1.** Debljinomjer – mikrometar.

### 3.3.2. Mehaničko ponašanje biokompozitnih materijala – vlačni test

Za ispitivanje promjene u mehaničkom ponašanju biokompozitnih materijala dodatkom rižinih ljuski, materijali su ispitivani na dinamometru Tenso Lab 3000 tvrtke Mesdan, S.p.A., Italija, slika 3.3.2.1. Biokompozitni materijali iz kalupa 150 x 250 mm rezani su u dimenzijama od 50 x 250 mm i testirani su 3 puta. Uvjeti pri vlačnom naprezanju su: brzina istezanja od 50 mm/min, udaljenost između stezaljki od 100 mm, te maksimalna sila od 1000 N.



Slika 3.3.2.1. Dinamometar Tenso Lab 3000.

### 3.3.3. Određivanje otpora prolazu topline – ispitivanje vrućom pločom

Za određivanje otpora prolazu topline biokompozitni filmovi ispitivani su vrućom pločom tvrtke Measurement Technology Northwest, Thermetrics, Seattle, Washington, SAD, slika 3.3.3.1. Vruća ploča je smještena unutar komore za održavanje uvjeta okoline uključujući temperaturu od 20 °C, relativnu vlažnost od 65 % i strujanje zraka od 1 m/s. Sama ploča na koju se smješta uzorak održava temperaturu od 35 °C kako bi se simulirala temperatura ljudskog tijela odnosno kože, koja je u dodir s odjećom. Test se provodi prema standardu ISO 11092. Ovdje su korišteni biokompozitni filmovi s dimenzijama od 305 x 305 mm. Otpor prolazu topline dobiva se prema jednadžbi (1). Kod ispitivanja materijala najprije se određuje otpor prolazu topline bez uzorka,  $R_{cto}$ , a nakon toga se ispituje otpor prolazu topline uzorka  $R_{ct}$  [27].



**Slika 3.3.3.1.** Vruća ploča – ThermoMetric, SAD [29].

$$R_{ct} = \frac{(T_m - T_a) \cdot A}{H} \quad (1)$$

Gdje su:  $R_{ct}$  ( $m^2K/W$ ) otpor prolazu topline,  $T_m$  ( $^{\circ}C$ ) temperatura ploče,  $T_a$  ( $^{\circ}C$ ) temperatura zraka,  $A$  ( $m^2$ ) površina mjerne jedinice i  $H$  ( $W/m^2$ ) toplinski fluks [27, 28].

**REZULTATI I RASPRAVA**

## 4. REZULTATI I RASPRAVA

U svrhu vrednovanja utjecaja količine i veličine punila odnosno ljuske riže na svojstva biokompozitnih filmova izmjerena je debljina materijala, određena su mehanička svojstva pri vlažnom testu i određen je otpor prolazu topline suhim testom, što bi u konačnici pomoglo kod razvoja termoizolacijskih bio materijala za specijalnu namjenu.

### 4.1. Ovisnost debljine biokompozitnih materijala o koncentraciji i veličini punila

U tablici 4.1.1. dane su srednje vrijednosti izmjerenih debljina biokompozitnih filmova s dimenzijama od 150 x 250 mm i 305 x 305 mm. Kod svakog kompozita je provedeno šest odnosno devet mjerenja. Općenito se može zaključiti da dodatkom rižinih ljuski, bez obzira na udio i veličine istih, debljina čistog PEO filma raste do najviše 16 puta. Debljina čistog PEO filma iznosi  $0,115 \pm 0,276$  mm, dok najveća izmjerena debljina kod PEO/LJR=100/100 s krupno mljevenim ljuskama iznosi  $1,948 \pm 0,351$  mm.

**Tablica 4.1.1.** Srednje vrijednosti i SD debljina biokompozitnih filmova.

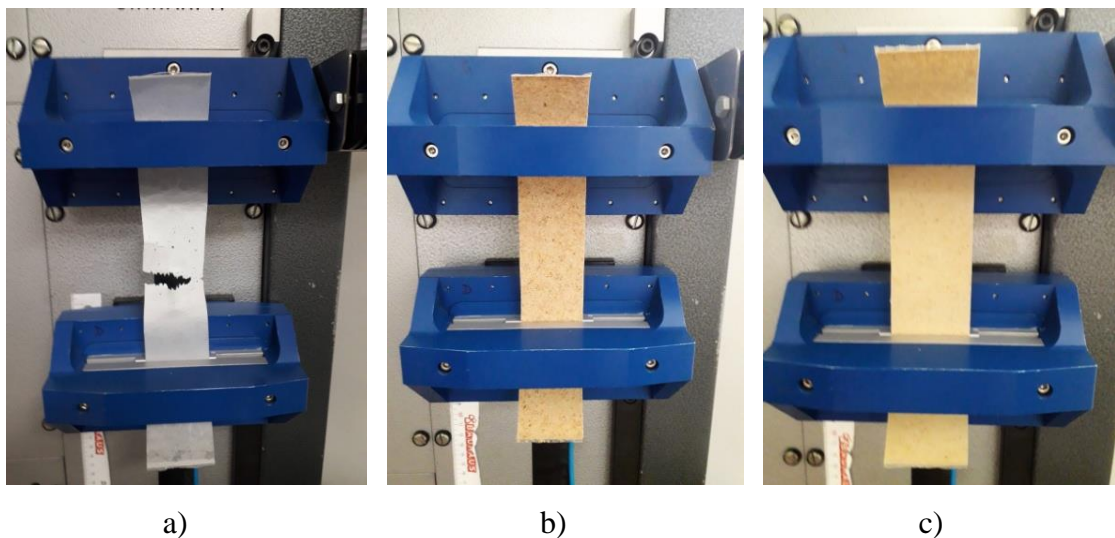
MATERIJAL		Debljina (mm) 150 x 250 mm	Debljina (mm) 305 x 305 mm
SITNO MLJEVENO	PEO/LJR = 100/25	$0,439 \pm 0,130$	$0,220 \pm 0,178$
	PEO/LJR = 100/50	$0,588 \pm 0,090$	$0,356 \pm 0,173$
	PEO/LJR = 100/100	$0,907 \pm 0,015$	$0,427 \pm 0,047$
SREDNJE MLJEVENO	PEO/LJR = 100/25	$0,543 \pm 0,100$	$1,234 \pm 0,783$
	PEO/LJR = 100/50	$1,082 \pm 0,070$	$1,463 \pm 0,209$
	PEO/LJR = 100/100	$1,304 \pm 0,140$	$1,266 \pm 0,126$
KRUPNO MLJEVENO	PEO/LJR = 100/25	$0,913 \pm 0,017$	$1,548 \pm 0,206$
	PEO/LJR = 100/50	$1,161 \pm 0,095$	$1,400 \pm 0,143$
	PEO/LJR = 100/100	$1,547 \pm 0,217$	$1,948 \pm 0,351$
	PEO/LJR=100/0	$0,115 \pm 0,276$	$0,125 \pm 0,081$



Povećanjem udjela rižinih ljuski u kompozitu primjećuje se povećanje debljine materijala. Najmanja izmjerena debljina je kod biokompozita PEO/LJR = 100/25 sa sitno mljevenim rižinim ljuskama,  $0,220 \pm 0,178$  mm.

#### 4.2. Ovisnost mehaničkog ponašanja biokompozitnih materijala o koncentraciji i veličini punila

Na slici 3.2.1. prikazan je vlačni test biokompozitnih filmova na kidalici. Vlačno ponašanje materijala prikazano je izmjenom silom i odgovarajućem istezanju (produljenju) materijala. Izmjerena maksimalna sila i površina poprečnog presjeka materijala korištene su za određivanje vlačne čvrstoće biokompozitnih filmova.



**Slika 4.2.1.** Vlačni test čistog PEO (a) i termoizolacijskih biokompozita PEO/LJR (b i c).

U tablici 4.2.1. dane su srednje vrijednosti i SD maksimalne sile, istezanja kod maksimalne sile i vlačne čvrstoće PEO/LJR biokompozita. Na grafovima od 4.2.1. do 4.2.6. dana su ponašanja biokompozita PEO/LJR s udjelima rižinih ljuski od 25, 50 i 100 %, kao i usporedba ponašanja materijala pri istoj koncentraciji sitno, srednje i krupno mljevenih ljuski, pri vlačnom testu, odnosno dijagrami kidanja (sila – istezanje).

Iz rezultata se može generalno zaključiti da dodatak punila odnosno rižine ljuske u polimernu matricu rezultira smanjenjem vlačne čvrstoće (do najviše 20 puta) i istezanja kod maksimalne sile (do najviše 40 %) kod svih udjela i vrsti mljevenih ljuski. Smanjenje maksimalne sile je u slučaju krupno i srednje mljevenih ljuski (do najviše 45 N – 40 %). Najmanja vlačna čvrstoća

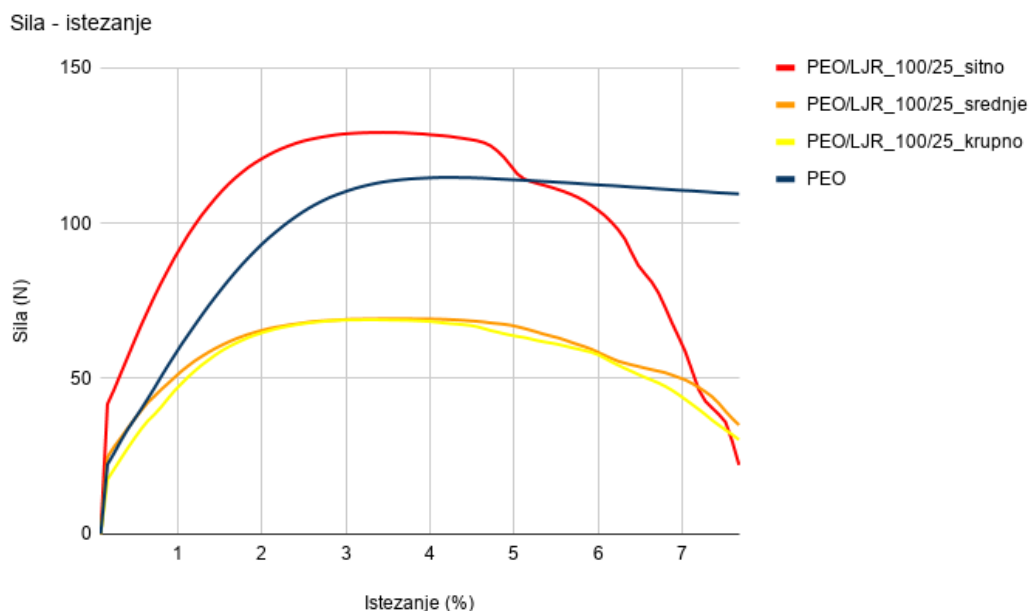
od  $0,92 \pm 0,18 \text{ N/mm}^2$ , gdje je potrebna maksimalna sila od  $71,56 \pm 13,57 \text{ N}$  da bi se ostvarilo istezanje od  $2,79 \pm 0,72 \%$ , određena je kod PEO/LJR=100/100 biokompozita sa krupno mljevenim rižinim ljuskama. Najveća vlačna čvrstoća od  $5,90 \pm 0,81 \text{ N/mm}^2$ , gdje je potrebna maksimalna sila od  $129,57 \pm 17,75 \text{ N}$  da bi se ostvarilo istezanje od  $3,36 \pm 0,42 \%$ , određena je kod PEO/LJR=100/25 biokompozita sa sitno mljevenim rižinim ljuskama, međutim najveća vlačna čvrstoća je određena kod čistog PEO filma i to od čak  $20,02 \pm 2,10 \text{ N/mm}^2$ .

**Tablica 4.2.1.** Srednje vrijednosti i SD maksimalne sile, istezanja i vlačne čvrstoće PEO/LJR biokompozita.

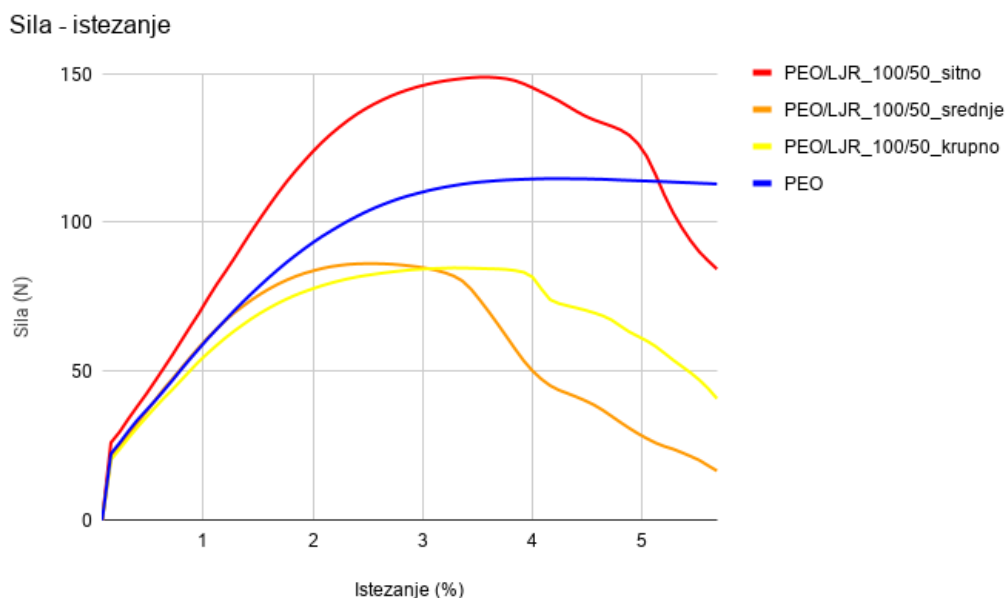
Filmovi PEO/ljuske riže	F (N)	$\varepsilon$ (%)	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )
Kontrola – čisti PEO	115,13±12,09	4,04±0,45	20,02±2,10
Krupno mljevene ljuske riže 100/25	69,30±10,41	3,21±0,51	1,52±0,23
Krupno mljevene ljuske riže 100/50	85,35±14,32	3,31±0,64	1,47±0,25
Krupno mljevene ljuske riže 100/100	71,56±13,57	2,79±0,72	0,92±0,18
Srednje mljevene ljuske riže 100/25	69,38±23,08	3,31±0,32	2,56±0,85
Srednje mljevene ljuske riže 100/50	87,96±23,25	2,43±0,52	1,63±0,43
Srednje mljevene ljuske riže 100/100	110,76±19,51	3,72±0,36	1,70±0,30
Sitno mljevene ljuske riže 100/25	129,57±17,75	3,36±0,42	5,90±0,81
Sitno mljevene ljuske riže 100/50	148,98±31,66	3,49±0,18	5,07±1,08
Sitno mljevene ljuske riže 100/100	183,61±4,11	3,41±1,10	4,05±0,09

Kada se promatra udio rižinih ljuski u biokompozitnim filmovima iz rezultata se može zaključiti da povećanjem količine LJR punila potrebna je veća maksimalna sila da bi nastupilo pucanje materijala, kod srednje i sitno mljevenim rižinim ljuskama. Isključak je u slučaju krupno mljevenih ljuski gdje se maksimalna sila smanjuje kod PEO/LJR=100/100 biokompozita. Daleko najveće maksimalne sile bile su potrebne kod istezanja biokompozitnih filmova sa sitno mljevenim ljuskama i to najveća od  $183,61 \pm 4,11 \text{ N}$  kod najvećeg udjela punila od 100 %. Povećanjem količine rižinih ljuski došlo je do smanjenja vlačne čvrstoće biokompozita kod svih vrsti mljevenih ljuski, sitno, srednje i krupno mljevenih. Najveće smanjenje bilo je u slučaju biokompozitnih filmova sa sitno mljevenim rižinim ljuskama i to

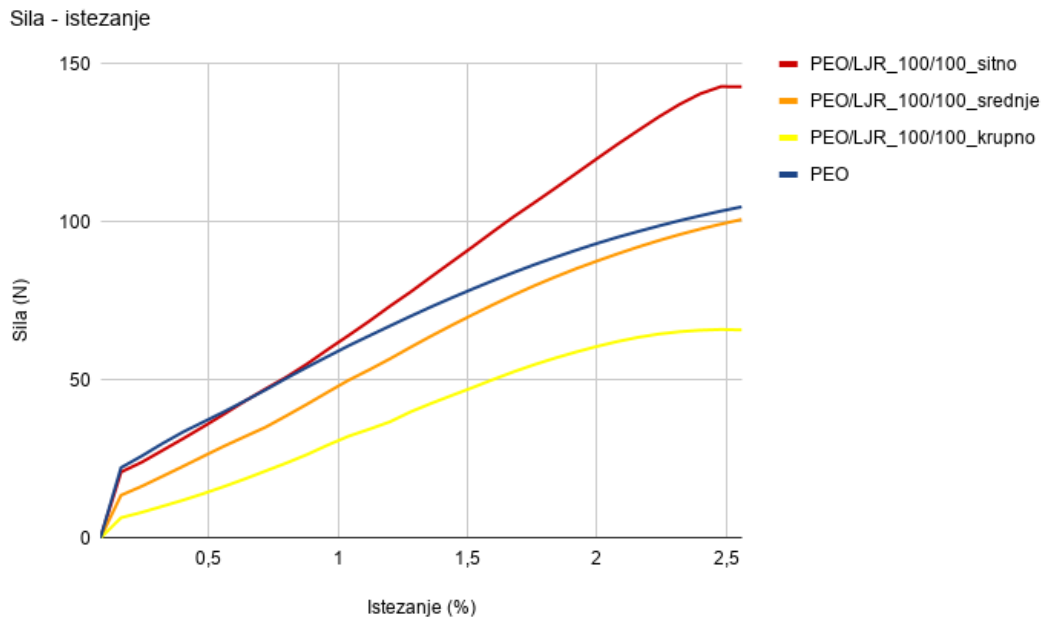
do oko 36 %. U slučaju istežanja kod maksimalne sile nisu zabilježene značajne promjene u vrijednosti istog povećanjem količine rižinih ljuski kao i vrsti rižinih ljuski. Generalno istežanja su bila oko 3,5 % što i u odnosu na čistog PEO filma ne predstavljaju značajnu razliku (čisti PEO – oko 4 %).



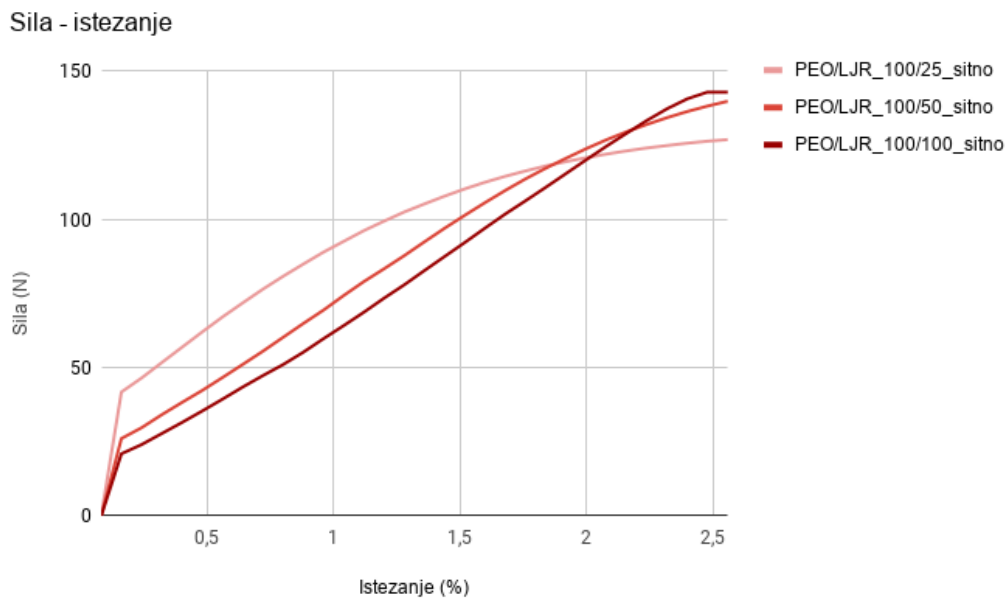
**Graf 4.2.1.** Dijagram kidanja (sila – istežanje) PEO/ljuske riže = 100/25 krupno, srednje i sitno mljevene.



**Graf 4.2.2.** Dijagram kidanja (sila – istežanje) PEO/ljuske riže = 100/50 krupno, srednje i sitno mljevene.

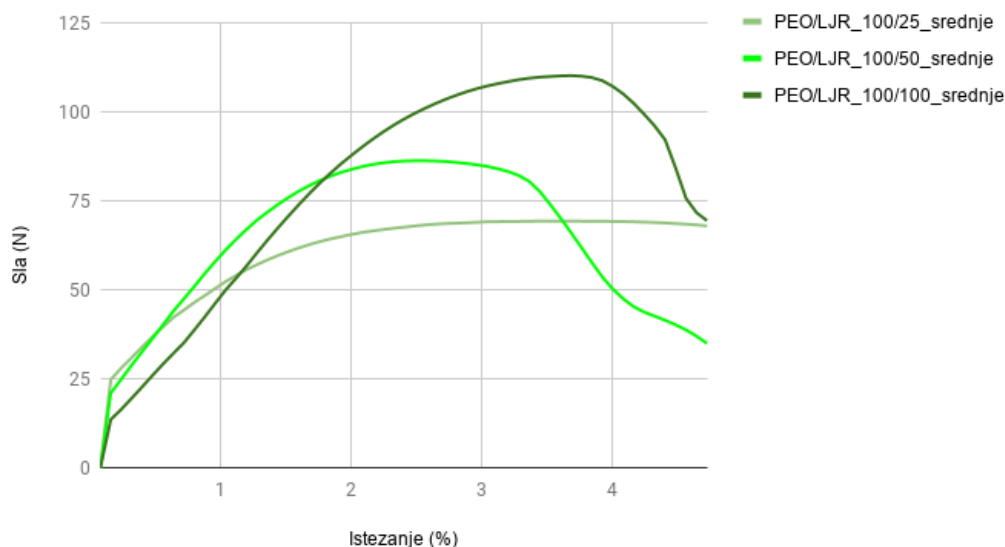


**Graf 4.2.3.** Dijagram kidanja (sila – istezanje) PEO/ljuske riže = 100/100 krupno, srednje i sitno mljevene.



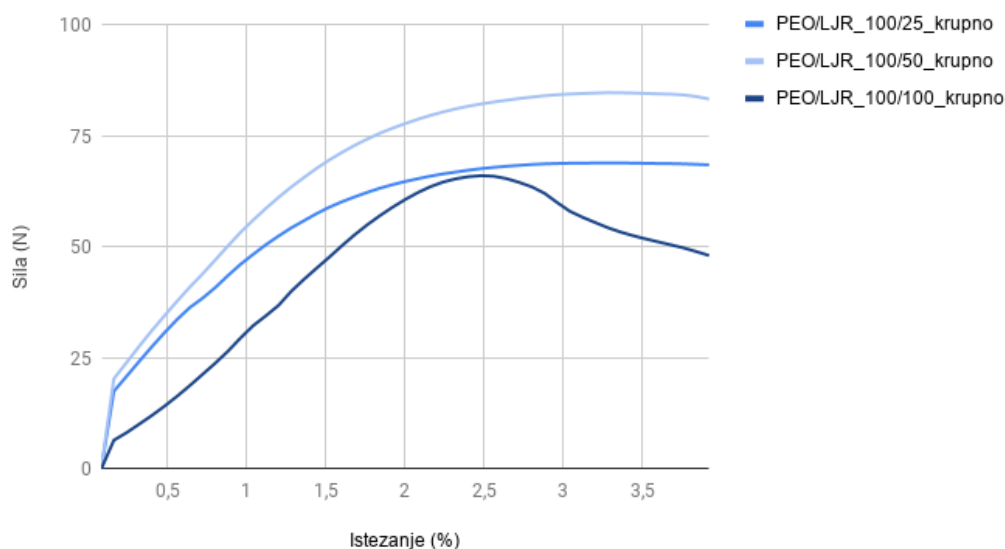
**Graf 4.2.4.** Dijagram kidanja (sila – istezanje) PEO/ljuske riže - sitno mljevene s udjelom od 25, 50 i 100 %.

Sila - istezanje dijagram



**Graf 4.2.5.** Dijagram kidanja (sila – istezanje) PEO/ljuske riže - srednje mljevene s udjelom od 25, 50 i 100 %.

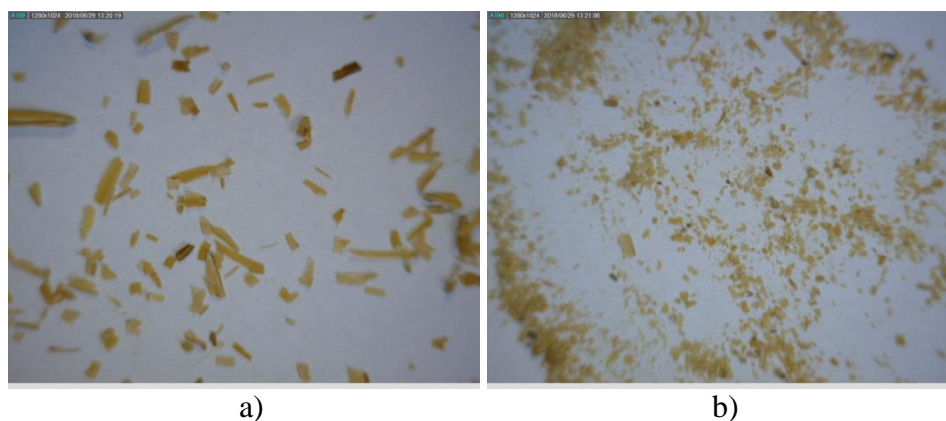
Sila - istezanje dijagram



**Graf 4.2.6.** Dijagram kidanja (sila – istezanje) PEO/ljuske riže - krupno mljevene s udjelom od 25, 50 i 100 %.

Dobiveni rezultati sugeriraju da dodatak punila u matricu odnosno rižinih ljuski u polietilen oksid pokazuje slabiju interakciju između matrice i punila što je nužno za poboljšanje vlačne čvrstoće. Neučinkoviti prijenos naprezanja u materijalu povećava se povećanjem količine

rižinih ljuski, a to je rezultat formiranja mikro praznina između matrice i punila što je pokazatelj slabe adhezije između dviju komponenata [30]. Smanjenje vlačne čvrstoće povećanjem količine punila može biti i zbog moguće aglomeracije punila. Generalno u ovom radu se može uvidjeti da bolja adhezija između matrice i punila je u slučaju sitno mljevenih rižinih ljuski što se može pripisati smanjenoj veličini punila odnosno pravilnijem obliku istih što je suprotno u odnosu na krupno i srednje mljevenih ljuski, slika 3.2.2. Manja veličina punila rezultira većom specifičnom površinom odnosno boljom interakcijom s matricom [31].



**Slika 4.2.2.** Izgled rižine ljuske nakon mljevenja: krupno (a) i srednje mljevene ljuske (b), slike dobivene optičkim mikroskopom.

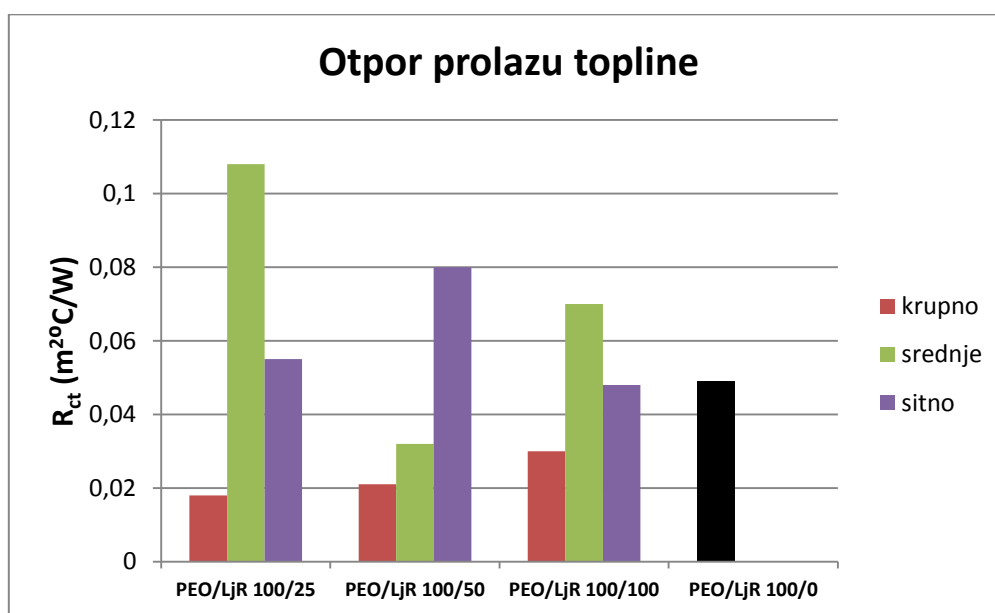
Istraživanja drugih autora pokazuju da za povećanje interakcije između matrice i punila poglavito u slučaju hidrofobne/hidrofilne veze poboljšanje se može ostvariti dodatnom obradom punila i to s alkalnom otopinom NaOH s kojom se smanjuje ili odstranjuje lignin, hemicelulozu, masti i vosak iz rižinih ljuski što rezultira i grubljom površinom ljuski i većom kompatibilnošću s matricom [32, 33]. Alkalna obrada prirodnih vlakana generalno eliminira necelulozne komponente vlakana, a grublja površina proizlazi i iz stršećih hidrokilnih skupina na površini celulozne komponente nakon obrade što povećava vezivanje punila s hidrofobnom matricom [34].

#### **4.3. Ovisnost otpora prolazu topline biokompozitnih materijala o koncentraciji i veličini punila**

Istraživanja do sada su pokazala da dodatak rižinih ljuski u određeni materijal koji ima ulogu matrice poboljšava njegova termoizolacijska svojstva. Nekih od istraživanja opisuju postupak

izrade betonskih građevinskih cigli dodatkom rižinih ljuski u mješavinu cementa, vode i pijeska, kako bi se dobila bolja toplinska izolacija cigli [35]. U ovom radu pripremljeni biokompozitni filmovi mogu naći primjenu u proizvodnji građevinskih termoizolacijskih panela, ali i kod izrade odjeće specijalne namijene tj. kao jedan od slojeva u izradi višeslojne odjeće s termoizolacijskim učinkom.

Graf 4.3.1. daje prikaz otpora prolazu topline pripremljenih biokompozitnih filmova na bazi ljuske riže. Iz dobivenih rezultata se generalno može zaključiti da i veličina (razina mljevenja) i količina rižinih ljuski ima utjecaj na vrijednosti otpora prolazu topline. Što je veći otpor prolazu topline materijali imaju i bolja termoizolacijska svojstva. Dodatak krupno mljevenih rižinih ljuski rezultirao je smanjenjem otpora prolazu topline kod svih koncentracija punila. Najveće smanjenje otpora prolazu topline u odnosu na čistog PEO ( $0,049 \text{ m}^2\text{C/W}$ ) filma iznosilo je 63 % i to kod PEO/LJR=100/25 biokompozita. Dodatkom srednje i sitno mljevenih rižinih ljuski rezultiralo je suprotnim učinkom osim u slučaju PEO/LJR=100/50 (srednje mljevene) i PEO/LJR=100/100 (sitno mljevene) gdje je utvrđeno također smanjenje i to za 35 % odnosno 2 %. Ostali biokompozitni materijali su pokazali očekivanu poboljšanu termoizolaciju odnosno veći otpor prolazu topline i to najviše do 120 % kod PEO/LJR=100/25 (srednje mljevene) biokompozita. Općenito povećanje količine rižinih ljuski rezultiralo je povećanjem otpora prolazu topline kod krupno mljevenih i srednje mljevenih ljuski, ali u slučaju sitno mljevenih ljuski dobiven je suprotan učinak.



**Graf 4.3.1.** Otpor prolazu topline biokompozitnih PEO/LJR materijala.

Ovi rezultati su u skladu i s rezultatima vlačnog testa gdje su biokompoziti sa sitno mljevenim ljuskama pokazali najveće vrijednosti vlačne čvrstoće, pa tako i kod vrijednosti otpora prolazu topline. Rezultati sugeriraju da smanjenjem veličine rižinih ljuski poboljšava se interakcija LJR s PEO polimernom matricom pa samim time rezultira poboljšanjem termoizolacijskih svojstava. Iznimka iz trenda smanjenja i povećanja otpora prolazu topline kod PEO/LJR=100/50 biokompozita može se pripisati nehomogenoj distribuciji punila unutar matrice ili formiranju nakupina punila što rezultira i povećanim ili smanjenim uključenjem zraka u mješavinu dviju komponenti, obzirom da zrak povećava termoizolaciju materijala.



**ZAKLJUČAK**

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu pripremljeni su biokompozitni filmovi postupkom lijevanja mješavine vodene otopine polietilen oksida (PEO) i ljuske riže (RLJ). Rižine ljuske mljevene su u tri razine na sitno, srednje i krupno mljevene, dok su koncentracije bile od 25, 50 i 100 % u odnosu na masu polimera.

Dodatkom rižinih ljuski se bez obzira na veličinu i udio istih povećava debljina kompozita u odnosu na čisti PEO film. Najveća debljina kompozita postiže se dodatkom krupno mljevenih rižinih ljuski. Debljina čistog PEO filma iznosi 0,125 mm, dok najveća debljina iznosi 1,9421 mm i to kod PEO/LJR=100/100 sa krupno mljevenim ljuskama.

Kod vlačnog ponašanja biokompozitnih materijala utvrđeno je da jedino dodatkom sitno mljevenih ljuskama riže potrebna je veća maksimalna sila u odnosu na čisti PEO da bi nastupilo pucanje materijala. Dodatkom svih vrsta rižinih ljuski u čisti PEO dolazi do smanjenja vlačne čvrstoće u odnosu na čistog PEO filma i to do najviše 36 %. Također je primijećeno da s povećanjem količine rižinih ljuski dolazi do dodatnog smanjenja vlačne čvrstoće. Povećanjem količine i veličine rižinih ljuski ne primjećuju se značajne promjene u vrijednosti istezanja kod maksimalne sile. Generalno istezanja su bila oko 3,5 % što u odnosu na čisti PEO (4 %) predstavlja tek neznatno smanjenje (do 12,5 %).

Da bi se dodatkom punila u matricu ostvarilo poboljšanje vlačne čvrstoće potrebno je ostvariti jaku interakciju između matrice i punila. U slučaju sitno mljevenih rižinih ljuski bolja je adhezija između matrice i punila što se može pripisati smanjenoj veličini punila odnosno pravilnijem obliku istih što je suprotno u odnosu na krupno i srednje mljevenih ljuski. Manja veličina punila rezultira većom specifičnom površinom odnosno boljom interakcijom s matricom.

U odnosu na termoizolacijska svojstva biokompozitnih filmova utvrđeno je da je dodatak krupno mljevenih rižinih ljuski rezultirao smanjenjem otpora prolazu topline kod svih koncentracija punila i to do najviše 63 % za PEO/LJR=100/25 biokompozita u odnosu na čistog PEO filma ( $0,049 \text{ m}^2\text{C/W}$ ). Puno veći otpor prolazu topline imaju biokompoziti sa sitno mljevenim i srednje mljevenim (najveće povećanje od 120 % kod PEO/LJR=100/25) ljuskama riže. Razlog tome je poboljšanje interakcije ljuske riže sa PEO polimernom matricom.

**LITERATURA**

## 6. LITERATURA

- [1] History of Composite Materials, URL: <https://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>, pristupljeno: [03\_09\_2018]
- [2] Babić, S.; Grujović, M.: Kompozitni materijali, Seminarski rad, Univerzitet u Kragujevcu, Tehnički fakultet - Čačak, 2012.
- [3] Zweben, C.: Composite materials, Mechanical Engineers' Handbook, John Wiley & Sons, Inc., ed. Myer Kutz, ISBN:9780471777441, Kanada, 2015, str. 380-417
- [4] Štimac, M.: Primjena kompozita u zrakoplovnoj industriji, Završni rad, Politehnika Pula, Visoka tehnička-poslovna škola, Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova, 2016.
- [5] Introduction to composite materials, URL: [http://www.efunda.com/formulae/solid\\_mechanics/composites/comp\\_intro.cfm](http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/composites/comp_intro.cfm), pristupljeno: [03\_09\_2018]
- [6] Kovačićek, F.; Žmak, I.: Metalni kompoziti, URL: <https://bib.irb.hr/datoteka/189027.metalni.pdf>, pristupljeno: [03\_09\_2018]
- [7] Masuelli, M. A.: Introduction of Fibre-Reinforced Polymers – Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes, The Technology Applied for Concrete repair, INTECH, Ed: Martin A. Masuelli, ISBN: 978-953-51-0938-9, 2013, pp.3-40
- [8] Kompozitni materijali, URL: <https://www.scribd.com/document/261348758/Kompozitni-polimeri>, pristupljeno: [03\_09\_2018]
- [9] Composites, URL: <http://in.bgu.ac.il/engn/mater/Documents/LaboratoryBriefings/4/Materials%20Science%20and%20Engineering%20introduction%20Chapter%2015%20Composites%207th%20ed.pdf>, pristupljeno: [03\_09\_2018]
- [10] Kompozitni materijali, URL: <https://ironlady003.wordpress.com/2014/05/12/kompozitni-materijali/>, pristupljeno: [03\_09\_2018]
- [11] URL: <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/open-molding/>, pristupljeno: [03\_09\_2018]

- [12] Šercer, M.; Filipović, A.: Proizvodnja kompozitnih tvorevina, URL: <https://www.scribd.com/document/233375901/Kompozitni-materijali>, pristupljeno: [03\_09\_2018]
- [13] Milardović, G.: Kompoziti u automobilskoj industriji, Polimeri: časopis za plastiku i gumu, **32** (2012) 3-4; 139-142
- [14] Meić Sidić, A.: Primjena kompozitnih materijala u zrakoplovnim konstrukcijama, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova, 2015.
- [15] URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus\\_A310](https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus_A310), pristupljeno: [13\_09\_2018]
- [16] Černić, Ž.: Primjena i utjecaj novih tehnologija na kvalitetu rada u području sportske rekreacije, URL: [https://www.hrks.hr/skole/24\\_ljetna\\_skola/45-cernic.pdf](https://www.hrks.hr/skole/24_ljetna_skola/45-cernic.pdf), pristupljeno: [03\_09\_2018]
- [17] URL: [https://www.ottobockadria.com.ba/protetika/proizvodi\\_od\\_a\\_do\\_z/runner-1e91/](https://www.ottobockadria.com.ba/protetika/proizvodi_od_a_do_z/runner-1e91/), pristupljeno: [13\_09\_2018]
- [18] Brkić S.,: Primjena polimernih kompozita u kirurgiji, Polimeri: časopis za plastiku i gumu, **34** (2013) 1; 21-23
- [19] Nwosu-Obieogu, K.; Chiemenem, L.; Adekunle, K.: Utilization of Rice Husk as Reinforcement in Plastic Composites Fabrication – A Review, American Journal of Materials Synthesis and Processing, **1** (2016) 3; 32-36
- [20] Lim, S. L.; Wu, T. Y.; Sim, E. Y. S.; Lim, P. N.; Clarke, C.: Biotransformation of rice husk into organic fertilizer through vermicomposting, Ecological Engineering, **41** (2012) 60-64
- [21] Rose Marie Garay, M.; Mónica Rallo de la, B.; René Carmona, C.; Jaime Araya, C.: Characterization of Anatomical, Chemical, and Biodegradable Properties of Fibers from Corn, Wheat, and Rice Residues, Chilean Journal of Agricultural Research, **69** (2009) 3; 406-415
- [22] Biocomposites, URL: <https://netcomposites.com/media/1211/biocomposites-guide.pdf>, pristupljeno: [18\_09\_2018]
- [23] URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/wood-plastic-composites>, pristupljeno: [18\_09\_2018]
- [24] Asdrubali, F.; DAlessandro, F.; Schiavoni, S.: A review of unconventional sustainable building insulation materials, Sustainable Materials and Technologies, **4** (2015) 1-17

- [25] Juruf, F. A.; Alam, A.; Alam, I. A.: Development of Heat Insulating Materials Using Date Palm Leaves, *Journal of Thermal Insulation*, 11 (1988) 158-164
- [26] Zdraveva, E.; Mijović, B.; Skenderi, Z.; Parać, M.: Rižine ljuške u izradi termoizolacijskih biokompozita, *Zbornik radova, 7. Međunarodni stručno-znanstveni skup "Zaštita na radu i zaštita zdravlja"*, Kirin, S. (ur.). Karlovac: Veleučilište u Karlovcu, 2018. 352-357
- [27] Skenderi, Z.; Salopek Čubrić, I.; Potočić Matković, V. M.: Toplinska svojstva pletiva naslojenih poliuretanom različite propusnosti, *Zbornik radova 9. znanstveno-stručnog savjetovanja Tekstilna znanost i gospodarstvo*, Penava, Ž.; Gudlin Schwarz, I. (ur.). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Tekstilno-tehnološki fakultet, 2013. 95-98
- [28] Mijović, B.; Zdraveva, E.; Salopek Čubrić, I.; Skenderi, Z.: Heat resistance of layered PS/PU microporous electrospun mats, *Book of proceedings of the 12<sup>th</sup> AUTEX World Textile Conference: Innovative Textile for High Future Demands - Volume I*, Mijović, Budimir i sur. (ur.), Zagreb: Tekstilno-tehnološki fakultet, 2012. 321-324
- [29] URL: <http://www.thermetrics.com/products/guarded-hotplates/sweating>, pristupljeno: [18\_09\_2018]
- [30] Hardinnawirda, K.; Siti Rabiattul, A.: Effect of rice husks as filler in polymer matrix composites, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2 (2012) 181-186
- [31] Guilbert Garcia, E.: Modification of rice husk to improve the interface in isotactic polypropylene composites, *Latin American applied research*, 42 (2012) 83-87
- [32] Ismat Zerín, L. i sur.: Physical and Thermal Characterization of Alkali Treated Rice Husk Reinforced Polypropylene Composites, *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2015, Article ID 907327, 7 pages
- [33] Ab Ghani, M. H. i sur.: Effect of Alkaline Treated Rice Husk on the Mechanical and Morphological Properties of Recycled HDPE/RH Composite, *Journal of applied science and agriculture*, 10 (2015) 5; 138-144
- [34] Kaewkuk, S.; Sutapun, W.; Jarukumjorn, K.: Effects of interfacial modification and fiber content on physical properties of sisal fiber/polypropylene composites, *Composites Part B*, 45 (2013) 1; 544-549
- [35] Tri Endangsih, M.; Hakim, M.: Against the thermal conditions of housing room, *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 116 (2017) 24; 467-485

## **ŽIVOTOPIS**

### **Martina Parać**

Rođena je u Zagrebu 27.10.1993. godine. Nakon završetka osnovne škole 2008. godine upisuje srednju ekonomsku školu. Nakon završene ekonomske škole u Zagrebu 2012. godine upisuje engleski u školi stranih jezika Vodnikova u trajanju od 1 godine. 2013. upisuje preddiplomski studij na Tekstilno tehnološkom fakultetu, smjer: Projektiranje i menadžment tekstila, kao redovan student uz potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske. 2016. godine stječe stručni naziv: Sveučilišna prvostupnica baccalaurea inženjerka tekstilne tehnologije i inženjerstva; Modul: Projektiranje i menadžment tekstila. 2016. godine upisuje diplomski sveučilišni studij. Koautor je na radu: Rižine ljuste u izradi termoizolacijskih biokompozita, koji je bio predstavljen na kongresu: 7. Međunarodni stručno-znanstveni skup "Zaštita na radu i zaštita zdravlja", Zadar, Hrvatska, 12-15.09.2018.