

# Utjecaj dodatka kore kao punila na fizikalna i mehanička svojstva drvno-plastičnih kompozita

---

**Pijalović, Dominik**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Forestry / Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:108:459936>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-04**



*Repository / Repozitorij:*

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
ŠUMARSKI FAKULTET  
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK**

**PREDDIPLOMSKI STUDIJ  
DRVNA TEHNOLOGIJA**

**DOMINIK PIJALOVIĆ**

**UTJECAJ DODATKA KORE KAO PUNILA NA FIZIKALNA I  
MEHANIČKA SVOJSTVA DRVNO-PLASTIČNIH KOMPOZITA**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, rujan 2020.**

## PODACI O ZAVRŠNOM RADU

<b>AUTOR:</b>	Dominik Pijalović 27.11.1997., Sisak 0068229915
<b>NASLOV:</b>	Utjecaj dodatka kore drva kao punila na fizikalna i mehanička svojstva drvno-plastičnih kompozita
<b>TITLE:</b>	The influence of wood bark added as filler on physical and mechanical properties of wood-plastic composites
<b>PREDMET:</b>	Ploče od usitnjenog drva
<b>MENTOR:</b>	Doc. dr. sc. Nikola Španić
<b>IZRADU RADA JE POMOGAO:</b>	-
<b>RAD JE IZRAĐEN:</b>	Sveučilište u Zagrebu - Šumarski fakultet Zavod za tehnologije materijala
<b>AKAD. GOD.:</b>	2019./2020.
<b>DATUM OBRANE:</b>	18.09.2020.
<b>RAD SADRŽI:</b>	Stranica: 25 Slika: 21 Tablica: 10 Navoda literature: 4
<b>SAŽETAK:</b>	<p>U industrijskoj preradi drva, kora se mahom smatra nepovoljnim materijalom i stoga se najčešće koristi u energetske svrhe. Druga opcija je uporaba kore s ciljem izdvajanja specifičnih kemijskih komponenti poput tanina. No, s obzirom na globalnu nestašicu kvalitetne drvne sirovine, kora postaje vrlo zanimljiva sirovina, ponajprije kao dio sirovine za izradu ploča iverica. Upravo na tom načelu osniva se hipoteza ovog završnog rada, u kojem su izrađeni i u određenoj mjeri karakterizirani drvno-plastični kompoziti kod kojih je standardno drvno punilo zamijenjeno onim iz kore. Pritom je kao polimerna osnova korišten komercijalni polistiren, bez ikakvih aditiva i primjesa. Rezultati ispitivanja pokazali su da je koru moguće primijeniti kao punilo, no i da svojstva kompozita ovise o vrsti kore (vrsti drva s koje je uzeta kora). Točnije, rezultati sugeriraju da je primjena usitnjene kore bagrema (<i>Robinia pseudaccacia</i> L.) rezultirala nešto višim vrijednostima mehaničkih svojstava, ali i nešto nižim vrijednostima fizikalnih svojstava, u odnos na kompozite izrađene primjenom kore obične smreke (<i>Picea abies</i> [L.] H. Karst).</p>


## **PREDGOVOR**

Prije svega bih se htio zahvaliti svom profesoru i mentoru doc. dr. sc. Nikoli Španiću koji je utrošio svoje vrijeme i rad pri pomoći u eksperimentalnom radu te je kroz cijeli proces bio dostupan i uvijek spreman pružiti savjet u svrhu izvršavanja i provođenja ovog završnog rada.

Jedan dio zahvale pripada svima bližnjima koji su bili uz mene tijekom obrazovanja, naravno to se odnosi na moju obitelj, djevojku i moje prijatelje koji su uvijek vjerovali u mene.

Tijekom ovog završnog rada dotaknuti ćemo se drvnih kompozita, točnije zamjene drvnog punila s korom i svojstvima uslojenih drvno-plastičnih kompozita.

*Autor*

	<b>IZJAVA</b>  <b>O IZVORNOSTI RADA</b>	<b>OB ŠF 05 07</b>
		Revizija: 1
		Datum: 28.06.2017.

„Izjavljujem da je moj *završni rad* izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

---

*vlastoručni potpis*

*Dominik Pijalović*

U Zagrebu, 18. rujna 2020.

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. CILJ RADA</b> .....	2
<b>3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA</b> .....	3
<b>3.1. Svojstva pločastih drvno-plastičnih kompozita izrađenih primjenom recikliranog polietilena</b> .....	3
<b>3.2. Svojstva drvno-plastičnih kompozita izrađenih iz piljevine i recikliranog poli(etilen-tereftalata): mehanička i fizikalna svojstva</b> .....	3
<b>3.3. Utjecaj različitih vrsta materijala za oblaganje na svojstva ravnih prešanih drvno-plastičnih kompozitnih ploča</b> .....	4
<b>4. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA</b> .....	5
<b>4.1. Osnovna sirovina</b> .....	5
<b>4.2. Izrada drvno-plastičnih kompozita</b> .....	6
<b>4.3.1. Određivanje fizikalnih svojstva</b> .....	9
4.3.1.1. Određivanje gustoće .....	10
4.3.1.2. Određivanje sadržaja vode .....	10
4.3.1.3. Određivanje debljinskog bubrenja, apsolutnog i relativnog upijanja vode .....	10
<b>4.3.2. Određivanje mehaničkih svojstava</b> .....	12
4.3.2.1. Određivanje savojne čvrstoće .....	12
4.3.2.2. Određivanje modula elastičnosti savojne čvrstoće .....	13
<b>5. REZULTATI I DISKUSIJA</b> .....	14
<b>5.1. Debljina</b> .....	14
<b>5.2. Gustoća</b> .....	15
<b>5.4. Debljinsko bubrenje</b> .....	17
<b>5.5. Apsolutno upijanje vode</b> .....	18
<b>5.6. Relativno upijanje vode</b> .....	19
<b>5.7. Savojna čvrstoća, paralelno</b> .....	20
<b>5.8. Savojna čvrstoća, okomito</b> .....	21
<b>5.9. Modul elastičnosti savojne čvrstoće, paralelno</b> .....	22

<b>5.10. Modul elastičnosti savojne čvrstoće, okomito .....</b>	<b>23</b>
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>24</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>25</b>

## 1. UVOD

Ploče od usitnjenog drva su sve češće na tržištu i sve više se koriste. Razlog tomu je globalna nestašica kvalitetne drvne sirovine, te razlika u cijeni u odnosu na masivno drvo. Isprva su se i ploče radile samo od kvalitetne drvne sirovine i ostajalo je puno otpada ali kako nestašica raste sve više i više morao se pronaći način kako bi se iskoristio i drvni otpad. U ovome radu pričamo o drvnoj kori koja je nekad predstavljala nepovoljni materijal u drvnoj industriji i najčešće se koristila u energetske svrhe, a sad je predstavljena kao punilo u drvno-plastičnom kompozitu (engl. Wood-plastic composites - WPC).

Drvno plastični kompoziti (WPC) relativno su nove generacije složenih materijala. U 1970-ima moderni koncept za WPC razvijen je i predstavljen u Italiji te je postepeno stekao popularnost preko cijelog svijeta. U njihovoj strukturi, drvo u obliku brašna, čestica ili vlakana, kombinirano je s termoplastičnim materijalima primjenom specifičnog tlaka uz djelovanje topline.

Drvno-plastični kompoziti su univerzalni materijali visokog modula elastičnosti i vrlo dobrim primjenskim svojstvima, a mogu se proizvesti na mnoge načine. Neki od njih su ekstrudiranje, injekcijsko i kompresijsko prešanje (Klyosov, 2007), odnosno lijevanje i uslojavanje. Upravo potonje navedenom metodom izradit će se kompoziti u sklopu ovog završnog rada.



## 2. CILJ RADA

Cilj ovog rada je izrada i karakterizacija kompozita na bazi kore drva kao punila i polistirena kao polimerne osnove. Kompoziti će se pritom izraditi metodom uslojavanja i zatim će im se ispitati fizikalna (gustoća, sadržaj vode, debljinsko bubrenje, apsolutno i relativno upijanje vode), i mehanička svojstva (savojna čvrstoća i modul elastičnosti). Ciljevi ovog istraživanja realizirani su kroz nekoliko međusobno povezanih faza:

- otapanje polistirena u toluenu,
- dodavanje usitnjene kore smreke (*Picea abies* [L.] H. Karst) i bagrema (*Robinia pseudaccacia* L.) u otopinu,
- izrada WPC ploče (ploča izrađena od polimera i prirodnog punila),
- krojenje ploča na dimenzije uzoraka 160×25×d mm za ispitivanje savojne čvrstoće i modula elastičnosti,
- krojenje ploča na dimenzije uzoraka 25×25×d mm za ispitivanje gustoće, sadržaja vode i debljinskog bubrenja,
- mjerenje dimenzija i mase uzoraka potrebnih za izračun gustoće, sadržaja vode, debljinskog bubrenja i savojne čvrstoće,
- sušenje uzoraka u sušioniku,
- potapanje uzoraka u vodu,
- ispitivanje debljinskog bubrenja, apsolutnog i relativnog upijanja vode te sadržaja vode uzoraka nakon sušenja i potapanja u vodu,
- određivanje savojne čvrstoće i modula elastičnosti,
- statistička obrada i analiziranje dobivenih podataka,
- donošenje zaključaka o svojstvima drvno-plastičnog kompozita.

### **3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA**

#### **3.1. Svojstva pločastih drvno-plastičnih kompozita izrađenih primjenom recikliranog polietilena**

U svom radu autori Lyutyy i sur. (2014) ispitali su utjecaj vrste drvnog punila u raznim omjerima i dodacima, i varijabilnih tehnoloških parametara prešanja (proizvodnje) na svojstva drvno-plastičnih kompozita s polimernom matricom iz recikliranog polietilena. Promatrana je drvena sirovina u formi čestica, brašna i smjese otpadne piljevine i otpadnog iverja (90:10), uz dodatak od 20-60 %. Promatrani parametri odnose se na temperaturu prešanja (160-200 °C) i vrijeme prešanja (6,4-9,6 min). Uz navedene uvjete proizvedeni su kompoziti ciljane gustoće od 800, 900 i 1000 kg/m<sup>3</sup>. Kompozitni materijali izrađeni su jednostavnim prešanjem primjenom jednoetažne preše i adekvatnog kalupa, a sve komponente budućeg kompozita najprije su promiješane na suho.

Rezultati ovog istraživanja pokazali su da su najviše vrijednosti savojne čvrstoće zabilježene kod kompozitnih materijala izrađenih primjenom drvnih čestica pri omjeru drvo:polimer od 40:60. Pri svim drugim promatranim omjerima drvnog punila i polimerne matrice rezultiralo je značajnim smanjenjem savojne čvrstoće. Otpornost na djelovanje vode povećava se s povećanjem udjela polimera u strukturi kompozita s 40 na 80 %. Povećanje ciljane gustoće kompozita s 800 na 1000 kg/m<sup>3</sup> također ima utjecaja na mehanička i fizikalna svojstva kompozita čiji je porast gotovo linearan. Na osnovi zbirnih rezultata navedeni autori zaključili su da su temperatura od 200 °C i vrijeme prešanja od 9,6 min, optimalni parametri proizvodnje kompozita s matricom iz recikliranog polietilena, čija su fizikalno-mehanička svojstva zadovoljavajuća za svakodnevnu upotrebu.

#### **3.2. Svojstva drvno-plastičnih kompozita izrađenih iz piljevine i recikliranog poli(etilen-tereftalata): mehanička i fizikalna svojstva**

Rad autora Rahman i sur. (2013) bavi se izradom drvno-plastičnih kompozita iz piljevine i recikliranog poli(etilen-tereftalata) (PET) uz varijabilan udio drva i polimerne matrice. Kompozitni materijali debljine 6 mm izrađeni su plošnim prešanjem prethodno izmiješanih komponenti i određena su im fizikalno-mehanička svojstva.

Rezultati ovog istraživanja ukazuju na to da je moguće proizvesti drvno-plastične kompozite iz piljevine i recikliranog poli(etilen-tereftalata) (PET), no da je za postizanje boljih uporabnih svojstava nužna uporaba aditiva koji bi bolje povezali drvo s plastikom, točnije kompatibilizatora. Autori su zabilježili pad gustoće kompozita za 18,3 % kao posljedicu povećanja udjela piljevine s 40 na 70 %. Debljinsko bubrenje i upijanje vode rastu sa smanjenjem udjela polimerne matrice i s povećanjem temperature vode kojoj su uzorci za određivanje ova dva svojstva bili izloženi tijekom ispitivanja. Savojna čvrstoća i modul elastičnosti pritom postižu najveće vrijednosti (2008,34 i 27,08 N/mm<sup>2</sup>) u slučaju kompozita sa samo 40 % udjela drvnog punila. Generalno gledajući, autori zaključuju da je ovo istraživanje pokazalo kako je moguće uspješno izraditi kompozit iz otpadne drvne i reciklirane polimerne sirovine, no da pritom treba iznimno paziti na njihove omjere, posebice ako se radi o kompozitu izrađenom bez ikakvih aditiva.

### **3.3. Utjecaj različitih vrsta materijala za oblaganje na svojstva ravnih prešanih drvno-plastičnih kompozitnih ploča**

Autori Bekhta i sur. (2014) ispitali su utjecaj vrste materijala za oblaganje na fizikalno-mehanička svojstva drvno-plastičnih kompozita. Pritom su utvrdili utjecaj brezovog i hrastovog furnira, fenolom impregniranog papira, polietilenske folije i recikliranog polietilena kao materijala za površinsko oblaganje plošno prešanih kompozita. Pritom se kompozit površinski oblagao paralelno s proizvodnjom (u procesu prešanja).

Rezultati ispitivanja pokazali su da se, kako je i očekivano, svojstva kompozita iznimno mijenjaju ovisno o prisustvu pojedinog tipa materijala za oblaganje. Pritom su najveće vrijednosti savojne čvrstoće i modula elastičnosti zabilježene u slučaju primjene brezovog furnira, no te vrijednosti variraju ovisno o smjeru ispitivanja (smjeru drvnih vlaknaca). Za razliku od prirodnih materijala, sintetski su pokazali bolja vodoodbojna svojstva, budući da su vrijednosti debljinskog bubrenja i upijanja vode najniža u slučaju kompozita dvostrano obloženih fenolom impregniranim papirom, polietilenskom folijom i recikliranim polietilenom. Dodatno je zaključeno da je jednostrano oblaganje furnirom bolja opcija od obostranog, budući da je u tom slučaju debljinsko bubrenje niže.

## 4. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA

### 4.1. Osnovna sirovina

#### 4.1.1. Kora obične smreke i bagrema

Kao osnovna sirovina korišteni su kora obične smreke (*Picea abies* [L.] H. Karst). i bagrema (*Robinia pseudaccacia* L.). Sirovina je pripremljena na način da se, neposredno nakon obaranja stabla, otprilike na prsnoj visini stabla, poprečnim piljenjem motornom pilom lančanicom izdvojio kolut visine 5 cm. S takvog uzorka, nakon prirodnog sušenja do postizanja konstantne mase, dlijetom je ručno uklonjena kora. Izdvojena kora zatim je mljevena primjenom mlina Retsch ZM 200, opremljenog sa sitom s otvorom oka od 1 mm. Usitnjena masa zatim je ručno prosijana primjenom sita s otvorom oka od 0,2 i 0,8 mm. Masa zaostala na situ s otvorom oka od 0,2 mm korištena je u daljnjem radu. Pripremljena kora, do korištenja je pohranjena u polietilenske bočice.

#### 4.1.2. Polistiren

Osim kore drva, kao osnovna sirovina koristio se i polistiren koji se dobiva radikalnom polimerizacijom stirena (sl. 1). Polistiren je polimerni materijal koji zbog svoje raznolikosti u primjeni, lake preradljivosti i relativno niske cijene zauzima četvrto mjesto u ukupnoj svjetskoj potrošnji plastomera. Svojstva su mu visoka čvrstoća (46-55 MPa), niska elastičnost (isteže se 3-4%), dobra toplinska postojanost, dobra električna izolacijska svojstva, otpornost na kiseline i lužine, velika optička prozirnost i mnoga druga. Veliki nedostataci polistirena su lomljivost i niska udarna žilavost.



**Slika 1.** Polistiren u granulama

## 4.2. Izrada drvno-plastičnih kompozita

U ovom eksperimentalnom radu ispitivanja su provedena na višeslojnim drvno-plastičnim kompozitima čiji je sastav polimer i usitnjena kora smreke (Uzorak A) i bagrema (Uzorak B).

Rad je započeo otapanjem 4 g polistirena u 100 ml toluena. Polistiren se otopio u staklenim čašama zapremine 250 ml koje su se nalazile na mutipozicijskoj mješalici IKA RO 10 (sl. 1), odnosno IKA C-MAG HS 7. U ovoj fazi, na potonje navedenoj mješalici, otapanje polistirena ubrzalo se zagrijavanjem toluena na 70 °C (sl. 2). Kada je polistiren otopljen, otopina se izlila u kalupe kako bi se formirao polimerni list. Kao kalup, korišten je keramički tanjurić pravokutnog oblika. Nakon izlivanja, kalupi su ostavljeni na ambijentalnom tlaku i temperaturi do potpunog hlapljenja tekuće komponente (toluen) i formiranja stvrdnutog lista čistoga polimera.



*Slika 1. Otopanje polistirena u toluenu uz pomoć multipozicijske mješalice IKA RO 10*



*Slika 2. Otopanje polistirena u toluenu uz pomoć mješalice IKA C-MAG HS 7*

Nakon toga se provodio dosta sličan postupak, jedina razlika je u tome što se u čašu u kojoj se nalazila otopina toluena i polistirena dodalo još 2 g usitnjene kore smreke i bagrema (slika 3.). Kao i u prethodnom slučaju otopina se zatim izlila u kalupe i ostavila na ambijentalnom tlaku i temperaturi kako bi se formirao list polimera izmješanog s česticama punila (sl. 4).



**Slika 3.** Vaganje usitnjene kore smreke



**Slika 4.** Polimer pomiješan s usitnjenom korom bagrema

Prije prešanja, listovi su složeni u adekvatan kalup (sl. 5) prema slijedećem redoslijedu:

1. Furnir topole orijentiran u smjeru paralelno s vlakancima
2. Čisti polimer
3. Polimer pomiješan s usitnjenom korom
4. Polimer pomiješan s usitnjenom korom
5. Polimer pomiješan s usitnjenom korom
6. Čisti polimer
7. Furnir topole orijentiran u smjeru okomito na vlakanca



**Slika 5.** Listovi u adekvatnom kalupu

Nakon slaganja listova unutar kalupa uslojeni kompozit stavio se između dvije metalne ploče i umetnuo u vruću prešu (sl. 6), na vruće prešanje. Vruće prešanje

odvijalo se na temperaturi od 140 °C i tlaku 0,5 N/mm<sup>2</sup> kroz 8 minuta. S ciljem završetak polimerizacije i potpunog otvrdnjavanja kompozita, po vađenju iz vruće preše, kompoziti su hladno prešani (sl. 7) kroz 5 min pri tlaku od 5 N/mm<sup>2</sup> (slika 7.).



*Slika 6. Postupak vrućeg prešanja*



*Slika 7. Postupak hladnog prešanja*

### **4.3. Karakterizacija kompozita**

Izrađenim kompozitima utvrđena su fizikalna i mehanička svojstva. Pritom su uzorci pripremljeni krojenjem na kružnoj pili podijeljeni u više skupina. Konkretno, uzorci korišteni za ispitivanje savojne čvrstoće i modula elastičnosti (sl. 8) podijeljeni su u četiri skupine:

1. Uzorci kompozita izrađeni primjenom usitnjene kore smreke krojeni tako da je smjer vlaknaca vanjskih listova furnira orijentiran u smjeru duljine uzoraka.
2. Uzorci kompozita izrađeni primjenom usitnjene kore smreke krojeni tako da je smjer vlaknaca vanjskih listova furnira orijentiran okomito na smjer duljine uzoraka.
3. Uzorci kompozita izrađeni primjenom usitnjene kore bagrema krojeni tako da je smjer vlaknaca vanjskih listova furnira orijentiran u smjeru duljine uzoraka.
4. Uzorci kompozita izrađeni primjenom usitnjene kore bagrema krojeni tako da je smjer vlaknaca vanjskih listova furnira orijentiran okomito na smjer duljine uzoraka.

Dimenzije uzoraka u sve četiri skupine bile su 160×25 mm.



*Slika 8. Uzorci za ispitivanje savojne čvrstoće i modula elastičnosti*

Uzorci za određivanje fizikalnih svojstava pripremljeni su iz ostataka iskidanih uzoraka korištenih za određivanje savojne čvrstoće i modula elastičnosti. Točnije, ostaci ranije korištenih uzoraka raspiljivali su se na još manje uzorke (po 20 kom) dimenzija 25×25 mm, i takvi koristili za određivanje gustoće, sadržaja vode, debljinskog bubrenja, te apsolutnog i relativnog upijanja vode.

#### **4.3.1. Određivanje fizikalnih svojstva**

Od fizikalnih svojstava su izmjerene dimenzije, gustoća, debljinsko bubrenje te apsolutno i relativno upijanje vode. Kod određivanja dimenzija (i ostalih fizikalnih i mehaničkih svojstava) potrebno je najprije izmjeriti dimenzije uzoraka. Duljina i širina uzoraka izmjereni su s pomičnim mjerilom (sl. 9) s preciznošću od desetinke milimetara. Debljina uzoraka izmjerena je pomoću mikrometarskog vijka s paralelnim dodirnim površinama s točnošću od stotinke milimetara (sl. 10).



*Slika 9. Digitalno pomično mjerilo*



*Slika 10. Mikrometarski vijak*

Masa ispitnih uzoraka izmjerena je pomoću precizne vage točnosti 0,01 g.



#### 4.3.1.1. Određivanje gustoće

Gustoća je određena na kondicioniranim uzorcima. Ispitano je 20 uzoraka kvadratnog oblika dimenzija 25×25 mm. Svakom pojedinom ispitnom uzorku izmjerena je masa i određene su njegove dimenzije, na osnovu čega se izračunala gustoća. Gustoća je izražena kao omjer mase i volumena kompozita, a srednja vrijednost svih mjerenja po setu uzoraka predstavlja gustoću izrađenih kompozita. Gustoća je računata prema sljedećoj formuli:

$$\rho = \frac{m_u}{V} \quad [1]$$

gdje je:

$\rho$  – gustoća ( $g/cm^3$ )  
 $m_u$  – masa uzorka (g)  
 $V$  – volumen uzorka ( $cm^3$ )

#### 4.3.1.2. Određivanje sadržaja vode

Sadržaj vode određen je gravimetrijskom metodom za što su se također koristili uzorci dimenzija 25×25 mm. Postupak gravimetrijske metode odvija se po principu da se najprije izmjeri masa ispitnih uzoraka na vagi točnosti  $\pm 0,01$  g te se zatim ti isti uzorci stavljaju u sušionik i suše pri konstantnoj temperaturi od  $103 \pm 2^\circ C$  dok sva voda ne ispari iz uzorka, odnosno, do konstantne mase. Empirijski je utvrđeno vrijeme za sušenje koje u pravilu iznosi 24 sata, nakon kojih se uzorci vade iz sušionika, hlade u eksikatoru i važu. Sadržaj vode u uzorcima izražava se kao relativna vlažnost i izračunava se na osnovi razlike mase uzoraka u zrakosuhom i apsolutno suhom stanju prema sljedećoj formuli:

$$u_r = \frac{m_u - m_0}{m_0} \times 100 \quad [2]$$

gdje je:

$u_r$  – relativna vlažnost (%)  
 $m_u$  – masa klimatiziranog uzorka prije sušenja (g)  
 $m_0$  – masa klimatiziranog uzorka nakon sušenja (g)

#### 4.3.1.3. Određivanje debljinskog bubrenja, apsolutnog i relativnog upijanja vode

Određivanje debljinskog bubrenja odvijalo se potapanjem 20 uzoraka dimenzija 25×25 mm u vodu kroz određeno vrijeme (24 h). Prije ispitivanja, uzorci su

klimatizirani i izmjerena im je masa i debljina. Klimatizirani uzorci u vodu su potopljani u vodoravnom položaju, što je osigurano primjenom adekvatnog kaveza. Pri potapanju pazilo se da se uzorci međusobno ne dodiruju i da nisu preklopljeni jedan preko drugoga. Razina vode iznad uzoraka bila je oko 25 mm. Nakon propisana vremena ispitni uzorci izvađeni su iz vode i kratko ocijeđeni od viška vode. Uzorci su zatim vagani i određene su im dimenzije (debljina) nakon izlaganja djelovanju vode. Debljinsko bubrenje izračunato je kao razlika debljine ispitnog uzorka nakon klimatizacije (prije tretmana) i njegove debljine nakon potapanja u vodu. Izražava se s točnošću od 0,1 mm, a računa se prema formuli:

$$Q - 24 = \frac{d_0 - d_u}{d_u} \times 100 \quad [3]$$

gdje je:

$Q-24$  – debljinsko bubrenje nakon 24 sata izlaganja (%)

$d_0$  – debljina ispitnog uzorka nakon tretmana (mm)

$d_u$  – debljina klimatiziranog ispitnog uzorka (mm)

Apsolutno upijanje vode je odnos mase ispitnog uzorka nakon tretmana u vodi i mase klimatiziranog uzorka prije tretmana. Rezultat se izražava s točnošću od 0,1 g, a izračunava se prema sljedećoj formuli:

$$U_a = m_v - m_u \quad [4]$$

gdje je:

$U_a$  – apsolutno upijanje vode (g)

$m_v$  – masa ispitnog uzorka nakon izlaganja (g)

$m_u$  – masa ispitnog uzorka prije izlaganja (g)

Relativno upijanje vode odnos je apsolutnog upijanja vode i mase ispitnog uzorka prije tretmana. Relativno upijanje vode računa se prema formuli:

$$U_r = \frac{m_v - m_u}{m_u} \times 100 \quad [5]$$

gdje je:

$U_r$  – relativno upijanje vode (%)

$m_v$  – masa ispitnog uzorka nakon izlaganja (g)

$m_u$  – masa ispitnog uzorka prije izlaganja (g)

### 4.3.2. Određivanje mehaničkih svojstava

Od mehaničkih svojstava ispitivala se savojna čvrstoća i modul elastičnosti savojne čvrstoće koji su određeni na kidalici (sl. 11) u Laboratoriju za drvene ploče Šumarskog fakulteta. Uzorci za ispitivanje savojne čvrstoće i modula elastičnosti bili su dimenzija 160×25 mm



*Slika 11. Kidalica za ispitivanje savojne čvrstoće i modula elastičnosti savojne čvrstoće*

#### 4.3.2.1. Određivanje savojne čvrstoće

Prilikom ispitivanja, uzorak se stavlja na dva oslonca ispitnog uređaja (kidalice) međusobno razmaknuta za 105 mm, a brzina opterećenja, odnosno primicanja traverze s uzorkom prema vertikalnom pritiskivaču, podešena je tako da lom nastupi u vremenu od oko jedne minute. Navedeni razmak koristio se zbog dodane nadmjere pri piljenju uzorka od po  $\geq 25$  mm sa svake strane, čime se sprječilo proklizavanje uzoraka i (smična) deformacija pojedinih slojeva pri ispitivanju. Za vrijeme opterećivanja, sila je djelovala na sredini mjerne duljine po cijeloj širini ispitnog uzorka. Na osnovi tako izmjerene sile i ranije izmjerenih dimenzija ispitnih uzoraka odredila se savojna čvrstoća; po formuli:

$$\sigma_s = \frac{3 \times F \times l}{2 \times b \times d^2}$$

[6]

gdje je:

$\sigma_s$  – savojna čvrstoća (MPa)  
 $F$  – maksimalna pritisna sila (N)

*l* – razmak između oslonaca (mm)  
*b* – širina ispitnog uzorka (mm)  
*d* – debljina ispitnog uzorka (mm)

#### 4.3.2.2. Određivanje modula elastičnosti savojne čvrstoće

Modul elastičnosti savojne čvrstoće odnos je normalnog naprezanja u poprečnom presjeku ispitnog uzorka, u području proporcionalnosti i odgovarajućeg pojedinačnog progiba. Određivanje modula elastičnosti izvršeno je paralelno s ispitivanjem savojne čvrstoće, na istim uzorcima. Pritom se za registraciju progiba koristio, na kidalicu postavljeni induktivni davač pomak. Kidalica i davač pomaka informacije u realnom vremenu šalju na računalo opremljeno adekvatnim programom (National Instruments LabView, ver. 10) koji generira zapis porasta sile i pomaka. Na osnovi tako dobivenih podataka, primjenom računalnog programa MATLAB R2010b proračunat je modul elastičnosti. Pritom je korišten princip određivanja istovjetan onome koji se koristi za drvene ploče, a prema kojem se ispitni uzorak počinje naprezati pri 10 % maksimalnog opterećenja, a nakon 40% maksimalnog opterećenja prelazi u zonu plastičnosti i dolazi do zaostalih trajnih deformacija. Modul elastičnosti ( $E_s$ ) izračunao se prema formuli:

$$E_s = \frac{(F_2 - F_1) \times l^3}{4 \times b \times d^3 \times (a_2 - a_1)} \quad [7]$$

gdje je:

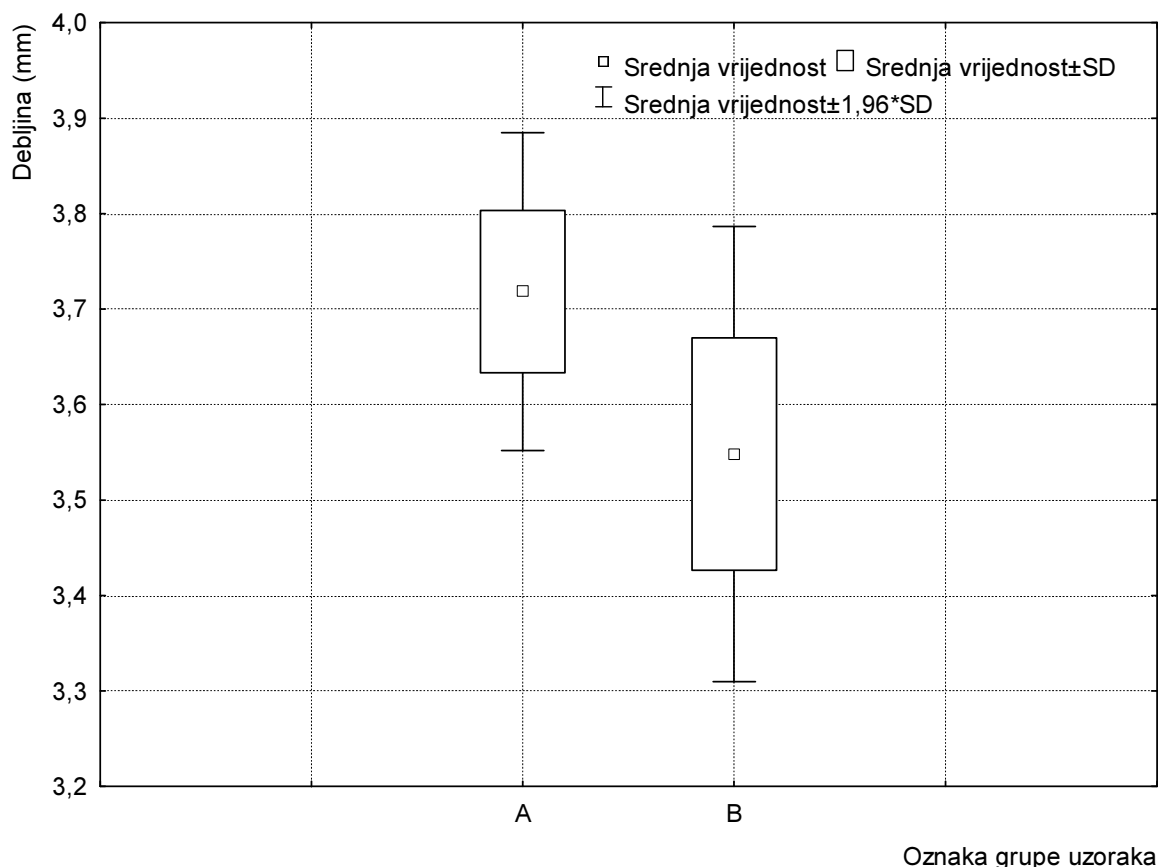
$E_s$  – modul elastičnosti savojne čvrstoće (MPa)  
 $(F_2 - F_1)$  – porast sile na pravocrtnom dijelu krivulje; Hookeova dijagrama (MPa)  
*l* – razmak između oslonaca (mm)  
*b* – širina ispitnog uzorka (mm)  
*d* – debljina ispitnog uzorka (mm)  
 $(a_2 - a_1)$  – povećanje progiba na sredini duljine ispitnog uzorka (mm)

## 5. REZULTATI I DISKUSIJA

### 5.1. Debljina

Tablica 1. Vrijednosti debljine ispitnih uzoraka drvno-plastičnog kompozita

Oznaka grupe uzoraka	Broj uzoraka (n)	Aritmetička sredina (mm)	Minimum (mm)	Maksimum (mm)	Standardna devijacija
A	10	3,718	3,625	3,863	0,084
B	10	3,548	3,403	3,784	0,121



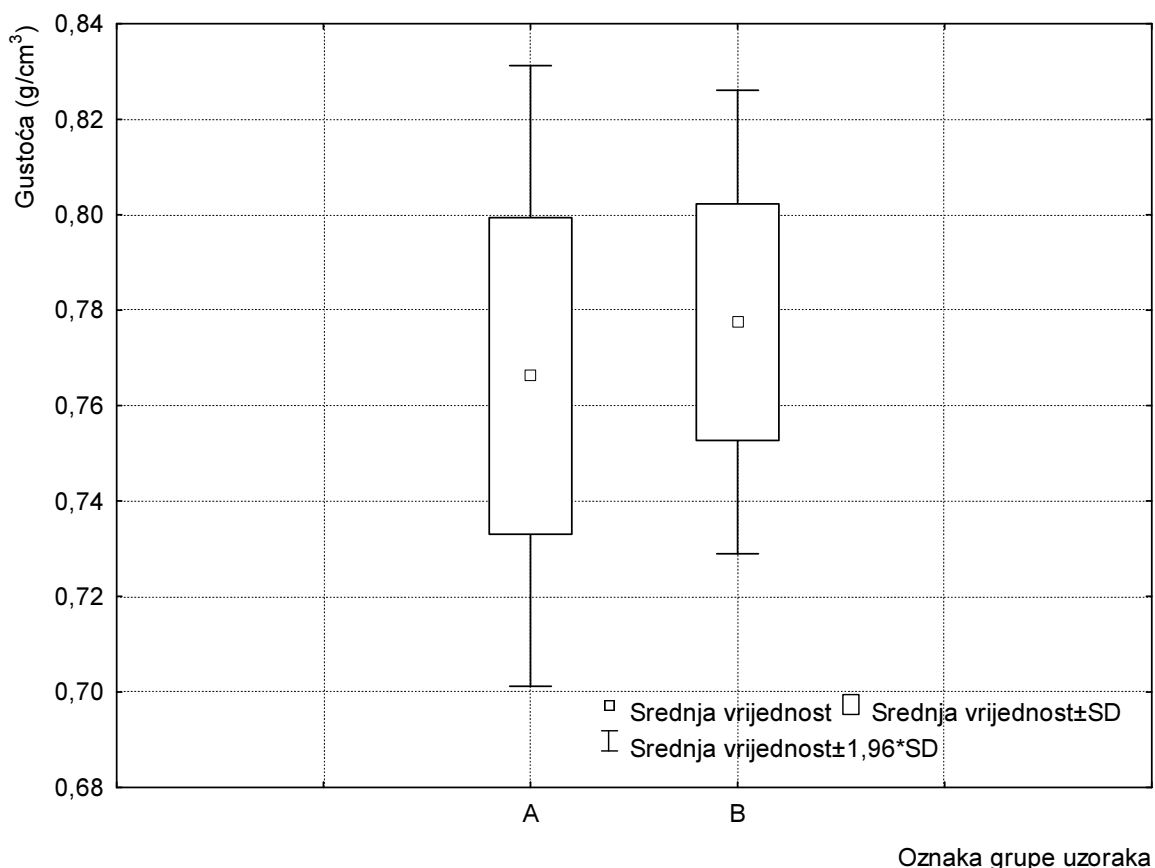
Slika 12. Grafički prikaz debljine pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih drvno-plastičnih kompozita

Grupa uzoraka A, koja označava drvno-plastični kompozit sa korom smrekom korištenom kao punilom, imala je veću debljinu od uzoraka u kojima je kora bagrema korištena kao punilo (uzorci oznake B). Iako mala, ova razlika ukazuje na mogućnost većeg uprešavanja kore smreke u odnosu na koru bagrema, što rezultira različitim tolerancijama debljine gotovih kompozita. Naravno, u ovom je slučaju bitna i tolerancija debljine i uprešavanje korištenih listova furnira, no u ovom završnom radu taj utjecaj nije analiziran.

## 5.2. Gustoća

Tablica 2. Vrijednosti gustoće ispitnih uzoraka drvno-plastičnog kompozita

Oznaka grupe uzoraka	Broj uzoraka (n)	Aritmetička sredina (g/cm <sup>3</sup> )	Minimum (g/cm <sup>3</sup> )	Maksimum (g/cm <sup>3</sup> )	Standardna devijacija
A	10	0,766	0,727	0,837	0,331
B	10	0,777	0,733	0,815	0,024



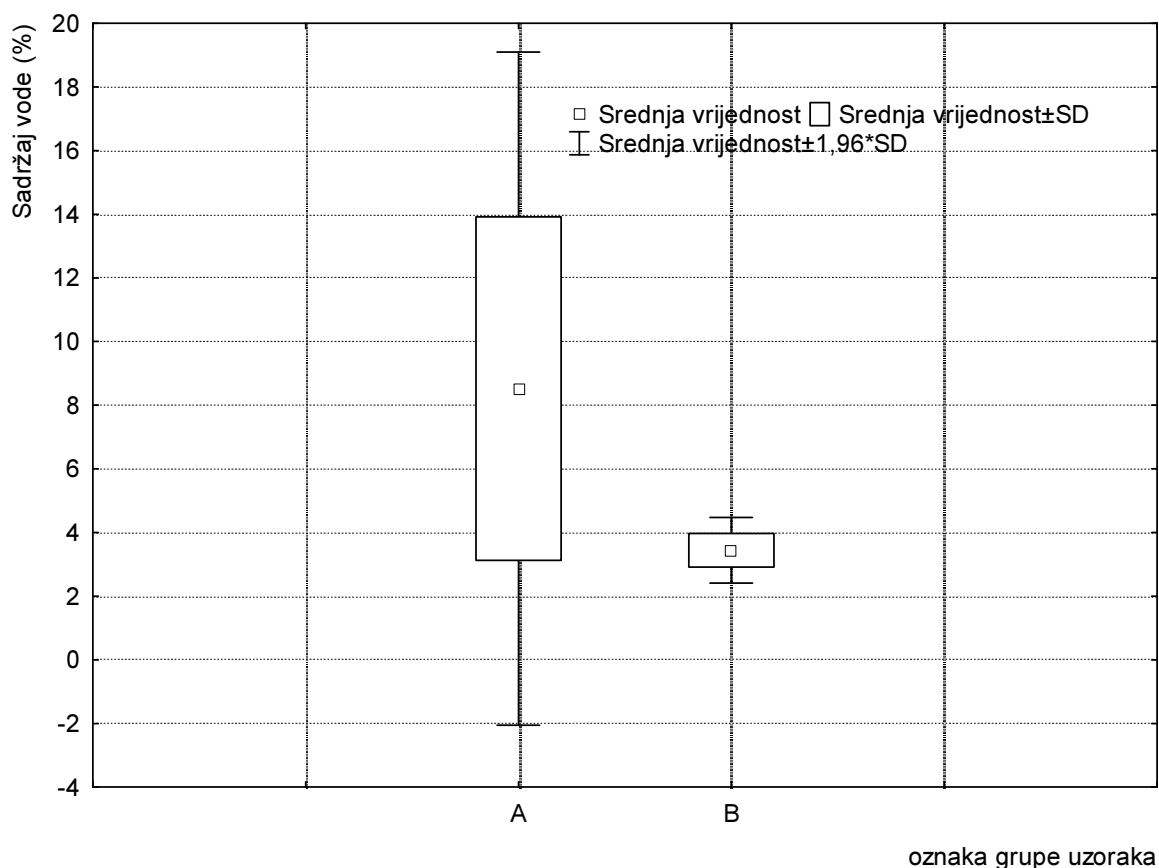
Slika 13. Grafički prikaz gustoće pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih drvno-plastičnih kompozita

Na osnovi prikaznog u tablici 2. i na slici 13. moguće je zaključiti da su uzorci grupe B veće gustoće nego uzorci grupe A. Razlog tome je različita struktura usitnjene kore, koja je u slučaju bagrema vrlo vlaknaste strukture koja je podložna većem sabijanju prilikom prešanja. Srednje vrijednosti gustoća razlikuju se za 0,11 mm Uz to, s obzirom da je debljina bila veća kod grupe uzoraka A, logično je da je gustoća grupe uzoraka B veća jer su debljina i gustoća uzoraka u obrnuto proporcionalnom odnosu.

### 5.3. Sadržaj vode

Tablica 1. Vrijednosti sadržaja vode ispitnih uzoraka drvno-plastičnog kompozita

Oznaka grupe uzoraka	Broj uzoraka (n)	Aritmetička sredina (%)	Minimum (%)	Maksimum (%)	Standardna devijacija
A	10	8,52	2,96	17,61	5,39
B	10	3,44	2,99	4,29	0,52



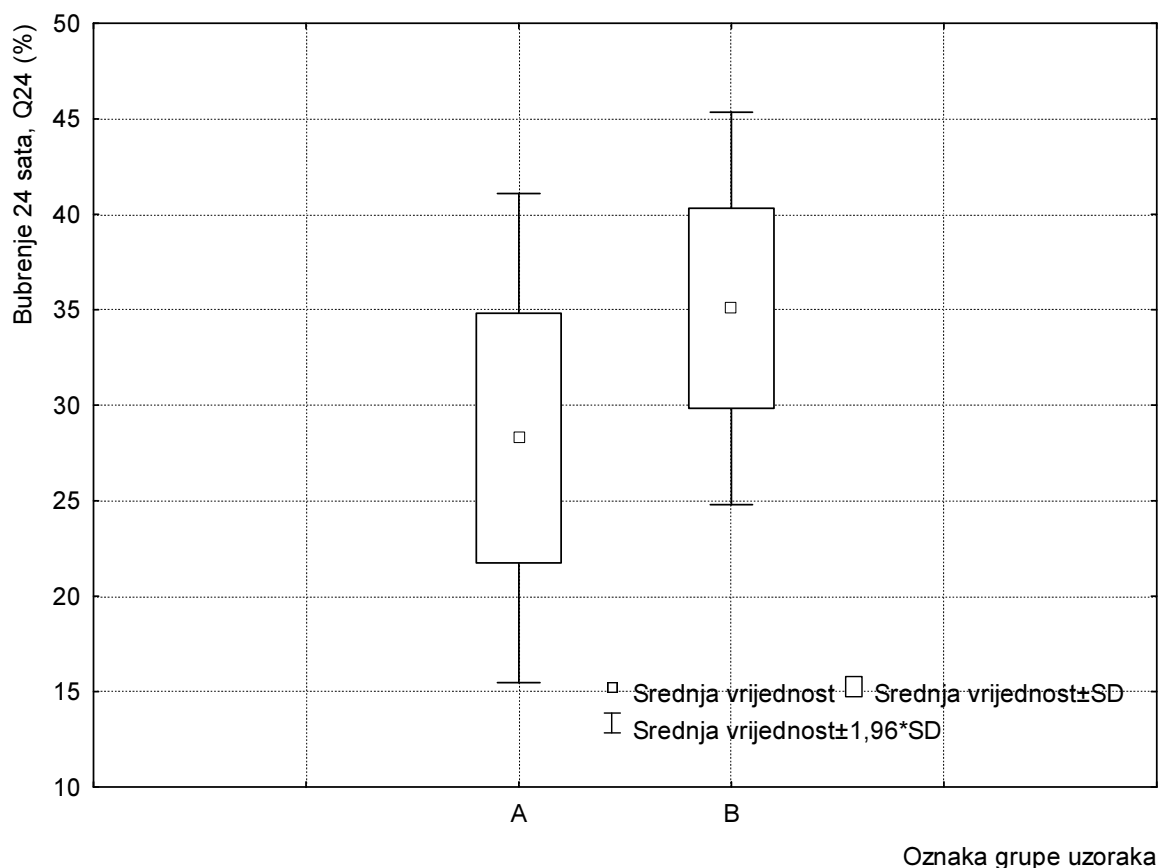
Slika 14. Grafički prikaz sadržaja vode pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih drvno-plastičnih kompozita

Sadržaj vode (tabl. 3 i sl. 14) veći je kod uzoraka grupe A u odnosu na uzorke grupe B. Točnije, uzorci grupe A imaju 5,08 % veći sadržaj vode od uzoraka grupe B. Tako velika razlika sadržaja vode najvjerojatnija je posljedica različite hidrofilnosti kore dvaju korištenih vrsta, odnosno razlika kemijskog sastava s naglaskom na sadržaj celuloze. Naime, poznato je da je celuloza izrazito hidrofilna komponenta drvene tvari, čije je učešće u kori bagrema veće nego li u kori smreke. No, tu tvrdnju svakako treba dodatno potvrditi kroz laboratorijski rad. Ujedno, u obzir svakako treba uzeti i činjenicu da se radilo s ukupnom korom, bez razdvajanja njenih primarnih i sekundarnih dijelova.

## 5.4. Debljinsko bubrenje

Tablica 2. Vrijednosti debljinskog bubrenja ispitnih uzoraka drvno-plastičnog kompozita

Oznaka grupe uzoraka	Broj uzoraka (n)	Aritmetička sredina (%)	Minimum (%)	Maksimum (%)	Standardna devijacija
A	10	28,28	19,76	42,30	6,53
B	10	35,07	27,12	44,77	5,24



Slika 15. Grafički prikaz debljinskog bubrenja pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih drvno-plastičnih kompozita

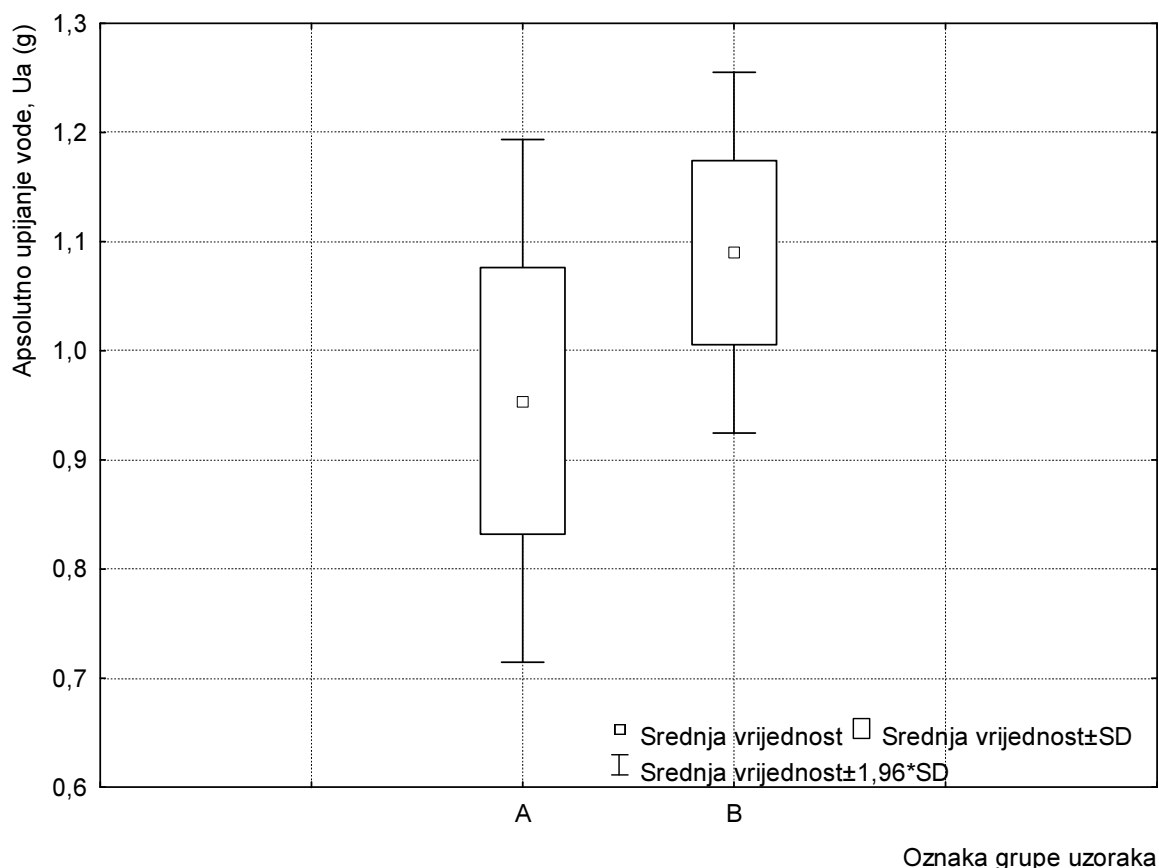
Istraživanje je pokazalo (tabl. 4 i sl. 15) da su uzorci grupe B osjetljiviji na djelovanje vode više nego uzorci grupe A. Točnije, uzorci grupe B nabubрили su više od uzoraka grupe A, pri čemu ta razlika iznosi 6,79 %. Ovakvu tendenciju promjene vrijednosti moguće je povezati s ranije opisanom razlikom hidrofilnosti čestica punila, odnosno zbijenosti kompozita, te većoj ili manjoj količini čistog polimera koji je taljenjem u preši djelomično ušao u strukturu furnira i popunio sve šupljine u strukturi kompozita. Točnije, većoj ili manjoj kompaktnosti kako kompozita, tako i sloja između kompozitne smjese i lista furnira, te samoga furnira koji je neminovno ugušćen djelovanjem povišenog tlaka pri prešanju.



## 5.5. Apsolutno upijanje vode

Tablica 3. Vrijednosti apsolutnog upijanja vode ispitnih uzoraka drvno-plastičnog kompozita

Oznaka grupe uzoraka	Broj uzoraka (n)	Aritmetička sredina (g)	Minimum (g)	Maksimum (g)	Standardna devijacija
A	10	0,95	0,78	1,15	0,12
B	10	1,09	0,98	1,27	0,08



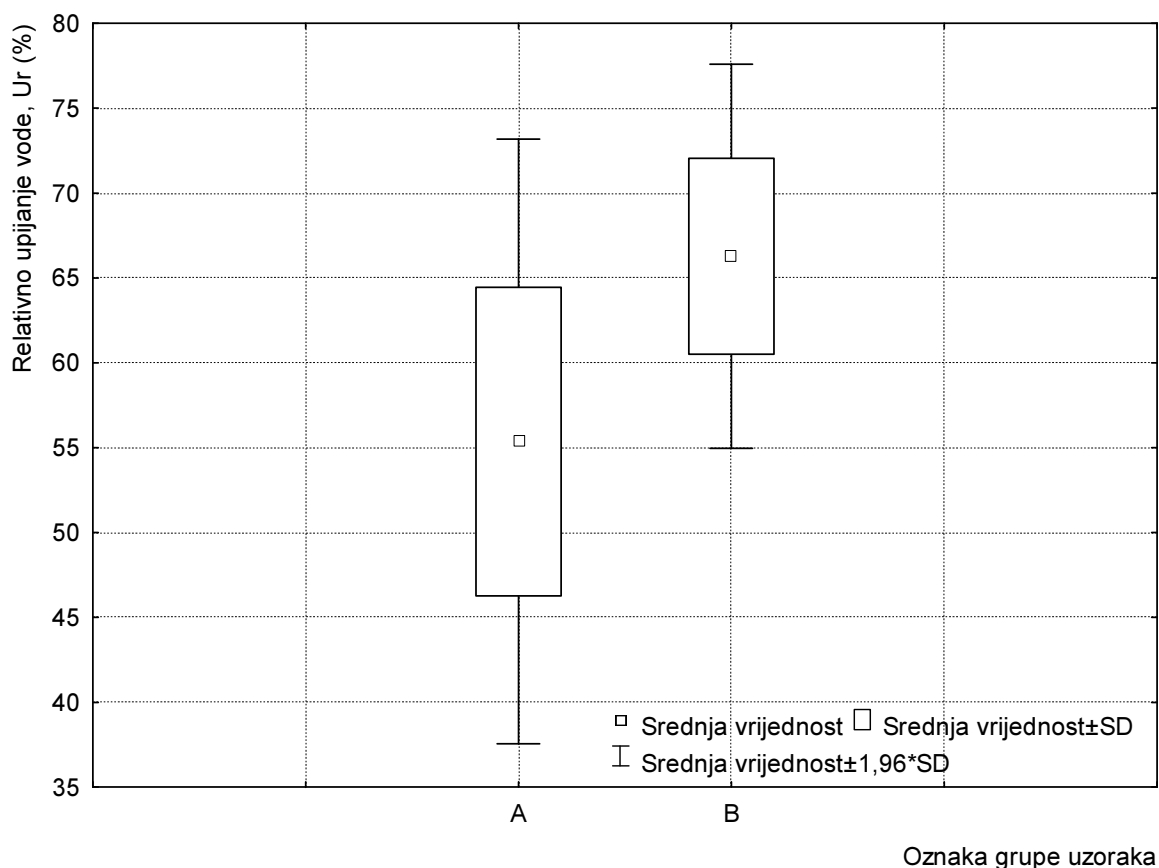
Slika 16. Grafički prikaz apsolutnog upijanja vode pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih drvno-plastičnih kompozita

Ispitivanje je pokazalo (tabl. 5 i sl. 16) da su vrijednosti apsolutnog upijanja vode neznatno veće u slučaju kompozita izrađenog primjenom kore bagrema kao punila. Razliku od 0,14 % pritom je moguće povezati s većom hidrofilnosti čestica kore bagrema. Usporedbom grafičkih prikaza vrijednosti apsolutnog upijanja (sl. 16) i debljinskog bubrenja (sl. 15), moguće je primjetiti velike podudarnosti tendencije promjena vrijednosti o dva ispitana slučaja; što je i očekivano. I u ovom slučaju upitan je efekt furnira i prodiranja rastopljenog punila u njegovu strukturu prilikom prešanja, te će se stoga taj efekt svakako trebati istražiti u budućnosti.

## 5.6. Relativno upijanje vode

Tablica 4. Vrijednosti relativnog upijanja vode ispitnih uzoraka drvno-plastičnog kompozita

Oznaka grupe uzoraka	Broj uzoraka (n)	Aritmetička sredina (%)	Minimum (%)	Maksimum (%)	Standardna devijacija
A	10	55,36	41,71	68,45	9,08
B	10	66,28	59,76	77,91	5,77



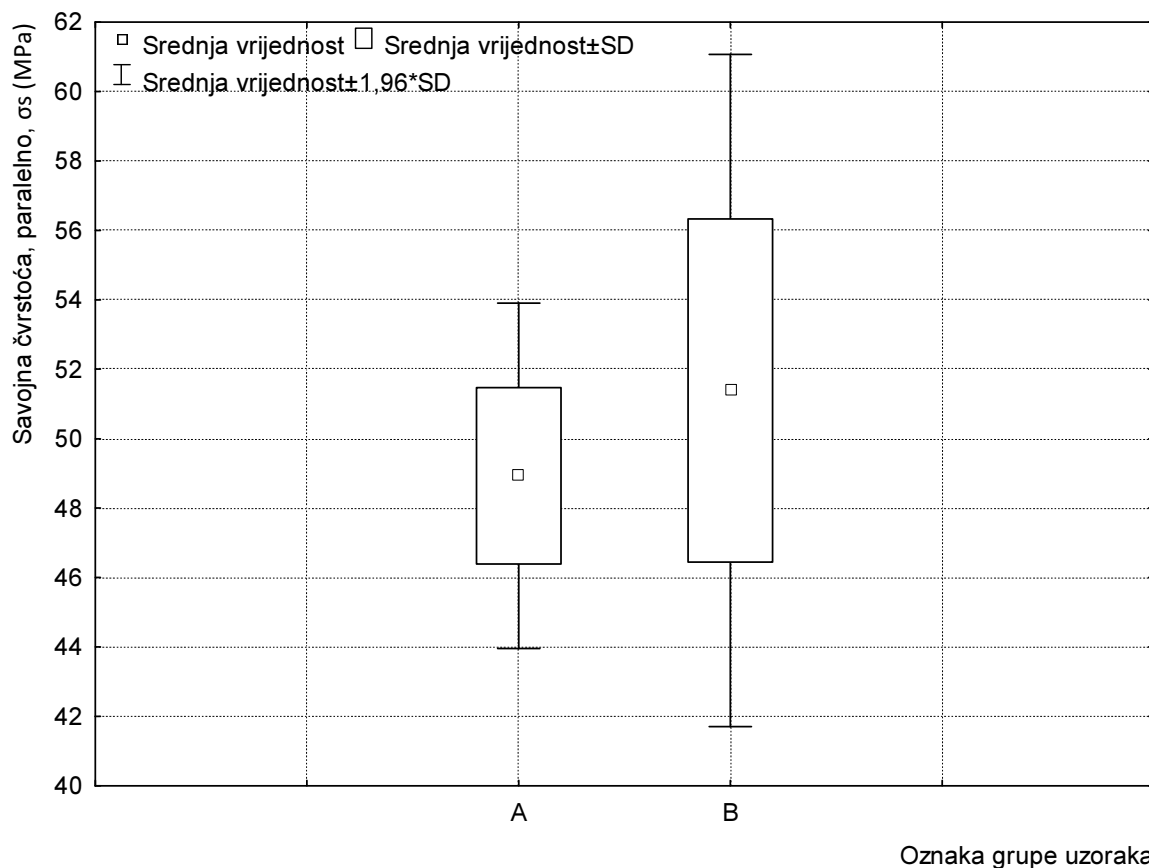
Slika 17. Grafički prikaz relativnog upijanja vode pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih drvno-plastičnih kompozita

Kako pokazuju rezultati (sl. 16 i sl. 17, te tabl. 5 i tabl. 6), vrijednosti relativnog i apsolutnog upijanja vode su u istom omjeru, odnosno, i u ovom slučaju upijanje je veće kod grupe uzoraka B, odnosno kompozita izrađenog iz kore bagrema. Vrlo visoke vrijednosti relativnog upijanja vode, pritom ukazuju na potencijalne šupljine u strukturi izrađenih materijala u kojima se zadržava voda, ta na slabo prodiranje rastaljenog polimera u strukturu furnira na vanjskim slojevima. Ujedno, ovakvi rezultati ukazuju na problem kore kao hidrofilnog punila za drvno-plastične kompozite. Ovaj bi se problem najvjerojatnije riješio alternativnim metodama izrade kompozita poput injekcijskog prešanja ili ekstruzije.

## 5.7. Savojna čvrstoća, paralelno

Tablica 5. Vrijednosti savojne čvrstoće ispitnih uzoraka drvno-plastičnog kompozita (paralelno sa smjerom vlaknaca furnira)

Oznaka grupe uzoraka	Broj uzoraka (n)	Aritmetička sredina (MPa)	Minimum (MPa)	Maksimum (MPa)	Standardna devijacija
A	6	48,93	45,03	52,79	2,53
B	6	51,38	44,19	57,70	4,93



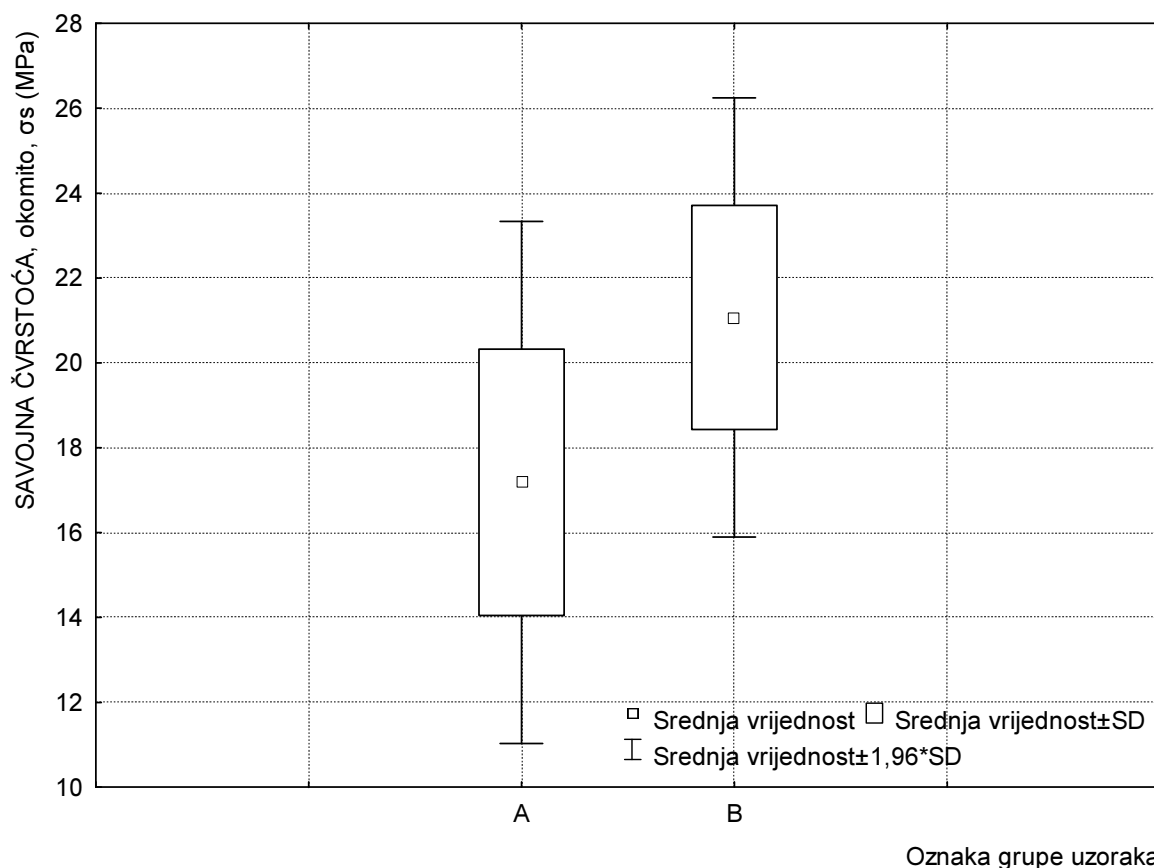
Slika 18. Grafički prikaz savojne čvrstoće pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih drvno-plastičnih kompozita (paralelno sa smjerom vlaknaca furnira)

Savojna čvrstoća koja je izmjerena paralelo sa smjerom vlaknaca prirodnog furnira na vanjskim ploham (tabl. 7 i sl. 18) drvno-plastičnog kompozita veća je kod uzoraka grupe B, nego kod uzoraka grupe A. Točnije, veća je za točno 2,45 MPa, što je relativno velika razlika. Vjerojatno je to posljedica individualne strukture listova furnira, više nego li je to rezultat malih razlika u strukturi polimerom oplahnutih čestica kore u središnjem sloju kompozita. Ipak, rezultati ukazuju i na nešto bolji efekt povezivanja vlaknaste strukture kore u slučaju bagrema s polimernom osnovom, što na kraju rezultira višim vrijednostima savojne čvrstoće u ovom smjeru.

## 5.8. Savojna čvrstoća, okomito

Tablica 6. Vrijednosti savojne čvrstoće ispitnih uzoraka drvno-plastičnog kompozita (okomito na smjer vlaknaca furnira)

Oznaka grupe uzoraka	Broj uzoraka (n)	Aritmetička sredina (MPa)	Minimum (MPa)	Maksimum (MPa)	Standardna devijacija
A	6	17,18	13,97	21,22	3,13
B	6	21,07	18,50	25,91	2,63



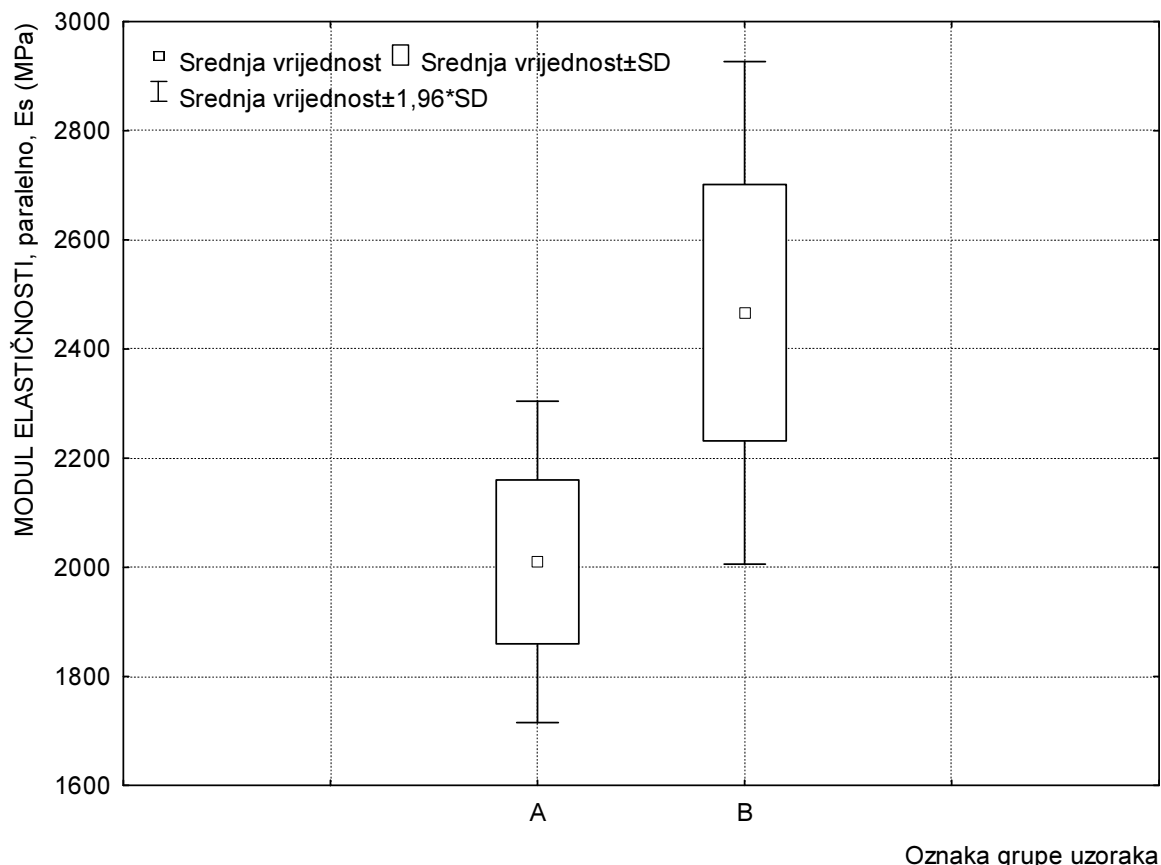
Slika 19. Grafički prikaz savojne čvrstoće pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih drvno-plastičnih kompozita (okomito na smjer vlaknaca furnira)

I u slučaju uzoraka ispitanih u smjeru okomito na smjer vlaknaca furnira (tabl. 8 i sl. 19) srednja vrijednost savojne čvrstoće veća je kod grupe uzoraka B koja je izrađena primjenom kore bagrema. U ovom je slučaju navedena razlika 3,89 MPa. Gledajući zbirne rezultate ispitivanja savojne čvrstoće (u oba smjera) može se zaključiti kako su navedene vrijednosti prilično visoke, što se prije svega može pripisati utjecaju materijala za oplemenjivanja, odnosno korištenim listovima furnira. Zanimljivo bi bilo probati napraviti kompozite po istom principu i primjenom istih tipova punila, ali uz primjenu furnira druge vrste drva.

## 5.9. Modul elastičnosti savojne čvrstoće, paralelno

Tablica 7. Vrijednosti modula elastičnosti savojne čvrstoće ispitnih uzoraka drvo-plastičnog kompozita (paralelno sa smjerom vlaknaca furnira)

Oznaka grupe uzoraka	Broj uzoraka (n)	Aritmetička sredina (MPa)	Minimum (MPa)	Maksimum (MPa)	Standardna devijacija
A	6	2009,9	1850,0	2220,5	150,1
B	6	2466,4	2195,8	2814,6	235,0



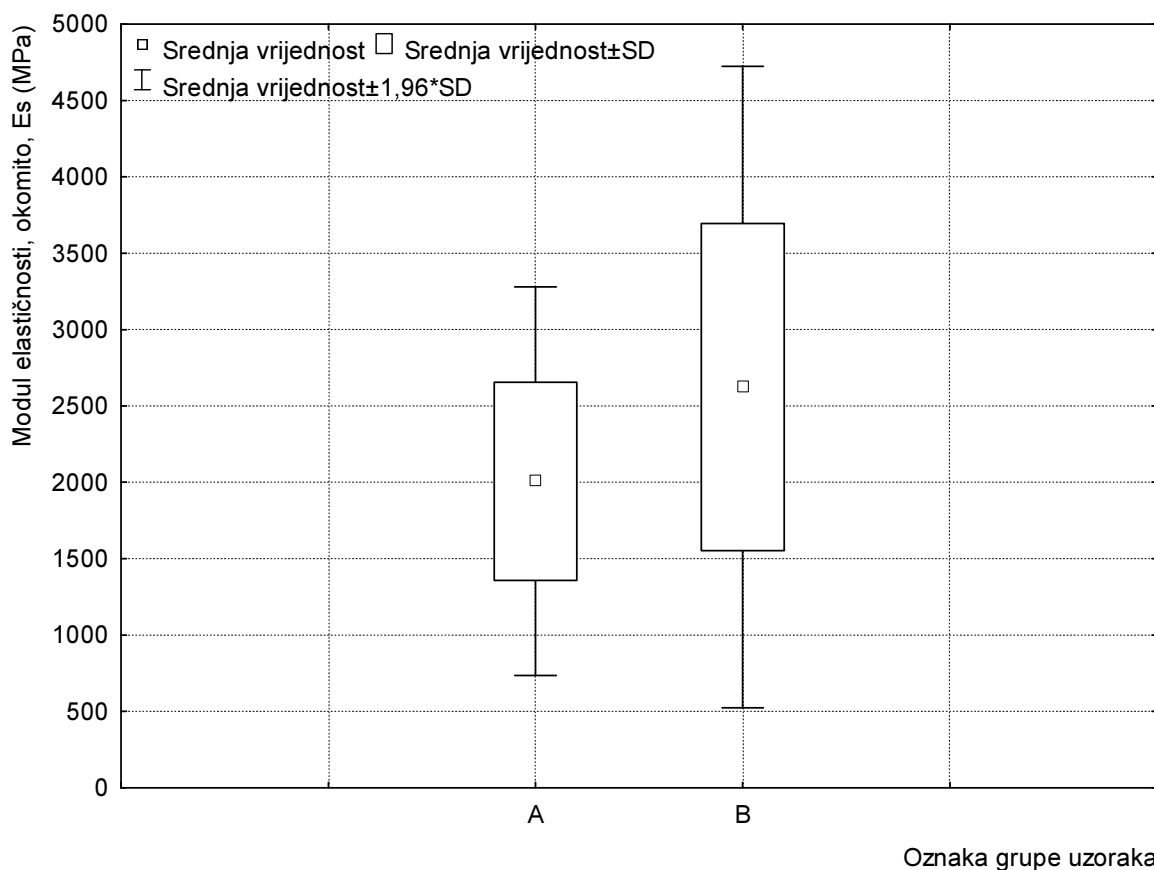
Slika 20. Grafički prikaz modula elastičnosti savojne čvrstoće pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih drvo-plastičnih kompozita (paralelno sa smjerom vlaknaca furnira)

Rezultati prikazani u tablici 9. i na slici 20. jasno pokazuju razliku vrijednosti modula elastičnosti (ispitano paralelno sa smjerom vlaknaca furnira) između grupa uzoraka A i B. Pritom su dosta više vrijednosti zabilježene u slučaju uzoraka grupe B, odnosno grupe izrađene iz kore bagrema. Time se dodatno naglašava važnost morfologije čestica punila, gdje ono u vlaknastoj formi tvori jezgru kompozita više čvrstoće i rezultirajućeg modula elastičnosti.

## 5.10. Modul elastičnosti savojne čvrstoće, okomito

Tablica 8. Vrijednosti modula elastičnosti savojne čvrstoće ispitnih uzoraka drvno-plastičnog kompozita (okomito na smjer vlaknaca fumira)

Oznaka grupe uzoraka	Broj uzoraka (n)	Aritmetička sredina (MPa)	Minimum (MPa)	Maksimum (MPa)	Standardna devijacija
A	6	2006,7	1140,1	2847,2	649,3
B	6	2623,7	1766,2	4707,9	1071,7



Slika 21. Grafički prikaz modula elastičnosti savojne čvrstoće pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih drvno-plastičnih kompozita (okomito na smjer vlaknaca fumira)

I u ovom slučaju (tabl. 10 i sl. 21), kao i kod savojne čvrstoće, modul elastičnosti okomito na vlaknaca i modul elastičnosti paralelno s vlakancima imaju isti omjer, odnosno, i u ovom slučaju modul elastičnosti veći je kod grupe uzoraka B koji je izrađen primjenom punila na bazi kore bagrema. Pritom je zanimljiva činjenica da su dobivene vrijednosti u oba slučaja (ispitivanje okomito/paralelno), vrlo slične, što ukazuje na to da je efekt materijala za oplemenjivanje zapravo dosta ograničen. No, za potvrdu potonje navedene tvrdnje, potrebno je provesti dodatna ispitivanja, prema metodologiji objašnjenom nešto ranije u poglavlju Rezultati.

## 6. ZAKLJUČAK

Na osnovi ranije prikazanih rezultata provedenog istraživanja mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- drvno punilo za drvno-plastične kompozite, uspješno se može zamijeniti usitnjenom korom,
- zbirno gledajući, postoji velika razlika između svojstava kompozita, ovisno o vrsti (izvoru) kore iz koje su napravljeni,
- smjerovi drvnih vlaknaca na furniru koji služi za oplemenjivanje kompozita značajno utječu na vrijednosti mehaničkih svojstava,
- iznosi fizikalno-mehaničkih svojstava pokazuju da bi i uporabna svojstva kompozita mogla (i trebala) biti na visokoj razini,
- uz dodatan laboratorijski rad kora bi se najvjerojatnije još uspješnije mogla koristiti u svrhu opisanu u ovom radu, posebice kada bi se pri pripremi iste izvršila dodatna selekcija (odvajanje primarnog i sekundarnog dijela).

## LITERATURA

1. Bekhta, P.; Lyutyy P.; Ortynska G., 2016: Effects of Different Kinds of Coating Materials on Properties of Flat Pressed WPC Panels. *Drvna industrija* 67(2): 113-118.
2. Klyosov, A. A., 2007: *Wood-Plastic Composites*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
3. Lyutyy P.; Bekhta, P.; Sedliacik, J.; Ortynska G., 2014: Properties of Flat-pressed Wood-polymer Composites made using Secondary Polyethylene. *ACTA FACULTATIS XYLOLOGIAE ZVOLEN*, 56(1): 39–50.
4. Rahman. K.S. ; Islam; Md N.; Rahman, Md M.; Hannan, Md O.; Dungani, R.; Khalil HPS A., 2013: Flat-pressed Wood Plastic Composites from Sawdust and Recycled Polyethylene terephthalate (PET): Physical and Mechanical properties. *SpringerPlus*, 2: 629.