

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE**  
**DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK**  
**PREDDIPLOMSKI STUDIJ**  
**DRVNA TEHNOLOGIJA**

**LUKA LUČIĆ**

**UTJECAJ OBRADJE POVRŠINE NA KVALITETU  
LIJEPLJENJA HRASTOVINE**

**ZAVRŠNI RAD**

**ZAGREB, 2021.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE**  
**DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK**

**UTJECAJ OBRADJE POVRŠINE NA KVALITETU**  
**LIJEPLJENJA HRASTOVINE**

**ZAVRŠNI RAD**

Prediplomski studij:	Drvena tehnologija
Predmet:	Ljepila i lijepljenje drva
Mentor	Izv.prof.dr.sc. Vjekoslav Živković
Student:	Luka Lučić
JMBAG:	0068233951
Datum odobrenja teme:	30.03.2021.
Datum predaje rada:	13.09.2021.
Datum obrane rada:	24.09.2021.

**Zagreb, rujan, 2021.**

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Naslov:	Utjecaj obrade površine na kvalitetu lijepljenja hrastovine
Autor:	Luka Lučić
Adresa autora:	Radaslije bb. Glamoč 80230 BiH
Mjesto izradbe:	Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu
Vrsta objave:	Završni rad
Mentor:	izv.prof.dr.sc. Vjekoslav Živković
Izradu rada pomogao:	Andrija Novosel, mag. ing. techn. lign.
Godina objave:	2021
Obujam:	22 str., 17 slika, 1 tablica i 7 navoda literature
Ključne riječi:	Hrastovina, priprema površine, lameliranje, vlakna, aluminij
Sažetak:	<p>U ovome radu provedeno je istraživanje utjecaja obrade površine na kvalitetu lijepljena hrastovine iskazano kao smična čvrstoća. Za ispitivanje je korišteno pet vrsta lijepila (tri poliuretanska, polivinil-acetatno te epoksidno), tri načina obrade sljubnice (brušenje, čeono glodanje, obodno blnjanje) te tri vrste nedravnih umetaka (karbonska vlakna, staklena vlakna i aluminij).</p> <p>Ispitivanje je provedeno prema ISO 6238 normi, na uzorcima dimenzija 25 x 25 x 20 mm. Uzorci su nakon lijepljenja izrezani te kondicionirani, a zatim podvrgnuti konstantnom opterećenju do loma.</p> <p>Dobiveni rezultati su potvrdili da je brušenje najbolji način pripreme površne za lijepljenje, te da umetanje vlakana u sljubnicu ne utječe negativno na čvrstoću lijepljenog spoja kod lameliranja hrastovine.</p>

	<b>IZJAVA</b> <b>O IZVORNOSTI RADA</b>	<b>OB ŠF 05 07</b>
		Revizija: 1
		Datum: 28.6.2017.

„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“.

U Zagrebu, 24. rujna 2021.

---

*vlastoručni potpis*

*Luka Lučić*

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. CILJ ISTRAŽIVANJA</b> .....	<b>3</b>
<b>3. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA</b> .....	<b>3</b>
3.1. Drvo .....	3
<b>3.2. Ljepilo</b> .....	<b>3</b>
3.2.1. <i>Polivinilacetatno ljepilo (PVAc)</i> .....	3
3.2.2. <i>Poliuretansko ljepilo (PUR)</i> .....	3
3.2.3. <i>Epoksidna ljepilo</i> .....	4
3.3. Nedrvni umetci .....	4
3.3.1 <i>Aluminij</i> .....	4
3.3.2. <i>Karbonska vlakna</i> .....	5
3.3.3. <i>Staklena vlakna</i> .....	6
3.4. Priprema uzoraka.....	6
3.4.1. <i>Priprema sljubnice</i> .....	6
3.4.2. <i>Lijepljenje</i> .....	7
3.4.3. <i>Kondicioniranje uzoraka</i> .....	8
3.5. Ispitivanje.....	9
<b>4. REZULTATI</b> .....	<b>13</b>
4.1. Rezultati uzoraka s obzirom na način obrade površine sljubnice.....	13
4.1.1. <i>Brušeni uzorci</i> .....	13
4.1.2. <i>Čeono glodani uzorci</i> .....	14
4.1.3. <i>Obodno glodani uzorci</i> .....	15
4.2. Rezultati uzoraka s obzirom na vrstu dodatnog materijala.....	16
4.2.1. <i>Karbonska vlakna</i> .....	16
4.2.1. <i>Staklena vlakna</i> .....	17
4.2.3. <i>Aluminij</i> .....	18
4.3. Rezultati uzoraka s obzirom na pomak uslijed maksimalnog naprezanja.....	19
4.3.1. <i>Rezultati uzoraka s obzirom na način obrade površine sljubnice</i> .....	19
4.3.2. <i>Rezultati uzoraka s obzirom na vrstu ukrute</i> .....	20
<b>ZAKLJUČAK</b> .....	<b>21</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>22</b>

# 1. UVOD

Lijepljenje drva ima važnu ulogu u učinkovitom iskorištavanju sve manje dostupnih drvnih resursa. Drvo se smatra prirodnim i ekološkim materijalom velike estetske vrijednosti kojeg susrećemo svakodnevno. Dobra mehanička svojstva uz malu volumnu masu su jedan od razloga zašto je drvo i dalje konkurentan materijal u današnjem graditeljstvu. Obrada drva je jednostavna te ne zahtjeva veliki utrošak energije. No uz sve prednosti postoje i neki nedostaci kod drva, jedan od njih je podložnost prirodnoj razgradnji koju je moguće riješiti uz pomoć adekvatne zaštite. Problem stvaraju i dimenzijska ograničenost sirovine, prisustvo prirodnih grešaka građe drva, utjecaj insekata i gljiva, i dr. Lijepljenje drva je način kojim se ti nedostaci mogu umanjiti, i samim time povećati iskorištenje vrijedne sirovine. Danas se gotovo u svakoj proizvodnji drvenih proizvoda u nekoj fazi koristi lijepljenje, bila to proizvodnja ploča, namještaja ili nosivih konstrukcija. Razlog tomu je ubrzani razvoj novih sustava ljepljenja koja omogućuju pretvaranje sirovine gotovo svih razina kvalitete i dimenzija u funkcionalne proizvode. Lijepljenje omogućuje da se drvo koristi u gradnji gdje ranije nije bilo smatrao prikladnim građevinskim materijalom, što uvelike utječe na povećanje energetske i ekonomske učinkovitosti.

Lijepljenje drva uvelike se razlikuje od lijepljenja drugih materijala. Kompleksnost građe drva glavni je uzrok velike raznolikosti, jer je složenost takvih sustava dodatno povećana nizom činitelja. Svi su oni međusobno povezani i ako ih zamislimo kao karike, tvore svojevrsan lanac čvrstoće spoja, a lom će nastati na najslabijoj karici. Bitno je poznavati sva svojstva, i uvidjeti kako ista mogu utjecati na krajnji proizvod. To nas navodi na zaključak da je u procesu lijepljenja važan svaki detalj (Blomquist, 1963).

Prema Knorzu i suradnicima (2015.) prikladna priprema površine drva se smatra presudnom u postizanju uspješnog lijepljenja drva. Mehanička priprema površine standardna je međunarodna praksa u drvenoj industriji kojom se postiže zadovoljavajuća adhezija ljepljenja i drva. Mehaničkom pripremom sljubnice povećava kvašenje površine drva, pojačava prodiranje ljepljenja i poboljšava adheziju drva tako što aktivira površinu drva uklanjanjem ekstrakata i onečišćenja (npr. prašine i prljavštine), te stvara mikropukotine čime izlaže lumene drvnih stanica.

Mehanički se površina za lijepljenje često priprema blanjanjem, ostavljajući trag na staničju, što ima velik utjecaj na svojstva tog staničja pa tako i na čvrstoću spoja. Neodgovarajućom se oštricom pri brušenju radi veći pritisak na stanice tako da se umjesto rezanja događa gnječenje i uklanjanje deformiranih stanica koje su izgubile svoju prirodnu čvrstoću i vezu s okolnim staničjem. Međutim, slijepljeni spojevi drva ne pokazuju razliku u čvrstoći na takvoj i na glatkoj površini koja je obrađena pravilnom reznom oštricom blanjalice. No utjecaj deformiranih stanica je vidljiv nakon ciklusa vlaženja, pri čemu stanice nabubre više od nedeformiranih i prouzroče unutrašnje naprezanje, koje se u konačnici odrazi na čvrstoću spoja (Jokerst i Stewart, 1976).

Leggate i suradnici (2020) su u svome istraživanju provedenom na drvu Eukaliptus tetradonta ili Darwinov živac (*Eucalyptus tetradonta*) koje je jedna je od najvažnijih komercijalnih šumskih resursa Sjeverne Australije utvrdili da čeonoglodanje daje bolje rezultate u kvašenju površine te permeabilnosti u odnosu na konvencionalno obodno blanjanje. Gledajući te faktore čeonoglodanje se pokazalo kao najbolji način mehaničke pripreme površine drva prije lijepljenja. Rezultati su pokazali da je za očekivati da će odabir metode površinske obrade prije lijepljenja utjecati na rezultate lijepljenja, obrada glodanjem i brušenjem osiguravaju bolju kvalitetu spoja drva u odnosu na blanjanje.

## 2. CILJ ISTRAŽIVANJA

Hrastovina se smatra izazovnom vrstom drva za lijepljenje, najviše zbog svoje prstenasto porozne strukture te ostalih karakteristika. Upravo je to razlog zašto treba obratiti dodatnu pažnju na odgovarajuću pripremu površine pri lijepljenju ove vrste drva. Cilj ovog rada je ustanoviti koji od slijedećih metoda obrade sljubnice je najpogodniji: brušenje, blanjanje, čeono blanjanje. Pored toga cilj je pokazati kojom se kombinacijom ljepila, pripreme površine te ojačanja dobiva najveća čvrstoća lijepljenog spoja nakon izlaganja različitim uvjetima vlažnosti zraka (simulacija stvarnih uvjeta pri uporabi proizvoda).

## 3. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA

### 3.1. Drvo

Drvo korišteno u ovome istraživanju je hrastovina (*Quercus Robur*, L), za pripremu uzoraka korištene su lamele dimenzija 300 x 58 x 10 mm, od kojih bi se nakon lijepljenja i izrezivanja dobile probe dimenzija 35 x 25 x 20 mm, kakve su propisane po normi ISO 6238 koja se odnosi na utvrđivanje čvrstoće lijepljenog spoja. Uzorci su osušeni na 9% sadržaja vode. Za potrebe istraživanja odabrani su uzorci visoke kvalitete, ravne žice, bez kvrga, truleži, pukotina i ostalih vidljivi grešaka. Takvim izborom smanjuje se mogućnost utjecaja prirodnih grešaka drva na krajnje rezultate čvrstoće lijepljenog spoja. Gustoća uzoraka je izosila 670-770 kg/m<sup>3</sup> što je u skladu sa prosječnim vrijednostima za odabranu vrstu drva.

### 3.2. Ljepilo

#### 3.2.1. Polivinilacetatno ljepilo (PVAc)

Polimerizacijska PVAc ljepila za drvo sastoje od polivinil-acetata i aditiva koji modificiraju ljepilo za određenu upotrebu. Osnovno je vezivo PVAc ljepila vodena disperzija polivinilacetata, koji se stvara pri polimerizaciji vinilacetata. Vinilacetat se može polimerizirati uz pomoć polimerizacije u masi, polimerizacijom otopine i emulzijskom polimerizacijom. U proizvodnji ljepila za drvo najčešće se upotrebljava emulzija sa sadržajem suhe tvari od 40 do 60 % (Šernek i Kutnar, 2008).

U našem slučaju korišteno je Klebit 0314.0, jednokomponentno ljepilo D4 industrijsko ljepilo za vodootporno lijepljenje prema normi DIN/EN 204. Koristi se za proizvode sa potrebom za visoku postojanost na toplinu.

#### 3.2.2. Poliuretansko ljepilo (PUR)

Poliuretanska (PUR) ljepila nastaju poliadicijom izocianatnih polimera i poliola (alkohola s više OH skupina). Poznata su jednokomponentna, dvokomponentna, termo stabilna te taljiva ljepila. U drvnoj se industriji najčešće upotrebljavaju



jednokomponentna PUR ljepljiva, i to za zahtjevniju montažnu ljepljivu, ljepljivu konstrukcijskih kompozita kao što su npr. nosači. Služe i za spajanje međusobno različitih materijala kao što su metali, guma i keramika. Pri primjeni jednokomponentnih ljepljiva preporučuje se da sadržaj vode u drvu bude veći od 8 % (Resnik, 1997).

Za ljepljivu proba korištena su dvije vrste jednokomponentnog PUR ljepljiva istog proizvođača te jedna vrsta dvokomponentnog PUR ljepljiva :

- 1K Keiberit 501 - za čvrste spojeve, otporno na visoke temperature te vlagu, po DIN EN 204 kvalifikaciji spada u razred D4. Stvrdnjavanje se događa uslijed povezivanja sa vlagom iz zraka ili podloge.
- 1K Kleberit 500 – ojačano staklenim vlaknima
- 2K Henkel LOCTITE CR 421 – sastoji se od dvije komponente koje je potrebno pomiješati uz pomoć statičke miješalice prije nanošenja. U volumnom omjeru A:B=2:1, nanosi se pomoću aplikatora. Omogućuje ljepljivu širokog spektra materijala, a posebno je prikladan za ljepljivu poroznih ili upijajućih materijala kao što su drvo, papir te koža. Koristi se u izradi drvenih nosača i konstrukcija.

### 3.2.3. Epoksidna ljepljiva

Epoksidne smole su kemijski inertni polimeri s najmanje dvije epoksidne skupine koji se povezivanjem lančastih molekula mogu prevesti u visokomolekulske polimerne materijale. Proizvode se polikondenzacijom dihidroksifenilpropana (bifenol A) i epiklorhidrina u dva stupnja. Epoksidna ljepljiva imaju dobru adheziju sa drugima materijalima (metal, plastik, beton), otporna su na kemikalije te vanjske utjecaje. Najčešće su to dvokomponentni sustavi u kojima se za sredstvo za otvrdnjavanje koriste amini (Singla i Chawla, 2010.)

U drvnoj industriji se iznimno koriste za specijalne namjene, kao što je vezanje drva sa drugim materijalima. U ovome istraživanju dio proba je slijepjeno sa dvokomponentnim epoksidnim ljepljivom EC 152 proizvođača Elantas. Isto se koristi za kompozitne dijelove visokih performansi male i srednje veličine, te pri izradi strukturnih dijelova za čamce, modela zrakoplova, trkaća vozila i sportskih komponenti. Kao otvrdivač u sustavu se koristi W 152 HR koji se mješa sa smolom u težinskom omjeru 100:30.

## 3.3. Nedrvni umetci

### 3.3.1 Aluminij

Aluminijska pločica dimenzija 25 x 25 x 4 mm je dodana kod dijela uzoraka u sljubnicu proba. Aluminij je meka, krta i žilava kovina male gustoće, te je jako rastezljiva. Iz tog razloga gotovo polovina proizvedenog metala prerađuje se dalje u

legure kako bi se poboljšali nedostaci, iste obično uključuju bakar, mangan, silicij, cink i magnezij. Zbog niske specifične gustoće (posebice u usporedbi sa željezom), prirodne otpornosti na koroziju, dobre vodljivosti i fizikalnih svojstava pogodnih ja za primjenu u gotovoj svakoj industriji. Gustoća aluminija je  $2,70 \text{ g/cm}^3$ , točka vrelišta  $660,3 \text{ }^\circ\text{C}$ , modul elastičnosti po Youngu za aluminij iznosi  $70 \text{ GPa}$ .

### **3.3.2. Karbonska vlakna**

Karbonska vlakna su vlakna koja sadrže najmanje 90% ugljika, vrlo su fina, većinom kružna presjeka, promjera 5 do  $10 \text{ }\mu\text{m}$  i svojstvene crne boje. Dobivaju se iz već oblikovanih drugih organskih vlakana, pretežito poliakrilonitrilnih vlakana velike čvrstoće, a u manjoj mjeri i od celuloznih viskozničkih vlakana, te iz smolastog ostatka nakon pirolize nafte (tzv. mezofazna smola). Općenito su za ugljična vlakna karakteristična sljedeća svojstva: velika čvrstoća ( $3000 \text{ do } 5000 \text{ N/mm}^2$ ) i velik modul elastičnosti (kod grafitnih vlakana  $200\,000 \text{ do } 450\,000 \text{ N/mm}^2$ ), velika krutost, razmjerno mala gustoća u odnosu na metalne niti ( $1,5 \text{ do } 2,2 \text{ g/cm}^3$ ), izvrsna otpornost na toplinu uz istodobnu stabilnost dimenzija (termički raspad u području  $3600 \text{ do } 4000 \text{ }^\circ\text{C}$ ), veoma slaba gorivost, kemijska inertnost, nekorozivnost, otpornost na kiseline, lužine i organska otapala, dobra toplinska i električna vodljivost. Područja primjene su neograničena, od zrakoplovne tehnologije pa sve do medicinskih implantata.

Kod jedne serije ispitanih uzoraka kao međusloj su umetnuta karbonska vlakna. Korištena se HinFab HCP200C vlakna čija masa iznosi 200gr po četvornom metru.

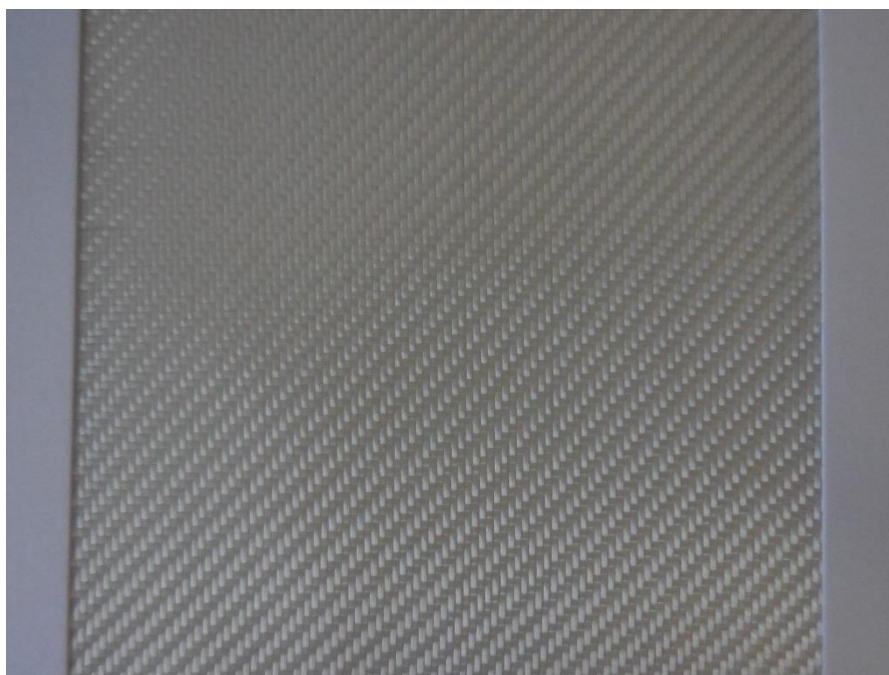


**Slika 1.** Karbonska vlakna

### 3.3.3. Staklena vlakna

Staklena vlakna su umjetna vlakna dobivena iz rastaljenoga stakla (taline) izvlačenjem niti i namatanjem na brzorotirajući valjak (filamentna vlakna) ili centrifugalnim postupkom uz puhanje stlačenim zrakom (kratka vlasasta vlakna). Rabi se staklo različitih vrsta i svojstava koja su posljedica kem. sastava, odnosno specifičnog udjela pojedinih oksida. Staklena vlakna općenito su čvrsta, negoriva, većinom otporna na kemikalije i dobrih izolacijskih svojstava, ali kruta i krta. Rabe se za ojačavanje kompozita, u tekstilnoj, građevnoj, te u industriji za toplinsku i elektroizolaciju.

Jedna od ispitanih serija uzoraka je sa umetnutim staklenih vlakana u područje sljubnice. Korištena su UTE 163 T vlakna čija masa iznosi 166 g po četvornom metru. Radi se o E staklu (za opću primjenu) čiji modul elastičnosti iznosi 81 GPa dok se vlačna čvrstoća kreće u rasponu od 3100-3800 MPa.



*Slika 2. Staklena vlakna*

## 3.4. Priprema uzoraka

### 3.4.1. Priprema sljubnice

Hrastove platice dimenzija 300 x 58 x 10 mm su dobivene piljenjem iz hrastovih gredica. Pri obradi sljubnice korištene su 3 metode, obodno blanjanje, čeonno glodanje i brušenje. Obodno blanjanje su platice koje će se kasnije ojačati sa tri vrste ukruta uz jednu referentnu neojačanu seriju (za svaku vrstu ljepila). Čeonim glodanjem je obrađena sljubnica referentnih proba svake vrste ljepila. Za glodanje je korišteno trokrako glodalo promjera 80 mm sa HS noževima za masivno drvo, kuta oštrice 38°,

uz pomak od 5 m/min te 2000 okretaja glodala po minuti. Ista serija platica je obrađena brušenjem, koje je izvedeno širokotračnom brusilicom koristeći brusni papir 80 a zatim i 120. Obrada sljubnica je izvršena maksimalno 3 sata prije lijepljenja.

### 3.4.2. Lijepljenje

Ljepilo je na platice nanošeno staklenim štapićem u količini 200 g/m<sup>2</sup>, u skladu s preporukom proizvođača. Na referentne uzorke 3,48 g ljepila (proračun vršen prema gustoći PVAC ljepila) se nanosilo samo na jednu stranu, dok se kod uzoraka sa umetcima koristila dvostruka količina ljepila koje nanosilo na obje strane. Na temelju debljine tkanja određeno je da se dodaje onoliko više ljepila da ispuni 50% volumena koje tkanje zauzima, za karbonska vlakna je korišteno 4,20 g po sljubnici dok se staklena vlakna po sljubnici koristilo 3,84 g. Za ravnomjerni nanos ljepila po površini korištena je nazubljena lopatica (Slika 3.) Odmah nakon nanošenja ljepila, proveli smo sklapanje elemenata i nedravnih umetaka. Isti postupak ponovljen je za preostale četiri probe, a zatim su sve stavljene u prešu. Preša je bila mehanička, s tlakom reguliranim težinom, upravljana polugom u omjeru 1:20. Ova metoda primjene tlaka omogućila je konstantno tlačno opterećenje proba, bez obzira na smanjenje debljine zbog prodiranja ljepila u drvo.



**Slika 3.** Nanos ljepila

Tlak prešanja je 1 N / mm<sup>2</sup>, što je nešto više od preporučenog od strane proizvođača, ali je iskustvo pokazalo da je prikladan za univerzalna PVAc ljepila. Komadi su bili pod opterećenjem 24 sata, što je mnogo duže od propisanih 2 do 3 sata u proizvodnji. Tako dugo trajanje tlačnog opterećenja odabrano je s ciljem uklanjanja

unutarnjeg naprezanja i eventualnih šupljina. Značajno je da ovoj vrsti ljepila trebaju 24 sata da završi reakcije.

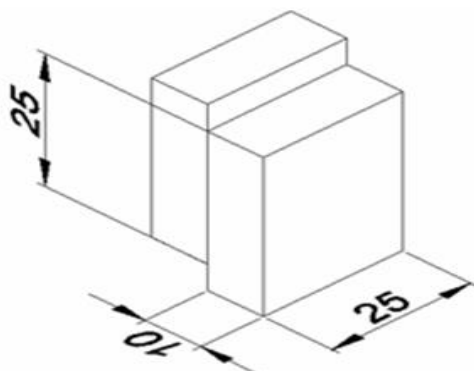


*Slika 4. Prešanje uzoraka*

### **3.4.3. Kondicioniranje uzoraka**

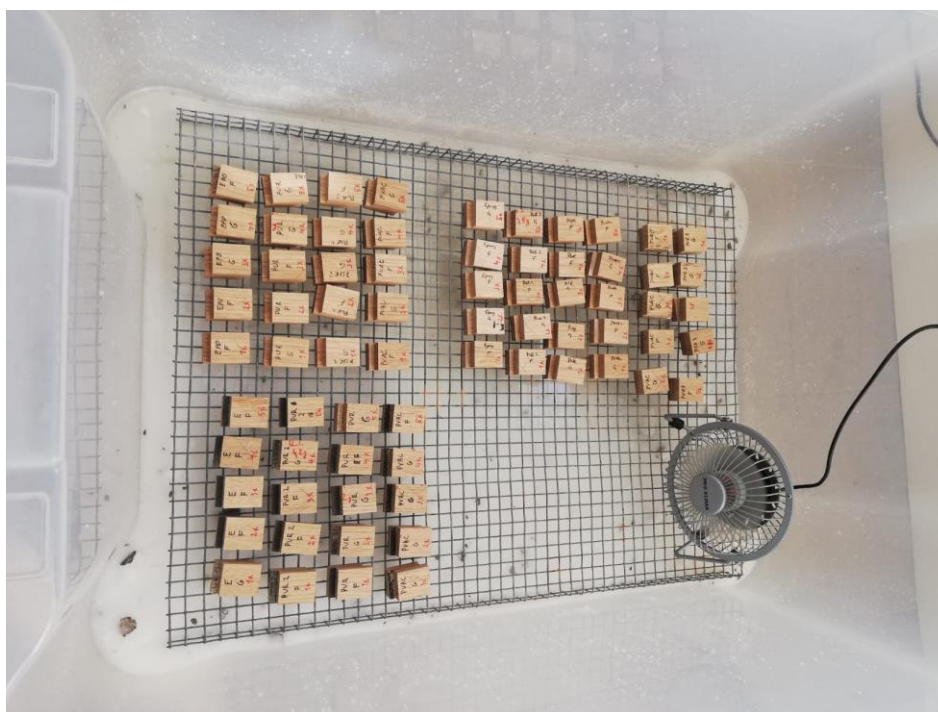
Svi zalijepljeni dijelovi kondicionirani su najmanje 7 dana na temperaturi od  $23 \pm 2$  ° C pri relativnoj vlazi zraka od  $50 \pm 5\%$ .

Nakon kondicioniranja slijedilo je izrezivanje proba, piljeno je po shemi, uz izdvajanje rubnih dijelova koji nisu mjerodavni za ispitivanje, iz uzoraka dimenzija 300 x 58 mm moguće je izrezati 8 proba. Na takvim ispiljenim uzorcima je zatim glodanjem na CNC stroju postignut konačni izgled uzorka prikazanog na slici 5. Tolerancija dimenzija po ISO standardu iznosi  $\pm 0,5$  mm. Na uzorcima je zatim označen tip obrade, vrsta lijepila te broj uzorka za tu skupinu.



### **Slika 5. Prikaz uzorka sa dimenzijama**

Ispitne probe svake kombinacije ljepila, obrade površine i umetka su zatim izlagane uvjetima relativne vlage zraka od 75% pri temperaturi 23°C do konstantne mase, a zatim uvjetima sadržaja vlage zraka od 30% i temperature 23°C do konstantne mase osušenih proba. Oba izlaganja su provedena 3 puta naizmjenično. Kontrola ostvarenih uvjeta u oba slučaja je obavljena mjerenjem mase uzoraka. Nakon svakog od izlaganja, osim mase mjerene su i dimenzije širine u području gornje i donje strane probe te području sljubnice (kod uzoraka sa umetkom od aluminiija mjerene su gornja i donja sljubnica). Razlog mjerenja širine je utvrđivanje utjecaja ljepila i umetka na promjenu dimenzija u području sljubnice u odnosu na ostatak probe uslijed bubrenja i utezanja.



**Slika 6. Uzorci izloženi zadanim uvjetima**

## **3.5. Ispitivanje**

Ispitivanje uzoraka je provedeno u Laboratoriju za drvo u graditeljstvu na Fakultetu šumarstva i drvne tehnologije. Za potrebe ispitivanja korištena je kidalica proizvođača Shimadzu kojom se upravlja pomoću popratnog softvera na računalu. Za praćenje deformacija na uzorcima korišten je Aramis 3D sustav sa dvije 12Mp optičke kamere, isti se koristi za analiziranje statičkih i dinamički opterećenih uzoraka. Sustav radi na principu višestrukog fotografiranja ispitivanog uzorka (u ovom slučaju 8fps) koje

se zatim obrađuju u Aramis Professional softveru, nakon obrade snimljenih podataka jasno se vide mjesta na kojima dolazi da najvećih naprezanja i deformacija tijekom ispitivanja. Za potrebe optičkog mjerenja potrebno je jednu stranu uzoraka obojati u bijelu boju a zatim poprskati crnom bojom da bi se dobio uzorak sa jakim kontrastom(Slika 7.).

Ljepilo	Način obrade	Oznaka	Umetak	Broj uzoraka
PUR 1	brušenje	BRU PUR 1		12
	obodno blanjanje	BLA PUR 1	bez umetka	9
	čeono glodanje	ČGLO PUR 1		4
		CFRP PUR 1	karbonska vlakna	4
	obodno blanjanje	GFRP PUR 1	staklena vlakna	5
		ALU PUR 1	aluminij	5
PUR 2	brušenje	BRU PUR 2		10
	obodno blanjanje	BLA PUR 2	bez umetka	9
	čeono glodanje	ČGLO PUR 2		5
		CFRP PUR 2	karbonska vlakna	5
	obodno blanjanje	GFRP PUR 2	staklena vlakna	5
		ALU PUR 2	aluminij	5
PUR 3	brušenje	BRU PUR 3		12
	obodno blanjanje	BLA PUR 3	bez umetka	10
	čeono glodanje	ČGLO PUR 3		5
		CFRP PUR 3	karbonska vlakna	5
	obodno blanjanje	GFRP PUR 3	staklena vlakna	5
		ALU PUR 3	aluminij	0
PVAC	brušenje	BRU PVAC		10
	obodno blanjanje	BLA PVAC	bez umetka	10
	čeono glodanje	ČGLO PVAC		5
		CFRP PVAC	karbonska vlakna	5
	obodno blanjanje	GFRP PVAC	staklena vlakna	5
		ALU PVAC	aluminij	5
EPO	brušenje	BRU EPO		12
	obodno blanjanje	BLA EPO	bez umetka	10
	čeono glodanje	ČGLO EPO		5
		CFRP EPO	karbonska vlakna	5
	obodno blanjanje	GFRP EPO	staklena vlakna	5
		ALU EPO	aluminij	5



**Slika 7.** Uzorci spremni za ispitivanje

Uzorci su ispitivani na smičnu čvrstoću. Uzorci su nakon umetanja u kidalicu konstantno opterećivani do nastanka loma. Pomak glave je iznosio 5 mm/s te do loma je dolazilo unutar 60 +/- 20 s što je u skladu sa normom ISO 3238. Podatci o maksimalnoj sili prije loma su zabilježeni u kN na najbližih 100 N. Softver je bilježio i dimenziju pomaka uslijed djelovanja silom na uzorak. Rezultati su zatim obrađeni u Microsoft Excelu te prikazani u idućem poglavlju.



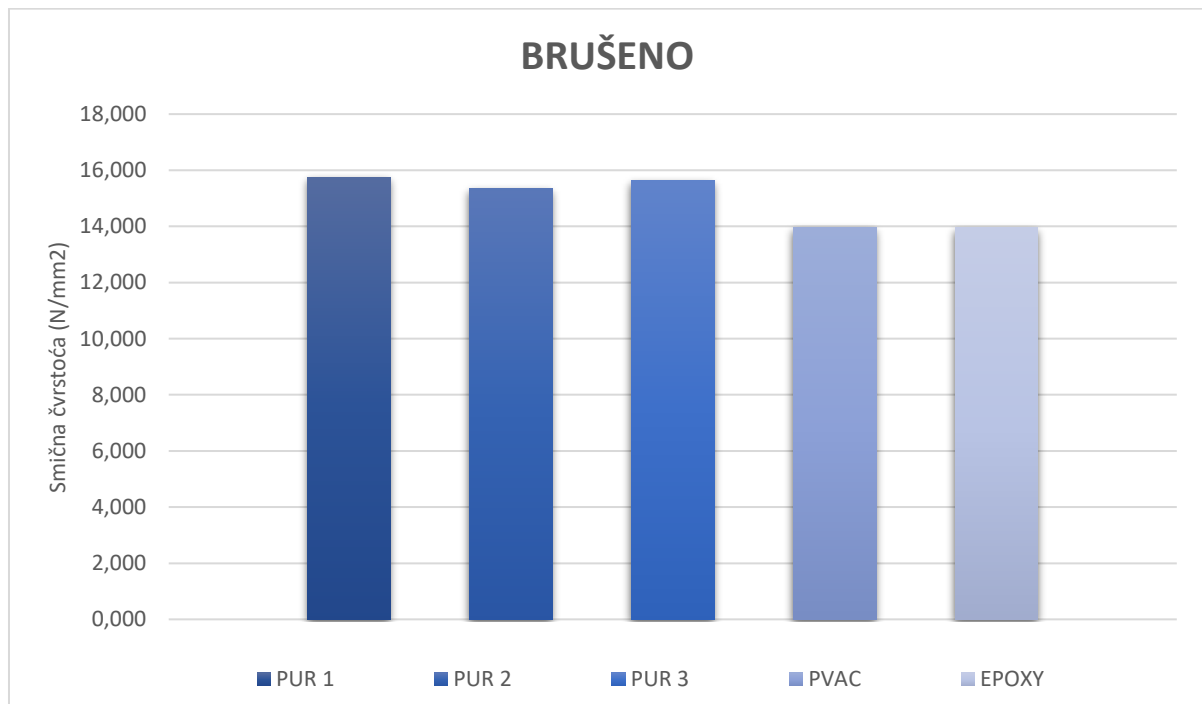


*Slika 8. Položaj uzorka pri ispitivanju*

## 4. REZULTATI

### 4.1. Rezultati uzoraka s obzirom na način obrade površine sljubnice

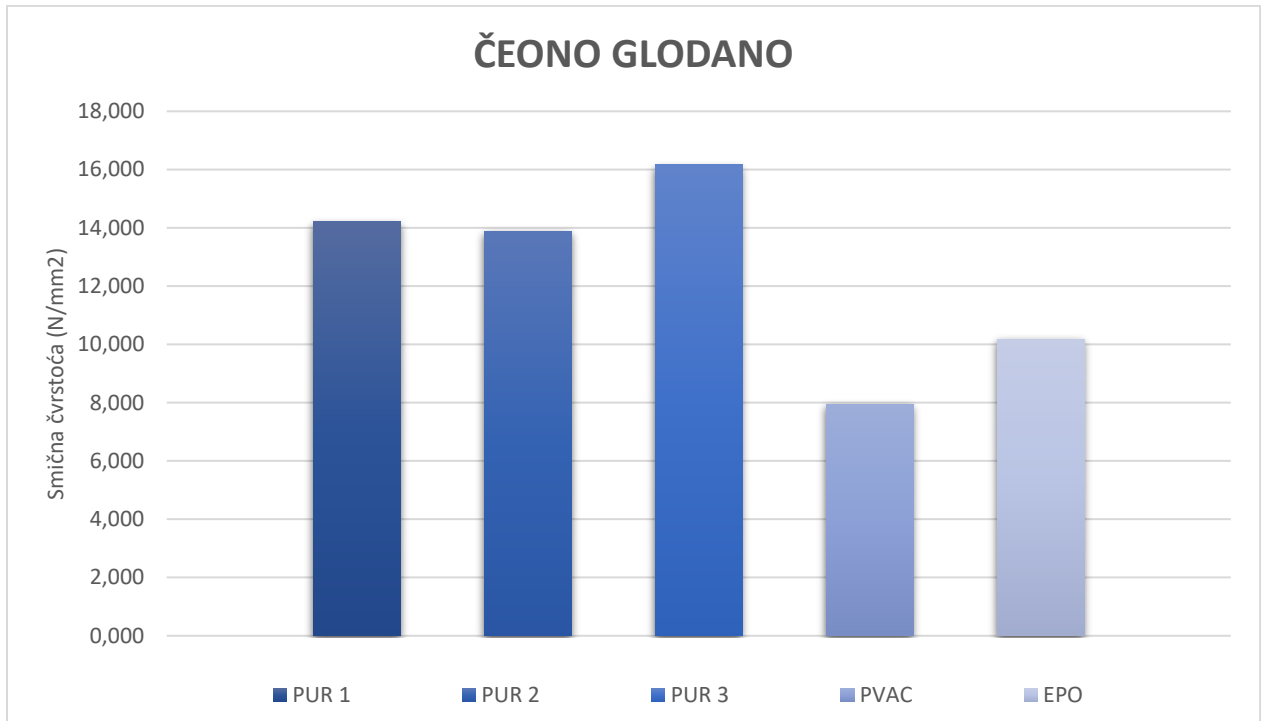
#### 4.1.1. Brušeni uzorci



**Slika 9.** Grafički prikaz prosječne smične čvrstoće (N/mm<sup>2</sup>) uzoraka obrađenih brušenjem

Na grafu su prikazani rezultati ispitivanja smične čvrstoće lameliranih uzoraka koji čija je sljubnica pripremljena za lijepljenje brušenjem. Uzorci su lijepljeni sa pet različitih vrsta ljepila, od kojih najbolje rezultate imaju poliuretanska ljepila. Smična čvrstoća za PUR 1 iznosi 15,73 što je ujedno najbolji rezultat, dok su EPO i PVAC najlošiji sa 13,95 N/mm<sup>2</sup> što je za 11,32% lošije od PUR 1. I uzorci lijepljeni sa ostala dva poliuretanska ljepila su ostvarili dobre rezultate, pa tako je smična čvrstoća PUR 3 manja za samo 0,68% u odnosu na PUR 1, a vrijednost PUR 2 je manja za 2,56%.

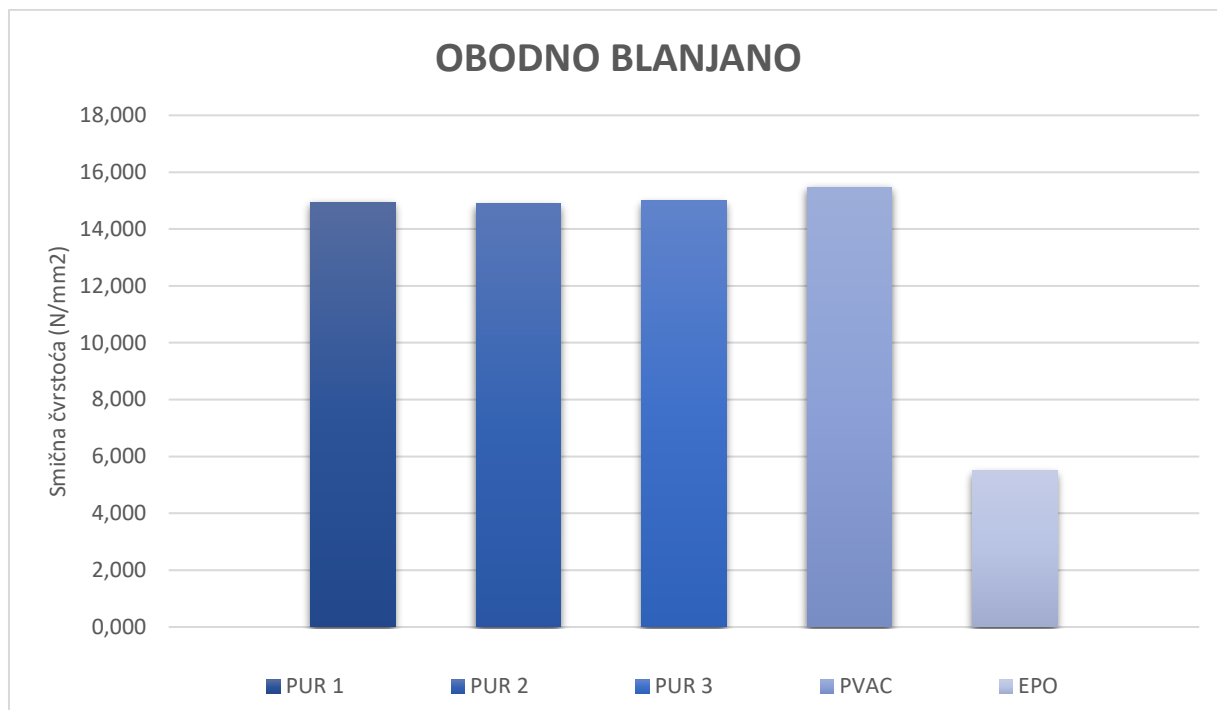
#### 4.1.2. Čeono glodani uzorci



**Slika 10.** Grafički prikaz prosječne smične čvrstoće (N/mm<sup>2</sup>) uzoraka obrađenih čeonim blanjanjem

Na grafu su prikazani rezultati ispitivanja smične čvrstoće lameliranih uzoraka koji čija je sljubnica pripremljena za lijepljenje čeonim glodanjem. Za lijepljenje uzoraka korišteno je 5 vrsta ljepila, sa grafa se jasno vidi da se najviše vrijednosti imaju poliuretne ljepila. Najlošije za ovaj način obrade se pokazalo polivinilacetatno ljepilo koje je sa vrijednosti smične čvrstoće od 7,94 N/mm<sup>2</sup> rezultiralo upola manjom čvrstoćom u odnosu na PUR 3. Epoksino ljepilo ima nešto bolji rezultat u odnosu na PVAc sa ostvarenom čvrstoćom 10,17 N/mm<sup>2</sup>, a PUR 1 i PUR 2 su postigli 13,69 % odnosno 16,41 % lošije rezultate od PUR 3 (16,16 N/mm<sup>2</sup>).

### 4.1.3. Obodno glodani uzorci



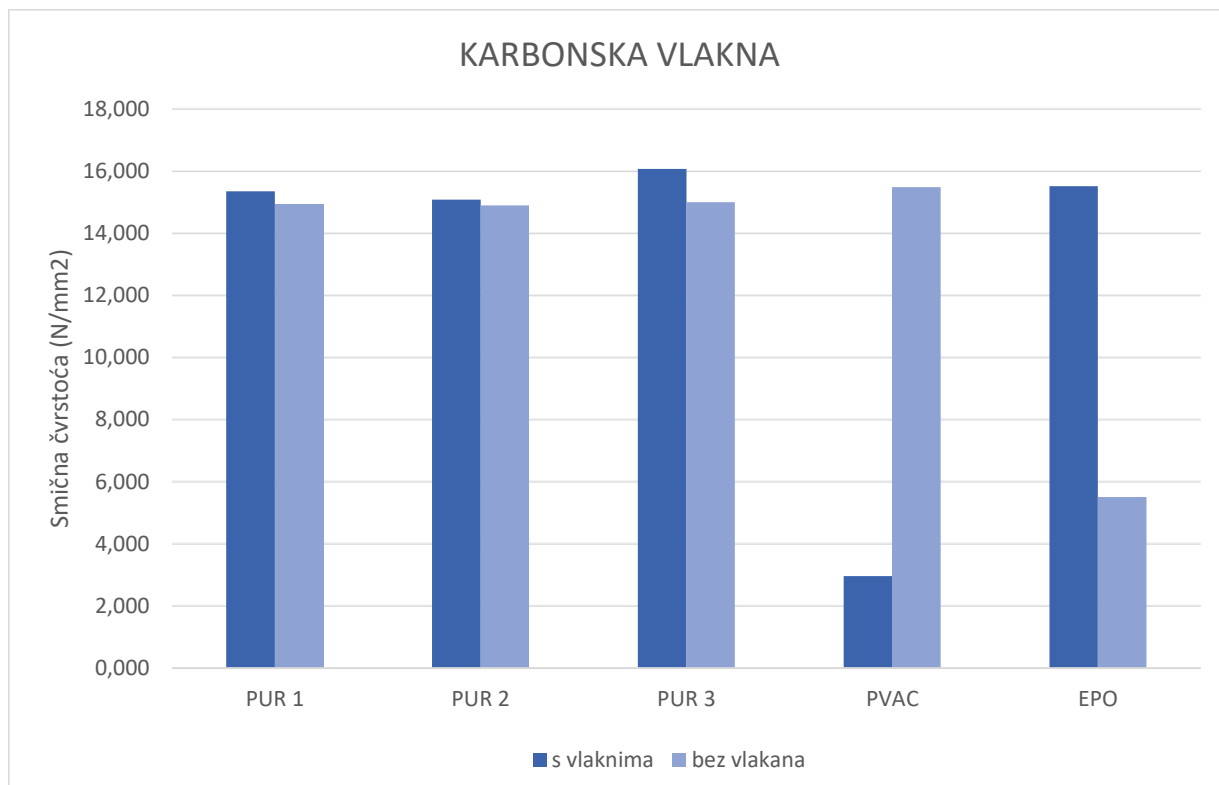
**Slika 11.** Grafički prikaz prosječne smične čvrstoće (N/mm<sup>2</sup>) uzoraka obrađenih obodnim blanjanjem

Na grafu su prikazani rezultati ispitivanja smične čvrstoće lameliranih uzoraka koji čija je sljubnica pripravljena za lijepljenje obodnim blanjanjem. Za lijepljenje uzoraka korišteno je 5 vrsta ljepila, za razliku od prethodna dva slučaja PVAC ljepilo se pokazalo najboljim za ovu vrstu obrade. Vrijednosti smične čvrstoće od 15,47 N/mm<sup>2</sup> je bolja za 3,2-3,92 % u odnosu na poliuretanska ljepila. Epoksidno ljepilo je u ovome slučaju ima najlošije rezultate, vrijednost 5,5 N/mm<sup>2</sup> je skoro 3 puta manja od vrijednosti koje je postiglo PVAC.

Najbolji način obrade sljubnice prije lijepljenja hrastovine prema ovome istraživanju je brušenje. Brušeni uzorci su ostvarili prosječnu smičnu čvrstoću od 14,92 N/mm<sup>2</sup>, čeonoglodani uzorci 12,47 N/mm<sup>2</sup> te obodnoglodani 13,16 N/mm<sup>2</sup>. Ovaj rezultat nam govori da kod hrastovine ne vrijedi opća tvrdnja o negativnom utjecaju deformiranih stanica (nastalih brušenjem zbog nepravilne oštice) koje više bubre tj. utežu od nedeformiranih stanica uslijed promjene vanjskih uvjeta.

## 4.2. Rezultati uzoraka s obzirom na vrstu dodatnog materijala

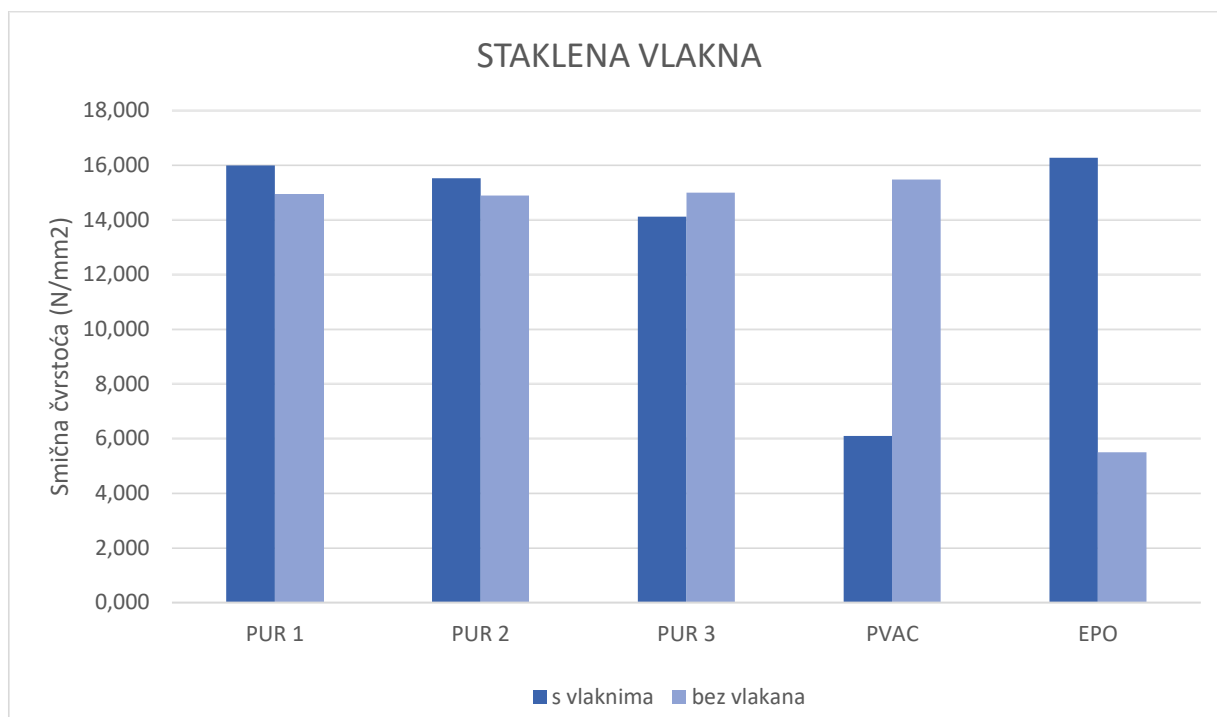
### 4.2.1. Karbonska vlakna



**Slika 12.** Grafički prikaz prosječne smične čvrstoće (N/mm<sup>2</sup>) uzoraka sa umetnutim karbonskim vlaknima i referentnih uzoraka

Na grafu su prikazani rezultati ispitivanja smične čvrstoće lameliranih uzoraka s dodanim karbonskim vlaknima u međusloju te referentnih uzoraka bez dodataka. Obe skupine uzoraka su lijepljene sa pet različitih vrsta ljepila. Cilj uporabe karbonskih vlakana je povećati smičnu čvrstoću lijepljenih uzoraka, što nije bio slučaj kod PVAC ljepila gdje su referentni uzorci imali 5,22 puta veću vrijednost od uzoraka sa karbonskim vlaknima. Velika razlika je vidljiva i kod epoksidnog ljepila, smična čvrstoća uzoraka sa umetnutim vlaknima iznosi 15,51 N/mm<sup>2</sup> što je 2,81 puta veće u odnosu na referentne uzorke. Uzorci lijepljeni sa PUR 1 ljepilom su postigli smičnu čvrstoću 15,35 N/mm<sup>2</sup> je za 2,78 % veće u odnosu na referentne uzorke, kod PUR 2 ljepila smična čvrstoća iznosi 15,08 N/mm<sup>2</sup> što je također veća vrijednost za 1,28 %. Najbolji rezultati su postignuti sa PUR 3 ljepilom, smična čvrstoća iznosi 16,07 N/mm<sup>2</sup> što je povećanje od 7,12 % u odnosu na referentne uzorke.

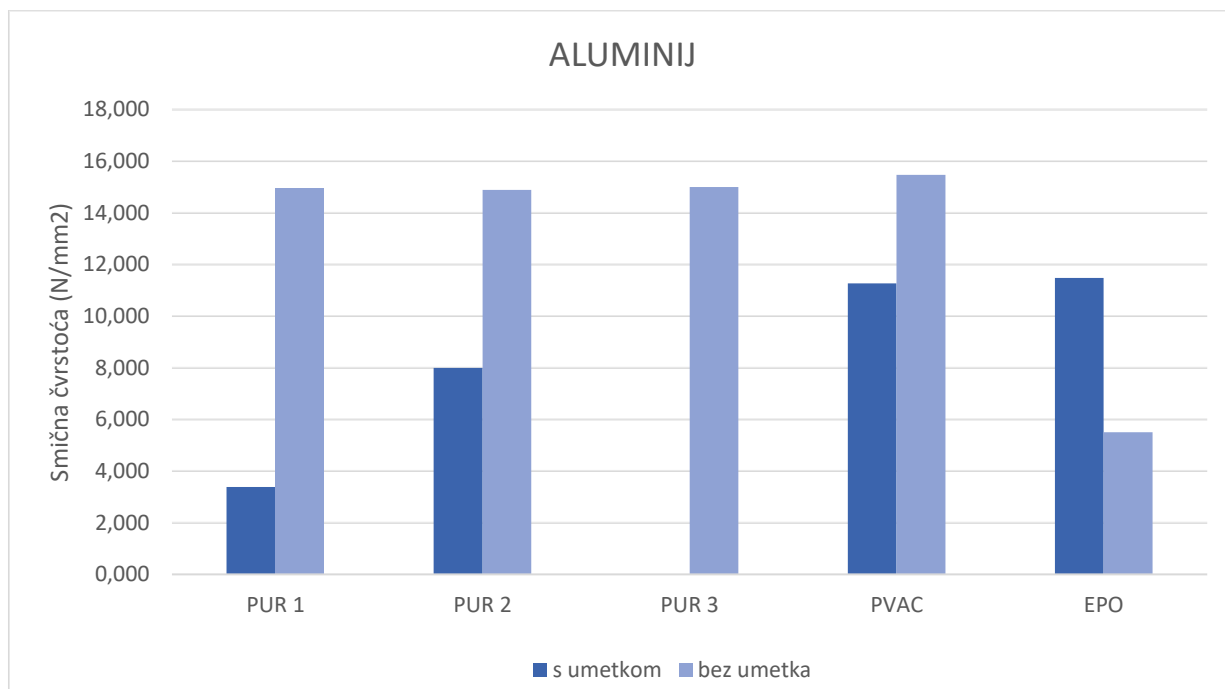
### 4.2.1. Staklena vlakna



**Slika 13.** Grafički prikaz prosječne smične čvrstoće (N/mm<sup>2</sup>) uzoraka sa umetnutim staklenim vlaknima i referentnih uzoraka

Na grafu su prikazani rezultati ispitivanja smične čvrstoće lameliranih uzoraka koji su ojačani staklenim vlaknima te referentnih uzoraka bez umetaka. Obe skupine uzoraka su lijepljene sa pet različitih vrsta ljepila. Razlike između uzoraka sa umetnutim vlaknima u međusloju i referentnih uzoraka su slične prethodnom grafu u kojemu su prikazani rezultati za uzorke sa karbonskim vlaknima, jedina znatna razlika je uzorcima lijepljenim PUR 3 ljepilom koji su postigli vrijednost smične čvrstoće 14,12 N/mm<sup>2</sup> što je za 6,24 % lošiji rezultat u odnosu na referentne uzorke. Najnižu vrijednost su postigli uzorci lijepljeni PVAC ljepilom, smična čvrstoća iznosi 6,09 N/mm<sup>2</sup> što je za 2,5 puta lošiji rezultat od referentnih uzoraka lijepljenih istim ljepilom. Uzorci lijepljeni sa PUR 1 su ostvarili poboljšanje od 7 % u odnosu na referentne uzorke ostvarivši vrijednost od 15,53 N/mm<sup>2</sup>, nešto manje poboljšanje od 4,3 % je ostvareno kod PUR 2 ljepila. Najveća promjena u vrijednosti smične čvrstoće je vidljiva kod epoksidnog ljepila, sa ostvarenih 16,28 N/mm<sup>2</sup> što je 2,95 puta veći rezultat u odnosu na referentne uzorke lijepljene istim ljepilom.

### 4.2.3. Aluminij



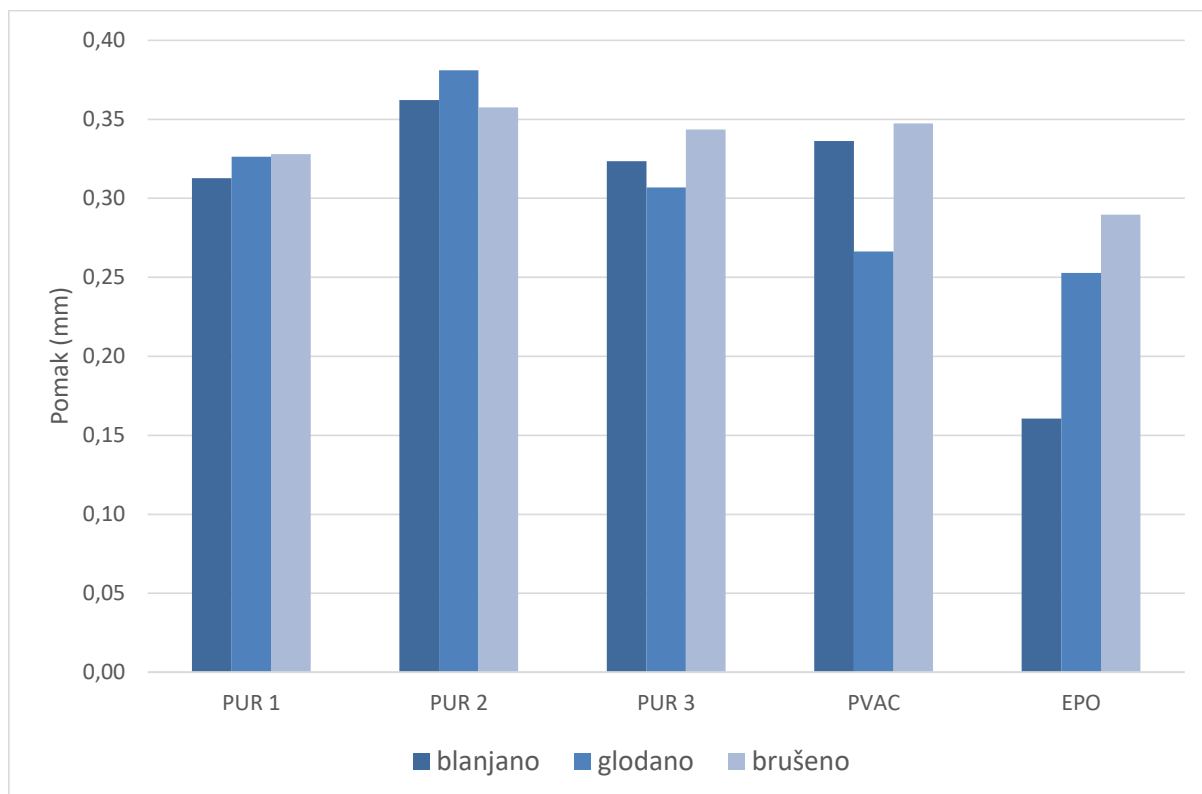
**Slika 14.** Grafički prikaz prosječne smične čvrstoće ( $N/mm^2$ ) uzoraka sa umetnutim aluminijem i referentnih uzoraka

Na grafu su prikazani rezultati ispitivanja smične čvrstoće lameliranih uzoraka sa aluminijem i referentnih uzoraka bez umetka. Obe skupine uzoraka su lijepljene sa pet različitih vrsta ljepila. Poboľšanje smične čvrstoće kod većine uzoraka nije uspješno uporabom aluminija, što je jasno vidljivo iz grafičkog prikaza. Jedino uzorci lijepljeni sa epoksidnim ljepilom su dali bolje rezultate u odnosu na referentne uzorke, smična čvrstoća za EPO iznosi  $11,48 N/mm^2$  što je poboljšanje za 108,7 % od referentnih uzoraka. Uzorci lijepljeni PUR 1 i PUR 2 ljepilom su ostvarili loše rezultate, smična čvrstoća za iste iznosi  $3,39 N/mm^2$  odnosno  $7,99 N/mm^2$  što je manje u odnosu na referentne uzorke za skoro 4 odnosno 2 puta. Nešto bolji rezultat su ostvarili uzorci lijepljeni PVAC ljepilom, smična čvrstoća ojačanih uzoraka iznosila je  $11,26 N/mm^2$  što je lošiji rezultat s obzirom na referentne uzorke za 37,36 %. U grafu nema podatka o vrijednosti smične čvrstoće za uzorke lijepljene sa PUR 3 ljepilom iz razloga što su se isti raspali uslijed kondicioniranja prije ispitivanja na kidalici.

Obje vrste vlakana (karbonska i staklena) su pokazale bolje rezultate u odnosu na referentne uzorke u većini slučajeva, osim kada se kao ljepilo koristilo PVAC. Za razliku od vlakana, aluminij nije materijal za međusloj koji će utjecati na povećanje čvrstoće kod lamelirane hrastovine.

### 4.3. Rezultati uzoraka s obzirom na pomak uslijed maksimalnog naprezanja

#### 4.3.1. Rezultati uzoraka s obzirom na način obrade površine sljubnice

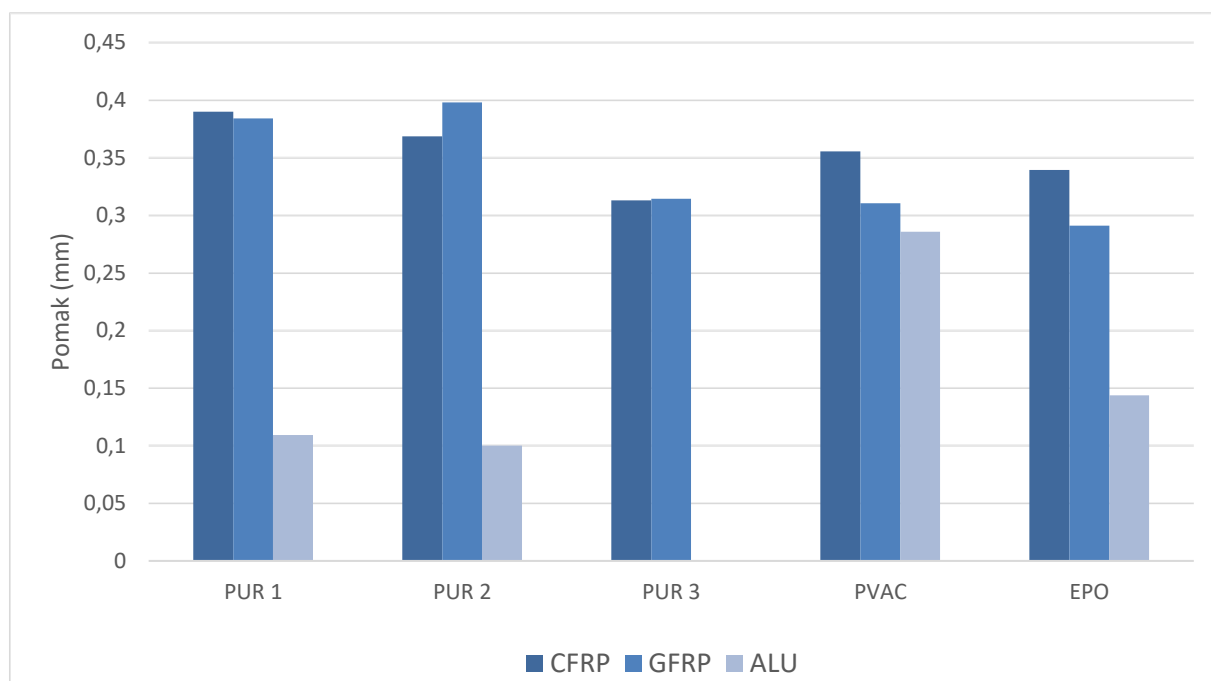


**Slika 15.** Grafički prikaz pomaka promatrane točke uslijed djelovanja maksimalne sile

Grafički su prikazane prosječne vrijednosti pomaka promatrane točke uslijed djelovanja maksimalne sile na lamelirani uzorak. Podatci su grupirani s obzirom na korišteno ljepilo te način obrade sljubnice prije lijepljenja. Najveću prosječnu vrijednost pomaka a samim time i najveću elastičnost spoja su ostvarili uzorci lijepljeni PUR 2 ljepilom, uzorci obrađeni glodanjem su postigli pomak od 0,38 mm. Promatrajući po vrsti ljepila, epoksidno ljepilo je ostvarilo najmanji pomak što ukazuje na neelastičnu vezu, posebno uzorci koji su postupkom blanjanja pripremljeni za lijepljenje. Sa ostvarenih 0,16 mm pomaka, uzorci lijepljeni EPO ljepilom te obrađeni blanjanjem su uvjerljivo uzorci sa najmanjim pomakom. Brušeni uzorci imaju najveće vrijednosti pomaka kod svih vrsta ljepila osim kod EPO 2 ljepila.



### 4.3.2. Rezultati uzoraka s obzirom na vrstu ukrute



**Slika 16.** Grafički prikaz pomaka promatrane točke uslijed djelovanja maksimalne sile kod ojačanih uzoraka

Grafički su prikazane prosječne vrijednosti pomaka promatrane točke uslijed djelovanja maksimalne sile na ojačani lamelirani uzorak. Podatci su grupirani s obzirom na korišteno ljepilo te vrstu ojačanja. Kao i na prethodnom grafu na kojemu su prikazani neojačani uzorci, najveću prosječnu vrijednost pomaka su ostvarili uzorci lijepljeni PUR 2 ljepilom. Uzorci ojačani staklenim vlaknima te lijepljeni PUR 2 ljepilom ostvarili su pomak od 0,40 mm uslijed djelovanja maksimalne sile, što je veći pomak za 7,65 % u odnosu na uzorke ojačane karbonskim vlaknima. U grafu je jasno vidljivo da uzorci ojačani aluminijem imaju najmanje prosječne pomake kod svih pet vrsta ljepila. Uzorci ojačani aluminijem te lijepljeni PUR 2 ljepilom su ostvarili 4 puta manji pomak u odnosu na uzorke ojačane staklenim vlaknima lijepljeni istim ljepilom. Iz prikazanih rezultata vidljivo je da je elastičnost veza uvelike veća kod uzoraka sa umetnutim vlaknima u odnosu na uzorke sa krutim aluminijevim umetkom.

## ZAKLJUČAK

Nakon provedbe ovog istraživanja uvidjeli smo koliku razliku može činiti odgovarajući odnosno neodgovarajući odabir lijepila, načina obrade sljubnice te vrste umetka pri lameliranju hrastovine. Rezultati ovog istraživanja pokazuju koliko je bitno poznavati sve aspekte prilikom lijepljenja zahtjevne vrste drva kao što je hrastovina. Pravilan odabir načina obrade sljubnice prije lijepljenja je neophodan za dobivanje zadovoljavajuće čvrstoće lijepljenog spoja.

Najboljim su se pokazali uzorci lijepljeni PUR 3 ljepilom čija je sljubnica za lijepljenje pripremljena postupkom čeonog blanjanja. Isti uzorci su ostvarili prosječnu vrijednost smične čvrstoće od  $16,16 \text{ N/mm}^2$ , što je najveći postignuti rezultat. No gledajući svih pet vrsta ljepila, brušeni uzorci imaju 13,37 % veću vrijednost smične čvrstoće u odnosu na obodno blanjanje uzorke te 19,65 % veću od čeonog glodanih uzoraka. Najbolji rezultat kod uzoraka sa nedrvenim umetkom u međusloju ostvarili su uzorci kod kojih je korištena staklena vlakna, te su lijepljeni epoksidnim ljepilom, smična čvrstoća kod istih je iznosila  $16,28 \text{ N/mm}^2$  što je poboljšanje u odnosu na referentne (bez ojačanja) uzorke za dvostruko. Uzorci s umetnutim staklenim i karbonskim vlaknima su uglavnom ostvarili veće vrijednosti u odnosu na referentne uzorke (za pretpostaviti je da bi poboljšanja bila izraženija da su uzorci obrađeni brušenjem a ne blanjanjem prije lijepljenja), to međutim nije slučaj kod uzoraka sa umetkom od aluminijski koji je zasigurno najlošiji izbor za povećanje čvrstoće lamelirane hrastovine.

## LITERATURA

1. Blomquist, R. F. (1963) Edgar Marburg Lecture: Adhesives—Past, Present, and Future, in *Adhesion*, (West Conshohocken, PA: ASTM International, 1964), 179-212. <https://doi.org/10.1520/STP44573S>
2. Horvatin; Zupančić; Šernek; Oblak (2008): Usporedba momenta loma kutnog spoja izvedenoga različitim vrstama lijepila, *Drvena industrija* 64\_4
3. Jokerst R., Stewart H. (1976) Knife- Versus Abrasive-Planed Wood: Quality of Adhesive Bonds, Forest Products Laboratory, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, Madison, WI ,53705
4. Knorz, M., Neuhaeuser, E., Torno, S., van de Kuilen, J.W. (2015) Influence of surface preparation methods on moisture-related performance of structural hardwood adhesive bonds.
5. Leggate, William ; McGavin, Robert ; Outhwaite, Andrew ; Dorries, Jack ; Robinson, Rhianna ; Kumar, Chandan ; Faircloth, Adam ; Knackstedt, Mark. (2020). The Influence of Mechanical Surface Preparation Method, Adhesive Type, and Curing Temperature on the Bonding of Darwin Stringybark. *Bioresources*. 16. 302-323.
6. Resnik, J. (1997.): *Lepila in lepljenje lesa: (okvirna skripta)*. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Odelek za lesarstvo,
7. Singla, M., ; Chawla, V. (2010). Mechanical Properties of Epoxy Resin - Fly Ash Composite. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 09, 199-210.