

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Robert BOŽIČ

**KAKOVOST LEPILNEGA SPOJA OKENSKIH PROFILOV IZ  
TERMIČNO MODIFICIRANE SMREKOVINE**

DIPLOMSKO DELO  
Visokošolski strokovni študij

**THE QUALITY OF THE ADHESIVE BOND OF WINDOW PROFILES  
FROM THERMALLY MODIFIED SPRUCE**

GRADUATION THESIS  
Higher Professional Studies

Ljubljana, 2016

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega strokovnega študija. Opravljeno je bilo na Katedri za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin, Oddelka za lesarstvo, Biotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani.

Praktičen del diplomskega dela je potekal v laboratorijih Oddelka za lesarstvo.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Milana Šerneka, za somentorja doc. dr. Mirka Kariža, za recenzentko pa izr. prof. dr. Manjo Kitek Kuzman.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Diplomsko delo je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisani se strinjam z objavo diplomskega dela v polnem tekstu na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je naloga, ki sem jo oddal v elektronski obliki, identična tiskani verziji.

Robert BOŽIČ

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Vs  
DK UDK 630\*824.7  
KG lepljenje/termično modificiran les/strižna trdnost/trdnost spoja  
AV BOŽIČ, Robert  
SA ŠERNEK, Milan (mentor)/KARIŽ, Mirko (somentor)/KITEK KUZMAN, Manja (recenzentka)  
KZ SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34  
ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo  
LI 2016  
IN KAKOVOST LEPILNEGA SPOJA OKENSKIH PROFILOV IZ TERMIČNO MODIFICIRANE SMREKOVINE  
TD Diplomsko delo ( visokošolski strokovni študij )  
OP IX, 24 str., 3 pregl., 14 sl., 20 vir  
IJ sl  
JI sl/en  
AI Termična modifikacija je sodoben postopek zaščite lesa, kateri mu izboljša dimenzijsko stabilnost in obstojnost. Tako zaščiteno leseno okno je kvalitetnejše in konkurenčnejše na trgu. V diplomski nalogi smo zato proučevali vpliv termične modifikacije na kakovost lepljenja okenskega profila iz smrekovine. Uporabili smo smrekov les in tri različne vrste lepil (PVAc, PU, EPI), s katerimi smo zlepili termično modificiran in nemodificiran les. Zlepljenim preizkušancem smo ugotavljali strižno trdnost spojev in delež loma po lesu po standardu EN 392. Da bi ugotovili vpliv vode na lepilne spoje, pa smo del preizkušancev izpostavili 24 urnem namakanju v vodi s sobno temperaturo. Pri termični modifikaciji se smreki spremenijo lastnosti, ki posredno ali pa neposredno vplivajo na utrjevanje lepil in kakovost lepilnih spojev. Rezultati testa strižne trdnosti so pokazali, da je termično modificiran les možno kvalitetno zlepiti z PU in EPI lepili. Da zagotovimo kvaliteten lepilni spoj moramo postopek lepljenja prilagoditi spremenjenim lastnostim modificiranega lesa. Obe vrsti lepil utrjujeta kemično in za reakcijo potrebujeta višjo vlažnost kot jo ima modificiran les. Pred lepljenjem zato lepilne površine dodatno navlažimo, čas stiskanja pa povečamo. PVAc lepilo pa je manj kvalitetno zlepilo termično modificiran les, kar se je pokazalo predvsem pri testiranju mokrih preizkušancev.

## KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Vs  
DC UDC 630\*824.7  
CX bonding/heat treated wood/shear strength/bond strength  
AU BOŽIČ, Robert  
AA ŠERNEK, Milan (supervisor)/KARIŽ, Mirko (co-supervisor)/KITEK  
KUZMAN, Manja (reviewer)  
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34  
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty,, Department of Wood Science and  
Technology  
PY 2016  
TI QUALITY OF ADHESIVE BOND WINDOW PROFILES FROM HEAT  
TREATMENT SPRUCE WOOD  
DT Graduation Thesis (Higher professional studies)  
NO IX, 24 p., 3 tab., 14 fig., 20 ref.  
LA sl  
AL sl/en  
AB The thermal modification of wood is a modern procedure which improves the  
dimensional stability of wood and its resistance. In such a way protected wooden-  
window is better in quality and more competitive in market. In the thesis the influence  
of the thermal modification on the quality of bonding window profile from spruce  
wood was investigated. Spruce wood and three different types of adhesives were used  
(PVAc, PU, EPI) to bond thermal modified and non-modified wood (technical  
dry). The shear strength adhesive bond and percentage of wood failure were  
determined according to the EN 392. To find out the influence of water on adhesive  
bonds, part of specimens were soaked in water for 24 h at room temperature.  
It was found out, that after thermal modification the properties of spruce wood was  
changed, which has direct or indirect influence on adhesive curing and quality of  
adhesive bonds. The test results of the shear strength showed that the thermally  
modified wood can be bonded with (PU and EPI) adhesives. To assure the quality of  
adhesive bonds in thermally modified wood, the method of bonding needs to be  
adapted. The both types of adhesives cure chemically and for the reaction they need  
higher moisture content as the modified wood has. Therefore, the surfaces of wood  
have to be additionally wetted during the bonding, and the time of pressing has to be  
increased. The quality of PVAc adhesive bond of thermally modified wood was lower,  
which was particularly evident at testing specimens.

## KAZALO VSEBINE

	str.
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA (KDI).....	III
KEY WORDS DOCUMENTATION (KWD).....	IV
KAZALO VSEBINE .....	V
KAZALO PREGLEDNIC .....	VII
KAZALO SLIK .....	VIII
KAZALO PRILOG .....	IX
SLOVARČEK.....	IX
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA .....	1
1.2 CILJ NALOGE.....	1
1.3 DELOVNE HIPOTEZE .....	1
<b>2 PREGLED OBJAV .....</b>	<b>2</b>
2.1 TERMIČNA MODIFIKACIJA LESA .....	2
2.1.1 Namen modifikacije lesa.....	2
2.1.2 Uporaba termično modificiranega lesa .....	2
2.2 LASTNOSTI TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA .....	3
2.2.1 Izguba mase.....	3
2.2.2 Ravnovesna vlažnost lesa .....	3
2.2.3 Dimenzijska stabilnost.....	4
2.2.4 Vrednost pH .....	4
2.2.5 Trajnost in obstojnost.....	4
2.2.6 Barvne spremembe .....	4
2.2.7 Mehanske lastnosti.....	4
2.2.8 Lepljenje termično modificiranega lesa.....	5
2.3 VAKUUMSKI POSTOPEK TERMIČNE MODIFIKACIJE LESA SILVAPRO .....	5
2.3.1 Slovenski postopek termične modifikacije lesa z vakuumsko tehnologijo.....	5
<b>3 MATERIAL IN METODE .....</b>	<b>6</b>
3.1 MATERIALI.....	6
3.1.1 Les .....	6
3.1.2 Lepila .....	7
3.1.2.1 Mekol D4 .....	7
3.1.2.2 Mitopur E45 .....	8
3.1.2.3 EPI 1989/1993.....	9
3.2 METODE.....	9
3.2.1 Termična modifikacija lesa.....	9
3.2.2 Priprava lamel.....	9
3.2.2.1 Ravnovesna vlažnost lamel.....	10
3.2.3 Lepljenje troslojnih lepljencev.....	10
3.2.4 Ugotavljanje strižne trdnosti lepilnih spojev.....	11
<b>4 REZULTATI.....</b>	<b>12</b>
4.1 VLAŽNOST LESA.....	12
4.2 KAKOVOST LEPILNIH SPOJEV .....	13
4.2.1 Kakovost PVAc lepilnih spojev.....	14
4.2.2 PU lepilo.....	15
4.2.3 EPI lepilo .....	16

<b>5</b>	<b>RAZPRAVA</b> .....	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>SKLEPI</b> .....	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>POVZETEK</b> .....	<b>20</b>
<b>8</b>	<b>VIRI</b> .....	<b>21</b>

**ZAHVALA**  
**PRILOGE**

## KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1. : Povprečna ravnovesna vlažnost nemodificiranih vzorcev. ....	12
Preglednica 2. : Povprečna ravnovesna vlažnost modificiranih vzorcev.....	12
Preglednica 3. : Rezultati povprečnih strižnih trdnosti spojev v $N/mm^2$ in deleža loma po lesu v %, pri suhih in mokrih preizkušancih.....	13

## KAZALO SLIK

Slika 1: Vakuumska komora podjetja Silvaprodukt.....	5
Slika 2: Nemodificirana (levo) in termično modificirana smrekovina (desno). ....	6
Slika 3: Mekol lepilo (komp. A) in trdilec (komp. B). ....	7
Slika 4: Mitopur E45 lepilo.....	8
Slika 5: Poskobljan nemodificiran in termično modificiran lepljenec... <b>Napaka! Zaznamek ni definiran.</b>	
Slika 6: Testiranje strižne trdnosti lepilnih spojev na stroju Zwick Z1 .....	11
Slika 7: Primerjava strižne trdnosti lepilnih spojev suhih in mokrih nemodificiranih ter suhih in mokrih modificiranih preizkušancev. ....	13
Slika 8: Primerjava povprečnih trdnosti spojev zlepljenih s PVAc lepilom.....	14
Slika 9: Delež loma po lesu pri vzorcih zlepljenih z PVAc lepilom ocenjen v %..... <b>Napaka! Zaznamek ni definiran.</b>	
Slika 10: Izrazit lom po lesu pri nemodificiranih suhih vzorcih.....	15
Slika 11: Primerjava povprečnih trdnosti spojev zlepljenih z PU lepilom v N/mm <sup>2</sup> . ....	15
Slika 12: Delež loma po lesu pri vzorcih zlepljenih z PU lepilom ocenjen v %.....	16
Slika 13: Primerjava povprečnih trdnosti spojev zlepljenih z EPI lepilom v N/mm <sup>2</sup> .....	17
Slika 14: Delež loma po lesu pri vzorcih zlepljenih z EPI lepilom ocenjen v %.....	17



## KAZALO PRILOG

### PRILOGA A : REZULTATI MERITEV SUHIH PREIZKUŠANCEV

- Priloga A1 : Rezultati nemodificiranih preizkušancev zlepljenih z PVAc lepilom
- Priloga A2 : Rezultati nemodificiranih preizkušancev zlepljenih z PU lepilom
- Priloga A3 : Rezultati nemodificiranih preizkušancev zlepljenih z EPI lepilom
- Priloga A4 : Rezultati modificiranih preizkušancev zlepljenih z PVAc lepilom
- Priloga A5 : Rezultati modificiranih preizkušancev zlepljenih z PU lepilom
- Priloga A6 : Rezultati modificiranih preizkušancev zlepljenih z EPI lepilom

### PRILOGA B : REZULTATI MERITEV MOKRIH PREIZKUŠANCEV

- Priloga B1 : Rezultati nemodificiranih preizkušancev zlepljenih z PVAc lepilom
- Priloga B2 : Rezultati nemodificiranih preizkušancev zlepljenih z PU lepilom
- Priloga B3 : Rezultati nemodificiranih preizkušancev zlepljenih z EPI lepilom
- Priloga B4 : Rezultati modificiranih preizkušancev zlepljenih z PVAc lepilom
- Priloga B5 : Rezultati modificiranih preizkušancev zlepljenih z PU lepilom
- Priloga B6 : Rezultati modificiranih preizkušancev zlepljenih z EPI lepilom

## 1 UVOD

Okna iz aluminija in PVAc so v veliki meri zamenjala klasična lesena okna. Vzrok za to gre iskati v dejstvu, da sta aluminij in PVAc obstojnejša od lesa. Les je naravni material s sorazmerno slabo odpornostjo na zunanje vremenske dejavnike in na naravne škodljivce, zato ga je za podaljšanje življenjske dobe izdelkov in trajnosti potrebno ustrezno zaščititi. Za zaščito so se običajno uporabljali razni premazi, ki pa so bili običajno slabo obstojni. En novejših postopkov zaščite je termična modifikacija lesa, s katero les naredimo bolj odporen na okolju prijazen način, brez uporabe strupenih kemikalij in okolju škodljivih postopkov. Zato je leseno okno iz termično modificiranega lesa pridobilo dodano vrednost in je tudi ekološko bolj ustrezno.

### 1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Termična modifikacija lesa je industrijsko uveljavljen postopek. Modificiran les je dimenzijsko bolj stabilen in trajnejši, vendar pa mu delno poslabšamo mehanske lastnosti. Z modifikacijo se spremenijo lastnosti površine lesa, kar lahko povzroča težave pri lepljenju in vpliva na kakovost lepilnega spoja.

### 1.2 CILJ NALOGE

Osnovni cilj diplomske naloge je ugotoviti vpliv termične modifikacije smrekovega lesa na kakovost lepljenja okenskih profilov. Ugotavljali bomo strižno trdnost lepilnega spoja pri modificiranih in nemodificiranih smrekovih lepljencih, zlepljenih s tremi različnimi lepili. Na podlagi rezultatov testov bomo izbrali najprimernejše lepilo za lepljenje okenskih profilov iz termično modificirane smrekovine.

### 1.3 DELOVNE HIPOTEZE

Predvidevamo, da bo lepljenje termično modificirane smrekovine zahtevnejše kot nemodificirane. Lepilni spoji iz termično modificiranega lesa bodo imeli nižjo trdnost in manjši delež loma po lesu. Prav tako bodo razlike v trdnosti lepilnih spojev glede na vrsto lepila, predvsem pri lepljencih, preskušanih po namakanju v vodi.

## **2 PREGLED OBJAV**

### **2.1 TERMIČNA MODIFIKACIJA LESA**

Termična modifikacija lesa je postopek segrevanja lesa z določeno temperaturo pri zmanjšani prisotnosti kisika (Militz, 2002). S tem lesu, predvsem celulozi in hemicelulozam v njem, spremenimo kemično sestavo in strukturo. Celične stene lesa so sestavljene predvsem iz polimerov (celuloze, hemiceluloz in lignina). Njihove (OH) skupine so najbolj reaktivne skupine v lesu, na katere se veže voda pri navlaževanju lesa. Z modifikacijo teh polimerom v celični steni zmanjšamo število prostih OH skupin, delno pa jih zamrežimo. Tak les ima manjšo higroskopnost, zato pa boljšo dimenzijsko stabilnost in odpornost proti glivam in insektom v primerjavi z nemodificiranim lesom (Hill, 2006).

Osnovne razlike med postopki termične modifikacije lesa so v temperaturi postopka, trajanju, začetni vlažnosti lesa ter v načinu preprečevanja dostopa kisika med postopkom modifikacije, kar dosežemo s pomočjo dušika, vodne pare, vročega olja ali vakuuma.

#### **2.1.1 Namen modifikacije lesa**

Modificiramo predvsem dostopnejše, cenejše in manj kvalitetne drevesne vrste. Takemu lesu z modifikacijo povečamo uporabnost in ga zaščitimo, ter s tem omogočimo uporabo na mestih, za katera prej ni bil primeren.

V zadnjih desetletjih narašča potreba po razvoju okolju prijaznejših metod zaščite lesa. To seveda ne pomeni, da so vsi obstoječi postopki neprimerni in okolju škodljivi, vendar je tudi lesna industrija sama zainteresirana za razvoj novih metod, ki bi omogočile ohranitev ali celo izboljšanje naravnega videza ter lastnosti lesa za daljše časovno obdobje. V preteklosti so se za zaščito lesa večinoma uporabljali zelo strupeni kemijski pripravki. Problem pa je nastal po preteku življenjske dobe zaščitenega lesa, ko je potrebno odpadni zaščiten les primerno odstraniti iz okolja. Zaradi velike vsebnosti strupenih elementov (krom, baker, arzen, živo srebro) ter organskih biocidov (PCP, DDT) pristo odlaganje ali nekontrolirano sežiganje ni mogoče. Po drugi strani s strupenimi biocidi zaščitenega lesa ne moremo uporabiti v bivalnih prostorih ter za izdelke, ki pridejo v stik s hrano za ljudi ali živali. Tem problemom se izognemo z modifikacijo lesa (Rep in Pohleven, 2002), saj pri njej v les ne vnašamo dodatnih kemikalij.

#### **2.1.2 Uporaba termično modificiranega lesa**

Termično obdelan les je ob pravilni izbiri in načinu uporabe odličen material za uporabo na prostem, za izdelavo stavbnega pohištva, vrtnih garnitur, lesenih teras, fasadnih oblog, ograj in kritin. Primeren je tudi za izdelavo notranjega pohištva, talnih oblog, kopalnic in

savn. Tuje in tropske vrste lesa (sibirski macesen, tik, meranti, ...) lahko enakovredno nadomestimo s termično obdelanimi lesovi iz naših gozdov, smreko, borom, jesenom, bukvijo, topolom, gabrom, robinijo in drugimi. Ob primerljivi kvaliteti so cene domačih pogosto nižje od cen tropskih lesov, ki so velikokrat pridobljeni na okolju neprijazen način (Rep, 2008).

## 2.2 LASTNOSTI TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA

S postopkom termične modifikacije lesa, lesu izboljšamo odpornost proti insektom in glivam in njegovo dimenzijsko stabilnost, žal pa posledično poslabšamo nekatere mehanske lastnosti. Zmanjšana higroskopsnost in s tem manjša ravnovesna vlažnost lesa ter izboljšana njegova dimenzijska stabilnost in odpornost so največje prednosti termično modificiranega lesa (Yildiz in sod., 2006).

Lastnosti modificiranih lepljencev naj bi vplivale predvsem na naslednje faze lepljenja: penetracijo, omočitev in utrjevanje lepila. Omočitev je odvisna od molekularne narave lepila, mobilnosti molekul lepila, lesne vrste, kvalitete površine lepljenca, hrapavosti površine, starosti površine, anatomske smeri lesa, poroznosti, vlažnosti, higroskopsnosti, kemijske zgradbe, in vrednosti pH lesa, tlaka med stiskanjem ter časa do utrjevanja lepila (Marra, 1992).

### 2.2.1 Izguba mase

Ena najpomembnejših sprememb pri termični modifikaciji lesa je izguba mase in se jo pogosto pojmuje kot oceno kakovosti procesa modifikacije. Izguba mase je odvisna od trajanja postopka modifikacije, temperature in kisika (Kariž in Šernek, 2008).

Vzorci modificirani z nizko temperaturo, čeprav v časovnem daljšem postopku modifikacije, ne izgubijo toliko mase, kot vzorci modificirani pri višji temperaturi.

Ugotovljeno je bilo, da je zaradi izgube mase gostota termično modificiranega lesa nižja od gostote nemodificiranega lesa in pada z rastjo temperature pri postopku termične modifikacije (Esteves in Pereira, 2009).

### 2.2.2 Ravnovesna vlažnost lesa

Higroskopsnost termično modificiranega lesa pada z izgubo mase. Za spremembo ravnovesne vlažnosti je pomemben čas modifikacije in temperatura (Kollmann in Schneider, 1963). Zaradi slabše absorpcije vode v les, pa se lahko pojavljajo težave pri lepljenju modificiranega lesa. Upočasni se utrjevanje lepil, zaradi počasnejšega odstranjevanja vode iz lepilnega spoja med utrjevanjem lepila pa so spoji lahko slabše kakovosti. Rešitev predstavlja uporaba lepil z manjšim deležem vode.

Pri lepilih, ki za utrjevanje potrebujejo vodo, pa si pomagamo z navlaževanjem lepilne površine pred lepljenjem.

### **2.2.3 Dimenzijska stabilnost**

Dimenzijska stabilnost je ena od glavnih prednosti termično modificiranega lesa. Boljša dimenzijska stabilnost je predvsem posledica zmanjšane higroskopnosti lesa (Esteves in Pereira, 2009). Zaradi manjšega krčenja in nabrekanja lesa so lepilni spoji in površinski premazi manj obremenjeni (Yildiz in sod., 2006).

### **2.2.4 Vrednost pH**

Sprememba vrednosti pH modificiranega lesa je sorazmerna z izgubo mase. Višja kot je temperatura pri postopku modifikacije, večja je izguba mase in nižja je vrednost pH. Nižja vrednost pH negativno deluje pri lepljenju in barvanju modificiranega lesa, vendar so proizvajalci večino težav že odpravili (Rep in Pohleven, 2002).

### **2.2.5 Trajnost in obstojnost**

S postopkom termične modifikacije lesu znižamo ravnovesno vlažnost na stopnjo, ki ni več primerna za razvoj gliv. Visoko odpornost proti insektom in glivam dosežemo z visokimi temperaturami pri postopku modifikacije, tako lahko neodporne vrste lesa kot so smreka, jelka in topol spremenimo v bolj odporne proti glivam bele in rjave trohnobe (Dirol in Guyonnet, 1993).

### **2.2.6 Barvne spremembe**

Pri termični modifikacije les potemni. Barvne spremembe so opazne že pri nižjih temperaturah modifikacije, s poviševanjem temperature in podaljševanjem časa modifikacije pa se sorazmerno povečuje tudi potemnitev lesa. Sprememba barve je odvisna tudi od drevesne vrste, in je dobrodošla, saj lahko temnejši termično modificiran domač les uporabimo namesto temnejših tropskih vrst (Sundqvist in sod., 2006).

### **2.2.7 Mehanske lastnosti**

Mehanske lastnosti se z višanjem temperature pri postopku termične modifikacije poslabšajo, medtem, ko se izboljšuje biološka odpornost in dimenzijska stabilnost. Uporaba termično modificiranega lesa v obremenjenih konstrukcijah je zato omejena, oziroma je potrebno pravilno konstruiranje z upoštevanjem slabšim mehanskih lastnosti. Termično modificiranemu lesu se zmanjšata natezna in upogibna trdnost in sicer od 10 % - 30 %. Poveča se krhkost, medtem ko se udarna žilavost, tlačna trdnost in trdota površine naj ne bi bistveno spremenile (Sailer in sod., 2000).

## 2.2.8 Lepljenje termično modificiranega lesa

Ugotovljeno je bilo, da lepilni spoji termično modificiranega lesa ne dosegajo takšne trdnosti kot spoji nemodificiranega lesa. Delno je to zaradi manjše trdnosti modificiranega lesa, delno pa zaradi slabšega lepljenja z nekaterimi lepili.

Lepljenje termično modificiranega lesa je zahtevnejše in težavnejše, saj modifikacija lesu spremeni določene lastnosti, ki lahko vplivajo na utrjevanje lepil in kakovost lepilnih spojev. Te lastnosti so : izguba mase, mehanske lastnosti, ravnovesna vlažnost, omočitev površine, vrednost pH, kristaliničnost, toplotna prevodnost, reaktivnost in morfologija lepilne površine.

## 2.3 POSTOPEK TERMIČNE MODIFIKACIJE LESA SILVAPRO WOOD

Termična modifikacija lesa je med novejšimi metodami zaščite lesa s katero lesu izboljšamo lastnosti, ga zaščitimo pred biološkimi dejavniki in mu posledično podaljšamo trajnost.

### 2.3.1 Slovenski postopek termične modifikacije lesa z vakuumsko tehnologijo

V podjetju Silvapro produkt modificirajo les po izvornem postopku Silvapro wood, ki so ga že pred desetletjem razvili in patentirali v sodelovanju z Biotehniško fakulteto Univerze v Ljubljani. Postopek temelji na modifikaciji z začetnim vakuumom. Pri termični modifikaciji lesa so spremembe teksture lesnih makromolekul posledica spontanih termokemičnih reakcij, ki potečejo pri segrevanju lesa med 180 ° C in 230 ° C v inertni atmosferi. Sami so izdelali tudi komoro. Testiranja neodvisnih ustanov in primerjave kažejo, da s postopkom Silvapro Wood pridobijo izredno kvaliteten in odporen termično modificiran les (Rep, 2013).



Slika 1: Vakuumska komora podjetja Silvapro produkt

### 3 MATERIAL IN METODE

#### 3.1 MATERIALI

##### 3.1.1 Les

Navadna smreka (*Picea Abies*, Karst.) je najpogosteje uporabljena drevesna vrsta za izdelavo lesenih oken. Smreka je pri nas zelo razširjena, zato je količinsko dostopna in cenovno ugodna. Les je rumeno-bele barve, jedrovina in beljava pa se barvno ne razlikujeta. Branike so izrazite z svetlim ranim in temnejšim kasnim lesom. Ima razmeroma visoko trdnost, glede na njeno razmeroma nizko gostoto. Smrekovina je zelo uporabna, dobro se obdeluje in predeluje, moteča je le razmeroma visoka vsebnost smole in neodpornost proti glivam in insektom (Čufar, 2006).

V diplomskem delu smo zlepili okenske profile iz nemodificirane in iz termično modificirane smrekovine debeline 50 mm. V prvem primeru gre za tehnično posušen les, ki je vseboval 14,5 % vlage.

Termično modificiran les pa je bil obdelan po postopku Silvapro Wood. Njegova vlažnost je malo variirala, v povprečju pa je znašala 4,5 %.



Slika 2: Nemodificirana (levo) in termično modificirana smrekovina (desno).

### 3.1.2 Lepila

Za lepljenje lepljencev smo uporabili tri vrste lepil za hladno lepljenje lesa: PVAc lepilo MEKOL D4 proizvajalca Mitol d.d. Sežana, PU lepilo MITOPUR E45 istega proizvajalca ter EPI lepilo na osnovi emulzije polimernih izocianatov proizvajalca Akzo Nobel. Med njimi smo na koncu izbrali najbolj primerno lepilo za lepljenje okenskih profilov iz termično modificiranega lesa. Vsa tri lepila so razreda D4, lepilni spoji vodoodporni in namenjeni zunanji uporabi.

#### 3.1.2.1 Mekol D4

MEKOL D4 je dvokomponentno PVAc lepilo namenjeno za lepljenje lesa. Pri uporabi v mešanici s trdilcem komponente B, spoj izpolnjuje zahteve standarda za vodoodpornost EN 204 za razred D4. Lepilo utrjuje na fizikalni način z oddajanjem vode.

Lepilo se uporablja zlasti tam, kjer se zahteva odpornost lepilnega spoja na vodo. Pri notranji uporabi se uporablja pri pohištvu za vlažne prostore, kjer so lepljenci stalno izpostavljeni visoki relativni zračni vlagi, kondenzu ali izlitju vode. Uporablja se tudi v stavbnem pohištvu (okna, zunanja vrata), ki je izpostavljeno neposrednim vremenskim vplivom. Lepilo lahko uporabimo tako za hladno kot za vroče lepljenje, primerno pa je tudi za visokofrekvenčno lepljenje. Optimalno lepljenje omogočajo standardni klimatski pogoji, z vlažnostjo lesa 8-12 %. Čas stiskanja pa pri temperaturi 20 °C znaša 20-35 minut. Pri lepljenju pri nižji temperaturi ali večji vlažnosti lesa, je priporočljivo podaljšati čas stiskanja. Lepljence lahko nadaljnje obdelujemo po 12 urah. Končna vodoodpornost lepilnega spoja pa je dosežena po sedmih dneh.



Slika 3: Mekol lepilo (komp. A) in trdilec (komp. B).



### 3.1.2.2 Mitopur E45

MITOPUR E45 je enokomponentno poliuretansko lepilo namenjeno za lepljenje poroznih materialov med seboj ali v kombinaciji s kovinami, keramiko ali umetnimi masami. Lepilo utrjuje kemijsko, na osnovi reakcije z vodo. Spoj zlepljen s tem lepilom ustreza zahtevam standarda za vodoodpornost EN 204 po razredu D4.

Lepilo se uporablja povsod tam kjer se zahteva vodoodpornost in dobra temperaturna obstojnost. Pri lepljenju s tem lepilom je vlažnost lesa lahko višja kot pri PVAc lepilu.

Med reakcijo utrjevanja lepila nastaja plin ogljikov dioksid, zato se lepilo v odvisnosti od debeline nanosa, reže med lepljenci, temperature, vlage ter tlaka bolj ali manj zapeni. Pri poroznih materialih prodre v notranjost ter zapolni reže, pri lepljenju dveh zaprtih neporoznih površin pa je to lahko moteče. Za optimalno lepljenje proizvajalec (Mitol tovarna lepil d.d.) navaja, da les ne bi smel imeti manj kot 8 % vlažnosti, nanešen sloj lepila pa naj bi navlažili z vodno meglico. Pri hladnem lepljenju pri temperaturi 20° C je minimalen čas stiskanja 45 minut. Nadaljnja obdelava lepljencev je možna po 24-ih urah, končno trdnost in vodoodpornost pa spoj doseže po nekaj dneh.

Pri skladiščenju moramo biti izrecno pozorni, da je lepilo dobro zaprto in da ni v vlažnem prostoru.



Slika 4: Mitopur E45 lepilo.

### 3.1.2.3 EPI 1989/1993

EPI 1989/1993 je dvokomponentno lepilo na osnovi emulzije polimernih izocianatov, namenjeno za lepljenje lesa. Lepilo je označeno z številom 1989, trdilec pa z številom 1993. Utrjevanje lepila je kombinirano (kemijsko – fizikalno). Tudi to lepilo ustreza kriteriju standarda za vodoodpornost EN 204-D4.

Lepilni spoji so odporni na lezenje in topila, so izredno trdni in odporni na visoke temperature. Proizvajalec (AkzoNobel, 2009) navaja, da je lepilo namenjeno za lepljenje lesenih nosilcev, konstrukcijskih elementov in oken. Razmerje mešanja je 100 : 15 (lepilo : trdilec). Lepilo lahko uporabimo tako za hladno kot za vroče lepljenje. Hladno lepljenje naj se izvaja pri temperaturi 20 °C pri standardnih klimatskih pogojih z časom stiskanja 30 minut. Les naj ne bi vseboval manj kot 8 % in ne več kot 15 % vlage. Nadaljnja obdelava je možna že po dveh urah, popolna odpornost proti vlagi pa bo dosežena po štirinajstih dneh.

Trdilec in mešanica lepila vsebujeta izocianat, zato naj bi se izogibali neposrednemu stiku s kožo in uporabljali zaščitne rokavice. Pri skladiščenju pa moramo biti pozorni, da trdilec ne pride v stik z vlago.

## 3.2 METODE

### 3.2.1 Termična modifikacija lesa

Pripravili smo primeren kvaliteten les, ki je vseboval zelo malo vraslih grč. Les je bil tehnično suh, z povprečno vlažnostjo 14,5%. Del smrekovega (*Picea abies*, Karst.) lesa za raziskavo diplome, smo dali v podjetje Silvaproduct termično modificirati.

Deske debeline 50 mm so bile termično modificirane po postopku Silvapro Wood, ki temelji na postopku z začetnim vakuumom. Maksimalna temperatura lesa med procesom je bila 220 °C, temperaturo pa so pri tej vrednosti vzdrževali 180 minut. Povprečna izguba mase lesa (kot posledica termične modifikacije) je znašala 5,51 %.

### 3.2.2 Priprava lamel

Deske smo po modifikaciji razžagali, jih poravnali in poskobljali na dimenzijo 520 mm x 134 mm x 41 mm. Pripravili smo lamele iz termično modificirane smrekovine in iz tehnično posušene nemodificirane smrekovine.

Da bi zmanjšali razliko ravnovesne vlažnosti v lamelah, smo jih izpostavili standardni klimi (T = 20 °C, RVZ = 65 %).

### 3.2.2.1 Ravnovesna vlažnost lamel

Po končanem kondicioniranju lamel, smo izbranim vzorcem določili ravnovesno vlažnost. Uporabili smo gravimetrično metodo za ugotavljanje vlažnosti lesa. Najprej smo označili in stehali vzorce, tako smo dobili maso vlažnih vzorcev. Sledilo je sušenje vzorcev v sušilniku, ki je trajalo 24 ur pri 103 °C. Tako smo lesu odstranili vso vlažnost. Ponovili smo tehtanje in tako dobili še maso absolutno suhih vzorcev. Uporabili smo formulo (1) in izračunali ravnovesno vlažnost vsakemu vzorcu.

$$u = \frac{m_u - m_o}{m_o} \cdot 100\% \quad \dots(1)$$

$u$ ..... vlažnost lesa (%)

$m_u$ .....masa vlažnega lesa (g)

$m_o$ .....masa absolutno suhega lesa (g)

### 3.2.3 Lepljenje troslojnih lepljencev

Površina namenjena za lepljenje naj bi bila sveža in aktivna, zato smo lamele najprej poskobljali na debelino 39 mm. Lepili smo na hladen način s PVAc, PU in EPI lepilom. Z vsakim lepilom smo zlepili dva lepljenca iz treh lamel. Eden je bil iz termično modificiranega, drugi pa iz nemodificiranega lesa. Pred nanosom PU in EPI lepil smo lepilne površine navlažili z vodno meglico. Parametre lepljenja smo poenotili. Nanos lepila je bil 180 g/m<sup>2</sup>, kar je v našem primeru znašalo 12 g/spoj. Količino nanešenega lepila smo preverjali z tehtnico. Tlak stiskanja je znašal 1,0 N/m<sup>2</sup>. Priporočen čas stiskanja za PVAc lepilo je 20-35 minut, za PU lepilo 45 minut in za EPI lepilo 30 minut pri sobni temperaturi. Naš čas stiskanja je bil v vseh treh primerih 60 minut. Povečali smo ga zaradi vlažnosti modificiranega lesa, ki je bila nižja od priporočene.



Slika 5: Poskobljan nemodificiran in termično modificiran lepljenec

### 3.2.4 Ugotavljanje strižne trdnosti lepilnih spojev

Po sedmih dneh smo lepljence poskobljali in iz njih nažagali strižne preizkušance. Pripravili smo 12 preizkušancev iz vsakega lepljenca. Nato smo jih oštevilčili in označili z oznako lepila, ki je bilo uporabljeno v posameznih primerih (PVAc, PU, EPI). Preizkušanci so bili široki in dolgi 40 mm (velikost strižne površine). Po višini so bili sestavljeni iz treh delov z dvema lepilnima spojema, ki smo ju testirali. Hoteli smo primerjati strižno trdnost lepilnih spojev suhih preizkušancev in strižno trdnost preizkušancev po namakanju v vodi.

Preizkušance smo ponovno izpostavili standardni klimi ( $T = 20\text{ °C}$ ,  $RVZ = 65\%$ ). Po enotedenskem klimatiziranju preizkušancev, smo iz vsakega lepljenca ločili po 6 preizkušancev, ki smo jih pred testiranjem v laboratoriju za 24 ur potopili v vodo. Nato smo jim na 0,01 mm natančno izmerili širine in dolžine lepljenih spojev. Sledilo je ugotavljanje strižne trdnosti lepilnih spojev na univerzalnem testirnem stroju Zwick Z100, po standardu EN 392. Vpetim preizkušancem smo tlačno obremenjevali spoje, dokler niso popustili. Standard EN 392 zahteva, da je spoj obremenjen s silo vsaj 20 sekund preden pride do loma, zato smo hitrost obremenjevanja prilagodili tem pogojem. Na osnovi izmerjene maksimalne sile, površine lepljenega spoja in modifikacijskega faktorja smo izračunali strižno trdnost po formuli (2). Po končanem testiranju smo lome lepilnih spojev vizualno ocenili. Ocenjevali smo delež loma po lesu.

$$f_v = k \frac{F}{A} \quad \dots(2)$$

$f_v$  ...strižna trdnost spoja (N/mm<sup>2</sup>)

F... maksimalna strižna sila (N)

A ... strižna površina spoja (mm<sup>2</sup>)

k ... modifikacijski faktor:  $k = 0,78 + 0,0044 \cdot t$

t ... višina preizkušanca (mm)

Standard EN 392 navaja, da mora biti dolžina vlaken preizkušanca med 40 in 50 mm in da v tem primeru na strižno trdnost spoja vpliva modifikacijski faktor k.



Slika 6: Testiranje strižne trdnosti lepilnih spojev na stroju Zwick Z100

## 4 REZULTATI

### 4.1 VLAŽNOST LESA

Kot je prikazano v preglednici 1 je povprečna ravnovesna vlažnost nemodificirane smrekovine 14,5 %. Za tehnično suh les je bila vlažnost kar visoka. Razlog za to gre pripisati temu, da je bil les deponiran zunaj in tako izpostavljen višji relativni zračni vlažnosti.

Preglednica 1 : Povprečna ravnovesna vlažnost nemodificiranih vzorcev.

	<b>Masa vlažen (g)</b>	<b>Masa suh (g)</b>	<b>Vlažnost (%)</b>
1	12,46	10,90	14,3
2	13,25	11,60	14,2
3	12,95	11,29	14,7
4	15,37	13,38	14,9
		Povprečje	14,5

Povprečna ravnovesna vlažnost modificiranih vzorcev je 4,5 %. Kot je razvidno iz preglednice 2, so razlike med posameznimi modificiranimi vzorci bistveno večje kot pri nemodificiranih.

S termično modifikacijo lesa smo polimerom v celični steni zmanjšali število prostih OH skupin. Zato je tak les manj higroskopen in posledično z manjšo ravnovesno vlago.

Preglednica 2 : Povprečna ravnovesna vlažnost modificiranih vzorcev.

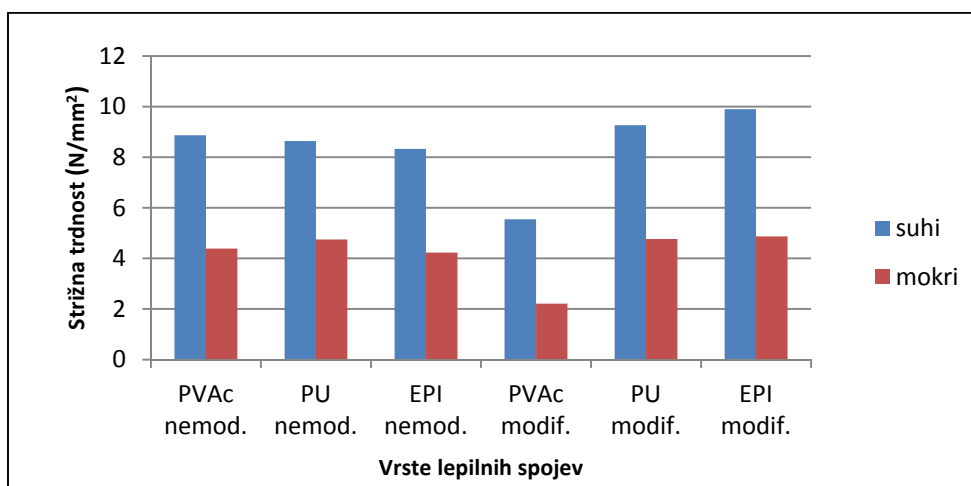
	<b>Masa vlažen (g)</b>	<b>Masa suh (g)</b>	<b>Vlažnost (%)</b>
1	42,58	41,07	3,7
2	43,28	41,67	3,9
3	39,50	37,75	4,6
4	42,54	40,13	6,0
		Povprečje	4,5

## 4.2 KAKOVOST LEPILNIH SPOJEV

Testirali smo strižne trdnosti lepilnih spojev modificiranega in nemodificiranega lesa. Preizkušanci so bili zlepljeni s tremi vrstami lepil. Preglednica 3 prikazuje rezultate povprečne strižne trdnosti lepilnih spojev posameznega lesa zlepljenega z določenim lepilom. Delež loma po lesu pa je bil ocenjen vizualno v odstotkih.

Preglednica 3 : Povprečna strižna trdnost lepilnih spojev v  $N/mm^2$  in deleža loma po lesu v % pri suhih preizkušancih.

	Trdnost ( $N/mm^2$ )		Delež loma po lesu (%)	
	Suhi	Mokri	Suhi	Mokri
<b>Nemodificiran les, PVAc</b>	8,9	4,4	100	93
<b>Nemodificiran les, PUR</b>	8,6	4,7	100	15
<b>Nemodificiran les, EPI</b>	8,3	4,2	100	78
<b>Modificiran les, PVAc</b>	5,8	2,8	100	91
<b>Modificiran les, PUR</b>	8,7	5,0	100	100
<b>Modificiran les, EPI</b>	8,9	3,9	100	80

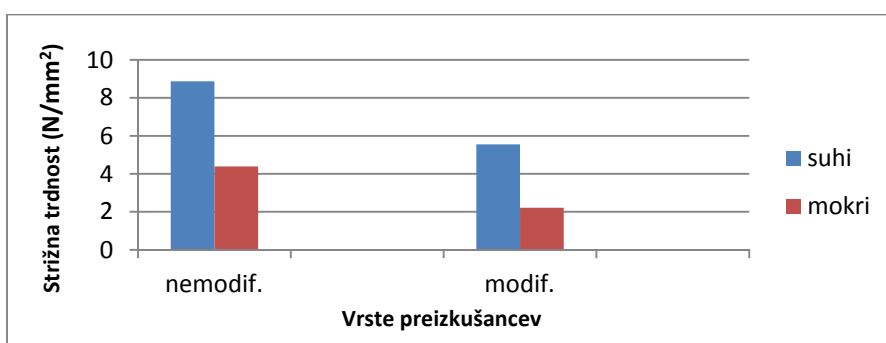


Slika 7: Primerjava strižne trdnosti lepilnih spojev suhih in mokrih nemodificiranih ter suhih in mokrih modificiranih preizkušancev.

#### 4.2.1 Kakovost PVAc lepilnih spojev

Povprečna strižna trdnost spojev nemodificiranih preizkušancev zlepljenih s PVAc lepilom je znašala pri suhih  $8,87 \text{ N/mm}^2$ , pri mokrih pa  $4,39 \text{ N/mm}^2$ . Pri suhih preizkušancih so imeli spoji celo največjo trdnost, trdnost mokrih pa je bila primerljiva s PU in EPI lepilnimi spoji.

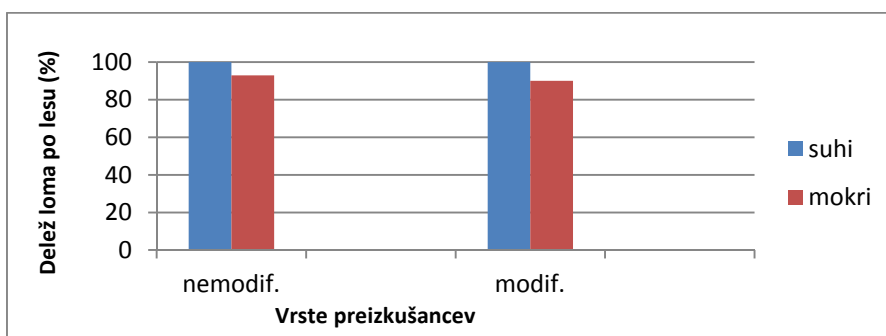
Spoji preizkušancev iz modificiranega lesa, ki so bili zlepljeni s PVAc lepilom, pa so bili zelo slabi. Njihova povprečna strižna trdnost je pri suhih preizkušancih dosegla komaj  $5,55 \text{ N/mm}^2$ , pri mokrih pa samo  $2,21 \text{ N/mm}^2$ . Rezultati modificiranih preizkušancev, ki so bili zlepljeni s PVAc lepilom, so bili pol slabši kot pa pri preizkušancih zlepljenih s PU in EPI lepili (Slika 8).



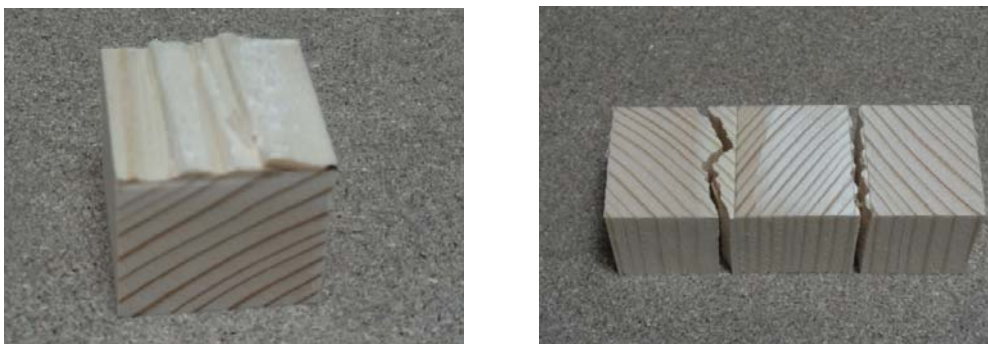
Slika 8: Primerjava povprečnih trdnosti spojev zlepljenih s PVAc lepilom.

Delež loma po lesu pri preizkušancih, ki so bili zlepljeni s PVAc lepilom, je bil visok in je znašal 90-100 %. Pri suhih preizkušancih je bil 100 %, tako pri modificiranem kot pri nemodificiranem lesu. Tudi pri preizkušancih, ki smo jih namakali 24 ur, ni bilo opaziti velike razlike (slika 9).

Opazna je bila razlika v izgledu loma pri nemodificiranih in modificiranih preizkušancih. Lomi pri nemodificiranih so potekali izrazito po lesu (slika 10), z majhnim delom loma po lepilnem spoju. Modificirani pa niso bili tako izraziti, bili so bolj vlaknasti.



Slika 9: Delež loma po lesu pri preizkušancih zlepljenih s PVAc lepilom ocenjen v %.

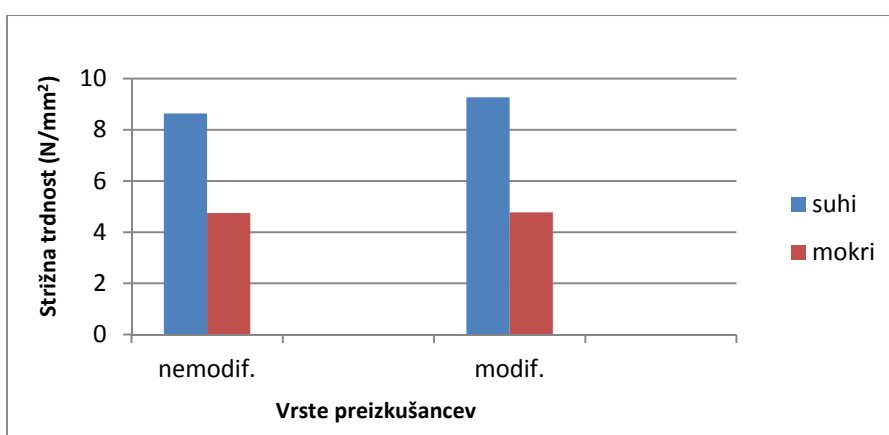


Slika 10: Izrazit lom po lesu pri nemodificiranih suhih preizkušancev.

#### 4.2.2 PU lepilo

Spoji nemodificiranih preizkušancev zlepljenih z PU lepilom so tudi kvalitetni. Njihova povprečna strižna trdnost spojev je znašala pri suhih  $8,64 \text{ N/mm}^2$ , pri mokrih pa  $4,75 \text{ N/mm}^2$ . Spoji suhih preizkušancev so primerljivi z spoji PVAc lepil in so trdnejši od spojev zlepljenih z EPI lepilom.

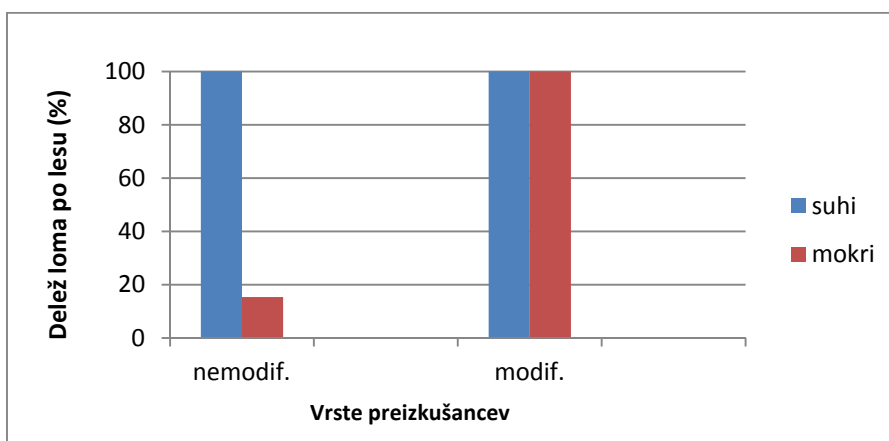
Povprečna strižna trdnost spojev modificiranih preizkušancev je znašala pri suhih  $9,22 \text{ N/mm}^2$ , pri mokrih pa  $4,77 \text{ N/mm}^2$ . Spoji modificiranih preizkušancev so bili celo trdnejši od nemodificiranih, kar prikazuje slika 11. V primerjavi s spoji zlepljenimi s PVAc lepilom so bili skoraj enkrat boljši in primerljivi s spoji zlepljenimi z EPI lepilom.



Slika 11: Primerjava povprečnih trdnosti spojev zlepljenih z PU lepilom.



Delež loma po lesu pri suhih preizkušancih je bil 100 %, tako pri modificiranih kot pri nemodificiranih. Celo mokri modificirani so zadržali visok odstotek loma po lesu 100 %. Odstopal pa je del loma po lesu pri nemodificiranih mokrih preizkušancev, ki je bil izrazito nizek le 15,42 % v primerjavi z 100 % deležem suhih (slika 12). Nemodificirane preizkušance smo narezali iz istega lepljenca, tako, da smo vsakega drugega namenili za potapljanje v vodi. Vzrok za tako veliko razliko med mokrimi in suhimi, bi lahko bila vsebnost vode in nabrekanje preizkušancev, ki so bili za 24 ur potopljene v vodo. Delovanje lesa bi obremenilo spoje, ki bi nato popustili. Ti isti spoji, so imeli najvišjo strižno trdnost med mokrimi nemodificiranimi.

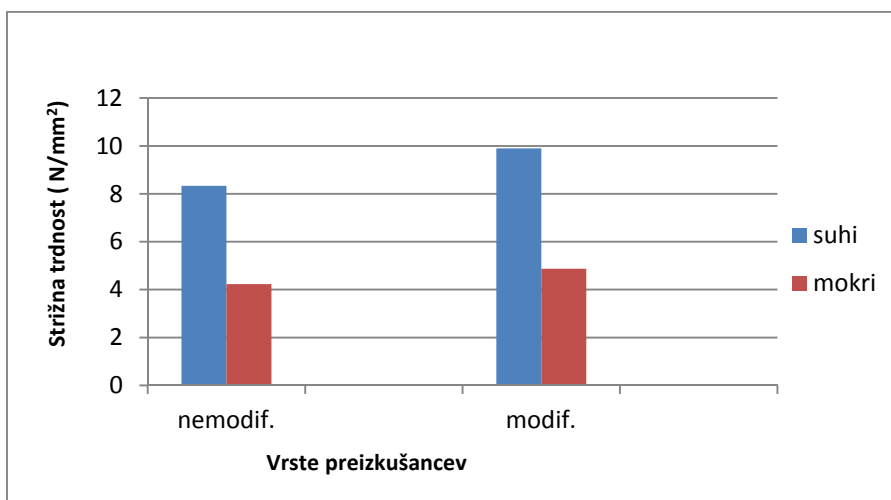


Slika 12: Delež loma po lesu pri preizkušancih zlepljenih z PU lepilom ocenjen v %.

#### 4.2.3 EPI lepilo

Spoji nemodificiranih preizkušancev zlepljenih z EPI lepilom so bili primerljivi, a nekoliko manj trdni od spojev zlepljenih z PVAc in PU lepili. Njihova povprečna strižna trdnost spojev je znašala pri suhih  $8,33 \text{ N/mm}^2$ , pri mokrih pa  $4,23 \text{ N/mm}^2$ .

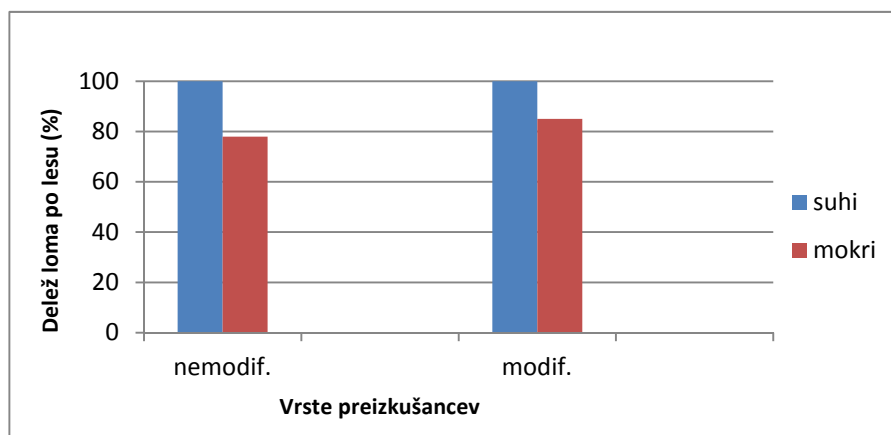
Kot prikazuje slika številka 13 so bili spoji modificiranih preizkušancev zlepljenih z EPI lepilom trdnejši od nemodificiranih. Njihova povprečna strižna trdnost spojev je pri suhih dosegla kar  $9,90 \text{ N/mm}^2$ , pri mokrih pa  $4,87 \text{ N/mm}^2$ . Izkazalo se je da so imeli modificirani spoji zlepljeni z EPI lepilom boljšo trdnost kot preizkušanci zlepljeni z PVAc in PU lepili.



Slika 13: Primerjava povprečnih trdnosti spojev zlepljenih z EPI lepilom.

Pri suhih modificiranih in nemodificiranih preizkušancih smo delež loma po lesu ocenili kot 100 %, medtem ko je bil pri mokrih nekoliko slabši. Pri mokrih modificiranih 85 %, pri nemodificiranih pa 77,92 %. Tudi pri EPI lepilu smo torej opazili, da je bil delež loma po lesu pri mokrih modificiranih večji kot pri nemodificiranih, a ne tako izrazit kot pri PU preizkušancih.

Med mokrimi nemodificiranimi so bili spoji zlepljeni z EPI lepilom primerljivi z PVAc in izrazito boljši od PU preizkušancev. Mokri modificirani preizkušanci, pa so vsi imeli visok delež loma po lesu. Deleži so bili primerljivi, pri EPI pa malo nižji.



Slika 14: Delež loma po lesu pri preizkušancih zlepljenih z EPI lepilom ocenjen v %.

## 5 RAZPRAVA

Klasično leseno okno je izpostavljeno zunanjim vremenskim vplivom, zato ga moramo primerno zaščititi. Termična modifikacija lesa je eden novejših, sodobnih postopkov zaščite lesa, ki je okolju prijazen, ker ne uporablja strupenih kemikalij in zato tudi po uporabi tak les ne predstavlja nevarnega odpadka. Z njo lesu izboljšamo dimenzijsko stabilnost in podaljšamo trajnost.

Z modifikacijo se spremenijo lastnosti površine lesa, kar povzroča težave pri lepljenju okenskega profila, ki je osnovni element za izdelavo okvirjev. Zato smo v diplomski nalogi ugotavljali vpliv termične modifikacije lesa na kakovost lepljenja.

Uporabili smo tri različna lepila (PVAc, PU, EPI), s katerimi smo zlepili termično modificiran in nemodificiran les. Zlepljenim preizkušancem smo potem ugotavljali strižno trdnost spojev in delež loma po lesu po standardu EN 392. Da bi ugotovili vpliv vode na lepilne spoje, pa smo del preizkušancev izpostavili 24 urnem namakanju v vodi s sobno temperaturo in jih nato testirali.

Testiranje nemodificiranih preizkušancev je pokazalo, da so imeli najvišjo strižno trdnost preizkušanci zlepljeni z PVAc lepilom. Strižna trdnost preizkušancev zlepljenih z PU in EPI lepilom, pa je bila za spoznanje nižja.

S termično modifikacijo se je trdnost lepilnim spojem zmanjšala zaradi manjše trdnosti lesa in slabšega utrjevanja lepila, najbolj preizkušancem zlepljenih z PVAc lepilom.

Pri preizkušancih zlepljenih z PU in EPI lepili pa je bila strižna trdnost spojev celo višja od nemodificiranih, kot prikazujeta sliki 11 in 13.

Opazna je bila razlika v izgledu loma pri nemodificiranih in modificiranih preizkušancih. Lomi pri nemodificiranih so potekali izrazito po lesu (slika 10), z majhnim delom loma po lepilnem spoju. Modificirani pa so bili vlaknasti in ne tako izraziti, najbrž zaradi nižje trdnosti lesa.

Tako imenovani mokri preizkušanci, ki smo jih pred testiranjem izpostavili 24-urnemu namakanju, so imeli v povprečju pol nižje strižne trdnosti v primerjavi s suhimi. Eden od možnih vzrokov za to je nabrekanje lesa, zaradi česar v lepilnih spojih nastanejo napetosti in posledično prej popustijo.

Pri suhih preizkušancih so vsa tri lepila zagotovila kvaliteten spoj, kar je potrdil tudi delež loma po lesu, ki je bil v vseh primerih ocenjen kot 100 %.

Najbolj kvalitetne spoje termično modificiranih preizkušancev je zagotovilo EPI lepilo, medtem ko spoji, zlepljeni z PU lepilom, niso bili veliko slabši. Možen vzrok za tako nizko strižno trdnost preizkušancev, zlepljenih z PVAc lepilom, pa gre iskati v slabih pogojih utrjevanja tega lepila. To lepilo utrjuje na fizikalni način z oddajanjem vode, katere pa termično modificiran les ne more v zadostni meri absorbirati.

## 6 SKLEPI

V diplomski nalogi smo proučevali vpliv termične modifikacije smrekovine na kakovost lepljenja. Kakovost lepilnih spojev preizkušancev smo ugotovili z ugotavljanjem strižne trdnosti lepilnega spoja in oceno deleža loma po lesu glede na standard EN 392. Ugotovili smo:

- Lepljenje termično modificiranega lesa je zahtevnejše in težavnejše, saj modifikacija lesu spremeni določene lastnosti, ki vplivajo na utrjevanje lepil in kakovost lepilnih spojev.
- Pri suhih preizkušancih iz nemodificiranega lesa so imeli največjo strižno trdnost spoji lepljeni s PVAc, sledili so spoji s PU in EPI lepilni spoji.
- Pri suhih preizkušancih iz modificiranega lesa so imeli največjo strižno trdnost EPI, nato PU in najmanjšo PVAc lepilni spoji.
- Tako imenovani mokri preizkušanci so imeli strižno trdnost spojev v povprečju pol nižjo od suhih. Najvišja je bila pri modificiranih EPI in PU preizkušancih.
- Lom po lesu je bil pri nemodificiranih preizkušancih zelo izrazit, pri modificiranih pa bolj vlaknast zaradi nižje trdnosti lesa.
- PVAc lepilo se je v primeru mokrih preizkušancev izkazalo kot neprimerno za lepljenje termično modificiranega lesa.

Glede na dobljene rezultate raziskave menimo, da je termično modificirano smrekovino možno kvalitetno zlepiti z EPI in PU lepili. Tako mokri kot suhi preizkušanci teh dveh lepil so imeli najvišje strižne trdnosti.

## 7 POVZETEK

S termično modifikacijo se lesu spremenijo lastnosti površine lesa, kar vpliva na lepljenje lamel v okenske profile, ki so osnovni element za izdelavo oken. Zato smo v diplomski nalogi ugotavljali vpliv termične modifikacije na kakovost lepljenja.

Uporabili smo smrekov les in tri različna lepila (PVAc, PU, EPI), s katerimi smo zlepili termično modificiran in nemodificiran les (tehnično suh). Zlepljenim preizkušancem smo potem ugotavljali strižno trdnost spojev in delež loma po lesu po standardu EN 392. Da bi ugotovili vpliv vode na lepilne spoje, pa smo del preizkušancev izpostavili 24 urnem namakanju v vodi s sobno temperaturo in jih nato testirali.

Največjo strižno trdnost lepilnih spojev modificiranega lesa, je test pokazal pri spojih zlepljenih z EPI lepilom. Sklepamo, da je tako visoka trdnost spoja posledica kemijsko-fizikalnega načina utrjevanja lepila, pri katerem prihaja tudi do penetracije lepila.

Največ težav z utrjevanjem pri lepljenju termično modificiranega lesa, je imelo PVAc lepilo. To lepilo utrjuje fizikalno z oddajanjem vode, katero pa hidrofoben modificiran les slabo absorbira. Spoji zlepljeni s tem lepilom niso primerljivi z ostalima dvema.

Pri termični modifikaciji se smreki spremenijo lastnosti, katere posredno ali pa neposredno vplivajo na utrjevanje lepil in kakovost lepilnih spojev. Rezultati testa strižne trdnosti lesa so pokazali, da je termično modificiran les možno kvalitetno zlepiti s PU in EPI lepili.

Obe vrsti lepil utrjujeta s kemično reakcijo in za utrjevanje potrebujeta višjo vlažnost kot jo ima modificiran les, zato postopek lepljenja prilagodimo zahtevam ter pred nanosom lepila navlažimo lepilne površine.

## 8 VIRI

- Adhesive bonding of plato wood. 2006. Plato International BV (11.05.2006)  
<http://www.platowood.nl/ENG07/Adhesivebonding06.pdf>(28.01.2008)
- Čufar K. 2006. Anatomija lesa. Univerzitetni učbenik. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 185 str.
- Dirol D., Guyonnet R. 1993. The improvement of wood durobilty by rectication process. IRG/WP 00-40162: 16
- Esteres B. M., Pereira H. M. 2009. Wood modification by heat treatment : a review. Bioresources, 4, 1: 370-404
- Hill C. A. S. 2006. Wood modification. Chemical, thermal and other processes. Chichester, John Wiley & Sons: 239
- Kariž M. 2011. Vpliv termične modifikacije lesa na utrjevanje lepil in kakovost lepilnih spojev. Dokt. disertacija. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakultete: 121-126
- Kariž M., Šernek M. 2012. Utrjevanje PVAc lepila pri lepljenju termično modificiranega lesa. Les, 64, 3-4:57-62
- Kariž M., Šernek M. 2008. Lepljenje termično modificiranega lesa. Les, 60, 7/8: 275-282
- Kljun U. 2004. Termična modifikacija lesa v vakuumu. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 36 str.
- Kollmann F., Schneider A. 1963. On the sorption behaviour of heat stabilized wood. Holz Roh- Werkst, 21, 3: 77-85
- Marra A. A. 1992. Technology of wood bonding: principles and practice. New York, Van Nostrand Reinhold: 1-9
- Militz H. 2002 Thermal treatment of wood: European processes and their background. V: 33rd Annual Meeting. 12-17 maj, 2002. IRG/WP 02-40271: 20
- Rep G. 2008. Modificiran les. Lesarski utrip, 14, 2: 22-23
- Rep G., Pohleven F. 2002. Wood modification-a promising method for wood preservation. Modifikacija lesa- obečajúča metoda za zaščitu drva. Drvna Industrija, 52, 2: 71-76
- Sailer M., Rapp A., Leithoff H. 2000. Improved resistance of Scots pine and spruce by appication of an oil- heat treatment. IRG/WP 00-40162:16
- Silvaproduct. Izvirni postopek termične modifikacije lesa.

[http:// www.Silvaprodukt.si/  
default. Asp? Page id=01KKJATZdR0352V92U5C1438001201](http://www.Silvaprodukt.si/default.Asp?Pageid=01KKJATZdR0352V92U5C1438001201)

Sundqvist B., Karlson O., Westermarck U. 2006. Determination of formic- acid and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and its relation to color, strength and hardness. *Wood Sci Technol*, 40: 549-561

Veg T. 2009. Termična modifikacija različnih vrst lesa. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakultete, oddelek za lesarstvo:1-9 str.

Yildiz S. Gezerb D. E., Yildiza U. C. 2006. Mechanical and Chemical behavior of spruce Wood modified by heat. *Bulding and Environment*, 41: 1762-1766

### **ZAHVALA**

Zahvalil bi se mentorju prof. dr. Milanu Šerneku za nasvete in strokovno pomoč. Za pomoč pri tehničnem delu bi se zahvalil asistentu doc. dr. Mirku Karižu in izr. prof. dr. Manji Kitek Kuzman za recenzijo.

Zahvala gre tudi moji ženi, ki mi je stala ob strani in me spodbujala.



## PRILOGE

### PRILOGA A : REZULTATI MERITEV SUHIH PREIZKUŠANCEV

#### Priloga A1 : Rezultati nemodificiranih preizkušancev zlepljenih z PVAc lepilom

Nemodif PVAc	Višina	Širina	Sila	K-faktor	Trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Delež loma po lesu (%)
	39,74	39,64	15228	0,954856	9,2	100
1	39,74	39,64	13743	0,954856	8,3	100
	39,74	39,61	14369	0,954856	8,7	100
3	39,74	39,61	15191	0,954856	9,2	100
	39,76	39,61	14540	0,954944	8,8	100
5	39,76	39,61	14083	0,954944	8,5	100
	39,78	39,62	15660	0,955032	9,5	100
7	39,78	39,62	15091	0,955032	9,1	100
	39,76	39,58	13337	0,954944	8,1	100
9	39,76	39,58	15393	0,954944	9,3	100
	39,78	39,59	14945	0,955032	9,1	100
11	39,78	39,59	13960	0,955032	8,5	100
				Povprečje	8,9	100,00
				St. odklon	0,4	0,00

#### Priloga A2 : Rezultati nemodificiranih preizkušancev zlepljenih z PU lepilom

Nemodif PU	Višina	Širina	Sila	K-faktor	Trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Delež loma po lesu (%)
	39,7	39,62	13447	0,95468	8,2	100
1	39,7	39,62	15580	0,95468	9,5	100
	39,69	39,45	13491	0,954636	8,2	100
3	39,1	40,16	16341	0,95204	9,9	100
	39,87	39,59	13239	0,955428	8,0	100
5	39,87	39,59	10386	0,955428	6,3	100
	39,87	39,84	15230	0,955428	9,2	100
7	39,87	39,84	14287	0,955428	8,6	100
	39,75	39,57	14617	0,9549	8,9	100
9	39,2	40,2	13769	0,95248	8,3	100
	39,71	39,58	14536	0,954724	8,8	100
11	39,2	40,2	16252	0,95248	9,8	100
				Povprečje	8,6	100
				St. odklon	0,9	0

Priloga A3 : Rezultati nemodificiranih preizkušancev zlepljenih z EPI lepilom

Nemodif EPI	Višina	Širina	Sila	K-faktor	Trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Delež loma po lesu (%)
	39,9	39,56	16012	0,95556	9,7	100
1	39,87	39,85	14876	0,955428	8,9	100
	39,84	39,54	13164	0,955296	8,0	100
3	39,84	39,54	13890	0,955296	8,4	100
	39,82	39,55	15305	0,955208	9,3	100
5	39,82	39,55	12218	0,955208	7,4	100
	39,56	39,71	13449	0,954064	8,2	100
7	39,56	39,71	13701	0,954064	8,3	100
	39,61	39,6	12048	0,954284	7,3	100
9	39,61	39,6	13828	0,954284	8,4	100
	39,69	39,58	13090	0,954636	7,9	100
11	39,69	39,58	13239	0,954636	8,1	100
				Povprečje	8,3	100
				St. odklon	0,7	0

Priloga A4 : Rezultati modificiranih preizkušancev zlepljenih z PVAc lepilom

Modif PVAc	Višina	Širina	Sila	K-faktor	Trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Delež loma po lesu (%)
	39,84	40	8210	0,955296	4,9	100
1	39,84	40	8077	0,955296	4,8	100
	39,81	39,98	9206	0,955164	5,5	100
3	39,81	39,98	9837	0,955164	5,9	100
	39,77	39,82	11226	0,954988	6,8	100
5	39,77	39,82	10968	0,954988	6,6	100
	39,79	40	8364	0,955076	5,0	100
7	39,79	40	9244	0,955076	5,6	100
	39,79	40,23	10658	0,955076	6,4	100
9	39,79	40,23	9069	0,955076	5,4	100
	39,72	39,98	11813	0,954768	7,1	100
11	39,72	39,98	8455	0,954768	5,1	100
				Povprečje	5,8	100
				St. odklon	0,8	0

Priloga A5 : Rezultati modificiranih preizkušancev zlepljenih z PU lepilom

Modif PU	Višina	Širina	Sila	K-faktor	Trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Delež loma po lesu (%)
	39,91	40,05	14384	0,955604	8,6	100
1	39,91	40,05	14039	0,955604	8,4	100
	40,12	39,99	14703	0,956528	8,8	100
3	40,12	39,99	15818	0,956528	9,4	100
	39,83	39,75	14065	0,955252	8,5	100
5	39,83	39,75	16263	0,955252	9,8	100
	39,66	39,97	15502	0,954504	9,3	100
7	39,66	39,97	15401	0,954504	9,3	100
	39,72	39,93	14405	0,954768	8,7	100
9	39,72	39,93	15159	0,954768	9,1	100
	39,76	39,79	12919	0,954944	7,8	100
11	39,76	39,79	11965	0,954944	7,2	100
				Povprečje	8,7	100
				St. odklon	0,7	0

Priloga A6 : Rezultati modificiranih preizkušancev zlepljenih z EPI lepilom

Modif EPI	Višina	Širina	Sila	K-faktor	Trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Delež loma po lesu (%)
	39,6	39,93	12334	0,95424	7,4	100
1	39,6	39,93	14050	0,95424	8,5	100
	39,71	40,08	13457	0,954724	8,1	100
3	39,71	40,08	14645	0,954724	8,8	100
	39,68	39,8	12997	0,954592	7,9	100
5	39,68	39,8	15950	0,954592	9,6	100
	39,66	40,03	16413	0,954504	9,9	100
7	39,66	40,03	16464	0,954504	9,9	100
	39,77	40,03	15865	0,954988	9,5	100
9	39,77	40,03	14336	0,954988	8,6	100
	39,76	39,94	15475	0,954944	9,3	100
11	39,76	39,94	14750	0,954944	8,9	100
				Povprečje	8,9	100
				St. odklon	0,8	0

PRILOGA B : REZULTATI MERITEV MOKRIH PREIZKUŠANCEV

Priloga B1 : Rezultati nemodificiranih preizkušancev zlepljenih z PVAc lepilom

Nemodif PVAc	Višina	Širina	Sila	K-faktor	Trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Delež loma po lesu (%)
	39,74	39,64	7111	0,954856	4,3	95
2	39,74	39,64	6862	0,954856	4,2	80
	39,74	39,61	7214	0,954856	4,4	85
4	39,74	39,61	7396	0,954856	4,5	90
	39,76	39,61	7375	0,954944	4,5	90
6	39,76	39,61	7909	0,954944	4,8	95
	39,78	39,62	7547	0,955032	4,6	100
8	39,78	39,62	6577	0,955032	4,0	90
	39,76	39,58	6493	0,954944	3,9	90
10	39,76	39,58	7537	0,954944	4,6	100
	39,78	39,59	7194	0,955032	4,4	100
12	39,78	39,59	7755	0,955032	4,7	100
				Povprečje	4,4	93
				St. odklon	0,3	6

Priloga B2 : Rezultati nemodificiranih preizkušancev zlepljenih z PU lepilom

Nemodif PU	Višina	Širina	Sila	K-faktor	Trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Delež loma po lesu (%)
	39,74	39,64	7101	0,954856	4,3	5
2	39,74	39,64	8140	0,954856	4,9	25
	39,75	39,56	7228	0,9549	4,4	0
4	39,75	39,56	8289	0,9549	5,0	20
	39,73	39,63	7409	0,954812	4,5	5
6	39,73	39,63	8089	0,954812	4,9	25
	39,66	39,63	7880	0,954504	4,8	10
8	39,66	39,63	8156	0,954504	5,0	25
	39,77	39,54	8045	0,954988	4,9	10
10	39,77	39,54	7983	0,954988	4,9	5
	39,71	39,63	7944	0,954724	4,8	50
12	39,71	39,63	7631	0,954724	4,6	5
				Povprečje	4,8	15
				St. odklon	0,2	13

Priloga B3 : Rezultati nemodificiranih preizkušancev zlepljenih z EPI lepilom

Nemodif EPI	Višina	Širina	Sila	K-faktor	Trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Delež loma po lesu (%)
	39,73	39,63	7950	0,954812	4,8	95
2	39,73	39,63	6512	0,954812	4,0	90
	39,71	39,57	7718	0,954724	4,7	85
4	39,71	39,57	5847	0,954724	3,6	80
	39,73	39,62	7798	0,954812	4,7	90
6	39,73	39,62	5707	0,954812	3,5	65
	39,69	39,62	7182	0,954636	4,4	85
8	39,69	39,62	6823	0,954636	4,1	80
	39,7	39,59	7433	0,95468	4,5	85
10	39,7	39,59	6951	0,95468	4,2	60
	39,68	39,59	7470	0,954592	4,5	70
12	39,68	39,59	6161	0,954592	3,7	50
				Povprečje	4,2	77
				St. odklon	0,5	13

Priloga B4 : Rezultati modificiranih preizkušancev zlepljenih z PVAc lepilom

Modif PVAc	Višina	Širina	Sila	K-faktor	Trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Delež loma po lesu (%)
	39,75	39,62	2819	0,9549	1,7	80
2	39,75	39,62	4208	0,9549	2,6	100
	39,77	39,66	6360	0,954988	3,9	100
4	39,77	39,66	5014	0,954988	3,0	100
	39,77	39,64	3866	0,954988	2,3	70
6	39,77	39,64	3156	0,954988	1,9	60
	39,73	39,62	4307	0,954812	2,6	100
8	39,73	39,62	3646	0,954812	2,2	90
	39,79	39,67	4952	0,955076	3,0	100
10	39,79	39,67	3923	0,955076	2,4	95
	39,73	39,63	7666	0,954812	4,7	100
12	39,73	39,63	4898	0,954812	3,0	100
				Povprečje	2,8	91
				St. odklon	0,8	13

Priloga B5 : Rezultati modificiranih preizkušancev zlepljenih z PU lepilom

Modif PU	Višina	Širina	Sila	K-faktor	Trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Delež loma po lesu (%)
	39,69	39,63	9189	0,954636	5,6	100
2	39,69	39,63	9571	0,954636	5,8	100
	39,71	39,69	8913	0,954724	5,4	100
4	39,71	39,69	8697	0,954724	5,3	100
	39,74	39,63	9292	0,954856	5,6	100
6	39,74	39,63	8713	0,954856	5,3	100
	39,74	39,6	8577	0,954856	5,2	100
8	39,74	39,6	7859	0,954856	4,8	100
	39,75	39,68	46	0,9549	0,0	100
10	39,75	39,68	9066	0,9549	5,5	100
	39,77	39,62	8167	0,954988	5,0	100
12	39,77	39,62	10144	0,954988	6,2	100
				Povprečje	5,0	100
				St. odklon	1,5	0

Priloga B6 : Rezultati modificiranih preizkušancev zlepljenih z EPI lepilom

Modif EPI	Višina	Širina	Sila	K-faktor	Trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Delež loma po lesu (%)
	39,67	39,71	5876	0,954548	3,6	75
2	39,67	39,71	5356	0,954548	3,3	60
	39,71	39,66	5578	0,954724	3,4	75
4	39,71	39,66	6617	0,954724	4,0	70
	39,74	39,64	6172	0,954856	3,7	75
6	39,74	39,64	6282	0,954856	3,8	70
	39,7	39,66	6843	0,95468	4,2	90
8	39,7	39,66	8033	0,95468	4,9	85
	39,77	39,66	7289	0,954988	4,4	95
10	39,77	39,66	6626	0,954988	4,0	90
	39,79	39,6	6477	0,955076	3,9	90
12	39,79	39,6	6767	0,955076	4,1	80
				Povprečje	3,9	79
				St. odklon	0,4	10

NIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Robert BOŽIČ

**KAKOVOST LEPILNEGA SPOJA OKENSKIH  
PROFILOV IZ TERMIČNO MODIFICIRANE  
SMREKOVINE**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2016