

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA

ODDELEK ZA LESARSTVO

Izak KALČIČ

**OMOČITEV IN ADHEZIJA PRI LEPLJENJU HITRO RASTOČIH LESNIH VRST**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski študij

**WETTING AND ADHESION AT GLUING FAST GROWING TIMBER**

GRADUATION THESIS

Higher professional studies

Ljubljana, 2006

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za žagarstvo in lesna tvoriva Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja visokošolske strokovne diplomske naloge imenoval doc. dr. Milana Šerneka, za recenzentko pa prof. dr. Katarino Čufar.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Izak KALČIČ

Vera v skrivnostno moč lesa in v svetost nekaterih dreves je stoletja stara dediščina. Čarobna moč lesa prinaša srečo, kaže nam pot do zdravja, zakladov in lepote. Varuje nas pred strelo, rešuje zaklete duše in prerokuje usodo.

(Dušica Kunaver)

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Vs
DK	UDK 630*824.832
KG	fenolno lepilo/kontaktni kot/strižna trdnost/adhezija
AV	KALČIČ, Izak
SA	ŠERNEK, Milan (mentor)/ČUFAR, Katarina (recenzentka)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2006
IN	OMOČITEV IN ADHEZIJA PRI LEPLJENJU HITRO RASTOČIH LESNIH VRST
TD	Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)
OP	IX, 42 str., 9 pregl., 22 sl., 16 vir.
IJ	Sl
JI	sl/en
AI	Raziskovali smo omočitev in adhezijo pri lepljenju hitro rastočih lesnih vrst. Uporabili smo fenol-formaldehidno lepilo GP 3110 in 5 pri nas komercialno manj pomembnih lesnih vrst: brezo, črno jelšo, topol, zeleni bor in vrbo. S pomočjo mikroskopa, digitalnega fotoaparata in računalnika smo ugotavljali kontaktni kot kapljice fenol-formaldehidnega lepila na posameznih lesnih vrstah. Vroče smo zlepili po 2 lameli ter iz takih lepljenecv izdelali preizkušance za ugotavljanje strižne trdnosti. Te smo pred meritvijo izpostavili različnim pogojem kot so klimatiziranje, namakanje v vodi, kuhanje in sušenje. Strižni preizkus smo izvajali s pomočjo univerzalnega testirnega stroja Zwick Z100. Ugotovili smo, da se kontaktne kote lepila med posameznimi lesnimi vrstami niso veliko razlikovali. Najmanjši kontaktni kot lepila smo izmerili pri zelenem boru (najmanjša gostota lesa), največjega pa pri brezi (največja gostota lesa). Na strižno trdnost lepilnega spoja preizkušancev je vplivala priprava oziroma pogoji pri katerih smo tretirali in testirali preizkušance. Na trdnost lepilnega spoja je vplivala tudi gostota lesa.

## KEY WORDS DOCUMENTATION

- DN Vs
- DC UDC 630\*824.832
- CX phenol glue/contact angle/shear strength/adhesion
- AU KALČIČ, Izak
- AA ŠERNEK, Milan (supervisor)/ČUFAR, Katarina (co-advisor)
- PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c.VII/34
- PB University of Ljubljani, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Tecnology
- PY 2006
- TI WETTING AND ADHESION AT GLUING OF FAST GROWING TIMBER SPECIES
- DT Graduation Thesis (Higher professional studies)
- NO IX, 42 p., 9 tab., 22 fig., 16 ref.
- LA Sl
- AL sl/en
- AB Wetting and adhesion at gluing of fast growing species was studied. Phenol-formaldehyde glue GP 3110 and 5 commercially less important wood species (birch, black alder, poplar, green pine and willow) were used. A microscope, digital photo camera and computer were used to find the contact angle of phenol-formaldehyde glue drop on specific wood species. 2 lamellas were hot glued together. Testers made for measuring the shear strength were exposed to different conditions (acclimatisation, soaking in water, boiling). The shear test was performed with Zwick Z100 universal testing machine. Contact angles did not differ much among specific species. The lowest contact angle was measured at green pine wood (lowest wood density), the highest at birch wood (highest wood density). It was also found that the shear strength of the adhesive bond of the testers was influenced by the conditions under which they were treated and tested. Wood density also influenced shear strength.

## KAZALO VSEBINE

	str.
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA .....	1
1.2 CILJ NALOGE.....	2
1.3 DELOVNE HIPOTEZE .....	2
<b>2 SPLOŠNI DEL.....</b>	<b>3</b>
2.1 LEPLENJE LESA .....	3
<b>2.1.1 Razdelitev sintetičnih lepil .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1.2 Lastnosti lepil .....</b>	<b>4</b>
2.2 OMOČENJE IN KONTAKTNI KOT .....	6
<b>2.2.1 Površinska napetost in omočenje .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2.2 Kontaktni kot .....</b>	<b>9</b>
2.2.2.1 Definicija kontaktnega kota.....	9
2.2.2.2 Način merjenja kontaktnega kota .....	9
2.3 PREGLED OBJAV .....	11
2.4 LASTNOSTI LESA UPORABLJENIH LESNIH VRST .....	12
<b>3 MATERIAL IN METODE .....</b>	<b>15</b>
3.1 UPORABLJENE LESNE VRSTE .....	15
3.2 ZASNOVA EKSPERIMENTA.....	15
3.3 UPORABLJENO LEPILO .....	17
3.3.1 Lastnosti fenol-formaldehidnega lepila (GP 3110) .....	17
3.4 PRIPRAVA LAMEL.....	17
3.5 UGOTAVLJANJE STRIŽNE TRDNOSTI LEPILNEGA SPOJA.....	19
3.6 UGOTAVLJANJE KONTAKTNEGA KOTA FENOL-FORMALDEHIDNEGA LEPILA .....	20
3.7 UGOTAVLJANJE VLAGE V LESU .....	23
3.8 UGOTAVLJANJE GOSTOTE LESNIH VRST .....	23
<b>4 REZULTATI.....</b>	<b>25</b>
4.1 REZULTATI MERJENJA KONTAKTNEGA KOTA.....	25
4.1.1 Grafični prikaz kontaktnega kota fenol – formaldehidnega lepila po lesnih vrstah.....	26
4.2 REZULTATI MERITEV STRIŽNE TRDNOSTI LEPILNEGA SPOJA .....	27
4.2.1 Grafični prikazi rezultatov strižne trdnosti po lesnih vrstah po pripravi A1 .....	28
4.2.2 Grafični prikazi rezultatov strižne trdnosti po lesnih vrstah po pripravi A2.....	30
4.2.3 Grafični prikazi rezultatov strižne trdnosti po lesnih vrstah po pripravi A3.....	32
4.2.4 Grafični prikazi rezultatov strižne trdnosti po lesnih vrstah po pripravi A4.....	34
4.2.5 Grafični prikazi rezultatov strižne trdnosti po lesnih vrstah po pripravi A5.....	36

<b>5</b>	<b>RAZPRAVA.....</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>SKLEPI .....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>POVZETEK.....</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>VIRI .....</b>	<b>42</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Število strižnih preizkušancev .....	18
Preglednica 2: Izpostavitve strižnih preizkušancev različnim klimam .....	19
Preglednica 3: Kontaktni kot ( $^{\circ}$ ) fenol – formaldehidnega lepila na različnih lesnih površinah .....	25
Preglednica 4: Strižna trdnost in delež lomov po lesu za strižni preizkus po načinu priprave strižnih preizkušancev po A1 .....	27
Preglednica 5: Strižna trdnost in delež lomov po lesu za strižni preizkus po načinu priprave strižnih preizkušancev po A2 .....	29
Preglednica 6: Strižna trdnost in delež lomov po lesu za strižni preizkus po načinu priprave strižnih preizkušancev po A3 .....	31
Preglednica 7: Strižna trdnost in delež lomov po lesu za strižni preizkus po načinu priprave strižnih preizkušancev po A4 .....	33
Preglednica 8: Strižna trdnost in delež lomov po lesu za strižni preizkus po načinu priprave strižnih preizkušancev po A5 .....	35



## KAZALO SLIK

	Str.
Slika 1: Oblika tekočinske kapljice, ki ne omoči površine.....	7
Slika 2: Oblika tekočinske kapljice, ki omoči površino .....	7
Slika 3: Prikaz opreme za neposredno ugotavljanje kota omočenja (Šernek, 2004).....	10
Slika 4: Prikaz neposrednega merjenja kontaktnega kota .....	10
Slika 5: Posredno merjenje kontaktnega kota.....	11
Slika 6: Les zelenega bora .....	14
Slika 7: Klima komora za kondicioniranje lesa v normalnih pogojih (T = 20 °C, φ = 65 %) .....	16
Slika 8: Prikaz sušenja lesa v laboratoriju (T = 22° C, 35 – 55 % relativna zračna vlažnost) .....	16
Slika 9: Prikaz priprave lamel za merjenje kontaktnega kota in lepljenje.....	17
Slika 10: Napaka pri lepljenju lamel vrbe .....	18
Slika 11: Napaka pri lepljenju lamel zelenega bora .....	19
Slika 12: Izgled in dimenzije strižnega preizkušanca v mm. ....	20
Slika 13: Oprema za ugotavljanje kontaktnega kota .....	21
Slika 14: Način merjenja dimenzij kapljice v programu IMAGE – Pro Plus 4.5 .....	22
Slika 15: Merjenje dimenzij kontrolnih vzorcev za določevanje gostote.....	23
Slika 16: Grafični prikaz kontaktnih kotov v odvisnosti od časa merjenja po lesnih vrstah.....	26
Slika 17: Strižne trdnosti (stolpci) pri različnih lesnih vrstah ter prikaz loma po lesu (kvadratki) po pripravi A1 .....	28
Slika 18: Strižne trdnosti (stolpci) pri različnih lesnih vrstah ter prikaz loma po lesu (kvadratki) po pripravi A2.....	30
Slika 19: Strižne trdnosti (stolpci) pri različnih lesnih vrstah ter prikaz loma po lesu (kvadratki) po pripravi A3 .....	32
Slika 20: Strižne trdnosti (stolpci) pri različnih lesnih vrstah ter prikaz loma po lesu (kvadratki) po pripravi A4.....	34
Slika 21: Strižne trdnosti (stolpci) pri različnih lesnih vrstah ter prikaz loma po lesu (kvadratki) po pripravi A5.....	36

## 1 UVOD

### 1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

V lesarstvu, kot gospodarski dejavnosti, ki se ukvarja z nabavo, obdelavo in predelavo lesa, je lepljenje zelo pomembna faza, saj skoraj ni izdelka, ki ne bi bil lepljen. Lepljeni izdelki se uporabljajo v različnih klimatskih razmerah, zato morajo biti lepilni spoji zelo kvalitetni. Kvaliteto spoja dosežemo s pravim izborom lepila, z njegovo zadostno količino in pravo viskoznostjo, ki je pomembna za dobro razlivanje lepila. Lastnosti lepljenega izdelka so odvisne tudi od lastnosti samega lepila, ki mora biti vodoodporno, elastično, odporno na insekte, glive, ogenj, kemikalije, svetlobo idr. Prav tako pa je pomembno, da lepilo ni predrago.

Razlogi za lepljenje so: izboljšanje izkoristka lesa, izboljšanje mehanskih lastnosti ter povečanje dimenzijske stabilnosti lesa. Z lepljenjem povečamo tudi obseg uporabnosti lesenih izdelkov.

Lepilo mora biti sposobno penetrirati do lesnih vlaken in jih omočiti, pri čemer pa ne sme priti do kemijske reakcije s komponentami lesa. Na kvaliteto lepilnega spoja vplivajo predvsem omočitev lesa z lepilom, penetracija lepila v les in utrjevanje lepila.

Vsaka vrsta lesa ima glede lepljenja svoje zahteve, zato je prav pri lepljenju med drugim mogoče opaziti veliko razliko med hitro rastočimi lesnimi vrstami in lesnimi vrstami, ki imajo zelo majhen prirastek.

Lepljenje lesa hitro rastočih lesnih vrst in lesa, ki ga proizvajajo na plantažah, je praviloma zahtevno, saj je med drugim prisotnega tudi veliko juvenilnega lesa, kjer so letnice manj izrazite, pravi kasni les pa manjka. Poleg tega imajo hitro rastoče vrste običajno nižjo gostoto lesa, kar se odraža v večji penetraciji lepila v les in s tem je verjetno tudi nižja trdnost lepilnega spoja, zaradi česar lesne vrste z večjim prirastkom v proizvodnji pogosto zgostijo z različnimi postopki. Ti vplivajo na zvišanje mehanske trdnosti lepilnega spoja.

Pri tem se površina lesa in njegova struktura bistveno spremenita, kar lahko vpliva na omočitev lepila in strižno trdnost lepilnega spoja.

## 1.2 CILJ NALOGE

Cilja diplomske naloge sta:

- proučiti omočitev površine lesa ter adhezijo hitro rastočih lesnih vrst z lepilom in
- ugotoviti vpliv omočitve lepila na trdnost lepilnega spoja.

## 1.3 DELOVNE HIPOTEZE

Predvidevam, da bo:

- omočitev površine lesa odvisna od lastnosti lesa različnih lesnih vrst,
- trdnost lepilnega spoja odvisna od omočitve lepila in od načina priprave (A1, A2, A3, A4, A5) strižnih preizkušancev pred testiranjem.

## 2 SPLOŠNI DEL

### 2.1 LEPLENJE LESA

Utrjevanje sintetičnih lepil temelji na številnih fizikalnih in kemijskih osnovah, pri čemer obstaja še veliko nejasnosti. Gre za delovanje sil med delci lepila in lesa, med delci lepila, za delovanje na mejnih površinah, za pH vrednost lepila, koloidne raztopine in druge pojave.

Sintetična lepila so boljša od naravnih lepil, ker:

1. omogočajo mnogo hitrejšo proizvodnjo kot naravna lepila,
2. je poraba lepila na enoto površine (m<sup>2</sup>) precej manjša,
3. imajo s sintetičnimi lepili zlepljeni deli precej višje trdnosti,
4. sintetična lepila omogočajo hitrejšo nadaljnjo obdelavo zlepljenih delov,
5. je odpornost proti vlagi in vodi, soncu, zmrzovanju itn. pri večini sintetičnih lepil mnogo večja kot pri naravnih lepilih,
6. so sintetična lepila odporna tudi proti bakterijam, glivam in insektom.

#### 2.1.1 Razdelitev sintetičnih lepil

Glede na surovinsko sestavo delimo sintetična lepila na:

- a) polivinil-acetatna lepila, kjer je glavna surovina polivinil-acetat,
- b) sečninsko-formaldehidna lepila, kjer sta glavni surovini sečnina in formaldehid,
- c) fenol-formaldehidna lepila, kjer sta osnova fenol in formaldehid,
- d) melamin-formaldehidna, kjer sta osnova melamin in formaldehid.

Glede na osnovne reakcije delimo lepila na:

- a) polimerizacijska lepila (PVA - polivinil-acetatno lepilo...),
- b) polikondenzacijska lepila (MF – melamin-formaldehidno lepilo, FF – fenol-formaldehidno lepilo, UF – urea-formaldehidno lepilo, ...),
- c) poliadiacijska lepila (PUR – poliuretanska lepila, ...).

Po načinu vezanja oziroma po lastnostih lepilnega filma, lepila delimo na:

- a) plastomerna (termoplastična) in
- b) duromerna (duroplastična) lepila.

### 2.1.2 Lastnosti lepil

Lepilne lastnosti neke snovi so odvisne od fizikalnih in kemijskih sprememb snovi oziroma reakcij ter velikosti makromolekul in mehanskih ter kemijskih lastnosti makromolekularnih snovi. Poznamo različne reakcije, katerih namen je, da iz nizko molekularnih snovi ali monomerov nastanejo visoko molekulske snovi ali polimeri. Obvezen pogoj za te polireakcije, je dvofunkcionalna vez monomerne molekule. Za oblikovanje polimerov poznamo predvsem naslednje reakcije:

- a) polimerizacijo,
- b) polikondenzacijo in
- c) poliadiacijo.

Pri vseh treh pride do polireakcij v navzočnosti katalizatorjev in drugih dodatkov.

**Polimerizacija** je reakcija med istovrstnimi ali raznovrstnimi nenasičenimi monomernimi molekulami z vsaj eno dvojno ali trojno vezjo. Ta reakcija poteka v treh stopnjah. V prvi se nenasičene vezi razcepijo in nastanejo vsaj dvovalentni monomerni radikali. Ti se v drugi

stopnji vežejo med seboj in tvorijo makroradikale, ki se v tretji stopnji zaključijo z makromolekulami. Pri navedeni reakciji se ne odceplja in ne izstopa nobena snov.

**Polikondenzacija** je reakcija med dvema ali med več različnimi monomeri, pri čemer nastanejo makromolekule. Pri reakciji vedno izstopa neka enostavna snov, kot npr. voda, amoniak, žveplo idr.

**Poliadicija** je reakcija, ki poteka tako, da se atom nekega elementa (npr. vodika) enega monomera premesti na drug monomer. Posledica je nastanek radikalov, ki se vežejo med seboj. Pri poliadiciji ne izstopajo nobene snovi.

Med lepili, ki nastanejo s polimerizacijo ali poliadicijo, so bistvene razlike. Polimer je zelo velika molekula oziroma makromolekula, sestavljena iz malih, preprostih kemičnih enot oziroma molekul (monomerov). Produkti polikondenzacije in poliadicije pa niso končani že v fazi priprave lepila. Med samim lepilnim procesom se namreč kemijske reakcije nadaljujejo. Druga bistvena razlika je v tem, da polimerizacijska lepila lepijo samo fizikalno, polikondenzacijska lepila pa poleg tega tudi kemijsko. Zato so polimerizacijska lepila pod vplivom toplote izpostavljena spremembam agregatnega stanja. Glede na navedeno jih imenujemo **plastomeri**, za razliko od **duromerov**, ki se pod toplotnim vplivom ne spreminjajo več (Resnik, 1989).

Fenol – formaldehidna lepila so na voljo v tekoči, prašnati in trdni obliki (filmi). Po Resniku (1989) se v obliki raztopin, se glede na namen uporabe in različno gostoto uporabljajo za:

- montažna lepljenja kot visokomolekularne v vodi topne smole z 80% suhe snovi; vežejo pri sobni temperaturi, za razredčenje pa se uporabljajo organska topila,
- slojnata lepljenja; imajo 50 do 75 % suhe snovi; utrjevanje poteka pri 135 do 160°C,
- vlaknene in iverne plošče; uporabljajo nizkomolekularne smole gostote do 50 % suhe snovi, ki vežejo pri 180 do 200 %.

Področje uporabe fenol – formaldehidnega lepila je široko, omejitveni faktor pa je včasih njihova temna barva. Najpogosteje ga uporabljajo za lepljenje lesnih plošč, lesenih elementov v gradbeništvu, za čolne, jadrnice, smuči idr.

Lepilni spoji s fenol – formaldehidnim lepilom so odporni na hladno in vročo vodo, na večino kislin, olj, masti in organskih topil, na glivice in bakterije. Pri temperaturi nad 180°C fenolno lepilo veže brez utrjevalca. Pri temperaturi pod 20°C obstaja nevarnost nekvalitetnih spojev. Razpadanje lepilnega spoja se začne nad 220°C. Kljub temu, da so spoji trdnjši od lesa, uporabo fenol – formaldehidnih lepil omejuje njihova strupenost in neprijeten vonj. Fenol – formaldehidno lepilo je manj občutljivo za debelino spoja, je bolj elastično in povzroča manjšo obrabo rezil. Običajno ga nanašamo z valji ali brizganjem, pogosto ločeno smolo in utrjevalec. Pri montažnem lepljenju zadostuje tlak 2 bara, pri vezanih ploščah 12 do 15 barov in pri oblikovanih ploščah 20 do 25 barov. Nanosi so od 100 do 150 g/m, vlaga lesa pa 6 do 14 %.

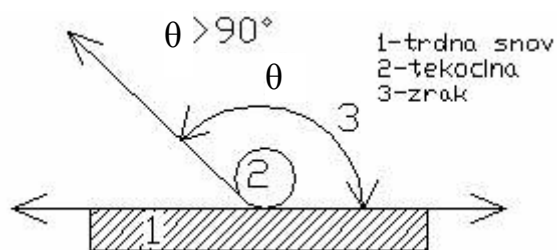
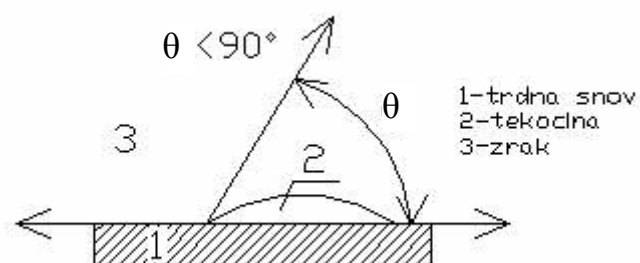
## 2.2 OMOČENJE IN KONTAKTNI KOT

### 2.2.1 Površinska napetost in omočenje

Z omočitvijo površine, ki je pogoj za kvalitetno lepljenje, je ustvarjen neposredni stik med lepilom in lepljencem. Kot lepilo je načeloma uporabna vsaka snov, ki zadosti omoči površino in v lepilnem sloju preide iz tekočega v trdo stanje. Omakalnost tekočine je povezana s površinsko napetostjo, ki je rezultat delovanja molekulskih sil v tekočini. V povezavi s površinsko napetostjo je tudi pojav kapilarnosti (Resnik, 1989).

Posledice površinske napetosti so: oblikovanje kapljic, poroznih snovi z veliko površino, koloidnih kristalov, tankih kožic, niti, itd.

Površinsko napetost lahko ponazorimo z delovanjem sil na meji med tekočino in zrakom, tekočino ter trdim telesom in zrakom.

Slika 1: Oblika tekočinske kapljice, ki **ne omoči** površineSlika 2: Oblika tekočinske kapljice, ki **omoči** površino

Na sliki 1 in 2 je prikazan kontaktni kot  $\theta$ . Če je kot  $\theta$  manjši od  $90^\circ$  (slika 2) to pomeni, da se je lepilo dobro razlilo po površini, kar je osnovni pogoj za kvaliteten lepilni spoj. Pri kontaktnem kotu, ki pa je večji od  $90^\circ$  (slika 1), pa lahko v fazi lepljenja, ko pride do prenosa lepila, nastanejo zračni mehurčki, ki lahko v fazi stiskanja povzročijo, da na mestih kjer je ujet zrak, lepilni spoj ni dober. Kontaktni koti se razlikujejo med sabo predvsem zaradi različne površinske napetosti, viskoznosti lepila in fizikalno-kemijske narave površine, ki jo lepimo. Omakalnost neke tekočine je tem boljša, čim manjši je kontaktni kot  $\theta$ .

Površinska napetost linearno pada z večanjem temperature tako, da je pri kritični temperaturi enaka nič. Pri večji temperaturi je manjša tudi viskoznost, zaradi česar pride do boljše omočitve oziroma manjšega kontaktnega kota.

Za dobro zlepljenost pa sta pomembna dva pojavi, in sicer **adhezija** in **kohezija**.



**ADHEZIJO** v splošnem razumemo kot površinski fenomen, ki predstavlja privlačnost oziroma sprejemnost med površinami snovi. Definirana je kot stanje v katerem sta dve površini povezani med seboj zaradi delovanja površinskih sil. Pri lepljenju lesa lahko te sile nastanejo na osnovi treh mehanizmov (Šernek, 2004). Penetracija lepila v pore in razpoke lesa ter utrditve lepila predstavlja sidra, ki povežejo dve površini poroznega materiala med sabo. To adhezijo imenujemo **mehansko**. Vendar pa za trdno povezavo zlepljenih delov ne zadošča samo mehanska adhezija, ampak moramo poleg mehanske adhezije upoštevati tudi **fizikalno adhezijo**. To je skupek vseh sil, kot so: površinska napetost in omakalnost, viskoznost, kapilarne in elektrostatične sile, idr. S pojmom **adhezija** tako označujemo vse sile, ki se pojavljajo na mejnih ploskvah med lepilom in lesom. Posamezne komponente adhezijjskih sil je zelo težko določiti, zaradi česar je glede lepil mogoče zaključiti (Mervič, 1962):

- kot lepila so uporabne le tekočine, ki imajo omakalne sposobnosti,
- lepila je potrebo nanašati na les v tekočem ali skoraj tekočem stanju (lepilni film),
- lepilna vez je tem boljša, čim bolj lepilo omoči les.

**KOHEZIJA** je pojav, ki nastaja v samem lepilnem filmu. Ti so rezultati privlačnih sil med istovrstnimi molekulami, t.j. med molekulami samega lepila, ki jih v fiziki imenujemo **kohezija**, v mehanski teoriji pa trdnost. Sile, ki prenašajo natezne in strižne napetosti, so kohezijske sile lepilnega filma.

Zahteve za lepljive snovi na osnovi navedenih pojavov so (Mervič, 1962):

- v tekoči obliki naneseno lepilo se mora v spoju utrditi v tako trdno telo, da zmore njegova kohezija premagovati vsaj enako velike obremenitve kot zlepljen les,
- kohezija doseže najvišjo vrednost šele v utrjenem filmu,
- kohezija je pri makromolekularnih lepilih premosorazmerna z velikostjo molekul,
- nastanek trdnega lepilnega filma in s tem povezano povečanje kohezije spremljajo fizikalno – kemijski procesi v lepilu.

## 2.2.2 Kontaktni kot

### 2.2.2.1 Definicija kontaktnega kota

Kontaktni kot je definiran s kotom, ki ga oklepata tangenta na površino kapljice in podlaga na kateri je kapljica nanescna (Šernek, 2004).

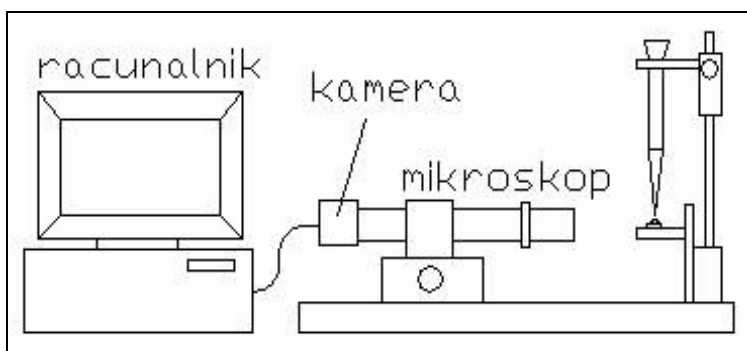
### 2.2.2.2 Način merjenja kontaktnega kota

Za merjenje kontaktnega kota uporabljamo več metod. Delimo jih na:

- stacionarne in
- kontinuirane metode.

Za **stacionarne metode** je značilno, da se najprej izdelata slika kapljice lepila, nato pa se na njeni podlagi izmeri kontaktni kot. Stacionarno merjenje kontaktnih kotov lahko izvajamo na več načinov, in sicer:

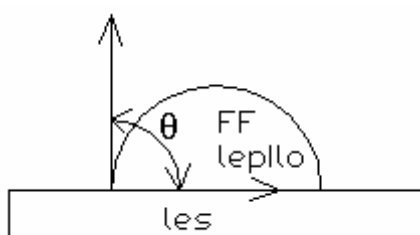
- 1) **z uporabo navadne CCD video kamere.** Težavnost te metode se kaže v naknadnem prenašanju podatkov v računalnik in v merjenju kontaktnih kotov.
- 2) **z uporabo digitalne kamere, ki je priključena na računalnik** (slika 3). Ta način merjenja nam omogoča takojšnje prenašanje slike v računalnik, merjenje kontaktnih kotov pa je s pomočjo specialnih računalniških programov zelo enostavno.



Slika 3: Prikaz opreme za neposredno ugotavljanje kota omočenja (Šernek, 2004)

Pri **kontinuiranih metodah** slika teče, zaradi česar kontaktni kot lahko sprti izmerimo v različnih časovnih intervalih. Kontaktne kote neke tekočine merimo s pomočjo merilnega mikroskopa, ki ima v objektivu vgrajeno skalo za merjenje kotov.

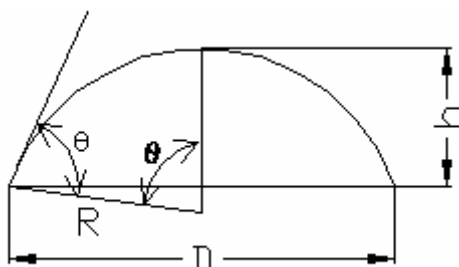
**Neposredno merjenje** kontaktnega kota temelji na merjenju kota, ki ga s površino trdne snovi oklepa tangenta na oboku kapljice (slika 4). Takšno merjenje kontaktnega kota nam omogočajo specializirani računalniški programi, ki avtomatično izračunavajo kot. Za doseganje večje natančnosti izmerjenih kontaktnih kotov, lahko kot izmerimo tudi iz druge strani kapljice in izračunamo povprečje obeh kotov. Način merjenja kontaktnega kota prek tangente je zelo subjektiven, saj je odvisen od ocene merilca, oziroma od tega, kako natančno bo slednji postavil tangento.



Slika 4: Prikaz neposrednega merjenja kontaktnega kota

**Posredno merjenje** kontaktnega kota temelji na merjenju višine in širine kapljice tekočine, v našem primeru lepila (slika 5). Ta način merjenja je manj subjektiven od neposrednega merjenja, saj lahko višino in širino kapljice natančneje določimo. Pri tem

načinu je pomembno, da za širino kapljice vzamemo dimenzijo, ki je v stiku s trdno snovjo in ne maksimalno širino kapljice. To je zelo pomembno, če je kot večji od  $90^\circ$ . Pri tej metodi je predpostavljeno, da ima kapljica sferično obliko.



Slika 5: Posredno merjenje kontaktnega kota

### 2.3 PREGLED OBJAV

Sheikl in Dunky (1998) ugotavljata, da na kontaktni kot lepila vplivajo hrapavost površine, starost lesa in vlaga v lesu. Priprava lesne površine je, glede na smer poteka vlaken, možna pod različnimi koti rezanja, kar se kaže v stopnji hrapavosti površine in v vplivu na omočitev površine. V les iglavcev so lumni celic ranega lesa večji od lumnov celic kasnega lesa. S tem sta Sheikl in Dunky pojasnila manjši kontaktni kot na površini lesa pri nanašanju lepila na rani kot na kasni les. Hkrati sta ugotovila, da nizka vlažnost v lesu preprečuje omočitev. Razlog za to je verjetno v premajhnem številu prostih hidroksilnih skupin, ki iz lepila absorbirajo vodne molekule. Nadalje sta sklepala, da so kontaktni koti pri nanašanju destilirane vode nižji pri ranem, kot pri kasnem lesu, in da nižja vlažnost lesa nujno privede do večjega kontaktnega kota.

Pizzi (1998) ugotavlja, da so študije omočitvenih pojavov na lesu ključnega pomena, saj nam podajajo pomembne informacije o lepljivosti in vezivnosti lepila. Prav te informacije pa so nujne za učinkovit razvoj novih metod ter za napovedovanje kakovosti vezivnosti in lepljivosti tako zlepljenih lesnih kompozitov. Ocenjuje, da je 80% ali več vseh lesnih produktov danes lepljenih, ter da je 70% vseh adhezivnih sredstev na svetu direktno ali indirektno povezanih z lesom.

Z raziskavo omočitve lesa se je ukvarjal tudi Bogner (1990). Raziskoval je omočitev bukovine in smrekovine pri različni pripravi površine. Površino je pripravil s skobljanjem, žaganjem in v kombinaciji z modifikacijo površine, z 10% amonijevim hidroksidom ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ). Prišel je do ugotovitev, da se bolj hrapave žagane površine omočijo bolje od skobljanih površin. Modifikacija površine z 10 %  $\text{NH}_4\text{OH}$  pred lepljenjem je izboljšala omočitev površine tako pri bukovini kot pri smrekovini in pri obeh načinih obdelave površine (žaganje in skobljanje). Ugotovil je, da je omočitev sveže obdelanih površin boljša, trdnost lepilnih spojev pa večja, kot pri površinah lesa, ki so bile starane. Na slabo omočitev vplivajo tudi smole, voski in olja v samem lesu in na njegovi površini. Z izboljšanjem omočitve je dosežena večja in enakomernejša trdnost lepilnega spoja.

Walinder (2000) ugotavlja, da je proučevanje fenomena omočitve na lesu pomembno za razumevanja interakcij med lesom in adhezivnim sredstvom. Les je naravni kompozit, ki sestoji iz celuloze, hemiceluloze, lignina in ekstraktivov. Med temi komponentami prihaja do intramolekularnih sil. Intramolekularne napetosti imajo glavno vlogo pri razumevanju temeljnih mehanizmov, kot so krčitveni mehanizmi in reološke lastnosti lesa. Omočitvene lastnosti lepila na lesu ugotavljamo zaradi zagotovitve čim boljših lastnosti utrjenega lepilnega spoja.

#### 2.4 LASTNOSTI LESA UPORABLJENIH LESNIH VRST

**BREZA** (*Betula pendula*) je raztreseno porozna vrsta lesa in nima obarvane jedrovine. Les je rumenkasto bel in na zraku potemni. Za sveže posekan les je značilno oranžno rdečkasto oksidativno obarvanje, ki pa z osušitvijo izgine. Branike niso izrazite, traheje so vidne z lupo kot svetle pike. Trakovi so tenki, vendar se zaradi grupiranja (agregirani) zdijo zelo široki. Les nima dekorativnega videza. Brezovina je srednje gost (gostota  $\rho_0 = 460 \dots 610 \dots 800 \text{ kg/m}^3$ ), trd, trden, plastičen in elastičen les. Cepi se dokaj težko. Pri sušenju se zmerno krči in je nagnjen k zvijanju in pokanju. Na prostem ni trajen, trajnejši je pod vodo. Brezovina se lahko obdeluje, lepo se tudi struži. Pri lepljenju in površinski obdelavi ni težav, dobro se luži. Les breze se uporablja za pohištvo, za proizvodnjo furnirjev, za športna orodja, idr. (Čufar 2001).

**ČRNA JELŠA** (*Alnus glutinosa*). Les črne jelše je srednje gost (gostota  $r_0 = 450...510...600 \text{ kg/m}^3$ ), dokaj mehak, vendar dokaj trden z zmernim krčenjem in dobro stabilnostjo. Les jelš ni odporen proti atmosferilijam, pod vodo pa je zelo trajen. Vsebuje veliko čreslovin. Beljava in jedrovina se barvno ne ločita. Les je rdečkastobel, do rdečkasto rumen ali rdečkastorjav. Letnice manj izrazite. Traheje razporejene difuzno ali v radialnih skupinicah. Pogosti so rdečerjavi parenhimski madeži. Naprodaj je kot žagan les, občasno tudi kot luščen in rezan furnir. Dobro se površinsko obdeluje z vsemi komercialnimi sredstvi. Ta žilav les se z lahkoto lepo obdeluje do gladke površine, lepo se struži in rezlja. Posebno lepo se luži. Naravno in tehnično sušenje poteka hitro in brez posebnih napak. Lepljenje je dobro. (Čufar, 2001)

**TOPOL** (*Populus alba*). Les je belkasto siv. Je raztreseno porozna vrsta lesa s temneje obarvano jedrovino. Branike so izrazite in široke (vlaknata površina), z ozkim področjem temnejšega kasnega lesa. Les nima dekorativnega videza. Spada med lesove z najnižjo gostoto pri nas (gostota  $r_0 = 370...410...520 \text{ kg/m}^3$ ). Les je homogen in se le malo krči, je mehak in ni trajen. Stabilnost lesa je dobra. Obrabna trdnost je visoka. Dobro se obdeluje, vendar morajo biti rezila ostra. Pri sušenju ni nagnjen k pokanju, pogosto se zvija. Lepi in luži se dobro. Topolovino uporabljajo za manj obremenjene notranje konstrukcije in v splošnem mizarstvu. Uporabna je tudi za struženje, papir in celulozo. Uporaben je tudi za rezanje in luščenje furnirja tudi brez predhodnega parjenja po 3 do 4 mesečnem skladiščenju hlodovine. (Čufar, 2001).

**ZELENI BOR** (*Pinus strobus*). Les zelenega bora (slika 6) ima rumenkastobelo beljavo in rdečkastorjavo jedrovino. Branike so pogosto široke. Prehod iz ranega v kasni les postopen. Les je elastičen, lahek in mehak. Gostota lesa  $r_0 = 310...370...470$ . Je težko cepljiv, krhek in odporen proti vlagi. Stabilnost je dobra. Trajnost je dobra, tudi v stiku s tlemi in pod vodo. Sušenje poteka hitro. Zlaganje in nega mora bit zelo skrbna. Lepljenje je dobro. Lakiranje je težavno. Uporablja se za manj obremenjene notranje konstrukcije, okvirji (okna, vrata), razni opaži, vezan les (sredice), les za kemično predelavo (Čufar, 2001).



Slika 6: Les zelenega bora

**VRBA** (*Salix*). Les vrbovine je zelo podoben topolovini, popolnoma zanesljivo makroskopsko razločevanje ni mogoče. Vrbovina je mehek, srednje težek (gostota  $r_0 = 370...410...520 \text{ kg/m}^3$ ), krhek, ne preveč prožen in slabo obstojen les z majhno ogrevalno močjo, primeren za uporabo izdelkov, ki ne zahtevajo najvišje stopnje kakovosti. Prav tako se les vrbovine le malo krči. Uporabljajo ga za izdelavo zaboječkov, vezanih plošč, notranjih polnil pri pohištvu, cokel, igrač, zobotrebcev, vžigalic, lesne volne, furnirja, najboljšega risalnega oglja in nekaterih športnih rekvizitov. Vrbovo skorjo so v prejšnjem stoletju, zaradi vsebnosti salicilne kisline, uporabljali kot sredstvo proti vročini (Čufar 2001).

Opisane lesne vrste so pri nas gospodarsko manj pomembne. Njihov delež na ozemlju Slovenije je izredno nizek. Delež črne jelše – 0,6 % , delež vrbe – 0,1 %, delež zelenega bora – 0,2 %, delež breze – 0,3 %, delež topola – 0,1 % (Eleršek, 2001). V primerjavi z našimi gospodarsko pomembnimi lesnimi vrstami je uporaba teh vrst v večje namene res nemogoča. Zeleni bor je tako pomembnejši v svoji domovini – v vzhodnem delu severne Amerike saj ga imenujejo »kralj borov« (Eleršek, 2001). V veliki večini pa ga uporabljajo za izdelavo jamborov. Uporaba testiranih lesnih vrst je pomembnejša predvsem v predelih, kjer je njihov areal bolj obsežen.

### 3 MATERIAL IN METODE

#### 3.1 UPORABLJENE LESNE VRSTE

V diplomski nalogi smo uporabili pri nas industrijsko manj pomembne in hitreje rastoče vrste lesa, kot so les: breze, črne jelše, topola, zelenega bora in vrbe.

**Srednje gostote** ( $r_{12-15}$ ) lesa navedenih lesnih vrst, ki smo jih izmerili, so naslednje:

- breza -  $655 \text{ kg/m}^3$ ,
- črna jelša -  $520 \text{ kg/m}^3$ ,
- topol -  $468 \text{ kg/m}^3$ ,
- vrba -  $461 \text{ kg/m}^3$ ,
- zeleni bor -  $400 \text{ kg/m}^3$ .

#### 3.2 ZASNOVA EKSPERIMENTA

Iz lesa vsake lesne vrste smo izdelali lamele dimenzij  $600 \times 120 \times 25 \text{ mm}$  in jih posušili do vlažnosti 12-15 %. Vsaka lesna vrsta je imela različno vlažnost, saj zaradi različne gostote lesa in načina sušenja, t.j. naletvičeno v prostoru (slika 8), ni bilo mogoče doseči enake vlažnosti lesnih vrst. Vlažnosti lesnih vrst pred klimatiziranjem so bile naslednje: breza 10 %, črna jelša 9,2 %, topol 7,6 %, zeleni bor 11,5 % in vrba 32,8 %. Lamele smo za štiri tedne vložili v klima komoro (slika 7), s standardno klimo (temperatura  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , relativna zračna vlažnost  $65 \pm 5 \%$ ), kjer so se vlažnosti lesa uravnovesile na naslednje vrednosti:

- breza 13,1 %,
- črna jelša 12,4 %,
- topol 11,9 %,
- zeleni bor 12,4 %,
- vrba 12,7 %.





Slika 7: Klima komora za kondicioniranje lesa v normalnih pogojih ( $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 65\%$ )

Po preteku štirih tednov smo lamele grobo poskobljali na debelino 14 mm in jih za teden dni ponovno vložili v klima komoro. Zatem smo lamele znova poskobljali, in sicer na končno dimenzijo 600 x 110 x 5 mm. Po končanem skobljanju vseh vzorcev so bili izpolnjeni pogoji za določevanje kontaktnega kota lepila na površini lesa ter lepljenje lamel in izdelavo strižnih preizkušancev.



Slika 8: Prikaz sušenja lesa v laboratoriju ( $T = 22^{\circ}\text{C}$ , 35 – 55 % relativna zračna vlažnost)

### 3.3 UPORABLJENO LEPILO

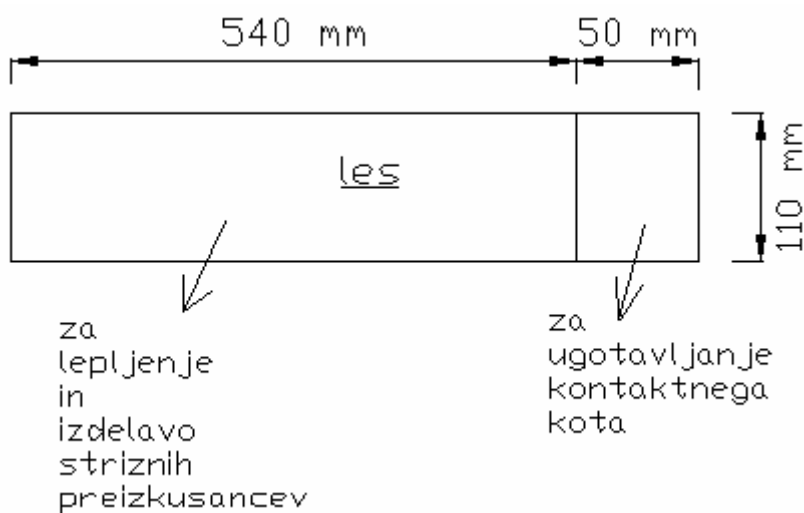
#### 3.3.1 Lastnosti fenol-formaldehidnega lepila (GP 3110)

V raziskavi smo uporabili fenol–formaldehidno lepilo (GP3110), ki nastaja z reakcijo polikondenzacije. Polikondenzacija namreč poteka v treh fazah (Šernek 2004):

- **rezol** stanje: produkt nabreka in je topen ter termoplasten,
- **rezitol** stanje: produkt nabreka in je termoplasten,
- **rezit** stanje: produkt ne nabreka več, se ne topi, je termoplasten in ima tridimenzionalno obliko (zamreženje).

### 3.4 PRIPRAVA LAMEL

Za merjenje kontaktnega kota smo od vsake lamele dimenzij 600 x 110 x 5 mm, odžagali kos lesa z dimenzijo 50 x 110 x 5 mm, na katerem smo nato merili kontaktni kot (slika 9).



Slika 9: Prikaz priprave lamel za merjenje kontaktnega kota in lepljenje

Za izdelavo preizkušancev za strižno trdnost smo imeli na voljo preostanek lamele z dimenzijami 540 x 110 x 5 mm. Pripravili smo lepljenca iz dveh lamel. Najprej smo na eno lamelo nanесли 10,5 – 11 g fenol-formaldehidnega lepila (okrog 180 g/m<sup>2</sup>). Lepilo smo

nanašali z valjčkom, da smo zagotovili enakomeren nanos lepila po celotni površini. Nato smo to lamelo pokrili z drugo in obe skupaj stiskali v stiskalnici pri temperaturi 180 °C in pri tlaku 50 barov, kar je predstavljalo 8 barov specifičnega tlaka. Čas stiskanja je bil 10 min. Iz lepljencev smo izdelali preizkušance za strižno trdnost (slika 12), in sicer po standardu EN 302 – 1:2004 (E).

Tako smo iz lepljencev izdelali različno število preizkušancev za ugotavljanje strižne trdnosti (Preglednica 1).

Preglednica 1: Število strižnih preizkušancev

Lesna vrsta	Število strižnih preizkušancev
Črna jelša	96
Breza	95
Topol	76
Zeleni bor	53
Vrba	45

Za vsako lesno vrsto bi morali dobiti iz lamel po 96 strižnih preizkušancev, a tega nismo uspeli zagotoviti, ker so nekateri preizkušanci zaradi slabega lepilnega spoja razpadli med razžagovanjem. Ta pojav je bil izrazit pri vrbi (slika 10) in zelenem boru (slika 11). Strižne preizkušance smo nato naključno razdelili v skupine od A1 do A5. Tako smo v vsako skupino dali od 10 do 15 strižnih preizkušancev. Za korektno izvedbo strižnega preizkusa je po standardu potrebno zagotoviti najmanj deset veljavnih rezultatov.



Slika 10: Napaka pri lepljenju lamel vrbe



Slika 11: Napaka pri lepljenju lamel zelenega bora

Pred izvajanjem strižnega preizkusa smo preizkušance obravnavali na način in po postopkih, kot jih navaja standard SIST EN 302 – 1:2004. Te razmere so prikazane v preglednici 2.

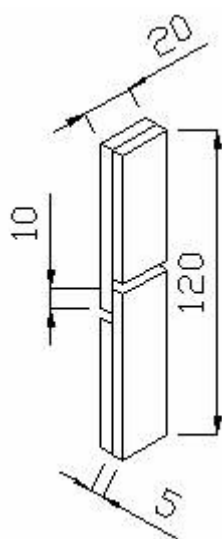
Preglednica 2: Izpostavitve strižnih preizkušancev različnim klimam

Oznaka	Postopek izpostavitve
A1	7 dni v standardni klimi (20°C / 65%) takojšnje testiranje
A2	4 dni namakanje v vodi (20 ± 5) °C testiranje še vlažnih preizkušancev
A3	4 dni namakanje v vodi (20 ± 5) °C 7 dni v standardni klimi (20°C / 65%) testiranje suhih preizkušancev
A4	6 ur kuhanje preizkušancev 2 uri namakanje v hladni vodi (20 ± 5) °C testiranje še vlažnih preizkušancev
A5	6 ur kuhanje preizkušancev 2 uri namakanje v hladni vodi (20 ± 5) °C 7 dni v standardni klimi (20°C / 65%) testiranje suhih preizkušancev

### 3.5 UGOTAVLJANJE STRIŽNE TRDNOSTI LEPILNEGA SPOJA

Strižni preizkus smo izvajali s pomočjo univerzalnega testirnega stroja Zwick Z100. Pri testiranju je pomembno, da je preizkušanec vpet v čeljust čim bolj vzporedno. Za izračun strižne trdnosti je potrebo s kljunastim merilom izmeriti širino in dolžino strižne ploskve

(tj. širina preizkušanca in razdaljo med utoroma). Na osnovi tega izračunamo strižno površino, s katero delimo strižno silo, ki je potrebna za lom preizkušanca, ter tako ugotovimo strižno trdnost lepilnega spoja. Po standardu je do porušitve preizkušanca moralo priti v času od 30 do 90 sekund. Glede na to je morala biti hitrost obremenjevanja 0,5 mm/min, kar smo ugotovili na osnovi predposkusa. Standard SIST EN 302 – 1:2004 med drugim zahteva, da po porušitvi ocenimo tudi lom po lesu na proučevani strižni površini.



Slika 12: Izgled in dimenzije strižnega preizkušanca v mm.

### 3.6 UGOTAVLJANJE KONTAKTNEGA KOTA FENOL - FORMALDEHIDNEGA LEPILA

Kontaktni kot fenol-formaldehidnega lepila GP 3110 smo ugotavljali s pomočjo statične digitalne metode (slika 3). Kontaktni kot kapljic lepila smo ugotavljali na preizkušancih dimenzij 50 x 110 x 5 mm (slika 9).

Uporabili smo mikroskop, digitalno kamero, računalnik ter medicinsko brizgalko za nanos kapljice lepila na površino lesa (slika 13).

Za merjenje kontaktnega kota smo uporabili digitalni fotoaparat OLYMPUS CAMEDIA C – 3040 ZOOM. Slednjega smo privili na okular mikroskopa znamke OLYMPUS SZ – STU2. Pred mikroskop smo postavili dvižno mizico, na katero smo položili preizkušane. Pet milimetrov nad njim smo vpeli medicinsko brizgalko (25 ml) z iglo (0,7 x 40 mm). Na mikroskopu smo uporabili 25,6 - kratno povečavo, na fotoaparatu pa največjo povečavo tj. 3 X optični in 2,5 X digitalni zoom. Za boljšo osvetlitev smo uporabili dve žarnici, ki sta bili priklopljeni na regulator osvetlitve.



Slika 13: Oprema za ugotavljanje kontaktnega kota

Po končanih meritvah je sledila računalniška obdelava filmov in izdelava slik s programom ACDsee 5.0. S pomočjo navedenega programa smo izdelali slike kapljice lepila na časovnih intervalih 0 sekund, 1 sekunda, 3 sekunde, 5 sekund, 10 sekund, 15 sekund in 30 sekund.



0 sekund



1 sekunda



3 sekunde



5 sekund



10 sekund



15 sekund



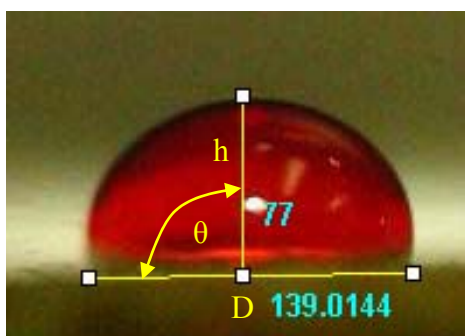
30 sekund

Čas 0 sekund smo navedli kot čas, ko je kapljica prišla v stik s površino lesa. To se je zgodilo približno 1 sekundo po odtrganju kapljice lepila od injekcijske igle. Izdelane slike smo prenesli v program IMAGE – Pro plus 4.5, s katerim smo določili dimenzije kapljice, tj. širino kapljice na stiku z lesom ter njeno višino (slika 14). Dobljene podatke smo vnesli v računalniški program Excel in s pomočjo enačbe 1 izračunali kontaktni kot ( $\theta$ ):

$$\theta = 2 \times \arctg\left(\frac{2h}{D}\right) \quad \dots(1)$$

D – širina kapljice

h – višina kapljice



Slika 14: Način merjenja dimenzij kapljice v programu IMAGE – Pro Plus 4.5

### 3.7 UGOTAVLJANJE VLAGE V LESU

Pred začetkom meritev kontaktnega kota lepila in lepljenjem lamel smo preverili vlažnost lesa po standardu SIST EN 322:1993. Najprej smo na tehtnici, na 0,01 g natančno stehali vzorčne kose. Nato smo stehane vzorce dali v laboratorijski sušilnik s temperaturo  $103 \pm 2$  °C. Po opravljenem sušenju do konstantne mase smo vzorce za 30 minut dali v eksikator s silika gelom. Vzorce smo ponovno stehali na 0,01 g natančno ter izračunali vlažnost lesih vrst po naslednji formuli:

$$H = \frac{m_H - m_0}{m_0} \times 100 \quad \dots(2)$$

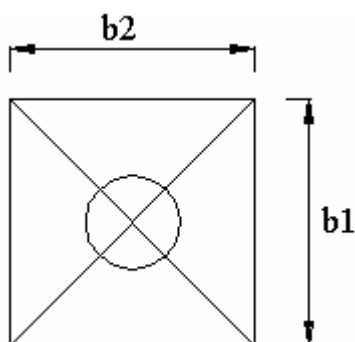
H – vlažnost (%)

$m_0$  – masa testnih vzorčkov po sušenju (g)

$m_H$  – začetna masa testnih vzorčkov (g).

### 3.8 UGOTAVLJANJE GOSTOTE LESNIH VRST

Gostoto lesa smo določili po standardu EN 323:1993. Kontrolne vzorce konstantne mase, ki smo jih uravnovesili v standardni klimi s temperaturo 20° C in relativno vlažnostjo 65 %, smo nažagali na dimenzijo 50 x 50 x 5 mm ter jih stehali na 0,01 g natančno. Nato smo z mikrometrom na sečišču diagonal izmerili debelino na 0,05 mm natančno. Nato smo izmerili tudi dimenziji obeh stranic  $b_1$  in  $b_2$  preizkušancev, in sicer na 0,1 mm natančno.



Slika 15: Merjenje dimenzij kontrolnih vzorcev za določevanje gostote



Gostoto smo izračunali po enačbi:

$$\rho = \frac{m}{b_1 \times b_2 \times t} \times 10^6 \quad \dots(3)$$

m – masa kontrolnih vzorcev

$\rho$  - gostota (kg/m<sup>3</sup>)

b<sub>1</sub> – širina (mm)

b<sub>2</sub> – dolžina (mm)

t – debelina (mm)

## 4 REZULTATI

### 4.1 REZULTATI MERJENJA KONTAKTNEGA KOTA

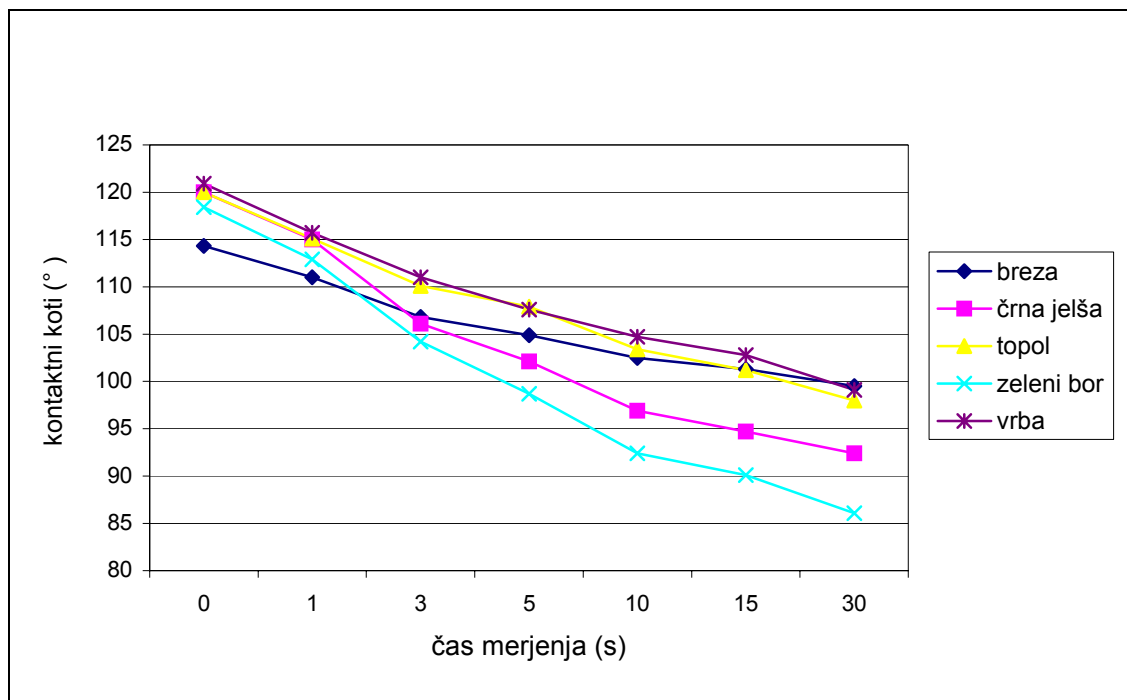
V preglednici 3 so prikazani podatki meritev o kontaktnih kotih po lesnih vrstah z osnovno statistiko. Za vsako lesno vrsto smo opravili najmanj 24 meritev, saj je bilo potrebno kakšno meritev tudi večkrat ponoviti, če se je v kapljici pojavil zračni mehurček. Ker smo testirali pet lesnih vrst, smo skupno opravili vsaj 120 meritev.

Preglednica 3: Kontaktni kot (°) fenol – formaldehidnega lepila na različnih lesnih površinah

		Čas (s)						
Statistični parametri		0	1	3	5	10	15	30
Breza	<b>srednja vrednost</b>	<b>114,3</b>	<b>111,0</b>	<b>106,8</b>	<b>104,9</b>	<b>102,5</b>	<b>101,3</b>	<b>99,5</b>
	najmanjša vrednost	103,7	99,2	95,7	94,8	92,9	92,5	90,8
	največja vrednost	126,4	123,2	120,5	118,1	118,2	115,2	111,0
	standardni odklon	5,8	5,7	5,9	5,3	5,2	4,7	4,2
	koeficient variacije (%)	5,1	5,1	5,5	5,1	5,1	4,6	4,2
	<b>Statistični parametri</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>30</b>
Črna jelša	<b>srednja vrednost</b>	<b>120,0</b>	<b>115,0</b>	<b>106,1</b>	<b>102,1</b>	<b>96,9</b>	<b>94,7</b>	<b>92,4</b>
	najmanjša vrednost	107,7	101,9	96,3	93,8	92,0	90,4	86,4
	največja vrednost	126,4	125,4	119,7	111,4	106,0	102,1	96,4
	standardni odklon	4,4	5,1	5,4	4,3	3,2	2,6	2,6
	koeficient variacije (%)	3,7	4,4	5,1	4,2	3,3	2,7	2,8
	<b>Statistični parametri</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>30</b>
Topol	<b>srednja vrednost</b>	<b>120,0</b>	<b>115,1</b>	<b>110,1</b>	<b>107,9</b>	<b>103,4</b>	<b>101,2</b>	<b>98,0</b>
	najmanjša vrednost	109,0	102,4	97,6	95,3	92,8	91,6	88,5
	največja vrednost	128,7	122,8	118,8	115,7	112,5	109,9	107,4
	standardni odklon	4,7	5,4	5,7	6,0	5,6	5,5	5,6
	koeficient variacije (%)	3,9	4,7	5,2	5,6	5,4	5,4	5,7
	<b>Statistični parametri</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>30</b>
Zeleni bor	<b>srednja vrednost</b>	<b>118,4</b>	<b>112,9</b>	<b>104,2</b>	<b>98,7</b>	<b>92,4</b>	<b>90,1</b>	<b>86,1</b>
	najmanjša vrednost	107,8	97,1	90,4	84,9	77,5	75,4	72,7
	največja vrednost	126,9	125,5	117,7	111,1	101,9	97,2	93,5
	standardni odklon	5,6	6,2	5,8	5,6	5,1	5,3	4,6
	koeficient variacije (%)	4,7	5,5	5,6	5,7	5,5	5,9	5,3
	<b>Statistični parametri</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>30</b>
Vrba	<b>srednja vrednost</b>	<b>120,9</b>	<b>115,7</b>	<b>111,0</b>	<b>107,6</b>	<b>104,7</b>	<b>102,8</b>	<b>99,1</b>
	najmanjša vrednost	112,9	106	101,3	95,5	92,5	91,7	80,4
	največja vrednost	127,4	124,8	121,9	118,8	117,5	114,9	112,1
	standardni odklon	3,8	5,2	5,8	5,5	5,3	5,3	6,1
	koeficient variacije (%)	3,1	4,5	5,2	5,1	5,1	5,2	6,2
	<b>Statistični parametri</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>30</b>

#### 4.1.1 Grafični prikaz kontaktnega kota fenol – formaldehidnega lepila po lesnih vrstah

Na sliki 16 so prikazani kontaktni koti v odvisnosti od časa merjenja. Opaziti je, da kontaktni kot pri vseh lesnih vrstah linearno pada. Vrednosti kontaktnih kotov so bile pri 0 sekundah v mejah od 114,3 ° do 120,9 °, po 30 sekundah pa v mejah od 86,1° do 99,5°. Pri zelenem boru je najmanjši kontaktni kot po 30 sekundah znašal 86,1°. Največji kontaktni kot je bilo opaziti pri brezi, in sicer 99,5 °, ki ima največjo izračunano gostoto ( $\rho = 655 \text{ kg/m}^3$ ) med vsemi testiranimi lesnimi vrstami. Pri boru je vrednost gostote najnižja ( $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ ). Pri času 0 sekund je bil največji kontaktni kot izmerjen pri vrbi ( $\rho = 461 \text{ kg/m}^3$ ), najmanjši pa pri brezi ( $\rho = 655 \text{ kg/m}^3$ ). Razlog za razlike v izmerjenih kontaktnih kotih je v že omenjenih različnih gostotah lesa, deležu ranega lesa in verjetno v njihovi različni površinski energiji, ki pa je nismo ugotavljali. Pri lepljenju bi tako najboljši lepilni spoj dobili pri zelenem boru, če pogledamo z vidika kontaktnega kota, saj je kapljica lepila pri tej drevesni vrsti imela najmanjši kontaktni kot. Lepilo bi se najboljše razlilo, kar je odločilno za dobro adhezijo in omočitev. Vendar pa v primeru nizke goste običajno pride do loma lepilnega spoja po lesnih vlaknih in ne po lepilu, zato je v takem primeru nesmiselno iskati zvezo med omočitvijo površine in strižno trdnostjo lepilnega spoja.



Slika 16: Grafični prikaz kontaktnih kotov v odvisnosti od časa merjenja po lesnih vrstah

## 4.2 REZULTATI MERITEV STRIŽNE TRDNOSTI LEPILNEGA SPOJA

V preglednicah od 4 do 8 so prikazane strižne trdnosti in odstotek lomov po lesu z osnovno statistiko pri različnih preizkušancih.

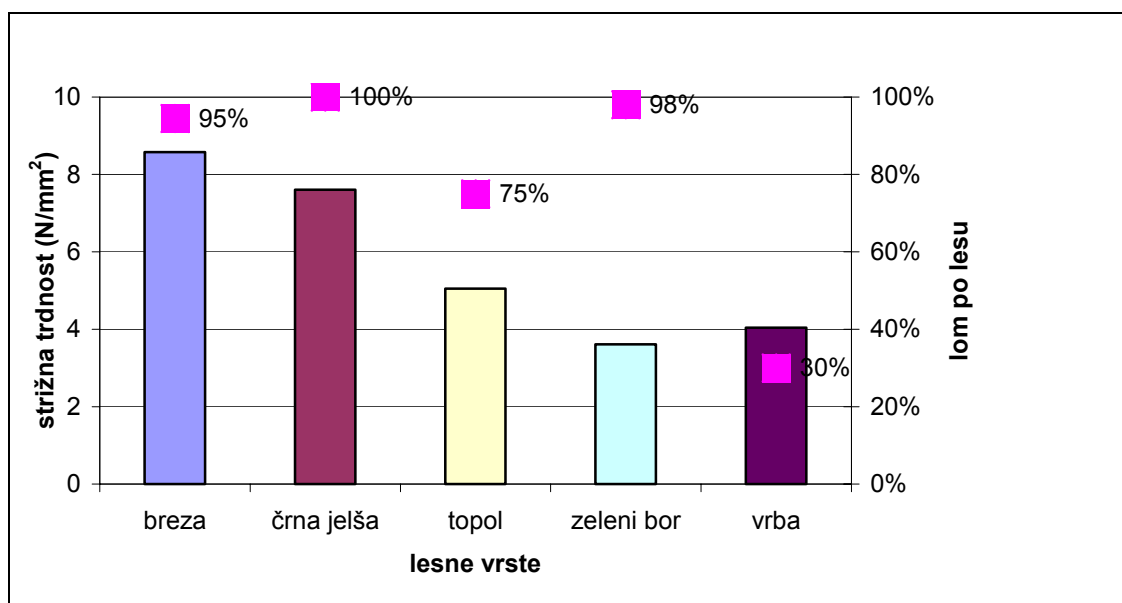
Preglednica 4: Strižna trdnost in delež lomov po lesu za strižni preizkus po načinu priprave strižnih preizkušancev po A1

Način priprave - A1 <sup>1</sup>	Breza	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>8,58</b>	<b>95%</b>
		najmanjša vrednost	7,12	70%
		največja vrednost	10,45	100%
		standardni odklon	0,95	0,12
		koeficient variacije (%)	11	12
	Črna jelša	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>7,61</b>	<b>100%</b>
		najmanjša vrednost	4,82	100%
		največja vrednost	11,38	100%
		standardni odklon	2,06	0,00
		koeficient variacije (%)	27	0
	Topol	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>5,05</b>	<b>75%</b>
		najmanjša vrednost	3,73	10%
		največja vrednost	6,43	100%
		standardni odklon	0,99	0,38
		koeficient variacije (%)	20	50
	Zeleni bor	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>3,61</b>	<b>98%</b>
		najmanjša vrednost	2,96	80%
		največja vrednost	4,30	100%
		standardni odklon	0,44	0,06
		koeficient variacije (%)	12	6
	Vrba	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>4,04</b>	<b>30%</b>
najmanjša vrednost		2,01	0%	
največja vrednost		6,22	100%	
standardni odklon		1,35	0,31	
koeficient variacije (%)		33	104	

<sup>1</sup> Preizkušance smo 7 dni kondicionirali v normalni klimi (20 °C, 65 % relativna vlažnost).

#### 4.2.1 Grafični prikazi rezultatov strižne trdnosti po lesnih vrstah po pripravi A1

Na sliki 17 so prikazani rezultati meritev strižne trdnosti v odvisnosti od lesne vrste ter lom po lesu. Pri pripravi A1 (preglednica 2) smo preizkušance testirali takoj po enotedenskem klimatiziranju pri temperaturi 20°C in relativni zračni vlažnosti 65 %. Največjo strižno trdnost je dosegla breza z 8,576 N/mm<sup>2</sup> ter s 95 % vrednostjo loma po lesu. Največjo vrednost loma po lesu je dosegla črna jelša s 100 %, najmanjšo pa vrba, in sicer 30 %, saj je pri njej že v fazi lepljenja prišlo da slabega lepilnega spoja (slika 12). Najmanjšo strižno trdnost je dosegel zeleni bor s 3,61 N/mm<sup>2</sup>. Dobljeni rezultati kažejo razliko v strižnih trdnostih, v odvisnosti od različnih gostot obravnavanih lesnih vrst. Rezultati kažejo, da ima breza, z največjo gostoto med testiranimi lesnimi vrstami, tudi največjo strižno trdnost. Lom je pri brezi potekal pretežno po lesu, zato je za trdnost spoja predvsem pomembna gostota lesa in ne lepilo. Pri zelenem boru, ki ima najmanjšo gostoto opazimo, da ima posledično tudi najmanjšo strižno trdnost lepilnega spoja.



Slika 17: Strižne trdnosti (stolpci) pri različnih lesnih vrstah ter prikaz loma po lesu (kvadratki) po pripravi A1

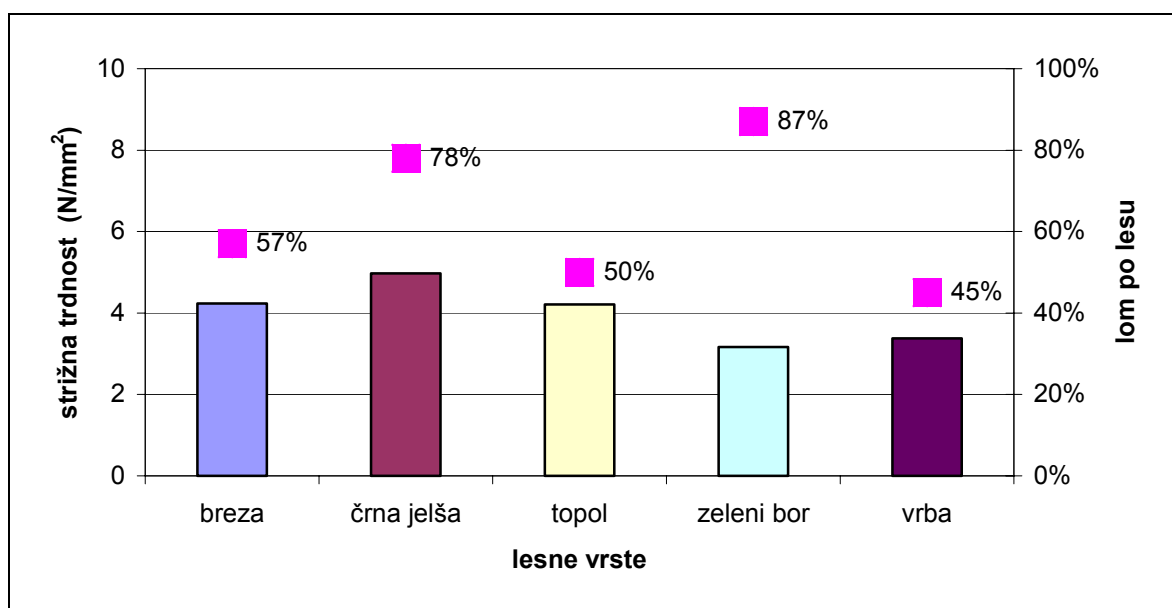
Preglednica 5: Strižna trdnost in delež lomov po lesu za strižni preizkus po načinu priprave strižnih preizkušancev po A2

Način priprave - A2 <sup>2</sup>	Breza	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>4,24</b>	<b>57%</b>
		najmanjša vrednost	1,72	0%
		največja vrednost	5,55	100%
		standardni odklon	1,52	0,44
		koeficient variacije (%)	36	77
	Črna jelša	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>4,97</b>	<b>78%</b>
		najmanjša vrednost	3,64	0%
		največja vrednost	6,58	100%
		standardni odklon	0,94	0,42
		koeficient variacije (%)	19	53
	Topol	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>4,21</b>	<b>50%</b>
		najmanjša vrednost	2,94	0%
		največja vrednost	4,91	100%
		standardni odklon	0,58	0,49
		koeficient variacije (%)	14	98
	Zeleni bor	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>3,17</b>	<b>87%</b>
		najmanjša vrednost	2,68	30%
		največja vrednost	3,90	100%
		standardni odklon	0,40	0,24
		koeficient variacije (%)	13	27
	Vrba	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
<b>srednja vrednost</b>		<b>3,38</b>	<b>45%</b>	
najmanjša vrednost		1,44	0%	
največja vrednost		4,76	100%	
standardni odklon		0,88	0,28	
koeficient variacije (%)		26	62	

<sup>2</sup> preizkušance smo 4 dni namočili v vodo (20 ± 5 °C) in nato takoj testirali.

#### 4.2.2 Grafični prikazi rezultatov strižne trdnosti po lesnih vrstah po pripravi A2

Na sliki 18 so prikazani rezultati meritev strižne trdnosti v odvisnosti od lesne vrste ter lom po lesu. Pri pripravi A2 (preglednica 2) smo preizkušance za 4 dni izpostavili v vodo s temperaturo  $20 \pm 5^\circ \text{C}$ . Nato smo jim takoj ugotavljali strižno trdnost. Opazimo, da se je v primerjavi z meritvami prikazanimi na sliki 17, delež loma po lesu pri brezi, črni jelši, topolu in zelenem boru zmanjšal, in sicer pri brezi za 38 %, črni jelši za 22 %, topolu za 25 % in pri zelenem boru za 11 %. Nadalje opazimo, da se je pri vseh lesnih vrstah zmanjšala strižna trdnost, in sicer iz razloga, ker smo preizkušance namakali v vodi in s tem oslabili lepilni spoj. Vrednost strižne trdnosti je še vedno najmanjša pri zelenem boru, največja pa pri črni jelši. Po pripravi A2 so se tudi vrednosti loma po lesu zmanjšale. Z namakanjem smo oslabili predvsem lepilni spoj in tako se je tudi strižna trdnost primerno zmanjšala.



Slika 18: Strižne trdnosti (stolpci) pri različnih lesnih vrstah ter prikaz loma po lesu (kvadratki) po pripravi A2

Preglednica 6: Strižna trdnost in delež lomov po lesu za strižni preizkus po načinu priprave strižnih preizkušancev po A3

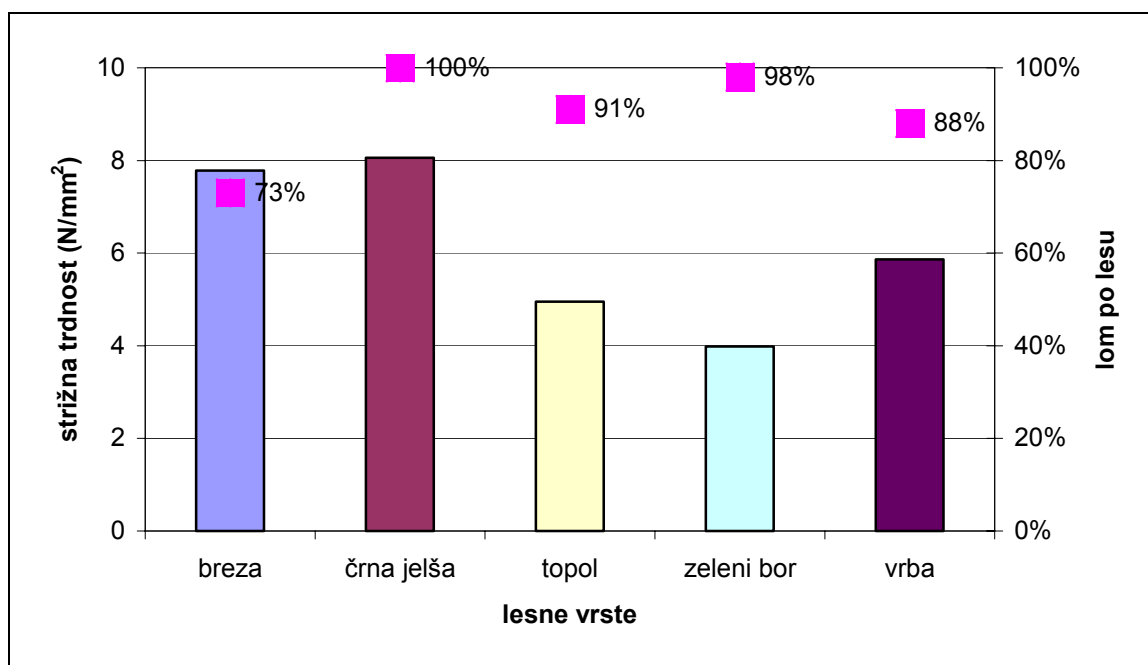
Način priprave - A3 <sup>3</sup>	Breza	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>7,79</b>	<b>73%</b>
		najmanjša vrednost	5,67	10%
		največja vrednost	9,18	100%
		standardni odklon	1,17	0,40
		koeficient variacije (%)	15	54
	Črna jelša	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>8,06</b>	<b>100%</b>
		najmanjša vrednost	6,82	100%
		največja vrednost	9,85	100%
		standardni odklon	1,13	0,00
		koeficient variacije (%)	14	0
	Topol	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>4,95</b>	<b>91%</b>
		najmanjša vrednost	1,55	20%
		največja vrednost	6,06	100%
		standardni odklon	1,40	0,25
		koeficient variacije (%)	28	28
	Zeleni bor	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>3,99</b>	<b>98%</b>
		najmanjša vrednost	3,49	80%
		največja vrednost	4,72	100%
		standardni odklon	0,38	0,06
		Koeficient variacije (%)	10	6
	Vrba	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>5,87</b>	<b>88%</b>
najmanjša vrednost		4,07	60%	
največja vrednost		7,50	100%	
standardni odklon		1,28	0,17	
koeficient variacije (%)		22	19	

<sup>3</sup> Preizkušance smo 4 dni namočili v vodo (20 °C), zatem 7 dni kondicionirali v normalni klimi (20 °C, 65 % relativna vlažnost) in šele nato testirali.



### 4.2.3 Grafični prikazi rezultatov strižne trdnosti po lesnih vrstah po pripravi A3

Na sliki 19 so prikazani rezultati meritev strižne trdnosti v odvisnosti od lesne vrste ter lom po lesu. Vzorce po pripravi A3 (preglednica 2) smo 4 dni namakali v vodi in jih še teden dni klimatizirali v komori, nato pa smo jih testirali. Glede na predhodne meritve (slika 18), so se strižne vrednosti povečale pri vseh lesnih vrstah, in sicer pri brezi na  $7,79 \text{ N/mm}^2$ , pri zelenem boru, ki je imel do sedaj najslabši rezultat merjenja strižne trdnosti, pa se je strižna trdnost povečala na  $3,99 \text{ N/mm}^2$ . Vrednosti so se povečale tudi pri lomu po lesu. Najvišjo vrednost loma po lesu je dosegla črna jelša s 100 %, najmanjšo pa breza s 73 %. Vrba je tokrat dosegla večji lom po lesu kot v predhodni meritvi to je 88 %. Opaziti je trend, da se po tedenskem klimatiziranju, kljub predhodnem namakanju strižnih preizkušancev, vrednosti strižne trdnosti in lomi po lesu povečajo v primerjavi z vrednostmi, ki smo jih dobili, če smo preizkušance testirali takoj po namakanju (slika 18). Razvidno je, da so strižne vrednosti večje, če je večji delež loma po lesu kot pa če je ta nizek.



Slika 19: Strižne trdnosti (stolpci) pri različnih lesnih vrstah ter prikaz loma po lesu (kvadratki) po pripravi A3

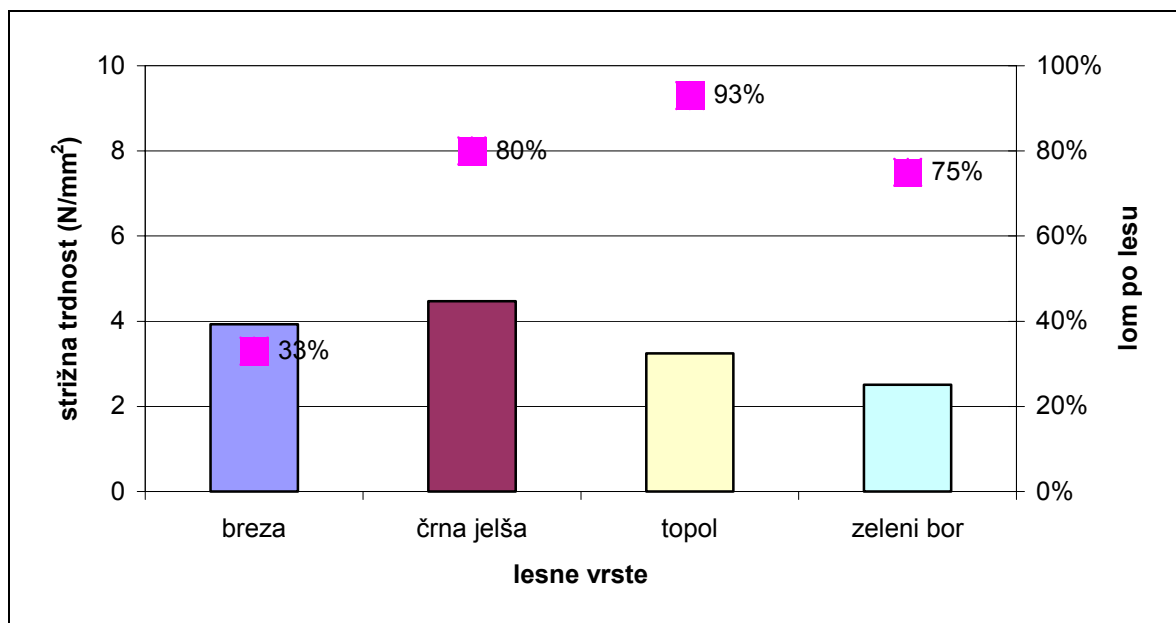
Preglednica 7: Strižna trdnost in delež lomov po lesu za strižni preizkus po načinu priprave strižnih preizkušancev po A4

Način priprave - A4 <sup>4</sup>	Breza	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		srednja vrednost	<b>3,93</b>	<b>33%</b>
		najmanjša vrednost	1,47	0%
		največja vrednost	5,55	100%
		standardni odklon	1,51	0,47
		koeficient variacije (%)	38	143
	Črna jelša	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		srednja vrednost	<b>4,47</b>	<b>80%</b>
		najmanjša vrednost	3,52	0%
		največja vrednost	5,81	100%
		standardni odklon	0,73	0,38
		koeficient variacije (%)	16	47
	Topol	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		srednja vrednost	<b>3,25</b>	<b>93%</b>
		najmanjša vrednost	2,73	50%
		največja vrednost	4,31	100%
		standardni odklon	0,56	0,16
		koeficient variacije (%)	17	18
	Zeleni bor	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		srednja vrednost	<b>2,51</b>	<b>75%</b>
		najmanjša vrednost	0,74	10%
		največja vrednost	3,34	100%
		standardni odklon	0,80	0,33
		koeficient variacije (%)	32	45
	Vrba	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		srednja vrednost	<sup>5</sup>	
najmanjša vrednost				
največja vrednost				
standardni odklon				
koeficient variacije (%)				

<sup>4</sup> Preizkušance smo kuhali 6 ur. Nato smo jih namakali v vodi ( $20 \pm 5$  °C) 2 uri in jih takoj testirali.<sup>5</sup> Zaradi slabega zlepljanja ni bilo možno zagotoviti zadostno količino preizkušancev

#### 4.2.4 Grafični prikazi rezultatov strižne trdnosti po lesnih vrstah po pripravi A4

Na sliki 20 so prikazani rezultati strižnega preizkusa in loma po lesu preizkušancev, ki smo jih pripravili po pripravi A4 (preglednica 2). Preizkušance smo poleg klimatiziranja še šest ur kuhali in nato dve uri namakali v vodi pri temperaturi  $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vzorce smo takoj testirali. Vrednost strižne trdnosti lepilnega spoja se je pri vseh lesnih vrstah razpolovila glede na pripravo A3. Pri brezi je tokratna strižna trdnost znašala  $3,93 \text{ N/mm}^2$ , pri črni jelši pa  $4,47 \text{ N/mm}^2$ . Najmanjšo strižno trdnost je dosegel zeleni bor z  $2,51 \text{ N/mm}^2$ . Glede loma po lesu se je vrednost, upoštevajoč prejšnje ugotovitve (slika 17, 18 in 19) pri brezi močno zmanjšala, in sicer na 33 %. Pri topolu je vrednost loma po lesu do sedaj dosegla največjo vrednost, tj. 93 %. Dokaj visoke vrednosti loma po lesu pa so dosegle tudi ostale lesne vrste, in sicer črna jelša 80 %, zeleni bor pa 75 %. Delež loma po lesu je bil visok, ker smo s pripravo A4 oslabili tudi lesno tkivo, zato je prej popustilo kot lepilo. Strižnih preizkušancev iz lesa vrbe nismo testirali, ker nismo mogli zagotoviti zadostne količine preizkušancev, saj so nekateri razpadli že v fazi lepljenja. Kuhanje je najbolj oslabilo celice lesa in s tem so bile strižne trdnosti manjše kot pri namakanju v vodi (priprava A2).



Slika 20: Strižne trdnosti (stolpci) pri različnih lesnih vrstah ter prikaz loma po lesu (kvadratki) po pripravi A4

Preglednica 8: Strižna trdnost in delež lomov po lesu za strižni preizkus po načinu priprave strižnih preizkušancev po A5

Način priprave - A5 <sup>6</sup>	Breza	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>8,23</b>	<b>94%</b>
		najmanjša vrednost	6,07	70%
		največja vrednost	9,58	100%
		standardni odklon	1,06	0,13
		koeficient variacije (%)	13	13
	Črna jelša	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>7,98</b>	<b>100%</b>
		najmanjša vrednost	4,37	100%
		največja vrednost	9,74	100%
		standardni odklon	1,50	0,00
		koeficient variacije (%)	19	0
	Topol	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		<b>srednja vrednost</b>	<b>5,49</b>	<b>100%</b>
		najmanjša vrednost	4,04	100%
		največja vrednost	6,28	100%
		standardni odklon	0,71	0,00
		koeficient variacije (%)	13	0
	Zeleni bor	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
		srednja vrednost	<sup>7</sup>	
		najmanjša vrednost		
		največja vrednost		
		standardni odklon		
		koeficient variacije (%)		
	Vrba	Statistični parametri	Strižna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	Lom po lesu (%)
srednja vrednost		<sup>8</sup>		
najmanjša vrednost				
največja vrednost				
standardni odklon				
koeficient variacije (%)				

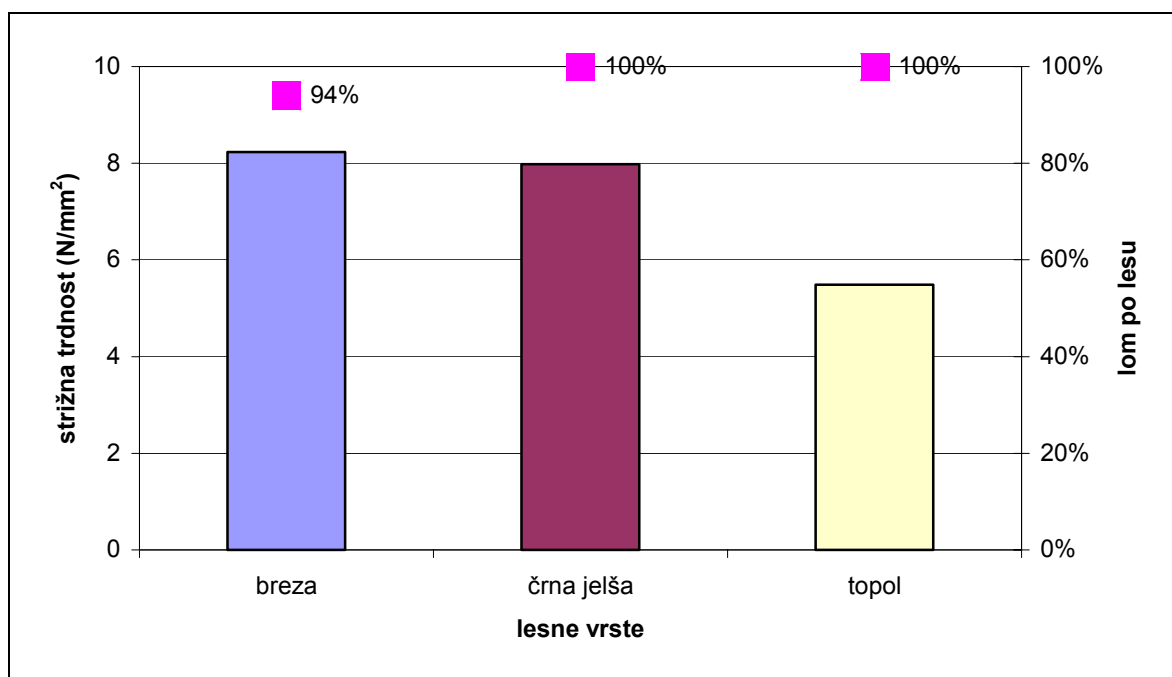
<sup>6</sup> Preizkušance smo 6 ur kuhali v vreli vodi, nato 2 uri namakali v vodi ( $20 \pm 5$  °C), jih za 7 dni kondicionirali v normalni klimi (20 °C, 65 % relativna vlažnost) in jih šele nato testirali.

<sup>7</sup> Zaradi slabega zlepljanja ni bilo možno zagotoviti zadostne količine preizkušancev.

<sup>8</sup> Zaradi slabega zlepljanja ni bilo možno zagotoviti zadostno količino preizkušancev

#### 4.2.5 Grafični prikazi rezultatov strižne trdnosti po lesnih vrstah po pripravi A5

Na sliki 21 so prikazani rezultati strižnega preizkusa za naslednje lesne vrste: breza, črna jelša in topol. Pri tej pripravi A5 (preglednica 2) smo preizkušance po klimatiziranju kuhali 6 ur, jih nato dve uri namakali v vodi pri temperaturi  $20 \pm 5$  °C. Nato smo jih teden dni klimatizirali v klima komori v standardnih pogojih. Na sliki niso prikazane meritve strižnega preizkusa za zeleni bor, ker nismo mogli zagotoviti zadostne količine teh preizkušancev. Pri tokratni pripravi so vrednosti strižnih preizkušancev za brezo znašale  $8,57 \text{ N/mm}^2$ , za črna jelšo  $7,61 \text{ N/mm}^2$  in za topol  $5,05 \text{ N/mm}^2$ . Glede na prejšnje meritve so se povečale tudi vrednosti loma po lesu, in sicer pri brezi na vrednost 94 %, pri črni jelši na 100 % in pri topolu prav tako na 100 %. Gostota lesa na strižno trdnost nima vpliva ima pa gostota vpliv na vrednost loma po lesu v kolikor je dobra penetracija lepila v les in s tem kvaliteten lepilni spoj.



Slika 21: Strižne trdnosti (stolpci) pri različnih lesnih vrstah ter prikaz loma po lesu (kvadratki) po pripravi A5

## 5 RAZPRAVA

Hitro rastoče lesne vrste imajo od ostalih lesnih vrst večji delež ranega lesa in manjši delež kasnega lesa, kar je najbolj izrazito pri zelenem boru. Rani les ima večje celične lumne in tanjše celične stene, kasni les pa nasprotno manjše celične lumne in debelejšje celične stene. Pri merjenju kontaktnih kotov lepila se tako pojavljajo razlike v omočitvi. Kapljica lepila, ki je nanesena na rani les, namreč bolj prodre v les kot tista, ki je nanesena na kasni les. Vpliv na omočitev lesa z lepilom pa ima tudi gostota posamezne lesne vrste. Gostota lesa močno variira znotraj vrste. Hitro rastoče lesne vrste, ki jih gojijo na plantažah, imajo dokaj enakomerne prirastke in s tem tudi podobno gostoto lesa. Lesne vrste, ki smo jih proučevali, pa so rasle na različnih rastiščih, nekatere tudi v strjenih sestojih, tako da gostote in prirastki niso enaki in primerljivi. Najmanjšo gostoto je v našem primeru imel zeleni bor, pri katerem smo izmerili tudi najmanjši kontaktni kot lepila. To pomeni, da je lepilo dobro omočilo površino lesa, saj je omočitev tem boljša, čim manjši je kontaktni kot.

Pri lepljenju lamel zelenega bora in vrbe se je pojavil nekvaliteten lepilni spoj. Nekaj lepljencev se je razslojilo po lepilnem spoju v trenutku, ko smo odprli vročo stiskalnico. Predvidevamo, da je do porušitve lepilnega spoja prišlo predvsem zaradi visokega tlaka pare, ki je bila ujeta v lepilnem spoju. Vzrok za to je bila slaba permeabilnost oziroma prevodnost lesa, zato vodna para v času stiskanja ni uspela v difundirati iz lepilnega spoja. Tlak pare v lepilnem spoju je bil ob odprtju stiskalnice večji kot ustvarjena adhezija, zato je lepilni spoj popustil.

Ker smo v našem primeru želeli, da se vlažnost lesa uravnovesi na vrednosti 12 – 15 % (zračno suh les), je pri vročem lepljenju prišlo do napetosti v lepilnem spoju, ki jih je povzročila vlaga. Ta se je v času stiskanja zaradi visoke temperature spremenila v paro in tako povzročila, da so se lamele razprle. Para namreč ni mogla izhajati prosto iz lesa, ker je verjetno prišlo do kapilarne tenzije oz. aspiracije obokanih pikenj. Pikenjske povezave med traheidami so se zaprle, zaradi česar vlaga ni mogla prosto izhajati iz lesa. Les bora vsebuje več ranega lesa in prav v ranem lesu je pojav aspiracije pogostejši. Kasni les iglavcev ima namreč pikenjske membrane debelejšje in bolj toge, zaradi česar se ne

aspirirajo. V lesu zelenega bora je bila prisotna tudi smola, kar je po vsej verjetnosti vplivalo tudi na slabšo oprijemljivost lepila na površino lamele in s tem tudi na slabšo kvaliteto lepilnega spoja.

Na slabšo prevodnost lesa vrbe je dodatno vplivalo otiljenje (vraščanje parenhimskih celic v izpraznjene lumne trahej) v celičnih lumnih. S tem je bila zmanjšana vzdolžna in prečna prevodnost, ki je vlagi v lesu onemogočala prost izhod. Pri preostalih proučevanih lesnih vrstah, t.j. pri brezi, črni jelši in topolu so bili lepilni spoji trdni, napak pri lepljenju ni bilo opaziti, kljub temu, da so imele te lesne vrste podobno vlažnost kot les vrbe in zelenega bora. Glede na navedeno lahko sklepamo, da je les breze, črne jelše in topola dovolj prevoden za vodno paro, ki lahko med vročim lepljenjem izhaja in zato ni nevarnosti, da bi lepilni spoj pri odpiranju stiskalnice popustil.

Strižne trdnosti preizkušancev so se razlikovale glede na pripravo pred testiranjem. Lepilni spoj smo namreč namenoma oslabili z namakanjem ali kuhanjem v vodi. Zaradi oslabiljenega lepilnega spoja je bila strižna trdnost le tega nižja. Najmanjšo strižno trdnost je imel zeleni bor po vseh pripravah, katerim so bili preizkušanci izpostavljeni.

Na utrjevanje lepila in kasneje tudi na strižno trdnost lepilnega spoja je verjetno vplivala tudi pH vrednost površine lesa, na katero smo nanašali lepilo. Fenol-formaldehidno lepilo namreč utrjuje v kislem ( $\text{pH} < 7$ ). Bolj ko je površina lesa kislja, hitreje poteka reakcija polikondenzacije fenol-formaldehidnega lepila in s tem lepljenje lesa.

## 6 SKLEPI

Glede na dobljene rezultate lahko oblikujemo naslednje sklepe:

1. Kontaktni kot kapljice fenol – formaldehidnega lepila na površini lesa je padal s časom ne glede na lesno vrsto. Vrednosti kontaktnega kota so bile pri 0 sekundah od 114,3 do 120,9°, pri 30 sekundah pa so vrednosti kontaktnega kota znašale od 86,1 do 99,5°.
2. Strižna trdnost lepilnega spoja je bila odvisna od načina priprave strižnih preizkušancev. Opazili smo, da so bile vrednosti strižne trdnosti pri preizkušancih, katere smo poleg priprave (A2<sup>9</sup>, A4,) izpostavili še en teden v standardni klimi (A3, A5), za polovico višje. Prav tako pa se je tudi povečal lom po lesu.
3. Kadar je lom lepilnega spoja potekal pretežno po lesnih vlaknih, je bila ugotovljena trdnost odvisna predvsem od gostote lesa.
4. Lepilni spoj je oslabil pri tistih preizkušancih, ki smo jih namakali ali kuhali v vodi ter jim še vlažnim določili strižno trdnost.
5. Vroče lepljenje zelenega bora in vrbe je bilo problematično verjetno zaradi previsoke začetne vlažnosti. Priporočamo sušenje teh dveh lesnih vrst na nižjo ravnovesno vlažnost pred lepljenjem.
6. Korelacije med omočitvijo in strižno trdnostjo lepilnega spoja nismo ugotovili.

V nadaljnjih raziskavah bi bilo smiselno proučiti še vpliv penetracije lepila na kvaliteto zlepljenosti proizvodov iz proučevanih lesnih vrst.

---

<sup>9</sup> Priprava strižnih preizkušancev pri različnih pogojih A1, A2, A3, A4, A5 (preglednica 2)



## 7 POVZETEK

V diplomski nalogi smo proučevali omočitev in adhezijo pri lepljenju hitro rastočih lesnih vrst. Lepljenje takih lesnih vrst je praviloma zahtevnejše, ker je med drugim prisotnega veliko juvenilnega lesa. Najprej smo z merjenjem kontaktnega kota kapljice lepila na površini lesa ugotavljali omočitev petih lesnih vrst. Nato smo zlepili dvoslojne lepljence in ugotavljali še strižno trdnost lepilnega spoja ter morebitne povezave med kontaktnim kotom in strižno trdnostjo.

V raziskavi smo uporabili hitro rastoče in industrijsko manj pomembne lesne vrste in sicer: brezo, črno jelšo, topol, zeleni bor in vrbo. Vsaki lesni vrsti smo posebej določevali kontaktni kot kapljice fenol-formaldehidnega lepila in strižno trdnost zlepljenih lamel. Kontaktni kot smo ugotavljali s statično digitalno metodo. Kapljice fenol-formaldehidnega lepila smo na površino lamele nanašali s pomočjo medicinske brizgalke in igle. Nato smo proučevali omočitev v odvisnosti od časa in sicer po 1. sekundi, 2. sekundi, 3. sekundi, 5. sekundi, 10. sekundi, 15. sekundi in po 30. sekundi od nanosa kapljice na površino lesa. Kapljice lepila smo snemali z digitalnim fotoaparatom, ki je bil vpet na okular mikroskopa (slika 13). Z maksimalno povečavo 3 x optični in 2,5 x digitalni zoom ter ustrezno ostrino smo dosegli najboljšo vidnost kapljice. Iz posnetka smo nato izločili slike v navedenih časovnih intervalih in z računalniškim programom izmerili kontaktni kot na osnovi merjenja širine in višine kapljice. Iz teh dimenzij smo izračunali kontaktni kot za vsako izmed preizkušanih lesnih vrst. Po končanem merjenju kontaktnih kotov smo za vsako lesno vrsto pripravili lepljence iz dveh lamel z dimenzijami 540 x 110 x 5 mm. Iz lepljencev smo pripravili strižne preizkušance (slika 14). Pred začetkom izvajanja strižnega preizkusa smo preizkušance izpostavili različnim klimatskim pogojem (od A1 do A5) po standardu.

Najprej smo vse preizkušance najmanj 7 dni klimatizirali v standardni klimi (20°C / 65%). Nato smo jim izmerili širino in dolžino preploščitve (strižna površina). Sledilo je ugotavljanje strižne trdnosti lepilnega spoja za 12 preizkušancev za vsako lesno vrsto. Za pripravo A1 smo preizkušance testirali takoj po klimatiziranju. Za pripravo A2 smo preizkušance 4 dni namakali v vodi (20 ± 5) °C in jih še vlažne testirali. Za pripravo A3

smo preizkušance 4 dni namakali v vodi ( $20 \pm 5$ ) °C in nato 7 dni klimatizirali v standardni klimi (20°C / 65%) ter testirali suhe preizkušance. Za pripravo A4 smo preizkušance kuhali 6 ur, nato smo jih 2 uri namakali v hladni vodi ( $20 \pm 5$ ) °C in jih še vlažne testirali. Za pripravo A5 smo preizkušance kuhali 6 ur, nato smo jih za 2 uri dali v hladno vodo ( $20 \pm 5$ ) °C in zatem še za 7 dni v standardno klimo (20°C / 65 %). Testirali smo suhe strižne preizkušance.

Ugotovili smo, da so bili kontaktni koti fenol-formaldehidnega lepila po 30 sekundah od nanosa različni glede na lesno vrsto in sicer je bil kontaktni kot najnižji pri zelenem boru (86,1°), sledila je črna jelša (92,4°), topol (98,0°), vrba (99,1°) in breza (99,5°). To pomeni, da je bila omočitev najboljša pri zelenem boru in najslabša pri brezi.

Pri proučevanju strižne trdnosti smo prišli do ugotovitev, da so na lepilni spoj preizkušancev vplivale priprave oziroma pogoji, pod katerimi smo testirali preizkušance (namakanje, kuhanje, klimatiziranje, idr.). Predvidevali smo, da bo tudi omočitev lesa z lepilom vplivala na strižno trdnost, vendar se je izkazalo, da omočitev posebnega vpliva na strižno trdnost ni imela. Pri zelenem boru (gostota 400 kg/m<sup>3</sup>) in vrbi (gostota 461 kg/m<sup>3</sup>) se je že po stiskanju oziroma lepljenju pojavil problem, da je v sredini lepljenca prišlo do razslojitve. Razlog za to so verjetno visoka temperatura, previsoka vlažnost lesa in slaba prevodnost teh dveh lesnih vrst. Tako je prišlo do generiranja visokega tlaka pare v lepilnem spoju, ki je po končanem stiskanju popustil (slika 12, slika 13). Nadalje smo ugotovili, da se breza, črna jelša in topol dobro lepijo in izkazujejo zadovoljivo strižno trdnost.

Predvidevamo, da bi bil lepilni spoj zelenega bora in vrbe kvalitetnejši, če bi lesu zmanjšali vsebnost vlage oziroma, če bi les pred lepljenjem sušili še nekoliko dlje. Glede na rezultate raziskave lahko zaključimo, da smo dosegli zastavljene cilje. Priporočamo, da lepljenje hitro rastočih in slabo prevodnih lesnih vrst, poteka pri nižjih vlažnostih (pod 8%), s čimer se zmanjša nevarnost razslojitve zaradi ujete pare v lepilnem spoju.

## 8 VIRI

1. Bogner A. 1990. Modifikacija površine drva radi boljšega lijepjenja. *Drvena industrija* 41, 5/6): 85-91.
2. Čufar K. 2001. Anatomija lesa; študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
3. Čufar K. 2001. Opisi lesnih vrst; študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
4. Eleršek L. 2001. Knjiga o gozdu o njegovem pomenu, lepoti, podrobnostih in sestavi. Ljubljana, samozal.: 142 str.
5. Geršak M., Medjugorac N., Velušček V. 1985. Sušenje lesa. Ljubljana, Zavod SR Slovenije za šolstvo: 136 str.
6. Mervič B. 1962. Sintetična lepila in njihova uporaba. Ljubljana, Tehniška šola KRML: 287 str.
7. EN 322. Wood – based panels – Determination of moisture content. 1993.
8. EN 301. Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load bearing timber structures: Classification and performance requirements. 1992.
9. EN 323. Wood – based panels – Determination of density. 1993.
10. Pizzi A. 1998. Special section: Wood adhesives. *Forewood. Int. J. Adhesion & Adhesives*, 18: 67-70
11. Podlesnik B. 2004. Vpliv staranja površine in na strižno trdnost fenol – formaldehidnega lepilnega spoja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 44 str.
12. Resnik J. 1989. Lepila in lepljenje lesa. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 103 str.
13. Scheikl M. Dunky M. 1998. Measurement of Dynamic and Static Contact Angles on Wood for the Determination of its Surface Tension and the Penetration of Liquids into the Wood Surface, *Holzforschung*, 52, 1: 89-94.
14. SIST EN 302 – 1. Lepila za nosilne lesene konstrukcije – preskusne metode – 1. del: Določanje trdnosti lepljenega stika pri vzdolžni natezno strižni obremenitvi. 2004.
15. Sernek M. 2004. Furnir in lepljen les; študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

16. Wallinder M. 2000. Wetting phenomena on wood. Stockholm, KTH-Royal Institute of Technology. Department of Manufacturing Systems Wood Technology and Processing SE-100 44: 62 str.

## **ZAHVALA**

Za pomoč in strokovne nasvete pri nastajanju diplomske naloge in za dragocen čas, ki si ga je vzel zame, se zahvaljujem mentorju doc. dr. Milanu Šerneku. Zahvalo sem dolžan tudi recenzentki prof. dr. Katarini Čufar. In nenazadnje velja zahvala tudi mojim staršem, ki so mi v času študija in v času, ko je nastajala moja diplomska naloga, stali ob strani in me spodbujali.