

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Simon LAUKO

DOLŽINSKO LEPLJENJE SVEŽE SMREKOVINE

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2010

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Simon LAUKO

DOLŽINSKO LEPLJENJE SVEŽE SMREKOVINE

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

FINGER JOINTING OF GREEN SPRUCE

GRADUATION THESIS
Higher professional studies

Ljubljana, 2010

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega strokovnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo v laboratorijih Katedre za žagarstvo in lesna tvoriva na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete je za mentorja diplomskega dela imenoval izr. prof. dr. Milana Šerneka, za recenzenta pa viš. pred. mag. Bogdana Šego.

Mentor: izr. prof. dr. Milan Šernek

Recenzent: viš. pred. mag. Bogdan Šega

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Univerza v Ljubljani, Biotehniška Fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Član:

Univerza v Ljubljani, Biotehniška Fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Član:

Univerza v Ljubljani, Biotehniška Fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Datum zagovora:

Diplomsko delo je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Simon LAUKO

KLJUČNA INFORMACIJSKA DOKUMENTACIJA

- ŠD Vs
- DK UDK 630*824.86
- KG les/kompoziti/lepljenje/mehanske lastnosti/smrekovina/vlažnost lesa
- AV LAUKO, Simon
- SA ŠERNEK, Milan (mentor)/ŠEGA, Bogdan (recenzent)
- KZ SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
- ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
- LI 2010
- IN DOLŽINSKO LEPLJENJE SVEŽE SMREKOVINE
- TD Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)
- OP X, 41 str., 2 pregl., 21 sl., 14 pril., 15 vir.
- IJ sl
- JI sl/en
- AI Raziskovali smo trdnostne lastnosti dolžinsko spojene smrekovine (*Picea abies* Karst). Pripravili smo smrekove lamele z različno vlažnostjo in jih razvrstili v 3 vlažnostne razrede. V prvem so bile lamele z vlažnostjo okoli 46 %, v drugem 30 % in v tretjem 10 %. Lamele smo prežagali na pol in jih ponovno spojili s pomočjo zobatega spoja. Za lepljenje smo uporabili enokomponentno poliuretansko lepilo MITOPUR E20, ki ga proizvaja podjetje Mitol iz Sežane. Lepljenje smo obdelali na dimenzije kot zahteva standard DIN 52 186, preseka 20 mm × 20 mm ter dolžine 470 mm. V sušilniku smo jih posušili na vlažnost okoli 14 %. Preizkuse smo izvajali na napravi za testiranje mehanskih lastnosti Zwick Z100. Ugotavljali smo modul elastičnosti in upogibno trdnost. Ugotovili smo, da je bilo izbrano lepilo primerno za spajanje mokre oziroma vlažne smrekovine. Upogibna trdnost je padala z naraščajočo vlažnostjo lesa pri lepljenju. Vrednosti modula elastičnosti pa so naraščale. Najbolj ugodne rezultate smo dobili pri lepljenju smrekovine z vlažnostjo 10 %.

KEY WORDS DOCUMENTATION

- DN Vs
- DC UDC 630*824.86
- CX wood/composites/gluing/mechanical properties/spruce wood/moisture content
- AU LAUKO, Simon
- AA ŠERNEK, Milan (supervisor)/ŠEGA, Bogdan (reviewer)
- PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c VIII/34
- PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
- PY 2010
- TI FINGER JOINTING OF GREEN SPRUCE
- DT Graduation Thesis (Higher professional studies)
- NO X, 41 p., 2 tab., 21 fig., 14 ann., 15 ref.
- LA sl
- AL sl/en
- AB Strength properties of longitudinally glued spruce wood (*Picea abies* Karst) were researched using a toothed adhesive layer and spruce wood of different moisture. We took several lamellas of spruce wood and sort them into 3 moisture groups. The first group contained lamellas with high percentage of moisture 46%, the second group 30 %, and the third 10%. We sawed lamellas into halves and then glued them back together with assistance of finger joint and one - component polyurethane glue, MITOPUR E20 produced by Mitol from Sežana. Afterwards we processed glued lamellas into dimensions demanded by DIN 52 186, cross- section 20 × 20 mm and length 470 mm. We dried the processed lamellas in a drier to moisture of 14 %. Our tests were performed at Biotechnical faculty on Zwick Z100 machine, used for testing mechanical characteristics. Modulus of elasticity and bending strength demanded by DIN 52 186 were tested. We came to conclusion that the glue we used was appropriate for gluing wet or humid spruce wood. By increasing the moisture of wood the modulus of elasticity was increasing and bending strength was decreasing. The best results we came across were at the moisture of 10 %.

KAZALO VSEBINE

	str
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	III
KEY WORDS DOCUMENTATION.....	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO PREGLEDNIC	IX
KAZALO PRILOG	X
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 DELOVNE HIPOTEZE	2
1.3 CILJI RAZISKAVE	2
2 PREGLED OBJAV	3
2.1 PRAVILNA IZBIRA IN PRIPRAVA LEPILA.....	3
2.2 POLIURETANSKA LEPILA	3
2.2.1 Enokomponentna poliuretanska lepila	4
2.3 ZGRADBA LEPILNEGA SPOJA.....	5
2.3.1 Proces oblikovanja lepilnega spoja.....	6
2.3.2 Omočitev površine lesnih celic.....	8
2.3.3 Vpliv zgradbe lesa na oblikovanje lepilnega spoja	8
2.3.4 Utrjevanje lepila.....	9
2.3.5 Procesi utrjevanja lepil.....	9
2.3.5.1 Fizikalni način utrjevanja lepila	9
2.3.5.2 Kemijski način utrjevanja.....	10
2.3.5.3 Kombinirano utrjevanje.....	10
2.4 OPIS UPORABLJENE LESNE VRSTE IN NJENE LASTNOSTI.....	11
2.4.1 Smreka	11
2.4.2 Obdelavne in uporabne lastnosti smrekovine	11

2.5	FIZIKALNE LASTNOSTI LESA	13
2.5.1	Voda v lesu.....	13
2.5.1.1	Točka nasičenja celičnih sten	14
2.5.2	Ugotavljanje vlažnosti lesa	15
2.5.2.1	Metoda tehtanja	15
2.5.2.2	Metoda merjenja električnih lastnosti lesa	18
2.6	PREGLED DOSEDANJIH RAZISKAV	20
2.6.1	Zgodovinski pregled lepljenja svežega lesa s pomočjo zobatega spoja.....	20
2.6.2	Dolžinsko lepljenje	21
2.6.2.1	Dolžinsko lepljenje sušenega lesa	21
2.6.2.2	Dolžinsko lepljenje svežega lesa	21
3	MATERIALI IN METODE	23
3.1	MATERIALI	23
3.1.1	Lepilo (Mitopur E20).....	23
3.1.1.1	Prednosti uporabe lepila Mitopur E20.....	23
3.1.1.2	Področje uporabe lepila Mitopur E20.....	24
3.1.1.3	Način uporabe lepila Mitopur E20	24
3.1.2	Smrekove lamele	25
3.2	METODE	25
3.2.1	Priprava preizkušancev	25
3.2.2	Klimatizacija preizkušancev	27
3.2.3	Ugotavljanje mehanskih lastnosti.....	27
3.2.4	Ugotavljanje vlažnosti lesa	30
3.2.5	Ugotavljanje gostote lesa	30
4	REZULTATI.....	32
4.1	MODUL ELASTIČNOSTI IN UPOGIBNA TRDNOST PREIZKUŠANCEV	32
4.1.1	Modul elastičnosti preizkušancev	33
4.1.2	Upogibna trdnost preizkušancev	34
4.2	GOSTOTA PREIZKUŠANCEV ZA POSAMEZNO SKUPINO	35

5	RAZPRAVA IN SKLEPI.....	36
5.1	RAZPRAVA	36
5.2	SKLEPI	37
6	POVZETEK.....	38
7	VIRI	40
	ZAHVALA	
	PRILOGE	

KAZALO SLIK

Slika 1: Zgradba lepilnega spoja (Marra, 1992).....	5
Slika 2: Sekvence gibanja lepila v lepilnem spoju (Marra, 1992).....	7
Slika 3: Kontaktni kot in omočitev (Kalčič, 2006).....	8
Slika 4: Kontrolna deska za ugotavljanje vlažnosti lesa (Geršak, s sod., 1985)	16
Slika 5: Uporovna merilnika vlažnosti serije 7800 in 7150	19
Slika 6: Dielektrični merilnik vlažnosti lesa	19
Slika 7: Diagram poteka dolžinskega lepljenja svežega lesa s pomočjo zobatega spoja za konstrukcijsko uporabo (Šernek in Kuronja, 2007)	22
Slika 8: Enostavno in natančno nanašanje lepila Mitopur E20	25
Slika 9: Orodje za izdelavo zobatega spoja	26
Slika 10: Dimenzije lamele in zobatega spoja (mm).....	26
Slika 11: Dolžinsko zlepljeni preizkušanci za ugotavljanje mehanskih lastnosti	27
Slika 12: Laboratorijski sušilnik.....	27
Slika 13: Naprava za testiranje štiri točkovni upogib, Zwick Z100	28
Slika 14: Shema testa za preizkus mehanskih lastnosti DIN 52 186 (dimenzije za naš primer).....	28
Slika 15: Orientiranost preizkušancev glede na smer obremenitve: v tangencialni smeri (T).....	29
Slika 16: Orientiranost preizkušancev glede na smer obremenitve: v radialni smeri (R).....	29
Slika 17: Merjenje dimenzij preizkušanca za ugotavljanje gostote.....	31
Slika 18: Kljunasto merilo za merjenje dimenzij preizkušanca	31
Slika 19: Modul elastičnosti pri štiritočkovni obremenitvi preizkušancev lepljenih pri različnih vlažnostih z lepilom Mitopur E20	33
Slika 20: Upogibna trdnost pri štiritočkovni obremenitvi preizkušancev lepljenih pri različnih vlažnostih z lepilom Mitopur E20	34
Slika 21: Gostota preizkušancev za posamezno skupino v času lepljenja z lepilom Mitopur E20	35

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Lastnosti smrekovine (Čufar, 2001)	12
Preglednica 2: Povprečni moduli elastičnosti, upogibne trdnosti in standardni odkloni preizkušancev zlepljenih pri različnih vlažnostih za radialno in tangencialno smer obremenitve.	32

KAZALO PRILOG

- Priloga A: Rezultati testiranja smrekovih preizkušancev, ki niso bili lepljeni.
- Priloga B: Sila v odvisnosti od povesa pri štiri točkovni obremenitvi preizkušancev, ki niso bili lepljeni.
- Priloga C: Rezultati testiranja smrekovih preizkušancev, ki so bili lepljeni pri 10,4 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v tangencialni smeri.
- Priloga D: Sila v odvisnosti od povesa pri štiri točkovni obremenitvi preizkušancev, ki so bili zlepljeni pri 10,4 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v tangencialni smeri.
- Priloga E: Rezultati testiranja smrekovih preizkušancev, ki so bili lepljeni pri 10,4 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v radialni smeri.
- Priloga F: Sila v odvisnosti od povesa pri štiri točkovni obremenitvi preizkušancev, ki so bili zlepljeni pri 10,4 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v radialni smeri.
- Priloga G: Rezultati testiranja smrekovih preizkušancev, ki so bili lepljeni pri 30,4 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v tangencialni smeri.
- Priloga H: Sila v odvisnosti od povesa pri štiri točkovni obremenitvi preizkušancev, ki so bili zlepljeni pri 30,4 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v tangencialni smeri.
- Priloga I: Rezultati testiranja smrekovih preizkušancev, ki so bili lepljeni pri 30,4 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v radialni smeri.
- Priloga J: Sila v odvisnosti od povesa pri štiri točkovni obremenitvi preizkušancev, ki so bili zlepljeni pri 30,4 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v radialni smeri.
- Priloga K: Rezultati testiranja smrekovih preizkušancev, ki so bili lepljeni pri 46,1 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v tangencialni smeri.
- Priloga L: Sila v odvisnosti od povesa pri štiri točkovni obremenitvi preizkušancev, ki so bili zlepljeni pri 46,1 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v tangencialni smeri.
- Priloga M: Rezultati testiranja smrekovih preizkušancev, ki so bili lepljeni pri 46,1 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v radialni smeri.
- Priloga N: Sila v odvisnosti od povesa pri štiri točkovni obremenitvi preizkušancev, ki so bili zlepljeni pri 46,1 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v radialni smeri.

1 UVOD

V lesni industriji les pogosto lepimo zaradi doseganja večjih dimenzij proizvodov. Poleg tega z lepljenjem zagotovimo večjo dimenzijsko obstojnost, povečamo izkoristek in znižamo ceno. Les lahko lepimo širinsko, debelinsko, dolžinsko in ploskovno. Nekateri načini lepljenja so znani že več tisoč let, medtem ko je lepljenje lesa po dolžini z zobatim spojem staro le nekaj desetletij. Sodobne tehnologije lepljenja in težnja po čim večjem izkoristku ter izboljšanju kvalitete proizvodov so glavni razlogi za čedalje pogostejšo uporabo dolžinsko lepljenega lesa.

Dolžinsko lepljenje z zobatim spojem je industrijsko uveljavljena tehnika, vendar samo če lepimo les, ki je predhodno posušen. Takšen les uporabljamo za okenske lamele, dimenzijsko večje nosilce in pohištvo. Lepljenje z zobatim spojem omogoča izdelavo proizvodov, ki si jih naročniki oz. načrtovalci objektov zaželi. Tako lahko dosežemo izdelavo nosilcev večjih dimenzij, ki zagotavljajo dimenzijsko obstojnost, kar v preteklosti ni bilo mogoče izvesti. Lamele v lepljenih nosilcih so dolžinsko spojene, saj je za večje dolžine nemogoče zagotoviti lamele brez napak in ustrezne dolžine. Večje napake in nepravilnosti moramo izžagati oziroma izločiti, kvalitetne dele lamel pa nato s pomočjo lepila ponovno spojimo v želeno dolžino.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Lepljenje svežega lesa ni običajen postopek v lesni industriji in je primeren samo v izrazito omejenih primerih ter ob uporabi specialnih lepil, ki lahko utrdijo ob prisotnosti vode oziroma povišani vlažnosti. Kvaliteten lepilni spoj je mogoče doseči le z ustrezno izbiro in pripravo lepila ter pravilnim postopkom lepljenja. Za lepljenje svežega lesa je primernih samo nekaj vrst lepil. Eno izmed njih je poliuretansko lepilo, ki utrjuje z neposredno kemijsko reakcijo med lepilom in lesom oziroma njegovimi hidroksilnimi skupinami.

1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Predvidevamo, da je dolžinsko lepljenje sveže smrekovine možno, vendar mora biti postopek lepljenja izveden skrbno in s primernim lepilom. Ocenjujemo, da ima poliuretansko lepilo ustrezne lastnosti za uporabo oziroma lepljenje pri povišani vlažnosti lesa. Predvidevamo, da je lahko sušenje in krčenje dolžinsko lepljenih svežih smrekovih lamel kritični dejavnik za nastanek različnih razpok v spoju, kar bi lahko negativno vplivalo na uvajanje tega načina lepljenja v industrijo.

1.3 CILJI RAZISKAVE

Glavni cilj te raziskave je proučiti možnosti lepljenja sveže oziroma vlažne smrekovine, ki bo dolžinsko spojena na zobati spoj s poliuretanskim lepilom. Ugotoviti želimo upogibno trdnost in modul elastičnosti preizkušancev iz smrekovine, ki bodo imeli med lepljenjem različne vlažnosti. Na osnovi teh rezultatov pa bo mogoče definirati mejno vlažnost lesa, ki bo zagotavljala ustrezno trdnost dolžinsko spojenih proizvodov glede na zahteve standarda.

2 PREGLED OBJAV

2.1 PRAVILNA IZBIRA IN PRIPRAVA LEPILA

Cilj vsakega lepljenja je zagotoviti kvaliteten lepilni spoj glede na pogoje uporabe lepljenega proizvoda. Izbira lepila je pri tem ključnega pomena, saj imajo lepila različno sestavo in lastnosti. Izbira lepila poleg tega pogojuje še tehnološki postopek lepljenja in posebne zahteve, kot so na primer hitrost utrjevanja, način dela, itd. Lepila za lepljenje lesa, ki jih uporabljamo za lepljene nosilce, morajo izpolnjevati določene zahteve. Z lepljenjem naj bi dosegli enako trdnost spojev, kot je trdnost lesa. Večina lepil za les pa tvori spoje, ki presegajo trdnost lesa, ki ga spajamo, kar je seveda zaželeno.

Najpogostejše zahteve za lepila v lesarstvu so:

- lepilo mora biti odporno na vlago in vodo,
- lepilo mora zagotavljati trdnost spoja pri povišani temperaturi,
- lepilo mora biti enostavno za pripravo in uporabo,
- lepilo ne sme biti zdravju škodljivo,
- lepilo mora biti poceni, lepljenje pa ekonomično,
- lepilo mora imeti ustrezen odprti in zaprti čas lepljenja,
- lepilo mora imeti ustrezno vezivno trdnost,
- lepilo mora biti odporno na kemijske vplive,
- lepilo mora zagotavljati kvalitetne spoje in
- lepilo ne sme biti zdravju škodljivo.

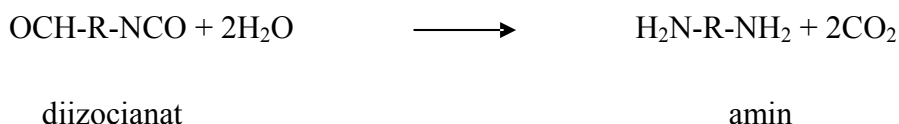
2.2 POLIURETANSKA LEPILA

Poliuretanska lepila nastanejo z reakcijo poliadicije. Poliadicija je kemijska reakcija spajanja molekul, ki vsebujejo nenasičene vezi z nasičenimi molekulami, ki imajo vsaj dve funkcionalni skupini. Za razliko od polimerizacije ali polikondenzacije se pri poliadiciji

majhne molekule vežejo na velike molekule, ob tem pa ne nastajajo vzporedni produkti, kot sta na primer voda ali formaldehid.

2.2.1 Enokomponentna poliuretanska lepila

Osnova za utrjevanje enokomponentnih poliuretanskih lepil, pri katerih odpade zahtevno doziranje komponent, so OH skupine lesa in vodnih molekul, ki omogočajo zamreženje izocianatnih komponent. Druga komponenta pri teh lepilih je voda.



Za zagotovitev ustrezne kvalitete lepilnega spoja uporabljajo v primeru enokomponentnih poliuretanskih lepil delno zamrežen prepolimer. Utrjevanje takega lepila poteka izključno zaradi vpliva vlage, zato se zahteva minimalna relativna zračna vlaga 40 %. Pred uporabo moramo tem lepilom preprečiti stik z vlago ali vodo.

Pri polimerizaciji se molekule medsebojno spojijo preko ogljikovih atomov, medtem ko se s poliadicijo molekule spajajo preko heteroatoma (na primer preko atoma kisika, dušika itd.). Poliuretani so proizvodi, ki se pridobivajo kot rezultat sopolimerizacije izocianata s polihidroksilom, ki se nahajajo v sklopih z najmanj dvema hidroksilnima skupinama v molekuli (Backović, 1996).

Izocianatna skupina $\text{N}=\text{C}=\text{O}$ se lahko združuje s premikajočim atomom vodika hidroksilne skupine v molekuli brez stranskih produktov. Namesto večatomnih alkoholov se lahko koristijo tudi poliestri, ki imajo na kraju molekule hidroksilne skupine. Surovina za pridobivanje poliuretanskih lepil je najpogosteje heksametilendiizocianat in butandiol.

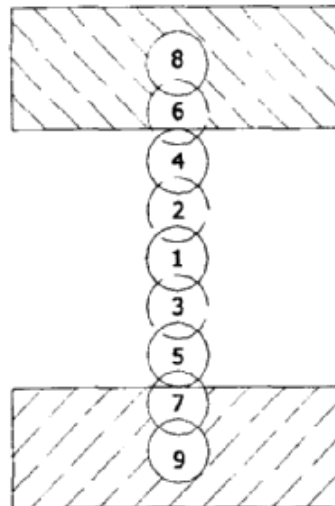
Poliuretanska lepila se lahko dobijo neposredno z reakcijo diizocianata in alkohola. V procesu sodeluje tudi monoklorbenzol, ki služi kot topilo. Poliuretani so prisotni tudi v

proizvodnji elastičnih gobastih materialov, sintetičnih kavčukov, v lepilih, materialih površinske obdelave, sintetičnih vlaknih itd.

Poliuretanska lepila se uporabljajo za lepljenje kovinskih materialov na nekovinske, za lepljenje stekla, tekstila, lesa itd. Lahko pa se uporabljajo tudi za lepljenje istovrstnih materialov med seboj. Spoji, zlepljeni s temi lepili, imajo visoko čvrstost in obstojnost pri izpostavljenosti težjim vremenskim vplivom.

2.3 ZGRADBA LEPILNEGA SPOJA

Zgradbo lepilnega spoja lahko ponazorimo kot verigo (slika 1), ki je sestavljena iz devetih členov (Marra, 1992). Za vsak člen je značilna njegova specifična vloga na točno določenem mestu spoja.



Slika 1: Zgradba lepilnega spoja (Marra, 1992)

Člen ena predstavlja lastnosti lepilnega filma in samega lepila. Naloga tega člana je, da poveže dva kosa lesa hkrati in kljubuje nastalim napetostim. Lepilni spoj doseže ustrezno

trdnost le, če je lepilo uporabljeno in utrjeno na ustrezen način. Najbolj izrazito je to pri debelih lepilnih spojih.

Drugi in tretji člen predstavljata mejni sloj med lepilom in lepljencem. To je sloj med kohezijskimi silami lepila in adhezijskimi silami na površini lesa.

Člena štiri in pet predstavljata vezni mehanizem – adhezijo med molekulami lepila in lepljencem. Ta privlačnost med lesom in lepilom lahko temelji na mehanski povezavi, fizikalni vezi ali kemijski vezi.

Člena šest in sedem predstavljata lesna vlakna tik pod površino lesa. Ta vlakna so bila poškodovana med mehansko pripravo lepilnih površin. Tako lahko ta sloj lesa predstavlja kritično vrzel v trdnosti lepilnega spoja.

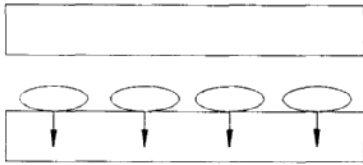
Člena osem in devet sta skrajna člena v verigi in predstavljata lastnosti lepljenca, ki vplivajo na oblikovanje lepilne vezi. V glavnem so to naslednje lastnosti: gostota, poroznost, permeabilnost in vlažnost lesa.

2.3.1 Proces oblikovanja lepilnega spoja

Proces nastanka lepilnega spoja poteka v petih fazah (slika 2):

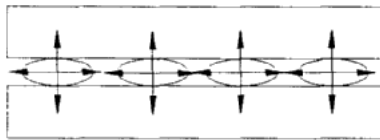
- nanos in tok lepila po lepilni ploskvi,
- prenos lepila na nasprotno lepilno ploskev,
- penetracija lepila v pore in druge odprtine v površini lesa,
- omočitev površin lesa in celičnih sten ter
- utrditev lepilnega spoja.

Enostransko naneseno lepilo

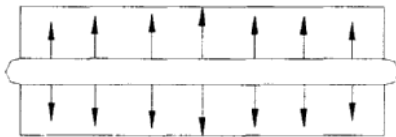


V vmesnem času prihaja do penetracije in omočitve površine, na katero smo nanesli lepilo. Prihaja tudi do zgoščevanja in nastanka kožice.

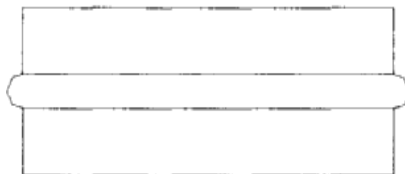
Začetek gibanja lepila po približevanju površin.



Masni tok se začne v obliki toka v ravnini lepilnega spoja, ki mu sledi prenos lepila na nasprotno stran.



Začetek penetracije lepila v nasprotno površino in nadaljevanje penetracije v površino, na katero smo nanesli lepilo.



Pritisk zagotavlja mirovanje lepljenca, dokler se gibanje lepila ne zaključi.

Posledica utrditve lepila je prenehanje kakršnegakoli gibanja lepila, tako masnega toka kot gibanja molekul.

Slika 2: Sekvence gibanja lepila v lepilnem spoju (Marra, 1992)

S stališča kvalitetnega lepljenja je za optimalno globino penetracije lepila značilno:

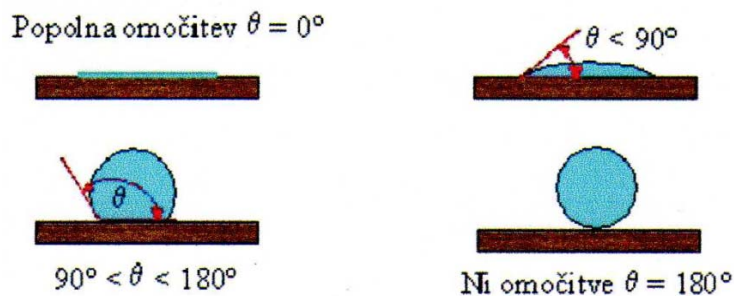
- da lepilo prepoji in učvrsti površino lesa,
- zadostno sidranje lepila v pore in razpoke lesa,
- zadostno difundiranje lepila v površine celičnih sten,
- konsistenca – povezana porazdelitev lepila in
- da ni preboja lepila.

2.3.2 Omočitev površine lesnih celic

Preden lepilo utrdi, mora dobro omočiti lesno površino, čim boljše mora zapolniti razpoke lesa ter globoko penetrirati v pore, kjer se mora usidrati v njih. Omočitev površine je odvisna od površinske napetosti in viskoznosti lepila. Z vidika omočitve in adhezije je za kvalitetno lepljenje lesa potrebno, da:

- je lepilo v tekočem stanju,
- ima lepilo čim manjšo površinsko napetost,
- ima lepilna površina čim večjo površinsko napetost,
- lepilo čim bolj omoči površino – nizek kontaktni kot in
- lepilo zadostno penetrira v les.

Omočitev ocenjujemo z merjenjem kontaktnega kota (θ), ki nastane na stiku med kapljico tekočine in trdno površino (slika 3). Kadar je kontaktni kot majhen, je omočitev dobra in obratno. Kadar pa je kontaktni kot enak 0° , govorimo o popolni omočitvi površine. Pogoj za nastanek močnih adhezijskih sil pri lepljenju je dobra omočitev.



Slika 3: Kontaktni kot in omočitev (Kalčič, 2006)

2.3.3 Vpliv zgradbe lesa na oblikovanje lepilnega spoja

Lastnosti lepilnega spoja, s katerim sta povezana dva kosa lesa, so v veliki meri odvisne od anatomske zgradbe lesa in od fizikalnih, kemijskih ter mehanskih lastnosti lesa. Les, ki služi kot podlaga, kamor nanašamo lepilo, ima velik vpliv na mobilnost lepila. Mobilnost

lepila je z vidika oblikovanja ustreznega lepilnega spoja pomembna za utrjevanje lepila in kasnejšo trajnost utrjenega lepilnega spoja.

2.3.4 Utrjevanje lepila

Na utrjevanje lepila vplivajo naslednji dejavniki (Resnik, 1997):

- molekulska masa ali stopnja polimerizacije polimera,
- oblika makromolekul,
- temperaturno razteznostni koeficient lepila,
- ustrezna plastičnost lepilnega sloja in
- ustrezna debelina sloja ter različni dodatki za spremembo lastnosti lepilnega sloja.

2.3.5 Procesi utrjevanja lepil

Splošne značilnosti utrjevanja lepil so:

- pogoj za prehod v trdno stanje so temperatura, čas, tlak in reagenti ter
- lepilo se med utrjevanjem spremeni prek gel stanja v trdno stanje.

Pri utrjevanju se vključujejo različni mehanizmi:

- oddaja disperzijskega sredstva,
- oddaja topila in toplote ter
- kemijska reakcija.

Med procesom utrjevanja lahko molekule ostanejo iste (linearne), lahko pa se spremenijo v razvejane ali zamrežene.

2.3.5.1 Fizikalni način utrjevanja lepila

Pri fizikalnem načinu utrjevanja ne gre za kemijsko reakcijo, temveč za oddajanje disperzijskega sredstva ter ohlajanje pod temperaturo steklastega prehoda.

Fizikalni proces utrjevanja lepila je reverzibilen. Slabost lepil, ki utrjujejo fizikalno pa je ta, da so neodporna na temperaturo in vodo. Na fizikalen način utrjujejo polivinilacetatna in talilna lepila.

Talilna lepila preidejo iz trdne v tekočo obliko s pomočjo dovajanja toplote, ko pa pridejo v stik z lesom, se zopet ohladijo in utrdijo (kratek odprti in zaprti čas lepljenja). Običajno so to termoplastna lepila, pri procesu utrjevanja pa ne pride do sprememb molekul.

Polivinilacetatna lepila utrjujejo tako, da oddajajo disperzijsko sredstvo, ki je najpogosteje voda. Ta v procesu utrjevanja izhlapi in difundira v les. Tako kot pri talilnih lepilih tudi pri teh ne pride do spremembe molekul.

2.3.5.2 Kemijski način utrjevanja

Pri kemijskem procesu utrjevanja gre za kemijsko reakcijo, ki je največkrat nepovratna in je lahko:

- polimerizacija,
- polikondenzacija ali
- poliadicija.

Pri kemijskem utrjevanju gre za spremembe na molekularnem nivoju. Utrjevanje poteka s pomočjo kemijskih reakcij. Zaradi povezovanja molekul v zamrežene makromolekule pride do krčenja spoja, kar neugodno vpliva na lepilni spoj. Posledica tega pa so napetosti v lepilnem spoju.

2.3.5.3 Kombinirano utrjevanje

Pri kombiniranem utrjevanju gre za istočasno kemijsko in fizikalno utrjevanje.

2.4 OPIS UPORABLJENE LESNE VRSTE IN NJENE LASTNOSTI

2.4.1 Smreka

Smreka (*Picea abies* Karst) je drevo severne poloble. Uspeva v severnih in hribovitih predelih Srednje Evrope. Pri nas je razširjena po celi Sloveniji, le na Primorskem in v Istri redkeje. Zaradi velikega gospodarskega pomena jo že od nekdaj načrtno gojijo.

Smreka ima ravno, vitko in polnolesno deblo, zlasti če raste v strnjenem gozdu. Krošnja je stožčasta oziroma piramidalna. Zraste v višino 30 do 50 m, redko več, in doseže prsni premer tudi do 2 m. Skorja je tanka, rjavo rdečkasta in dolgo gladka. Pri starejših drevesih razpoka v obliki zaokroženih lusk. Igllice so razporejene okrog vej, trde ošiljene in štirioglate. Nameščene so na blazinicah. Ko odpadejo, ostanejo na veji bradavicam podobne tvorbe. Storži so viseči in odpadejo celi.

2.4.2 Obdelavne in uporabne lastnosti smrekovine

Les smreke je rumenkasto bele do rumenkasto rjave barve. Branike so izrazite, nima pa obarvane jedrovine. Prehodi iz svetlejšega ranega lesa v temnejši kasni les so postopni. Sveži les diši po smoli. Smrekovina je zelo podobna jelovini, ki pa nima smolnih kanalov in je bolj belkasta, pogosto z modrikastim odtenkom. Smrekov les je redek do srednje gost in se zmerno krči. Je elastičen, trden, lahko cepljiv, se dobro suši in lahko lušči. Lahko se tudi obdeluje. Sodi med srednje trajen les, proti glivam in insektom ni odporen. Njegovo trajnost, zlasti če ga uporabljamo na prostem, lahko povečamo z ustreznimi zaščitnimi sredstvi (Čufar, 2001).

Rastne značilnosti, ki jih najdemo v lesu smrekovine, so:

- smolike,
- modrivost,
- trohnoba,
- grčavost ter

➤ rovi od insektov.

Smrekovina se uporablja kot gradbeni in konstrukcijski les nizkih in visokih gradenj, v stavbenem in pohištvem mizarstvu, za embalaže, uporablja se tudi za proizvodnjo lesnih tvoriv (furnir, vezane mizarske plošče, iverne in vlaknene plošče) ter za proizvodnjo celuloze in papirja. Glavne lastnosti smrekovine so prikazane v preglednici 1.

Preglednica 1: Lastnosti smrekovine (Čufar, 2001)

SMREKOVINA			
Gostota			
r_0 [kg/m ³]	300	430	640
r_{15} [kg/m ³]	330	470	680
E-modul (upogibni, vzporedno s potekom aksialnih elementov)			
11 [GPa]			
10 [GPa]			
Tlačna trdnost (vzporedno s potekom aksialnih elementov)			
43 [MPa]			
40 [MPa]			
Natezna trdnost (vzporedno s potekom aksialnih elementov)			
90 [MPa]			
80 [MPa]			
Upogibna trdnost (vzporedno s potekom aksialnih elementov)			
66 [MPa]			
68 [MPa]			
Strižna trdnost (vzporedno s potekom aksialnih elementov)			
6,7 [MPa]			
7,5 [MPa]			
Krčenje β (od 30 % do 0 %)			
Vzdolžno β_l		0,3 %	
Tangencialno β_t		7,4 %	
Radialno β_r		3,6 %	
Volumsko β_v		12 %	
Diferencialno nabrekanje q [%/-%]			
$q_{rad} = 0,19$			
$q_{tang} = 0,36$			

2.5 FIZIKALNE LASTNOSTI LESA

2.5.1 Voda v lesu

Svež les takoj po poseku vsebuje velike količine vode, ki ne zagotavljajo dimenzijske stabilnosti in biološke odpornosti ter tako omejujejo njegovo nadaljnjo predelavo in obdelavo. Delež vode v svežem lesu se med drevesnimi vrstami pa tudi v okviru iste močno razlikuje, zato je z vidika nadaljnje uporabe pomembno poznavanje njene razporeditve.

Svež les vsebuje večje ali manjše količine vode kot:

- vezano ali higroskopsko vodo v celičnih stenah,
- prosto ali kapilarno vodo v celičnih lumnih in
- paro v celičnih lumnih (je zanemarljiva).

Vsa vlažnostna stanja se med seboj razlikujejo tudi v energijskem nivoju:

- vezana voda ima najnižji energijski nivo,
- sledi prosta voda,
- najvišjo energijo ima para, vendar je količinsko zanemarljiva.

Največ vode v živem lesu je prav v beljavi, njena vsebnost pa pada proti strženu.

Stopnje vlažnosti lesa:

- vlažnost svežega lesa,
- vlažnost polsvežega lesa,
- vlažnost zračno suhega lesa in
- vlažnost tehnično suhega lesa.

Voda v živem drevesu je odraz prevajalne funkcije sekundarnega ksilena, ki prevaja vodo od korenin do krošnje. Beljava je bolj ali manj nasičena z vodo, ko pa celice ne opravljajo več primarne funkcije transporta, se voda v lumnih v večji ali manjši meri zamenja s plini, ki vključujejo tudi vodno paro. Pri prevajanju vode sodeluje beljava, vendar periferni del

bolj kot notranji. Skladno s povečanjem radija se prevodni del umika na periferijo, vlažnost proti sredici pa upada. Na meji z jedrovino pride do strmega padca, vendar ne pod točko nasičenja celičnih sten (TNCS).

Vlažnost lesa je odvisna od časa sečnje in transporta, vrste lesa, starosti, velikosti krošnje, radialne in vertikalne distribucije v drevesu. Razlika v vlažnosti med beljavo in jedrovino je pri iglavcih nekajkratna, pri listavcih pa ni tako izrazita. Najznačilnejša porazdelitev vlažnosti v radialni smeri je odraz prevajalne funkcije.

Vlažnostna stanja:

- suh les 0%,
- zračno suh les 12 – 15%,
- območje nasičenja 23 – 35%,
- gozdno svež les > TNCS in
- napojen les >>> TNCS.

2.5.1.1 Točka nasičenja celičnih sten

Vlažnost točke nasičenja celičnih sten (u_{TNCS}) predstavlja zgornjo mejo higroskopskega območja, v katerem vlada tesna odvisnost med fizikalnimi in mehanskimi lastnostmi ter lesno vlažnostjo. Pri postopku sušenja predstavlja TNCS kritično točko, ko preidemo iz faze konstantne hitrosti sušenja v pojemajočo zaradi difuzijskega upora. Kot posledica vlažnostnega gradienta se hkrati pojavijo še sušilne napetosti, ki ob prekoračitvi trdnosti lesnega tkiva povzročijo trajne deformacije.

Vlažnost, pri kateri so celične stene še nenasičene s higroskopsko (vezano) vodo, lumni celic pa so že izpraznjeni, imenujemo točka nasičenja celičnih sten – TNCS. Vlažnost lesa pri točki nasičenja celičnih sten je približno enaka ravnovesni vlažnosti, kot se vzpostavi v klimi s 100% relativno zračno vlažnostjo.

Zaradi prisotnosti vlažnostnih gradientov velja definicija TNCS za les kot celoto le kot mejna vrednost, pa tudi eksperimentalno jo je težko določiti, zato v praksi večkrat obravnavamo območja nasičenja celičnih sten in ne le točko. Za les iglavcev z neobarvano jedrovino, kot je smreka, je u_{TNCS} 30 – 34%.

2.5.2 Ugotavljanje vlažnosti lesa

Vlažnost lesa je osnovni podatek o lesu in jo v praksi najpogosteje ugotavljamo na dva načina:

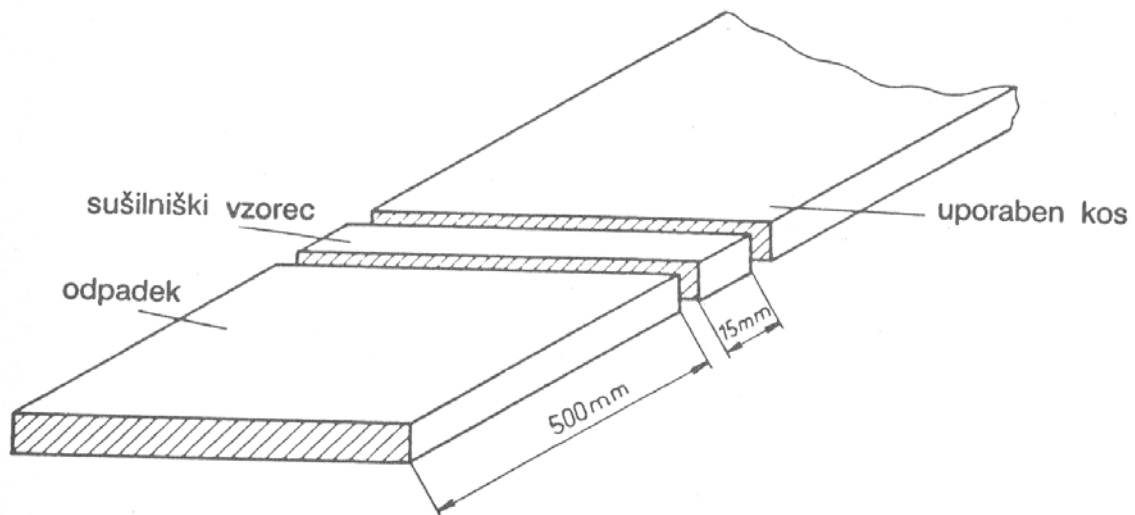
- z metodo tehtanja (gravimetrična metoda) in
- z metodo merjenja električnih lastnosti lesa, ki pa temelji na različnih principih.

Med sušenjem moramo stalno ugotavljati vlažnost lesa.

2.5.2.1 Metoda tehtanja

Metoda tehtanja je ena izmed najnatančnejših metod ugotavljanja vlažnosti v lesu. Pogoj za to pa je, da se med procesom izloča samo voda. Pri lesu, ki vsebuje tudi druge hlapljive snovi, najpogosteje je to smola, so možna manjša odstopanja od točnih rezultatov.

Iz lesa, kateremu želimo ugotoviti vlažnost, izberemo kontrolno desko, ki naj predstavlja ostali les. Pri večjih količinah moramo izbrati več kontrolnih desk. Iz kontrolne deske odžagamo 500 mm od čela sušilniški vzorec, širine 15 mm (slika 4).



Slika 4: Kontrolna deska za ugotavljanje vlažnosti lesa (Geršak, s sod., 1985)

Sušilniški vzorec takoj stehtamo in to je masa vlažnega lesa m_v . Potem odrezek takoj vložimo v laboratorijski sušilnik in ga sušimo pri temperaturi $103 \pm 2^\circ \text{C}$. Trajanje sušenja je odvisno od začetne vlažnosti lesa in se izvaja do absolutne suhosti. To pa je doseženo takrat, ko je masa vzorca po večkratnem tehtanju konstantna, kar pomeni, da je vzorec posušen do najnižje možne suhosti lesa.

Vlažnost lesa se izračuna po naslednji formuli:

$$u (\%) = \frac{m_v - m_0}{m_0} \cdot 100 \% = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_0} \cdot 100 \% \quad \dots(1)$$

u vlažnost lesa (%)

m_v masa vlažnega vzorca (g)

m_0 masa absolutno suhega vzorca (g)

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ masa vode (g)

Da dosežemo zanesljivost računa, moramo tehtati hitro, da ne pride do sprememb v vsebnosti vode v vzorcih. Kadar vemo, da tehtanja ne moremo izpeljati hitro, pa se vzorce zavije v folijo. Pri tem se vzorci zaščitijo pred zunanjimi vplivi.

Za ugotavljanje povprečne vlažnosti lesa in za doseganje realnih rezultatov izberemo iz količine lesa, ki ga nameravamo posušiti, več desk, iz katerih izžagamo kontrolne vzorce, ki so primerno oddaljeni od čela in niso debelejši od 4 cm.

S pomočjo kontrolnega odrezka določimo povprečno začetno vlažnost lesa, na osnovi katere zastavimo začetne sušilne parametre. Ker les v procesu sušenja oddaja vodo in mu s tem vlažnost pada, moramo te spremembe spremljati s kontrolnimi kosi, ki jih izberemo iz zložaja. Razporejeni morajo biti po celotnem zložaju, da predstavljajo povprečno vlažnost lesa v njem. Kontrolne kose med procesom sušenja tehtamo, to pa storimo tako, da jih vzamemo iz sušilnice, jih označimo in stehtamo. Potem jih vrnemo nazaj v sušilnico na tisto mesto, kjer so bili v zložaju. Vlažnost lesa lahko izračunamo, če smo iz kontrolnih odrezkov ugotovili začetno vlažnost lesa in maso kontrolnega kosa pred sušenjem ter trenutno maso kontrolnega kosa.

Trenutna vlažnost lesa se izračuna po naslednji formuli:

$$u_x (\%) = \frac{M_x}{M_z} \times (100 \% + u_z) - 100 \% \quad \dots(2)$$

u_xtrenutna vlažnost lesa (%)

M_xtrenutna masa kontrolnega kosa (g)

M_zzačetna masa kontrolnega kosa (g)

u_zzačetna vlažnost lesa (g)

Kontrolne kose uporabljamo pri ročnem in delno avtomatiziranem sušenju lesa, saj z njimi spremljamo sušenje in tako lahko predpisujemo režim sušenja in z njimi ugotavljamo povprečno trenutno vlažnost lesa v sušilnici. Lahko pa jih uporabljamo tudi pri popolnoma avtomatiziranem procesu sušenja za kontrolo.

2.5.2.2 Metoda merjenja električnih lastnosti lesa

Električno merjenje vlažnosti lesa je najpogostejši način merjenja vlažnosti lesa, saj rezultate vlažnosti ugotovimo takoj, les pa ostane nepoškodovan. V praksi se običajno uporabljata dva načina:

- uporovno merjenje vlažnosti in
- dielektrično ali kapacitivno merjenje vlažnosti.

Z uporovnim vlagomerom (slika 5) merimo električno upornost lesa glede na njegovo vlažnost. Sprememba vlažnosti lesa namreč zelo vpliva na spremembo električnega upora. Les, ki je vlažen, prevaja električni tok. Čim nižja je vlažnost, tem večji je upor lesa. Tako lahko z merjenjem upornosti ugotovimo vlažnost lesa. Inštrument za merjenje električnega upora umerimo na odstotek vlažnosti lesa, ki jo potem direktno merimo in odčitamo. Uporaba uporovnega merilnika vlažnosti lesa je uporabna in zanesljiva v območju od 7 % do 25 % vlažnosti lesa oz. do TNCS. Za merjenje vlažnosti furnirjev uporabljamo ploščate elektrode in igelne elektrode za merjenje vlažnosti lesa, te pa morajo biti zaščitene z izolativnim materialom. V les jih zabijemo od 1/4 do 1/3 globoko, saj naj bi bila na tem mestu približna povprečna vlažnost po debelini lesa. Na natančnost meritve z uporovnim vlagomerom vpliva še:

- gostota lesa, ki je obratno sorazmerna z električno upornostjo,
- vrsta lesa,
- anatomska zgradba in smer vlaken pri merjenju ter
- temperatura lesa (vpliva približno 0,15 % vlažnosti lesa pri spremembi za 1 °C).

Kadar imamo večjo količino lesa, izmerimo vlažnost lesa na več mestih in izračunamo povprečno vlažnost lesa.



Slika 5: Uporovna merilnika vlažnosti

Kapacitivnostni merilniki (slika 6) merijo dielektrično konstanto oziroma vrednost lesa, ki narašča z vlažnostjo, gostoto in temperaturo. Merjenje vlažnosti lesa poteka z izmeničnim tokom visoke frekvence preko dveh ali več kontaktnih sond, ki se morajo dobro prilegati na površino, drugače meritev ni natančna. Merilnik meri v globino, zato je podatek povprečna vlažnost lesa in se uporablja v območju med 0 % in 25 % vlažnosti, vendar je meritev manj natančna kot pri uporabnem vlagomeru. Uporabljamo ga za merjenje vlažnosti lesa končanih izdelkov, ki so površinsko že obdelani, saj jih ne poškoduje.



Slika 6: Dielektrični merilnik vlažnosti lesa

2.6 PREGLED DOSEDANJIH RAZISKAV

2.6.1 Zgodovinski pregled lepljenja svežega lesa s pomočjo zobatega spoja

Na temo lepljenja svežega lesa med začetnike raziskav spadata Murphey in Nearn, ki sta o tem že leta 1956 naredila raziskavo. Izvedla sta jo s stiskanjem v vroči stiskalnici. Uporabila sta moker hrastov les vlažnosti 50 % in fenol-resorcinol-formaldehidno lepilo (FRF). Ugotovila sta, da je lepilo dobro penetriralo v les, rezultat pa je bil zelo tanek lepilni spoj. Nato so se raziskave nadaljevale in na tržišče je prišlo modificirano fenol-resorcinol-formaldehidno lepilo s komercialnim imenom »Greenweld«. Z njim je bilo mogoče lepljenje po hladnem postopku. Uporabljalo se je za dolžinsko lepljenje svežega lesa s pomočjo zobatega spoja.

Prav tako pa je za dolžinsko spajanje svežega lesa uporabno enokomponentno poliuretansko lepilo (PUR). Raziskavo sta naredila Verreault (1999) in Lange (2000), ki sta za lepljenje uporabila enokomponentno PUR lepilo, ker reagira z vodo v lesu, oziroma z hidroksilnimi skupinami lesa. Rezultati pa so pokazali, da mora biti lepilni sloj zelo tanek - presežati ne sme debeline 0,3 mm zaradi formiranja luknjic (zračnih mehurčkov) v lepilnem spoju.

Raziskavo o napakah v zobatem spoju zaradi spremembe temperature, ki je zlepljen z enokomponentnim poliuretanskim lepilom, sta izvedla Richter in Schirle (2002). Ugotovila sta, da se trdnostne lastnosti lepila spreminjajo in so odvisne od metod testiranja in oblikovanja lepilnega spoja.

Ker je lepljenje svežega lesa s pomočjo zobatega spoja mogoče izvesti in s tem lesu povečati vrednost, se za to tehnologijo v Evropi vedno bolj povečuje interes. Zaradi boljšega izkoriščenja lesa in praktično brez omejitev oblik in velikosti lepljencev, pa se je zanimanje povečalo tudi pri nas v Sloveniji. To tehnologijo so že industrijsko uvedli v Novi Zelandiji, ZDA in Kanadi (Sterley, 2004).

2.6.2 Dolžinsko lepljenje

2.6.2.1 Dolžinsko lepljenje sušenega lesa

Vedno več evropskih držav ima problem z nižjo kvaliteto in premerom hlodovine, ki jo sprejemajo v žagalnice. Zaradi pogostejših naravnih katastrof je potrebno uporabljati hlodovino, ki ima manjši premer in je bila poškodovana, vsebuje pa različne napake. Zato je lepljenje lesa v inženirske lesne kompozite nujno, da je lahko les še konkurenčen ostalim materialom. Na konkurenčnost na trgu pa ima vedno večji vpliv nizka cena. To pa lahko dosežemo, če lepimo les nižjega kvalitetnega razreda v inženirski les, ki ima višjo dodano vrednost. Dolžinsko lepljenje s pomočjo zobatega spoja se uporablja že dolgo, ampak je vedno obstajal pogoj, da je moral biti les posušen na vlažnost od 8 do 15 %. Rezultat lepljenja pri tej vlažnosti so trdni in kvalitetni spoji. Količina vode v lesu ima namreč odločilen vpliv na ustrezen tok, penetracijo, omočitev in utrditev lepila za les (Marra, 1992). To je še posebej pomembno za lepila, ki so narejena na vodni osnovi, kot so urea-formaldehidna, melamin-formaldehidna, fenol-formaldehidna in polivinil-acetatna lepila.

2.6.2.2 Dolžinsko lepljenje svežega lesa

Raziskave so pokazale, da je možno kvalitetno zlepiti tudi les, ki ima bistveno višjo vlažnost od 18 %, ali pa les, ki sploh ni bil sušen pred fazo lepljenja (Maun, 2005). To je relativno nova tehnologija, ki pa je mogoča samo ob uporabi specialnih lepil, ki lahko utrdijo ob prisotnosti povišane vlažnosti oziroma vode. Takšna lepila so dvokomponentna fenol-resorcinol-formaldehidna lepila (Greenweld), dvokomponentna lepila na osnovi soje in fenol-resorcinol-formaldehida in enokomponentna poliuretanska lepila (PUR).

Lepljenje svežega lesa je predvsem primerno za dolžinsko spajanje krajših kosov, iz katerih so bile izžagane napake. Ko jih ponovno spojimo z zobatim spojem, izboljšamo izkoristek in kvaliteto surovine ter dosežemo kakovostnejše sušenje z manj napakami. Kratke kose različnih dolžin je težje kvalitetno sušiti kot dolge kose enotnih dolžin.

Ker dosežemo boljše izkoristke, se zmanjša poraba svežega materiala tudi do 16 %. (Blümer, 2005).

Na sliki 7 je prikazan diagram poteka dolžinskega lepljenja svežega lesa s pomočjo zobatega spoja. Diagram je primeren za žagalnice, ki si želijo povečati izkoristek in kvaliteto stavbnemu lesu ter želijo porabiti krajše kose lesa v daljših elementih. Najprej iz hloda izžagamo deske, ki imajo visoko vlažnost. Nato sledi razvrščanje desk in odstranitev vseh napak. Sledi izdelava zobatega spoja. Potem sledi nanos lepila in dolžinsko stiskanje ter sušenje v sušilnici. Na koncu pa sledi še končna obdelava, da dosežemo končne dimenzije izdelka, ki ga žagalnica izdeluje.



Slika 7: Diagram poteka dolžinskega lepljenja svežega lesa s pomočjo zobatega spoja za konstrukcijsko uporabo (Šernek in Kuronja, 2007)

3 MATERIALI IN METODE

Cilj raziskave diplomskega dela je bil ugotoviti vpliv vlažnosti lesa na kvaliteto zobatega spoja pri dolžinskem lepljenju oziroma spajanju. Uporabili smo smrekove lamele z različno vlažnostjo, ki smo jih razdelili v tri razrede. V prvem razredu so bile lamele z visoko vlažnostjo (46 %), v drugem razredu so bile lamele z vlažnostjo okrog točke nasičenja celičnih sten (30 %) in v tretjem razredu so bile lamele z vlažnostjo okrog 10 %. Vse lamele smo prečno prežagali na pol. Nato smo izdelali zobati spoj in lamele z isto vlažnostjo dolžinsko spojili. Za lepljenje smo uporabili enokomponentno poliuretansko lepilo (Mitopur E20). Lepili smo pri temperaturi od 18 do 22 °C. Iz zlepljenih lamel smo izdelali preizkušance za ugotavljanje trdnostnih lastnosti in proučili vpliv vlažnosti na kvaliteto lepljenja. Merili smo deformacijo (poves) preizkušancev pri konstantni obremenitvi in proučevali mehanske lastnosti zlepljenega zobatega spoja. Spremljali smo tudi spreminjanje gostote lesa glede na vlažnost.

3.1 MATERIALI

3.1.1 Lepilo (Mitopur E20)¹

Mitopur E20 je enokomponentno poliuretansko voodporno lepilo. Izdelujejo ga v Mitolu, tovarni lepil, d.d. iz Sežane. Lepilni spoj je trden, voodporen in temperaturno obstojen v območju od -40 °C do +90 °C, kar ustreza zahtevam standarda EN 204 za razred D4.

3.1.1.1 Prednosti uporabe lepila Mitopur E20

Lepilo Mitopur E20 ima naslednje dobre lastnosti:

- lepilo je nevtralnega vonja,

¹ Mitopur E20 enokomponentno poliuretansko lepilo, 2010.

- je brez organskih topil,
- hitro utrjuje z reakcijo z vodo,
- za doseganje zadovoljive trdnosti zadošča že 20 minut stiskanja lepljencev,
- pri večjem nanosu in pri pršenju lepila z vodno meglo, se lepilo zapeni, penetrira in utrdi porozne materiale ter zapolni reže in neravnine ter
- ob minimalnem nanosu lepila brez vodne megle, se lepilo ne zapeni, zato omogoča tudi lepljenje vidnih spojev in lakiranih površin.

3.1.1.2 Področje uporabe lepila Mitopur E20

Lepilo Mitopur E20 je predvsem primerno za:

- površinska, širinska, debelinska in montažna lepljenja vseh vrst lesa,
- izdelavo in popravilo stavbnega in vrtnega pohištva, ladijske opreme ter notranjega pohištva, izpostavljenega visoki relativni zračni vlagi ali kondenzu,
- lepljenje sendvič plošč iz izolacijskih materialov: mineralne volne, stiropora, pene, kovinskih ali drugih stranic in
- lepljenje kovin, keramike in drugih materialov.

3.1.1.3 Način uporabe lepila Mitopur E20

Lepilo nanese enostransko na čisto površino (slika 8), nato ga popršimo z vodno meglo in lepljence stisnemo za minimalno 20 minut. Nižje temperature in nanos lepila brez vodne megle podaljšajo odprti čas in čas stiskanja lepljencev. Višje temperature in pršenje lepila z vodno meglo pa jih skrajšajo. Nadaljnja obdelava elementov je možna čez 24 ur.



Slika 8: Enostavno in natančno nanašanje lepila Mitopur E20

3.1.2 Smrekove lamele

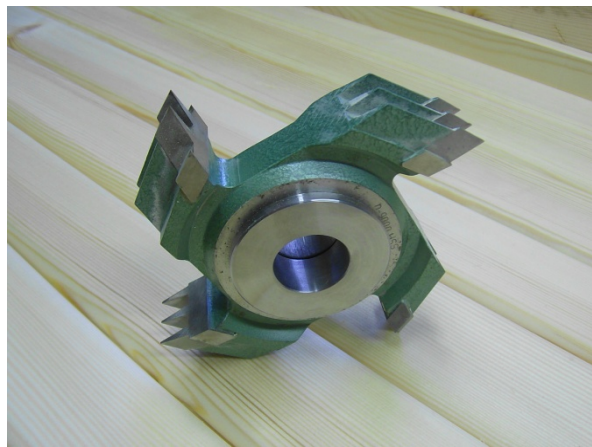
Smreka (*Picea abies* Karst) je v slovenskem prostoru najpogostejši iglavec in je med gospodarsko najpomembnejšimi lesnimi vrstami. Zato smo izdelali lamele iz smrekovega lesa. Lastnosti smrekovine so opisane v teoretičnem delu diplomskega dela v poglavju 2.4.1.

3.2 METODE

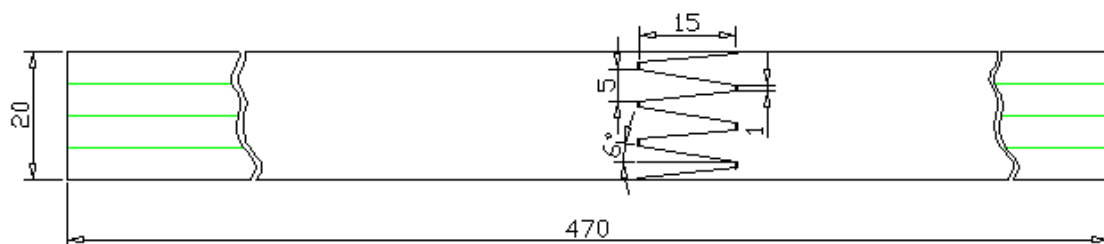
3.2.1 Priprava preizkušancev

Za izdelavo lamel, ki smo jih potrebovali za preizkuse, smo posekali smreko. Hlode je bilo potrebno razžagati v plohe debeline 45 mm, te pa potem krojiti na dimenzijo 40 mm × 40 mm in dolžine 600 mm. Potrebovali smo 200 preizkušancev. Vse je bilo potrebno označiti in jim 3 cm od čela odžagati sušilniški vzorec, s katerim smo določili začetno vlažnost lamel po gravimetrični metodi. Ko smo ugotovili začetno vlažnost, smo lamele razdelili v tri skupine. Prvo skupino smo v sušilniku posušili na 46 %, drugo skupino na 30 % in tretjo skupino na 10 % vlažnosti. Po sušenju smo preizkušancem ponovno izmerili vlažnost in izračunali gostoto. Nato smo lamele prežagali na pol in na rezkalnem stroju s

pomočjo rezkarja (slika 9) izdelali zobati spoj (slika 10) na obeh polovicah. Na zobati spoj smo nanесли 200 g/m² lepila Mitopur E20 in obe polovici dolžinsko zlepili v prirejeni aksialni mehanski stiskalnici. Nato smo lepljenec, ki je imel v sredini zobati spoj, poskobljali na končni presek 20 mm × 20 mm in krojili na dolžino 470 mm ter tako pripravili preizkušaneц za nadaljnje raziskave (slika 11). Po klimatizaciji na 14 % vlažnost je sledilo ugotavljanje mehanskih lastnosti s trgalnim strojem po standardu DIN 52 186.



Slika 9: Orodje za izdelavo zobatega spoja



Slika 10: Dimenzije lamele in zobatega spoja (mm)



Slika 11: Dolžinsko zlepljeni preizkušanci za ugotavljanje mehanskih lastnosti

3.2.2 Klimatizacija preizkušancev

Preizkušance smo klimatizirali v laboratorijskem sušilniku (slika 12). Postopek klimatizacije je potekal en mesec s pomočjo ventilatorja. Končna ravnovesna vlažnost lesa je bila okoli 14 %.



Slika 12: Laboratorijski sušilnik

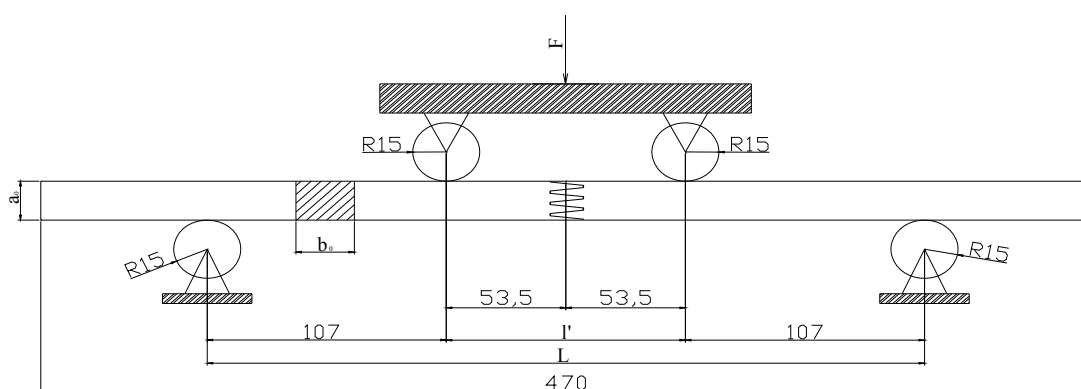
3.2.3 Ugotavljanje mehanskih lastnosti

Mehanske lastnosti dolžinsko spojenih preizkušancev smo ugotavljali z napravo za testiranje mehanskih lastnosti Zwick Z100 (slika 13). Ugotavljali smo upogibno trdnost in modul elastičnosti po standardu DIN 52 186 (slika 14). Test mehanskih lastnosti smo

izvajali tako, da smo v računalnik, ki je bil povezan na napravo za testiranje, najprej vnesli oznako ter debelino in širino preizkušanca. Nato smo preizkušanec položili na podpore in začeli s preizkusom. Preizkušanec smo upogibno obremenjevali in spremljali silo ter povese. Ko smo dosegli povese 4 mm, smo morali odstraniti ekstenziometer, da se ni poškodoval zaradi loma preizkušanca. Po poružitvi preizkušanca je računalniški program podal vrednosti sile loma in izračunal upogibno trdnost po formuli (3) in modul elastičnosti po formuli (4). Čas, v katerem je moralo priti do loma, je bil 90 ± 30 sekund. Pogoji v laboratoriju med preizkušanjem so bili: $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$, $RZV = 60 \%$. Vlažnost vseh preizkušancev v času preizkušanja je bila okoli 14 %.

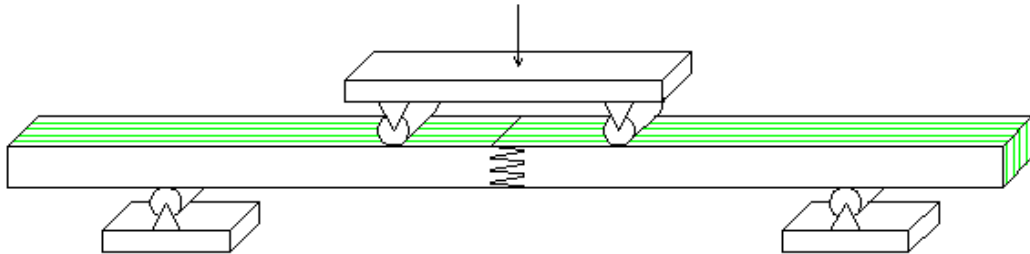


Slika 13: Naprava za testiranje štiri točkovni upogib, Zwick Z100

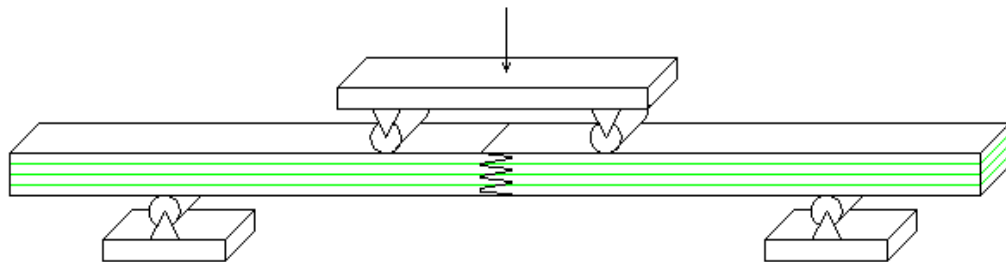


Slika 14: Shema testa za preizkus mehanskih lastnosti DIN 52 186 (dimenzije za naš primer)

Polovico preizkušancev smo orientirali tako, da je bila obremenitev v tangencialni smeri (slika 15), polovico pa v radialni smeri (slika 16). Zelene črte na slikah predstavljajo potek branike oziroma letnice.



Slika 15: Orientiranost preizkušancev glede na smer obremenitve: v tangencialni smeri (T)



Slika 16: Orientiranost preizkušancev glede na smer obremenitve: v radialni smeri (R)

Upogibno trdnost (σ_M) smo izračunali po formuli:

$$\sigma_M = \frac{3 \cdot F \cdot (L - l')}{2 \cdot b \cdot a^2} \quad \dots(3)$$

Modul elastičnosti (E_{mod}) smo izračunali po formuli:

$$E_{\text{mod}} = \frac{(2 \cdot L^3 - 3 \cdot L \cdot l'^2 + l'^3)}{8 \cdot b \cdot a^3} \quad \dots(4)$$

Kjer je:

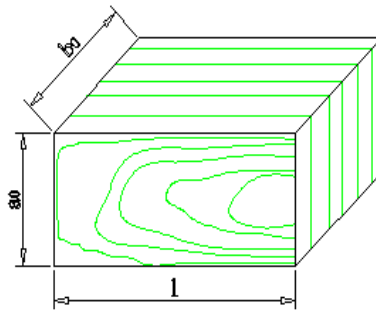
- F (N) – sila loma,
- σ_M (N/mm²) – upogibna trdnost,
- b_0 (mm) – širina preizkušanca,
- a_0 (mm) – debelina preizkušanca,
- L (321 mm) – razdalja med podporama (mm),
- E_{mod} (N/mm²) – modul elastičnosti in
- l' (107 mm) – razdalja med sredinskima zgornjima točkama obremenjevanja.

3.2.4 Ugotavljanje vlažnosti lesa

Po končanem mehanskem preizkusu smo vsakemu preizkušancu ugotovili vlažnost. To smo izvedli tako, da smo 4 cm od čela preizkušanca na miznem krožnem žagalnem stroju izžagali manjši preizkušaneč dolžine 5 cm. Nato smo preizkušance stehali na laboratorijski tehtnici na 0,01 g natančno ter jih označili. Potem smo jih dali v sušilnik s temperaturo 103 ± 2 °C za 24 ur, oz. smo jih sušili do konstantne mase. Po sušenju smo jih ponovno stehali z laboratorijsko tehtnico na 0,01g natančno in izračunali vlažnost vzorcev po formuli (1).

3.2.5 Ugotavljanje gostote lesa

Za ugotavljanje gostote lesa smo uporabili iste preizkušance, kot za ugotavljanje vlažnosti lesa. Potrebno je bilo izmeriti dolžino, širino in debelino preizkušancev (slika 17). Meritev smo izvedli s kljunastim merilom (slika 18) na 0,01 mm natančno. Za maso preizkušancev pa smo uporabili kar podatke, ki smo jih izmerili pri ugotavljanju vlažnosti lesa za določanje skupine v katero spada. Izmerili smo jih na laboratorijski tehtnici na 0,01 g natančno.



Slika 17: Merjenje dimenzij preizkušanca za ugotavljanje gostote



Slika 18: Kljunasto merilo za merjenje dimenzij preizkušanca

Gostoto preizkušancev smo izračunali po formuli:

$$\rho = \frac{m}{a_0 \cdot b_0 \cdot l} \quad \dots(5)$$

Kjer je:

- ρ - gostota lesa preizkušanca (g/mm^3),
- m – masa preizkušanca (g),
- a_0 – debelina preizkušanca (mm),
- b_0 – širina preizkušanca (mm) in
- l – dolžina preizkušanca (mm).

4 REZULTATI

4.1 MODUL ELASTIČNOSTI IN UPOGIBNA TRDNOST PREIZKUŠANCEV

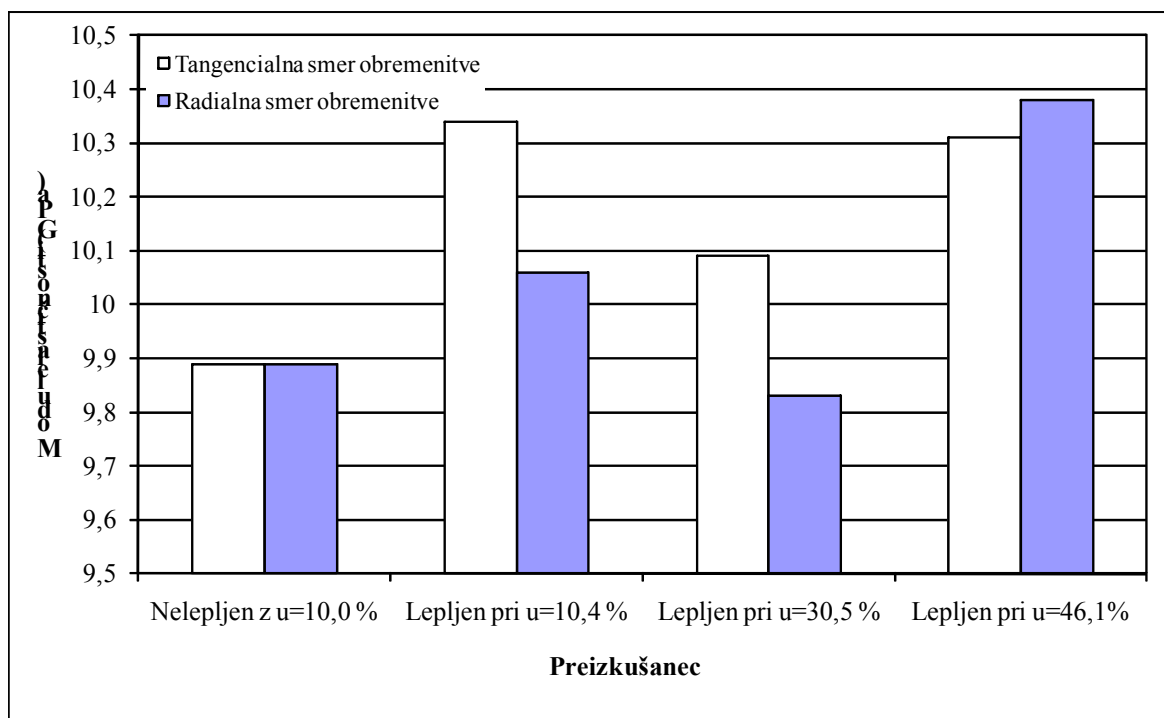
S pomočjo štiri točkovne upogibne obremenitve smo proučevali preizkušance, ki so bili dolžinsko spojeni z zobatim spojem in zlepljeni z enokomponentnim poliuretanskim lepilom Mitopur E20 pri različni vlažnosti lesa in preizkušance, ki so bili iz enega dela (niso bili zlepljeni). Tako smo lahko ugotovili vpliv vlažnosti in gostote lesa na mehanske lastnosti dolžinsko spojenega lesa, glede na usmerjenost preizkušancev. V preglednici 2 so predstavljeni povprečni rezultati meritev. Za izvajanje preizkusov smo imeli v vsaki skupini približno 30 preizkušancev. Vsi ostali podatki, ki so potrebni za izračun po standardu DIN 52 186, pa so predstavljeni v prilogah oznake od A do M. Proučevali smo tudi rezultate glede na smer branike. Ker ni velikega odstopanja, smo z raziskavo na tem področju prekinili.

Preglednica 2: Povprečni moduli elastičnosti, upogibne trdnosti in standardni odkloni preizkušancev zlepljenih pri različnih vlažnostih za radialno in tangencialno smer obremenitve.

Preizkušanec	Modul elastičnosti		Upogibna trdnost	
	E_{mod} [GPa]		σ_M [MPa]	
	[R]	[T]	[R]	[T]
Lepljen pri $u=10,4\%$	10,34	10,06	53,02	49,85
Standardni odklon	0,86	1,04	5,67	5,56
Lepljen pri $u=30,5\%$	10,09	9,83	45,67	45,98
Standardni odklon	1,06	1,17	6,99	8,26
Lepljen pri $u=46,1\%$	10,31	10,38	44,7	46,24
Standardni odklon	1,15	1,34	6,12	9,16
Nelepljen z $u=10\%$	9,89		63,27	
Standardni odklon	0,82		3,38	

4.1.1 Modul elastičnosti preizkušancev

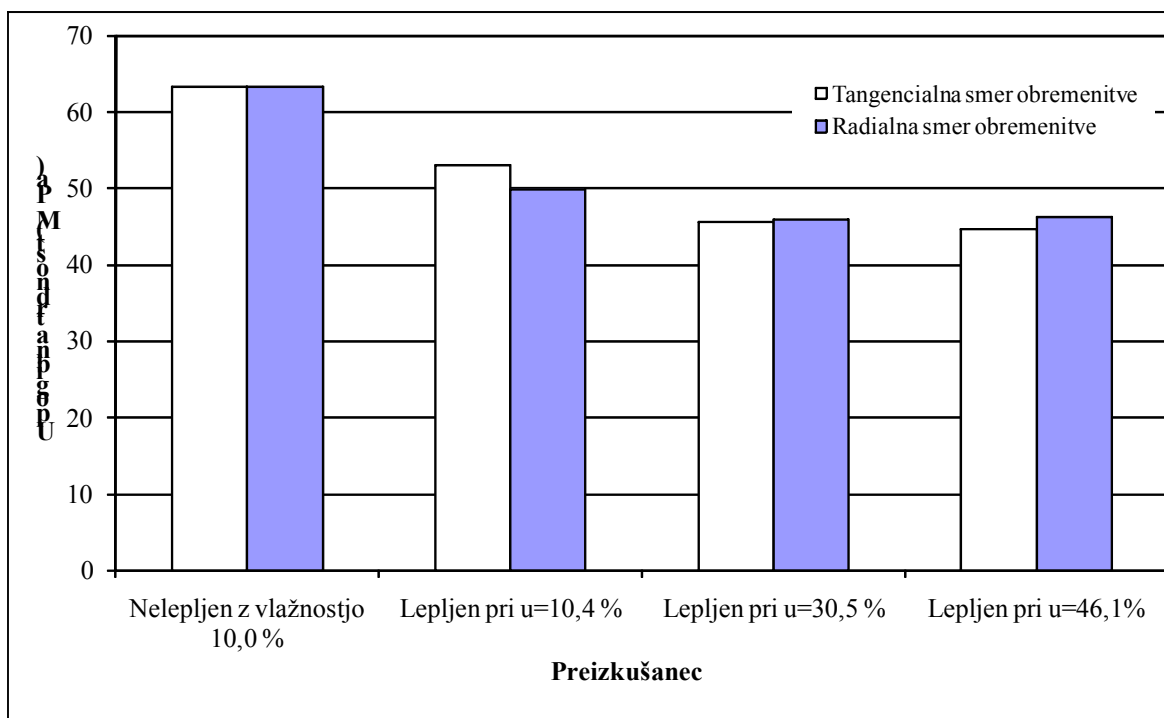
Na sliki 18 lahko vidimo, da se vrednosti modula elastičnosti spreminjajo in je najvišja vrednost pri visoki vlažnosti. Razvidno je tudi, da so imeli zlepljeni preizkušanci nekoliko višje povprečne vrednosti, kot so jih imeli preizkušanci, ki niso bili zlepljeni.



Slika 19: Modul elastičnosti pri štiri točkovni obremenitvi preizkušancev lepljenih pri različnih vlažnostih z lepilom Mitopur E20

4.1.2 Upogibna trdnost preizkušancev

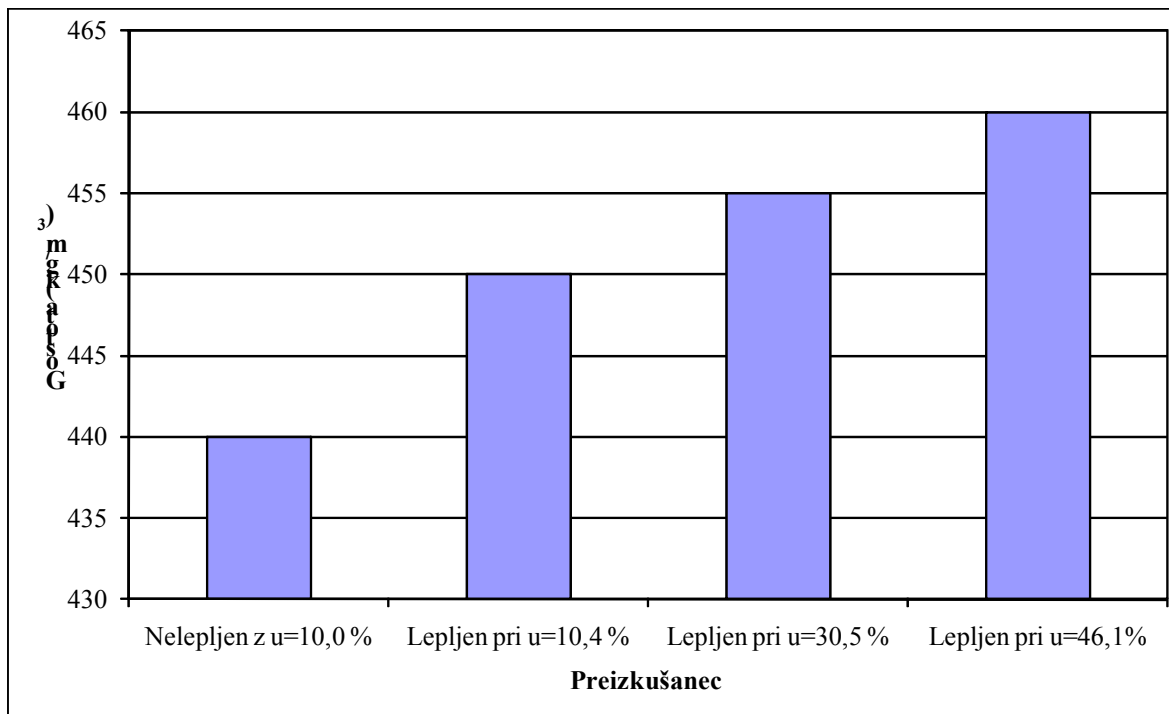
Na sliki 20 lahko vidimo, da povprečna upogibna trdnost pada glede na vlažnost lesa pri lepljenju preizkušancev. Ugotovili smo tudi, da orientiranost preizkušanca (slika 15 in 16) ni imela bistvenega vpliva na upogibno trdnost.



Slika 20: Upogibna trdnost pri štiri točkovni obremenitvi preizkušancev lepljenih pri različnih vlažnostih z lepilom Mitopur E20

4.2 GOSTOTA PREIZKUŠANCEV ZA POSAMEZNO SKUPINO

Na sliki 21 lahko vidimo vpliv vlažnosti lesa na njegovo gostoto. Les z višjo vlažnostjo vsebuje več vode in je zaradi tega težji, lumni celic so zapolnjeni z vodo. Pri višji vlažnosti pride do manjše penetracije lepila v les zaradi velike vsebnosti vode. Nelepljeni preizkušanci so bili skozi celoten potek priprav v isti klimi in so imeli povprečno ravnovesno vlažnost 10 %. Navedene gostote veljajo pri različnih vlažnostih, pri katerih je potekalo lepljenje.



Slika 21: Gostota preizkušancev za posamezno skupino v času lepljenja z lepilom Mitopur E20

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

Kljub različnim materialom, ki se uporabljajo v gradbeništvu, se v zadnjih letih za konstrukcijske namene vedno bolj uveljavlja les. To smo dosegli z dolžinskim spajanjem s pomočjo zobatega spoja in z ustrezno površinsko zaščito lepljenih proizvodov. S takšno tehnologijo smo lahko konkurenčni ostalim materialom, saj lahko izdelamo proizvode z neomejeno dolžino, pri tem pa izžagamo vse napake, ki so nam v preteklosti povzročale težave pri sami obdelavi in na koncu pri konstrukcijski stabilnosti. Tehnologijo dolžinskega lepljenja s pomočjo zobatega spoja poznamo že dolgo, zadnje čase pa se pojavlja težnja po lepljenju svežega oziroma mokrega lesa. Glede na dosedanje raziskave se tako spojenemu lesu poveča dodana vrednost, prav tako pa se znižajo stroški obdelave in povečajo izkoristki lesa. To pa dosežemo s tem, da napake v lesu izžagamo že na začetku, nadaljnja obdelava pa ne vsebuje odpadnega materiala.

Med lepila, ki omogočajo lepljenje vlažnega in mokrega lesa, spada tudi enokomponentno poliuretansko lepilo Mitopur E20. Lepilo je enostavno za uporabo in ne zahteva drage tehnologije za nanašanje. V raziskavi smo želeli ugotoviti, ali je to lepilo dovolj kakovostno za tovrstna lepljenja. Zato smo uporabili smrekov les različnih vlažnosti, ki smo ga razdelili v tri skupine, da bi ugotovili vpliv vlažnosti na kvaliteto lepljenja lesa.

Preizkušanci iz smrekovega lesa so imeli različno vlažnost in so bili na sredini dolžinsko spojeni z lepilom Mitopur E20 s pomočjo zobatega spoja. Preizkuse smo izvedli po standardu DIN 52 186 s strojem za preizkušanje ZWICK Z100. Rezultati za upogibno trdnost in modul elastičnosti so se spreminjali v odvisnosti od vlažnosti lesa v času lepljenja. V literaturi (Čufar, 2001) najdemo vrednosti za upogibno trdnost smrekovine od 66 MPa do 68 MPa, v našem primeru pa smo dosegli vrednosti od 45 MPa do 63,3 MPa. Modul elastičnosti za smrekovino je od 10 GPa do 11 GPa, v našem primeru so se vrednosti nahajale med 9,89 GPa in 10,38 GPa.

Z lepilom Mitopur E20 smo dobili kvalitetne spoje, saj se je večina preizkušancev zlomila po lesu. Lepilo je ustvarilo zadostno adhezijo na osnovi kemijske reakcije s hidroksilnimi skupinami lesa. Ker vlažen les vsebuje več vode, sorazmerno s tem pa tudi več OH skupin za reakcijo, so bili spoji tudi pri visoki vlažnosti lesa kvalitetni. To pa še ne pomeni, da je lepljenje svežega lesa kvalitetnejše od lepljenja sušenega. Sveži lepljenci se sušijo na ravnovesno vlažnost po spajanju, posledica pa je različno krčenje in s tem napetosti in deformacije v lepilnem spoju.

5.2 SKLEPI

Z raziskavo smo ugotovili, da je lepljenje sveže smrekovine z enokomponentnim poliuretanskim lepilom MITOPUR E20 možno. Lom preizkušancev je potekal večinoma po lesu. Lepilni spoj je bil zadovoljiv tudi pri preizkušancih z višjo vlažnostjo nad TNCS. Nanos lepila je moral biti dovolj velik (200-300 g/m²) zaradi hitrega reagiranja in penetriranja lepila v površino lesa. V primerjavi s kontrolnimi preizkušanci so preizkušanci iz sveže zlepljene smrekovine izkazovali 25 – 30% nižjo upogibno trdnost. Pri lepljenju z enokomponentnim poliuretanskim lepilom MITOPUR E20 je primeren hladen postopek lepljenja, kjer so časi lepljenja bolj vlažnih preizkušancev tudi do 50 % krajši. S primerjavo rezultatov pri upogibnem preizkusu, ki so navedeni v lesarskih priročnikih za lepljenje lesa, ki je predhodno posušen pod TNCS, in rezultatov, katere smo dobili z našimi preizkusi z vlažnostjo nad TNCS, smo ugotovili, da so naši nekoliko slabši, vendar ni velikega odstopanja. Kvalitetno lepljenje sveže smrekovine lahko dosežemo le s predčasno odstranitvijo grč in drugih napak iz lesa, ker se z napakami v lesu povečujejo kritična mesta, pri katerih lahko kasneje pride do loma. Prav tako pa nam napake povzročajo težave pri nadaljnji obdelavi in sušenju zlepljenega izdelka.

6 POVZETEK

Lesna industrija ima vedno večje težave ostati konkurenčna na trgih, kjer se pojavljajo razni novi materiali. Vedno več lastnikov gozdov v Sloveniji je začelo delati z lesom bolj preudarno. Lesu se kvaliteta povečuje s tem pa tudi končna cena. Da lahko sledimo konkurenci, je potrebno čim bolj znižati stroške izdelave izdelkom, ali pa uporabiti slabšo kvaliteto lesa za določene izdelke, kjer je to izvedljivo. Pri lesnih izdelkih je velikokrat potrebna ustrezna dolžina, zato se je uveljavil postopek dolžinskega spajanja s pomočjo zobatega spoja. S tem postopkom se teoretično lahko spojijo kratki konci lesa v neskončen proizvod, ki ne vsebuje napak, saj se le te prej izžagajo. Ker je pri klasičnem postopku dolžinskega spajanja potrebno les najprej posušiti na nizko vlažnost, ki omogoča kvalitetno lepljenje z običajnimi lepili, se je začel razvijati postopek spajanja vlažnega lesa. V preteklosti je bil problem izbrati prava lepila oz. so bila ta precej dražja od lepil za običajna lepljenja. Sedaj pa se že tudi pri nas pojavljajo lepila, ki so sposobna zagotoviti kvaliteten spoj tudi pri spajanju lesa z vlažnostjo nad TNCS.

V raziskavi za diplomsko delo smo uporabili smrekov les. Preizkušance smo pridobili tako, da smo v domačem gozdu posekali smreko, nato smo hlod razžagali in pripravili sveže lamele. Začetne dimenzije lamel so bile preseka $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ in dolžine 580 mm . Lamelam smo z gravimetrično metodo ugotovili začetno vlažnost ter jih razvrstili v tri skupine glede na vlažnost. Nato smo lamele, ki so imele najnižjo začetno vlažnost, posušili v sušilni komori na povprečno vlažnost $10,43\%$. Za ostali dve skupini pa smo jih posušili v sušilni komori na $30,47\%$ in $46,1\%$ vlažnosti. Pri svežih lamelah je bila vlažnost tudi do 183% . Lamele smo nato prežagali na polovico in jih ponovno dolžinsko zlepili s pomočjo zobatega spoja in enokomponentnega poliuretanskega lepila MITOPUR E20. Lepilo smo nanašali ročno, stiskali pa smo v prirejeni aksialni mehanski stiskalnici. Po 24 urah smo dolžinsko spojene preizkušance poskobljali na točne dimenzije in sicer preseka $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ in jih očelili na dolžino 470 mm . Preizkušance smo potem vstavili v klima komoro, kjer so se klimatizirali na 14% vlažnost. Preizkuse smo izvajali na napravi za testiranje mehanskih lastnosti Zwick Z100. Ugotavljali smo modul elastičnosti in upogibno trdnost po standardu DIN 52 186. Test mehanskih lastnosti smo izvajali tako, da smo najprej

preizkušance položili na napravo za testiranje mehanskih lastnosti. Pomembno je bilo, da je bil preizkušanec obremenjen na točno določenih mestih, ki jih zahteva standard. Nato smo v računalnik, ki je bil povezan z napravo za testiranje, vnesli potrebne parametre, ki jih je računalniški program potreboval, da nam je nato lahko podal rezultate kot modul elastičnosti in upogibno trdnost. Čas v katerem se je moral preizkus izvesti pa je bil 90 ± 30 sekund.

Po končanem mehanskem testu smo vsakemu preizkušancu 5 cm od čela odžagali 5 cm dolg preizkušanec za ugotavljanje vlažnosti. Nato smo vzorce stehali na laboratorijski tehtnici na 0,01 g natančno. Ker nas je zanimala tudi gostota preizkušancev, smo s pomočjo kljunastega merila z digitalnim prikazom vrednosti na 0,01 mm natančno izmerili še dolžino, širino in debelino preizkušancev. Nato smo preizkušance dali v laboratorijski sušilnik s temperaturo 103 ± 2 °C. Po sušenju do konstantne mase smo preizkušance ponovno stehali in izračunali njihovo vlažnost. S pomočjo istih preizkušancev pa smo izračunali tudi gostoto.

V raziskavi smo ugotovili, da je enokomponentno poliuretansko lepilo MITOPUR E20 primerno za dolžinsko spajanje sveže smrekovine s pomočjo zobatega spoja, saj so lepilni spoji dovolj trdni tudi pri višjih vlažnostih (50 %). Pri preizkusih upogibne trdnosti smo ugotovili, da vlažnost lesa vpliva na trdnost lepilnega spoja. Tako smo najboljše rezultate za upogibno trdnost dobili pri lepljencih, ki so bili zlepljeni pri 10,43 % vlažnosti. Pri modulu elastičnosti pa so se rezultati dvigali sorazmerno z vlažnostjo, tako so bili najboljši pri vlažnosti 46,1 %. Rezultati, ki smo jih dobili pri ostalih dveh skupinah, so bili nižji, vendar se je lom še vedno pojavljal po lesu in ne po spoju.

7 VIRI

1. Backović M. 1997. Lijepljenje u tehnologijama prerade drveta. Sarajevo, Bosna Public: 396 str.
2. Blümer H. 2005. Integrating green finger jointing into the production process. V: Green gluing of wood – process – products - market. Borås, SP Swedish National Testing and Research Institute: 21–25
3. Čufar K. 2001 Opisi lesnih vrst. Študijska literatura, Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 53 str.
4. DIN 52 186 Juni 1978. Prüfung von Holz Biegeversuch: 4 str.
5. Geršak M., Medjugorac N., Velušček V. 1985. Sušenje lesa. Ljubljana, Lesarska založba: 163 str.
6. Kalčič I. 2006. Omočitev in adhezija pri lepljenju hitrorastočih drevesnih vrst: diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 43 str.
7. Kuronja B. 2006. Lepljenje sveže smrekovine: diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 13-15
8. Marra A. A. 1992. Technology of wood Bonding: Principles in Practice. New York, Van Nostrand Reinhold: 454 str.
9. Maun K. 2005 Introduction to green gluing. V: Green gluing of wood – process– products- market. Borås, SP Swedish National Testing and Research Institute: 8-20

10. Mitopur E20 enokomponentno poliuretansko lepilo. 2010. Mitol (11.1.2010).
<http://www.mitol.si/delnicarji/images/mitopurE20.asp> (9.5.2010)
11. Resnik J. 1997. Lepila in lepljenje lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 103 str.
12. Sterley M., Blümer H., Wålinder M. E. P. 2004. Edge and face gluing of green timber using a one – component polyurethane adhesive. Holz Roh Werkst., 62: 479-482
13. Sterley M. 2005. Finger jointing of green Scots pine. V: Proceedings of COST E34 Green bonding of wood Sweden, April 7-8, 2005: 10 str.
14. Šernek M. 2004. Furnir in lepljen les; študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 50 str.
15. Šernek M., Kuronja B. 2007. Lepljenje sveže smrekovine. Les, 59, 5-6: 136-141

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Milanu Šerneku za pomoč pri izvedbi in usmerjanju diplomskega dela.

Hvala tudi recenzentu viš. pred. mag. Bogdanu Šegi za strokovno recenzijo diplomskega dela.

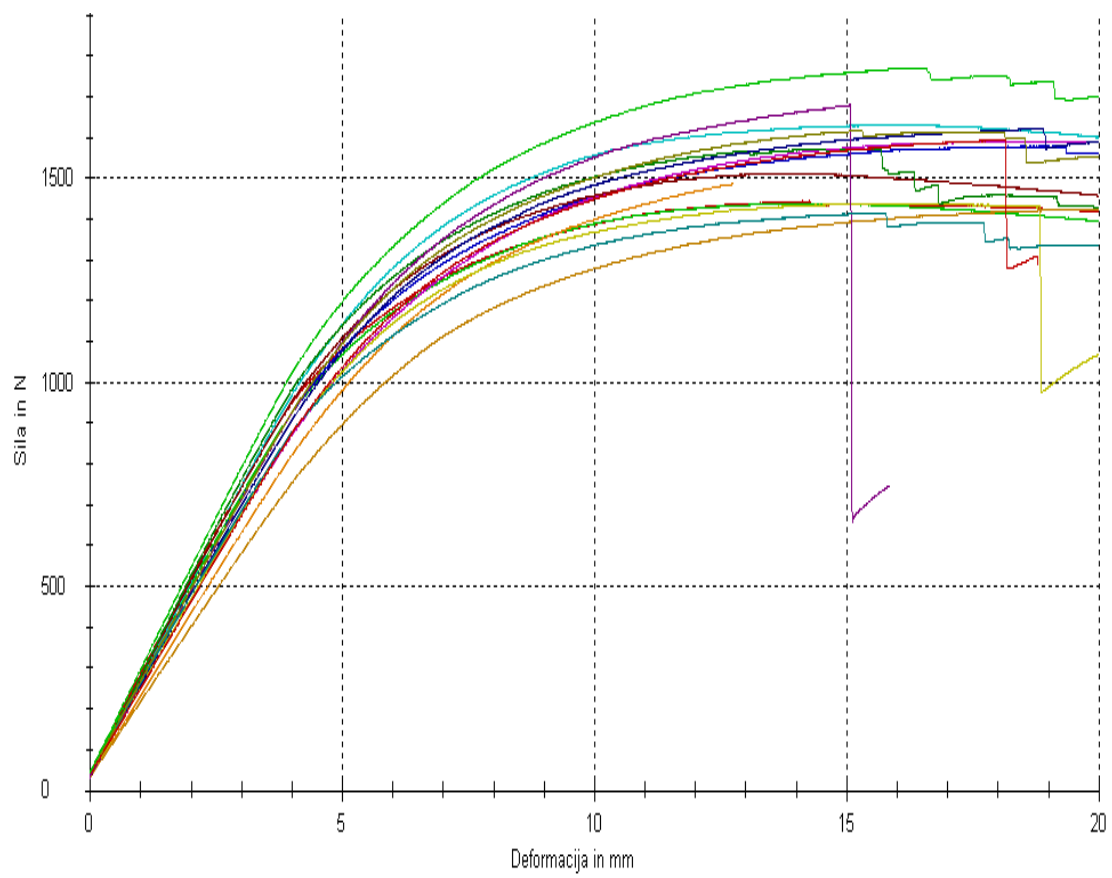
Zahvala gre tudi staršem, ki so mi s finančno pomočjo omogočili zaključek študija in za pomoč pri poseku in spravilu smreke, ki sem jo potreboval za izdelavo preizkušancev.

Simon LAUKO

PRILOGE

Priloga A: Rezultati testiranja smrekovih preizkušancev, ki niso bili lepljeni.

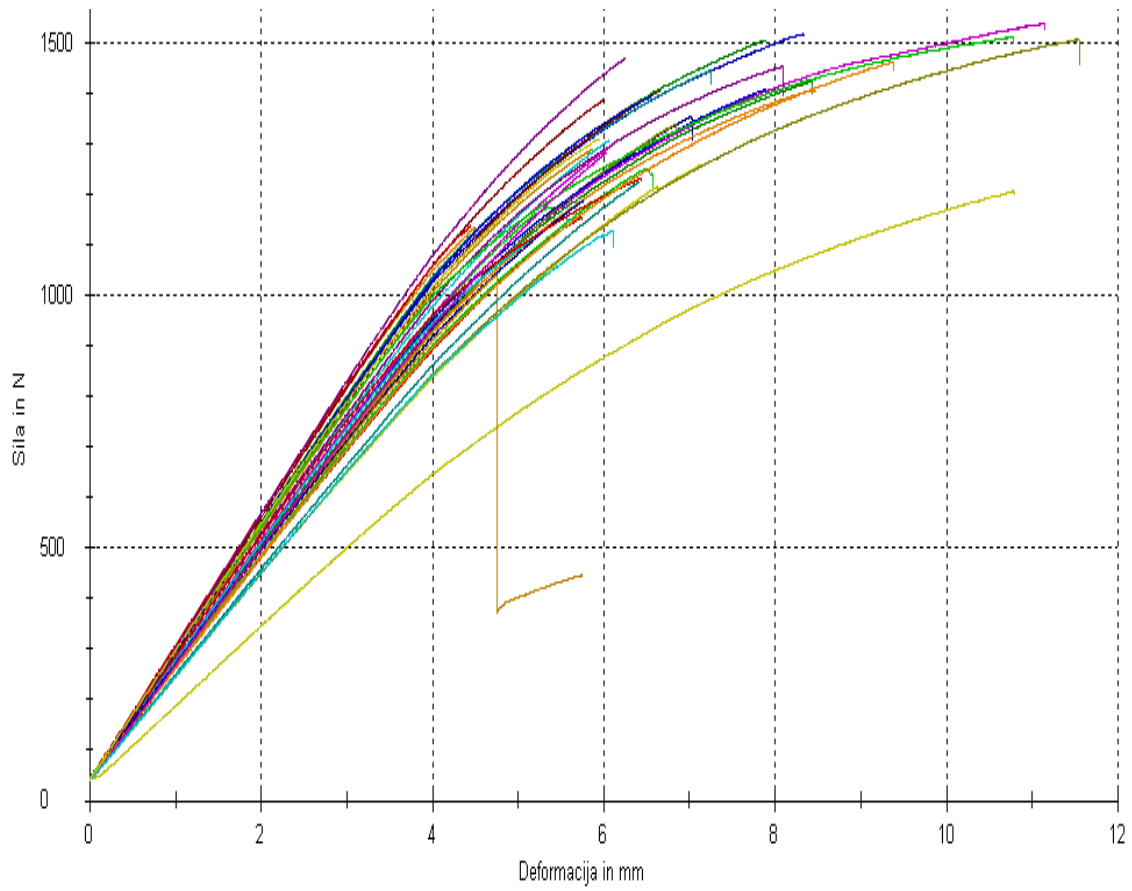
Oznaka	Vlažnost test.	Gostota	a_0	b_0	F_{max}	F_{low}	F_{high}	t_{Test}	E_{mod}	σ_M
	u (%)	[kg/m ³]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[s]	[GPa]	[N/mm ²]
4	13,6	450	20,25	20,17	1770	177	708,1	106	10,50	68,70
5	13,6	430	20,1	20,1	1571	157,1	628,3	103	10,60	62,10
6	14,4	450	19,92	19,62	1621	162,1	648,5	107	10,10	66,90
7	14,5	430	19,92	19,7	1424	142,4	569,5	100	8,26	58,50
9	13,4	440	20,05	20,1	1679	167,9	671,4	71	9,82	66,70
10	13,9	460	20,08	20,06	1591	159,1	636,2	133	9,27	63,10
11	13,4	440	20,13	20,15	1617	161,7	646,9	105	9,65	63,60
12	14,2	400	19,67	19,81	1414	141,4	565,7	103	10,10	59,20
13	13,9	430	20	19,79	1486	148,6	594,6	55	8,91	60,30
14	14,3	440	19,87	19,65	1577	157,7	631	143	10,40	65,30
16	12,8	430	20,15	20,12	1593	159,3	637,2	84	9,10	62,60
17	14,0	440	19,79	19,81	1511	151,1	604,3	101	11,00	62,50
19	14,0	420	20	19,64	1436	143,6	574,6	93	9,69	58,70
20	14,2	450	19,91	19,54	1630	163	652,2	119	11,10	67,60
Najmanjša vrednost									8,26	58,50
Največja vrednost									11,1	68,70
Srednja vrednost									9,89	63,27
Standardni odklon									0,82	3,38



Priloga B: Sila v odvisnosti od povesa pri štiri točkovni obremenitvi preizkušancev, ki niso bili lepljeni.

Priloga C: Rezultati testiranja smrekovih preizkušancev, ki so bili lepljeni pri 10,4 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v tangencialni smeri.

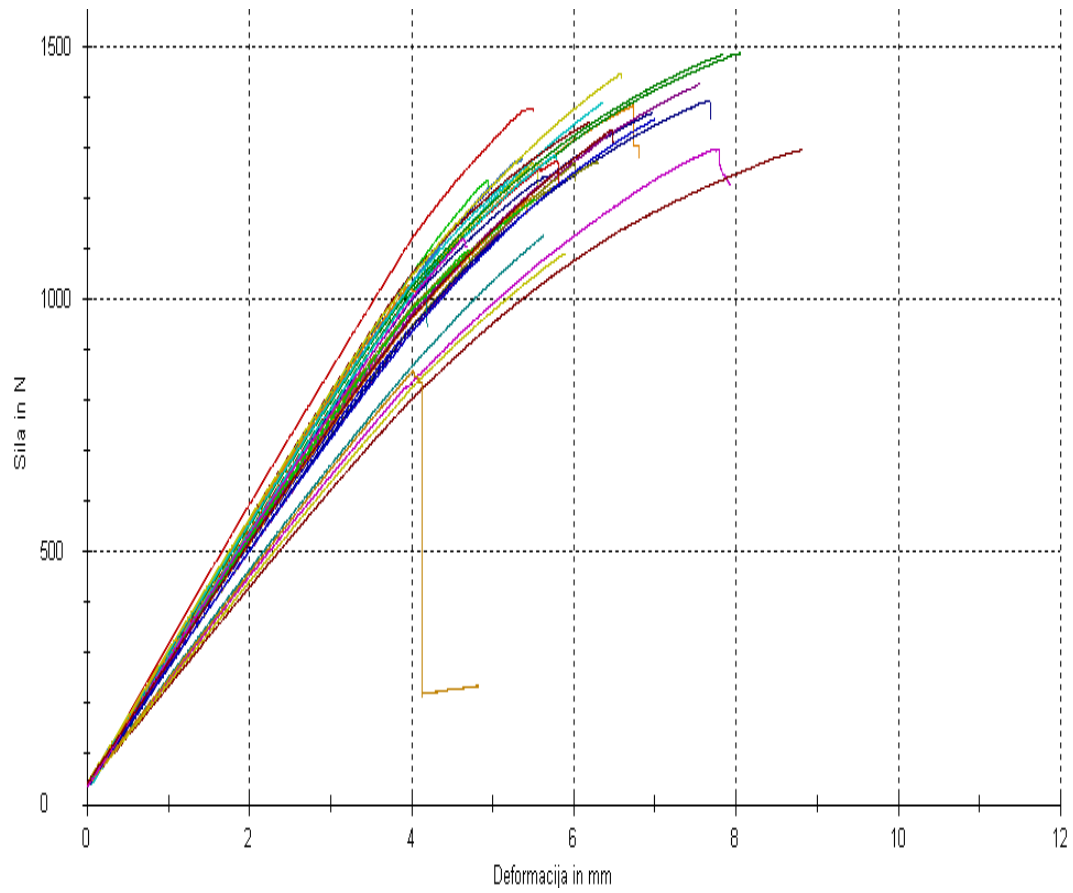
Oznaka	Začetna vl.	Vlažnost test.	Gostota	a0	b0	F max	F low	F high	t Test	E mod	σ_M
	u (%)	u (%)	[kg/m ³]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[s]	[GPa]	[N/mm ²]
1p1	10,4	14,08	440	20,04	20,09	1154	115,4	461,8	85	9,71	46,4
1p2	10,7	13,58	500	20,04	20,1	1174	117,4	469,7	80	10,3	46,7
1p3	9,9	13,68	450	20,01	20,02	1518	151,8	607,3	120	11,1	60,8
1p4	10,2	13,87	450	20	20	1135	113,5	454,1	68	11,9	45,6
1p5	10,6	14,21	410	19,92	20,1	1539	153,9	615,4	140	10,1	61,9
1p6	10,2	13,82	440	19,86	20,01	1306	130,6	522,6	91	10,9	53,1
1p7	10,1	14,49	450	19,97	20,07	1207	120,7	482,8	150	6,92	48,4
1p8	10,6	14,22	470	19,86	20,04	1388	138,8	555,1	90	11,8	56,4
1p9	10,5	14,00	430	19,98	20,03	1424	142,4	569,4	120	10,1	57,1
1p10	10,2	13,90	440	19,93	20,07	1353	135,3	541,3	90	10,1	54,5
1p11	10,4	13,89	430	19,95	20,08	1289	128,9	515,6	87	10,9	51,8
1p12	10,5	13,94	430	19,93	20,07	1454	145,4	581,5	110	10,8	58,5
1p13	10,3	13,63	440	19,86	20,04	1446	144,6	578,6	97	11,5	58,7
1p14	10,5	14,08	440	20	20,07	1340	134	536,1	100	9,97	53,6
1p15	10,4	13,83	450	19,9	20,08	1137	113,7	454,9	71	11,8	45,9
1p16	10,8	13,82	410	20,02	20,13	1252	125,2	500,7	96	9,66	49,8
1p17	10,5	14,01	470	20,06	20,06	1408	140,8	563,2	110	10,2	56
1p18	10,5	13,96	450	19,97	20,09	1405	140,5	562,2	121	9,99	56,3
1p19	10,5	14,00	460	20	20,08	1294	129,4	517,4	90	10,4	51,7
1p20	10,6	14,25	430	20,03	20,06	1156	115,6	462,6	84	10,3	46,1
1p21	10,7	14,25	470	20,09	20,1	1259	125,9	503,4	95	8,78	49,8
1p22	9,9	13,98	460	19,86	20,03	1408	140,8	563,2	90	11,4	57,2
1p23	10,5	14,32	450	20,01	20,06	1505	150,5	602,1	113	11,3	60,2
1p24	10,7	14,11	430	19,97	20,09	1188	118,8	475,4	90	9,95	47,6
1p25	10,3	14,02	430	19,96	20,06	1040	104	415,8	86	9,93	41,8
1p26	10,1	13,94	470	19,88	20,14	1470	147	587,8	91	11,8	59,3
1p27	10,7	14,52	480	20,1	20,09	1225	122,5	489,9	92	9,05	48,4
1p28	10,1	14,13	460	19,96	20,09	1507	150,7	602,8	150	9,01	60,4
1p29	10,8	13,73	420	20,03	20,05	1232	123,2	492,8	96	10,5	49,2
1p30	10,0	14,13	420	20,02	20,04	1512	151,2	604,7	150	10,9	60,4
1p31	10,2	13,70	430	20,01	20,11	1397	139,7	558,8	97	11,1	55,7
1p32	10,7	14,36	460	20,03	20,07	1463	146,3	585,2	132	9,55	58,3
1p33	10,2	13,76	460	20,04	20,13	1284	128,4	513,5	87	10,1	51
1p34	10,2	13,91	430	20,04	20,13	1127	112,7	451	89	8,99	44,8
1p35	10,3	13,82	440	20,05	19,9	1311	131,1	524,2	87	11,1	52,6
Najmanjša vrednost										6,92	41,8
Največja vrednost										11,19	61,9
Srednja vrednost										10,34	53,02
Standardni odklon										1,04	5,56



Priloga D: Sila v odvisnosti od povesa pri štiri točkovni obremenitvi preizkušancev, ki so bili zlepljeni pri 10,4 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v tangencialni smeri.

Priloga E: Rezultati testiranja smrekovih preizkušancev, ki so bili lepljeni pri 10,4 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v radialni smeri.

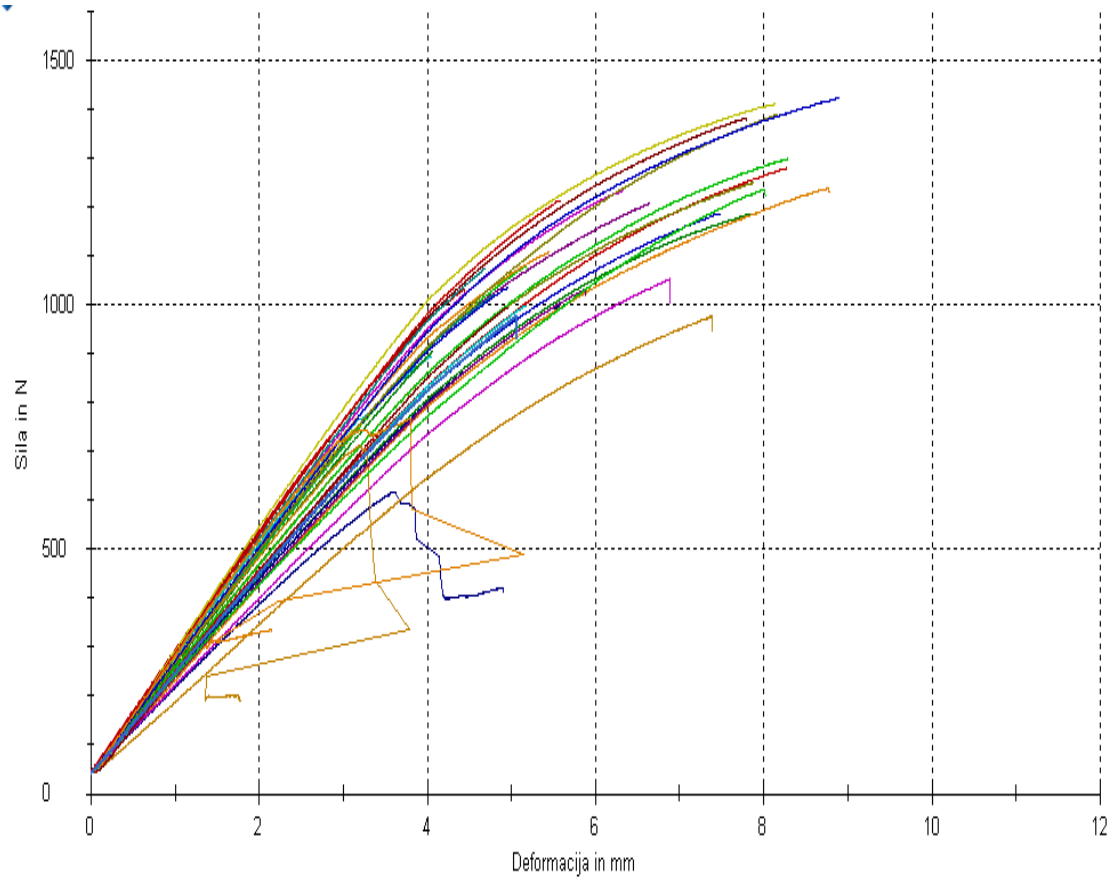
Oznaka	Začetna vl.	Vlažnost test.	Gostota	a0	b0	F max	F low	F high	t Test	E mod	σ_M
	u (%)	u (%)	[kg/m ³]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[s]	[GPa]	[N/mm ²]
1v1	10,5	14,14	450	20,12	20,1	1276	127,6	510,5	14	11,1	50,3
1v2	10,2	14,10	470	20,01	20,06	1236	123,6	494,4	60	11,5	49,4
1v3	10,9	14,54	450	20,11	20,06	1078	107,8	431,1	71	10,3	42,6
1v4	10,5	14,42	430	20,1	20,05	1384	138,4	553,6	98	11	54,8
1v5	10,6	14,38	410	20,13	20,05	1298	129,8	519,2	112	8,88	51,3
1v6	10,7	14,75	460	20,1	20,03	1391	139,1	556,3	91	11	55,2
1v7	10,4	14,65	480	20,1	20,09	1270	127	507,9	81	10,9	50,2
1v8	10,6	14,75	440	20,11	20,05	1297	129,7	518,9	122	8,46	51,4
1v9	10,5	14,32	440	20,07	20,05	1488	148,8	595,2	115	10,9	59,1
1v10	10,7	14,30	430	20,1	20,04	1370	137	547,8	74	10,8	54,3
1v11	10,6	14,45	440	20,08	20,02	1205	120,5	482,2	84	10,6	47,9
1v12	10,7	14,41	450	20,09	20,09	1328	132,8	531,2	68	10	52,6
1v13	10,6	14,64	460	20,06	20,09	1128	112,8	451,2	69	9,31	44,8
1v14	10,4	14,66	430	20,13	20,06	1271	127,1	508,3	73	10	50,2
1v15	12,5	14,72	450	20,07	20,07	1275	127,5	510,1	72	10,9	50,6
1v16	8,8	14,15	460	20,07	20,08	1097	109,7	438,8	59	10,6	43,5
1v17	10,7	14,36	470	20,02	20,02	1221	122,1	488,5	63	11,7	48,9
1v18	10,4	14,48	470	20,07	20,08	1186	118,6	474,5	80	10,5	47,1
1v19	10,5	14,08	460	20,12	20,04	1067	106,7	426,8	68	10,7	42,2
1v20	9,9	14,61	430	20,03	20,04	1285	128,5	514,2	85	10,9	51,3
1v21	10,7	14,77	450	20,15	20,09	1091	109,1	436,4	81	8,67	42,9
1v22	10,4	13,80	560	20,1	20,07	1350	135	540,2	92	11,4	53,5
1v23	10,2	14,34	450	20,06	20,05	1485	148,5	594,1	112	11,1	59,1
1v24	10,5	14,62	460	20,08	20,07	1394	139,4	557,7	109	10,2	55,3
1v25	10,8	14,13	470	20,06	20,02	857,6	85,76	343	74	9,2	34,2
1v26	10,7	14,06	440	20,08	20,05	1428	142,8	571,1	107	10,5	56,7
1v27	10,7	14,42	490	20,11	20,09	1078	107,8	431,3	62	11,4	42,6
1v28	10,9	14,51	430	20,1	20,12	1273	127,3	509,2	93	10,7	50,3
1v29	10,2	14,63	550	20,02	20,01	1378	137,8	551,3	82	12,3	55,2
1v30	10,1	14,07	450	20,05	20,06	1199	119,9	479,7	83	10,7	47,7
1v31	10,2	13,90	420	20,05	20,07	1359	135,9	543,5	101	10,1	54,1
1v32	10,3	14,04	440	20,02	20,06	1027	102,7	411	63	11,7	41
1v33	10,5	14,13	460	20,1	20,08	1120	112	447,9	69	10,9	44,3
1v34	10,7	14,27	440	20,06	20,04	1235	123,5	494,2	77	11,2	49,2
1v35	10,3	14,16	460	20,01	19,98	1447	144,7	578,9	95	11,5	58,1
1v36	10,3	14,10	450	20,1	20,04	1336	133,6	534,4	93	10,3	53
Najmanjša vrednost										8,46	51,4
Največja vrednost										12,3	55,2
Srednja vrednost										10,6	49,85
Standardni odklon										0,86	5,67



Priloga F: Sila v odvisnosti od povesa pri štiri točkovni obremenitvi preizkušancev, ki so bili zlepljeni pri 10,4 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v radialni smeri.

Priloga G: Rezultati testiranja smrekovih preizkušancev, ki so bili lepljeni pri 30,4 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v tangencialni smeri.

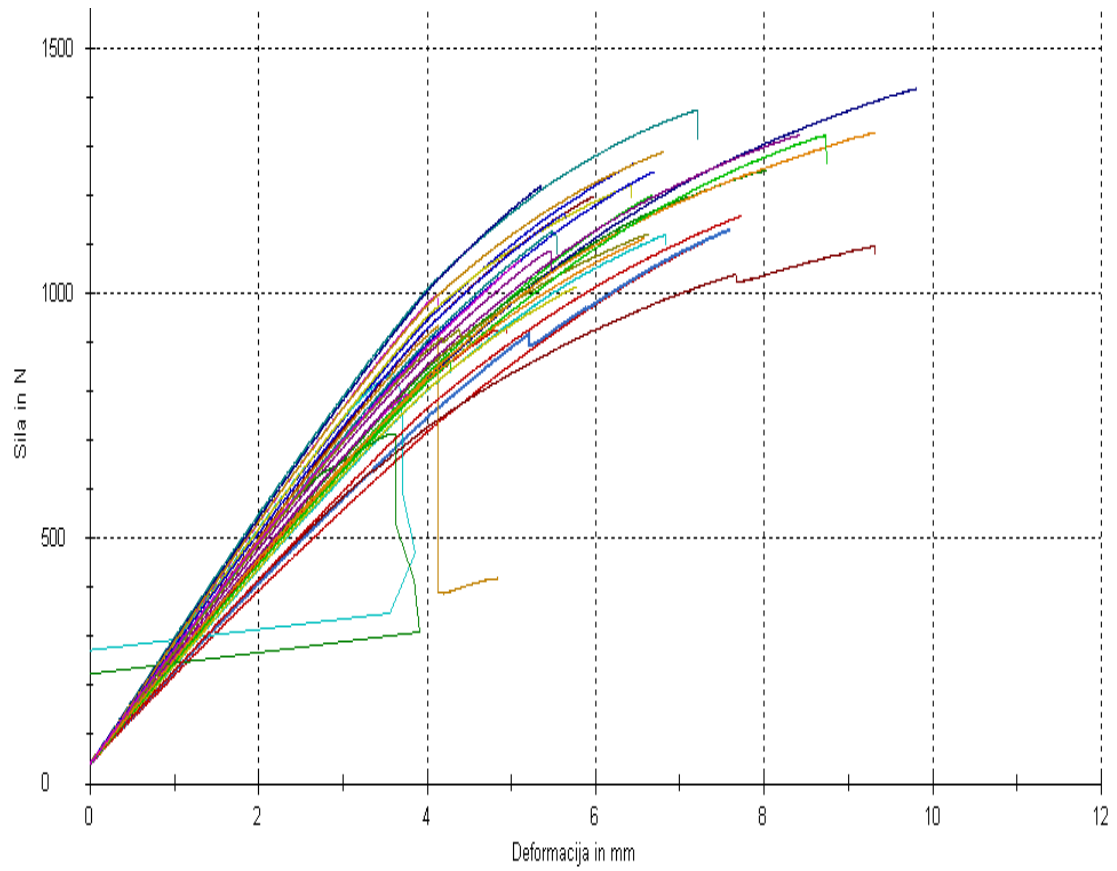
Oznaka	Začetna vl. u (%)	Vlažnost test. u (%)	Gostota [kg/m ³]	a0 [mm]	b0 [mm]	F max [N]	F low [N]	F high [N]	t Test [s]	E mod [GPa]	σ_M [N/mm ²]
2p1	30,6	14,73	440	19,72	19,88	1279	127,9	511,8	94	9,45	53,1
2p3	30,0	14,67	470	19,97	19,96	1188	118,8	475,1	102	9,12	47,9
2p4	30,2	14,52	420	19,69	19,72	1108	110,8	443,1	90	11	46,5
2p5	51,6	14,60	450	19,73	19,88	1233	123,3	493,3	100	11	51,2
2p6	31,1	14,47	450	19,74	19,85	893,6	89,36	357,5	63	10,9	37,1
2p7	31,5	14,25	440	19,53	19,85	1003	100,3	401,3	78	10,9	42,5
2p8	31,8	14,84	460	19,69	19,76	1382	138,2	552,9	118	11,4	57,9
2p9	31,4	14,61	440	19,78	19,88	1186	118,6	474,6	116	9,07	49
2p10	30,2	14,94	420	19,77	19,89	617,7	61,77	247,1	73	8,11	25,5
2p11	26,0	14,14	400	19,72	19,9	977,4	97,74	390,9	103	7,26	40,5
2p12	30,5	14,44	430	19,57	19,89	1209	120,9	483,7	105	10,8	51
2p13	31,4	14,23	420	19,71	19,8	1022	102,2	408,8	80	10,8	42,6
2p15	30,4	22,80	460	19,74	19,84	1250	125	500,2	116	9,84	51,9
2p16	31,2	14,29	440	19,66	19,78	1030	103	412,1	74	11,6	43,3
2p17	31,5	14,73	460	19,57	19,92	1299	129,9	519,8	124	9,92	54,7
2p18	31,4	14,66	430	19,71	19,87	1036	103,6	414,3	80	10,7	43,1
2p19	22,0	14,51	450	19,91	19,87	1238	123,8	495,3	121	8,73	50,5
2p20	30,3	14,97	440	19,79	19,84	1052	105,2	421	101	8,18	43,5
2p21	31,4	14,58	420	19,75	19,97	999,8	99,98	399,9	81	9,43	41,2
2p22	31,6	14,66	460	19,69	19,88	1411	141,1	564,4	122	11,9	58,8
2p23	31,1	14,31	400	19,54	19,83	997,3	99,73	398,9	82	10,2	42,3
2p24	31,2	14,39	420	19,6	19,9	905,9	90,59	362,4	70	10,4	38
2p25	30,4	14,72	470	19,96	19,95	1001	100,1	400,5	86	8,85	40,4
2p26	31,1	14,06	410	19,94	20	712,8	71,28	285,1	61	10,1	28,8
2p27	17,7	14,06	420	19,56	19,88	1031	103,1	412,3	93	9,21	43,5
2p28	29,4	14,02	440	19,68	19,89	1075	107,5	430,2	77	11,3	44,8
2p29	20,9	15,05	490	19,73	19,91	1388	138,8	555,3	121	10,4	57,5
2p30	28,0	14,42	440	19,56	19,88	1215	121,5	486,1	90	11,6	51,3
2p31	25,0	14,80	450	19,69	19,74	1237	123,7	494,8	123	8,78	51,9
2p32	24,3	14,23	480	19,61	19,88	1424	142,4	569,7	128	10,9	59,8
2p33	25,3	14,58	470	19,75	19,74	767,8	76,78	307,1	73	11,4	32
2p34	21,2	14,61	490	19,99	19,89	975,9	97,59	390,4	83	9,14	39,4
Najmanjša vrednost										7,26	40,5
Največja vrednost										11,9	58,8
Srednja vrednost										10,09	45,67
Standardni odklon										1,17	8,26



Priloga H: Sila v odvisnosti od povesa pri štiri točkovni obremenitvi preizkušancev, ki so bili zlepljeni pri 30,4 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v tangencialni smeri.

Priloga I: Rezultati testiranja smrekovih preizkušancev, ki so bili lepljeni pri 30,4 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v radialni smeri.

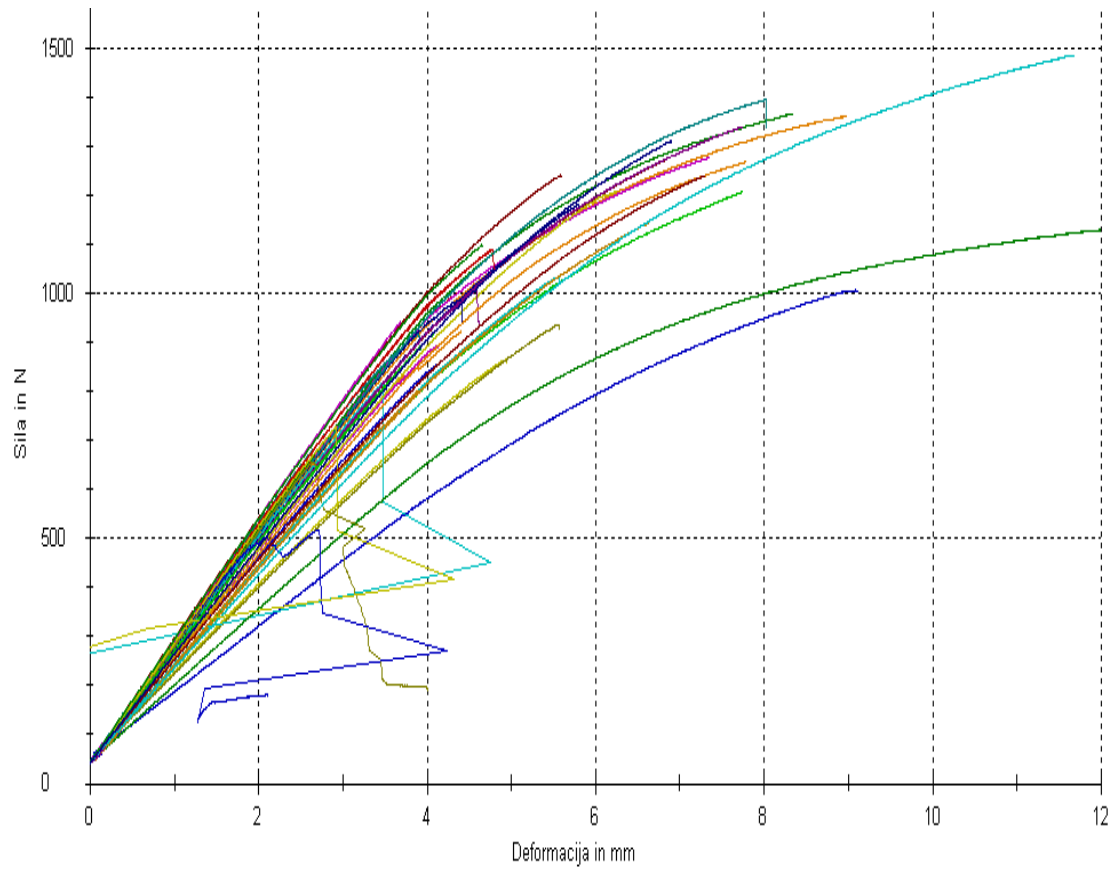
Oznaka	Začetna vl.	Vlažnost test.	Gostota	a0	b0	F max	F low	F high	t Test	E mod	σ_M
	u (%)	u (%)	[kg/m ³]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[s]	[GPa]	[N/mm ²]
2v1	29,2	15,30	450	20,03	19,96	1104	110,4	441,4	104	7,62	44,2
2v2	30,0	14,80	440	19,93	19,87	1201	120,1	480,3	101	9,11	48,8
2v3	31,5	14,73	450	19,9	19,64	1268	126,8	507,1	99	10,8	52,3
2v4	29,2	15,05	440	20,03	19,61	1128	112,8	451,2	114	8,09	46
2v5	30,7	14,80	1200	19,79	19,65	997,3	99,73	398,9	67	11,4	41,6
2v6	30,7	15,07	490	19,82	19,65	837,3	83,73	334,9	65	11,1	34,8
2v7	30,1	14,38	460	19,7	19,68	1220	122	488,2	100	11,2	51,3
2v8	31,3	15,26	460	19,79	19,64	1198	119,8	479	90	10,7	50
2v9	30,7	14,21	420	19,96	19,79	1252	125,2	500,7	116	9,31	51
2v10	23,0	14,86	440	19,98	19,86	1418	141,8	567,4	145	8,97	57,4
2v11	31,1	14,45	480	19,87	19,68	933,5	93,35	373,4	81	10,4	38,6
2v12	31,2	14,68	430	19,9	19,69	1086	108,6	434,3	80	9,98	44,7
2v13	31,2	14,92	460	19,85	19,63	1373	137,3	549,2	106	11,7	57
2v14	31,7	15,04	420	19,88	19,79	1123	112,3	449,2	102	9,49	46,1
2v15	31,4	14,62	450	19,95	19,9	931,1	93,11	372,5	73	9,3	37,7
2v16	29,1	14,96	410	19,96	19,63	864,1	86,41	345,6	71	9,28	35,5
2v17	29,0	15,20	460	20	19,57	1247	124,7	498,9	105	10	51,1
2v18	31,2	15,10	420	20	19,74	1330	133	531,9	130	9,15	54,1
2v20	27,3	14,62	420	19,89	19,75	1121	112,1	448,4	97	8,93	46,1
2v21	25,1	14,82	440	19,9	19,67	1014	101,4	405,7	84	9,04	41,8
2v22	26,3	14,79	400	19,91	19,53	1097	109,7	438,8	130	8,46	45,5
2v23	22,3	14,50	440	19,73	19,67	713,6	71,36	285,4	64	10,8	29,9
2v24	25,3	14,18	470	19,86	19,63	1220	122	487,9	85	11,5	50,6
2v25	25,9	14,85	450	19,81	19,69	1290	129	516,1	103	11,4	53,6
2v26	20,7	15,06	460	19,98	19,87	1325	132,5	529,8	117	9,45	53,6
2v27	27,4	14,44	450	19,93	19,67	1126	112,6	450,5	80	10,2	46,3
2v28	19,6	14,99	470	20,02	19,92	926,5	92,65	370,6	70	9,83	37,3
2v29	27,7	15,27	440	19,97	19,86	1158	115,8	463,3	106	8,3	46,9
2v30	27,9	15,35	460	19,99	19,91	1323	132,3	529,3	123	8,89	53,4
2v31	21,4	14,84	470	19,96	19,84	1164	116,4	465,5	88	10,5	47,3
2v32	27,5	14,36	430	19,88	19,79	1112	111,2	445	99	9,42	45,7
2v33	26,6	15,26	450	19,9	19,55	1069	106,9	427,5	83	10,4	44,3
Najmanjša vrednost										7,62	29,9
Največja vrednost										11,7	57,4
Srednja vrednost										9,83	45,98
Standardni odklon										1,06	6,99



Priloga J: Sila v odvisnosti od povesa pri štiri točkovni obremenitvi preizkušancev, ki so bili zlepljeni pri 30,4 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v radialni smeri.

Priloga K: Rezultati testiranja smrekovih preizkušancev, ki so bili lepljeni pri 46,1 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v tangencialni smeri.

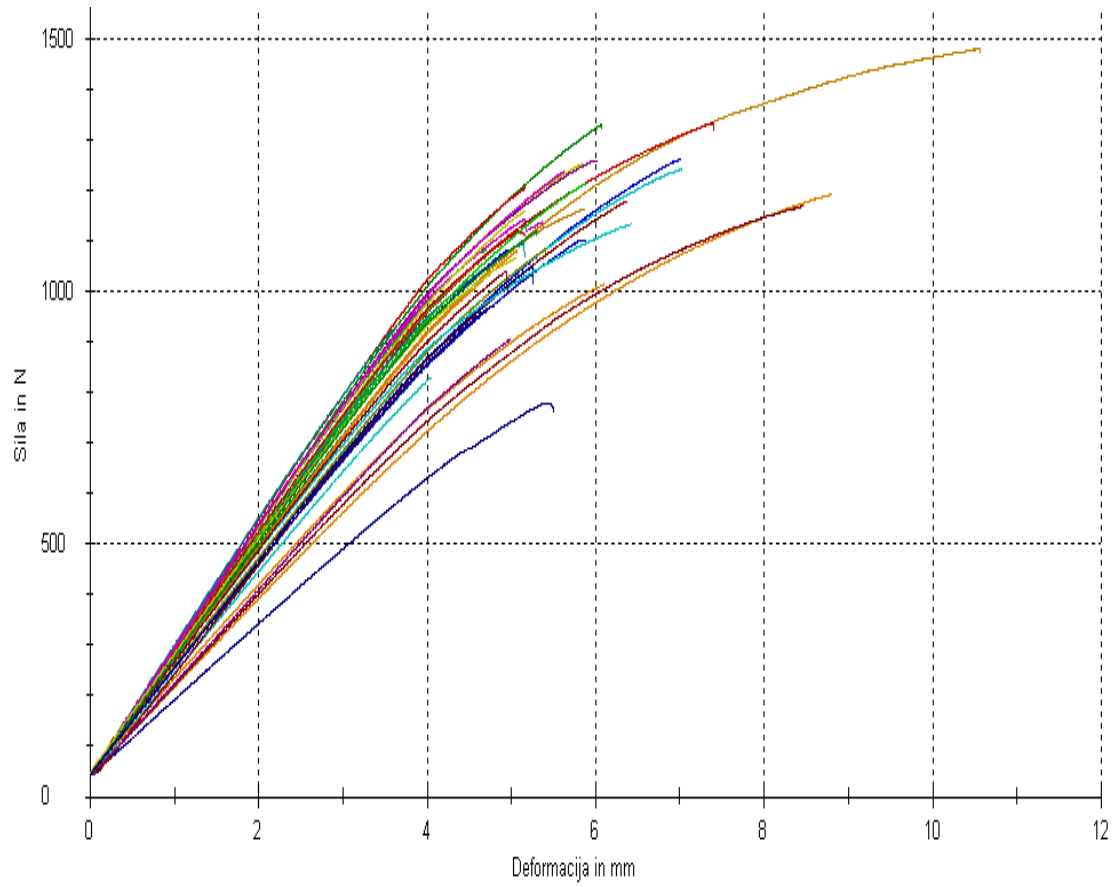
Oznaka	Začetna vl.	Vlažnost test.	Gostota	a0	b0	F max	F low	F high	t Test	E mod	σ_M
	u (%)	u (%)	[kg/m ³]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[s]	[GPa]	[N/mm ²]
3p1	88,1	15,07	440	19,58	19,63	1005	100,5	401,9	76	11,4	42,9
3p2	46,8	15,28	450	19,73	19,86	1207	120,7	482,9	117	9,2	50,1
3p3	59,5	14,71	530	19,78	19,92	1007	100,7	402,9	132	6,09	41,5
3p4	34,0	14,55	1050	19,85	19,7	1363	136,3	545,1	133	10,5	56,4
3p5	32,0	14,91	440	19,62	19,88	1278	127,8	511	114	11,1	53,6
3p6	32,8	14,95	460	19,82	19,79	1034	103,4	413,5	92	9,18	42,7
3p7	34,9	15,30	440	19,84	20,02	865,5	86,55	346,2	78	8,19	35,3
3p8	32,5	14,79	440	19,71	19,85	1274	127,4	509,5	108	10,5	53
3p9	33,1	15,01	430	19,62	19,92	1368	136,8	547	126	11,1	57,2
3p10	32,3	14,92	450	19,74	19,87	1182	118,2	472,9	93	10,5	49
3p11	81,2	15,17	430	19,76	19,9	1146	114,6	458,5	102	9,17	47,4
3p12	62,8	14,68	460	19,71	19,87	1341	134,1	536,3	118	10,5	55,8
3p13	34,7	14,67	440	19,7	19,74	915,6	91,56	366,3	68	11,5	38,4
3p14	37,6	14,91	440	19,76	19,93	936,6	93,66	374,6	89	8,13	38,6
3p15	80,7	15,05	450	19,58	19,8	1091	109,1	436,6	81	11,6	46,2
3p16	79,6	14,87	420	19,73	19,69	890	89	356	68	10,6	37,3
3p17	86,5	14,85	430	19,74	19,76	857,1	85,71	342,9	72	9,74	35,7
3p18	47,0	14,70	470	19,58	19,96	923,1	92,31	369,2	81	10,4	38,7
3p19	103,0	14,83	420	19,52	19,8	894,3	89,43	357,7	72	10,4	38,1
3p20	96,0	14,69	430	19,48	19,8	818,4	81,84	327,4	72	11,3	35
3p21	64,0	14,69	440	19,69	19,81	1209	120,9	483,5	95	10,2	50,5
3p22	50,1	15,09	480	19,58	19,66	1241	124,1	496,5	93	11,9	52,9
3p23	28,1	15,33	400	19,78	19,91	1154	115,4	461,6	190	7,09	47,6
3p24	54,7	14,89	470	19,49	19,72	988	98,8	395,2	79	11,4	42,3
3p25	31,9	14,74	440	19,75	19,93	922,1	92,21	368,8	75	9,47	38,1
3p26	29,6	14,90	440	19,7	19,72	1007	100,7	402,7	77	10,8	42,2
3p27	29,4	14,84	430	19,54	19,77	1397	139,7	558,7	124	11,1	59,4
3p28	99,2	15,15	430	19,49	19,85	655,9	65,59	262,4	60	11,3	27,9
3p29	34,5	14,80	450	19,51	19,77	1090	109	436,1	78	11,7	46,5
3p30	54,2	14,94	420	19,73	19,7	919,4	91,94	367,8	71	10,6	38,5
3p31	28,1	15,13	440	19,87	19,96	517,5	51,75	207	55	11	21,1
3p32	30,2	14,49	410	19,46	19,96	1269	126,9	507,7	121	10,2	53,9
3p33	57,6	14,74	450	19,52	19,85	941,6	94,16	376,6	66	12	40
3p34	29,9	15,52	440	19,8	19,99	1487	148,7	594,9	156	8,61	60,9
3p35	48,7	15,07	450	19,63	19,75	727,8	72,78	291,1	67	11,6	30,7
3p36	28,8	14,81	530	19,58	19,93	1241	124,1	496,4	105	9,66	52,1
3p37	41,6	14,96	1050	19,63	19,82	1100	110	440,1	79	11,7	46,2
3p38	31,4	14,99	440	19,61	19,94	1313	131,3	525	106	10,3	54,9
Najmanjša vrednost										6,09	21,1
Največja vrednost										12	60,9
Srednja vrednost										10,31	44,7
Standardni odklon										1,34	9,16



Priloga L: Sila v odvisnosti od povesa pri štiri točkovni obremenitvi preizkušancev, ki so bili zlepljeni pri 46,1 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v tangencialni smeri.

Priloga M: Rezultati testiranja smrekovih preizkušancev, ki so bili lepljeni pri 46,1 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v radialni smeri.

Oznaka	Začetna vl. u (%)	Vlažnost test. u (%)	Gostota [kg/m ³]	a0 [mm]	b0 [mm]	F max [N]	F low [N]	F high [N]	t Test [s]	E mod [GPa]	σM [N/mm ²]
3v1	38,4	14,77	420	19,82	19,54	1120	112	447,9	84	10,9	46,8
3v2	43,3	14,90	470	19,81	19,53	1081	108,1	432,5	75	11,3	45,3
3v3	32,2	14,84	460	19,92	19,63	1263	126,3	505,2	104	9,69	52,1
3v4	39,5	15,05	470	19,95	19,62	1193	119,3	477,2	125	7,9	49
3v5	34,2	14,71	440	19,81	19,68	1144	114,4	457,5	85	11,3	47,5
3v6	32,4	14,78	470	19,93	19,69	829,4	82,94	331,8	66	9,21	34
3v7	33,5	14,82	450	19,81	19,56	1253	125,3	501,2	89	11,4	52,4
3v8	32,2	15,38	450	19,92	19,68	1169	116,9	467,6	117	8,2	48,1
3v9	46,6	15,30	460	19,81	19,5	1331	133,1	532,5	93	11,6	55,8
3v10	34,0	15,49	430	19,69	19,69	780,2	78,02	312,1	81	7,08	32,8
3v11	45,6	15,22	440	19,67	19,67	1164	116,4	465,4	94	11,2	49,1
3v12	50,3	14,85	450	19,79	19,55	1260	126	504,2	94	11,5	52,8
3v13	33,8	14,80	440	19,78	19,78	1096	109,6	438,5	85	11,1	45,5
3v14	32,4	14,69	430	19,84	19,53	1099	109,9	439,5	76	11,1	45,9
3v15	35,3	15,17	460	19,82	19,54	1207	120,7	482,9	82	11,7	50,5
3v16	41,5	14,82	430	19,84	19,64	997	99,7	398,8	69	11	41,4
3v17	51,3	15,20	1180	19,67	19,79	1103	110,3	441,3	94	9,8	46,2
3v18	31,8	15,09	390	19,87	19,73	1015	101,5	406	95	8,55	41,8
3v19	48,9	15,03	430	19,79	19,72	959	95,9	383,6	67	11,6	39,9
3v20	44,9	14,79	400	19,94	19,68	1242	124,2	496,9	105	9,72	51
3v21	106,0	14,70	430	19,91	19,45	1159	115,9	463,8	80	11	48,3
3v22	36,8	15,51	440	19,95	19,85	1178	117,8	471,1	93	9,64	47,9
3v23	74,5	15,11	470	19,68	19,58	831,3	83,13	332,5	58	10,9	35,2
3v24	96,4	15,40	430	19,74	19,68	1051	105,1	420,2	81	9,95	44
3v25	35,5	15,19	460	19,72	19,63	1481	148,1	592,6	150	10,5	62,3
3v26	28,2	14,64	400	19,9	19,5	906,4	90,64	362,5	80	8,51	37,7
3v27	31,4	15,14	450	19,75	19,57	922,7	92,27	369,1	62	12	38,8
3v28	30,1	14,84	390	19,81	19,57	1084	108,4	433,6	84	9,95	45,3
3v29	48,6	15,14	460	19,74	19,71	1334	133,4	533,7	112	11,2	55,8
3v30	30,3	15,18	430	19,64	19,93	1213	121,3	485,3	88	11	50,7
3v31	41,1	15,16	460	19,83	19,71	1081	108,1	432,6	79	10,6	44,8
3v32	30,4	15,02	430	19,75	19,57	1081	108,1	432,5	79	10,5	45,5
3v33	33,2	14,90	440	19,8	20	1240	124	496,1	83	11,3	50,8
3v34	84,2	14,99	410	19,77	19,67	1134	113,4	453,5	102	10,3	47,3
3v35	30,0	14,78	420	19,73	19,68	1067	106,7	426,7	86	10,8	44,7
3v36	30,3	14,77	470	19,87	19,62	1040	104	415,9	76	10,2	43,1
3v37	30,7	15,21	460	19,82	19,65	1119	111,9	447,6	84	10,7	46,5
3v38	64,0	15,35	470	19,85	19,61	971,8	97,18	388,7	73	9,66	40,4
Najmanjša vrednost										7,08	32,8
Največja vrednost										12	62,3
Srednja vrednost										10,38	46,24
Standardni odklon										1,15	6,12



Priloga N: Sila v odvisnosti od povesa pri štiri točkovni obremenitvi preizkušancev, ki so bili zlepljeni pri 46,1 % vlažnosti. Obremenitev je potekala v radialni smeri.