

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Špela CURK

**LEPLJENJE VISKOELASTIČNO TOPLOTNO ZGOŠČENEGA LESA
Z LEPILOM NA OSNOVI UTEKOČINJENEGA LESA**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**BONDING OF VISCOELASTIC THERMAL DENSIFIED WOOD WITH AN
ADHESIVE BASED ON LIQUEFIED WOOD**

GRADUATION THESIS
University studies

Ljubljana, 2016

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

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Milana Šerneka, za somentorico izr. prof. dr. Andrejo Kutnar in za recenzenta prof. dr. Marka Petriča.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Podpisana izjavljam, da je naloga rezultat lastnega dela. Izjavljam, da je elektronski izvod identičen tiskanemu. Na univerzo neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravici shranitve avtorskega dela v elektronski obliki in reproduciranja ter pravico omogočanja javnega dostopa do avtorskega dela na svetovnem spletu preko Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete.

Špela Curk

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dn
DK	UDK 630*813
KG	Les/utekočinen les/viskoelastično topotno zgoščen les
AV	CURK, Špela
SA	ŠERNEK, Milan (mentor)/ KUTNAR, Andreja (somentor)/ PETRIČ, Marko (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška Fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2016
IN	LEPLJENJE VISKOELASTIČNO TOPOTNO ZGOŠČENEGA LESA Z LEPILOM NA OSNOVI UTEKOČINENJEGA LESA
TD	Diplomsko delo (univerzitetni študij)
OP	XI, 42 str., 8 pregl., 22 sl., 21 pril., 31 vir.
IJ	sl
J1	sl/en
AI	Pri zgoščevanju lesa so bili v zgodovini uporabljeni različni postopki, pri večini je predstavljala problem nestabilna deformacija pri izpostavitvi zgoščenega lesa klimi z visoko vlažnostjo. Tako je bil razvit viskoelastično topotno zgoščen les (VTC), z izboljšanimi mehanskimi lastnostmi, za njim pa še modificiran VTC postopek, katerega produkt je stabilen zgoščen les tudi po namakanju v vodi. V raziskavi smo primerjali lepilne sposobnosti dveh lesnih vrst z dvema različnima stopnjama zgostitve. Potrebno je bilo proučiti vpliv zgostitve na lepljenje VTC lesa. Pri raziskavi smo uporabili modificirane viskoelastično topotno obdelane preizkušance smrekovine in bukovine. Preizkušance smo zlepili z lepilom na osnovi utekočinjenega lesa in jih primerjali z lepilnimi lastnostmi preizkušancev, lepljenih s fenol-formaldehidnim lepilom. Preizkušance smo testirali s strižnimi in upogibnimi testi. Rezultati mehanskih testov so pokazali, da je lepljenje VTC lesa popolnoma primerljivo lepljenju nezgoščenega lesa.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN	Dn
DC	UDC 630*813
CX	Wood/liquefied wood/viscoelastic thermal densified wood
AU	CURK, Špela
AA	ŠERNEK, Milan (supervisor)/ KUTNAR, Andreja (co-supervisor)/ PETRIČ, Marko (reviewer)
PP	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB	University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science And Technology
PY	2016
TI	BONDING OF VISCOELASTIC THERMAL DENSIFIED WOOD WITH AN ADHESIVE BASED ON LIQUEFIED WOOD
DT	Graduation Thesis (University studies)
NO	XI, 42 p., 8 tab., 22 fig., 21 ann., 31 ref.
LA	sl
AL	sl/en
AB	Historically, various processes have been used for wood densification. The problem with most processes was the unstable deformation that occurred if the densified wood was exposed to high humidity. This led to the development of viscoelastic thermal compression (VTC) of wood with improved mechanical properties. Later on, a modified VTC process was developed, which produces densified wood that remains stable even after being soaked in water. Our research compared the adhesive bonding properties of two types of wood with different densification levels. We had to examine the impact of densification on the adhesive bonding of VTC wood. The research was conducted with modified viscoelastic thermally compressed specimens of spruce and beech wood. The specimens were bonded with an adhesive based on liquefied wood and their adhesive bonding properties were compared with the ones of specimens bonded with a phenol-formaldehyde adhesive. The shear test and bending test were used to test the specimens. The mechanical tests showed that adhesive bonding of VTC wood is entirely comparable with that of non-densified wood.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA (KDI)	III
KEY WORDS DOCUMENTATION (KWD)	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO PRILOG	IX
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	XI
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 CILJI NALOGE	2
1.3 DELOVNE HIPOTEZE	2
2 PREGLED OBJAV	3
2.1 UTEKOČINJEN LES	3
2.1.1 Izbira topila in katalizatorja	4
2.1.2 Izkoristki in čas utekočinjanja	5
2.1.3 Barva utekočinjenega lesa	6
2.1.4 Uporaba utekočinjenega lesa	7
2.1.4.1 Fenol-formaldehidne smole	7
2.1.4.2 Epoksi smole	7
2.1.4.3 Poliuretanske pene	8
2.1.4.4 Lepila	8
2.2 VISOELASTIČNO TOPLITNO ZGOŠČEN LES (VTC)	9
2.2.1 VTC postopek	9
2.2.2 Modificiran VTC postopek	10
2.3 FENOL-FORMALDEHIDNA LEPILA	10
3 MATERIAL IN METODE	11
3.1 MATERIALI	11
3.1.1 Smreka (<i>Picea abies (L.) Karst.</i>)	11
3.1.1.1 Opis lesa	11
3.1.1.2 Lastnosti lesa	11
3.1.1.3 Uporaba smrekovine	12
3.1.2 Bukev(<i>Fagus sylvatica L.</i>)	12
3.1.2.1 Opis lesa	12
3.1.2.2 Lastnosti lesa	12
3.1.2.3 Uporaba bukovine	13
3.1.3 Katalizator	15
3.1.4 Fenol-formaldehidno lepilo	16
3.2 METODE	17
3.2.1 Izdelava utekočinjenega lesa	17
3.2.2 VTC les	20

3.2.3 Lepljenje preizkušancev	22
3.3 DOLOČITEV MEHANSKIH LEPILNIH LASTNOSTI	25
3.3.1 Strižna trdnost	25
3.3.2 Upogibna trdnost	27
4 REZULTATI	29
4.1 VHODNI PODATKI	29
4.2 STRIG	29
4.3 UPOGIBNE LASTNOSTI	31
5 RAZPRAVA IN SKLEPI	33
5.1 FIZIKALNE IN MEHANSKE LASTNOSTI VTC LESA	33
5.2 LEPILNE LASTNOSTI VTC LESA	33
5.3 SKLEPI	34
6 POVZETEK	35
7 VIRI	36

ZAHVALA**PRILOGE**

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Kemična sestava bukovine (<i>Fagussylvatica L.</i>)(Wagenfuhr, 1996).....	14
Preglednica 2: Lastnosti lepila (podatki proizvajalca lepila- Fenolit)	16
Preglednica 3: Karakteristike VTC lesa in kontrolnih vrst	21
Preglednica 4: Podatki o gostoti preizkušancev	29
Preglednica 5: Rezultati strižne trdnosti pri preizkušancih lepljenih z utekočinjenim lesom	29
Preglednica 6: Rezultati strižne trdnosti pri preizkušancih lepljenih s fenol- formaldehidnim lepilom	30
Preglednica 7: Rezultati upogibne trdnosti in modula elastičnosti za smrekove preizkušance	31
Preglednica 8: Rezultati upogibne trdnosti in modula elastičnosti za bukove preizkušance	32

KAZALO SLIK

Slika 1: Utekočinen les (FOTO: Franc Budija)	3
Slika 2: Spreminjanje deleža netopnega ostanka lesa s časom reakcije pri različnih amplitudah ultrazvoka (Čuk in sod., 2012).....	6
Slika 3: Barva utekočinjenega lesa	7
Slika 4: Naprava za izvajanje VTC (Kutnar in sod., 2010)	9
Slika 5: Struktorna formula etilen glikola	14
Slika 6: Struktorna formula žveplene(VI) kisline	15
Slika 7: Oprema, uporabljena pri postopku utekočinjenja lesa.....	17
Slika 8: Zmes topolove žagovine, reagenta EG ter žveplove(VI) kisline	18
Slika 9: Prestreganje hlapov	18
Slika 10: Filtrirni papirji po filtraciji utekočinjenega lesa.....	19
Slika 11: Postopek utekočinjenja lesa	20
Slika 12: Preizkušanci, izdelani po standardu (SIST EN 205:2003)(Kos, 2013)	22
Slika 13: Preizkušanci iz VTC lesa	23
Slika 14: Nanos FF lepila na lepilno površino VTC preizkušanca.....	23
Slika 15: Stiskanje lepljencev z laboratorijsko stiskalnico	24
Slika 16: Zwick Z005- strižni preizkus	25
Slika 17: Vpetje preizkušanca med strižnim preizkusom.....	26
Slika 18: Štiri točkovni upogib preizkušancev po standardu SIST EN 408 (levo) in različne sestave upogibnih preizkušancev (desno). B – bukev, S – smreka, c – kontrola, a – manjša stopnja zgostitve, b – večja stopnja zgostitve (povzeto po Ugovšek in sod., 2013)	27
Slika 19: Prikaz rezultatov strižne trdnosti spoja	30
Slika 20: Rezultati ocenjevanja loma po lesu lepilnega spoja	31
Slika 21: Prikaz upogibnih rezultatov- modul elastičnosti	32
Slika 22: Trislojni VTC preizkušanec	33

KAZALO PRILOG

- PRILOGA A: Rezultati testiranja kontrolnih preizkušancev smreke lepljene z UL
- PRILOGA B: Rezultati testiranja preizkušancev smreke lepljene z UL (SB-UL)
- PRILOGA C: Rezultati testiranja preizkušancev smreke lepljene z UL (SA-UL)
- PRILOGA D: Rezultati testiranja preizkušancev bukve lepljene z UL (SB-UL)
- PRILOGA E: Rezultati testiranja preizkušancev bukve lepljene z UL (SA-UL)
- PRILOGA F: Rezultati testiranja kontrolnih preizkušancev bukve lepljene z UL
- PRILOGA G: Rezultati testiranja kontrolnih preizkušancev smreke lepljene z FF
- PRILOGA H: Rezultati testiranja preizkušancev smreke lepljene z FF (SA-FF)
- PRILOGA I: Rezultati testiranja preizkušancev smreke lepljene z FF (SB-FF)
- PRILOGA J: Rezultati testiranja preizkušancev bukve lepljene z FF (SB-FF)
- PRILOGA K: Rezultati testiranja preizkušancev bukve lepljene z FF (SA-FF)
- PRILOGA L: Rezultati testiranja kontrolnih preizkušancev bukve lepljene z FF
- PRILOGA M: Rezultati testiranja trislojnega lesa bukovine, lepljene z utekočinjenim
lesom, sistem (B: b-c-b)-SB
- PRILOGA N: Rezultati testiranja trislojnega lesa smrekovine, lepljene z utekočinjenim
lesom, sistem (S: a-c-a)-SA
- PRILOGA O: Rezultati testiranja trislojnega lesa smrekovine, lepljene z utekočinjenim
lesom, sistem (S: b-c-b)-SB
- PRILOGA P: Rezultati testiranja trislojnega lesa smrekovine, lepljene z utekočinjenim
lesom, sistem (S: a-a-a)-SA
- PRILOGA R: Rezultati testiranja trislojnega lesa bukovine, lepljene z utekočinjenim
lesom, sistem (B: a-a-a)-SA
- PRILOGA S: Rezultati testiranja trislojnega lesa smrekovine, lepljene z utekočinjenim
lesom, sistem (S: b-b-b)-SB
- PRILOGA T: Rezultati testiranja trislojnega lesa bukovine, lepljene z utekočinjenim
lesom, sistem (B: b-b-b)-SB
- PRILOGA U: Rezultati testiranja trislojnega lesa bukovine- kontrolni preizkušanci,
lepljeni z utekočinjenim lesom, sistem (B: c-c-c)

X

Curk Š. Lepljenje viskoelastično toplotno zgoščenega lesa z lepilom na osnovi utekočinjenega lesa.
Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, 2016

PRILOGA V: Rezultati testiranja trislojnega lesa smrekovine- kontrolni preizkušanci,
lepljeni z utekočinjenim lesom, sistem (S: c-c-c)

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

UL - utekočinjen les

VTC les - viskoelastično topotno zgoščen les

EG - etilen glikol

SA- manj zgoščen viskoelastičen preizkušanec

SB- bolj zgoščen viskoelastičen preizkušanec

h - debelina vzorca

b - širina vzorca

l - dolžina vzorca

F_{max} - maksimalna sila, pri kateri je prišlo do porušitve

F_m - upogibna trdnost

E_m - elastični modul

F - sila, pri kateri je prišlo do strižne porušitve vzorca

f_v - strižna sila

x - povprečna vrednost

s - standardni odklon

1 UVOD

Zgodovina zgoščevanja lesa sega že v začetke 20. stoletja, takrat so bili namreč razviti prvi takšni postopki. V Evropi je bil postopek prvič izveden leta 1930 in poimenovan »Lignostone«, sledili so mu še številni drugi. V začetku preizkušanja so bile uporabljene različne metode. Vsi postopki so sicer izboljšali nekatere mehanske lastnosti lesa, vendar pa dosežena deformacija ni bila stabilna. Prav zaradi neupoštevanja plastičnosti lesa in končne stabilizacije produkta, ti postopki v praksi nikoli niso bili uporabljeni (Kutnar in sod., 2010).

Produkti sodobnih razvitih postopkov zgoščevanja imajo sicer dobro dimenzijsko obstojnost, vendar se pri izpostavitvi klimi z visoko vlažnostjo pojavi ireverzibilen povratek tlačne deformacije, ta pa je odvisen od celične strukture in lastnosti polimerov celičnih sten (Kutnar in sod., 2010). Viskoelastično topotno zgoščen (VTC) les ima zaradi visoke gostote in s tem izboljšanih mehanskih lastnosti velik potencial pri razvoju visokokakovostnih lesnih proizvodov. Za učinkovito izrabo zgoščenega lesa v lesnih kompozitih pa so bistvene njegove mehanske in lepilne lastnosti.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

V raziskavah lepljenja viskoelastično topotno zgoščenega (VTC) lesa topola (*Populus deltoides* x *Populus trichocarpa*) je bilo ugotovljeno, da je lepljenje VTC lesa kvalitetno in v nekaterih primerih celo boljše od lepljenja kontrolnega, nezgoščenega lesa. Negativna lastnost VTC lesa, uporabljenega v preteklih raziskavah, je bil povratek tlačne deformacije po izpostavitvi območjem z visoko vlažnostjo. Zato je bil razvit modificiran VTC postopek, katerega produkt je visoko stabilen zgoščen les tudi po namakanju v vodi. Dimenzijska stabilnost VTC lesa, proizvedenega z modificiranim VTC postopkom, je odvisna od uporabljene temperature. Višja temperatura VTC procesa vodi do višje

dimenzijske stabilnosti, vendar je potrebno preučiti, ali takšna modifikacija vpliva tudi na lepljenje VTC lesa (Kutnar in sod., 2010).

1.2 CILJI NALOGE

Namen diplomske naloge je določitev lepilnih lastnosti VTC lesa, proizvedenega z modificiranim VTC postopkom. Testirali smo po 10 preizkušancev v vsaki skupini. Nadalje, ker VTC postopek omogoča izrabo manj vrednih lesnih vrst za visoko kakovostne produkte, kjer je poleg dobrih mehanskih lastnosti vse bolj pomemben tudi njihov vpliv na okolje, smo določili kvaliteto zlepljenosti VTC lesa z lepili iz naravnih, obnovljivih in zdravju neškodljivih surovin ter izvedli primerjavo s fenol formaldehidnim lepilom. Poznavanje adhezije med lepilom in VTC lesom bo pripomoglo k optimiziranju metode zgostitve lesa.

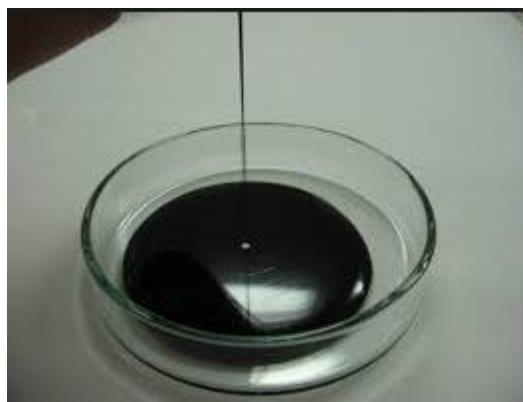
1.3 DELOVNE HIPOTEZE

Predvidevamo, da je mogoče z lepilom na osnovi utekočinjenega lesa kvalitetno zlepiti VTC les, primerljivo lepljenju s fenol-formaldehidnim lepilom.

2 PREGLED OBJAV

2.1 UTEKOČINJEN LES

Utekočinjanje lesa (UL) je eden od obetavnih pristopov za koristno uporabo lignoceluloznih materialov. Produkt je utekočinjen les (slika 1). Pod pojmom utekočinjanje si lahko predstavljamo trdne lesne ostanke in ostale lesne vire, ki so preoblikovani v tekoče agregatno stanje (Ugovšek in Šernek, 2009). To pa vsekakor ne predstavlja majhnih deležev, če predpostavimo nizek izkoristek vhodnih surovin v primarni obdelavi lesa.



Slika 1: Utekočinjen les (FOTO: Franc Budija)

Zaradi razgradnje lesa in reakcij s polioli, utekočinjanje pretvarja komponente lesa v reaktivne molekule. Med postopkom utekočinjanja lesa mora poteči reakcija s polihidroksi alkoholi in kislinskim katalizatorjem. Pridobljen UL je viskozen in temno rjav. Postopek utekočinjanja lesa poteka pri visokem tlaku (230 bar) in visoki temperaturi (150 °C do 250 °C). Traja lahko od 15 do 180 min, ob prisotnosti različnih organskih topil, na primer fenolov, alkoholov, bisfenolov, hidroksietrov in kislinskih katalizatorjev (Tišler, 2002).

Že med pirolizo (segrevanje lesa brez kisika) dobimo približno 20 % tekočih frakcij. Utekočinjanje brez prisotnosti katalizatorjev je možno le pod visokimi temperaturami in tlaki (Budija in sod., 2009), vendar je takšen postopek energetsko potraten in neekonomičen. Postopek utekočinjanja so z različnimi ugodnimi tehnikami in dodatki (topila in katalizatorji) uspeli bistveno izboljšati (Tišler, 2002).

Budija in sod. (2009) so navedli pet trenutno znanih postopkov pridobivanja utekočinjenega lesa, vsem pa je skupna kemično-termična obdelava, pri kateri nastopi razpad prvotnih polimernih molekul. Poznamo naslednje načine solvolitskega utekočinjanja lesa:

- s fenolom, ki lahko poteka v kislem ali bazičnem okolju, kar je odvisno od narave katalizatorja,
- z uporabo cikličnih karbonatov,
- z ionskimi tekočinami,
- z uporabo dibazičnega estra, ki je prijazen do okolja in
- s polihidričnimi alkoholi.

2.1.1 Izbira topila in katalizatorja

Velik vpliv na utekočinjanje lesa in kasnejšo uporabo ima predvsem topilo. V želji po čim višjem izkoristku so raziskovalci testirali različna topila. Najbolje se tako obneseta neopentil glikol in trimetitol propan z visokim izkoristkom reakcije. Visok izkoristek dosežemo tudi s propilen glikolom, dipropilen glikolom in glicerolom ob nekoliko daljših časih reakcije. Slabši izkoristki se dosegajo z uporabo etilen in dietilen glikola, ti pa še vedno znašajo nad 98 %. Za utekočinjenje z glicerolom je značilna razmeroma hitra eksotermna rekondenzacija, ki se odraža v hitrem povečevanju gostote preizkušancev in temperature v reaktorju. Poleg tega je zaradi penjenja zmesi v reaktorju potrebno dodajati sredstva proti penjenju. Nagnjenost k hitri rekondenzaciji je opazna tudi pri dietilen glikolu (Čuk, 2008).

Ugovšek in sod. (2010) ugotavljajo, da uporaba etilen glikola (EG) kot reagenta namesto glicerola, poviša trdnost lepilnega spoja. Višjo trdnost je mogoče zagotoviti tudi z nižjim deležem topila v utekočinjenem lesu.

Poleg reagenta pa ima pomembno vlogo tudi vrsta katalizatorja, ki je ključnega pomena pri razpadu ali degradaciji osnovnih komponent lesa. Žveplova(VI) in p-toluensulfonska kislina omogočata zelo visoke izkoristke, medtem ko so fosforjeva(V), mravljična,

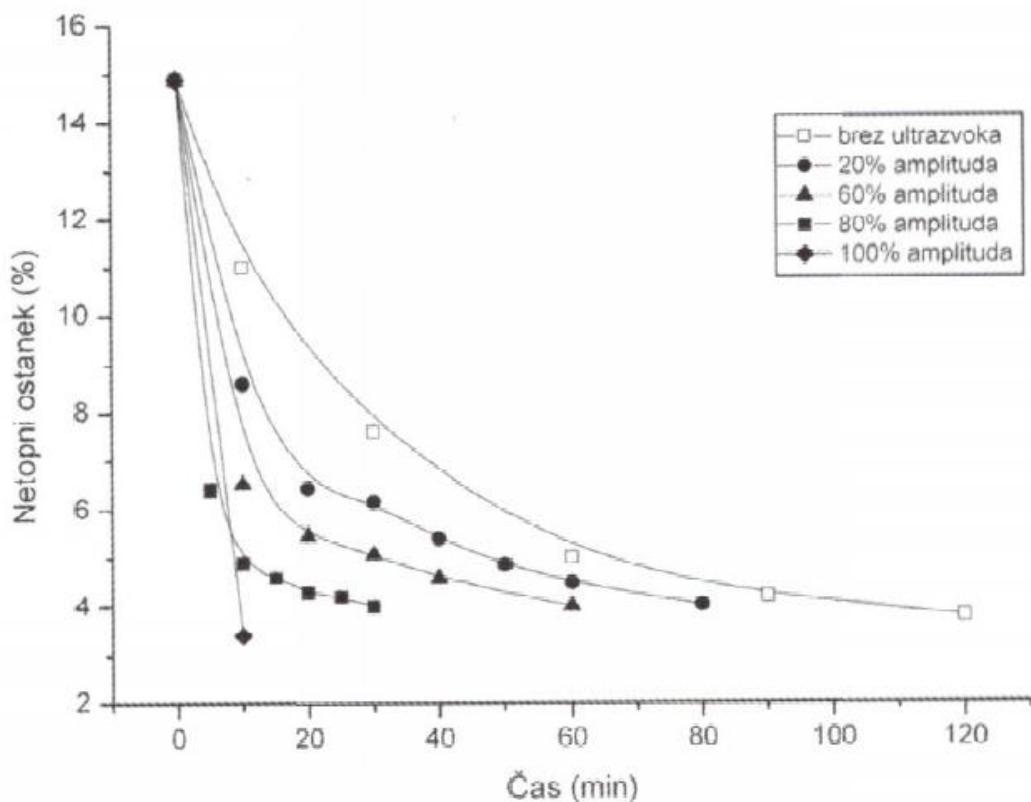
klorovodikova in oksalna kislina neprimerne zaradi prenizkega izkoristka utekočinjanja (Čuk, 2008).

Negativni pojav ob uporabi kislinskih katalizatorjev je nevarnost ponovne kondenzacije že razgrajenih komponent lesa. Zaradi rekondenzacije se poveča delež suhega ostanka, posledica je upad izkoristka in reaktivnosti (Tišler, 2002). Ugovšek in Šernek (2011) menita, da je pri nizkem razmerju topila in utekočinjenega lesa tveganje predčasne rekondenzacije večje. Prav tako je pomembna izbira katalizatorja z ustrezno vrednostjo pH, saj žveplova(VI) kislina lahko sproži predčasno reakcijo rekondenzacije. Koncentracijo oksonijevih ionov je možno zmanjšati z izbiro ustreznega katalizatorja in tako preprečiti nukleofilno substitucijo. Vendar s tem pri nadaljnji uporabi tvegamo zmanjšanje reaktivnosti utekočinjenega lesa, saj je reaktivnost tekočega lesa v kislem okolju večja.

2.1.2 Izkoristki in čas utekočinjanja

Na hitrost reakcije najbolj vplivajo topilo, katalizator in temperatura. Velik vpliv ima tudi izbira vrste lesa. Izkoristki pri utekočinjanju iglavcev in listavcev so zelo podobni, vendar so za utekočinjanje razvitejših listavcev (hrast) potrebni daljši časi reakcij. Najvišji izkoristek je dosegljiv z uporabo topolovine (Čuk, 2008). Budija in sod. (2009) so ugotovili, da je utekočinjen les, pridobljen iz hitro rastočega lesa črnega topola, primerna zmes naravnih kopolimerov za nadaljnjo uporabo.

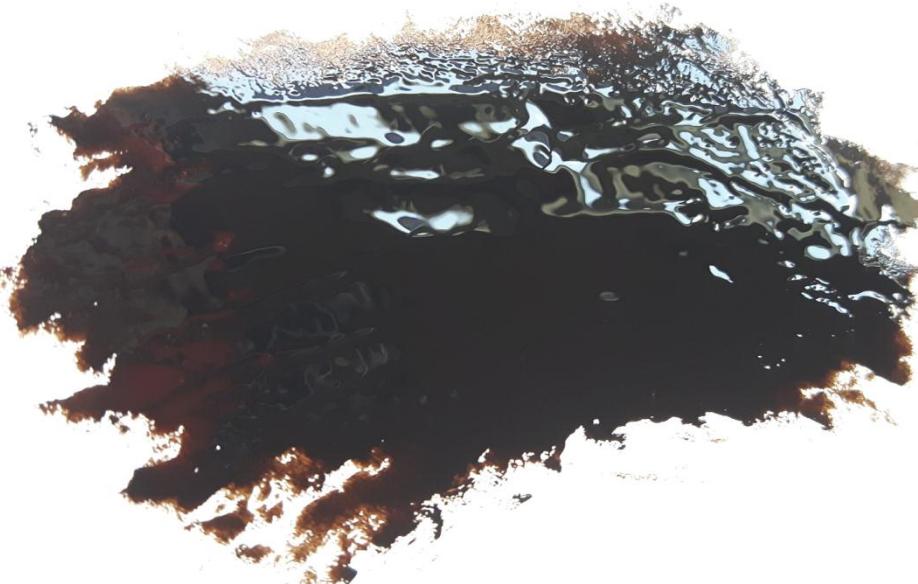
Čas reakcije utekočinjenja je odvisen predvsem od intenzitete mešanja in načina dodajanja lesa v reakcijsko zmes, medtem ko razmerje med lesom in topilom nima bistvenega vpliva na izkoristek utekočinjanja (Čuk, 2008). Čas utekočinjanja je možno pospešiti z uporabo ultrazvoka. Poleg običajnih elementov reaktorja dodamo še sonotrodo. S povečevanjem amplitudo ultrazvoka (slika 2) je možno bistveno skrajšati čas utekočinjanja in dosegati nižje stopnje netopnih ostankov (Čuk in sod., 2008). Ultrazvok lahko nadomesti klasično gretje, predvsem pri hitrih laboratorijskih eksperimentih. Prednost je v hitrem utekočinjanju razvitejših listavcev (Kržan in Kunaver, 2005).



Slika 2: Spreminjanje deleža netopnega ostanka lesa s časom reakcije pri različnih amplitudah ultrazvoka (Čuk in sod., 2012).

2.1.3 Barva utekočinjenega lesa

Barva utekočinjenega lesa je temno rjava (slika 3) oziroma skoraj črna in omejuje njegovo širšo uporabo. Z beljenjem z vodikovim peroksidom je možna sprememba barve v oranžno in svetlo rumeno, brez bistvenih sprememb karakteristik utekočinjenega lesa. Sprememba barve v preostale odtenke pa je nato izvedljiva z uporabo barvil. S tem se poveča možnost uporabe utekočinjenega lesa (Yona in sod., 2012).



Slika 3: Barva utekočinjenega lesa

2.1.4 Uporaba utekočinjenega lesa

2.1.4.1 Fenol-formaldehidne smole

Fenol-formaldehidne smole pridobivamo na način, ko les utekočinimo s fenolom v kislem ali alkalnem mediju ter mu dodamo formaldehid. V primeru, ko les utekočinimo s fenolom v kislem mediju ter mu dodamo formaldehid, dobimo odlično novolak smolo. Novolak smole nimajo nezreagiranega fenola, kar je njihova velika prednost in zato tako odlična smola. Pripravljajo jih z rahlim prebitkom fenola. Zamreževanje novolakov se lahko izvaja z dodatkom formaldehida ali heksametilentetramina. Pri utekočinjanju lesa s fenolom v alkalnem mediju ter dodanem formaldehidu dobimo dokaj viskozne rezol smole. Pene, izdelane iz tako pridobljene rezol smole imajo večjo gostoto kot pene, izdelane iz komercialne rezol smole (Lee in sod., 2002).

2.1.4.2 Epoksi smole

Za izdelavo epoksi smol so les utekočinjali z rezorcinolom, z dodajanjem katalizatorja (H_2SO_4) ali brez katalizatorja. Po postopku izdelave epoksi smol so utekočinjenemu lesu

dodali epiklorohidrin in smolo sintetizirali. Nastala epoksi smola ima dobre mehanske in adhezivne lastnosti (Kishi in sod., 2006).

2.1.4.3 Poliuretanske pene

Iz UL, utekočinjenega odpadnega papirja in škroba so izdelali bio razgradljivo poliuretansko peno. Prisoten reagent pri utekočinjanju je bila mešanica polietilen glikola in glicerola. V zmes so dodali še katalizator, žveplovo(VI) kislino in diizocianat (MDI). Nastale pene so imele dobre mehanske lastnosti in primerno gostoto (Lee in sod., 2002).

2.1.4.4 Lepila

Izdelali so izocianatna lepila na osnovi UL in tako nadomestili lepila na osnovi formaldehyda. Takšna lepila zagotavljajo varno uporabo, trajnost ter reciklažo. Les so utekočinili z zmesjo polietilen glikola in glicerola ob dodatku katalizatorja (H_2SO_4) in dodali diizocianat (pMDI). To lepilo so uporabili pri izdelavi furnirne vezane plošče, ki so jo testirali za strižno trdnost. Testi suhih preizkušancev so pokazali dobro strižno trdnost ter majhne emisije formaldehyda in acetaldehyda (Tohmura in sod., 2005).

2.2 VISKOELASTIČNO TOPOTNO ZGOŠČEN LES (VTC)

2.2.1 VTC postopek

VTC postopek se izvaja v napravi, ki je prikazana na sliki 4.



Slika 4: Naprava za izvajanje VTC (Kutnar in sod., 2010)

Naprava omogoča izpostavitev preizkušancev visokim temperaturam in visokemu tlaku vodne pare. Natančen opis naprave je predstavljen v literaturi (Kamke, 2006).

VTC postopek je sestavljen iz treh faz, v katerih s kombinacijo pare in topote ter mehanskim stiskanjem povečamo gostoto lesa. Celoten postopek zgostitve traja 15 min. Postopek se prične s parenjem vzorca lesa pri tlaku vodne pare 860 kN/m^2 . Preizkušanec je izpostavljen tlaku vodne pare brez mehanskega tlaka 3 min in nato še dodatni 2 min z mehansko tlačno silo 1380 kN/m^2 . Sledi sprostitev tlaka vodne pare in uravnovešanje brez mehanskega tlaka 100 s. Med fazo uravnovešanja se vzorcu zniža vlažnost. Pojavi se padec temperature. Naslednja faza se prične z vzpostavitvijo mehanske tlačne sile 4480 kN/m^2 , ki traja 5 min. Hkrati se dvigne temperatura z začetnih 175°C na 200°C . V zadnjem koraku se vzorce ohladi pod mehansko tlačno obremenitvijo (4480 kN/m^2) na 100°C .

2.2.2 Modificiran VTC postopek

Preizkušanci so bili najprej 3 minute izpostavljeni tlaku nasičene vodne pare pri 170°C brez mehanskega tlaka in nato še 3 minute z mehansko tlačno silo 5516 kN/m^2 . Sledila je sprostitev tlaka vodne pare in ohlajanje pod mehansko tlačno obremenitvijo na 100°C . Karakteristike modificiranega VTC postopka so natančno opisane v članku avtorjev Kutnar in sod. (2010).

2.3 FENOL-FORMALDEHIDNA LEPILA

Fenolne smole so prvi sintetični polimeri, ki so bili sintetizirani v komercialnem merilu. Nastanejo z reakcijo fenola s formaldehidom v kislem ali bazičnem okolju (Pizzi, 2003). V industriji se uporablajo za premaze, lepila, plastične kalupe, laminate, zračne ali oljne filtre in ostale kompozite (He in sod., 2003). Kot lepilo se fenol-formaldehidne smole največ uporablajo za lepljenje vezanega lesa, OSB plošč in konstrukcijskega kompozitnega lesa (Park in sod., 1999). Fenolne smole, pridobljene s kislim katalizatorjem in s prebitkom fenola glede na formaldehid, spadajo med smole tipa novolak, medtem ko smole, sintetizirane pod bazičnimi pogoji in ob presežku formaldehida, sodijo med fenolne smole tipa rezol. Proces utrjevanja fenol-formaldehidnih smol je precej zapleten, saj se vanj vključuje več samostojnih kemijskih reakcij, ki lahko potekajo vzporedno (He in sod., 2003).

3 MATERIAL IN METODE

3.1 MATERIALI

V raziskavah smo uporabili les smreke (*Picea abies* (L.) Karst) in bukve (*Fagus sylvatica* L.) in sicer nezgoščene in z modificiranim VTC postopkom zgoščene vzorce. Dolžina, širina in debelina preizkušancev je bila 120 mm, 18,64 mm in 20,4 mm. Preizkušanci so bili brez vidnih anomalij. Debela in širina preizkušancev sta bili radialno-tangencialne usmerjenosti.

3.1.1 Smreka (*Picea abies* (L.) Karst.)

3.1.1.1 Opis lesa

Smrekovina ima neobarvano jedrovino, zato se beljava in jedrovina barvno ne ločita. Les je večinoma rumenkastobel, v starosti rumenkastorjav. Branike so ozke do zelo široke, razločne. Prehod iz svetlega, belkastega ranega lesa do rdečkastorumenega kasnega lesa je večinoma postopen. Poskobljane površine imajo svilnat lesk (Čufar, 2006). Smrekovina je mehek, elastičen in v Sloveniji daleč najpogostejši les, uporabljan res povsod: predvsem v gradbeništvu, nekoliko manj pa v pohištveni industriji, papirni industriji. Najbolj zanimiva z ekonomskoga vidika pa je uporaba smrekovine pri izdelavi glasbil (Brus, 2005)

3.1.1.2 Lastnosti lesa

Aksialni elementi potekajo premo, jedrovina je neobarvana, branike so razločne. Gostota je nizka do srednja, krčenje je zmerno. Je elastična in trdna, suši se brez težav, lahko se cepi in lepo se lušči. Les je le malo nagnjen k zvijanju in pokanju in se z lakkoto obdeluje z ročnimi orodji ali strojno. Brez težav se površinsko obdeluje z vsemi komercialnimi premazi. Lepi se dobro. Dobro se tudi žebbla in viači. Zaradi nizke vsebnosti ekstraktivov je les komajda kemično aktiven. Ob stiku z vodo, kislinami, bazami, alkoholom, maščobami, olji, bakrom ali medenino ne pride doobarvanja. Nezaščiten les je odporen proti atmosferilijam in neodporen proti insektom in glivam. Pri uporabi na prostem mora biti zato smrekovina pravilno vgrajena ali zaščitena (Čufar, 2006).

3.1.1.3 Uporaba smrekovine

Smrekovina je naprodaj kot hlodovina, žagan les in furnir. Njena uporaba je zelo raznovrstna in množična. Poseben pomen ima kot gradben in konstrukcijski les za visoke in nizke gradnje ter za notranjo opremo. Uporablja se za ostrešja in konstrukcije stavb, za mostovne, rudniške in ogrodne konstrukcije, skeletne konstrukcije, stene, strope, stopnice, okna, fasade, vrata, tla, balkone, pergole, vhodna vrata in ograje, za betonske opaže, drogove, zaboje, palete, košare iz oblancev in škatle, lesno volno, igrače, talne kocke itd. Primerja je tudi za proizvodnjo lesnih tvoriv (luščen furnir za vezane plošče, sredice mizarskih plošč, okvirje vrat, iverne in vlaknene plošče ter plošče iz lesne volne) kot tudi za proizvodnjo celuloze in papirja. Včasih se uporablja za pohištvo. Resonančni les smreke se uporablja za glasbene instrumente (Čufar, 2006).

3.1.2 Bukev(*Fagus sylvatica L.*)

3.1.2.1 Opis lesa

Les je rdečkastobel, navadno brez obarvane jedrovine. Pri starejših drevesih se na prečnem prerezu pogosto pojavlja nepravilno oblikovan, rdečerjav diskoloriran les, imenovan »rdeče srce«. Zanj so značilne močno otiljene traheje, ki med drugim otežujejo impregnacijo lesa. Branike so razločne. Kasni les z manj trahejami je nekoliko temnejši od ranega. Majhne difuzno razporejene traheje so brez lupe v prerezih komaj vidne. Zelo značilni so številni široki trakovi, ki so na tangencialni površini vidni kot rdečkasta vretenca, na radialni pa kot očitna, do več milimetrov visoka zrcala, ki zelo vplivajo na videz lesa. Plamenast (tangencialna površina) in progast (radialna površina) videz nista tako izrazita kot pri iglavcih (Čufar, 2006).

3.1.2.2 Lastnosti lesa

Les bukve ima visoko gostoto, je trd in se zelo krči in nabreka. Stabilnost je neugodna, trdnosti so glede na gostoto nadpovprečno visoke (npr. dobra upogibna trdnost), elastičnost je nižja. Les je zelo žilav, malo elastičen in zelo trden. Dobro se cepi in se predvsem po parenju dobro upogiba. Nezaščitena bukovina je podvržena okužbi z glivami in insekti in

je le zmerno trajna, zato je potrebna hitra in pravilna manipulacija po poseku. S kreozotnimi olji impregnirana bukovina ima posebno dolgo življenjsko dobo. Impregnirani bukovi železniški pragovi dosegajo srednjo življenjsko dobo najmanj 40 let. Delež juvenilnega lesa je zanemarljiv. Možen je obilnejši pojav tenzitskega lesa. Notranje napetosti so lahko znatne, kar ima za posledico zvijanje in pokanje lesa. Les je trd in gost, njegova srednja gostota je 680 kg/m^3 (Čufar, 2006).

3.1.2.3 Uporaba bukovine

Na trgu se ločeno prodaja parjena in neparjena bukovina, sicer pa so na razpolago hlodovina, žagan les, furnirji, vezan les in razni polizdelki (grobo oblikovani kosi –surovci, prešana bukovina itd.). Uporaba lesa je zelo raznovrstna kot npr. za gradbeno mizarstvo, stopnice, opaže, parket, pohištvo, pri čemer se uporablja masiven, krivljen ali vezan les. Najbolj znana uporaba bukovine je bila za znane kavarniške stole, ki so jih izdelovali tudi v podjetju Stol Kamnik. Bukovina je izhodiščni material za proizvodnjo oplemenitenih lesnih tvoriv, kot so zgoščen masiven les ali laminati, uporabljajo ga za furnirske, mizarske plošče in za proizvodnjo ivernih plošč. Skupaj z drugimi lesnimi vrstami se uporablja tudi za pridobivanje celuloze. V preteklosti so bukovino uporabljali predvsem za kurjavo (drva in oglje). Uporaba v ta namen zaradi presežka na trgu zopet narašča (Čufar, 2006). Bučev je zaradi pogostnosti in velikih dimenzij ob smreki naša gospodarsko najpomembnejša drevesna vrsta. Les je trd, težek, elastičen in na prostem slabše obstojen. Uporaben je za izdelavo pohištva, zlasti upognjenega, parketa, vezanih plošč in za železniške pravove, slabši les pa porabijo za pridobivanje celuloze. Ima veliko ogrevalno moč, iz njega pridobivajo kakovostno oglje (Brus, 2005). V zadnjem obdobju potekajo številne raziskave, ki bi omogočile intenzivnejšo rabo lesa bukovine. Možnosti je več, od nove generacije lesnih kompozitov, do kemikalij iz lesa (nanoceluloza, ogljikove cevke).

Pri izdelavi preizkušancev smo uporabili tudi predpripravljene bukove lamele. Bučev spada med difuzne listavce brez obarvane jedrovine. Je trd in gost les z povprečno gostoto 680 kg/m^3 in močnim dimenzijskim delovanjem. Mehansko je les zelo žilav, malo elastičen in zelo trden, po parenju pa se dobro upogiba. Strižna trdnost vzporedno s potekom aksialnih elementov znaša med 8 N/mm^2 do 10 N/mm^2 . Toplotna prevodnost pravokotno na potek aksialnih elementov za zračno suh les pri gostoti 720 kg/m^3 znaša $0,157 \text{ W/mK}$. Les

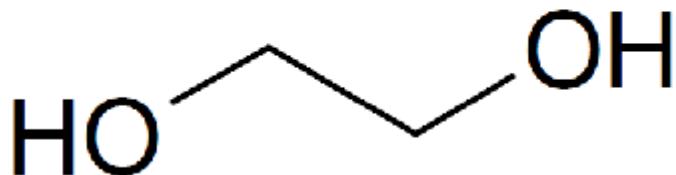
je naravno rahlo kiselkast s pH 5,1 - 5,4 . Kemično sestavo bukovine lahko preberemo iz preglednice 1. (Čufar, 2006).

Preglednica 1: Kemična sestava bukovine (*Fagus sylvatica* L.) (Wagenfuhr, 1996).

Komponenta	Količina (%)
Lignin	11,70 – 22,7
Celuloza	33,7 – 46,6
Pentoze	17,8 – 25,5
Mineralne snovi	0,3 – 1,2
Vrednost pH	5,1 – 5,4

3.1.2 Reagenti

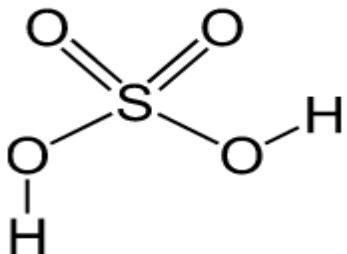
Reagent je topilo, ki se uporablja med utekočinjanjem lesa. V naši raziskavi smo uporabili etilen glikol. Etilen glikol EG ($C_2H_6O_2$) je organska snov (slika 5), proizvedena iz etena. Je brezbarvna, gosta, strupena tekočina brez vonja in sladkega okusa. Vrelisče ima pri 197,60 °C, gostota znaša 1,1135 g/cm³ in se v poljubnem razmerju meša z vodo. Poglavitno uporabo etilen glikola predstavlja dodatek proti zmrzovanju hladilnih tekočin (antifriz). Uporablja se tudi kot topilo, kot mehčalo v industriji plastičnih mas, pri proizvodnji razstreliv in poliestrskih vlaken in kot surovina za pridobivanje etrov in estrov (SevasEducationalSociety, 2015).



Slika 5: Strukturna formula etilen glikola.

3.1.3 Katalizator

Pri utekočinjanju lesa smo za katalizator uporabili žveplovo(VI) kislino (H_2SO_4), ki je zelo močna kislina in sodi med najpomembnejše kemijske surovine (slika 6). Je brezbarvna viskozna tekočina, ki se meša z vodo v vseh koncentracijah, pri čemer nastopi eksotermna reakcija. Zato se redčenje vedno izvaja z dodajanjem kisline v vodo in ne obratno. Gostota znaša $1,84 \text{ g/cm}^3$, tališče ima pri 10°C , vrelišče pa pri 337°C . Pri stiku z lesom, tekstilom, papirjem, ogljikovodiki, kislina hitro odvzame vodo, posledica je pooglenitev. Zaradi svoje jakosti je v industriji močno razširjena in se uporablja za izdelavo: umetnih mas, pralnih sredstev, eksplozivov... Uporablja se tudi kot elektrolit, sredstvo za rafiniranje mineralnih olj in obdelavo odpadnih voda (Prevor, 2015).



Slika 6: Strukturna formula žveplove(VI) kisline.

3.1.4 Fenol-formaldehidno lepilo

V raziskavi smo uporabili fenol-formaldehidno (FF) lepilo tipa rezol, proizvajalca Fenolit d.d., Borovnica, Slovenija. Po podatkih proizvajalca ima lepilo naslednje lastnosti (preglednica 2):

Preglednica 2: Lastnosti lepila (podatki proizvajalca lepila- Fenolit)

Lastnosti	Metode	Enota	Vrednost
Čas iztekanja, DIN (Φ 4 mm, 20°C)	MP 006 01	s	100
Vsebnost suhe snovi (135 °C)	MP 001 01	%	46,1
Vsebnost luga (NaOH)	MP 009 01	%	6,13
Čas želiranja (100 °C)	MP 005 01	min	22
Vsebnost prostega fenola (GC)	AP-AM-01	%	0,09
Vsebnost prostega formaldehyda	MP 003 01	%	0,0
Topnost v vodi (20 °C)	MP 007 01		neskončno

3.2 METODE

3.2.1 Izdelava utekočinjenega lesa

Uporabili smo preizkušen postopek utekočinjanja lesa z EG, povzet po Ugovšek in sod. (2010).



Slika 7: Oprema, uporabljena pri postopku utekočinjenja lesa

Topilo EG se dobro obnese zaradi nizkega vrelišča, ki znaša 197,3 °C. V reaktor smo natehtali 661,63 g reagenta EG, dodali 3 % žveplove kisline (19,85 g) kot katalizator in 219,30 g suhe zmlete topolovine (razmerje topol:topilo = 1:3) (slika 8).



Slika 8: Zmes topolove žagovine, reagenta EG ter žveplove(VI) kisline

Reaktor smo nato postavili na oljno kopel pri $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ za 120 min. Ker je bila zmes na začetku zelo gosta, smo nekoliko počakali z dokončno sestavo reaktorja in ročno mešali prvih 25 min. Ko se je viskoznost zmesi zmanjšala, smo dokončno sestavili reaktor in nadaljevali postopek utekočinjanja. S sestavo reaktorja smo vse novonastale hlapne tekom reakcije prestregli in utekočinili (slika 9).



Slika 9: Prestreganje hlapov

Dobljeno zmes smo nato filtrirali (pri izračunih smo upoštevali 3 % vlažnost filtrskega papirja). Zaradi lažje filtracije smo dodali dioksan, ki kot redčilo razredči zmes in omogoči njeni lažjo filtracijo. Na filtrskem papirju ostanejo višjemolekularni ostanki, ki se ne uspejo utekočiniti.



Slika 10: Filtrirni papirji po filtraciji utekočinjenega lesa

Filtrirne papirje (slika 10) z netopnim ostankom smo posušili in na podlagi mas izračunali delež utekočinjenega lesa (DUL) po enačbi (1).

$$DUL = \left(1 - \left(\frac{W_1 - W_2}{W_3} \right) \right) \times 100\% \quad \dots(1)$$

DUL ...delež utekočinjenega lesa (%)

W₁ ...masa filtrirnega papirja z oborino (g)

W₂ ...masa filtrirnega papirja (g)

W₃ ...masa dodanega lesa (g)

Precejeni zmesi smo z rotavapiranjem s podtlakom pri 55 °C odstranili ves dodani dioksan in vodo. Nato smo nadaljevali z odstranjevanjem EG pri 120 °C in 8 mbar podtlaka, vse do želene teže oz. do želenega razmerja 1:1 (EG:UL).



Slika 11: Postopek utekočinjenja lesa

Izkoristek topotno kemične reakcije je bil visok. Delež utekočinjenega lesa je znašal 89 %. Izgube so posledica nepopolne reakcije utekočinjenja in začetnih izgub pred dokončno sestavo reaktorja.

3.2.2 VTC les

V raziskavi so bili uporabljeni preizkušanci bukve (*Fagus sylvatica* L.) in smreke (*Picea abies* (L.) Karst.), izdelani v Sloveniji. Preizkušanci so bili v nadzorovanem okolju pri relativni vlažnosti (RH) 65 % in temperaturi 20 °C, da je bila dosežena vsebnost ravnotežne vlažnosti 12 %. Lamele so bile debeline 6 mm (radialno), dolžine 500 mm (vzdolžno) in širine 240 mm (tangencialno). Proses VTC so izvedli v tlačni posodi, opremljeni z ogrevano hidravlično stiskalnico pri temperaturi 170 °C. Proses VTC je sestavljen iz treh glavnih faz. V začetni fazi je potekalo parenje preizkušanca pri 860 kN/m^2 , brez stiskanja. Po treh minutah so parni tlak sprostili, preizkušanci so bili nadaljnjih 100 sekund brez izpostavitve kompresiji (faza 2). V tem obdobju je preizkušancem padla vrednost vlage. 3. faza se je začela z uporabo tlačne sile. Med fazo 3 se je temperatura dvignila od 170 °C do 200 °C. Tej temperaturi so bili preizkušanci izpostavljeni 300 sekund. V zadnjem koraku so bili preizkušanci ohlajeni na 100 °C, ta

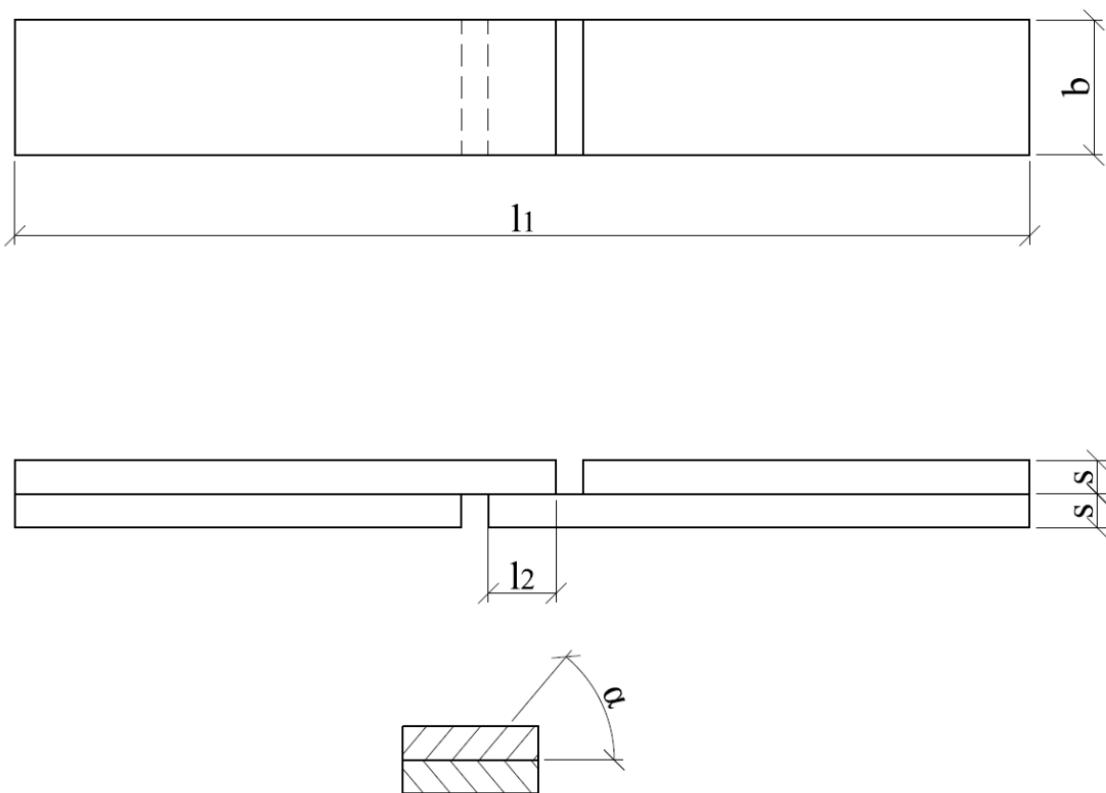
postopek je trajal 360 sekund. Preizkušanci so bili stisnjeni na različne stopnje zgostitve (preglednica 3). Po postopku VTC so bili preizkušanci kondicionirani pri 20 °C in 65 % relativne vlage.

Preglednica 3: Karakteristike VTC lesa in kontrolnih vrst

Preizkušanec	Debelina [mm]	Začetna gostota(D1) MC = 0 % [g cm ⁻³]	Gostota po kompresiji (D2) MC = 0 % [g cm ⁻³]	Razmerje gostot (D2-D1)/D1
Bukev (<i>Fagus sylvatica</i> L.)				
B-kontrola	6	0.680	-	-
B-A	6	0.683	1.075	0.365
B-B	6	0.677	1.198	0.433
Smreka (<i>Picea abies</i> (L.) Karst)				
S-kontrola	6	0.398	-	-
S-A	6	0.398	0.833	0.523
S-B	6	0.400	0.948	0.578

3.2.3 Lepljenje preizkušancev

Iz bukovih in smrekovih zlepljenih plošč smo po standardu (SIST EN 205:2003) izdelali preizkušance (slika 12), ki se uporabljajo za ugotavljanje natezno strižne trdnosti lepil za les. Nanos lepila je bil 200 g/m^2 . Lepljence smo stiskali s tlakom $0,5 \text{ MPa}$ pri temperaturi 180°C in sicer 10 min za fenol-formaldehidno lepilo in 18 min za UL.



Slika 12: Preizkušanci, izdelani po standardu (SIST EN 205:2003)(Kos,2013)



Slika 13: Preizkušanci iz VTC lesa

Testirali smo tri skupine VTC preizkušancev, dveh različnih gostot. Vzorce smo zlepili z utekočinjenim lesom, ter s FF lepilom (slika 14).



Slika 14: Nanos FF lepila na lepilno površino VTC preizkušanca



Slika 15: Stiskanje lepljencev z laboratorijsko stiskalnico

Parametre stiskanja smo določili s preliminarnimi testi. Sledila je priprava preizkušancev za ugotavljanje strižne trdnosti lepilnega spoja s klasičnim natezno strižnim testom (SIST EN 205, 2003)

3.3 DOLOČITEV MEHANSKIH LEPILNIH LASTNOSTI

3.3.1 Strižna trdnost

Preizkušance smo sedem dni klimatizirali v predpisani standardni klimi s temperaturo 20 °C in relativno zračno vlažnostjo 65 %. Nato smo opravili testiranja preizkušancev po standardu (SIST EN 12765:2002) za razvrščanje duromernih lepil za les za nekonstrukcijsko uporabo. Meritve so bile izvedene na trgalnem stroju Zwick Z005 (sliki 16 in 17).



Slika 16: Zwick Z005- strižni preizkus



Slika 17: Vpetje preizkušanca med strižnim preizkusom

Preko senzorjev se deformacije in sile zabeležijo v elektronski obliki. Z ugotovljeno strižno silo in izračunano lepilno površino smo vsakemu preizkušancu izračunali strižno trdnost lepilnega spoja po enačbi 3:

$$\tau = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{l \times b} \quad \dots(3)$$

τ ... strižna trdnost (N/mm^2)

F_{max} ... maksimalna sila (N)

A ... testirana lepilna površina (mm^2)

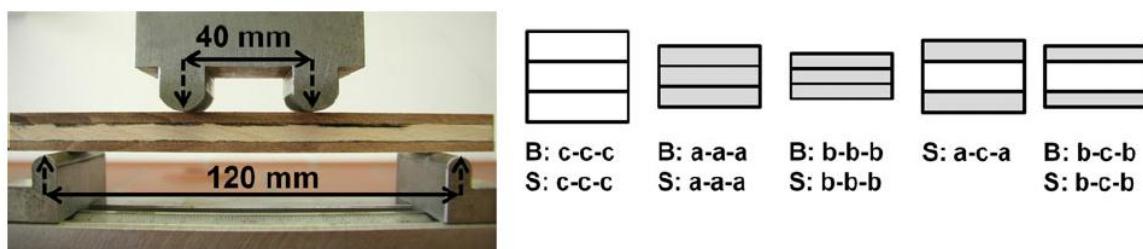
l ... dolžina lepilne površine (mm)

b ... širina lepilne površine (mm)

Poleg strižne trdnosti smo preizkušancem določili še oceno deleža loma po lesu. Posluževali smo se vizualnega ocenjevanja. Lom lahko poteka po lepilnem sloju ali po lesu. Določali smo deleže loma po lesu na testirani lepilni površini preizkušanca. Skupinam preizkušancem smo nato preračunali povprečne vrednosti.

3.3.2 Upogibna trdnost

Modul elastičnosti in upogibno trdnost smo ugotavljali po standardu SIST EN 408 (slika 18). Modul elastičnosti se nanaša na togost materiala in vpliva na poves materiala pri določeni obremenitvi.



Slika 18: Štiri točkovni upogib preizkušancev po standardu SIST EN 408 (levo) in različne sestave upogibnih preizkušancev (desno). B – bukev, S – smreka, c – kontrola, a – manjša stopnja zgostitve, b – večja stopnja zgostitve (povzeto po Ugovšek in sod., 2013)

Upogibne preizkušance smo zlepili pri enakih parametrih lepljenja kot strižne preizkušance. Po klimatiziranju v standardni klimi smo pričeli z ugotavljanjem modula elastičnosti in upogibne trdnosti. Preizkus smo izvajali na univerzalni napravi za mehanska preizkušanja ZWICK Z100. Napravo smo nastavili v skladu s standardom. Pred vstavitvijo preizkušanca v napravo smo izmerili njegovo širino in debelino z elektronskim kljunastim merilom. Podatke smo vnesli v računalnik, ki je povezan z napravo, rezultate za modul elastičnosti (E_m) in upogibno trdnost (f_m) pa smo izračunali z računalniškim programom (enačbi 4 in 5).

$$f_m = \frac{3 \times L_A}{(\check{s} \times d^2) \times F_{max}} \dots (4)$$

$$E_{m,l} = \frac{3 \times L_A \times L_B^2 \times (F_2 - F_1)}{4 \times (W_2 - W_1) \times \check{s} \times d^3} \dots (5)$$

kjer je:

- F_{max} maksimalna sila [N],
- f_m upogibna trdnost [N/mm²],
- $E_{m,l}$ modul elastičnosti [N/mm²],
- F_2-F_1 sprememba sile na linearinem območju napetostno deformacijske krivulje [N],
- w_2-w_1 sprememba deformacije na linearinem območju napetostno deformacijske krivulje [mm],
- d debelina vzorca [mm],
- š širina vzorca [mm],
- L_A dolžina vzorca med prvo spodnjo in drugo zgornjo točko pritisne sile
- L_B dolžina med zgornjima točkama pritiska
- L_v dolžina med spodnjima točkama pritiska

4 REZULTATI

4.1 VHODNI PODATKI

V preglednici 4 so predstavljeni podatki o gostoti preizkušancev. Iz podatkov je razvidno, da smo testirali po tri različne gostote vsake lesne vrste. Preizkušanci smreke z oznako SA so bili za 109,3 % bolj zgoščeni od kontrolnega preizkušanca. Tisti z oznako SB pa kar 138,2 % bolj zgoščeni od kontrole. Bukovi preizkušanci z oznako SA so bili za 58,1 % bolj zgoščeni od kontrolnega preizkušanca, tisti z oznako SB pa 76,2 % .

Preglednica 4: Podatki o gostoti preizkušancev

PREIZKUŠANEC	GOSTOTA (g/cm ³)
SMREKA KONTROLA	0,398
SMREKA SA	0,833
SMREKA SB	0,948
BUKEV KONTROLA	0,680
BUKEV SA	1,075
BUKEV SB	1,198

4.2 STRIG

Preglednica 5 prikazuje podatke za preizkušance, lepljene z utekočinjenim lesom. Iz podatkov je razvidno, da bukovi preizkušanci prenesejo višjo strižno silo kot pa smrekovi. Vsi preizkušanci so bili kvalitetno zlepljeni, saj je potekal lom spoja v večini primerov 100 % po lesu.

Preglednica 5: Rezultati strižne trdnosti pri preizkušancih lepljenih z utekočinjenim lesom

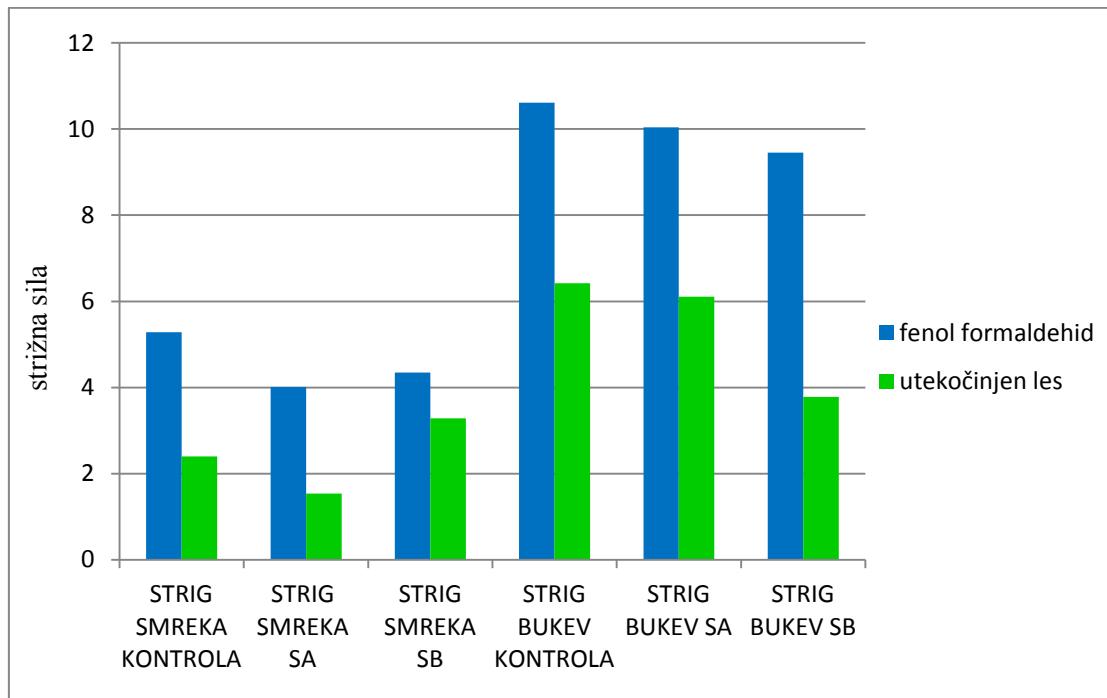
OZNAKA PREIZKUŠANCEV	STRIŽNA SILA (N/mm ²)	Lom po lesu (%)
STRIG SMREKA KONTROLA UL	2,40	100
STRIG SMREKA SA-UL	1,54	100
STRIG SMREKA SB-UL	3,28	100
STRIG BUKEV KONTROLA UL	6,42	100
STRIG BUKEV SA-UL	6,11	100
STRIG BUKEV SB-UL	3,78	85,7

V preglednici 6 so predstavljeni rezultati testiranja preizkušancev, lepljenih s fenol-formaldehidnim lepilom. Tudi tukaj so bukovi preizkušanci s testom strižne sile dosegli boljše rezultate kot smrekovi preizkušanci, vendar so imeli slabšo oceno loma po lesu.

Preglednica 6: Rezultati strižne trdnosti pri preizkušancih lepljenih s fenol-formaldehidnim lepilom

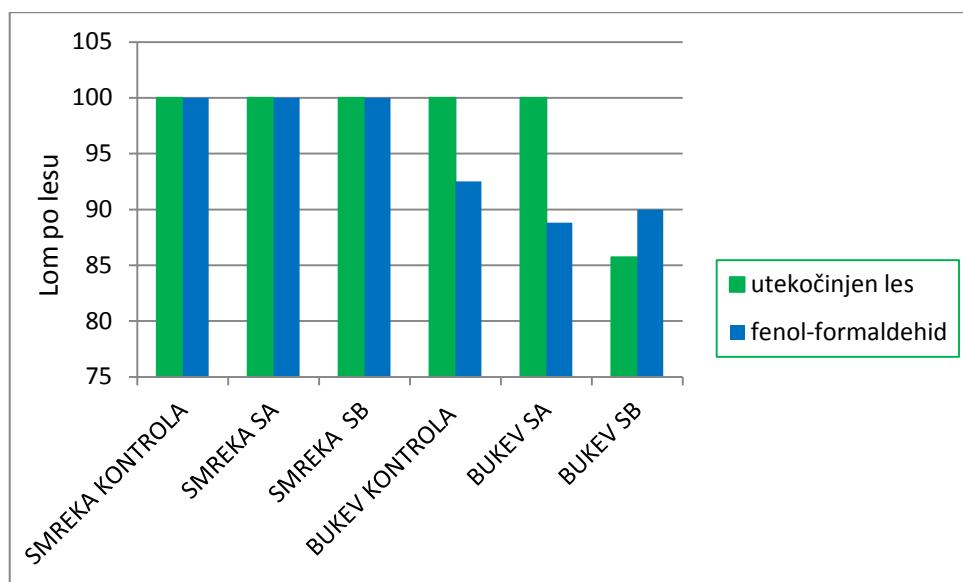
OZNAKA PREIZKUŠANCEV	STRIŽNA SILA (N/mm ²)	Lom po lesu (%)
STRIG SMREKA KONTROLA FF	5,28	100
STRIG SMREKA SA FF	4,01	100
STRIG SMREKA SB FF	4,35	100
STRIG BUKEV KONTROLA FF	10,61	92,5
STRIG BUKEV SA FF	10,04	88,8
STRIG BUKEV SB FF	9,45	90

Razliko v rezultatih najlažje razberemo s slike 19. V povprečju so se preizkušanci, lepljeni s fenol-formaldehidnim lepilom, bolje odzvali na strižno silo, prav tako lahko rečemo, da smo v primerjavi med lesnimi vrstami, dosegli boljše rezultate pri bukovih preizkušancih.



Slika 19: Prikaz rezultatov strižne trdnosti spoja

Ocena loma po lesu se je izvajala po zaključenih strižnih testih in je rezultat osebne presoje. Rezultati smrekovih preizkušancev so enotni, medtem ko imajo bukovi preizkušanci malenkost manjše vrednosti (slika 20).



Slika 20: Rezultati ocenjevanja loma po lesu lepilnega spoja

4.3 UPOGIBNE LASTNOSTI

Spodnji dve preglednici 7 in 8 prikazujeta podatke za upogibno trdnost in modul elastičnosti pri bukovih in smrekovih trislojnih preizkušancih. Upogibna trdnost je pri smrekovih preizkušancih nižja, modul elastičnosti pa višji pri preizkušancih, lepljenih s tremi VTC lamelami.

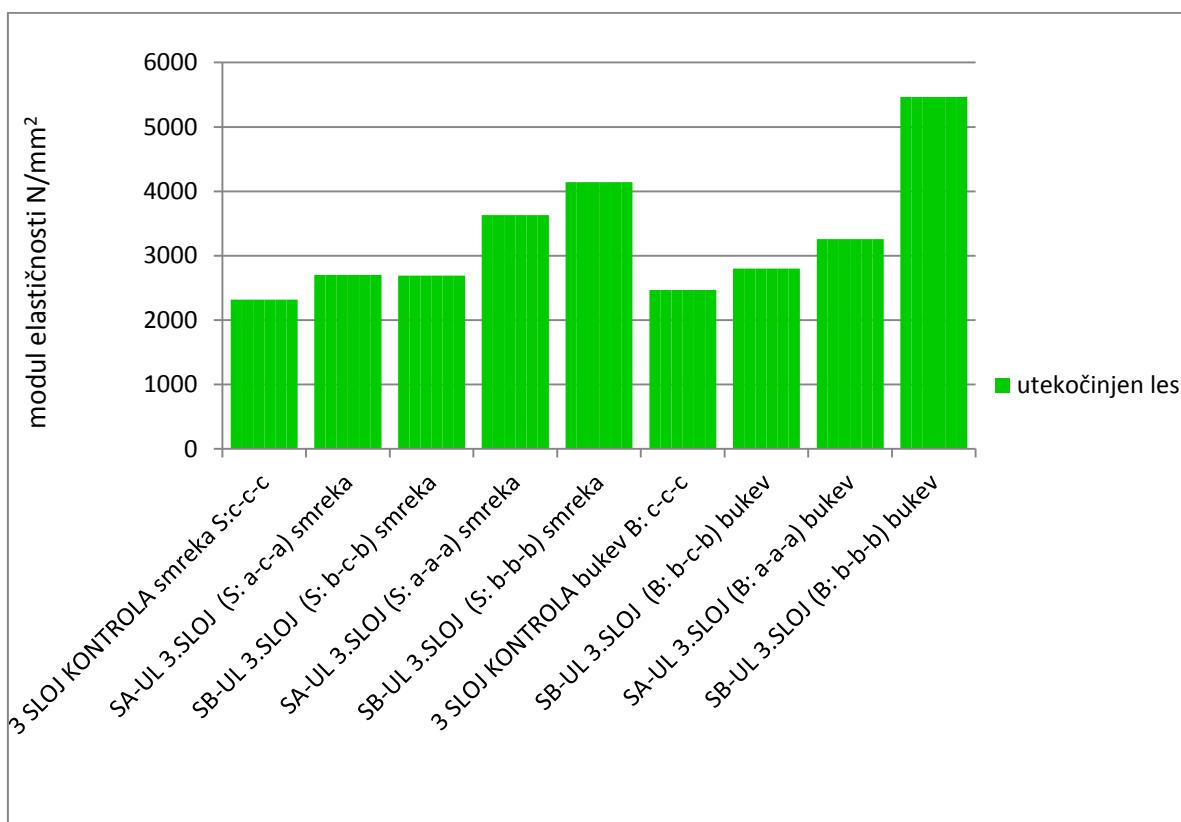
Preglednica 7: Rezultati upogibne trdnosti in modula elastičnosti za smrekove preizkušance

PREIZKUŠANCI-SMREKA	UPOGIBNA TRDNOST (N/mm ²)	MODUL ELASTIČNOSTI (N/mm ²)
3 SLOJ KONTROLA (S: c-c-c)	37,21	2318
SA-UL 3.SLOJ (S: a-c-a)	32,36	2702
SB-UL 3.SLOJ (S: b-c-b)	26,52	2689
SA-UL 3.SLOJ (S: a-a-a)	34,63	3628
SB-UL 3.SLOJ (S: b-b-b)	36,76	4144

Preglednica 8: Rezultati upogibne trdnosti in modula elastičnosti za bukove preizkušance

PREIZKUŠANCI- BUKEV	UPOGIBNA TRDNOST (N/mm²)	MODUL ELASTIČNOSTI (N/mm²)
3 SLOJ KONTROLA (B: c-c-c)	51,74	2468
SB-UL 3.SLOJ (B: b-c-b)	41,95	2803
SA-UL 3.SLOJ (B: a-a-a)	59,25	3260
SB-UL 3.SLOJ (B: b-b-b)	59,16	5463

Spodnja slika 21 prikazuje vrednosti, dobljene pri testu modula elastičnosti. Najvišje vrednosti dosegajo preizkušanci trislojnih VTC zlepljenih lamel z višjo stopnjo zgostitve.



Slika 21: Prikaz upogibnih rezultatov- modul elastičnosti

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 FIZIKALNE IN MEHANSKE LASTNOSTI VTC LESA

Z VTC postopkom smo povečali gostoto lesa z $0,398 \text{ g/cm}^3$ na $0,833 \text{ g/cm}^3$ (manjša stopnja zgostitve) in na $0,948 \text{ g/cm}^3$ (večja stopnja zgostitve) pri smrekovih preizkušancih ter z $0,680 \text{ g/cm}^3$ na $1,075 \text{ g/cm}^3$ (manjša stopnja zgostitve) in na $1,198 \text{ g/cm}^3$ (višja stopnja zgostitve) pri bukovih preizkušancih. S štiri-točkovnimi upogibnimi testi VTC in kontrolnih preizkušancev smo ugotovili, da je povečanje modula elastičnosti sorazmerno povečanju gostote, medtem ko je povečanje upogibne trdnosti nekoliko nižje kot bi pričakovali glede na povečanje gostote. Povečanje mehanskih lastnosti VTC lesa je doseženo, ker viskoelastična topotna zgostitev lesa uporablja ustrezeno kombinacijo temperature in vodne pare, ki med postopkom stiskanja plastificirata les, s tem pa preprečita lom lesnih celic pod ekstremnimi napetostmi.

5.2 LEPILNE LASTNOSTI VTC LESA

Kljub temu, da VTC postopek značilno spremeni lastnosti lesa, smo ugotovili, da tudi majhna efektivna penetracija lepila v VTC lesu ne povzroči slabe kvalitete lepljenja VTC lesa. Raziskave so namreč pokazale, da lepilo slabše penetrira v VTC les z večjo stopnjo zgostitve. Štiritočkovni upogibni testi VTC preizkušancev so pokazali, da sta upogibna trdnost in modul elastičnosti kompozitov (slika 22), izdelanih iz VTC lesa, višja od kompozitov, narejenih iz nezgoščenega lesa. Nekateri preizkušanci so med samo pripravo in še pred testiranjem razpadli (posledice razžagovanja, klimatiziranja, namakanja), zato smo v raziskavo vključili le število preizkušancev (8 - 10), ki so bili primerni za testiranje.



Slika 22: Trislojni VTC preizkušanec

5.3 SKLEPI

Na osnovi zgoraj opisanih testov in s prikazanimi rezultati smo prišli do naslednjih ugotovitev:

- Bukovi preizkušanci, lepljeni z UL in fenol-formaldehidnim lepilom dosegajo višjo strižno trdnost kot smrekovi preizkušanci.
- Bukovi preizkušanci imajo v primerjavi s smrekovimi slabšo oceno loma po lesu.
- Vsi preizkušanci, lepljeni s fenol-formaldehidnim lepilom imajo v primerjavi z lepilom na osnovi UL višjo strižno trdnost.
- Stopnja zgostitve ni bistveno vplivala na strižno trdnost smrekovih in bukovih preizkušancev, lepljenih s fenol-formaldehidnim lepilom, medtem ko so se pri lepljenju z UL pojavile razlike.
- Trislojni preizkušanci sestavljeni iz treh VTC lamel (slika 22) imajo bistveno višji modul elastičnosti kot kombinirani preizkušanci oz. kontrolni preizkušanci.
- Bukovi preizkušanci imajo višji modul elastičnosti kot smrekovi.

6 POVZETEK

Raziskavo o lepljenju viskoelastično topotno obdelanega lesa z lepilom na osnovi utekočinjenega lesa smo začeli z razmišljanjem o tem, da je mogoče z lepilom na osnovi utekočinjenega lesa ravno tako kvalitetno zlepiti VTC les. V raziskavi smo uporabili modificiran VTC les bukovine in smrekovine.

Z VTC postopkom smo povečali gostoto lesa z $0,398 \text{ g/cm}^3$ na $0,833 \text{ g/cm}^3$ (manjša stopnja zgostitve) in na $0,948 \text{ g/cm}^3$ (večja stopnja zgostitve) pri smrekovih preizkušancih ter z $0,680 \text{ g/cm}^3$ na $1,075 \text{ g/cm}^3$ (manjša stopnja zgostitve) in na $1,198 \text{ g/cm}^3$ (višja stopnja zgostitve) pri bukovih preizkušancih. Najprej smo izdelali lepilo na osnovi utekočinjenega lesa z etilen glikolom. Preizkušancem, lepljenim s tem lepilom, smo potem testirali strižno trdnost na trgalnem stroju Zwick Z005 ter upogibno trdnost na mehansko preizkuševalnem stroju Zwick Z100.

Kljub temu, da VTC postopek značilno spremeni lastnosti lesa, smo ugotovili, da tudi majhna efektivna penetracija lepila v VTC lesu ne povzroči slabe kvalitete lepljenja VTC lesa.

Bukovi preizkušanci so dosegali višje strižne sile, ne glede na vrsto lepila, imeli pa so slabše ocene loma po lesu. S testi smo tudi ugotovili, da imajo preizkušanci lepljeni s fenol-formaldehidnim lepilom boljše rezultate pri strižnih testih.

Upogibni testi so pokazali najvišji modul elastičnosti pri preizkušancih lepljenih, iz treh VTC lamel, po čemer lahko sklepamo, da gostota oz. zgoščenost lesa vpliva na višji modul.

Zaradi visoke gostote, visokih mehanskih lastnosti in dobre dimenzijske obstojnosti ima VTC les velik pomen v prihodnjem razvoju lesne industrije.

7 VIRI

- Brus R. 2005. Dendrologija za gozdarje. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 408 str.
- Budija F., Tavzes Č., Zupančič-Kralj L., Petrič M., 2009. Self-crosslinking and film formation ability of liquefied black poplar. *Bioresource technology*, 100: 3316-3323
- Čufar K. 2006. Anatomija lesa: univerzitetni učbenik. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 185 str.
- Čuk N. 2008. Optimizacija utekočinjanja lesa različnih drevesnih vrst. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 68 str
- Čuk N., Kunaver M., Jasiukaityte Grojzdek E., Medved S. 2012. Utekočinjanje lesa s pomočjo ultrazvoka in izdelava ivernih plošč z uporabo lepilnih mešanic z dodanim utekočinjenim lesom. *Les*, 64, 5: 116-122
- He G., Riedl B. 2003 Curing kinetics of phenol formaldehyde resin and wood-resin interations in the presence of wood substrates. *Wood Science and Technology*, 38, 1: 69-81
- Kamke F.A. 2006. Densified radiata pine for structural composites. *Maderas. Ciencia y tecnologia*, 8, 2: 83-92
- Kishi H., Fujita A., Miyazaki H., Matsuda S., Marukami A. 2006. Synthesis of wood-based epoxy resins and their mechanical and adhesive properties. *Journal of applied polymer science*, 102, 3: 2285-2292
- Kos J. 2013. Kakovost lepljenja z različnimi mešanicami utekočinjenega lesa in MUF lepila. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 57 str.
- Kržan A., Kunaver M. 2005. Microwawe heating in wood liquefaction. *Jurnal of applied polymer science*, 101, 2: 1051-1056
- Kutnar A., Kamke F.A., Šernek M. 2010. Bistvene lastnosti viskoelastično topotno zgoščenega (VTC) lesa za njegovo uporabo v lesnih kompozitih, *Les*, 62, št. 3-4: 222-227
- Lee S.H., Teramoto Y., Shiraishi N. 2002a. Biodegradable polyurethane foam from liquefied waste paper and its thermal stability, biodegradability, and genotoxicity. *Journal of applied polymer science*, 83, 7: 1482-1489

Park B.D., Reidl B., Bae H.Y., Kim Y.S. 1999. Differential scanning calorimetry of phenol-formaldehyde (PF) adhesives. Journal of wood chemistry and technology, 19,3: 265-286

Pizzi A. 2003. Wood adhesives: chemistry and technology. New York, M. Dekker: 264 str.

Prevor. 2015. Sulphuric acid.

http://www.prevor.com/EN/sante/RisqueChimique/diphoterine/publications/media/Acide_sulfur_Ang_BD.pdf (26. 8. 2015)

Resnik J. 1997. Lepila in lepljenje lesa. 1. Ponatis. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 103 str.

Sevas Educational Society. 2015. Properties of ethylene. glycol.

http://www.sbioinformatics.com/design_thesis/Ethylene_Glycol/Ethleneglycol_Properties&uses.pdf (8. 3. 2015)

SIST EN 408 Konstrukcijski les – Štiri točkovni upogib. Timberstructures – Structural Timber and gluedlaminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. 2003.

SIST EN 205. Lepila – lepila za les za nekonstrukcijsko uporabo – Ugotavljanje natezno strižne trdnosti spojev s preklopom. 2003. 8 str.

SIST EN 12765. Razvrstitev duromernih lepil za les za nekonstrukcijsko uporabo. 2002. 13 str.

Tišler V. 2002. Utekočinjen les in njegova uporaba. Les 54, 9: 281 – 284

Tohmura S. in sod. 2005. Preparation and characterization of wood polyalcohol-based isocyanate adhesives. Journal of applied polymer science, 98, 2: 791-795

Ugovšek A., Šernek M. 2009. Naravni materiali za izdelavo sodobnih lepil za les: tanin, lignin in utekočinjen les. Les, 61:451–458

Ugovšek A., Šernek M. 2009. Spremljanje utrjevanja utekočinjenega lesa in lepljenja lesa z utekočinjenim lesom. Studia Forestalia Slovenica, 142: 68-74

Ugovšek A., Šernek M. 2011. Kinetika in mehanizmi utekočinjanja lesa. Les 63, 11/12: 405-407

Ugovšek A., Šernek M. 2011. Vpliv vrednosti pH utekočinjenega lesa na strižno trdnost in trajnost zlepljenih spojev. Les, 63, 5: 232-237

Ugovšek A., Kariž M. 2010. Bonding of wood with adhesive mixtures made of liquefied wood combined with tannin of phenolic resin, V: Ristić R., Madarević, Popović Z. (ur.). Congress Abstracts of the »Future with forest« - First Serbian forestry congress. Beograd, Serbia, 11-13 November 2010: 263-264

Ugovšek A., Sernek M., Pavlič M., 2013. The wettability and bonding performance of densified VTC beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) bonded with phenol-formaldehyde adhesive and liquefied wood. Eur. J. Wood Prod., 71: 371–379

Wagenfuhr R. 1996. Holzatlas. Leipzig, Fachbuch Verlag: 688 str.

Yona A. M. C., Pori P., Kričej B., Kutnar A., Budija F., Tavzes Č., Petrič M. 2012. Bleaching of liquefied wood for the preparation of aesthetically manageable biomaterials. Les, 64, 5: 175-178

ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. Milanu Šerneku za mentorstvo in strokovno pomoč pri nastajanju diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi izr. prof. dr. Andreji Kutnar za somentorstvo in prav tako strokovno pomoč pri nastajanju diplomske naloge.

Prav tako se zahvaljujem dr. Alešu Ugovšku za pomoč pri eksperimentalnem delu diplomske naloge.

Zahvala gre tudi prof.dr. Marku Petriču za opravljeno recenzijo diplomske naloge.

Zahvalila pa bi se rada tudi partnerju Mihi, ter sinu Roku, za navdih in potrpljenje ob pisanju diplomskega dela. Zahvala gre tudi mami Mirijam in sestri Neži, za vzpodbudo in podporo pri nastajanju diplomske naloge.

Posebna zahvala gre očetu Sandiju, za neizmerno potrpljenje in vero vame, za vso pomoč pri študiju. Njegova brezpogojna vztrajnost je bila ključnega pomena pri zaključku študija.

PRILOGE

Priloga A: Rezultati testiranja kontrolnih preizkušancev smreke, lepljenje z UL

Vzorec	1	b ₁	b ₂	d	A	F	f _v	Lom po lesu
Št.	mm	mm	mm	mm	mm ²	N	N/mm ²	%
1	20,10	10,36	4	11	208	154	0,74	100
2	20,04	10,25	4	11	205	297	1,45	100
3	20,12	10,51	4	11	211	535	2,53	100
4	20,06	10,62	4	11	213	381	1,79	100
5	20,04	10,28	4	11	206	286	1,39	100
6	20,14	10,64	4	11	214	763	3,56	100
7	20,10	10,58	4	11	213	895	4,21	100
8	20,09	10,63	4	11	214	958	4,48	100
9	20,09	10,56	4	11	212	821	3,87	100
10						0	0	
Smreka – kontrola – strižna trdnost – UL								
					x	2,402	100	
					s	1,56	0	

Priloga B: Rezultati testiranja preizkušancev smreke, lepljenje z UL (SB-UL)

Vzorec	1	b_1	b_2	d	A	F	f_v	Lom po lesu
Št.	mm	mm	mm	mm	mm^2	N	N/mm^2	%
1	19,85	10,82	4	11	215	365	1,70	100
2	19,99	10,41	4	11	208	203	0,97	100
3	19,91	10,59	4	11	211	0,05	0	100
4						0	0	
5	19,90	10,68	4	11	213	510	2,40	100
6	20,04	10,78	4	11	216	2580	11,96	100
7	20,13	10,66	4	11	215	653	3,04	100
8	20,06	10,93	4	11	219	380	1,73	100
9	20,01	10,76	4	11	215	1240	5,77	100
10	20,10	10,69	4	11	215	412	1,92	100
SMREKA SB-UL								
					x	3,28	100	
					s	3,63	0	

Priloga C: Rezultati testiranja preizkušancev smreke, lepljenje z UL (SA-UL)

Vzorec	1	b ₁	b ₂	d	A	F	f _v	Lom po lesu
Št.	mm	mm	mm	mm	mm ²	N	N/mm ²	%
1	20,03	10,54	4	11	211	5,15	0,02	100
3	20,08	10,63	4	11	213	636	2,98	100
4	20,04	10,92	4	11	219	362	1,66	100
5	20,06	11,47	4	11	230	36,1	0,16	100
6	20,00	10,83	4	11	212	131	0,62	100
7	20,01	10,61	4	11	212	-0,003	0	100
8	20,00	10,83	4	11	217	1160	5,36	-
9						0	0	
10						0	0	100
11						0	0	100
SMREKA SA UL								
					x	1,54	100	
					s	2,00	0	

Priloga D: Rezultati testiranja preizkušancev bukve, lepljenje z UL (SB-UL)

Vzorec	1	b ₁	b ₂	d	A	F	f _v	Lom po lesu
Št.	mm	mm	mm	mm	mm ²	N	N/mm ²	%
3	20,16	10,31	4	11	208	2050	9,85	100
4	20,03	10,72	4	11	215	275	1,28	75
5	20,17	10,66	4	11	215	446	2,07	100
6	20,17	10,47	4	11	211	182	0,86	100
8	20,00	10,57	4	11	211	173	0,82	100
9	20,05	10,70	4	11	215	693	3,23	25
10	20,03	10,65	4	11	213	1780	8,37	100
11						0	0	
12						0	0	
13						0	0	
BUKEV SB-UL								
					x	3,78	85,7	
					s	3,75	0	

Priloga E: Rezultati testiranja preizkušancev bukve, lepljenje z UL (SA-UL)

Vzorec	1	b ₁	b ₂	d	A	F	f _v	Lom po lesu
Št.	mm	mm	mm	mm	mm ²	N	N/mm ²	%
11	19,99	10,37	4	11	207	731	3,53	100
12	20,15	10,50	4	11	212	1930	9,12	100
13	20,04	10,59	4	11	212	911	4,29	100
14	19,98	10,55	4	11	211	1620	7,69	100
15	20,16	10,79	4	11	218	846	3,89	100
16	20,06	10,56	4	11	212	1720	8,11	100
17						0	0	
18						0	0	
19						0	0	
20						0	0	
BUKEV SA-UL								
					x	6,11	100	
					s	2,47	0	

Priloga F: Rezultati testiranja kontrolnih preizkušancev bukve, lepljenje z UL

Vzorec	1	b ₁	b ₂	d	A	F	f _v	Lom po lesu
Št.	mm	mm	mm	mm	mm ²	N	N/mm ²	%
2	20,04	10,92	4	11	219	1490	6,82	100
3	20,16	10,83	4	11	218	1690	7,75	100
4	20,14	10,82	4	11	218	1480	6,80	100
5	20,23	10,65	4	11	215	1340	6,20	100
8	20,06	10,64	4	11	213	678	3,17	100
9	20,17	10,75	4	11	217	1240	5,72	100
10	20,17	10,89	4	11	220	1680	7,66	100
11	20,13	10,68	4	11	215	1610	7,51	100
12	20,22	10,69	4	11	216	1330	6,13	100
13						0	0	
BUKEV KONTROLA								
					x	6,42	100	
					s	1,41	0	

Priloga G: Rezultati testiranja kontrolnih preizkušancev smreke, lepljenje z FF

Vzorec	1	b ₁	b ₂	d	A	F	f _v	Lom po lesu
Št.	mm	mm	mm	mm	mm ²	N	N/mm ²	%
1	20,36	10,65	4	11	214	1330	6,21	100
4	20,31	10,87	4	11	221	2110	9,55	100
5	20,31	10,67	4	11	217	1090	5,02	100
6	20,50	10,61	4	11	218	1080	4,97	100
7	20,24	10,73	4	11	217	1540	7,07	100
9	20,27	10,82	4	11	219	936	4,27	100
10	20,27	10,82	4	11	219	739	3,37	100
11	20,37	10,85	4	11	221	783	3,54	100
12	20,24	10,70	4	11	217	1120	5,16	100
14	20,30	10,51	4	11	213	781	3,66	100
STRIG SMREKA KONTR FF								
						x	5,28	100
						s	1,91	0

Priloga H: Rezultati testiranja preizkušancev smreke, lepljenje z FF (SA-FF)

Vzorec	1	b ₁	b ₂	d	A	F	f _v	Lom po lesu
Št.	mm	mm	mm	mm	mm ²	N	N/mm ²	%
1	20,34	8,91	4	11	181	473	2,61	100
2	20,15	8,95	4	11	180	725	4,02	100
3	20,27	8,96	4	11	182	884	4,87	100
4	20,03	9,07	4	11	182	143	0,79	100
5	20,13	8,85	4	11	178	573	3,22	100
6	20,54	8,94	4	11	184	903	4,92	100
7	20,13	8,77	4	11	177	1560	8,84	100
8	20,43	8,97	4	11	183	1030	5,61	100
9	20,11	8,88	4	11	179	221	1,24	100
0	0	0	0	0	0	0	0	0
STRIG SMREKA SA FF								
					x	4,01	100	
					s	2,45	0	

Priloga I: Rezultati testiranja preizkušancev smreke, lepljenje z FF (SB-FF)

Vzorec	1	b ₁	b ₂	d	A	F	f _v	Lom po lesu
Št.	mm	mm	mm	mm	mm ²	N	N/mm ²	%
1	20,21	8,85	4	11	179	974	5,45	100
2	20,27	8,84	4	11	179	1270	7,10	100
3	20,22	9,07	4	11	183	693	3,78	100
4	20,22	9,06	4	11	183	1230	6,71	100
5	20,26	8,96	4	11	182	845	4,66	100
6	20,35	9,06	4	11	184	362	1,96	100
7	20,42	8,97	4	11	183	474	2,59	100
8	20,47	8,76	4	11	179	770	4,29	100
9	20,39	8,97	4	11	183	482	2,63	100
STRIG SMREKA SB FF								
					x	4,35	100	
					s	1,82	0	

Priloga J: Rezultati testiranja preizkušancev bukve, lepljenje z FF (SB-FF)

Vzorec	1	b ₁	b ₂	d	A	F	f _v	Lom po lesu
Št.	mm	mm	mm	mm	mm ²	N	N/mm ²	%
1	20,31	10,85	4	11	220	1570	7,11	50
2	20,37	10,88	4	11	222	1410	6,37	75
3	20,42	11,20	4	11	229	3660	15,99	100
4	20,37	10,84	4	11	221	2040	9,23	100
5	20,15	10,77	4	11	217	2810	12,95	100
6	20,46	10,58	4	11	216	468	2,16	75
7	20,47	10,78	4	11	221	2960	13,40	100
8	20,34	10,32	4	11	210	1450	6,89	100
9	20,23	11,14	4	11	225	2870	12,74	100
10	20,28	10,49	4	11	213	1630	7,68	100
STRIG BUKEV SB FF								
					x	9,45	90	
					s	4,21	0	

Priloga K: Rezultati testiranja preizkušancev bukve, lepljenje z FF (SA-FF)

Vzorec	1	b ₁	b ₂	d	A	F	f _v	Lom po lesu
Št.	mm	mm	mm	mm	mm ²	N	N/mm ²	%
1	20,34	10,40	4	11	212	2230	10,54	100
2	20,40	10,58	4	11	216	2540	11,77	100
3	20,53	10,30	4	11	211	563	2,66	50
4	20,51	10,65	4	11	218	2990	13,68	100
5	20,35	10,45	4	11	213	2360	11,11	100
6	20,39	10,27	4	11	209	1610	7,70	75
7	20,30	10,59	4	11	215	2430	11,32	100
8	20,47	10,34	4	11	212	1350	6,40	75
9	20,27	10,45	4	11	212	3210	15,15	100
STRIG BUKEV SA FF								
					x	10,04	88,8	
					s	3,85	0	

Priloga L: Rezultati testiranja kontrolnih preizkušancev bukve, lepljenje z FF

Vzorec	l	b ₁	b ₂	d	A	F	f _v	Lom po lesu
Št.	mm	mm	mm	mm	mm ²	N	N/mm ²	%
1	20,65	10,15	4	11	210	2820	13,48	25
2	20,67	10,29	4	11	213	2240	10,51	100
3	20,34	10,20	4	11	207	1720	8,28	100
4	20,63	10,65	4	11	220	2290	10,43	100
6	20,33	10,64	4	11	216	2220	10,27	100
7	20,60	10,82	4	11	223	2950	13,25	100
8	20,50	10,69	4	11	219	2280	10,43	100
9	20,47	10,58	4	11	217	2000	9,24	100
10	20,43	10,83	4	11	221	2180	9,87	100
11	20,08	10,34	4	11	208	2160	10,39	100
STRIG BUKEV KONTR FF								
					x	10,61	92,5	
					s	1,61	0	

Priloga M: Rezultati testiranja trislojnega lesa bukovine, lepljene z utekočinjenim lesom,
sistem (B: b-c-b)

	Oznaka vzorca	F_{max}	f_m	E_m	t (lom)
		N	N/mm ²	N/mm ²	s
	3-B-UL 1	1450	47,9	4140	63,42
	3-B-UL 2	708	22,3	1740	64,28
	3-B-UL 3	1220	39,8	2580	63,58
	3-B-UL 4	1740	54,3	3320	68,14
	3-B-UL 5	1160	36,8	2960	55,16
	3-B-UL 6	2030	67,5	2380	221,04
	3-B-UL 7	754	25,1	2500	41,88
	x				
			41,95	2803	
	s		16,10	61,71	

Priloga N: Rezultati testiranja trislojnega lesa smrekovine, lepljene z utekočinjenim lesom,
sistem (S:a-c-a)-SA

	Oznaka vzorca	F_{max}	f_m	E_m	t (lom)
		N	N/mm ²	N/mm ²	s
	3-A-UL-1 SMREKA	818	30,6	3490	46,3
	3-A-UL-2 SMREKA	882	38,4	4230	53,1
	3-A-UL-3 SMREKA	662	24,6	2210	50,88
	3-A-UL-4 SMREKA	1330	47,1	2080	214,62
	3-A-UL-5 SMREKA	515	20,7	964	47,6
	3-A-UL-6 SMREKA	815	34	2200	72,86
	3-A-UL-7 SMREKA	1140	42,1	4180	50,9
	3-A-UL-8 SMREKA	778	32,1	3240	53,58
	3-A-UL-9 SMREKA	550	22	1260	50,18
	3-A-UL-10 SMREKA	941	32	3170	54,26
	x	32,36		2702	
	s	8,55		69,43	

Priloga O: Rezultati testiranja trislojnega lesa smrekovine, lepljenega z utekočinjenim lesom
 Sistem (S: b-c-b)-SB

	Oznaka vzorca	F_{max}	f_m	E_m	t (lom)
		N	N/mm ²	N/mm ²	s
	smreka 3 1	740	32,7	4550	66,42
	smreka 3 2	677	24,5	1860	76,76
	smreka 3 3	677	30,2	4010	49,72
	smreka 3 4	491	19,1	1370	54,6
	smreka 3 5	536	21,2	2890	43,62
	smreka 3 6	540	17,1	1050	67,36
	smreka 3 7	528	21,8	2630	38,58
	smreka 3 8	1170	53,5	4730	57,84
	smreka 3 9	526	20,3	1110	59,22
	smreka 3 10	648	24,8	2690	43,52
	x	26,52	2689		
	s	10,6	12,18		

Priloga P: Rezultati testiranja trislojnega lesa smrekovine, lepljenje z utekočinjenim lesom
 Sistem (S: a-a-a)-SA

	Oznaka vzorca	F_{max}	f_m	E_m	t (lom)
		N	N/mm ²	N/mm ²	s
	A-UL-4	418	29,9	5900	74,54
	A-UL-6	413	25,9	4800	55,06
	A-UL-5	569	36,9	1540	131,28
	A-UL-1	337	14	1140	91,48
	A-UL-2	521	40,3	3850	96,68
	A-UL-7	1200	86,3	8150	62,74
	A-UL-8	402	24,8	3890	42,38
	A-UL-9	392	26,3	2800	81,8
	A-UL-10	584	27,3	586	82,06
	x	34,63	3628		
	s	20,8	26,01		

Priloga R: Rezultati testiranja trislojnega lesa bukovine, lepljene z utekočinjenim lesom,
sistem (B: a-a-a)-SA

	Oznaka vzorca	F_{max}	f_m	E_m	t (lom)
		N	N/mm ²	N/mm ²	s
	A-UL-7	656	28,8	3050	76,86
	A-UL-1	2200	82,3	4620	225,64
	A-UL-4	1710	63	2280	203,3
	A-UL-5	1670	62,9	3090	150,32
	x	59,25		3260	
	s	22,3		66,14	

Priloga S: Rezultati testiranja trislojnega lesa smrekovine, lepljene z utekočinjenim lesom Sistem (S: b-b-b)-SB

	Oznaka vzorca	F _{max}	f _m	E _m	t (lom)
		N	N/mm ²	N/mm ²	s
	B-UL-10	435	23,8	2130	110,82
	B-UL-5	898	37,4	1010	191,16
	B-UL-8	476	28,7	3790	84,46
	B-UL-2	662	56,5	7200	63,36
	B-UL-3	570	43,6	9170	59,78
	B-UL-9	519	25,2	2780	55,86
	B-UL-7	373	24,8	2770	88,62
	B-UL-6	802	33	1020	191,3
	B-UL-1	716	57,9	7430	68,74
x					
s					

Priloga T: Rezultati testiranja trislojnega lesa bukovine, lepljene z utekočinjenim lesom,
sistem (B: b-b-b)-SB

	Oznaka vzorca	F_{max}	f_m	E_m	t (lom)
		N	N/mm ²	N/mm ²	s
	B-UL-5	1920	94	8300	62,86
	B-UL-8	1740	88	7250	246,8
	B-UL-4	1340	67,7	5270	82,28
	B-UL-9	810	40,2	5560	53,88
	B-UL-1	1130	40,5	2160	136,06
	B-UL-6	638	24,6	4240	36,9
x		59,16	5463		
s		28,3	78,22		

Priloga U: Rezultati testiranja trislojnega lesa bukovine- kontrolnih preizkušancev, lepljenih z utekočinjenim lesom, sistem (B: c-c-c)

	Oznaka vzorca	F_{max}	f_m	E_m	t (lom)
		N	N/mm ²	N/mm ²	s
	bukev 1	2660	45,1	1450	89,42
	bukev 2	3320	55,9	2550	94,86
	bukev 3	3400	59,5	3340	70
	bukev 4	2520	44	2220	74,12
	bukev 5	2900	51,6	2460	83,96
	bukev 6	3210	56,9	3390	61
	bukev 7	2470	43,1	2300	70,76
	bukev 8	4120	72,8	3500	82,96
	bukev 9	3230	54,1	2600	88,58
	bukev 10	2070	34,4	872	114
	x	51,74		2468	
	s	10,7		15,12	

Priloga V: rezultati testiranja trislojnega lesa smrekovine- kontrolnih preizkušancev, lepljenih z utekočinjenim lesom, sistem (S:c-c-c)

	Oznaka vzorca	F_{max}	f_m	E_m	t (lom)
		N	N/mm ²	N/mm ²	s
	smreka kont 1	1730	36,8	2160	100,4
	smreka kont 2	1640	37,3	2760	80,2
	smreka kont 3	1750	35,9	2570	88,32
	smreka kont 4	1990	45,2	2450	104,78
	smreka kont 5	1730	41,4	2070	102,16
	smreka kont 6	1740	38,5	2250	92,28
	smreka kont 7	1470	28,9	2240	80,6
	smreka kont 8	1430	28,9	2290	67,86
	smreka kont 9	1830	42,6	2160	88,72
	smreka kont 10	1790	36,6	2230	76,74
	x	37,21	2318		
	s	5,3	12,03		

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Špela CURK

**LEPLJENJE VISKOELASTIČNO TOPLITNO
ZGOŠČENEGA LESA Z LEPILOM NA OSNOVI
UTEKOČINJENEGA LESA**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2016