

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Marko KUMER

LEPLJENJE TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

BONDING OF THERMALY MODIFIED WOOD

GRADUATION THESIS
Higher Professional Studies

Ljubljana, 2016

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

Za mentorja je bil imenovan prof. dr. Milan Šernek, za recenzenta pa prof. dr. Miha Humar.

Mentor: prof. dr. Milan Šernek

Recenzent: prof. dr. Miha Humar

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

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

Marko KUMER

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Vs
DK	UDK 630*824.8
KG	lepljenje lesa/lom po lesu/strižna trdnost/termična modifikacija
AV	KUMER, Marko
SA	ŠERNEK, Milan (mentor)/HUMAR, Miha (recenzent)
KZ	SI – 1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2016
IN	LEPLJENJE TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA
TD	Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)
OP	X, 51 str., 14 pregl., 19 sl., 57 vir.
IJ	Sl
JI	sl/en
AI	Smrekove lamele smo modificirali v vakuumski komori pri petih različnih temperaturah, od 160 °C do 210 °C. Šesta skupina lamel je bila testna in ni bila termično modificirana. Modificiranim lamelam smo izmerili izgubo lesne mase, ki je bila posledica termične obdelave. Potrdili smo, da obstaja korelacija med višino temperature in izgubo lesne mase, pri čemer višine izgube mase pri določeni temperaturi ni mogoče z gotovostjo napovedati. Lamele smo lepili v pare z urea-formaldehidnim (UF) in fenol-formaldehidnim (FF) lepilom. Iz zlepljenih parov lamel smo izžagali testne vzorce, kot predpisuje standard SIST – TS CEN/TS 133354: 2004. Vzorce smo pred testiranjem izpostavili trem različnim pogojem; (1) standardni klimi s 65 % zračno vlažnostjo in 20 °C, (2) za 24 ur smo jih potopili v hladno vodo z 20 °C in (3) jih 6 ur kuhali ter nato še eno uro ohlajali v hladni vodi. Ugotavljali smo strižno trdnost glede na stopnjo termične modifikacije in uporabljeno lepilo. Ocenjevali smo tudi delež loma po lesu in lepilu. Ugotovili smo, da stopnja modifikacije vpliva na lepljenje masivnega lesa in sicer strižna trdnost za obe lepili pada z naraščajočo temperaturo modifikacije. Za FF lepilo lahko rečemo, da je primerno za lepljenje izdelkov namenjenih notranji uporabi v vlažnih pogojih, med tem ko je UF lepilo omejeno na lepljenje izdelkov namenjenih notranji uporabi s suho klimo.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Vs
DC UDC 630*824.8
CX bonding/wood failure/shear strength/heat treatment
AU KUMER, Marko
AA ŠERNEK, Milan (supervisor)/HUMAR, Miha (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 HEAT TREATED WOOD
DT Graduation Thesis (Higher Professional Studies)
NO X, 51 p., 14 tab., 19 fig., 57 ref.
LA SI
AL sl/en
AB Spruce lamellas were modified in a vacuum chamber at five different temperatures, from 160 °C to 210 °C. The sixth group of blades was a control group and was not heat treated. We measured the mass loss, which was the result of thermal treatment. We confirmed that there is a correlation between the modification temperature and mass loss, while the amount of mass loss at a certain temperature cannot be asserted with certainty. Lamellas were bonded together in pairs by urea-formaldehyde and phenol- formaldehyde adhesive. From the pairs of lamellas we cut out test specimens, according to standard SIST - TS CEN / TS 133354:2004. Before sample testing the samples were exposed to three different conditions: (1) a standard condition at 65 % air humidity and 20 °C, (2) they were for 24 hours immersed in cold water with 20 °C, and (3) boiled for 6 hours, and then they were cooled down in water. We observed the shear strength depends on the degree of thermal modification and the adhesive type. We also determined the share of wood failure. We found out that the degree of modification affects on bonding of solid wood. How and to what extent the impact is, depends on the kind of adhesive and method of test samples preparation. We found out the level of modification has influence on bonding massive wood. We can claim phenol-formaldehyde adhesive is suitable for bonding products intended for indoor use in humid conditions, while urea-formaldehyde adhesive is limited to bonding products intended for indoor use with dry climate.

KAZALO VSEBINE

	str.
Ključna dokumentacijska informacija (KDI)	III
Key words documentation (KWD)	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic	VIII
Kazalo slik	IX
Okrajšave in simboli	X
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 HIPOTEZE IN CILJI NALOGE	1
2 PREGLED OBJAV	2
2.1 MODIFIKACIJA LESA	2
2.1.1 Princip modifikacije lesa	2
2.2 TERMIČNA MODIFIKACIJA LESA	3
2.2.1 Postopki termične modifikacije	4
2.2.1.1 Plato postopek	4
2.2.1.2 ThermoWood postopek	4
2.2.1.3 Retification postopek	5
2.2.1.4 Bois perdure	5
2.2.1.5 OHT (Oil-heat treatment)	5
2.2.2 Parametri modifikacije	5
2.2.2.1 Drevesna vrsta	5
2.2.2.2 Temperatura	6
2.2.2.3 Čas modifikacije	7
2.2.3 Lastnosti termično modificiranega lesa	7
2.2.3.1 Izguba mase	8
2.2.3.2 Dimenzijska stabilnost	8
2.2.3.3 Odpornost proti glivam in insektom	9
2.2.3.4 Odpornost proti vremenskim vplivom	10
2.2.3.5 Ognjeodpornost	Napaka! Zaznamek ni definiran.
2.2.3.6 Razpoke	10
2.2.3.7 Mehanske lastnosti	10
2.2.3.8 pH vrednost	11
2.2.3.9 Površinska obdelava	11
2.2.3.10 Barvne spremembe in vonj	12
2.2.3.11 Ravnovesna vlažnost	12
2.2.4 Uporaba termično modificiranega lesa	13
2.3 LEPLJENJE	13
2.3.1 Lepila za lepljenje termično modificiranega lesa	13
2.3.2 Parametri lepljenja	14
2.3.3 Trdnost termično modificiranih spojev	14
3 MATERIAL IN METODE	16
3.1 MATERIALI	16
3.1.1 Uporabljeni lesni vzorci	16
3.1.1.1 Nemodificirani vzorci lesa	16
3.1.1.2 Modificirani vzorci lesa	16
3.1.2 Uporabljeno lepilo	16
3.1.2.1 Urea-formaldehidno lepilo	16

3.1.2.2	Fenol-formaldehidno lepilo.....	17
3.1.3	Vakuumska tlačna komora	17
3.1.4	Stiskalnica.....	18
3.1.5	Klimatska komora	18
3.1.6	Univerzalni stroj za testiranje.....	18
3.2	METODE.....	19
3.2.1	Priprava vzorcev za termično modifikacijo.....	19
3.2.1.1	Predpriprava	19
3.2.1.2	Sušenje	19
3.2.2	Termična modifikacija vzorcev	19
3.2.3	Določanje izgube mase termično modificiranih vzorcev	21
3.2.4	Lepljenje lamel.....	21
3.2.4.1	Priprava za lepljenje.....	21
3.2.4.2	Lepljenje	21
3.2.4.3	Lepljenje lamel s FF lepilom.....	22
3.2.4.4	Lepljenje lamel z UF lepilom.....	22
3.2.5	Priprava vzorcev za testiranje po standardu CEN/TS 13354:2004	23
3.2.5.1	Izžagovanje vzorcev iz lamel	23
3.2.5.2	Priprava za testiranje.....	23
3.2.6	Testiranje.....	24
3.2.7	Strižna trdnost lepilnega spoja	24
3.2.8	Ocenjevanje loma po lesu	25
4	REZULTATI	26
4.1	POGOJI LEPLJENJA	26
4.1.1	Vlažnost lamel pred lepljenjem	26
4.1.2	Temperatura v spoju	27
4.2	IZGUBA MASE GLEDE NA TEMPERATURO MODIFIKACIJE.....	28
4.3	LEPLJENJE LAMEL V PARE	29
4.4	REZULTATI PRI TESTIRANJU PO STANDARDU SIS – TS CEN/TS 13354:2004.....	29
4.4.1	Razporeditev vzorcev v skupine in poimenovanje skupin.....	29
4.4.2	Rezultati vzorcev, ki so bili pred testiranjem izpostavljeni standardni klimi.....	30
4.4.3	Rezultati vzorcev 24 ur potopljenih v hladni vodi	31
4.4.4	Rezultati vzorcev, ki so bili 6 ur v vreli vodi.....	32
4.4.5	Rezultati in primerjave med vzorci izpostavljenimi različnim pogojem pred testiranjem 34	
4.4.6	Rezultati in primerjava med vzorci glede na lego v lameli.....	36
4.5	DELEŽ LOMA PO LESU	37
5	RAZPRAVA IN SKLEPI.....	40
5.1	RAZPRAVA	40
5.1.1	Vlažnost lamel pred lepljenjem	40
5.1.2	Temperatura v spoju	40
5.1.3	Izguba lesne mase.....	40
5.1.4	Strižna trdnost vzorcev izpostavljenih različnim klimam.....	41
5.1.4.1	Standardna klima.....	42
5.1.4.2	24 ur v hladni vodi	43
5.1.4.3	6 ur kuhanja.....	43
5.1.5	Rezultati in primerjava med vzorci glede na lego v lameli.....	43
5.1.6	Lom po lesu.....	44
5.2	SKLEPI.....	44
6	POVZETEK.....	45
7	VIRI.....	46

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Fizikalno-kemijske lastnosti lepila L – 200.....	17
Preglednica 2: Fizikalno kemijske lastnosti lepila TIP A.....	17
Preglednica 3: Podatki za vakuumsko tlačno komoro (Lesar, 2005)	18
Preglednica 5: Hitrost navlažitve lamel pred lepljenjem glede na izgubo lesne mase	26
Preglednica 6: Povprečna izguba lesne mase za posamezno temperaturo modifikacije	28
Preglednica 7: Strižna trdnost za posamezne skupine preizkušancev lepljenih s FF lepilom in pred preizkušanjem izpostavljenih standardni klimi	30
Preglednica 8: Strižna trdnost za posamezne skupine preizkušancev lepljenih z UF lepilom in pred preizkušanjem izpostavljenih standardni klimi	30
Preglednica 9: Strižna trdnost za posamezne skupine lepljene s FF lepilom pri vzorcih, ki so bili za 24 ur potopljene v hladno vodo	31
Preglednica 10: Strižna trdnost za posamezne skupine lepljene z UF lepilom pri vzorcih, ki so bili 24 ur potopljene v hladni vodi.....	32
Preglednica 11: Strižna trdnost za posamezne skupine lepljene s FF lepilom pri vzorcih, ki so bili za 6 ur potopljene v vrelo vodo	33
Preglednica 12: Trdnost lepilnega spoja za posamezne skupine lepljene z UF lepilom pri vzorcih, ki so bili za 6 ur potopljene v vrelo vodo	33
Preglednica 13: Delež loma po lesu za skupine lepljene s FF lepilom.....	37
Preglednica 14: Lom po lesu za skupine lepljene z UF lepilom	38

KAZALO SLIK

str.

Slika 1: Reakcijski mehanizmi modifikacije lesa (Mayens in Oksanen, 2003)	7
Slika 2: Obarvanje vzorcev kod posledica modifikacije	20
Slika 3: Vzorec	21
Slika 4: Lega preizkušencev v lameli (Šega, 2004).....	23
Slika 5: Kuhanje preizkušancev v laboratorijski posodi za kuhanje vzorcev.....	24
Slika 6: Merjenje vzorcev.....	25
Slika 9: Temperatura v spoju lamel.....	28
Slika 10: Izguba lesne mase pri posameznih temperaturah modifikacije.....	29
Slika 11: Povprečna strižna trdnost za FF in UF lepilo pri standardni klimi	31
Slika 12: Povprečna strižna trdnost za FF in UF lepilo pri vzorcih, ki so bili 24 ur potopljene v hladni vodi.....	32
Slika 13: Povprečna strižna trdnost za FF in UF lepilo pri vzorcih, ki so bili za 6 ur potopljene v vrelo vodo.....	34
Slika 14: Povprečna strižna trdnost za FF lepilo in vse tri načine priprave	35
Slika 15: Povprečna strižna trdnost za UF lepilo in vse tri načine priprave.....	35
Slika 16: Strižna trdnost glede na lego v lameli za FF lepilo in vse tri načine priprave	36
Slika 17: Strižna trdnost glede na lego v lameli za UF lepilo in vse tri načine priprave.....	37
Slika 18: Lom po lesu za FF lepilo in vse tri načine priprave	38
Slika 19: Lom po lesu za UF lepilo in vse tri načine priprave	39

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

PCP	pentaklorfenol (včasih se je uporabljal za zaščito lesa)
DDT	Diklorodifeniltrikloroetan (včasih se je uporabljal za zaščito lesa)
OHT	oil-heat treatment
ASE	antishrink efficiency, protikrčitvena učinkovitost
MEE	moisture excluding effectiveness, sposobnost preprečevanja navlaževanja
SIST	slovenski nacionalni standard
UV	ultravijolična (svetloba)
PVAc	polivinil-acetatno (lepilo)
PUR	poliuretansko (lepilo)
PMDI	izocianatno (lepilo)
RF	resorcinol-formaldehidno (lepilo)
UF	urea-formaldehidno (lepilo)
MUF	melamin-urea-formaldehidno (lepilo)
FRF	fenol-resorcinol-formaldehidno (lepilo)
MF	melamin-formaldehidno (lepilo)
FF	fenol-formaldehidno (lepilo)

1 UVOD

Les človeka spremlja že od pradavnine, saj so že naši predniki dobro poznali njegovo uporabnost. V zadnjih stoletjih se je začelo les tudi znanstveno proučevati, predvsem z namenom razširiti njegovo uporabo, izboljšati načine obdelave in podaljšati življenjsko dobo lesa. Za slednjo je bilo razvito veliko število različnih postopkov in sredstev. Veliko teh sredstev se je izkazalo za človeku in okolju škodljivih, zato se jih zamenjuje z novimi postopki, ki nimajo tako izrazitih negativnih vplivov na okolico.

Eden izmed teh postopkov je modifikacija lesa. Termična modifikacije je le eden od načinov, s katerimi se da izboljšati nekatere relevantne lastnosti lesa in povečati njegovo odpornost. Kot so pokazale raziskave, se mu poleg odpornosti pred okužbo z glivami in napadi insektov poveča tudi hidrofobnost in dimenzijska stabilnost. Negativne posledice termične obdelave lesa se kažejo predvsem v poslabšanju mehanskih lastnosti, spremeni se tudi barva, kar lahko vpliva na njegovo uporabo.

Postopek termične modifikacije lesa poteka pri visoki temperaturi in ob zmanjšani prisotnosti kisika. Za modifikacijo se uporabljajo komore z grelci, ki so sposobni les segreti tudi na več kot 230 °C. Stopnja modifikacije je odvisna od časa in temperature modifikacije. Med modifikacijo les izgubi del mase. Delež izgube mase v strokovni literaturi povezujejo z lastnostmi, ki jih les dobi z modifikacijo, zato je izguba lesne mase glavni indikator stopnje modifikiranosti.

Pogosto se zgodi, da je potrebno modificiran les lepiti, zato smo v naši raziskavi proučevali, kako termična modifikacija vpliva na lepljenje lesa.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Raziskave na tem področju so pokazale, da se s termično modifikacijo lesa spremenijo nekatere njegove lastnosti. Vemo, da se spremeni vrednost pH– in sicer les postane bolj kisel, poveča se hidrofobnost in zmanjša sposobnost omočitve površine. Vse to so pomembni parametri pri lepljenju lesa in zato pričakujemo, da so lastnosti lepilnega spoja pri termično modificiranem lesu drugačne, kot pa pri nemodificiranem lesu.

1.2 HIPOTEZE IN CILJI NALOGE

V diplomskem delu bomo proučevali vplive termične modifikacije na lepljenje lesa. Predvidevamo, da se bosta spoja, zlepljena s fenol-formaldehidnim in urea-formaldehidnim lepilom, zaradi različne kemične zgradbe lepil, obnašala različno. Predvidevamo tudi, da se bodo lastnosti lepilnega spoja spreminjale glede na stopnjo modifikacije.

2 PREGLED OBJAV

2.1 MODIFIKACIJA LESA

Les je kot naraven, obnovljiv material uporaben tako v gradbeništvu kot v proizvodnji stavbnega in notranjega pohištva. Slabost lesa pa je, da je podvržen napadom insektov in okužbi z glivami, ki povzročajo trohnenje in razkroj lesa, kar omejuje njegovo uporabo. Z različnimi biocidnimi proizvodi les zaščitimo tako pred biotskimi, kot abiotskimi dejavniki razkroja. Ključne biotske dejavnike smo že omenili, medtem ko so abiotski dejavniki nežive narave delujejo pa mehansko, fizikalno in kemijsko.

V zadnjih desetletjih narašča potreba po razvoju okolju prijaznejših metod zaščite lesa. To seveda ne pomeni, da so vsi obstoječi postopki neprimerni in okolju škodljivi, vendar je tudi lesna industrija zainteresirana za razvoj novih metod, ki bi omogočile ohranitev ali celo izboljšanje naravnega videza ter lastnosti lesa za daljše časovno obdobje. V preteklosti so se za zaščito lesa večinoma uporabljali strupeni kemijski pripravki. Problem je nastal po preteku življenjske dobe zaščenega lesa. Zaradi velike vsebnosti strupenih elementov (krom, baker, arzen, živo srebro) ter organskih biocidov (PCP, DDT) je prosto odlaganje ali sežiganje prepovedano. Po drugi strani, s strupenimi biocidi zaščenega lesa ne moremo uporabiti v vseh pogojih, predvsem za izdelke, ki pridejo v stik s hrano za ljudi ali živali. Tem problemom se izognemo z modifikacijo lesa (Rep in sod., 2004).

2.1.1 Princip modifikacije lesa

Modifikacija lesa je skupina novejših postopkov, s katerimi želimo z okolju prijaznimi metodami in brez uporabe biocidov, les zaščititi pred škodljivci (tudi za najzahtevnejše razrede uporabe) ter izboljšati njegovo dimenzijsko stabilnost. Pri postopku modifikacije lesa se v lesu spremeni struktura osnovnih gradnikov – polimerov (celuloza, hemiceluloze, lignin) v celični steni. Posledica spremenjene zgradbe na molekulskem nivoju so drugačne lastnosti lesa (Teischinger in Stingl, 2002).

Zgradba celične stene sestoji v glavnem iz polimerov (celuloze, lignina in hemiceluloz). Reaktivne hidroksilne skupine teh polimerov so v veliki meri odgovorne za mnoge fizikalne in kemične lastnosti lesa. Pri modifikaciji lesa se spremeni zgradba polimerov celične stene, kar se kaže v spremembi pomembnih lastnosti lesa, vključno z naravno odpornostjo, dimenzijsko stabilnostjo in trdnostjo. Modifikacijo lesa delimo na naslednje skupine:

- fizikalni postopki modifikacije (termična modifikacija, densifikacija),
- kemična modifikacija (acetilacija ...)
- modifikacija z impregnacijo (modifikacija s furfural alkoholom, DMDHEU ...) (Hill, 2006).

Za največji možen učinek je potrebno za vsak postopek modifikacije ugotoviti optimalne pogoje modifikacije. Glavni parametri so katalizator (pri kemičnih postopkih modifikacije), temperatura, čas in lesna vrsta (Militz in sod., 1997). Bistveno pri kemičnih postopkih modifikacije je, da ena od kemičnih komponent lesa reagira z drugimi molekulami. Pri kemični modifikaciji so to molekule reagenta, pri termični pa druge

molekule v lesu. Najbolj reaktivne so hidroksilne skupine v celični steni in posledično tudi najbolj verjetna mesta za nastanek kemičnih vezi (Štern, 2000). S tem se zmanjša možnost absorpcije vodnih molekul in sama vezava le-teh na hidroksilne skupine. Poleg tega modificiranega lesa škodljivci ne prepoznajo in zanje ne predstavlja možnega vira hrane. Pri postopku modifikacije pa se ne spremeni samo molekulska zgradba lesa, ampak pride tudi do drugih posledic, kot so sprememba barve, sprememba mehanskih lastnosti (v večini primerov so slabše) in drugih sprememb, ki so v nekaterih primerih nezaželene (Hrastnik, 2005).

2.2 TERMIČNA MODIFIKACIJA LESA

Prve raziskave o termični modifikaciji lesa so potekale že leta 1916, vendar pa je bilo največ raziskav narejenih v zadnjih treh desetletjih. Na področju termične modifikacije je prijavljenih veliko patentov. Na Finskem, v Franciji, Nemčiji in na Nizozemskem že desetletje proizvajajo termično modificiran les v industrijskem merilu, zadnje desetletje tudi v Sloveniji.

Posledica termične obdelave lesa je cepitev vezi v molekulah hemiceluloz in delno lignina. Posledica je delen razkroj, pri katerem nastajajo stranski produkti, kot so očetna kislina, furfural, voda, ogljikov dioksid in metanol. Tako pride do zmanjšanja števila hidroksilnih skupin in delne cepitve polimernih verig in tudi do nastanka novih vezi. Z redukcijo števila prostih hidroksilnih skupin pride do zmanjšanja medsebojnih reakcij z vodo. Rezultat je torej manj higroskopen in s tem dimenzijsko stabilnejši les, s povečano biološko odpornostjo proti glivam in insektom (Patzelt in sod., 2002).

Razlogi za to še niso v celoti razjasnjeni, najpogosteje pa zasledimo naslednje možnosti:

- glive modificiranega lesa ne prepoznajo, zato ga ne razkrajajo,
- s termično modifikacijo znižamo ravnovesno vlažnost lesa,
- med termično modifikacijo se najbolj razgradijo hemiceluloze, ki so najbolj dovzetne na glivni razkroj,
- med termično modifikacijo nastanejo nove snovi, ki delujejo fungicidno ... (Zanjekovič, 2007)

V splošnem modifikacija lesa poteka pri maksimalnih temperaturah med 160 in 260 °C. Prisotnost kisika pri tej temperaturi bi pomenila močno degradacijo in s tem bistveno poslabšanje mehanskih lastnosti lesa. Zato poteka termična modifikacija v komori brez prisotnosti kisika. Različni postopki termične modifikacije se ločijo predvsem po zagotavljanju odsotnosti kisika (Rapp in Sailer, 2001; Militz, 2002).

Zaradi slabših mehanskih lastnosti, je termično modificiran les pretežno uporaben tam, kjer ni izpostavljen mehanskim obremenitvam, zaželena je dobra dimenzijska stabilnost in odpornost lesa (Rep in Pohleven, 2002; Rapp in Sailer, 2001).

2.2.1 Postopki termične modifikacije

V Evropi (Finska, Francija, Nemčija in Nizozemska) ter v ZDA so že razviti številni različni postopki toplotne modifikacije lesa. Med sabo se razlikujejo predvsem po mediju za segrevanje, ki ga uporabljajo v procesu oz. po načinu zagotavljanja odsotnosti kisika (Kariž in Šernek, 2008.; Rapp in Sailer, 2001; Militz, 2002).

Najpogostejše uporabljeni postopki termične modifikacije lesa v Evropi so (Militz, 2002; Homan in Jorissen, 2004):

- Plato postopek (PLATO BV, Nizozemska),
- ThermoWood postopek (Stora, Finnforest, Finska),
- Retification postopek (NOW New Option Wood, Francija),
- Bois perdure (BCI-MBS, Francija),
- OHT (Oil-heat treatment) postopek (Menz Holz, Nemčija).
- Postopek segrevanja na ploščah (Timura, Nemčija),
- Postopek v intaktnem vakuumu (Slvaprodukt, Slovenija)

2.2.1.1 Plato postopek

Plato modifikacija lesa poteka v petih fazah (The Plato technology, 2006):

1. Predsušenje: če je les prevlažen za hidrotermično obdelavo, ga najprej v klasičnih sušilnicah delno posušijo.
2. Hidrotermična obdelava: les v tej fazi segrejejo na 150–180 °C pri povišanem tlaku in vodni pari. Pri tem hemiceluloze in lignin razpadejo v vmesne reaktivne produkte. Polioze se pretvorijo v aldehide in nekatere kisline. Celuloza ostane nespremenjena, kar je bistveno za ohranitev mehanskih lastnosti.
3. Sušenje: les posušijo na 10 % vlažnost v klasični sušilnici, kar traja 3–5 dni, odvisno od debeline sortimentov.
4. Utrjevanje: les ponovno segrejejo na 150–190 °C, vendar tokrat v suhih razmerah in pri atmosferskem tlaku. Trajanje te faze je odvisno od debeline, vrste in oblike lesa ter znaša 14–16 ur. Aldehidi, nastali v drugi fazi, reagirajo z aktiviranimi molekulami lignina in tvorijo nepolarne (vodo odbojne) vezi, povezane s strukturo lesa.
5. Kondicioniranje: sledi še faza kondicioniranja na ustrezno vlažnost primerno za končno uporabo.

2.2.1.2 ThermoWood postopek

Pri ThermoWood postopku lahko uporabimo svež ali suh les. To je najpomembnejši komercialni postopek, s katerim modificiramo največje količine lesa. Svež les v začetnem postopku najprej posušimo pri visokih temperaturah. ThermoWood postopek je primeren za modifikacijo listavcev ali iglavcev, vendar je za vsako vrsto treba uporabiti različne pogoje. Postopek je sestavljen iz treh stopenj.

1. Segrevanje: les hitro segrejejo s toploto in paro na 100 °C. Potem temperaturo počasi povišajo na 130 °C, pri čemer se les posuši na skoraj 0 % vlažnost.
2. Modificiranje: temperaturo povišajo na 185–215 °C in jo vzdržujejo konstantno 2–3 ure, odvisno od stopnje modifikacije, ki jo želijo doseči.

3. Hlajenje in kondicioniranje: les ohladijo in kondicionirajo z razprševanjem vode. V tej fazi je treba z ustreznimi pogoji preprečiti nastanek razpok. Ko se les ohladi na približno 80–90 °C, sledi navlaževanje na 4 do 7 % vlažnost (Mayes in Oksanen, 2003).

2.2.1.3 Retification postopek

Pri tem postopku les naprej intenzivno posušijo pri temperaturi okrog 160–180 °C, nato pa temperaturo povišajo. Ena od posebnosti Retification postopka je uporaba temperature, ki ustreza temperaturi steklastega prehoda za določeno lesno komponento, zato uporabljajo temperature do 240 °C. Druga posebnost je uporaba dušikove atmosfere, s katero zagotovijo manj kot 2 % kisika v atmosferi med modifikacijo. Les po modifikaciji ohladijo z razprševanjem vode. Kakovost modifikacije uravnavajo z najvišjo temperaturo, trajanjem izpostavljenosti tej temperaturi in trajanjem celotnega postopka modifikacije (Vernois, 2000; Militz, 2002; Retiwood–The Process, 2008).

2.2.1.4 Bois perdure

Postopek je razdeljen na tri faze:

1. Odstranitev proste vode: kot surovina se lahko uporablja tudi svež les, zato je najprej treba odstraniti prosto vodo.
2. Odstranitev vezane vode iz lesa.
3. Termična modifikacija: v tej fazi les izpostavijo temperaturi 200–240 °C in pari. Pri tem naj bi alkoholi, katrani in smole migrirali iz lumnov celic v celične stene lesa. Te snovi naj bi predstavljale zaščitni sloj, ki zaustavi ali upočasni napredovanje gliv (Militz, 2002; Bois perdure – Technology principles, 2008).

2.2.1.5 OHT (Oil-heat treatment)

Pri OHT postopku les potopijo v olje in s tem preprečijo dostop kisika v les. Modifikacija v olju omogoča hitrejšo segrevanje lesa, saj je prenos toplote boljši kot pri modifikaciji v plinski atmosferi. Les segrejejo v oljni kopeli na okrog 220 °C in temperaturo vzdržujejo konstantno 2–4 ure. Uporabljajo različne vrste olj (iz oljne repice, laneno, sončnično). Olje po koncu postopka vakuumsko odstranijo iz lesa (Militz, 2002; Homan in Jorissen, 2004).

2.2.2 Parametri modifikacije

2.2.2.1 Drevesna vrsta

Za termično modifikacijo se največkrat uporabljajo manj odporne drevesne vrste. Vrste, ki se običajno uporabljajo so smreka, jelka, bor, breza in topol. Modificirajo pa se tudi lesovi drugih drevesnih vrst. Proces termične modifikacije je za vsako drevesno vrsto specifičen. Končni rezultat modifikacije je drugačen, glede na kemično sestavo in celično strukturo. Po navadi je režim za iglavce strožji kot za listavce, predvsem zaradi namena uporabe. Les

iglavcev se ponavadi uporablja v konstrukcijah, kjer je potrebna zaščita pred vlago in škodljivci. Listavci pa se pogosteje vgrajujejo v notranje prostore in so tudi odpornejši ter jih velikokrat modificiramo le zaradi estetskih razlogov, kot so temnejša barva (Syrjanen, 2001).

Kvaliteta lesa za termično modifikacijo mora biti ustrezna. Problem predstavljajo izpadajoče in pokajoče grče. Tudi razkrojen in okužen les lahko po modifikaciji povzroči dodatne barvne spremembe (Lesar, 2005). Velik vpliv na modifikacijo ima orientacija sortimentov (Šuštar, 2008). Klasičen enkratni rez lahko (posebno pri iglavcih) povzroči luščenje posameznih branik, če le-te potekajo horizontalno glede na površino deske. Branike morajo potekati vsaj pod kotom 45° , da se doseže boljša kakovost, kar pomeni manjše deformacije, večja trdnost površine, lepši splošni izgled (Syrjanen in Oy, 2001).

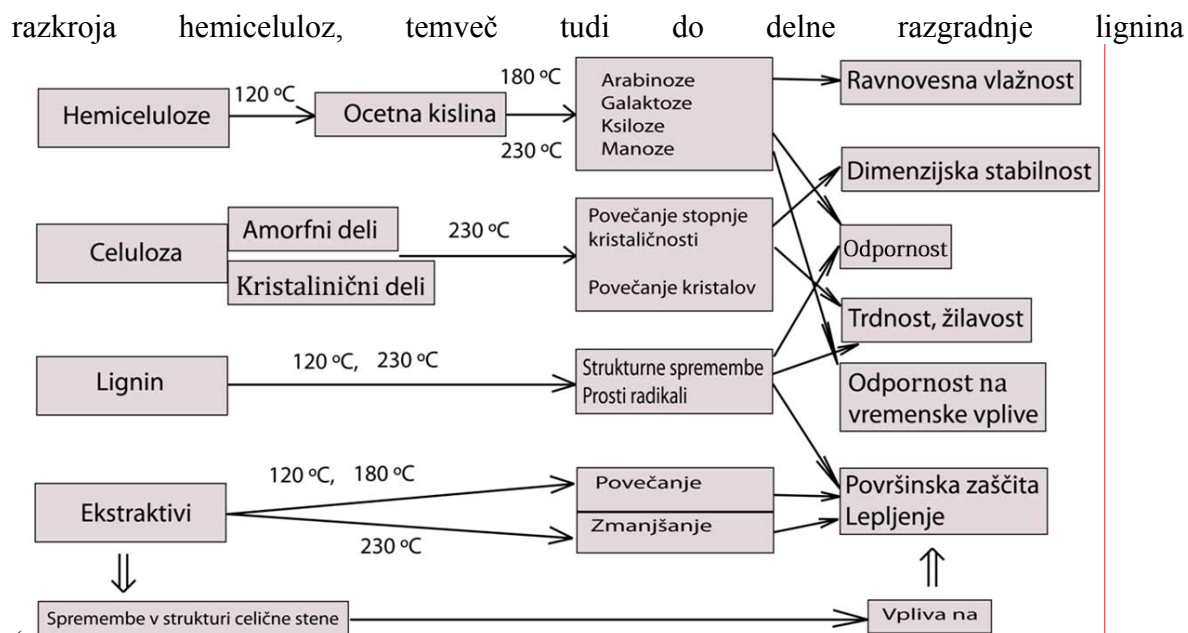
2.2.2.2 Temperatura

Potek termične modifikacije se sestoji iz treh faz:

- zviševanje temperature (segrevanje),
- modifikacija (konstantna temperatura),
- zniževanje temperature (ohlajanje).

V prvi fazi zviševanja temperature (segrevanja), se temperatura največkrat dviga od 100°C do 150°C . Temperatura med fazo modifikacije znaša med 150°C in 260°C ter je med procesom konstantna. Temperatura v fazi ohlajanja pada in sicer od temperature modifikacije na temperaturo okolice. Pri vseh treh stopnjah je pomembno, da razlika med temperaturo zraka in temperaturo lesa ni prevelika. V kolikor pride do prevelike razlike, se kvaliteta modificiranega lesa močno poslabša (Teischinger in Stingl, 2002).

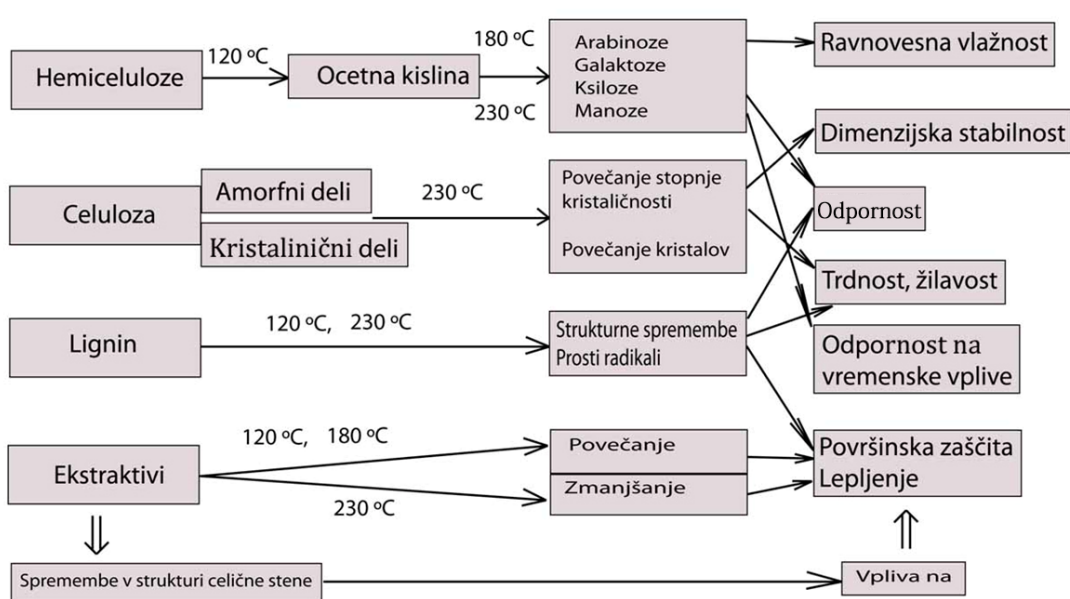
Temperatura v veliki meri vpliva na lastnosti modificiranega lesa, saj trajno spremeni biološke, fizikalne in mehanske lastnosti lesa. Pri nižjih temperaturah je razgradnja lesnih substanc še sorazmerno nizka, pri temperaturah nad 150°C pa se že opazijo večje spremembe (Teischinger in Stingl, 2002). Pri višjih temperaturah ne prihaja samo do



(Slika 1) (Feist in Seli, 1997). Celuloza in lignin se v primerjavi s hemicelulozami počasneje razgrajujeta. Pri visokih temperaturah hemiceluloze izgubljajo svojo vlogo povezovanja lignina in celuloze, pri tem pa lignin pridobiva termoplastične lastnosti (Feist in Sell, 1987).

Visoka temperatura zelo poveča biološko odpornost lesa, močno pa poslabša mehanske lastnosti. Za modifikacijo iglavcev se uporabljajo višje temperature, kot pa za les listavcev (Teischinger in Stingl, 2002).

Temperatura vpliva tudi na spremembo barvnega tona in sijaja. Zaradi tega se temperaturo modifikacije izbere glede na namen uporabe modificiranega lesa (Patzelt in sod., 2002).



Slika 1: Reakcijski mehanizmi modifikacije lesa (Mayens in Oksanen, 2003)

2.2.2.3 Čas modifikacije

Čas modifikacije je odvisen od več dejavnikov. Ti dejavniki so: višina temperature, velikost komore, kapaciteta komore, dimenzije lesa in čas ohlajanja (Sailer in sod., 2000).

Pomembno je, da je čas segrevanja dovolj dolg. Temperatura v sredini lesa mora biti enaka temperaturi modifikacije. Tako lahko dosežemo po celotnem volumnu lesa enakomerno modifikacijo (Tjeerdsma in sod., 1998).

Na splošno velja, da je celoten čas modifikacije odvisen od postopka termične modifikacije (grelnega medija) in od končnega namena uporabe lesa. Če se kot grelni medij uporablja vroče rastlinsko olje (OHT postopek modifikacije), čas modifikacije znaša (vključno s segrevanjem in ohlajevanjem) 18 ur (Rapp in Sailer, 2001). Pri uporabi vodne pare, kot grelnega medija (ThermoWood postopek modifikacije), modifikacija pri konstantni temperaturi traja štiri ure in pol (Syrjanen in Oy, 2001).

Pri termični modifikaciji ima temperatura večji vpliv kot čas. Modifikacija pri nižjih temperaturah z daljšim časom ne daje enakih lastnosti kot modifikacija pri višji temperaturi v bistveno krajšem času (Sailer in sod., 2000).

S podaljševanjem trajanja procesa modifikacije lesa se povečuje dimenzijska stabilnost, poslabšajo pa se njegove mehanske lastnosti ter zmanjša se gostota lesa. Prav tako se pri daljšem trajanju procesa močneje spremenita barva in sijaj lesa (Patzelt in sod., 2002).

2.2.3 Lastnosti termično modificiranega lesa

Stopnja spremembe lesa je zelo odvisna od vrste lesa in pogojev modifikacije, pri katerih igrata glavno vlogo temperatura in način zagotavljanja odsotnosti kisika (Militz 2002). Nedavno so se v Evropi zavzeli za razvoj tehnologije industrijske termične modifikacije lesa. Tehnologijo so razvijali na Nizozemskem (Militz in Tjeerdsma, 2000), v Franciji (Vernois, 2000), Nemčiji (Sailer in Rapp, 2000), na Finskem (Syrjanen in sod., 2000) in v Sloveniji (Rep in Pohleven, 2008).

2.2.3.1 Izguba mase

Les med postopkom modifikacije izgubi del mase, kar je predvsem značilno pri temperaturah nad 200 °C, ko se pojavi izrazita razgradnja ekstraktivov in razkroj nekaterih komponent lesa (Hakkou in sod., 2005).

Izguba mase je odvisna od več parametrov. V največji meri jo pogojujeta temperatura in trajanje modifikacije, manj pa vrsta lesa, začetna vlažnost lesa in medij, s katerim prenašamo temperaturo na les (Patzelt in sod., 2002). Pri enakih pogojih modifikacije je les bukve izgubil vedno večji odstotek mase, kot les smreke. Prisotnost kisika med modifikacijo lahko vpliva na oksidacijo celuloze in lignina in se zaradi tega izguba mase lesa dodatno zmanjša (Rapp in Sailer, 2001; Rep in Pohleven, 2001; Patzelt in sod., 2002). Rep s sodelavci (2004) pa navaja, da so vzorci smrekovine, modificirani pri maksimalni temperaturi med 190 °C in 230 °C imeli izgubo mase med 3,5 in 24 %. Izguba mase macesna je bila med 5,2 in 31 %. Izguba mase je zelo pomembna, saj le-ta vpliva na vse ostale biološke, fizikalne in kemijske lastnosti termično modificiranega lesa.

2.2.3.2 Dimenzijska stabilnost

Les je higroskopen material, saj hidroksilne skupine v lesnem tkivu vežejo oz. tvorijo vodikove vezi z molekulami vode. Zato povečana vlažnost ali direkten stik z vodo povzroči nabrekanje, sušenje pa krčenje celične stene. Takšne spremembe dimenzij lesa so nezaželene, ker povzročajo nastanek razpok v lesnem tkivu. Prav razpoke predstavljajo idealno mesto vdora škodljivcev in vode, odstopanje površinskih premazov, popuščanje lepilnih spojev in krivljenje lesa. Čim manjše je oddajanje in sprejemanje vode, bolj dimenzijsko stabilen je les. Na komponente celične stene se lahko vežejo molekule t.i. proste in vezane vode. Prosta voda vpliva samo na maso, ne pa tudi na lastnosti lesa. Količina vezane vode je omejena s številom sorpcijskih mest, ki vežejo vodne molekule. Pri sorpciji gre za vezavo plinastega adsorbenta, torej molekul vode iz zraka na površino adsorbenta (lesnih polimeriov), kar privede do nabreka celičnih sten (Gorišek, 1994).

Na higroskopičnost termično modificiranega lesa vplivajo pogoji, v katerih poteka modifikacija. Najbolj vpliva temperatura procesa. Proces, s katerim bi dosegli maksimalno dimenzijsko stabilnost in odpornost na razkroj z glivami ter minimizirati zmanjšanje mehanskih lastnosti, je potrebno optimizirati. Zaželeni so zmerni pogoji modifikacije, ki zagotavljajo visoke proizvodne kapacitete in lastnosti produkta ter zagotavljajo ustrezno izboljšanje kvalitete lesa, potrebno za različne namene uporabe (Tjeerdsma in sod., 1998). Dimenzijska stabilnost je v veliki meri odvisna od procesa, končne temperature in drevesne vrste (Rapp in Sailer, 2001). Znano je, da ima s temperaturo modifikacije okrog 200 °C modificiran les povečano dimenzijsko stabilnost. S povečevanjem izgube mase se zmanjšuje krčenje in nabrekanje termično modificiranega lesa (Patzelt in sod., 2002).

Dimenzijsko stabilnost pri termični modifikaciji lahko ovrednotimo z dvema parametroma: ASE (antishrinking efficiency – protikrčitvena učinkovitost) v radialni ASE_r in ASE_t v tangencialni smeri povesta, za koliko je krčenje modificiranega lesa manjše od krčenja nemodificiranega lesa. ASE se ocenjuje med dvema ravnovesnima stanjema, večinoma med vlažnim in sušilnično suhim stanjem (Šuštar, 2008)

Rapp in Sailer (2001) navajata, da je ponavadi vrednost ASE med 40 % in 50 %. Možno pa je, da izboljšamo dimenzijsko stabilnost celo za 90 %. Teoretični mejni vrednosti ASE sta 0 % in 100 %. Vrednost 100 % velja za material, ki se med dvema ravnovesnima stanjema ne skrči. ASE je kazalnik dimenzijske stabilnosti in ne vsebuje informacij o mehanskih lastnostih materiala.

MEE (moisture excluding effectiveness – sposobnost preprečevanja navlaževanja) je kazalnik, ki se je široko uveljavil pri kvantificiranju uspešnosti dimenzijske stabilnosti lesa s površinskimi premazi nam pove, za koliko odstotkov sprejme neobdelan vzorec več vode kot tretiran (Gorišek, 1994).

2.2.3.3 Odpornost proti glivam in insektom

Pri modifikaciji dosežemo zaščito proti glivam in insektom na dva načina, ki sta neškodljiva za okolje. Prvi način je z zasedenostjo hidroksilnih skupin v celični steni, kar zmanjša adsorpcijo vode in tako les ne doseže primerne vlažnosti za razvoj gliv. Ta teorija se v zadnjem času podira. Izkazalo se je, da če zmanjšamo TNCS, s tem zmanjšamo tudi minimalno vlažnost potrebno za razkroj lesa. Tako se pojavijo gobe na TMT lesu že pri 17%, ali 18% vlažnosti lesa.

Drug način je s spremembo lesnih polimerov med postopkom modifikacije in tako postanejo specifični encimi, ki jih škodljivci izločajo za razgradnjo lesnega tkiva, neučinkoviti.

Klasifikacija termično modificiranega lesa temelji na standardu SIST EN 335-1 (Trajnost lesa in lesnih proizvodov – definicija razredov uporabe pred biološkim napadom – 1. del: Splošno). Termično modificiran les lahko uporabljamo v največ 3.2 razredu uporabe (pogosto vlaženje, nad tlemi), medtem ko se odsvetuje uporaba v četrtem razredu uporabe; npr. les je stalno v vodi ali v stiku s tlemi (Tjeerdsma in sod., 1998).

V splošnem lahko rečemo, da termični modifikacijski procesi občutno zvišujejo odpornost lesa, odvisno od drevesne vrste in pogojev procesa. Za neodporne drevesne vrste razreda odpornosti 4 ali 5 se poveča odpornost za dve do tri stopnje, v razred 2 do 3, v nekaterih primerih celo v razred 1. Odpornost proti vsem vrstam gliv se znatno izboljša. Različne raziskave dokazujejo, da se posebej poveča odpornost proti rjavi trohnobi. Nekoliko manj se izboljša odpornost proti beli in mehki trohnobi (Raggers, 2007). Vzrok izboljšanja odpornosti na glive mehke trohnobe in rjave trohnobe je zmanjšanje higroskopičnosti materiala. Redukcija hemiceluloz se zgodi v prvi fazi procesa. Ker je metabolizem gliv bele trohnobe odvisen od pretvorbe hemiceluloz, je zmanjšanje hemiceluloz verjetno glavni razlog za povečanje odpornosti na glive bele trohnobe (Sailer in Rapp, 2000; Tjeerdsma in sod. 2000; Rep in sod., 2004). Testi termično modificiranega lesa na odpornost v morski vodi kažejo, da les ni odporen na ladijsko svedrovko in ladijskega vrtovina (Sailer in Rapp, 2000).

Izboljšanje biološke odpornosti temelji na kemični razgradnji lesnih komponent in na formiranju novih struktur. Vendar vse spremembe v kemijski sestavi lesa še niso točno poznane (Milz in Tjeerdsma, 2001).

V termično modificiranem lesu so odkrili strupene snovi, ki so učinkovite proti trohnobi in plesnim. Posledica zmanjšanja higroskopičnosti lesa zaradi modifikacije je nižja vsebnost vode v modificiranem lesu, kar je odločilno za mnoge glive, ki povzročajo trohnobo. Predvsem posledična razgradnja hemiceluloz, ki je zelo pomembna za okužbo in če te ni, se odpornost za glive poveča. Snovi, ki so se preoblikovale (večinoma polisaharidi) ali ekstrahirale (ekstraktivi) bi drugače služile kot hranilo za glive (Buro, 1954).

Visoka temperatura in daljši čas modifikacije izboljšata odpornost termično modificiranega lesa proti trohnobi in plesnim. Na primer, pri postopku termične modifikacije z vodno paro, se lesu izboljša odpornost že, ko izguba mase zaradi postopka modifikacije znaša 8 % (Viitamemi in sod., 1997 in Rep in Pohleven, 2002).

2.2.3.4 Odpornost proti vremenskim vplivom

Izpostavljenost nezaščitenega lesa abiotskim dejavnikom (voda, svetloba, temperatura, kisik) ima za posledico nastanek razpok na površini, krčenje in nabrekanje lesa, spremembo barve, razgradnjo lignina ter druge poškodbe. Modifikacija na odpornost lesa proti vremenskim vplivom deluje pozitivno, zaradi izboljšane dimenzijske stabilnosti (manj razpok, manjše krčenje in nabrekanje).

2.2.3.5 Ognjevarnost

Termično modificiran les, kateremu se pri postopku poškoduje struktura površine, je v primerjavi s termično neobdelanim lesom bolj vnetljiv. Z višjo stopnjo modifikacije in z naraščanjem izgube mase pri termični modifikaciji se vnetljivost lesa sorazmerno povečuje (Patzelt in sod., 2002).

2.2.3.6 Razpoke

Zaradi zmanjšanja možnosti navzemanja vode, je pomembno zmanjšano tudi pokanje modificiranega lesa, zaradi vremenskih vplivov (Patzelt in sod., 2002).

Boonostra in sod. (2006) pa opozarjajo na možnost pokanja lesa med samo termično modifikacijo. Iglavci z ozkimi branikami in/ali hitrim prehodom med ranim in kasnim lesom so nagnjeni k nastanku tangencialnih razpok v kasnem lesu. Radialne razpoke pa se pojavijo pri manj permeabilnih vrstah zaradi velikih napetosti med postopkom termične modifikacije. Te poškodbe vplivajo na trdnost lepilnih spojev. Manjše poškodbe se lahko pojavijo tudi v parenhimskih celicah v trakovih in epitelnih celicah okrog smolnih kanalov.

2.2.3.7 Mehanske lastnosti

Modifikacija lesa lahko izboljša ali poslabša mehanske lastnosti lesa. Z višanjem temperature modifikacije se izboljšujeta biološka odpornost in dimenzijska stabilnost, vendar pa se poslabšujejo mehanske lastnosti. Upogibna trdnost se zmanjša za 10 do 30 %, če pa proces modifikacije ni optimiziran, se zmanjša celo do 50 % (Militz in Tjeedrsma, 2001; Militz, 2002; Patzelt in sod., 2002). Od parametrov pri procesu modifikacije je odvisen tudi modul elastičnosti. (Rep in Pohleven, 2002). Zato je uporaba termično modificiranega lesa v bolj obremenjenih konstrukcijah omejena (Sailer in sod., 2000).

Masiven les že po 30 minutah segrevanja pri 200 °C izgubi približno 10 % porušitvene trdnosti in približno 1 % mase. Proces je počasnejši pri zmanjšanem kisiku in hitrejši pri povišani temperaturi, višji relativni zračni vlažnosti ter višji vlažnosti lesa (Christiansen, 1989b; Yildiz in sod., 2006). Zato termično modificiran les lepimo pri nižjih tlakih (Jämsä in Viitaniemi, 2001).

Poslabšanje mehanskih lastnosti lesa je odvisno predvsem od postopka in načina vzpostavitve pogojev brez kisika. Velik vpliv na mehanske lastnosti ima vlažnost lesa. S postopkom modifikacije vplivamo na nižjo vsebnost vode v lesu, ko je v ravnovesnem stanju, z nekaterimi postopki modifikacije pa v les vnesemo dodatno maso, ki poveča gostoto, ta pa mehansko odpornost.

Trdnost lepilnih spojev termično modificiranega lesa je nižja tudi zaradi nižje trdnosti samega lesa, medtem ko se delež loma po lesu poveča (Christiansen 1989b; Militz, 2002).

2.2.3.8 Vrednost pH

Kot vse druge lastnosti modificiranega lesa, je sprememba vrednosti pH sorazmerna z izgubo mase. Z večanjem izgube mase vrednost pH pada. Najhitrejše znižanje vrednosti pH, za 10 %, je bilo zabeleženo pri termični modifikaciji 1,5 ure pri temperaturi 165 °C. Če so časi modifikacije daljši, pH vrednost pada bolj počasi, glede na izgubo mase (Patzelt in sod., 2002). Sprememba vrednosti pH ima negativen vpliv pri lepljenju in površinski obdelavi modificiranega lesa (Rep in Pohleven, 2002).

2.2.3.9 Površinska obdelava

Pri površinski obdelavi termično modificiranega lesa z vročim oljem z akrilnimi premazi na vodni osnovi, kot tudi z alkidnimi premazi na osnovi organskega topila, so po dveh letih staranja potrdili dobro odpornost na vremenske vplive (Rapp in Sailer, 2000). Po termični modifikaciji z dušikom se lesu poveča površinska energija. Za tako površino lesa ne moremo uporabiti kateregakoli komercialnega premaznega sredstva, s katerimi običajno premazujemo naravni (nemodificiran) les. Površinska napetost premaznega sredstva mora biti manjša od površinske energije termično modificiranega lesa. To dosežemo tako, da površinskim premaznim sredstvom dodajamo aditive, ki zmanjšujejo površinsko napetost. Velik problem površinske obdelave predstavlja smola, ki se med modifikacijo izloča iz smolnatih vrst lesa (Vernois, 2001).

Po nekajletni izpostavitvi naravnega in termično modificiranega lesa vremenskim dejavnikom se je pokazalo, da je premaz na termično modificiranem lesu veliko bolj odporen na vremenske vplive kot naravni les. To je najverjetneje posledica povečane dimenzijske stabilnosti ter manjšega pokanja in zvijanja termično modificiranega lesa (Militz, 2002).

Površina termično modificiranega lesa ni odporna proti UV svetlobi, razen, če jo premažemo z UV odpornimi premazi, ki vsebujejo UV absorberje. Pri običajnih postopkih nanašanja premaznih sredstev ni problemov, če pa uporabljamo elektrostatsko premazovanje, je priporočeno, da se les predhodno navlaži (Jämsä in Viitaniemi, 2001).

Površina sveže modificiranega termično modificiranega lesa je bolj hidrofobna od površine naravnega lesa, zato premazi na vodni osnovi v modificiran les penetrirajo slabše (Viitaniemi in Janisa, 1996). Po drugi strani izboljšana dimenzijska stabilnost termično modificiranega lesa pripomore k boljši obstojnosti premazov na lesu pri izpostavitvi zunanjim vplivom okolja (Jämsä in Viitaniemi, 1998).

Akrilni premazi na vodni osnovi kakor tudi akrilni premazi na osnovi organskih topil na lesu, termično modificiranem z vročim oljem, so po dveh letih naravnega staranja izkazali dobro obstojnost. S presenečenjem so ugotovili, da so premazi na lesu, termično modificiranem z vročini oljem, bolj obstojni kot na lesu, termično modificiranem s plini (Rapp in Sailer, 2001).

Zaradi manj OH skupin v modificiranem lesu, delno spremenjene strukture lesa in drugačne kemične sestave površine prihaja do drugačnih vezi in števila le-teh med lesom in lepilom. Z zmanjšanjem deleža hemiceluloz se zmanjša tudi število prostih reaktivnih OH skupin (Mayes in Oksanen, 2003). Manj reaktivnih skupin predstavlja manj mest za nastanek kemijske vezi med lepilom in lesom (Kariž in Šernek, 2008).

2.2.3.10 Barvne spremembe in vonj

Pri višjih temperaturah modifikacije vse vrste lesa dobijo temnejšo barvo. Kot navajajo različni avtorji, je barva odvisna od temperature in časa termične modifikacije. Višja kot je temperatura in daljši kot je čas modifikacije, bolj temna je barva. Barva je odvisna tudi od lesne vrste. (Rapp in Sailer, 2000; Syrjanen, 2001; Militz, 2002; Patzelt in sod., 2002; Raggars, 2007). Barva termično modificiranega lesa se pod vplivom UV svetlobe vseskozi spreminja (Rapp in Saller, 2001).

Takoj po modifikaciji ima les močan vonj po dimu, ki je posledica depolimerizacije in sproščanja hlapnih spojin. Ta neprijeten vonj v nekaterih primerih omejuje uporabo termično modificiranega lesa v zaprtih prostorih (Zanjkovič, 2007).

2.2.3.11 Ravnovesna vlažnost

Termično modificiran les ima precej nižjo ravnovesno vlažnost, kot nemodificiran les. Posledica manjše higroskopnosti modificiranega lesa je precej manjše krčenje in nabrekanje lesa ob spreminjanju vlažnosti okolice s tem pa tudi manjša obremenjenost lepilnih spojev z napetostmi, ki nastanejo zaradi delovanja lesa (Kariž in Šernek, 2008).

Po drugi strani pa je lahko nizka ravnovesna vlažnost modificiranega lesa problem pri utrjevanju lepila, saj je zaradi slabše adsorpcije vode v les utrjevanje počasnejše, spoji pa slabši. Ena od rešitev je uporaba lepil z manjšim deležem vode (Adhesive bonding of Plato wood, 2006). Lahko se pojavijo tudi problemi pri lepljenju z lepili, ki za reakcijo utrjevanja potrebujejo vodo. Eno-komponentna poliuretanska lepila pri nizkih vlažnostih lesa dajejo spoje z nižjo trdnostjo in manjšim deležem loma po lesu (Beaud in sod., 2006), kar lahko izboljšamo z navlaževanjem površine lepljencev pred stiskanjem (Kariž in Šernek, 2008).

2.2.4 Uporaba termično modificiranega lesa

Kakovost termično modificiranega lesa se razlikuje od kakovosti navadnega lesa. Zaradi slabših mehanskih lastnosti, je ta material potrebno uporabljati strogo namensko in s precejšnjo mero pazljivosti.

Zaradi krhkosti lesa moramo uporabljati ostra rezila, s čimer preprečimo trganje lesa. Lesni prah, ki nastaja med strojno obdelavo je zelo fin in suh, zato draži dihalne poti.

Termično modificiran les je namenjen zunanji in notranji uporabi, kjer je zahtevana povečana odpornost ali dimenzijska stabilnost, ni pa zahteve po veliki mehanski obremenitvi. Termično modificiran les lahko uporabljamo za:

- okna/vrata,
- vrtno pohištvo,
- talne obloge,
- zunanje opaže,
- specialne namene (savna, kopalnica, glasbila, itd.).

Odpornost termično modificiranega lesa je odvisna od pogojev, v katerih je potekala modifikacija in obsega uporabo od prvega do tretjega razreda odpornosti, vendar ga ne

moremo primerjati z lesom zaščitenim z baker kromovimi pripravki. Uporaba termično modificiranega lesa v stiku z zemljo in vodo ni primerna (Militz, 2002).

2.3 LEPLJENJE

2.3.1 Lepila za lepljenje termično modificiranega lesa

Na kakovost lepljenja termično modificiranega lesa vplivata vrsta lesa in lepila (Šernek in sod., 2008). Prve raziskave so pokazale, da se modificiran les kvalitetno lepi z večino industrijskih lepil kot so polivinil-acetatna (PVAc), poliuretanska (PUR), izocianatna (PMDI) in resorcinol-formaldehidna (RF) lepila, le da je treba pri nekaterih prilagoditi postopek lepljenja in/ali modificirati lepilo (Militz, 2002). V kasnejših raziskavah so ugotovili, da je mogoče termično modificiran les kvalitetno zlepit tudi z urea-formaldehidnimi (UF) in melamin-urea-formaldehidnimi (MUF) lepili (Šernek in sod., 2007; Šernek in sod., 2008).

MUF in PUR lepila se odrežejo bolje od PRF, čeprav dokončno sklenitev glede slednjega se lahko doseže le, ko se spremeni pH. Nemodificiran les (smreka) pokaže boljše rezultate, kot toplotno obdelan les, zlasti pri uporabi voodopornih lepil. Nizek pH (PRF) in slaba omočitev površine (PRF in MUF) toplotno obdelanega lesa se smatrata, kot glavna razloga za te razlike (Šernek in sod., 2008). Pri proučevanju trdnosti lepilnih spojev MUF, PUR in FRF pri lepljenju termično modificirane in nemodificirane smreke je bilo ugotovljeno, da je bilo lepljenje z FRF lepilom problematično, ki se je zaradi kisle površine modificiranega lesa počasneje in nepopolno utrdilo. Termična modifikacija ni bistveno vplivala na trdnost PUR lepilnih spojev, medtem ko je trdnost MUF lepilnih spojev suhih preskušancev sicer padala s stopnjo modifikacije, vendar je bilo to povezano z zmanjšanjem trdnosti modificiranega lesa, saj je lom vedno potekal po lesu (Šernek in sod., 2008).

Za UF in melamin-formaldehidna (MF) lepila, ki utrjujejo v kislem mediju (Pizzi, 1983), povečana kislost modificiranega lesa ne pomeni problema, medtem ko lahko kisla površina povsem zaustavi reakcijo utrjevanja fenol-formaldehidnega (FF) lepila vrste resol, ki utrjuje v alkalnem mediju (Kariž in Šernek, 2008).

Težavno je lahko predvsem lepljenje z lepili na vodni osnovi. Termično modificiran les lahko kvalitetno zlepimo s PVAc lepili, vendar moramo zmanjšati delež vode (Militz, 2002; Mayes in Oksanen, 2003) ali pa podaljšati čas stiskanja (Jämsä in Viitaniemi, 2001), saj je higroskopsnost modificiranega lesa zmanjšana, zato slabše in počasneje sprejema vodo iz lepilnega spoja. Pri hidrofobnih tipih lepil pa naj bi se lepljenje po termični modifikaciji celo izboljšalo, saj je modificiran les bolj hidrofoben, kar omogoča boljšo omočitev s to vrsto lepil (Follrich in sod., 2006).

2.3.2 Parametri lepljenja

Izboljšanje dimenzijske stabilnosti termično obdelanega lesa izboljšuje lastnosti lepilnega spoja, saj se zmanjšajo negativni vplivi krčenja in nabrekanja. Vendar pa je toplotno obdelan les manj higroskopen (Boonstra, 2007; Paul 2007), površina pa manj polarna in s tem bolj hidrofobna, zato les odbija vodo (Gérardin in sod., 2007). Hidrofobnost lesa, ki je

sicer zaželena pri zunanji uporabi lesa, lahko torej povzroča težave pri lepljenju (Militz, 2002), med drugim tudi zato, ker se zmanjša sposobnost omočitve površine lesa (Gerardin in sod., 2007).

Ker toplotna obdelava zmanjša pH vrednost lesa (Boonstra in sod., 2007), to lahko vpliva na utrjevanje lepila. Pri UF lepilu nižja pH vrednost lesne površine pospeši kemijske reakcije kislega katalizatorja, medtem ko ovira utrjevanje FF lepila v alkalnem mediju (Šernek, 2008).

Termično modificiran bor po nemškem postopku, ki se med postopkom navzame večje količine olja, pa se dobro lepi samo s spremenjeno strukturo lepil (Rapp in Sailer, 2001).

2.3.3 Trdnost termično modificiranih spojev

Študija je pokazala, da je strižna trdnost in delaminacija preizkušancev iz termično modificiranega lesa odvisna od lepila, ki se uporablja za lepljenje. V večini primerov se je PUR in MUF lepilo odrezalo podobno ali bolje od PRF lepil. V zvezi z zahtevami za lepljene lameliranega lesa (strižna trdnost in delaminacija), PUR lepilo zadosti zahtevam za lepljenje smreke (neobdelane in v celoti toplotno obdelane) in toplotno obdelane topolovine; MUF lepilni spoj je zadovoljiv pri termično neobdelanih in hidrotermično obdelanih vzorcih smreke in v primeru toplotno obdelanega topola; pri čemer je samo neobdelana in hidrotermična obdelana smrekovina lepljena z PRF zadovoljila zahtevam.

V primeru smreke se strižna trdnost preizkušancev lepljenih z vodoodpornim MUF in PRF zmanjšuje s stopnjo toplotne obdelave (pol ali v celoti obdelan), vendar to ne vpliva na strižno trdnost PUR lepilnih spojev. Delaminacija pri PRF spojih se drastično zmanjša v primeru vseh toplotno obdelanih vzorcev, pri MUF in PUR lepili pa je bila delaminacija zelo visoka, med tem ko je bila pri termično modificiranih preizkušancih iz duglazije in breze še vedno znatna (Šernek in sod., 2008).

Delež trdnosti lepilnega spoja modificiranih vzorcev se giblje med 66 in 95 % trdnosti lepilnega spoja nemodificiranih vzorcev. Dobra trdnost lepilnega spoja je dosežena, če uporabimo lepilo z bazičnimi lastnostmi, ki v kombinaciji s kisljo površino termično obdelanega lesa doseže pozitivni učinek kvalitete lepljenja (Patzelt in sod., 2002).

Primerna lepila za lepljenje tega materiala so RF, PU in druga dvokomponentna lepila. Pri lepljenju je zaradi krhkosti materiala potrebno uporabljati nižje tlake (Lesar, 2005).

Zaradi nižjih strižnih trdnosti se je pokazalo, da pride hitreje do porušitve lepilnega spoja (Hribar, 2008).

Lepljenje termično modificiranega lesa s PUR in FRF lepili je dajalo 30-50 % nižjo trdnost kot lepljenje netretiranega lesa. Nižja trdnost spoja je lahko posledica nižje trdnosti lesa samega, saj je večina lomov potekala po lesu. Vzrok za slabše rezultate tretiranega lesa naj bi bila tudi nižja gostota in polarne skupine na površini lesa (Poncsák in sod., 2007). Dejstvo je tudi, da PUR lepila za utrjevanje potrebujejo vodo, ki pa je termično modificiran les vsebuje manj zaradi nižje ravnovesne vlažnosti (Mayes in Oksanen, 2003). Prav tako je od vode v lesu odvisno utrjevanje PMDI lepil. Izocianat v lepilu močno reagira z vodo ali pa se veže na les z reakcijo izocianata in OH skupin lesa in tvori direktne kovalentne vezi med lesom in lepilom. Kvalitetno utrjevanje teh lepil je zato zelo odvisno od ustrezne vlažnosti lesa (He in Yan, 2005; He in Yan, 2007).

3 MATERIAL IN METODE

Smrekovino smo modificirali pri različnih temperaturah in izmerili izgubo lesne mase. Na podlagi le-te smo zlepili pare lamel z urea-formaldehidnim in fenol-formaldehidnim lepilom. Izžagali smo vzorce in jih po treh različnih postopkih pripravili za testiranje. Poleg strižne trdnosti lepilnega spoja, smo določili še delež loma po lesu.

3.1 MATERIALI

3.1.1 Uporabljeni lesni vzorci

3.1.1.1 Nemodificirani vzorci lesa

Za testiranje smo uporabili smrekov les. Da bi imeli vzorci čim bolj podobne lastnosti, so bile vse lamele izžagane iz istega drevesa. Lamele so bile pravilno orientirane, bile so brez grč, razpok in ostalih napak.

3.1.1.2 Modificirani vzorci lesa

Pri raziskavi smo uporabili termično modificiran les, ki smo ga modificirali v vakuumski tlačni komori (*opisani v poglavju 3.1.3*). Dimenzija lamel pri modifikaciji je bila $410 \times 95 \times 20$ mm. Vzorci so bili izžagani iz lamel po navodilih standarda za testiranje kakovosti zlepljenosti masivnih lesnih plošč SIST – TS CEN/TS 13354:2004. Modifikacija je potekala pri petih različnih temperaturah, in sicer pri 160 °C, 180 °C, 190 °C, 200 °C in 210 °C. Določeni temperaturi modifikacije je bil les izpostavljen 3 ure, kasneje pa je v komori ostal do ohladitve.

3.1.2 Uporabljeno lepilo

3.1.2.1 Urea-formaldehidno lepilo

Pri lepljenju smo uporabili urea-formaldehidno lepilo proizvajalca Nafta Lendava. V spodnji Preglednica 1 so navedene karakteristike za lepilo Lendur 200, ki jih navaja proizvajalec.

Preglednica 1: Fizikalno-kemijske lastnosti lepila L – 200

Lastnost	Enota	Predpisana vrednost	Metoda
suha snov	mm/mm (%)	64 ± 1	KP PET UF-13
viskoznost po Höpplerju	mPa.s	600–1000	KP PET 03B
vsebnost prostega formaldehida	mm/mm (%)	max. 1,5	KP PET UF-20A
gostota	kg/m ³	1275–1290	KP PET UF-02
želiranje 100 °C	S	34 ± 7	KP PET UF-15
topnost v vodi		min. 1 : 2	KP PET UF-08A
pH vrednost		8.0–9.0	KP PET UF-05A
izgled		prosojna do mlečno bela, nehomogena tekočina	vizualno
barva		mlečno bela do svetlorjava	vizualno
vonj		po formaldehidu	organo – leptično

3.1.2.2 Fenol-formaldehidno lepilo

Uporabili smo fenol-formaldehidno lepilo proizvajalca Fenolit d. d. . Uporabili smo lepilo TIP A. Karakteristike za lepilo so navadne v spodnji tabeli (*Preglednica 2*).

Preglednica 2: Fizikalno kemijske lastnosti lepila TIP A

Lastnost	Enota	Vrednost
vsebnost suhe snovi	%	46,7
B-čas 120 °C	s	105
redčljivost z vodo		OK
vsebnost NaOH	%	6,4
iztočni čas 20 °C, Φ 4	s	94
čas želiranja 100 °C	min : s	24 : 45
prosti fenol	%	0,02
prosti formaldehid	%	0,3
čas skladiščenja 20 °C		najmanj 30 dni

3.1.3 Vakuumska tlačna komora

Za termično modifikacijo v vakuumu smo uporabili vakuumsko tlačno komoro proizvajalca Kambič (*Preglednica 3*). Vakuumska komora je izdelana iz nerjavečega materiala. Notranji obod komore je ogrevan s posebnimi grelci velike površine, ki so pritrjeni na obod komore. Program delovanja in temperaturo nastavljamo na komandni plošči. Za vakuumiranje uporabljamo membransko vakuumsko črpalko. Na komandni plošči lahko spremljamo, kakšne so razmere v komori, in sicer temperaturo in tlak v komori ter temperaturo vzorcev lesa. Vse te podatke lahko tudi izpisujemo po izbranem časovnem intervalu na igličnem tiskalniku.

Preglednica 3: Podatki za vakuumsko tlačno komoro (Lesar, 2005)

Tehnični podatki	
Priključna moč	2000 W
Grelci	210, 270 in 1025 W
Temperaturno območje	5 °C nad sobno temperaturo, do 200 °C
Tlak	0,030 -10 barov
Vakuumska črpalka	MZ 2C; Vacuubrand
Dimenzije komore	
Premer	210 mm
Globina	600 mm
Prostornina	0,021 m ³
Kontrolna in merilna oprema	
Temperaturni regulator	DIGITERM
Temperaturna sonda	Pt 100
Elektronski senzor tlaka	ECO-TRONIC -1 do + 15 barov

3.1.4 Stiskalnica

Uporabili smo hidravlično stiskalnico Oddelka za lesarstvo, Katedra za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin. Stiskalnica je proizvedena v podjetju Javor.

3.1.5 Klimatska komora

Les smo sušili in kondicionirali v klimatski komori proizvajalca Heraeus vötsch. Komora je postavljena v laboratoriju Katedra za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin. Izdelana je bila leta 1985, tipska oznaka pa je LT 5.

3.1.6 Univerzalni stroj za testiranje

Vzorci smo testirali na univerzalnem stroju za testiranje ZWICK/Z100. Stroj je povezan z računalnikom in nam podatke samodejno izpisuje na monitorju računalnika. Prav tako se preko računalnika uravnavajo vse nastavitve stroja za testiranja glede na to, kakšne pogoje pri testiranju določa standard.

3.2 METODE

3.2.1 Priprava vzorcev za termično modifikacijo

3.2.1.1 Predpriprava

Vzorci lesa smo zaradi čim bolj podobnih lastnosti izžagali iz lamel, izžaganih iz istega smrekovega (*Picea abies* Karst.) hloda. Na poravnalnem skobeljnem stroju smo jih poravnali, končne mere $410 \times 95 \times 20$ mm pa smo dosegli z debelinskim skobeljnim strojem in krojenjem na krožnem žgalnem stroju.

3.2.1.2 Sušenje

Lamele smo v laboratorijskem sušilniku posušili v standardni klimi pri temperaturi 103 ± 2 °C. Vlažnost vzorcev smo preverjali po gravimetrični metodi. Ko se masa med posameznimi meritvami ni več spreminjala, smo lamele postavili v eksikator, da so se ohladili, nato pa jim izmerili absolutno suho maso. Podatke smo upoštevali, ko smo ugotavljali izgubo mase lamel zaradi termične modifikacije.

3.2.2 Termična modifikacija vzorcev

Določili smo 5 temperatur modifikacije: 160 °C, 180 °C, 190 °C, 200 °C in 210 °C. Posušene lesene lamele smo razdelili v 6 skupin, pri čemer je bila ena skupina testna in je nismo termično modificirali (T0). Lamele smo nepredušno zaprli v plastične vreče, da se med čakanjem na modifikacijo ne bi ponovno navlažile.

Dimenzije lamel so bile podrejene dimenzijam vakuumске tlačne komore za termično modifikacijo. Naenkrat smo lahko v komoro vstavili 6 lamel in dodali T0 lamelo, v katero smo vstavili temperaturno sondo Pt100, ki je omogočala spremljanje temperaturnih sprememb v lesu med modifikacijo. Testni vzorec je bil enakega preseka kot ostale lamele.

Da se na lamele ne bi odlagala kondenz in nečistoče, smo jih, preden smo jih vstavili v komoro, zavili v aluminijasto folijo.

Pogoji v komori so se nam izpisovali na računalniškem monitorju, ki je bil preko tipal povezan s komoro. Naprava omogoča tudi tiskanje podatkov o času in temperaturi v komori, temperaturi v notranjosti lesnega vzorca ter o tlaku v komori.

Postopek modifikacije je potekal v treh fazah:

1. segrevanje,
2. modifikacija pri stalni temperaturi in vakuumu,
3. ohlajanje.

Lesene preizkušance smo postavili v komoro s sobno klimo pri začetni temperaturi 22 °C. Faza segrevanja se prične, ko v komori vključimo grelce, in se konča, ko notranjost lesenih

lamel doseže želeno temperaturo modifikacije. V našem primeru je faza segrevanja v povprečju trajala 92 min. V začetni fazi segrevanja se je izvajalo tudi vakuumsko črpanje zraka iz komore. Maksimalen vakuum, ki smo ga izmerili, je znašal 0,940 bara.

Faza modifikacije pri določenih temperaturah 160 °C, 180 °C, 190 °C, 200 °C in 210 °C je trajala 3 ure. Med modifikacijo smo morali paziti, da je temperatura v notranjosti vzorcev ostajala konstantna, kar smo uravnavali z dviganjem in spuščanjem temperature zraka v komori in z izsesavanjem zraka. Do spremembe temperature med samo modifikacijo prihaja zaradi izhajanja ekstraktivov in par iz lesa. Sprememba lastnosti zraka pa spreminja tudi termično prevodnost zraka, kar vpliva na temperaturo vzorcev.

Faza postopnega ohlajanja lamel poteka tako, da izklopimo grelce v komori. Da se nam les ne bi navzel atmosferskega zraka in plinov, smo po koncu modifikacije še enkrat vključili vakuumsko črpalko. Faza postopnega ohlajanja je trajala do 24 ur.

Na vzorcih, ki so bili modificirani, se je pojavila različna obarvanost v vzdolžni smeri lamele. Posebej izrazit je bil pojav pri lamelah, modificiranih pri višjih temperaturah, kjer je lahko bila lamela na sredini črno ožgana (*Slika 2- na desni*) med tem ko je bila na koncih svetlo rjava do bela.



Slika 2: Obarvanje vzorcev kot posledica modifikacije

Ker je tudi sprememba barve eden od indikatorjev stopnje termične modifikacije, smo na izžagane vzorce z zaporednimi črkami označili lego v lameli. Takšna označitev nam daje možnost proučevati lastnosti vzorcev glede na lego v lameli (*Slika 3*).



Slika 3: Vzorec za strižni preskus

3.2.3 Določanje izgube mase termično modificiranih vzorcev

Lamele smo po končanem postopku termične modifikacije v laboratorijskem sušilniku posušili do absolutno suhega stanja. Absolutno suho stanje smo preverili po gravimetričnem postopku. Nato smo jih vstavili še v eksikator in jih ponovno stehali na laboratorijski tehtnici.

Odstotek izgube mase smo izračunali po enačbi (1):

$$m_{izg} = \frac{m_{mod}}{m_0} \cdot 100\% \quad \dots (1)$$

m_{izg} = izguba lesne mase pri termični modifikaciji lesa (%)

m_{mod} = masa termično modificiranega lesa (g)

m_0 = masa absolutno suhega lesa pred modifikacijo (g)

3.2.4 Lepljenje lamel

3.2.4.1 Priprava za lepljenje

Lamele smo poskobljali, da smo odstranili morebitne deformacije zaradi termične modifikacije. Nato smo jih navlažili, da bi zadostili kriterijem za lepljenje glede vlažnosti lesa. Vzorce smo navlažili na 6 do 8 % vlažnost. Povprečna vlažnost lamel, ki smo jih lepili, je znašala 7,56 %.

3.2.4.2 Lepljenje

Lamele smo lepili v stiskalnici proizvajalca Javor. Pri obeh lepilih smo določili nanos 180 g/m^2 , in sicer z ročnim valjčkom. Količino lepila za naš primer pa smo izračunali na podlagi nanosa in površine lamel.

$$S_{lamel} = 0,41m \cdot 0,095m = 0,039m^2 \quad \dots (2)$$

$$m_{lepila} = 180g / m^2 \cdot 0,039m^2 = 7,2g \quad \dots (3)$$

S_{lamel} = je površina lamele (m^2)

m_{lepila} = je masa lepila, ki smo ga nanесли na lamelo (g)

Tlak stiskanja je v obeh primerih znašala $P_{\text{spec}} = 1,2 \text{ MPa}$.

$$S_{2x} = S_{\text{lamel}} \cdot 2 = 0,039\text{m}^2 \cdot 2 = 0,078\text{m}^2 \quad \dots (4)$$

$$S_{\text{bata}} = \frac{\pi \cdot R^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,159\text{m})^2}{4} = 0,0198\text{m}^2 \quad \dots (5)$$

$$P_{\text{specif}} \cdot S_{2x} = P_{\text{stisk}} \cdot S_{\text{bata}} \quad \dots (6)$$

$$P_{\text{stisk}} = P_{\text{specif}} \cdot \frac{S_{2x}}{S_{\text{bata}}} = 1,2\text{MPa} \cdot \frac{0,078}{0,0198} = 4,73\text{MPa} \approx 5\text{MPa}(50\text{bar}) \quad \dots (7)$$

S_{2x} = površina obeh lamel, ki sta istočasno v stiskalnici (m^2)

S_{bata} = površina bata stiskalnice (m^2)

F_{pecif} = specifična sila (N)

F_{stisk} = sila stiskalnice (N)

F_{bata} = sila bata (N)

Po končanem lepljenju smo lamele zavili v plastične vreče, da bi ne prihajalo do dodatne navlažitve in jih pustili mirovati do ohlaiditve ter dokončne utrditve spoja.

3.2.4.3 Lepljenje lamel s FF lepilom

FF lepilo TIPA A je enokomponentno in kot tako že pripravljeno na uporabo. Lamele smo lepili po vročem postopku. Temperatura na ploščah stiskalnice je znašala 180°C . Potreben čas lepljenja je 45 minut, pri čemer je potrebno upoštevati, da je temperatura, pri kateri začne lepilo utrjevati, 100°C . Če temperatura v spoju po 30 minutah še vedno ni dosegla temperature utrjevanja 100°C , smo dvignili temperaturo na ploščah ali podaljšali čas lepljenja. Zgornja temperatura, ki jo sme doseči spoj, je 130°C . Temperaturo v spoju smo odčitavali s pomočjo temperaturne sonde, ki smo jo vstavili v spoj.

3.2.4.4 Lepljenje lamel z UF lepilom

Pred lepljenjem smo stehali 30 g lepila in izračunali potrebno količino utrjevalca, ki smo ga dodali lepilu.

$$30g_{\text{lepila}} \dots\dots\dots 100_{\text{enot}}$$

$$Xg_{\text{utrjevalca}} \dots\dots\dots 1_{\text{enota}}$$

$$Xg_{\text{utrjevalca}} = \frac{30g_{\text{lepila}} \cdot 1_{\text{enota}}}{100_{\text{enot}}} = 0,3g_{\text{utrjevalca}} \quad \dots (8)$$

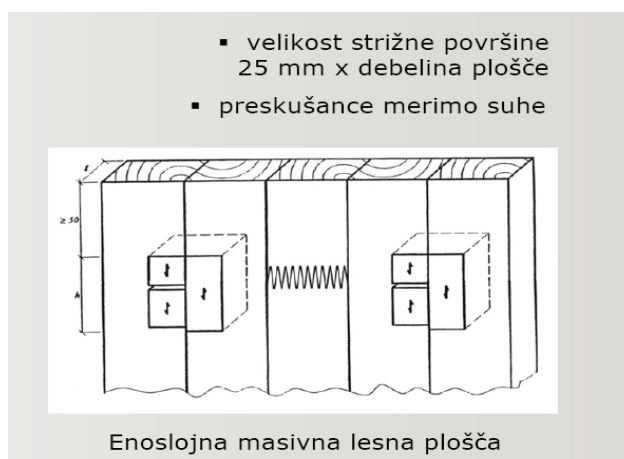
Lepilo in utrjevalec smo dobro premešali; tako pripravljeno mešanico pa smo z ročnim valjčkom nanašali na pripravljene lamele. Lepili smo po vročem postopku, pri čemer je temperatura na ploščah stiskalnice znašala 160 °C, v spoju pa največ do 110 °C. Tudi pri UF lepilu smo parametre lepljenja uravnavali s podaljševanjem časa lepljenja in dviganjem temperature plošč stiskalnice. Potreben čas lepljenja je znašal 30 minut.

3.2.5 Priprava vzorcev za testiranje po standardu CEN/TS 13354:2004

3.2.5.1 Izžagovanje vzorcev iz lamel

Standard CEN/TS13354:2004 določa preskusne metode za določanje kakovosti zlepljenosti za masivne plošče.

Iz lamel smo narezali preizkušance dolžine 50 mm, kot narekuje standard. Vanje smo zažagali dve prečni zarez, ki sta segali do zlepljenega dela (*Slika 4*), in sta bili debeli za širino žaginega lista (3 mm).



Slika 4: Lega preizkušenca v lameli (Šega, 2004)

Na vzorce smo zapisali označbe, ki so nam pojasnile, s kakim lepilom je bil vzorec zlepljen, pri kateri temperaturi je bil termično modificiran, iz katerih dveh lamel je sestavljen in kje v zlepljeni lameli se je nahajal. Tako smo vzpostavili sledljivost vzorcev glede na vse lastnosti vzorca in postopke predhodne obdelave.

3.2.5.2 Priprava za testiranje

Vzorce smo izpostavili pogojem, ki jih narekuje standard za suhe in vlažne pogoje, pripravili pa smo še vzorce, ki so bili izpostavljeni standardni klimi.

Prva skupina vzorcev je bila v eksikatorju izpostavljena standardni klimi s 65 % zračne vlažnosti pri temperaturi zraka 20 °C. Standard predpisuje, da za izdelke, ki so namenjeni notranji uporabi pri suhi klimi, preizkušance 24 ur namakamo v hladni vodi z 20 °C. Preizkušanci za izdelke, ki so namenjeni notranji uporabi pri vlažni klimi, so 6 ur izpostavljeni vreli vodi (Slika 5), nato pa se najmanj 1 uro ohlajajo v hladni vodi pri 20 °C.



Slika 5: Kuhanje preizkušancev v laboratorijski posodi za kuhanje vzorcev

3.2.6 Testiranje

Vzorci smo testirali na univerzalni laboratorijski napravi za testiranje ZWICK/Z100 po standardu SIST TS CEN/TS 13354:2004. Z namenom zadovoljitve zahtevam standarda, preizkušance tlačno-strižno obremenimo in merimo silo, pri kateri pride do loma. Do loma mora priti pri 60 ± 30 s. Podatke nam beleži računalnik, na katerega je naprava priključena.

3.2.7 Strižna trdnost lepilnega spoja

Strižno trdnost lepilnega spoja smo izračunali po naslednji formuli:

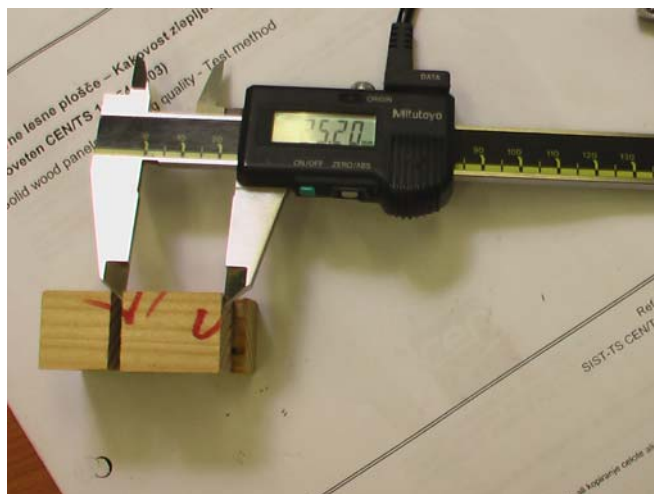
$$\text{Trdnost} = F_{\max} \cdot S_{\text{loma}} \quad \dots (9)$$

$F_{\max}$ = maksimalna sila pri lomu vzorca (N)

S_{loma} = površina loma (mm^2)

Površino loma smo izmerili s kljunastim merilom (Slika 6).

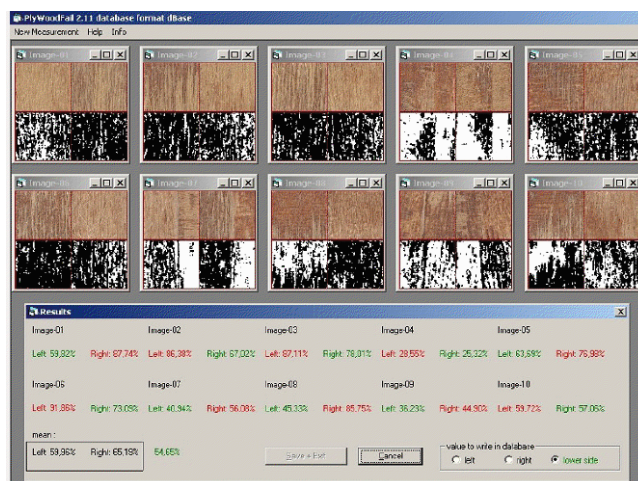
Izmerili smo po dve dolžini; po eno na vsaki strani vzorca, in sicer na dve decimalki natančno, iz njih pa potem izračunali povprečno dolžino vzorca. Širino vzorca smo merili samo enkrat, in sicer po pravilih za merjenje – pod kotom 45° glede na osnovno ploskev. Iz dobljenih podatkov smo izračunali površino.



Slika 6: Merjenje vzorcev

3.2.8 Ocenjevanje loma po lesu

Po tem, ko smo vzorce tlačno-strižno obremenili do porušitve, smo nekatere (po potrebi) na mestu lepilnega spoja dodatno razslojil z dletom. Ugotavljali smo, koliko odstotkov loma v delu lepilnega spoja je potekalo po lesu in koliko po lepilu. Pri ocenjevanju odstotka loma po lesu smo si pomagali s ploščico, na kateri so prikazani primeri za različne odstotke loma po lesu (Slika 7).



Slika 7: Ugotavljanja loma po lesu z računalniškim programom PlyWoodFail (Šega 2006)

4 REZULTATI

4.1 POGOJI LEPLJENJA

4.1.1 Vlažnost lamel pred lepljenjem

Lamele smo po modifikaciji ponovno osušili na absolutno suho stanje. Določili smo maso absolutno suhih vzorcev po modifikaciji in iz njih izračunali podatke o izgubi lesne mase med modifikacijo v odstotkih.

Da smo zadostili optimalnim pogojem lepljenja s FF in UF lepilom, smo morali lamele ponovno navlažiti med 6 in 8 % lesne vlažnosti.

Vlažnost lamel je bila v povprečju 7,56 %, pri čemer pa so višjo vlažnost dosegale lamele, ki so bile nemodificirane ali modificirane pri nižji temperaturi (*Preglednica 4*).

Preglednica 4: Povprečna vlažnost lamel, pred lepljenjem, za posamezno vrsto lepila

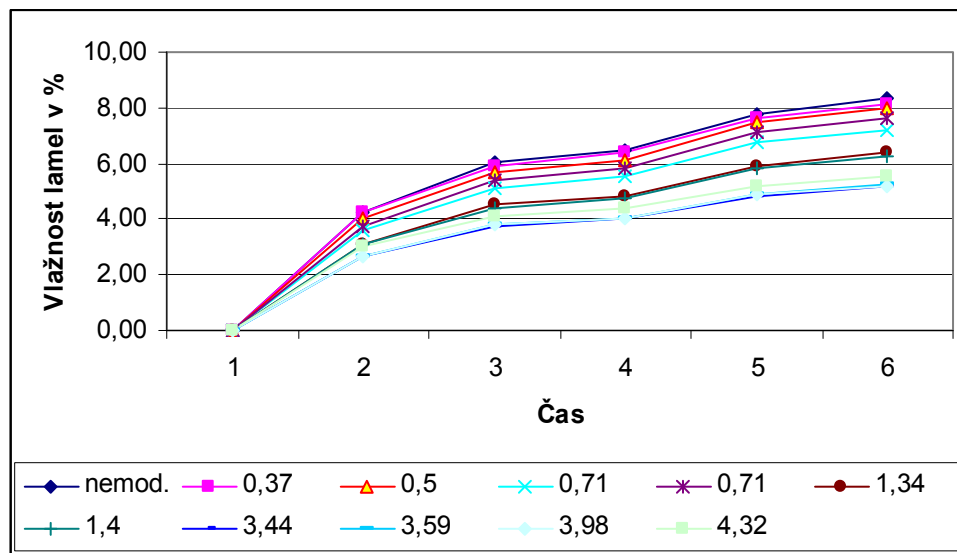
Temperatura modifikacije (°C)	Vlažnost lesa pred lepljenjem s FF lepilom (%)	Vlažnost lesa pred lepljenjem z UF lepilom (%)
nemodificiran les	7,76	7,66
160	7,85	7,79
180	7,60	7,60
190	7,85	7,75
200	7,55	7,33
210	6,93	7,12

Najnižja izguba lesne mase modificiranega lesa znaša 0,37 % pri temperaturi 160 °C, najvišja izguba lesne mase modificiranega lesa pa znaša 4,32 %, ki je bil modificirana pri temperaturi 210 °C (*Preglednica 5*).

Preglednica 5: Hitrost navlažitve lamel pred lepljenjem glede na izgubo lesne mase

Izguba mase	Temperatura modifikacije (°C)	9. 2. 2007	16. 2. 2007	21. 2. 2007	23. 2. 2007	2. 3. 2007	6. 3. 2007
		Vlažnost lamel v %					
Nemodificiran les		0,00	4,22	6,06	6,48	7,76	8,32
0,37	160	0,00	4,26	5,92	6,39	7,62	8,12
0,50	190	0,00	4,04	5,71	6,13	7,46	7,97
0,71	160	0,00	3,59	5,11	5,53	6,76	7,22
0,71	190	0,00	3,77	5,39	5,82	7,10	7,59
1,34	180	0,00	3,11	4,51	4,85	5,91	6,40
1,40	180	0,00	3,10	4,42	4,77	5,81	6,23
3,44	200	0,00	2,67	3,76	4,02	4,84	5,16
3,59	200	0,00	2,66	3,78	4,05	4,92	5,22
3,98	210	0,00	2,69	3,78	4,04	4,90	5,20
4,32	210	0,00	2,99	4,13	4,41	5,20	5,55

Navlažitev je potekala z različno intenzivnostjo, počasneje so se vlažile lamele, ki so med termično modifikacijo izgubile več lesne mase (*Slika 8*).

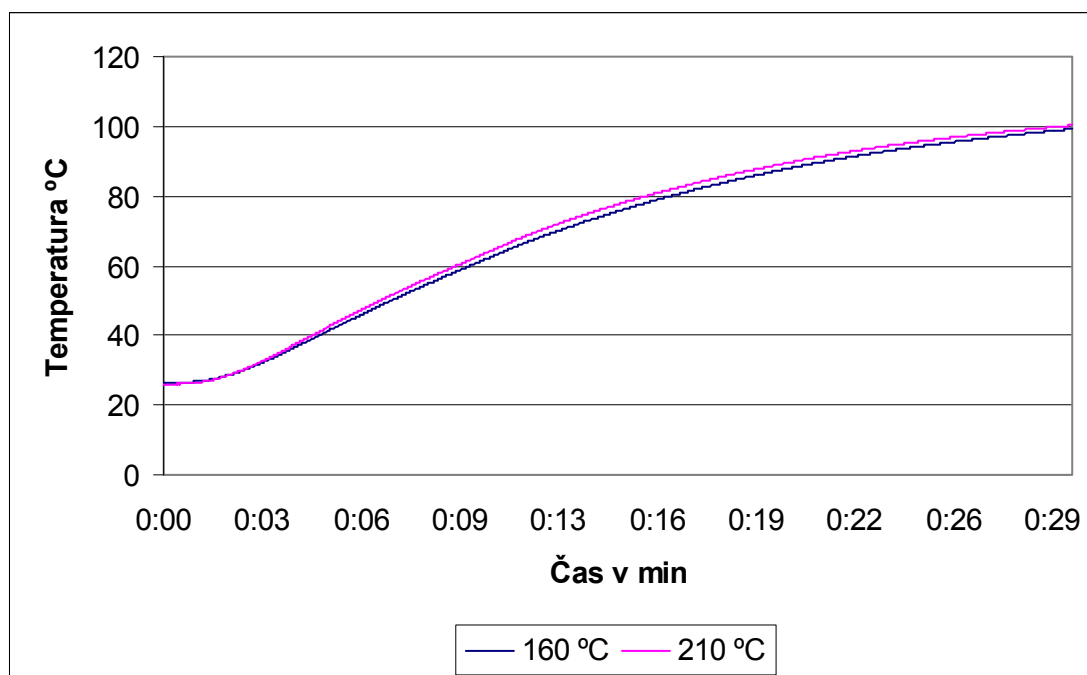


Slika 8: Hitrost navlažitve lamel

4.1.2 Temperatura v spoju

Da smo lahko spremljali temperaturo v lepilnem spoju, smo v spoj vstavili elektronsko tipalo. Iz podatkov, ki smo jih pridobili, smo lahko spremljali spremembo temperature v spoju.

Temperatura v spoju lamel, ki so bile termično modificirane pri temperaturi 210 °C, je dosegala nekoliko višje vrednosti kot temperatura v spoju lamel (*Slika 9*), termično modificiranih pri 160 °C, vendar razlika ni bila značilna.



Slika 9: Temperatura v spoju lamel

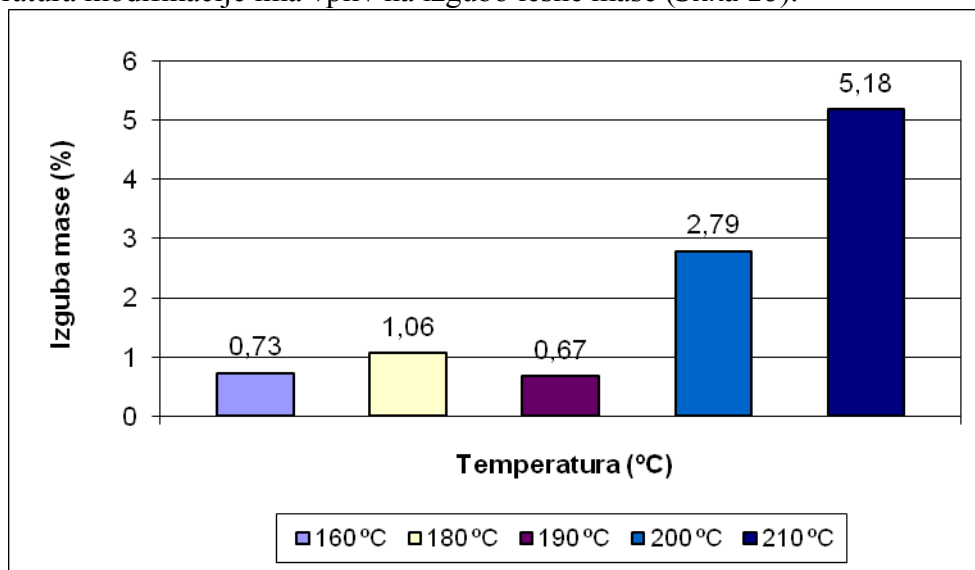
4.2 IZGUBA MASE GLEDE NA TEMPERATURO MODIFIKACIJE

Izgubo mase smo določili tako, da smo primerjali maso istega absolutno suhega vzorca pred in po termični modifikaciji. Povprečna izguba mase je prikazana v *Preglednica 6*.

Preglednica 6: Povprečna izguba lesne mase v odvisnosti od temperature modifikacije

Temperatura modifikacije [°C]	Povprečna izguba lesne mase [%]
Nemod.	0,00
160	0,82
180	1,06
190	0,67
200	2,79
210	5,18

Temperatura modifikacije ima vpliv na izgubo lesne mase (Slika 10).



Slika 10: Izguba lesne mase pri posameznih temperaturah modifikacije

Daleč največjo izgubo lesne mase lahko opazimo pri lamelah, modificiranih pri temperaturi 210 °C. Vendar pa je tudi izguba lesne mase lamel, modificiranih pri temperaturi 200 °C, precej višja od izgube mase lamel, modificiranih pri 160 °C, 180 °C in 190 °C.

4.3 LEPLJENJE LAMEL V PARE

Podatki v *Preglednici 7* prikazujejo povprečne izgube lesne mase za lamele, modificirane pri temperaturah 160 °C, 180 °C, 190 °C, 200 °C in 210 °C. Razlika v izgubi lesne mase med posameznimi lamelami, modificiranimi pri isti temperaturi, se je pojavila do take mere, da smo to morali upoštevati pri lepljenju lamel v pare.

Med seboj smo torej lepili lamele, modificirane pri isti temperaturi, s čim bolj podobno izgubo lesne mase.

4.4 REZULTATI PRI TESTIRANJU PO STANDARDU SIS – TS CEN/TS 13354:2004

4.4.1 Razporeditev vzorcev v skupine in poimenovanje skupin

Testne vzorce smo obravnavali glede na izgubo mase in ne glede na temperaturo modifikacije, saj (razvidno iz preglednic v prilogah) je taka delitev bolj smiselna.

Vzorci smo porazdelili v skupine glede na izgubo mase v odstotkih, uporabljeno lepilo in temperaturo modifikacije.

4.4.2 Rezultati vzorcev, ki so bili pred testiranjem izpostavljeni standardni klimi

Kot smo pričakovali, je strižna trdnost pri vzorcih, izpostavljenih standardni klimi, bistveno višja, kot pa pri ostalih dveh načinih priprave vzorcev na testiranje.

Med vzorci zlepljenimi s FF lepilom (*Preglednica 7*), je največjo povprečno strižno trdnost dosegla skupina modificirana pri 180 °C in sicer 10,20 N/mm², najmanj pa skupina modificirana pri 210 °C in sicer 7,43 N/mm².

Preglednica 7: Strižna trdnost za posamezne skupine preizkušancev lepljenih s FF lepilom in pred preizkušanjem izpostavljenih standardni klimi

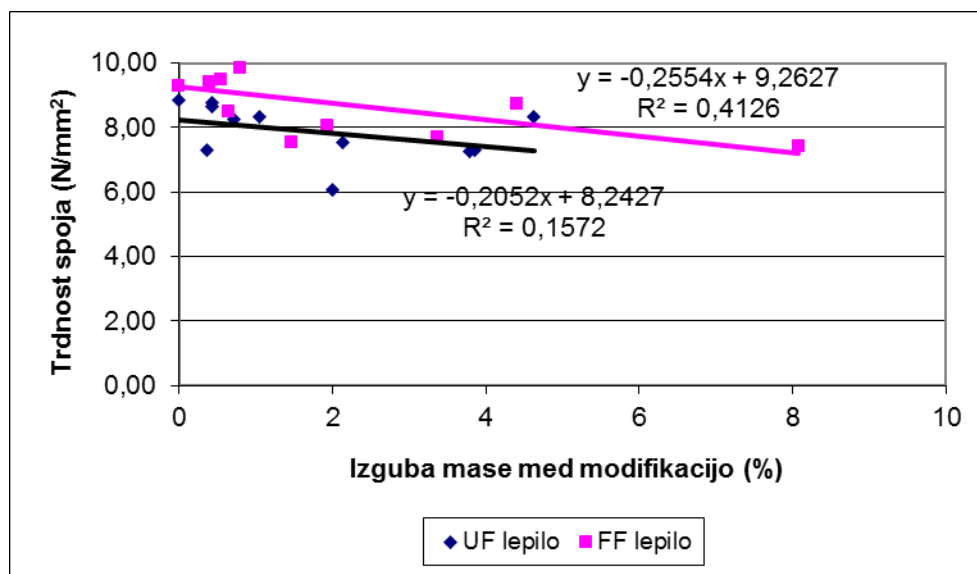
Temperatura modifikacije (°C)	Povprečna izguba mase (%)	Trdnost lepilnega spoja (N/mm ²)
0	0,00	9,30
160	0,40	9,40
180	0,49	10,20
190	0,55	9,49
160	0,64	8,50
190	0,80	9,84
180	1,46	7,55
200	1,93	8,06
200	3,37	7,71
210	4,41	8,74
210	8,08	7,43

Pri skupinah zlepljenih z UF lepilom, je največjo trdnost 8,84 N/mm² dosegla nemodificirana skupina, najmanjšo povprečno trdnost lepilnega spoja pa je dosegla skupina modificirana pri 200 °C 6,06 N/mm² (*Preglednica 8*).

Preglednica 8: Strižna trdnost za posamezne skupine preizkušancev lepljenih z UF lepilom in pred preizkušanjem izpostavljenih standardni klimi

Temperatura modifikacije (°C)	Povprečna izguba mase (%)	Trdnost lepilnega spoja (N/mm ²)
0	0,00	8,84
160	0,36	7,32
190	0,43	8,65
180	0,43	8,77
160	0,71	8,25
190	1,04	8,34
200	2,00	6,06
180	2,14	7,56
210	3,79	7,26
200	3,86	7,32
210	4,63	8,32

Iz grafa lahko razberemo, da trendni črti pri skupinah, lepljenih s FF in UF lepilom (*Slika 11*), padata glede izgubo lesne mase med modifikacijo.



Slika 11: Povprečna strižna trdnost za FF in UF lepilo pri standardni klimi

4.4.3 Rezultati vzorcev 24 ur potopljenih v hladni vodi

V tabeli (*Preglednica 9* in *Preglednica 10*) so navedeni rezultati testiranja trdnosti lepilnega spoja za vzorce, ki so bili po navodilih standarda za 24 ur namočeni v hladno vodo pri 20 °C. Rezultati so razvrščeni glede na izgubo lesne mase med termično modifikacijo.

Pri modificiranih vzorcih, ki so bili za 24 ur potopljeni v hladno vodo, se je strižna trdnost gibala med 4,16 in 6,29 N/mm². Najnižjo vrednost je dosegla skupina, modificirana pri 180 °C. Vrednosti vzorcev modificiranih pri tej temperaturi so na več mestih izstopali iz niza ostalih vrednosti.

Preglednica 9: Strižna trdnost za posamezne skupine lepljene s FF lepilom pri vzorcih, ki so bili za 24 ur potopljeni v hladno vodo

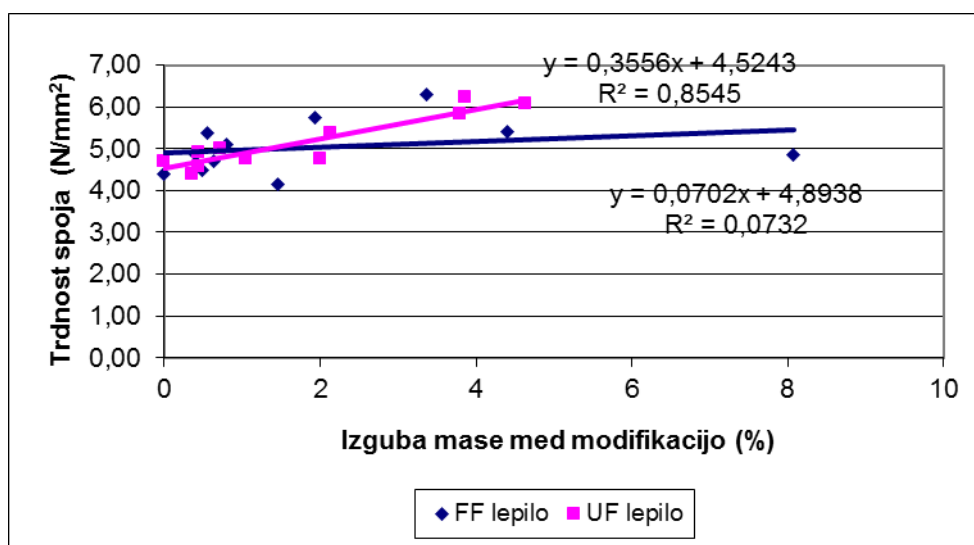
Temperatura modifikacije (°C)	Povprečna izguba mase (%)	Trdnost lepilnega spoja (N/mm ²)
0	0,00	4,41
160	0,4	4,85
180	0,49	4,50
190	0,55	5,37
160	0,64	4,69
190	0,80	5,10
180	1,46	4,16
200	1,93	5,75
200	3,37	6,29
210	4,41	5,42
210	8,08	4,84

Pri vzorcih lepljenih z UF lepilom je povprečna vrednost strižne trdnosti znašala 4,70 N/mm². Najvišjo vrednost je dosegla skupina modificirana pri 200 °C, znašala pa je 6,29 N/mm².

Preglednica 10: Strižna trdnost za posamezne skupine lepljene z UF lepilom pri vzorcih, ki so bili 24 ur potopljene v hladni vodi

Temperatura modifikacije (°C)	Povprečna izguba mase (%)	Trdnost lepilnega spoja (N/mm ²)
0	0,00	4,70
160	0,36	4,40
180	0,43	4,57
190	0,43	4,93
160	0,71	5,01
190	1,04	4,77
200	2,00	4,76
180	2,14	5,37
210	3,79	5,84
200	3,86	6,22
210	4,63	6,09

Na grafu smo primerjali skupine vzorcev, ki so bili zlepljeni z različnima lepiloma. Trendna črta za skupine, zlepljene z UF lepilom, z naraščanjem izgube mase med modifikacijo narašča bistveno hitreje kot pa trenda črta za FF lepilo (Slika 12).



Slika 12: Povprečna strižna trdnost za FF in UF lepilo pri vzorcih, ki so bili 24 ur potopljene v hladni vodi

4.4.4 Rezultati vzorcev, ki so bili 6 ur v vreli vodi

Vzorci so bili izpostavljeni 6-urnemu kuhanju v vreli vodi in pričakovano dosegali bistveno najnižje vrednosti (Preglednica 11 in Preglednica 12) od vzorcev, ki so bili izpostavljeni standardni klimi in vzorcev, ki so bili 24 ur namočeni v mrzlo vodo. Nižje vrednosti v tej skupini so dosegali vzorci, zlepljeni z ne-vodoodpornim UF lepilom. Že med samim kuhanjem in pred testiranjem je nekaj vzorcev razpadlo.

Preglednica 11: Strižna trdnost za posamezne skupine lepljene s FF lepilom pri vzorcih, ki so bili za 6 ur potopljene v vrelo vodo

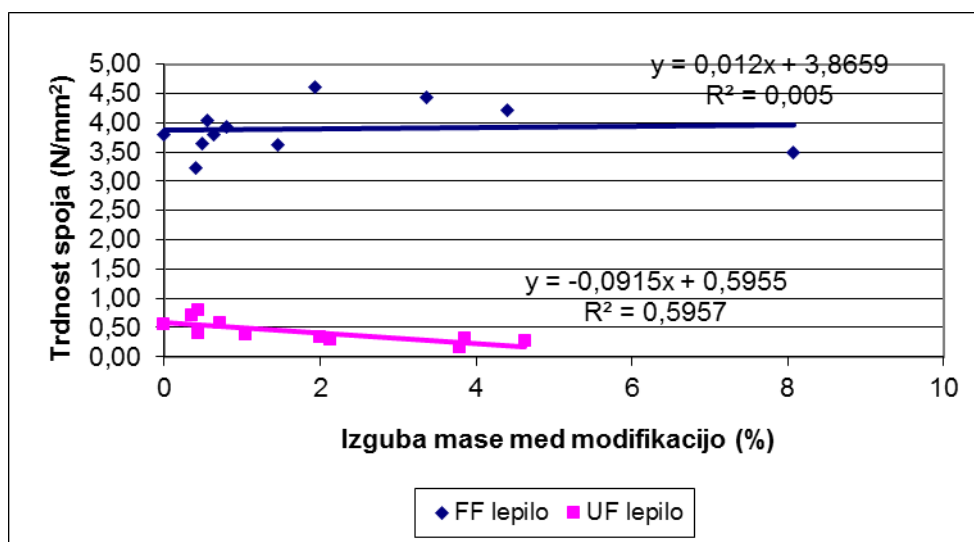
Temperatura modifikacije (°C)	Povprečna izguba mase (%)	Trdnost lepilnega spoja (N/mm ²)
0	0,00	3,80
160	0,4	3,22
180	0,49	3,63
190	0,55	4,03
160	0,64	3,79
190	0,8	3,94
180	1,46	3,62
200	1,93	4,62
200	3,37	4,43
210	4,41	4,21
210	8,08	3,50

Posebno nizke vrednosti so dosegale lamele, zlepljene z UF lepilom, ki je slabo odporno proti vlagi, in sicer so se gibale med 0,17 N/mm² in 0,79 N/mm². Povprečne vrednosti skupin lamel, zlepljenih z vodoodpornim FF lepilom, so dosegale vrednosti med 3,22 N/mm² in 4,62 N/mm².

Preglednica 12: Trdnost lepilnega spoja za posamezne skupine lepljene z UF lepilom pri vzorcih, ki so bili za 6 ur potopljene v vrelo vodo

Temperatura modifikacije (°C)	Povprečna izguba mase (%)	Trdnost lepilnega spoja (N/mm ²)
0	0,00	0,55
160	0,36	0,71
190	0,43	0,79
180	0,43	0,39
160	0,71	0,58
190	1,04	0,39
200	2,00	0,34
180	2,14	0,29
210	3,79	0,17
200	3,86	0,31
210	4,63	0,27

Čeprav se izmerjene vrednosti v primeru uporabe proti vlagi slabo odpornega UF lepila gibljejo zelo nizko, se vseeno (*Slika 13*) lepo pokaže upadanje trendne črte z naraščanjem izgube lesne mase, medtem ko pri skupinah, zlepljenih s FF lepilom, trendna črta z naraščanjem izgube lesne mase med modifikacijo rahlo naraste. Pri skupini, lepljeni s FF lepilom, opazimo še to, da so vrednosti na grafu precej razpršene.



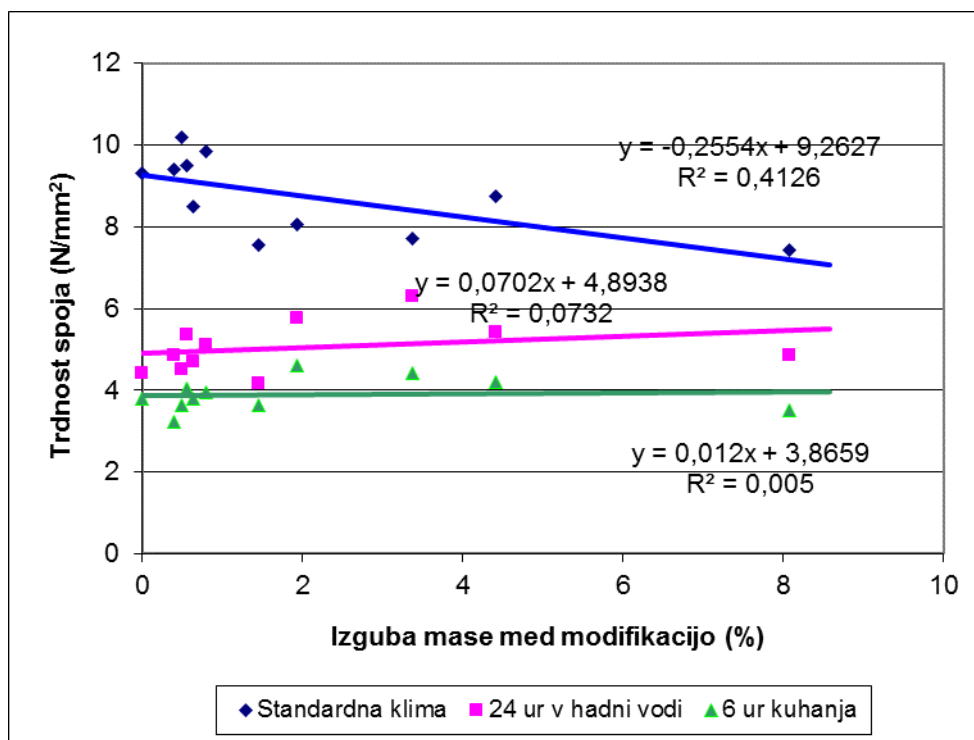
Slika 13: Povprečna strižna trdnost za FF in UF lepilo pri vzorcih, ki so bili za 6 ur potopljani v vrelo vodo

4.4.5 Rezultati in primerjave med vzorci izpostavljenimi različnim pogojem pred testiranjem

Kot narekuje standard, smo vzorce pred testiranjem pripravili na tri različne načine. Vsak izmed načinov priprave vzorcev je po standardu namenjen testiranju lastnosti spoja v določenih pogojih uporabe zlepljenega izdelka. Načini priprave vzorcev so opisani v poglavjih 3.2.5.1 in 3.2.5.2

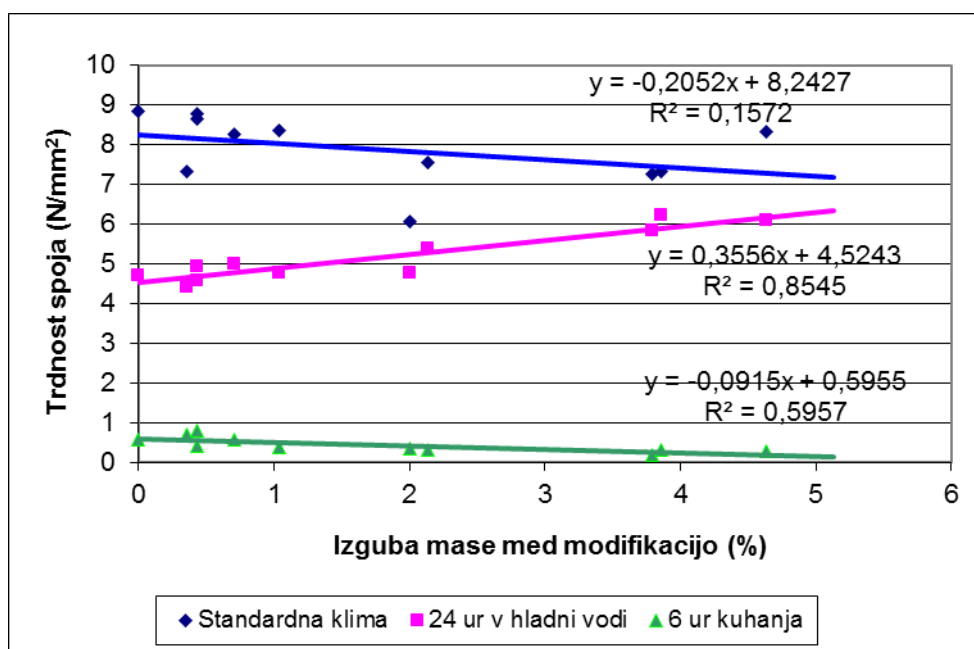
V tem poglavju smo skupaj prikazali rezultate vseh treh načinov priprave na testiranje.

Na grafu (Slika 14) vidimo skupine, lepljene s FF lepilom. Trendna črta za strižno trdnost glede na izgubo lesne mase, pada pri vzorcih, ki so bili pred testiranjem izpostavljeni standardni klimi, medtem ko pri ostalih dveh načinih priprave vzorcev na testiranje trendna črta rahlo naraste.



Slika 14: Povprečna strižna trdnost za FF lepilo in vse tri načine priprave

Na grafu (Slika 15) vidimo skupine vzorcev, zlepljene z UF lepilom, za vse tri načine priprave vzorcev pred lepljenjem. Trendna črta za strižno trdnost glede na izgubo lesne mase pada pri skupinah vzorcev, ki so bili izpostavljeni standardni klimi, in skupinah vzorcev, ki so bili izpostavljeni 6 uram kuhanja, narašča pa pri skupinah vzorcev, ki so bili za 24 ur potopljene v hladni vodi z 20 °C.

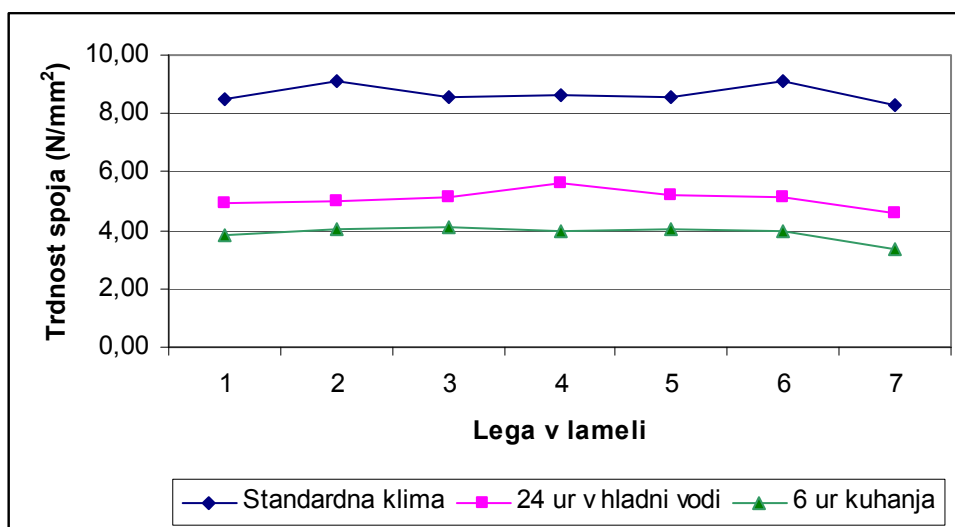


Slika 15: Povprečna strižna trdnost za UF lepilo in vse tri načine priprave

4.4.6 Rezultati in primerjava med vzorci glede na lego v lameli

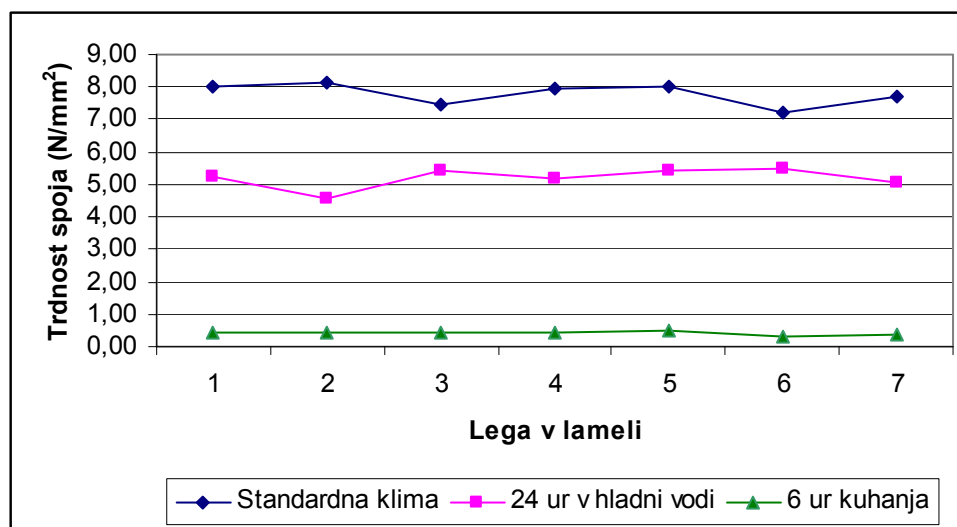
Lamela je bila razdeljena na 7 delov. Za vsako lego v lameli, ki smo jo na grafu prikazali s števili od 1 do 7, smo izračunali aritmetično sredino po logičnih sklopih, ki so pojasnjeni v poimenovanju grafov.

Na grafu (*Slika 16*) opazimo, da so povprečne vrednosti skupin v krajnih legah 1 in 7 najnižje, in sicer pri vseh treh načinih priprave na testiranje. Pojav je še posebej viden v točki 7. Pri vzorcih, ki so bili pred testiranjem izpostavljeni standardni klimi, se pojavi še povišana vrednost v obeh predzadnjih legah 2 in 6, medtem ko se pri vzorcih, za 24 ur izpostavljenim hladni vodi, zvišana vrednost pojavi na sredini v legi 4.



Slika 16: Strižna trdnost glede na lego v lameli za FF lepilo in vse tri načine priprave

Slika (*Slika 17*) na grafu strižne trdnosti skupin, lepljenih z UF lepilom glede na lego v lameli, je zelo drugačna od slike vzorcev, lepljenih z FF lepilom (*Slika 16*). Povprečne vrednosti skupin, ki so bile za 6 ur izpostavljene kuhanju, so v prvih 5 legah zelo podobne, v zadnjih dveh pa sta nekoliko nižji. Če primerjamo skupini, katerih lamele so bile izpostavljene standardni klimi, s skupino, katere vzorci so bili izpostavljeni 24-urnemu namakanju v hladni vodi, ugotovimo, da je obnašanje podobno v prvi legi, v vseh ostalih pa dobimo zrcalno sliko.



Slika 17: Strižna trdnost glede na lego v lameli za UF lepilo in vse tri načine priprave

4.5 DELEŽ LOMA PO LESU

Delež loma po lesu smo ugotavljali tako, da smo testirane strižne vzorce povsem razslojili z dletom in ugotavljali, kje je potekal lom. Rezultate testa smo podali v odstotkih (%) glede na velikost površine lesa ali lepila, kjer je potekal lom.

V preglednici (*Preglednica 13*) so prikazane povprečne vrednosti loma po lesu za vse skupine in za vse tri načine priprave lepljene z FF lepilom.

Preglednica 13: Delež loma po lesu za skupine lepljene s FF lepilom

Temperatura modifikacije (°C)	Povprečna izguba mase (%)	Delež loma po lesu (%)		
		Standardna klima	24 ur v vodi 20 °C	6 ur kuhanja
0	0,00	66	85	63
160	0,40	95	63	77
180	0,49	86	83	65
190	0,55	72	44	761
160	0,64	76	71	53
190	0,80	83	80	56
180	1,46	84	37	53
200	1,93	76	78	66
200	3,37	88	80	94
210	4,41	60	95	70
210	8,08	89	90	61

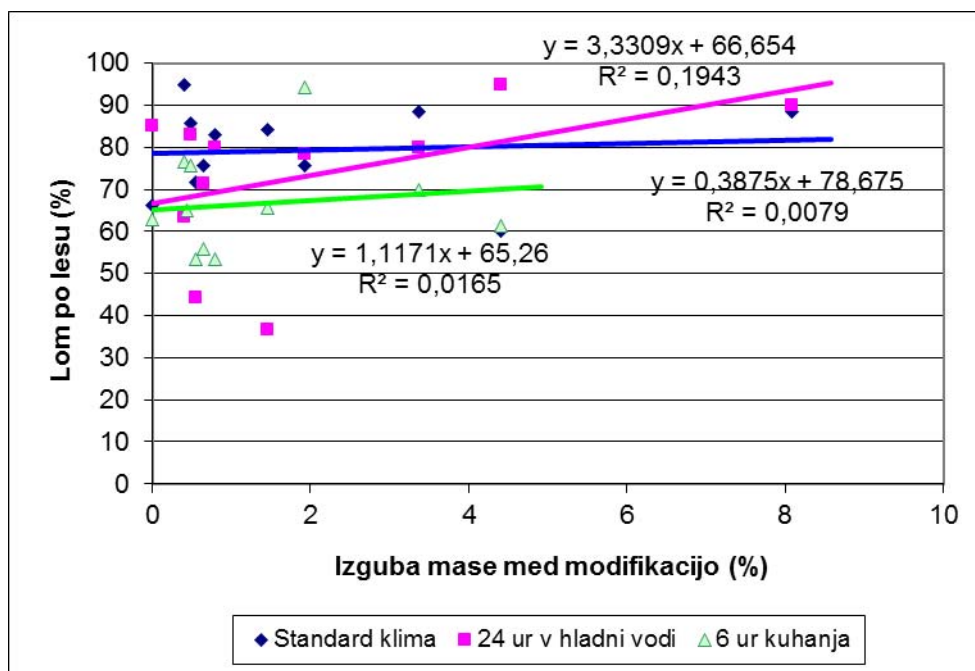
Pri vzorcih, ki so bili lepljeni z UF lepilom (*Preglednica 14*), so se vzorci razslojili po spoju pri vseh skupinah, razen pri nemodificirani skupini, ker se je pojavil delež loma po lesu manj kot 1 %. Vzorci, ki so bili pred testiranjem izpostavljeni standardni klimi, so

dosegali višji odstotek loma po lesu od teh, ki so bili za 24 ur potopljene v hladni vodi, ti pa višje od teh, ki so bili kuhani.

Preglednica 14: Lom po lesu za skupine lepljene z UF lepilom

Temperatura modifikacije (°C)	Izguba mase povprečna (%)	Standardna klima	Lom po lesu (%) 24 ur v vodi 20 °C	6 ur kuhanja
0,	0,00	79	69	1
160	0,36	58	82	0
190	0,43	73	66	0
180	0,43	86	77	0
160	0,71	92	80	0
190	1,04	80	70	0
200	2,00	96	83	0
180	2,14	100	68	0
210	3,79	99	99	0
200	3,86	997	90	0
210	4,63	100	96	0

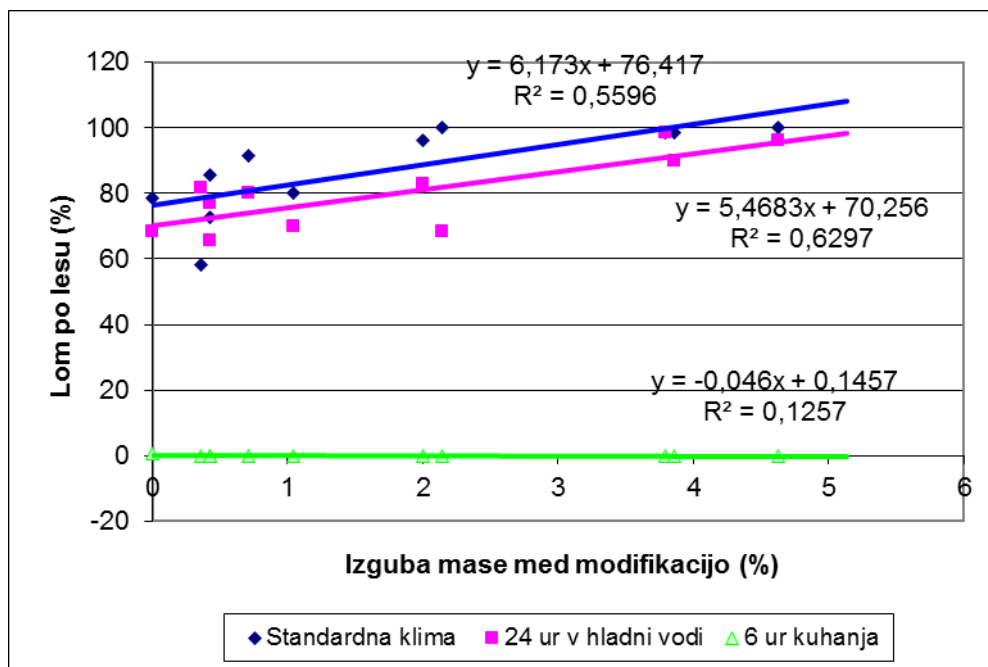
Pri vseh treh načinih priprave vzorcev opazimo, da lom po lesu narašča z naraščanjem izgube mase med modifikacijo (Slika 18). Trendna črta za skupine, katere vzorci so bili izpostavljeni standardni klimi, narašča blago, medtem ko trendna črta za vzorce, izpostavljene 6 uram kuhanja narašča hitreje; najhitreje narašča trendna črta za skupine vzorcev, ki so bili za 24 ur potopljene v hladno vodo z 20 °C. Slednja se na koncu pri izgubi mase 8,08 % povzpne proti 100 % loma po lesu.



Slika 18: Lom po lesu za FF lepilo in vse tri načine priprave

Trendni črti za skupine vzorcev, ki so bile pred testiranjem izpostavljene standardni klimi in za 24 ur namočeni v hladno vodo z 20 °C, naraščata skorajda identično, pri čemer je

trendna črta za skupine, ki so bile za 24 ur potopljene v hladno vodo, na grafu nekoliko nižje. Trendna črta skupin vzorcev, ki so bili pred testiranjem 6 ur v vreli vodi, je pokrita z osjo x, in sicer v vrednosti 0, saj je večina vzorcev razpadla med kuhanjem ali razslojevanjem (Slika 19).



Slika 19: Lom po lesu za UF lepilo in vse tri načine priprave

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

V diplomski nalogi smo ugotavljali vpliv termične modifikacije na lepljenje lesa. Ugotavljali smo strižno trdnost za modificirane in nemodificirane vzorce lepljene z UF in FF lepilom ter delež loma po lesu lepilnega spoja.

5.1.1 Vlažnost lamel pred lepljenjem

Lamele smo pred lepljenjem navlažili na 6 % do 8 % lesne vlažnosti. Les, modificiran pri visokih temperaturah in z veliko izgubo lesne mase, se vlaži bistveno počasneje kot nemodificiran les, kar je posledica zmanjšanja števila OH skupin zaradi zamreževanja (Poncsák, 2007). Tako je vlažnost vzorcev, modificiranih pri visoki temperaturi, ostala nižja kljub daljšemu navlaževanju, saj ima modificiran les nižjo ravnovesno vlažnost.

5.1.2 Temperatura v spoju

Med lepljenjem smo merili temperaturo v spoju in ugotovili, da je temperatura v spoju lamel, ki so bile modificirane z višjimi temperaturami (210 °C), nekoliko nižja od temperature v spoju lesa, modificiranega pri nižji temperaturi (160 °C). V našem primeru je termična prevodnost lamel, modificiranih pri višji temperaturi, neznatno nižja od teh, modificiranih pri nižjih, vendar pa Mayes (2003) navaja, da se termično modificiranemu lesu toplotna prevodnost zmanjša za od 20 % do 25 %.

5.1.3 Izguba lesne mase

Izguba lesne mase je zelo pomembna, saj vpliva na vse ostale lastnosti modificiranega lesa in je posledica izhlapevanja ekstraktivov ter razkroja nekaterih komponent v lesu.

Pojav je najbolj izrazit za les, ki je izpostavljen temperaturam nad 200 °C. Lamele, ki so bile izpostavljene temperaturi 210 °C, so izgubile daleč največ lesne mase, v povprečju pa so lamele, modificirane pri tej temperaturi, izgubile 5,18 % lesne mase. Občutna izguba je bila vidna tudi pri lamelah, modificiranih pri 200 °C, in sicer v povprečju 2,79 %. Lamele, modificirane pri treh nižjih temperaturah, so dosegale nižje izgube mase. Posebej izstopajo lamele, modificirane pri temperaturi 190 °C, saj so dosegle najnižjo izgubo lesne mase, in sicer celo nižjo od lamel, modificiranih pri 160 °C. Pojava ne moremo povsem dobro utemeljiti, vendar pa lahko razloge iščemo v analognem uravnavanju temperature in vakuumu v laboratorijski vakuumsko tlačni komori, kar oboje vpliva na stopnjo modifikacije. Temperature se med postopkom spreminjajo, saj iz lamel z nenadzorovano intenzivnostjo izparevajo pare in ekstraktivne snovi. S spreminjanjem zmesi zraka v komori se spremeni tudi toplotna prevodnost zraka, kar vpliva na temperaturo v spoju. Ob nenadni ter nezaželeni spremembi temperature je ponovno segrevanje do želene temperature dolgotrajno, ob upoštevanju, da cel postopek traja 3 ure.

Ko primerjamo, kako masa lamele vpliva na izgubo mase, ugotovimo, da le-ta pri temperaturi modifikacije 160 °C ne vpliva na izgubo lesne mase, medtem ko je pri

temperaturi 210 °C opazen padec izgube lesne mase z višanjem mase lamel pred modifikacijo. Vendarle pa je potrebno opozoriti, da je pri tej temperaturi tudi razpršenost vrednosti veliko bolj opazna in so ekstremi v obe smeri, kar nas odvrne od tega, da bi lahko potegnili jasne sklepe glede povezave gostote lesa in izgube lesne mase med modifikacijo.

Izguba lesne mase posameznih lamel, modificiranih pri isti temperaturi, je lahko precej različna. Opazimo jo že pri temperaturi 160 °C, kjer največja izguba znaša 0,73 %, medtem ko najnižja znaša le 0,34 %. Razlika v izgubi lesne mase med posameznimi lamelami pa je precej večja pri temperaturi modifikacije 210 °C, kjer največja izguba znaša 8,49 %, najnižja pa 3,68 %.

Pri tem moramo upoštevati, da so bile lamele pri isti temperaturi modificirane v dveh različnih ciklih, saj nam kapaciteta laboratorijske komore ne omogoča, da bi modificirali vse vzorce hkrati. Ista temperatura v dveh različnih ponovitvah je lahko v praksi precej različna in les ni vedno enako dolgo izpostavljen neki določen temperaturi.

Vzrokov za različno izgubo mase ne moremo iskati zgolj v lesu, saj so bile vse lamele izžagane iz istega drevesa. Verjeten je delni vpliv lege lamel med modifikacijo v sami komori, bližine grelcev, najnižji in najvišji del je najbližje ohišja, torej mesta, kjer se pojavljajo izgube toplote. Vseh vzrokov pa vendarle ne poznamo in natančnega pojasnila, zakaj prihaja do različnih izgub lesne mase pri lesu, modificiranem pri isti temperaturi, ne moremo dati.

5.1.4 Strižna trdnost vzorcev izpostavljenih različnim klimam

Da bi bili vzorci čim homogeni, smo zlepili dvojice lamel, ki so bile modificirane pri isti temperaturi in so imele čim bolj podobno izgubo lesne mase. Skušali smo izdelati po dva para z visoko in po dva para z nizko izgubo lesne mase za vsako temperaturo modifikacije. To se nam je zdelo še posebej smiselno zato, ker smo pri nadaljnji raziskavi pri razvrščanju vzorcev dajali prednost izgubi mase v odstotkih, pred temperaturo modifikacije. Iz para zlepljenih lamel smo izžagali po sedem vzorcev na način, ki ga narekuje standard SIST EN 314-1. Iz podatkov, ki smo jih pridobili za te skupine, smo računali aritmetično sredino in jo uporabljali kot vrednost, s katero smo operirali pri manipulaciji s podatki.

Za lepljenje lamel v pare smo uporabili FF in UF lepilo. Militz, (2002) navaja, da je za lepljenje termično modificiranega lesa primerna večina v industriji uporabljenih lepil. Čeprav FF in UF lepili nista pogosto omenjeni v raziskavah o lepljenju termično modificiranega lesa, pa sta v praksi med pogostejše uporabljene lepila, kar je med drugim vplivalo na izbiro lepila. Opozoriti je potrebno še, da UF lepilo utrjuje v kislem mediju, medtem ko FF lepilo v alkalnem, kot navaja Kariž (2008), zato dobimo zanimivo nasprotje dveh lepil, saj vemo, da je vrednost pH termično modificiranega nižja kot pH nemodificiranega lesa.

Vzorci smo izpostavili trem različnim klimam. Poleg standardne klime s 65 % zračne zračnosti in temperaturo zraka 20 °C, smo vzorce izpostavili še pogojem za preizkušanja strižne trdnosti lepljenega masivnega lesa, ki je izpostavljen notranji suhi in vlažni klimi,

kot nam jih narekuje standard SIST EN 314-1. Vzorce smo po navodilih standarda 24 ur namakali v hladni vodi z 20 °C, pri drugem postopku za les, vgrajen v notranje prostore z vlažno klimo, pa smo vzorce 6 ur kuhali v vreli vodi, nato pa 1 uro ohlajali v hladni vodi z 20 °C.

Glavni trije parametri, ki vplivajo na lepljenje modificiranega lesa, so znižanje pH vrednosti, kar lahko pozitivno vpliva na utrjevanje UF lepila in negativno na utrjevanja FF lepila (Šernek, 2008), zmanjšanje sposobnosti omočitve in povečanje hidrofobnosti (Gerardin in sod., 2007).

Ker se je pri vseh primerih pokazal zelo visok odstotek loma po lesu, lahko sklepamo, da je lepilo zadostno utrdilo in smo v veliki meri merili trdnost lesa samega, ne pa lepilnega spoja.

5.1.4.1 Standardna klima

Iz grafa (*Slika 11*) opazimo, da strižna trdnost pada s stopnjo modifikacije za obe lepila. Opazimo tudi, da je razlika med strižnima trdnostnima pri nemodificiranih skupinah (ti dve vrednosti najdemo pri vrednosti 0, na x osi) pri vzorcih izpostavljenih standardni klimi bistveno manjša, kot pa je količinska razlika med obema trendnima črtama obeh lepil.

V našem primeru trendna črta pada v obeh primerih z enakomerno razliko UF in FF lepila, razlika je okoli 1 N/mm². Glede na raziskave, ki so bile na tem področju že opravljene, bi pričakovali, da bo zaradi spremembe pH, trdnost lepilnega spoja s stopnjo modifikacije padala samo pri FF lepilu. Podrobnejša proučitev pa nam bo pomagala razumeti, da strižna trdnost, ki smo jo izmerili med testiranjem, ni nujno enaka trdnosti lepilnega spoja.

Pri FF imamo precej visok, okoli 80 % lom po lesu, kjer trendna črta z višanjem stopnje modifikacije rahlo naraste, medtem ko trendna črta strižne trdnost s stopnjo modifikacije vidno pada. Vemo, da se s stopnjo modifikacije trdnost lesa zmanjša. Domnevamo lahko, da z večanjem stopnje modifikacije lepilni spoj FF lepila slabi, saj bi se nasprotno odražalo v povečanju loma po lesu.

Pri UF lepilu lom po lesu od 78% pri nemodificiranem lesu naraste do 100 % pri lesu modificiranem pri 210 °C. Čeprav strižna trdnost pada, pa opazimo, da se lom po lesu z modifikacijo veča, kar pomeni, da se trdnost lepilnega spoja samega v resnici bistveno ne zmanjšuje, ampak z modifikacijo postaje les manj trden.

Če bi lahko opazovali samo trdnost lepilnega spoja ne glede na spremembe trdnosti lesa, bi najbrž lahko ugotovili, da je trdnost lepilnega spoja UF lepila sicer nižja, kar nam pokaže tudi strižna trdnost nemodificiranih skupin, vendar pa domnevamo, da z modifikacijo trdnost lepilnega spoja FF lepila pada in se približa trdnosti lepilnega spoja UF lepila, ki se bistveno ne spremeni.

5.1.4.2 24 ur v hladni vodi

Drugačen graf pa dobimo, ko primerjamo strižno trdnost glede na stopnjo modifikacije pri vzorcih, ki so bili za 24 ur potopljani v hladno vodo z 20 °C. Pri tem grafu strižna trdnost precej strmo narašča pri UF lepilu in zmerno pri FF. Če pogledamo sliko loma po lesu (*Slika 18 in Slika 19*), je slika podobna, delež loma po lesu z modifikacijo narašča.

Pri nemodificiranih skupinah opazimo, da je strižna trdnost obeh skupin precej podobna; 4,41 za UF lepilo in 4,70 N/mm² za FF lepilo, medtem ko je lom po lesu pri FF lepilu s 85 % bistveno višji kot pri UF s 68,57 %. Pri nemodificiranih skupinah lahko opazimo vpliv vode na neodporno UF lepilo.

Pri UF lepilu strižna trdnost z modifikacijo precej strmo narašča, narašča pa tudi delež loma po lesu. To nam, podobno kot v prejšnjem primeru, pove, da se strižna trdnost s stopnjo termične modifikacije ne zmanjšuje, v tem primeru pa se najbrž nekoliko zviša. To lahko razložimo s spremembo pH v kontekstu, ki je bil v zgornjem sestavku že pojasnjen.

Pri FF lepilu, se strižna trdnost povečuje zmerno, precej bolj strmo pa narašča delež loma po lesu. Čeprav natančnega stanja iz danih podatkov ne moremo ugotoviti, lahko domnevamo, da se strižna trdnost z naraščanjem stopnje termične modifikacije ne povečuje. Domnevo lahko utemeljimo na dejstvu, da je pri potapljanju v vodo termično modificiran les dimenzijsko bolj stabilen kot nemodificiran. Zato je generiranih manj napetosti na spoj in ta vzdrži več pri modificiranih vzorcih.

5.1.4.3 6 ur kuhanja

Razlika med nemodificiranimi vzorci pri skupini, ki je bila za 6 ur izpostavljanja kuhanju, je očitna. Tukaj se že na prvi pogled opazi razlika med vodoodpornim FF in nevodoodpornim UF lepilom. Pri UF lepilu so vse vrednosti precej nizke, nekaj vzorcev nam je razpadlo že med kuhanjem, tudi vsi ostali so se razslojili samo po lepilu. Čeprav so vrednosti nizke pa lahko opazimo, da s povečano stopnjo modifikacije strižna trdnost enakomerno pada proti vrednosti nič.

Pri FF lepilu dobimo obratno sliko, kot smo jo dobili pri vzorcih, izpostavljenih standardni klimi. Pri vzorcih, ki so bili 6 ur kuhani, se trendna črta za strižno trdnost giblje okoli 4 N/mm², ne glede na stopnjo modifikacije, trenda črta za lom po lesu pa narašča. Domnevamo, da se strižna trdnost s stopnjo modifikacije povečuje oz. ostaja enaka. Pojava v tem primeru ne znamo pojasniti, spodbudi pa nas k razmišljanju o nadaljnjih raziskavah glede vpliva vode na lepilni spoj pri termično modificiranem lesu, kajti tudi pri UF lepilu, ne znamo pojasniti, zakaj se s stopnjo modifikacije strižna trdnost še zmanjšuje.

5.1.5 Rezultati in primerjava med vzorci glede na lego v lameli

Proučevati strižno trdnost posameznih vzorcev glede na lego v lameli je smiselno predvsem zato, ker številni avtorji podajajo, da je stopnja modifikacije, ki se kaže kot različna barva, odvisna od temperature in časa termične modifikacije. V našem primeru je bila barva po dolžini lamele precej različna, kar nas je vzpodbudilo analizirati vzorce tudi iz te plati, praktično pa je bilo taka analiza mogoča, ker smo imeli vzorce označene glede

na lego, ki so jo zasedali v lameli v času modifikacije. Iz rezultatov smo želeli razbrati, če se različna stopnja modifikacije (barva) odraža v strižni trdnosti. Barvna nehomogenost lamel je najbrž posledica konstrukcije laboratorijske komore.

Primerjali smo skupine vzorcev, ki so zasedle isto mesto v lamelah in jih grafično prikazali glede na vrsto lepilo in vse tri različne načine priprav na merjenje strižne trdnosti. Ugotovili smo, da bi med posameznimi slikami lahko potegnili neke splošne povezave, vendarle pa neke enoznačne ugotovitve ne moremo dati.

Če je se na primer pri standardni klimi iz grafa (*Slika 12*) dalo razbrati, da je pri UF lepilu trdnost lepilnega spoja naraščala s stopnjo termične modifikacije, pa istega sklepa ne moremo potegniti iz grafa (*Slika 17*), ki nam prikazuje podatke glede na lego v lameli. Po barvi sodeč je bila stopnja modifikacije veliko večja v sredini kot na obeh koncih lamele.

5.1.6 Lom po lesu

Vsi avtorji, ki govorijo o termični modifikaciji lesa, omenjajo zmanjšanje trdnosti pri termično modificiranem lesu, posebno, če je modificiran pri temperaturah višjih od 200 °C. Zmanjšanje trdnosti termično modificiranega lesa smo pri večini vzorcev ugotovili tudi pri naši raziskavi. Kot je razvidno iz *Slike 18*, je lom po lesu pri FF lepilu, glede na izgubo mase, naraščal pri vseh treh postopkih priprave na modifikacijo. Najbolj je to očitno pri vzorcih, ki so bili za 20 ur potopljene v hladni vodi, malo manj pri vzorcih, ki so se 6 ur kuhali, najmanj pa pri vzorcih, izpostavljenih standardni klimi. Iz *Slike 19* lahko razberemo, da je pri UF lepilu lom po lesu, glede na stopnjo modifikacije, naraščal pri vzorcih, ki so bili izpostavljeni standardni klimi, prav tako pa pri vzorcih, ki so bili 20 ur potopljene v hladni vodi. Vzorci, ki so bili 6 ur podvrženi kuhanju pa so pri testiranju razpadli po spoju.

5.2 SKLEPI

V raziskavi smo ugotovili, da sta UF in FF lepilo primerna za lepljenje termično modificiranega lesa, vendar pa le v določenih pogojih.

Pri izpostavitvi vzorcev standardni klimi sta obe lepili kvalitetno zlepili les. Strižna trdnost je padala glede na stopnjo termične modifikacije pri obeh lepilih.

Pri testiranju lastnosti lepilnega spoja za uporabo v notranjih prostorih s suho klimo smo ugotovili, da je 24-urno namakanje vzorcev v hladni vodi negativno vplivalo na strižno trdnost spoja pri obeh lepilih.

Pri testiranju lastnosti lepilnega spoja za uporabo v notranjih prostorih z vlažno klimo, smo ugotovili, da je postopek priprave vzorcev negativno vplival na obe lepili. Močno so se oslabili lepilni spoji UF lepila, ki ni odporno na vodo, saj so nekateri vzorci razpadli že med kuhanjem, ostali pa so dosegali zelo nizke vrednosti pri merjenju strižne trdnosti. Z povečevanjem stopnje modifikacije lesa pa se je strižna trdnost za UF lepilo še zmanjšala, medtem ko se pri FF lepilu ni bistveno spremenila.

6 POVZETEK

V raziskavi smo proučevali vpliv termične modifikacije na lepljenje lesa. V raziskavi so bili uporabljeni smrekovi (*Picea abies* Karst.) vzorci, ki so bili izdelani po navodilih standarda SIST EN 314-1. Vzorci so bili termično modificirani v laboratorijski vakuumsko tlačni komori pri petih različnih temperaturah modifikacije: 160 °C, 180 °C, 190 °C, 200 °C in 210 °C, testni vzorci pa so ostali nemodificirani.

Vzorcem smo po modifikaciji določili izgubo lesne mase. Na podlagi izgube lesne mase in temperature modifikacije smo zlepili dvojce lamel z dvema različnima lepiloma, FF in UF lepilom. Pred testiranjem smo vzorce izpostavili trem različnim pogojem; standardni klimi, klimi za preizkušanje lepilnega spoja za izdelke, namenjene notranji uporabi s suho klimo in klimi za preizkušanje lepilnega spoja za izdelke, namenjene notranji uporabi z vlažno klimo. Spojem smo izmerili strižno trdnost in določili delež loma po lesu.

Pri proučevanju podatkov smo upoštevali povprečne vrednosti skupin vzorcev izrezanih iz iste dvojice lamel. Primerjali smo strižno trdnost glede na izgubo lesne mase za obe vrsti uporabljenega lepila. Pri proučevanju rezultatov smo upoštevali strižno trdnost glede na izgubo lesne mase med modifikacijo in delež loma po lesu in lepilu.

Ugotovili smo, da sta UF in FF lepili primerni za lepljenje termično modificiranega lesa, vendar pa le v določenih pogojih.

UF lepilo je glede na stopnjo modifikacije pokazalo zadovoljive rezultate pri vzorcih, ki so bili izpostavljeni standardni klimi, in vzorcih, ki so bili izpostavljeni klimi za preizkušanje lepilnega spoja za izdelke, namenjene notranji uporabi s suho klimo. Slabo pa se je odrezalo pri vzorcih, ki so bili izpostavljeni klimi za preizkušanje lepilnega spoja za izdelke, namenjene notranji uporabi z vlažno klimo.

FF lepilo je glede na stopnjo modifikacije prav tako pokazalo zadovoljive rezultate pri vzorcih, ki so bili izpostavljeni standardni klimi in vzorcih, ki so bili izpostavljeni klimi za preizkušanje lepilnega spoja za izdelke, namenjene notranji uporabi s suho klimo. Za razliko od UF lepila, pa se je FF izkazalo za primerno tudi pri vzorcih, ki so bili izpostavljeni klimi za preizkušanje lepilnega spoja za izdelke, namenjene notranji uporabi s vlažno klimo. Pri tem pa je uporaba omejena na izdelke, kjer se ne zahteva velika trdnost spoja, saj se le ta giblje okoli 4 N/mm².

Termična modifikacija na lepljenje lesa deluje različno glede na uporabljeno lepilo in pogoje uporabe. To področje pa bo v prihodnjih letih gotovo deležno številnih novih raziskav, saj je modifikacija vedno bolj priljubljena in zaželena ter ekološko potrebna metoda za obdelavo lesa.

7 VIRI

- Adhesive bonding of plato wood. 2006. Plato onternational BV(11.05.2006)
<http://www.platowood.nl/ENG07/Adhesivebondingmay06.pdf> (28.1.2008)
- Beaud F., Niemz P., Pizzi A. 2006. Structure-property relationships in one-component polyurethane adhesive for wood: sensitivity to low moister content. *Journal of Applied Polymer Science*. 101: 4181–4192
- Bois perdure – Technology principles. (2008) PCI Industries Inc., France.
<http://www.perdure.com/PERDUREPORTAL/DesktopDefault.aspx?tabindex=1&tabid=26> (1.7.2008)
- Boonstra M.J., Rijdsdijk J.F., Sander C., E. Kegel E., Tjerdsmas B., Militz H., Van Acker J., Steven M. 2006. Microstructural and physical aspects of heat treated. *Ciencia y tecnología. Maderas*, 8: 3, 193–208
- Boonstra M.J., Van Acker J., Kegl E., Stevens M. 2007. Optimal of a two-stage heat treatment process: Durability aspect *Wood Science and Technology*, 92(4): 653–657
- Buro A. 1954. Die Wirkung von Hitzebehandlung auf die Pilzresistenz von Kiefern- und Buclieuholz. *Holz Roh- Werkstoff* 12: 297–304
- Christiansen A. W. 1989b. How overdrying wood reduces its bonding to phenol-formaldehyde adhesives. Part 2. USDA Forest Service Forest Products Laboratory.
<http://www.fpl.fs.fed.us/document/pdf1989/chris89b.pdf>
- Feist W.C., Sell J. 1987. Weathering behavior of dimensionally stabilized wood treated by heating under pressure of nitrogen gas. *Wood and fiber science*, 19, 2: 183–195
- Follrich J., Muller U., Gindl W. 2006. Effect of thermal modification on the adhesion between spruce wood (*Picea abies* Karst) and a thermoplastic polymer. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 64: 373–376
- Gérardin P., Petrič M., Petrissans M., Lambert J., Ehrhardt J.J. 2007. Evolution of wood surface free energy after heat treatment. *Polymer Degradation and Stability*, 92, 4: 653–657
- Gorišek Ž. 1994. Sušenje lesa. Ljubljana, Lesarska založba. Zveza društev inženirjev in tehnikov lesarstva Slovenije: 235 str.
- Hakkou M., Petrissans M., Zoulalian A. 2005. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. *Polymer Degradation and Stability*, 89:1–5

- Homan W.J., Jorissen A.J.M. 2004. Wood modification developments. *Heron*, 49, 4: 361–386
http://heron.tudelft.nl/2004_4/Art5.pdf
- He G., Yan N. 2005. Effect of moisture content on curing kinetics of pMDI resin and wood mixtures. *International Journal of Adhesion & Adhesive*, 25: 450–455
- He G., Yan N. 2007 Curing kinetics of polymeric diphenyl-methane diisocyanate with different wood species. *International Journal of Adhesion & Adhesive*, 27: 244–249
- Hrastnik D. 2005. Odpornost v vročem olju modificiranega in površinsko obdelanega borovega lesa proti lesnim glivam. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 5 str.
- Hribar M. 2008. Površinska obdelava naravne in termično obdelane resonančne smrekovine. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 5 str.
- Jämsä S., Viitaniemi P. 2001. Heat treatment of wood-better durability without chemicals. V: *Proceedings of Special Seminar held in Antibes, France, 9. Februar 2001, Review on heat treatment of wood*. Rapp A.O., 21–27
- Jämsä S., Viitaniemi P. 1998. Heat treatment of wood. Better durability without chemicals. *Nordiske Trebeskyttelsesdager*: 47–51
- Kariž M., Šernek M. 2008. Lepljenje termično modificiranega lesa. *Les*, 7/8: 275–282
- Lesar B. 2005. Analiza termično modificiranega lesa z infrardečo spektroskopijo in termično analizo. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 4 str.
- Mayes D., Oksanen O. 2003. *ThermoWood handbook*. Helsinki, Finnish Thermowood Association: 66
- Militz H. 2002. Thermal treatment of wood: European Processes and their background. IRG/WP 02-40241: 18 str., 33rd Annual Meeting . 12–17 May 2002
- Militz H., Beckers E., Homan W. 1997. Modification of solid wood: research and practical potential. IRG/VP 97 The international research group on wood preservation. Stockholm. Sweden: 12 str.
- Militz H. 2002. Heat Treatment Technologies in Europe: Scientific Background and Technological State-of-Art. *Proceedings of Conference on "Enhancing the durability of lumber and engineered wood products"* February 11-13, 2002, Kissimmee, Orlando. Forest Products Society, Madison, US.
<http://www.wood.uni-goettingen.de/pdf-dateien/heateuropefps2002.pdf> (26. feb 2008)

- Militz H., Tjeerdsma B. 2000. Heat treatment of wood by the Plato-process. V: Proceedings of Seminar "Production and development of heat treated wood in Europe", Nov. 2000. Helsinki, Stockholm, Oslo: 19 str.
- Militz H., Tjeerdsma B. 2001. Heat Treatment of wood by the PLATO-PROCESS. V: Review on heat treatments of wood. Rapp A.O. (ur.) Luxembourg. Office for Official Publications of the European Communities: 11 str.
- Patzelt M., Stingel R., Teischinaer A. 2002. Thermische Modifikation von Holz und deren Einfluss auf ausgewählte Holzeigenschaften. V: Modifiziertes Holz: Eigenschaften und Märkte. Teischinger A., Stingel R. (ed.). Wein. LIGNOVISINEN: 101–147
- Paul W., Ohlmeyer M., Leithoff H. 2007. Thermal modification of OSB-strands by a one-step heat pre-treatment. Influence of temperature on weight loss, hygroscopicity and improved fungal resistance. Holz als Roh und Werkstoff, 65, 1: 57–63
- Pizzi A. 1983. Wood adhesives: chemistry and technology. New York, M. Dekker: 364 str.
- Pohleven F. 2008. »Proizvodnja termično modificiranega lesa v Sloveniji«. Ljubljana. Katedra za patologijo in zaščito lesa. Oddelek za lesarstvo. Biotehniška fakulteta. Univerza v Ljubljani (osebni vir, avgust 2008).
- Poncsák S., Shi. S. Q. Kocafe D. 2007. Effect of thermal treatment of wood lumbers on their adhesive bond strength and durability. Journal of Adhesion Science & Technology, 21, 8: 745–754
- Raggers J. 2007. Process/ Durability, Larenstein, Velp, Nederland.
<http://www.ivalsa.cnr.it/euris/english/4/4.pdf>
- Rep G., Pohleven F., Humar M. Modifikacija lesa.
file:///C:/DOCUME~1/PC/LOCALS~1/Temp/modifikacija_lesa-1.htm
- Rep G. 2008 »Proizvodnja termično modificiranega lesa v Sloveniji«. Ljubljana. Katedra za patologijo in zaščito lesa. Oddelek za lesarstvo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani (osebni vir, junij 2008).
- Rep G., Pohleven F. 2002. Wood modification – a promising method for wood preservation = Modifikacija drva – obetavna metoda za zaščito drva. Drvna industrija. 52, 2: 71–76
- Rep G., Pohleven F. 2008. Postopek toplotne obdelave lesa in priprava za izvedbo postopka. P-200800023
- Rep G., Pohleven F., Bučar B. 2004. Characteristics of thermally modified wood in vacuum. IRG/WP 04-40287: 8 str.

- Rapp A.O., Sailer M. 2001. Oil heat treatment of wood in Germany – state of the art, V: Review on heat treatments of wood. Rapp A.O. (ur.) Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities: 18 str.
- Retiwood – The Process. (2008), Retitech, France.
<http://www.retiwood.com/en/processes.html> (1.7.2008)
- Sailer M., Rapp A.O., Leithoff H. 2000. Improved resistance of Scots pine and spruce application of an oil-heat treatment. IRG/WP 00-40162: 12 str.
- Syrjanen T., Oy K. 2001. Production and Classification of heat treated wood in Finland. V: Review on heat treatments of wood. Rapp A.O. (ur.) Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities: 9 str.
- Syrjanen T., Jamsa S., Viitaniemi P. 2000. Heat treatment of wood in Finland. V: Proceedings of Seminar "Production and development of heat treated wood in Europe", Nov. 2000, Helsinki, Stockholm, Oslo.
- Šernek M., Boonstra M., Pizzi A., Despres A., Gerardin P. 2008. Bonding performance of heat treated wood with structural adhesive. Holz Roh Werkst, 66, 3: 173–180
- Šega B. 2004 Preizkušanje lepil za lepljenje lesa in kakovosti zlepljenosti. Strokovni posvet. Lepljenje lesa in lesnih tvoriv.
<http://www.ditles.si/Files/Bogdan%20Sega.pdf> (4.11.2004)
- Štern J. 2000. Modifikacija lesa in ugotavljanje njegovih fungicidnih lastnosti. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 72 str.
- Šuštar A. 2008. Modificiran les za kuhinjske elemente. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 7 str., 9 str., 10 str., 8str.
- Teischinger A., Stingl R. 2002. Modifiziertes Holz:Eigenschaften und Märkte. Wien: 226 str.
- The Plato technology, A novel wood upgrading technology. (2006) Plato International BV, The Netherlands.
<http://www.platowood.nl/DOCU0505/nPlatoEnglish0206.pdf> (1.7.2008)
- Tjeerdsma B.F., Boonstra M., Pizzi A., Tekely P., Militz H. 1998. Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. Holz als Roh- und Werkstoff, 56: 149–153
- Tjeerdsma B.F., Stevens M., Militz H. 2000. Durability aspects of (hydro)thermal treated wood. IRG/WP 00-40160: 10 str.

- Vernois M. 2000. Heat treatment of wood in France – state of the art, Centre Technique du Boi set de l'Ameublement, France.
http://www.bfafh.de/inst4/43pdf/heat_fra.pdf (1.7.2008)
- Vernois M. 2000. Heat treatment in France. V: Proceedings of Seminar "Production and development of heat treated wood in Europe", Nov. 2000, Helsinki, Stockholm, Oslo.
- Vernois M. 2001. Heat treatment of wood in France – State of the art. V: Review on heat treatments of wood. Rapp A. O. (ur.) Luxenibourg. Office for Official Publications of the European Communities: 18 str.
- Viitaniemi P., Jämsä S., Ek P., Viitanen H. 1997. Method for improving biodegradation resistance and dimensional stability of cellulosic products. Patent N° 5678324 (US005678324)
<http://patft.uspto.gov/netahtml/PTO/srchnum.htm> (26. feb. 2008)
- Viitaniemi P., Jämsä S. 1996. Piuui modifiointi lampokasittelylla (Modification of wood with heat-treatment). Espo 1996. VTT Julkaisuja – Publikationer 814.
- Zanjekovič B. 2007. Vpliv modifikacije lesa s tehnologijo Plato na kvaliteto lepljenja. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 3, 4 str.
- Yildiz S., Gezerb D.E. Yildiza U.C. 2006. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. Building and Environment, 41: 1762–1766

ZAHVALA

Za strokovno vodenje in vsestransko pomoč se zahvaljujem vsem zaposlenim na Katedri za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin in zaposlenim na Katedri za patologijo in zaščito lesa.

Posebej se zahvaljujem mentorju prof. dr. Milanu ŠERNEKU ter recenzentu prof. dr. Mihi HUMARJU.

Iskrena hvala tudi vsem ostalim, ki so me s strokovno pomočjo ali drugače podpirali v času študija in nastajanja diplome.

Za lektorsko pomoč in motivacijske grožnje hvala Bojanu Plevniku in ostalim.

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Marko KUMER

LEPLJENJE TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2016