

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Matej SUSMAN

**MEHANSKE LASTNOSTI TERMIČNO
MODIFICIRANE PIRAVE BUKOVINE**

DIPLOMSKI PROJEKT

Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja

Ljubljana, 2016

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Matej SUSMAN

**MEHANSKE LASTNOSTI TERMIČNO MODIFICIRANE PIRAVE
BUKOVINE**

DIPLOMSKI PROJEKT

Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja

**MECHANICAL PROPERTIES OF THERMALLY MODIFIED WHITE
ROT IN BEACHWOOD**

B. SC. THESIS

Professional Study Programmes

Ljubljana, 2016

Diplomsko delo je zaključek izobraževanja visokošolskega strokovnega študija Tehnologije lesa in vlaknatih kompozitov – 1. stopnja. Opravljeno je bilo na Katedri za Patologijo in zaščito lesa, kjer je bila izvedena termična modifikacija ter v laboratoriju za površinsko obdelavo Katedre za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin, Oddelka za lesarstvo, Biotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja imenoval prof. dr. Franca POHLEVNA in za recenzenta prof. dr. Milana ŠERNEKA.

Mentor: prof. dr. Franc POHLEVEN

Recenzent: prof. dr. Milan ŠERNEK

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

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

Matej Susman

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dv1
DK	UDK 630*84
KG	les/termična modifikacija/vakuum/barva/mehanske lastnosti
AV	SUSMAN, Matej
SA	POHLEVEN, Franc (mentor)/ŠERNEK, Milan (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2016
IN	MEHANSKE LASTNOSTI TERMIČNO MODIFICIRANE PIRAVE BUKOVINE
TD	Diplomski projekt (Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja)
OP	VIII, 23 str., 3pregl., 7 sl., 4 pril., 19 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	V gozdovih in na lesnopredelovalnih skladiščih se zaradi piravosti razvrednoti veliko bukovine. Z namenom izboljšanja lastnosti smo piravo bukovino termično modificirali. Pri postopku termične modifikacije se lesu poveča dimenzijska stabilnost in odpornost na škodljivce, poslabšajo pa se mu mehanske lastnosti. Spremeni se tudi barva lesa. Spremembe so odvisne od temperature modifikacije. Postopek uravnavamo tako, da s pomočjo parametrov, se pravi temperature in časa, dosežemo želeno stopnjo sprememb strukture celične stene lesa. Termično smo modificirali piravo bukovino pri temperaturah 170 °C, 190 °C in 210 °C. Pri tem smo ugotavljali izgubo mase, spremembo barve in mehanske lastnosti, pri katerih smo največjo pozornost namenili upogibni trdnosti in modulu elastičnosti. Ugotovili smo, da se pri termični modifikaciji mehanske lastnosti piravi bukovini poslabšajo, še zlasti pri najvišji uporabljeni temperaturi (210 °C).

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND	Dv1
DC	UDC 630*84
CX	wood/termally modified/vacuum/colour/mehanical properties
AU	SUSMAN, Matej
AA	POHLEVEN, Franc (mentor)/ŠERNEK, Milan (recenzent)
PP	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB	University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY	2016
TI	MECHANICAL PROPERTIES OF THERMALLY MODIFIED WHITE ROT IN BEACHWOOD
DT	B.sc Thesis (professional study programmes)
NO	VIII, 23 p., 3 tab., 7 fig., 4 ann., 19 ref.
LA	sl
AL	sl/en
AB	White rot fungi are the main cause of beech wood degradation in forests or wood procesing storages. To enhance wood's properties, we performed a thermal modification of a beech wood, colonized by a white rot fungi. Thermal modification processes of wood is used to increase it's dimensional stability and pest resistance, it however deteriorates the mechanical properties and colour of wood. Level of change depends of temperature height during modification process. We can control the process by managing parameters, such as temperature level and duration, to achieve desired level of the cell-wall structural change. We did a thermal modification of beech wood colonized by a white rot fungi, at a temperature of 170 °C, 190 °C and 210 °C. During the process, we attempted to determine the loss of mass, colour changes and differences in mechanical properties, mainly focusing on bending hardness. We concluded, that mechanical properties of a beech wood, colonized by white rot fungi, do in fact deteriorate, especially when processing it at the highest temperature of 210 °C.

KAZALO VSEBINE

Ključna dokumentacijska informacija.....	III
Key words documentation.....	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic.....	VII
Kazalo slik.....	VIII
1 UVOD.....	1
2 PREGLED OBJAV.....	2
2.1 OKOLJEVARSTVENE ZAHTEVE.....	2
2.2 MODIFIKACIJA LESA	2
2.2.1 Načini modifikacije lesa	2
2.3 TERMIČNA MODIFIKACIJA LESA.....	3
2.4 PARAMETRI TERMIČNE MODIFIKACIJE	4
2.4.1 Drevesna vrsta	4
2.4.2 Temperatura	4
2.4.3 Čas modifikacije	5
2.5 LASTNOSTI TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA.....	6
2.5.1 Dimenzijska stabilnost	6
2.5.2 Izguba mase	7
2.5.3 Mehanske lastnosti	7
2.5.4 Modul elastičnosti (E – modul).....	8
2.6 BARVNE SPREMEMBE TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA.....	9
2.6.1 Numerično vrednotenje barv po CIE $L^*a^*b^*$ sistemu	9
2.6.2 Barvne spremembe po sistemu CIE $L^*a^*b^*$	10
3 MATERIAL IN METODE.....	11
3.1 MATERIAL	11
3.2 METODE	12
4 REZULTATI.....	13
4.1 IZGUBA MASE.....	13
4.2 SPREMEMBA BARVE.....	15
4.3 MEHANSKE LASTNOSTI.....	16

5	RAZPRAVA	19
6	SKLEPI	21
7	VIRI	22

Kazalo preglednic

Preglednica 1: Izguba mase piravih vzorcev in nepiravih kontrolnih vzorcev.....	13
Preglednica 2: Sprememba barve pirave in nepirave bukovine	15
Preglednica 3: Modul elastičnosti in upogibna trdnost zdravih, piravih in modificiranih vzorcev..	16

Kazalo slik

Slika 1: CIE $L^*a^*b^*$ sistem (Golob in Golob,2001)	9
Slika 2: Slika vzorcev za modifikacijo.....	11
Slika 3: Sprememba barve.....	15
Slika 4: Vpliv stanja vzorcev in temperatura modifikacije na modul elastičnosti	17
Slika 5: Vpliv stanja vzorcev in temperatura modifikacije na upogibno trdnost	18
Slika 6: Odvisnost modula elastičnosti v odstotkih.....	20
Slika 7: Odvisnost upogibne trdnosti v odstotkih	20

1 UVOD

Les je naravni material, zato so lesni izdelki ob nepravilni uporabi ali izpostavljenosti podvrženi naravnemu razkroju. S pravilno uporabo konstrukcije ali izbiro zaščite, pa lahko veliko pripomoremo k temu, da nam izdelki iz lesa služijo dlje, oziroma jim podaljšamo življenjsko dobo. Seveda je pomembna tudi izbira drevesne vrste predvsem pa mesto uporabe.

Razkroj lesa povzročajo biotski dejavniki, ki les okužijo (lesne glive, bakterije), ali napadejo (insekti) in človek ter abiotski dejavniki: dež, veter, vlaga, UV svetloba. Za zaščito le-teh se poslužujemo insekticidov in fungicidov v obliki površinskih premazov.

Človek je že od nekdaj želel podaljšati življenjsko dobo lesu. Še pred iznajdbo kemičnih sredstev so les ščitili ali s pravilno konstrukcijo (kozolec) ali pa z naravnimi premazi (apno). Po industrijski revoluciji pa so izumili razne kemične pripravke in spojine, ki pa so po svoji zgradbi nevarni tako za okolje kot za človeka (Pohleven, 2009).

Omejevanje uporabe pesticidov se je pričelo na vseh področjih in ne le v lesarstvu. Vse manj se promovirajo tudi biocidi, ki so v zaščitnih sredstvih. Les je potrebno zaščititi tako, da ni nevaren človeku in nima stranskih vplivov na okolje. Tak postopek je termična modifikacija lesa.

Modifikacijo lesa preučujejo že več kot sedemdeset let. Aktualen način zaščite pa je postal v zadnjem desetletju. Snovi, ki sestavljajo olesenelo celično steno, pogojujejo biološke, fizikalne in kemične lastnosti lesa. Pri postopku modifikacije vplivamo na polimere in tako na kemično strukturo celične stene. Modifikacijo lahko izvedemo z temperaturo, s kemijskimi reagenti ali z encimi (Rep in Pohleven, 2002).

S termično modifikacijo dosežemo večjo trajnost in dimenzijsko stabilnost lesa, poslabšajo pa se njegove mehanske lastnosti. Lastnosti termično modificiranega lesa lahko uravnavamo s spremembo parametrov: temperaturo modifikacije in trajanjem izpostavitve ciljni temperaturi. Višja kot je temperatura modifikacije, večji sta dimenzijska stabilnost in odpornost modificiranega lesa proti škodljivcem, v večji meri pa se poslabšajo mehanske lastnosti. Obstaja tudi jasna povezava med izgubo mase in dobljenimi lastnostmi termično modificiranega lesa (Rep in Pohleven, 2002).

S postopkom termične modifikacije vplivamo na spremembo barve lesa. Les med postopkom potemni. Intenzivnost obarvanja pa lahko uravnavamo s temperaturo modifikacije. Stopnjo potemnitve pa določimo s spektrofotometrom, ki izmeri odtenke posamezne barve.

Pri piravi bukvi pa imamo problem, da je prisotno različno obarvanje lesa, zaradi interakcije lesnih gliv. Znano je, da piravost nastane z okužbo gliv, katere so povzročiteljice bele trohnobe.

Namen naloge je ugotoviti mehanske lastnosti pri modificirani piravi bukovini in jih primerjati z nemodificiranimi vzorci. Obenem pa smo spremljali tudi barvo lesa pri različnih stopnjah termične modifikacije.

2 PREGLED OBJAV

2.1 OKOLJEVARSTVENE ZAHTEVE

Zadnja leta so vedno bolj priljubljeni produkti, ki so prijazni do okolja in ljudi. Vse strožje okoljevarstvene zahteve, glede škodljivih kemičnih pripravkov, so spodbudile intenzivnejši razvoj novih, okolju bolj prijaznih tehnik zaščite lesa. Ponovno se zavedamo pomena konstrukcijske zaščite in uporabe postopkov brez biocidov. Na področju zaščite je potrebno poznati lastnosti določene drevesne vrste in njeno odpornost glede na mesto uporabe. Najprej je potrebno poiskati ustrezne konstrukcijske rešitve, uporabljati okolju in ljudem prijazne postopke zaščite lesa, odslužen les pa varno uničiti (Rep in Pohleven, 2002).

V smislu zaščite lesa smo pri nas in v večini evropskih držav prepovedali uporabo številnih klasičnih biocidov kot so: lindan, arzenove spojine (npr. CCA) ter pentaklorofenol. Uvedli smo nove aktivne komponente in tako zmanjšali nezaželen vpliv na okolje. Velik problem pa še vedno predstavlja odslužen les, ki vsebuje težke kovine: krom, kositer in arzen (Rep in Pohleven, 2002).

Modifikacija lesa spada med novejšje postopke, ki brez uporabe biocidov zaščitijo les pred škodljivci in izboljšajo njegovo dimenzijsko stabilnost. Pri postopku modifikacije se v celični steni spremeni struktura osnovnih gradnikov – polimerov (celuloza, hemiceluloza, lignin). Posledica spremenjene zgradbe na molekularnem nivoju so drugačne tehnološke lastnosti lesa (Teischinger in Stingl, 2002).

2.2 MODIFIKACIJA LESA

Modifikacija lesa ni nov tehnološki postopek, a bolj intenzivno so ga začeli uporabljati v letih, ko so omejili uporabo biocidov. Predstavlja rešitev, s katero je mogoče izboljšati naravno odpornost lesa ter mu razširiti uporabnost. Za okolje je veliko bolj prijazna od klasične zaščite lesa.

2.2.1 Načini modifikacije lesa

Poznamo tri vrste modifikacij lesa:

- Termična modifikacija
- Kemična modifikacija
- Encimska modifikacija

Termična modifikacija lesa

Les segrevamo v odsotnosti kisika in tako spremenimo osnovno molekularno strukturo celične stene. Prihaja do delne depolimerizacije gradnikov celične stene in do preoblikovanja polimerov. Produkt je odpornejši in dimenzijsko stabilnejši les, vendar nekoliko mehansko oslavljen. Les med postopkom segrevanja modifikacije potemni (Rep in Pohleven, 2002).

Kemična modifikacija lesa

Pri kemični modifikaciji poteče reakcija med kemičnim reagentom in makromolekulami celične stene. Večina kemičnih reagentov reagira s hidroksilnimi (-OH) skupinami lesnih polimerov. Najbolj običajni reakciji sta estrenje in etrenje. Med reagentom in lesnimi polimeri nastane kovalentna vez. Lastnosti kemično modificiranega lesa so odvisne od reagenta in od stopnje modifikacije (Rep in Pohleven, 2002).

Encimska modifikacija lesa

Modifikacija lesa z encimi je zaenkrat najmanj raziskana, predvsem pa še ni uporabljena v praksi. Sprememba osnovne strukture lesa poteka z pomočjo encimov, pri čemer zadostujejo že sobni pogoji. Znan primer je encim lakaza, ki spremeni strukturo lignina in s povečanjem števila reaktivnih mest, kar pa vpliva na lastnosti, na primer pri vročem stiskanju lesnih vlaken (Rep in Pohleven, 2002).

2.3 TERMIČNA MODIFIKACIJA LESA

Poizkusi o zaščiti lesa s termično modifikacijo segajo v trideseta leta prejšnjega stoletja. Vendar se intenzivne raziskave izvajajo v zadnjih dvajsetih letih. Tako poznamo postopke, ki so bili razviti v različnih evropskih državah in pa tudi v ZDA ter Kanadi. Med vodilne proizvajalce termično modificiranega lesa sodijo Finska, Francija, Nemčija in Nizozemska, vedno bolj pa tudi ZDA. S tega področja obstaja veliko prijavljenih patentov (Rapp in Sailer, 2001).

Glavne razlike med posameznimi postopki termične modifikacije lesa so predvsem v načinu zagotavljanja odsotnosti kisika, kar dosežemo z:

- dušikom (Vernios, 2001)
- vodno paro (Jämsä in Viitaiemi, 2001)
- vročim oljem (Tjeerdsma in sod., 1998; Sailer in sod., 2000; Rapp in Sailer, 2001; Militz, 2002)
- vakuumom (Rep in sod., 2004)

Termična modifikacija je zanimiva tudi z okoljskega vidika, saj pri tem postopku v les ne vnašamo škodljivih substanc. Ob odsotnosti kisika ga izpostavimo zgolj višji temperaturi. Kisik, ki bi sicer povzročil oksidacijo celuloze in s tem izrazito poslabšanje lastnosti lesa iz komore, odstranimo z vakuumom (Tjeerdsma in sod., 1998; Sailer in sod., 2000; Rep in Pohleven, 2002; Militz, 2002; Rep in Pohleven, 2004).

Termična modifikacija običajno poteka pri temperaturah med 170 °C in 240 °C, brez prisotnosti kisika. Glavni cilj je tako izboljšati dimenzijsko stabilnost lesa in njegovo odpornost proti glivam in insektom kolikor je le mogoče, pri tem pa v čim večji meri ohraniti njegovo trdnost. Med postopkom les potemni. Zaradi slabših mehanskih lastnosti je termično modificiran les uporaben pretežno tam, kjer ni izpostavljen večjim mehanskim obremenitvam. Največji tehnični problem toplotne modifikacije lesa so poslabšanje njegovih mehanskih lastnosti, spremembe barve ter vonja (Rapp in Sailer, 2001; Rep in Pohleven, 2002).

2.4 PARAMETRI TERMIČNE MODIFIKACIJE

2.4.1 Drevesna vrsta

Postopek je smiseln za manj odporne in komercialno manj vredne drevesne vrste, kot so: jelka, smreka, breza, topol in evropska trepetlika. Les se razlikuje zaradi anatomskih in kemičnih struktur. Zato so pogoji modifikacije za vsako drevesno vrsto drugačni. Ponavadi je za iglavce strožji režim kot za listavce, predvsem zaradi različnega načina uporabe modificiranega lesa (Tjeerdsma in sod., 1998).

Modificiran les iglavcev se najpogosteje uporablja za različne konstrukcije, kjer so izpostavljene zunanjim vremenskim razmeram. Medtem ko se les listavcev bolj pogosto uporablja za izdelke notranjih prostorov, kjer sta v ospredju barva in kakovost površine (Tjeerdsma in sod., 1998).

2.4.2 Temperatura

Proces termične modifikacije je razdeljen v tri sklope:

- višanje temperature (segrevanje)
- proces modificiranja (konstantna ciljna temperatura)
- zniževanje temperature (hlajenje)

Pri fazi segrevanja se temperatura, ki je v začetku enaka temperaturi okolice, postopoma dviga od 100 °C do 150 °C. Temperatura med fazo modifikacije znaša med 170 °C in 240 °C ter mora med procesom ostati konstantna. V fazi hlajenja pa temperatura pada od temperature modifikacije do izravnave na sobno temperaturo. Pri vseh fazah je pomembno, da razlika temperature med zrakom in lesom ni previsoka. V kolikor so nagle spremembe oz. prevelike razlike, se kvaliteta modificiranega lesa močno poslabša (Teischinger in Stingl, 2002).

Temperatura je glavni dejavnik ravni modifikacije. Tako je odvisna od vrste lesa in predvsem namena uporabe le-tega. Temperatura vpliva tudi na potemnitev lesa. Visoke temperature trajno spremenijo biološke, fizikalne, mehanske in barvne lastnosti. Pri nižjih temperaturah je razgradnja lesnih substanc še sorazmerno nizka, pri temperaturah nad 170 °C pa se že opazi večje spremembe. Visoke temperature zelo povečajo odpornost lesa, obratno pa zmanjšujejo njegove mehanske lastnosti. Les iglavcev se modificira pri višji temperaturi, kot les listavcev, za katerega se običajno uporabljajo temperature pod 200 °C (Teischinger in Stingl, 2002).

2.4.3 Čas modifikacije

Trajanje postopka modifikacije je odvisno od več dejavnikov: velikost in kapacitete komore, dimenzij lesa, ki ga bomo modificirali in časa segrevanja ter ohlajevanja (Sailer in sod., 2000).

Pomemben je čas segrevanja, ki mora biti dovolj dolg, da se les enakomerno segreje. Tako lahko modifikacija enakomerno poteka po celotni prostornini lesa. Trajanje se razlikuje med posameznimi postopki. Pri nemškem modelu traja 48 ur (Teischinger in Stingl, 2002), pri finskem traja segrevanje od 0,5 do 4 ure (Tjeerdsma in sod., 1998), pri francoskem je trajanje odvisno od posamezne drevesne vrste (Rapp in Sailer, 2001), pri slovenskem modelu pa je trajanje tri ure (Pohleven in Rep, 2004). Faza ohlajevanja poteka vse dokler ni temperatura lesa izenačena s temperaturo okolice oziroma sobno temperaturo.

Pri termični modifikaciji ima večji vpliv višina ciljne temperature, kot trajanje postopka. Modifikacija pri višjih temperaturah v krajšem času ne daje enakih rezultatov, kot modifikacija pri nižjih temperaturah in daljšem času (Sailer in sod., 2000).

2.5 LASTNOSTI TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA

2.5.1 Dimenzijska stabilnost

Les je higroskopen material, saj hidroksilne skupine v lesnem tkivu iz okolja vežejo molekule vode z vodikovimi vezmi. Zato les ob povečani relativni zračni vlažnosti ali stiku z vodo nabreka, pri zmanjševanju vlage pa se začne celična stena krčiti. Takšne spremembe dimenzij so nezaželene, ker lahko povzročijo nastanek razpok. Les je dimenzijsko stabilnejši, če je sprejemanje in oddajanje vode čim manjše (Gorišek, 1994).

V lesu oz. v celični steni se voda nahaja kot prosta ali vezana. Prosta voda, ki se nahaja le v lumnih celic, vpliva na maso, nima pa vpliva na lastnosti lesa. Vezana voda predstavlja molekule vode, ki so z vodikovimi vezmi vezane na polimere olesenele celične stene. Količina vezane vode je odvisna od prostih sorpcijskih mest, ki reagirajo z molekulami vode. Nabrek celičnih sten je posledica adsorpcije, ki pomeni vezavo plinastega adsorbenta (molekul vode) iz vlažnega zraka na lesne polimere (Gorišek, 1994).

Volumsko krčenje in nabrekanje je količinsko enako volumnu oddane ali sprejete vode, upošteva njeno zgostitev v celični steni. Idealno dimenzijsko in oblikovno so stabilni lesovi z majhnim skrčkom, majhno krčitveno anizotropijo in dolgim ravnovesnim časom (Gorišek, 1994), kar dosežemo z termično modifikacijo (Rep in Pohleven, 2004).

Higroskopnost termično modificiranega lesa je odvisna predvsem od pogojev, pri katerih poteka modifikacija. Proces modifikacije je potrebno optimizirati tako, da dosežemo maksimalno dimenzijsko stabilnost pri minimalnem poslabšanju mehanskih lastnosti. Vsekakor so želeni pogoji, ki zahtevajo visoke proizvodne kapacitete ter ustrezno izboljšanje kvalitete lesa, prilagojeni namenu uporabe (Tjeerdsma in sod., 1998).

Dimenzijska stabilnost termično modificiranega lesa je v veliki meri odvisna od izgube mase. Odvisno od vrste postopka, predvsem pa od parametrov modifikacije, lahko dosežemo omejeno sprejemanje vode; tudi do 70% (Teischinger in Stingl, 2002).

Dimenzijsko stabilnost lahko ovrednotimo z dvema parametroma:

ASE (antishrinking efficiency) – protikrčitvena aktivnost v radialni (ASE_r) in tangencialni (ASE_t) smeri pove, za koliko je krčenje modificiranega lesa manjše od krčenja nemodificiranega oz. kontrolnega lesa. ASE ocenjujejo med dvema legama, pogosto med napojenim in tehnično suhim stanjem (Gorišek, 1994; Rep in sod., 2004)

$$ASE = (\alpha_c - \alpha_t) / \alpha_c \quad (...1)$$

α_c – skrček kontrolnega vzorca med dvema ravnovesnima legama

α_t – skrček modificiranega vzorca med dvema ravnovesnima legama

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

$$MEE = (\Delta m_c - \Delta m_t) / \Delta m_c \quad (...2)$$

Δm_c – sprememba mase kontrolnega, nemodificiranega vzorca v določenem časovnem intervalu

Δm_t – sprememba mas modificiranega vzorca v določenem časovnem intervalu

Teoretični mejni vrednosti ASE sta od 0 do 100%. Vrednost 100% pomeni material, ki se med dvema ravnovesnima stanjema ne skrči. ASE je kazalnik dimenzijske stabilnosti in ne vsebuje informacij o mehanskih lastnostih lesa (Gorišek, 1994).

2.5.2 Izguba mase

V postopku termične modifikacije les tudi izgubi del svoje mase, ki pa je odvisna od več parametrov. V največji meri jo pogojujeta stopnja temperature in čas termične modifikacije. Seveda je odvisna tudi od drevesne vrste, začetne vlažnosti in medija s katerim prenašamo temperaturo na les.

Višja kot je temperatura modifikacije, slabše so mehanske lastnosti lesa, medtem ko se biološka odpornost in dimenzijska stabilnost povečujeta. Zato je uporaba termično modificiranega lesa pri bolj obremenjenih konstrukcijah omejena. Poveča se krhkost termično modificiranega lesa, za 10 do 30% se zmanjšata njegovi upogibna in natezna trdnost (Sailer in sod., 2000; Rep in sod., 2004).

2.5.3 Mehanske lastnosti

S termično modifikacijo se mehanske lastnosti lesa, odvisno od temperature, poslabšajo. Sprememba mehanskih lastnosti je odvisna predvsem od temperature modifikacije. Čim višja je temperatura med procesom modifikacije, bolj se lesu poslabšajo mehanske lastnosti. Raziskave kažejo, da se modificiranemu lesu trdnost zmanjša od 5 do 50%, kar je odvisno od uporabljenega procesa (Rep in sod., 2004).

Nezaželeni posledici termično modificiranega lesa sta povečana krhkost lesa ter znatno zmanjšanje upogibne in natezne trdnosti. Medtem v tlačni trdoti, udarni žilavosti in trdoti površine ni znanih sprememb. Uporaba termično modificiranega lesa v bolj obremenjenih konstrukcijah je omejena (Rep in sod., 2004).

Nekatere lastnosti lahko proizvajalci uravnavajo s spreminjanjem parametrov pri procesu. Visoka temperatura zelo poveča trajnost, obenem pa se bolj poslabšajo mehanske lastnosti. Z uravnavanjem parametrov lahko proizvedejo tudi manj odporen les, ki pa ima boljše mehanske lastnosti (Rep in Pohleven, 2002; Rep in sod., 2004).

2.5.4 Modul elastičnosti (E – modul)

Modul elastičnosti izkazuje hipotetično napetost, pri kateri bi se material podaljšal za svojo osnovno dolžino, podaja elastično odpornost telesa proti deformaciji in je merilo elastične togosti telesa (Gorišek, 2004).

Modul elastičnosti določimo s formulo (...3) za tritočkovni preizkus in (...4) za štiritočkovni preizkus (Gorišek, 2004).

$$E_{L3} = \frac{L^3(F_2 - F_1)}{4bt^3(a_2 - a_1)} \quad (...3)$$

F₂ ... 40% sile porušitve
 F₁ ... 10% sile porušitve
 a₁ ... poves pri sili F₁
 a₂ ... poves pri sili F₂
 L ... razdalja med podporama
 b ... širina preizkušanca
 t ... višina preizkušanca

$$E_{L4} = \frac{3(L-f)m^2(F_2 - F_1)}{8bt^3(a_2 - a_1)} \quad (...4)$$

F₂ ... 40% sile porušitve
 F₁ ... 10% sile porušitve
 a₁ ... poves pri sili F₁
 a₂ ... poves pri sili F₂
 L ... razdalja med podporama
 b ... širina preizkušanca
 f ... razdalja obremenilnih sil
 m ... središčna razdalja merjenja
 t ... višina preizkušanca

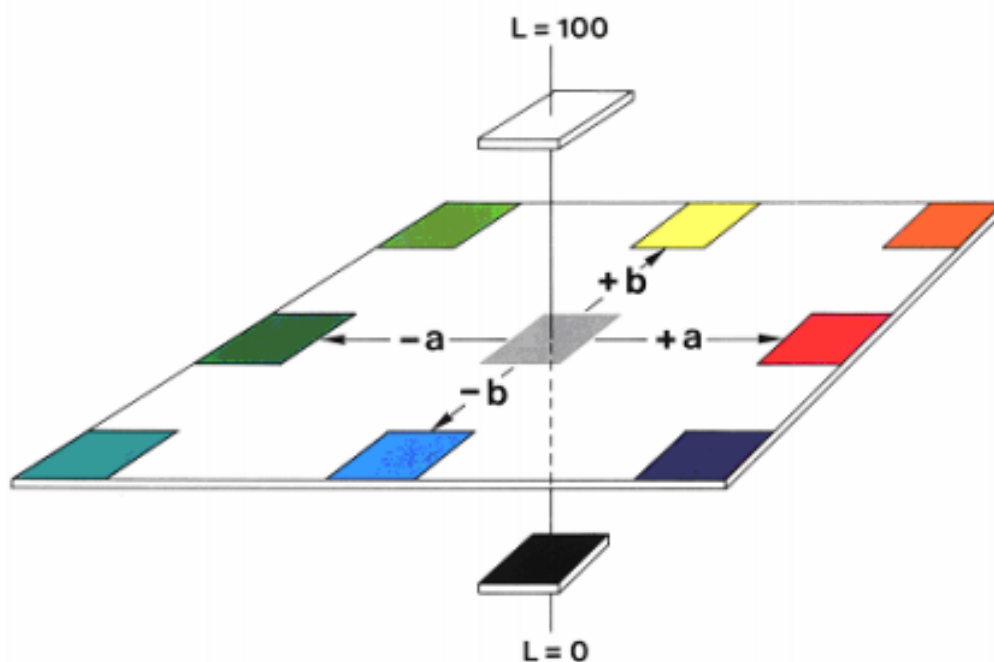
2.6 BARVNE SPREMEMBE TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA

Les med postopkom termične modifikacije potemni. Intenzivnost potemnitve je predvsem odvisna od ciljne temperature modifikacije, nekoliko manj od časa. V manjši meri pa na spremembo barve vpliva drevesna vrsta. Z uravnavanjem stopnje modifikacije lahko dobimo želeni odtenek barve, kar s pridom izkoriščajo v proizvodnji notranjih talnih, stenskih in pohištvenih oblog iz modificiranega lesa listavcev (Rep, 2008).

2.6.1 Numerično vrednotenje barv po CIE $L^*a^*b^*$ sistemu

Za zaznavo barve potrebujemo vir svetlobe, remisijo objekta in spektralno občutljivost očesa. Če želimo objektivno vrednotiti barve, moramo poznati teorijo nastanka čutne zaznave barve. Samo dobro poznavanje osnov o vidni zaznavi barve omogoča pretvorbo subjektivnega vtisa v objektivno, numerično vrednotenje barve. Leta 1931 je mednarodna organizacija CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) postavila temelje za numerično vrednotenje barve in barvnih razlik (Klajnšek, 1999).

Eden izmed sistemov za numerično vrednotenje barve je CIE $L^*a^*b^*$ sistem. Je najbolj izpopolnjen in praktično uporabljen sistem za numerično vrednotenje barve. Leta 1976 je bil definiran in najpogosteje uporabljen sistem z enakimi prostorskimi razmiki. Tridimenzionalni barvni prostor je definiran z osjo L^* in barvnima koordinatama a^* in b^* (slika 1).



Slika 1: CIE $L^*a^*b^*$ sistem (Golob in Golob,2001)

Sistem CIE $L^*a^*b^*$ predstavlja matematično kombinacijo kartezijskega in cilindričnega koordinatnega sistema. Barva je opredeljena s tremi osnovnimi vrednostmi:

- L^* - določa svetlost in zavzema vrednosti od 0 (absolutno črna) do 100 (absolutno bela),
- a^* - določa lego barve na rdeče (+) – zeleni (-) osi,
- b^* - določa lego barve na rumeno (+) – modri (-) osi.

2.6.2 Barvne spremembe po sistemu CIE $L^*a^*b^*$

Preverjanje barve in merjenje barvnih razlik z numerično metodo omogoča objektivno vrednotenje odnosa med barvami in kakovosti obarvanih izdelkov. Barvno razliko med vzorcema (ΔE^*) lahko izračunamo iz razlik koordinat trirazsežnega barvnega prostora po naslednji enačbi (...5).

$$\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{\frac{1}{2}} \quad (...5)$$

ΔL^* - razlika svetlosti,

Δa^* - razlika na osi rdeče/zeleno,

Δb^* - razlika na osi rumeno/modro

3 MATERIAL IN METODE

3.1 MATERIAL

V vseh primerih smo uporabljali pirav in nepirav masiven bukov les (*Fagus sylvatica* L.) pri katerih smo preučevali spremembo barve v odvisnosti od stopnje modifikacije in mehanske lastnosti pri različnih modifikacijah. Največji poudarek je bil na modulu elastičnosti, katerega želimo v nadaljevanju predstaviti.

Za vsako stopnjo modifikacije (T_1 170 °C, T_2 190 °C in T_3 210 °C), smo pripravili po 15 vzorcev piravega lesa in 5 kontrolnih vzorcev nepiravega lesa, skupno 60 vzorcev.

Dimenzija vzorcev je bila: debelina 20 mm, širina 20 mm in dolžina 400 mm (slika 2).



Slika 2: Slika vzorcev za modifikacijo

3.2 METODE

Pred začetkom modifikacije smo vzorce stehali na laboratorijski tehtnici na 0,01g natančno in jih ustrezno označili (slika 2). Pirave vzorce od 1 – 15 smo uporabljali pri temperaturi 170 °C, vzorce od 16 – 30 smo uporabili za temperaturo 190 °C in vzorce od 31 – 45 za temperaturo 210 °C. Vsaki od temperatur, (T_1 , T_2 , T_3), je sledilo 5 nepiravih kontrolnih vzorcev, ki smo jih označili z oznako »K« (kontrolni). Od 1K – 5K za temperaturo 170 °C, od 6K – 10K za temperaturo 190 °C in od 11K – 15K za temperaturo 210 °C.

Vzorce smo naložili v modifikacijsko komoro z določenim razmakom za boljšo cirkulacijo zraka med vzorci. V komoro smo vstavili tudi kontrolne vzorce enakih dimenzij, kateri je imel tudi sondo za merjenje temperature lesa ter izvedli postopek (patentna prijava Silvaproduct).

Postopek smo ponovili za vse tri ciljne temperature modifikacije.

Po končanem postopku modificiranja, vseh vzorcev, smo vzorce ponovno osušili, na laboratorijskem sušilniku (Kambič), na absolutno suho stanje (± 103 °C) in jih ponovno stehali ter določili izgubo mase (preglednica 1).

Nato je sledilo merjenje elastičnega modula na testirnem stroju ZWICK. Vzorci so bili pripravljani za tritočkovni upogibni preizkus. Zanimalo nas je, kakšne vrednosti dobimo pri relativno slabih vzorcih oz. biološko poškodovanem lesu, to je pirava bukovina po modifikaciji.

Parametri za preizkušance so bili nastavljeni tako, da smo pri vseh vzorcih dosegli točko loma. Pri tem smo ugotavljali silo loma ali porušitveno silo in modul elastičnosti ter izračunali povprečne vrednosti.

Hitrost obremenitve testirnega stroja je bila 7 mm/min.

Razdalja med podporami je bila 30 centimetrov.

4 REZULTATI

4.1 IZGUBA MASE

Izgubo mase smo določili z razliko mas vzorcev pred modifikacijo in po modifikaciji (preglednica 1). Vsi vzorci so bili pred vsakim tehtanjem osušeni na absolutno suho stanje. Ugotovili smo, da je največja izguba mase pri 210 °C, torej pri najvišji ciljni temperaturi termične modifikacije. Ugotovili smo tudi, da do sprememb v masi pride tudi pri najnižji stopnji to je pri 170 °C (preglednica 1).

Preglednica 1: Izguba mase piravih vzorcev in nepiravih kontrolnih vzorcev

št. vzorca	masa 1 [g]	masa 2 [g]	Δm [g]	izguba mase [%]	št. vzorca	masa 1 [g]	masa 2 [g]	Δm [g]	izguba mase [%]
1	102,13	101,14	0,99	0,97	16	101,19	98,82	2,37	2,34
2	105,85	104,87	0,98	0,93	17	101,80	99,03	2,77	2,72
3	115,08	113,99	1,09	0,95	18	99,98	97,50	2,48	2,48
4	109,93	108,87	1,06	0,96	19	102,43	100,34	2,09	2,04
5	115,46	114,30	1,16	1,00	20	115,44	112,93	2,51	2,17
6	99,44	98,50	0,94	0,95	21	105,49	102,72	2,77	2,63
7	102,85	101,88	0,97	0,94	22	107,22	104,21	3,01	2,81
8	91,94	91,05	0,89	0,97	23	106,00	102,88	3,12	2,94
9	112,67	111,72	0,95	0,84	24	98,84	95,94	2,90	2,93
10	101,12	100,35	0,77	0,76	25	105,39	103,06	2,33	2,21
11	116,02	115,00	1,02	0,88	26	97,71	94,89	2,82	2,89
12	94,49	93,48	1,01	1,07	27	107,10	103,95	3,15	2,94
13	111,00	109,88	1,12	1,01	28	109,31	106,30	3,01	2,75
14	108,93	107,96	0,97	0,89	29	115,43	112,23	3,20	2,77
15	111,96	111,06	0,90	0,80	30	113,26	110,37	2,89	2,55

Povpr. pri 170°C:	106,59	105,60	0,99	0,93
-------------------	--------	--------	------	------

Povpr. pri 190°C:	105,77	103,01	2,76	2,61
-------------------	--------	--------	------	------

št. vzorca	masa 1 [g]	masa 2 [g]	Δm [g]	izguba mase [%]	št. vzorca	masa 1 [g]	masa 2 [g]	Δm [g]	izguba mase [%]
31	107,86	99,58	8,28	7,68	1K	116,40	100,23	16,17	13,89
32	98,12	89,45	8,67	8,84	2K	110,72	109,80	0,92	0,83
33	106,73	96,50	10,23	9,58	3K	103,03	102,13	0,90	0,87
34	112,30	103,73	8,57	7,63	4K	122,10	121,42	0,68	0,56
35	102,54	94,23	8,31	8,10	5K	105,31	95,95	9,36	8,89
36	102,30	94,47	7,83	7,65	6K	110,59	110,02	0,57	0,52
37	102,69	94,66	8,03	7,82	7K	102,49	94,73	7,76	7,57
38	108,67	99,45	9,22	8,48	8K	103,45	103,30	0,15	0,14
39	96,07	87,37	8,70	9,06	9K	121,62	116,75	4,87	4,00
40	106,02	96,41	9,61	9,06	10K	109,58	108,59	0,99	0,90
41	98,96	57,10	41,86	42,30	11K	114,18	112,60	1,58	1,38
42	106,27	97,58	8,69	8,18	12K	117,87	114,13	3,74	3,17
43	97,39	89,67	7,72	7,93	13K	113,05	104,58	8,47	7,49
44	103,54	95,11	8,43	8,14	14K	109,33	106,36	2,97	2,72
45	98,64	91,03	7,61	7,71	15K	118,83	117,63	1,20	1,01

Povpr. pri 210°C:	103,21	92,42	10,78	10,44
-------------------	--------	-------	-------	-------

Povpr. pri NM vzorcih:	111,90	107,88	4,02	3,59
------------------------	--------	--------	------	------

4.2 SPREMEMBA BARVE

Sprememba barve pri piravi bukovini je odvisna od stopnje modifikacije. Les z višanjem temperature prehaja iz svetle barve v vedno temnejšo barvo. Največja razlika se opazi pri največji stopnji ciljne temperature modifikacije, to je pri 210 °C. Sprememba barve se začne spreminjati, ko preidemo točko parjenja (150 °C) in pričnemo z modifikacijo. V našem primeru pri 170 °C je že vidna temnejša obarvanost lesa (slika 3).

Primerjali smo vrednosti L^* , ki označujejo barvo na črno – beli osi (preglednica 2).

Preglednica 2: Sprememba barve pirave in nepirave bukovine

Vzorci	Temperatura [°C]	L^*
Kontrolni piravi nemodificirani		73,26
Pirava/170	170	59,08
Pirava/190	190	48,70
Pirava/210	210	36,16
Kontrolni nepiravi nemodificirani		73,26
Pirava/170	170	59,08
Pirava/190	190	48,70
Pirava/210	210	36,16



Slika 3: Sprememba barve

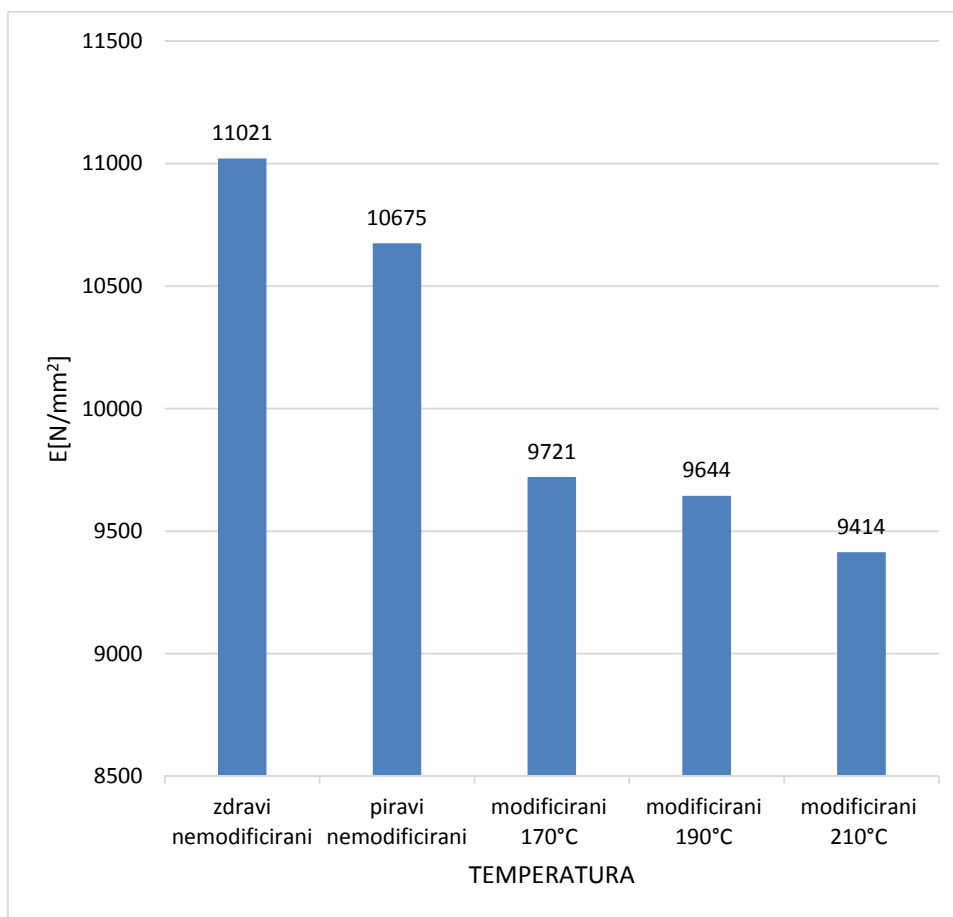
4.3 MEHANSKE LASTNOSTI

Za mehanske lastnosti je piravost pri bukovini kritičen faktor. Ugotovili smo, da se vzorcem, ki so bili okuženi z glivami povzročiteljicami piravosti, močno poslabšajo lastnosti v primerjavi s kontrolnimi vzorci, oziroma nepiravim lesom. S postopkom termične modifikacije lesu nekoliko izboljšamo lastnosti, vendar so te spremembe za uporabo v okolju zanemarljive.

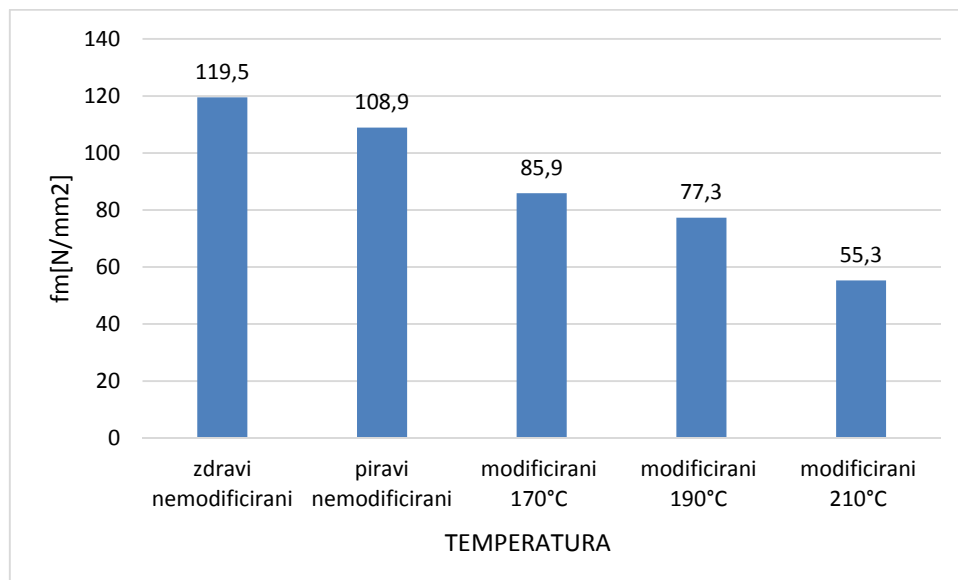
Po opravljenih poizkusih smo dobili naslednje rezultate (preglednica 3). V obeh primerih je iz grafov (slika 4 in slika 5) razvidno, da s postopkom termične modifikacije vrednosti padajo.

Preglednica 3: Modul elastičnosti in upogibna trdnost zdravih, piravih in modificiranih vzorcev

		E [N/mm ²]	fm [N/mm ²]
Zdravi NM Vzorci 1.1-1.10	Povprečna vrednost	11021	119,5
	Standardni odklon	1819,2	37,67
	Koeficient variabilnosti	17%	32%
Piravi NM Vzorci 1K-15K	Povprečna vrednost	10675	108,9
	Standardni odklon	1208,2	14,5
	Koeficient variabilnosti	17%	32%
Modificirani pri 170°C Vzorci 1-15	Povprečna vrednost	9721	85,9
	Standardni odklon	1716,5	27
	Koeficient variabilnosti	18%	31%
Modificirani pri 190°C Vzorci 16-30	Povprečna vrednost	9644	77,3
	Standardni odklon	1576	21,6
	Koeficient variabilnosti	16%	28%
Modificirani pri 210°C Vzorci 31-45	Povprečna vrednost	9414	55,3
	Standardni odklon	1845,3	19,3
	Koeficient variabilnosti	20%	35%



Slika 4: Vpliv stanja vzorcev in temperatura modifikacije na modul elastičnosti



Slika 5: Vpliv stanja vzorcev in temperatura modifikacije na upogibno trdnost

5 RAZPRAVA

Glede na čas in okoliščine v katerih živimo, je potrebno upoštevati okoljsko zakonodajo tudi na področju zaščite lesa. Termična modifikacija je do danes toliko napredovala, da se uporablja v praksi. Zagotovo lahko trdimo, da je to okolju prijazna zaščita lesa. Zavedati se moramo, da pri postopkih termične modifikacije ne uporabljamo kemikalij, ki bi negativno vplivale na izdelke in okolje.

S postopkom termične modifikacije lesu spremenimo lastnosti. Predvsem je v ospredju dimenzijska stabilnost, kar pomeni, da se les znatno manj krivi in poka. Praktično lahko govorimo, da se les umiri.

Pirave bukovine ne moremo uporabiti v konstrukcijske in pohištvene namene, je pa odlična za izdelavo umetniških estetskih predmetov in spominkov.

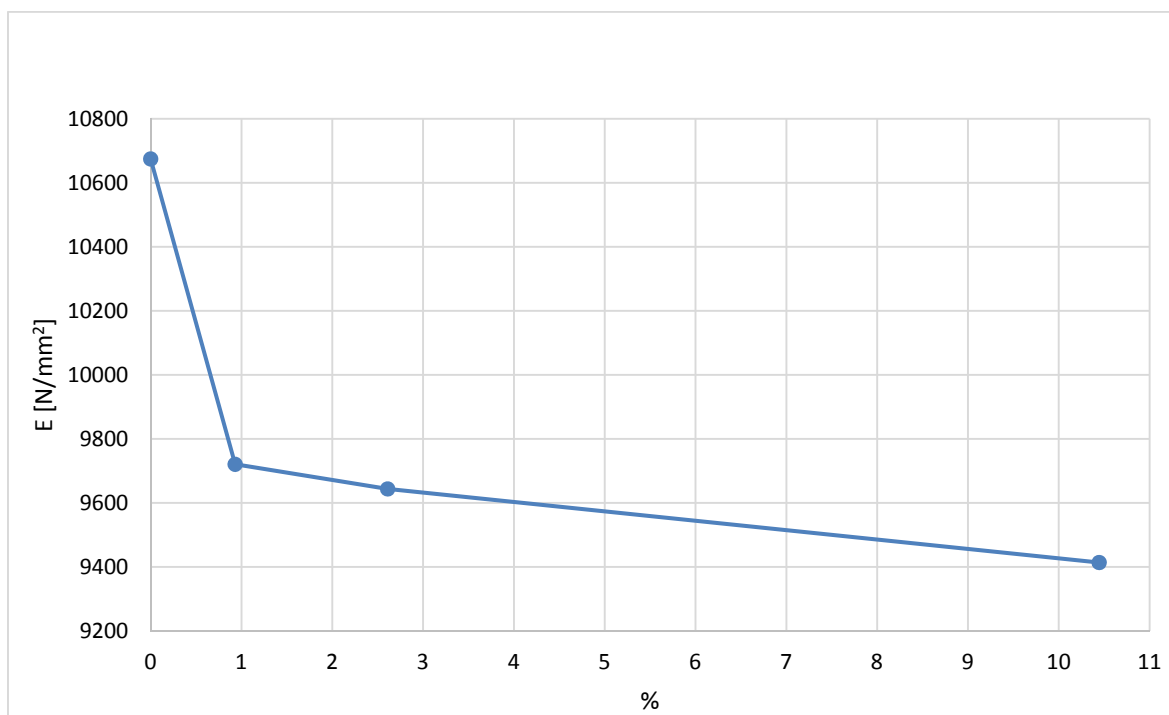
Zavedati se moramo, da se s stopnjo modifikacije mehanske lastnosti lesa poslabšajo. Izguba mase je zelo pomemben parameter, saj kar najbolj vpliva na mehanske lastnosti. Izguba mase je odvisna od temperature in časa trajanja modifikacije.

Sprememba barve je povezana s postopkom termične modifikacije in tudi z izgubo mase. Govorimo predvsem o potemnitvi bukovine. S povečanjem temperature les potemni. Tak postopek je popolnoma nadomestljiv z barvanjem ali luženjem izdelkov, vendar je obarvanost odvisna od drevesne vrste. S stopnjo modifikacije pa lahko uravnavamo ton obarvanja.

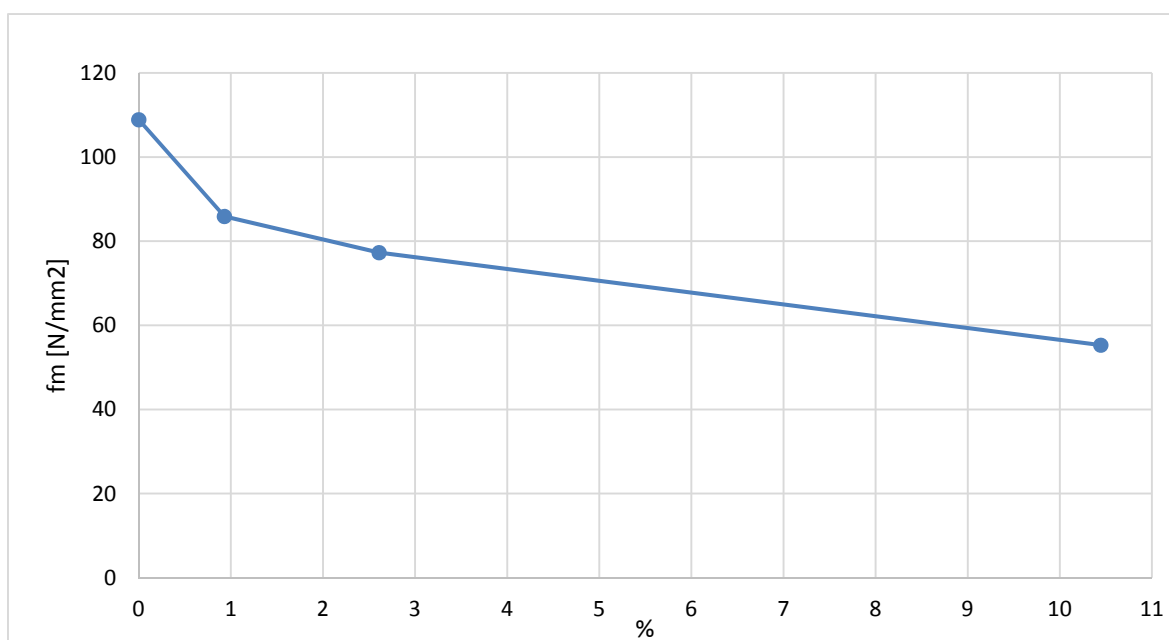
Pri mehanskih lastnostih pirave bukovine se s postopkom termičnega modificiranja močno poslabšajo upogibna trdnost in modul elastičnosti. Bolj kot je izpostavljen temperaturi večje je poslabšanje. Tako ne moremo govoriti o konstrukcijski primernosti modificiranega lesa, vendar pa je tak les popolnoma primeren za dekorativne izdelke in fronte pohištva v vsakdanjem življenju.

Pisanost pirave bukovine je zelo izrazita in s postopkom termične modifikacije pridobimo estetsko vrednost.

Po površini so modificirani vzorci na otip bolj trdi glede na kontrolne vzorce.



Slika 6: Odvisnost modula elastičnosti v odstotkih



Slika 7: Odvisnost upogibne trdnosti v odstotkih

6 SKLEPI

Z raziskavo smo ugotovili, da termična modifikacija poslabša mehanske lastnosti že tako oslabelemu piravemu lesu.

Pri spremembi barve smo ugotovili, da z višanjem temperature les potemni (slika 3). Zanimivo je, da že pri najmanjši stopnji modifikacije začne les temniti in v zadnji stopnji modifikacije praktično počrni, kar smo dokazali s sistemom $CIE L^*a^*b^*$.

Modul elastičnosti in upogibna trdnost se pri piravi modificirani bukovini močno zmanjša. S postopkom modifikacije smo povečali krhkost materialu, dimenzijsko stabilnost, odpornost na škodljivce in zmanjšali vpijanje vlage.

Ugotovili smo tudi, da je površina takega lesa še vedno dovolj kvalitetna in odporna proti obrabi, kar nam omogoča vgrajevanje v izdelke, ki zahtevajo odpornost proti površinski obrabi. Vendar moramo paziti, da izdelek ni konstrukcijsko obremenjen.

7 VIRI

- ASTM D 2244 – 93. Standard Test Method for Calculation Differences From Instrumentally Measured Color Coordinates 1993: 4 str.
- Golob V., Golob D. 2001 Teorija barvne matrike. V: Interdisciplinarnost barve, Društvo koloristov Slovenije. (ur.). Maribor: 201-229
- Gorišek Ž. 1994. Sušenje lesa. Ljubljana, Lesarska založba, Zveza društev inženirjev in tehnikov lesarstva Slovenije: 235 str.
- Jämsä S., Viitaniemi P. 2001. Heat treatment of wood – better durability without Chemicals. V: Review on heat treatment of wood. Rapp A.O. (ur.) Luxembourg, Office for Official publications of the European Communities: 6 str.
- Klajnšek Gunde M. 1999. Svetloba in barve. V: Numerično vrednotenje barve. Strokovni seminar. Maribor, Društvo koloristov Slovenije: 1-10
- Kljun U. 2004. Termična modifikacija lesa v vakuumu. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 36 str.
- Militz H. 2002. Thermal treatment of wood: European Processes and their background. IRG/WP 02-40241: 18 str.
- Patzelt M., Stingl R., Teischinger A. 2002. Thermische Modifikation von Holz und deren Einfluss auf ausgewählte Holzeigenschaften. V: Modifiziertes Holz: Eigenschaften und Märkte. Teischinger A., Stingl R. (ur.). Wien, LIGNOVISIONEN: 101-147
- Pohleven F. 2009. "Skripta za predmet patologija lesa, šolsko leto 2009/2010."
- Pohleven F., Rep G. 2004. Postopek termične modifikacije lesa v vakuumu : številka patentne prijave P-200400064. Ljubljana, Urad Republike Slovenije za intelektualno lastnino: 6 str.
- Raggers J. 2007 Process / Durability, Larenstein, velp, Nederland.
<http://www.ivalsa.cnr.it/euris/english/4/4.pdf>
- Rapp A.O., Sailer M. 2001a. 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 Publication of the European Communities: 18 str.
- Rapp O.A., Sailer M. 2001b. Oil-heat-treatment of wood – process and properties. Drvna industrija, 52, 2: 63-70
- Rep G. 2008. Modificiran les. Lesarski utrip, 14, 2: 22-23

- Rep G., Pohleven F. 2002. Wood modification – a promising method for wood preservation = Modifikacija lesa – obečavajuća metoda za zaštitu drva. *Drvna industrija*, 52, 2: 71-76
- Rep G., Pohleven F., Bučar B. 2004. Characteristics of thermally modified wood in vacuum. V: International Research Group on Wood Preservation. IRG Documents 2004 : IRG 35, 6-10 June 2004, Ljubljana, Slovenia. [Stockholm]: IRG Secretariat, 2004, iRG/WP 04-40287.pdf : 9 str.
- Teischinger A., Stingl R. 2002. Modifizierstes Holz: Eigenschaften und Märkte. Institut für Holzorschung. Wien, Universität für Bodenkultur: 226 str.
- Tjeerdsma B.F., Boonstra M., Pizzi A., Tekely P., Militz H. 1998. Characterisation of thermal modified wood: molecular reasons for Wood performance improvement. CP- MAS C NMR characterisation of thermal modified wood. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 56: 149-153
- Veg T. 2009. Termična modifikacija različnih vrst lesa. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 1 – 9 str.
- Vernois M. 2001. Heat treatment of wood in France – state of the art. V: Review on heat treatments of wood. Raap A.O. (ur.). Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities: 8 str.

ZAHVALA

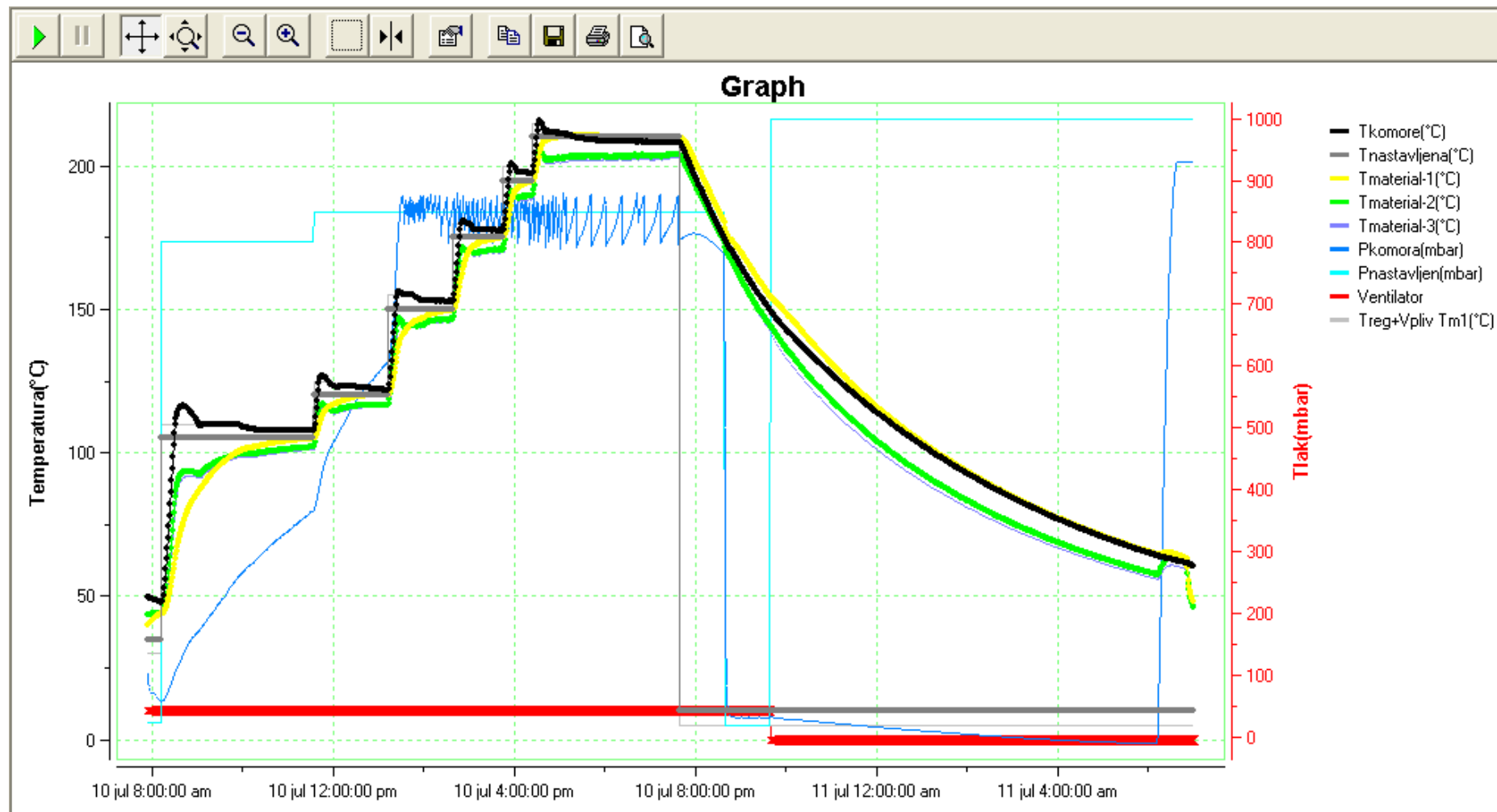
Zahvaljujem se mentorju, prof. dr. Francu Pohlevnu za pomoč in usmerjanje pri izdelavi diplomskega dela.

Hvala recenzentu, prof. Milanu Šerneku ter ostalim, ki so mi pomagali pri izdelavi diplomskega projekta.

Zahvaljujem se tudi svojim domačim, ki so mi omogočili študij na Biotehniški fakulteti.

PRILOGE

Priloga 1: Potek termične modifikacije



Priloga 2: Numerično vrednotenje barve piravih modificiranih in nemodificiranih vzorcev

PIRAVA BUKEV 170°C	L^*	a^*	b^*	PIRAVA BUKEV 190°C	L^*	a^*	b^*
1	61,45	8,18	20,91	16	46,58	10,15	20,96
2	61,33	7,7	20,45	17	47,96	9,79	19,98
3	53,55	8,46	18,04	18	50,79	8,93	20,17
4	57,52	7,59	19,9	19	53,37	8,63	21,24
5	62,43	7,7	21,7	20	46,08	8,67	16,87
6	57,42	8,81	21,38	21	45,6	9,12	17,17
7	58,36	9	22,82	22	47,95	8,65	18,77
8	60,96	9,09	24,93	23	44,14	7,85	15,63
9	58,83	8,38	20,99	24	50,01	10,39	21,79
10	58,37	9,06	22,83	25	53,31	9,47	21,45
11	59,41	8,47	21,19	26	49,51	9,2	20,36
12	59,7	8,42	22,48	27	53,77	7,76	19,81
13	53,31	7,27	17,06	28	46,85	9,32	19,2
14	60,14	8,29	21,23	29	46,68	8,54	17,68
15	63,42	7,53	21,83	30	47,93	8,88	17,83
povprečna vrednost	59,08	8,26	21,18	povprečna vrednost	48,70	9,02	19,26
MIN	53,31	7,27	17,06	MIN	44,14	7,76	15,63
MAX	63,42	9,09	24,93	MAX	53,77	10,39	21,79
STDEV	2,88	0,59	1,91	STDEV	3,01	0,74	1,87

PIRAVA BUKEV 210°C	L^*	a^*	b^*	PIRAVA BUKEV Nemodificirana	L^*	a^*	b^*
31	37,74	7,99	13,91	1K	67,51	7,58	20,06
32	36,14	7,42	12,91	2K	78,78	4,21	21,05
33	34,17	6,93	11,02	3K	70,61	7,36	20,72
34	38	8,22	14,37	4K	78,05	6,17	23,07
35	36,29	7,55	12,47	5K	76,2	5,36	21,34
36	25,93	5,56	7,31	6K	64,51	8,53	20,86
37	36,05	7,22	12,88	7K	81,32	3,86	19,45
38	38,75	7,61	12,85	8K	71,21	7,36	21,48
39	35,8	8,76	14,52	9K	70,56	6,75	19,33
40	40,86	8,07	14,43	10K	72,48	6,07	20,11
41	37,76	7,73	12,78	11K	70,08	5,25	19,3
42	35,42	7,67	11,7	12K	78,45	4,48	19,61
43	38,84	8,65	15,33	13K	76,26	5,41	21,57
44	38,06	7,84	13,91	14K	74,96	5,87	20,23
45	32,6	8,26	12,63	15K	67,97	6,19	20,13
povprečna vrednost	36,16	7,699	12,87	povprečna vrednost	73,26	6,03	20,55
MIN	25,93	5,56	7,31	MIN	64,51	3,86	19,3
MAKS	40,86	8,76	15,33	MAKS	81,32	8,53	23,07
STDEV	3,48	0,77	1,92	STDEV	4,87	1,33	1,04

Priloga 3: Numerično vrednotenje barve nepiravih modificiranih in nemodificiranih vzorcev

NEPIRAVA BUKEV 170°C				NEPIRAVA BUKEV 190°C			
	<i>L*</i>	<i>a*</i>	<i>b*</i>		<i>L*</i>	<i>a*</i>	<i>b*</i>
	55,30	8,94	19,36		44,46	9,07	17,19
	54,59	8,99	19,53		41,57	9,75	17,08
8K	54,88	8,77	18,96	9K	44,45	8,45	15,28
	56,68	8,75	19,19		42,78	9,59	17,22
	53,91	8,73	18,13		42,86	9,51	16,81
	53,31	8,81	18,83		45,23	9,16	17,75
	53,35	8,64	18,71		46,13	9,29	17,44
11K	52,91	8,64	17,81	12K	44,79	9,00	16,81
	54,03	8,60	17,96		44,12	9,08	16,99
	56,89	9,28	19,66		44,40	8,85	16,59
	53,65	8,50	17,66		44,75	8,93	17,03
	52,82	8,53	18,31		45,44	9,18	17,81
15K	56,95	9,25	19,36	14K	47,19	8,80	17,22
	56,85	9,03	19,44		46,27	8,91	17,61
	55,19	8,76	18,89		42,26	8,83	16,61
povprečna vrednost	54,75	8,81	18,79	povprečna vrednost	44,45	9,09	17,03
MIN	52,82	8,50	17,66	MIN	41,57	8,45	15,28
MAX	56,95	9,28	19,66	MAX	47,19	9,75	17,81
STDEV	1,50	0,24	0,66	STDEV	1,56	0,34	0,61

NEPIRAVA BUKEV 210°C				NEPIRAVA BUKEV Nemodificirana			
	L^*	a^*	b^*		L^*	a^*	b^*
	34,81	7,19	11,65		70,76	7,98	18,25
	34,49	6,93	11,24	1K	70,87	8,25	18,76
5K	32,58	6,53	10,06		70,98	8,06	18,09
	33,79	6,71	10,76		63,25	8,70	20,59
	33,41	6,26	9,79	2K	63,99	8,40	19,88
	35,95	7,84	13,18		64,17	8,46	18,70
	35,41	7,87	12,94		71,50	7,94	20,19
7K	34,33	7,59	12,40	16K	74,46	7,41	19,56
	32,73	6,76	9,99		76,74	6,39	19,08
	34,77	7,61	12,73		68,90	8,55	20,97
	36,88	7,64	12,16	17K	66,93	8,78	20,80
	35,46	7,25	11,07		66,03	9,53	21,56
13K	35,10	7,25	11,11		68,01	8,39	20,99
	35,88	7,52	11,58	18K	64,55	8,79	20,67
	36,65	7,56	11,94		62,14	8,98	19,98
povprečnavrednost	34,82	7,23	11,51	povprečnavrednost	68,22	8,31	19,87
MIN	32,58	6,26	9,79	MIN	62,14	6,39	18,09
MAX	36,88	7,87	13,18	MAX	76,74	9,53	21,56
STDEV	1,30	0,50	1,07	STDEV	4,16	0,70	1,05

Priloga 4: Rezultati meritev elastičnega modula in upogibne trdnosti

Zaporedna številka	Legends	Specimen identifier	t	b	F ₁	F ₂	a ₁	a ₂	F _{max}	E _m	f _m	l ₁	t _{Test}
		Vzorci številka	mm	mm	N	N	mm	mm	N	N/mm ²	N/mm ²	mm	s
1		1	20,88	20,04	293	383	1,54	1,97	389	7690	20	300	25
2		2	19,98	20,21	353	462	1,56	1,97	470	10852	26,2	300	25
3		3	20,5	19,89	136	177	1,81	1,99	180	8837	9,69	300	25
4		4	20,45	20,05	268	350	1,55	1,97	356	7686	19,1	300	25
5		5	19,8	20,36	310	405	1,55	1,97	412	9604	23,2	300	25
6		6	19,35	20,13	334	436	1,56	1,97	444	11457	26,5	300	25
7		7	20,3	19,6	353	461	1,54	1,97	470	10322	26,2	300	25
8		8	18,41	20,52	196	257	1,61	1,98	261	8620	16,9	300	25
9		9	20,21	20,11	268	351	1,54	1,97	358	7866	19,6	300	25
10		10	19,8	20,44	298	390	1,57	1,98	396	9462	22,2	300	25
11	e modul	11	20,04	20,28	292	381	1,52	1,97	388	8251	21,4	300	25
12		12	19,9	20,59	250	326	1,56	1,97	332	7662	18,3	300	25
13		13	19,81	20,34	421	550	1,56	1,97	560	13320	31,6	300	25
14		14	20,43	19,88	310	405	1,52	1,97	413	8386	22,4	300	25
15		15	20,56	20,24	447	583	1,56	1,97	594	12567	31,2	300	25
16		16	19,4	20,31	256	335	1,57	1,97	341	8869	20,1	300	25
17		17	20,15	19,12	306	400	1,55	1,97	408	9567	23,6	300	25
18		18	19,96	20,48	279	365	1,53	1,97	371	8088	20,5	300	25
19		19	20,13	20,49	358	467	1,55	1,97	476	10567	25,8	300	25
20		20	20,52	19,86	397	519	1,53	1,97	528	10805	28,4	300	25
21		21	20,03	20,3	381	498	1,53	1,97	507	10908	28	300	25

22	22	20,59	19,59	269	351	1,53	1,97	358	7362	19,4	300	25
23	23	20,54	20,12	339	443	1,56	1,97	451	9673	23,9	300	25
24	24	20,24	19,9	354	462	1,54	1,97	470	10400	26	300	25
25	25	20	20,87	340	444	1,52	1,97	452	9447	24,4	300	25
26	26	20,63	19,65	289	378	1,53	1,97	385	7848	20,7	300	25
27	27	20,49	20,52	338	441	1,54	1,97	449	9115	23,5	300	25
28	28	20,46	20,35	327	427	1,54	1,97	435	9056	23	300	25
29	29	19,9	20,16	324	423	1,54	1,97	431	9800	24,3	300	25
30	30	20,34	19,57	354	463	1,56	1,97	472	10668	26,2	300	25
31	31	20,35	20,21	401	524	1,52	1,97	534	10924	28,7	300	25
32	32	19,92	20,52	282	369	1,54	1,97	376	8354	20,8	300	25
33	33	19,9	20,59	384	501	1,57	1,98	510	12163	28,1	300	25
34	34	20,25	20,4	357	467	1,55	1,97	475	10373	25,6	300	25
35	35	20,54	20,45	266	348	1,52	1,97	355	6952	18,5	300	25
36	36	20,42	19,85	259	338	1,56	1,97	344	7667	18,7	300	25
37	37	20,42	20,12	277	362	1,53	1,98	368	7506	19,7	300	25
38	38	20,19	20,18	236	308	1,71	1,98	314	10614	17,2	300	25
39	39	19,45	20,58	325	425	1,55	1,97	433	10567	25	300	25
40	40	20,54	20,45	384	501	1,51	1,97	510	9755	26,6	300	25
41	41	20,37	20,17	273	357	1,55	1,97	363	7850	19,5	300	25
42	42	19,95	20,45	361	472	1,55	1,97	480	10936	26,6	300	25
43	43	20,06	20,37	338	442	1,56	1,97	449	10289	24,7	300	25
44	44	20	20,38	333	435	1,54	1,97	444	9725	24,5	300	25
45	45	19,17	20,48	343	448	1,56	1,97	456	11929	27,3	300	25
46	10K	19,7	20,27	342	448	1,56	1,97	455	10922	26,1	300	25
47	11K	19,96	20,46	447	583	1,52	1,97	595	12609	32,9	300	25
48	12K	19,47	19,95	106	139	1,84	2	141	9746	8,38	300	25
49	13K	19,64	20,2	308	403	1,54	1,97	410	9784	23,7	300	25

50	14K	19,48	20,1	374	488	1,55	1,97	497	12424	29,3	300	25
51	15K	19,85	19,84	375	490	1,57	1,98	499	12137	28,7	300	25
52	1K	20,24	19,4	399	521	1,53	1,97	531	11586	30	300	25
53	2K	19,8	20,8	343	448	1,53	1,97	456	9975	25,2	300	25
54	3K	20,31	19,56	349	456	1,56	1,98	463	10578	25,8	300	25
55	4K	20,17	20,6	374	488	1,55	1,97	498	10932	26,7	300	25
56	5K	19,61	20,46	327	427	1,56	1,97	435	10643	24,9	300	25
57	6K	19,97	20,2	322	420	1,57	1,97	428	10268	23,9	300	25
58	7K	19,78	20,62	295	386	1,55	1,97	393	9091	21,9	300	25
59	8K	19,94	20,3	330	431	1,53	1,97	439	9688	24,5	300	25
60	9K	20	20,3	476	622	1,52	1,97	634	13631	35,2	300	25

Zaporedna številka	Specimen identifier	t	b	F ₁	F ₂	a ₁	a ₂	F _{max}	E _m	f _m	l ₁	t _{Test}
	Vzorci številka	mm	mm	N	N	mm	mm	N	N/mm ²	N/mm ²	mm	s
1	1	19,16	20,41	142	568	0,67	2,4	1420	1162	8,54	300	52
2	2	19,57	19,08	129	518	0,59	2,06	1290	1247	7,97	300	49
3	3	19,84	20,49	201	804	0,84	2,95	2010	12068	112	300	68
4	4	20,2	20,27	253	1011	0,96	3,31	2530	1302	13,8	300	109
5	5	20,49	19,77	134	536	0,71	2,49	1340	896	7,26	300	53
6	6	20,16	20,39	244	975	0,87	3,03	2440	1366	13,2	300	89
7	7	19,84	20,27	182	730	0,8	2,81	1820	11592	103	300	61
8	8	20,25	20,65	128	511	0,75	2,58	1280	8209	67,9	300	54
9	9	18,9	20,39	127	509	0,76	2,71	1270	960	7,86	300	58
10	10	20,21	20	305	1219	1,06	3,7	3050	1417	16,8	300	102
11	11	19,94	20,26	259	1038	1,02	3,59	2590	1278	14,5	300	86
12	12	20,59	19,83	281	1122	0,97	3,33	2810	1390	15	300	102
13	13	20,16	20,23	215	860	0,89	3,06	2150	12106	118	300	66
14	14	19,82	20,15	177	709	1,08	3,51	1770	9413	101	300	82
15	15	20,27	19,96	80	320	0,47	1,66	799	816	4,39	300	48
16	10k	20,06	19,82	197	789	0,89	3,13	1970	11138	111	300	78
17	4k	20	20,25	283	1132	1,09	3,82	2830	12951	157	300	89
18	6k	20,14	19,74	238	952	1,11	3,8	2380	11121	134	300	87

