

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Simon ERŽEN

**VPLIV IZPOSTAVITVE ZGOŠČENEGA LESA TOPOLA IN
DUGLAZIJE GLIVAM RAZKROJEVALKAM NA MEHANSKE
LASTNOSTI, BARVO IN KEMIJSKE LASTNOSTI**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2014

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Simon ERŽEN

**VPLIV IZPOSTAVITVE ZGOŠČENEGA LESA TOPOLA IN
DUGLAZIJE GLIVAM RAZKROJEVALKAM NA MEHANSKE
LASTNOSTI, BARVO IN KEMIJSKE LASTNOSTI**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

**EXPOSURE OF DENSIFIED POPLAR AND DOUGLAS WOOD
TO FUNGHUS DECAY AND ITS INFLUENCE
ON MECHANICAL, COLOUR AND CHEMICAL PROPERTIES**

GRADUATION THESIS

University studies

Ljubljana, 2014

Diplomsko delo je zaključek univerzitetnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za patologijo in zaščito lesa Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. FTIR spektre mase in dimenzije smo posneli in izmerili v laboratoriju Katedre za patologijo in zaščito lesa, meritve elastičnih modulov pa v laboratoriju Katedre za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Miha Humarja, za somentorico doc. dr. Andrejo Kutnar in za recenzenta prof. dr. Milana Šerneka.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

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.

Simon Eržen

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Dn

DK UDK 630*842:630*844.2

KG les/duglazija/topol/zgoščevanje/mehanske lastnosti/barva/gostota/FTIR/

Trametes versicolor/Gloeophyllum trabeum

AV ERŽEN, Simon

SA HUMAR, Miha (mentor)/KUTNAR Andreja (somentor)/ŠERNEK Milan (recenzent)

KZ SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, Cesta VIII/34

ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

LI 2014

IN VPLIV IZPOSTAVITVE ZGOŠČENEGA LESA TOPOLA IN DUGLAZIJE
GLIVAM RAZKROJEVALKAM NA MEHANSKE LASTNOSTI, BARVO
IN KEMIJSKE LASTNOSTI

TD Diplomsko delo (univerzitetni študij)

OP VIII, 51 str., 6 pregl., 23 sl., 46 vir.

IJ sl

JI sl/en

AI Zaradi vse večje okoljske ozaveščenosti, velikih potreb po konstrukcijskem lesu in krčenju naravnih sestojev se precej pozornosti posveča iskanju novih metod za pridobivanje kakovostnega lesa za konstrukcijsko uporabo. Zgoščevanje lesa ima že dolgoletno tradicijo in znova stopa v ospredje zaradi vse večjega pomena izrabe obnovljivih virov, tudi plantažnega lesa. Zgoščen les ima boljše mehanske lastnosti od nezgoščenega iste vrste. Želeli smo preveriti, ali je mogoče zgoščen plantažni les uporabiti v konstrukcijske namene tudi v primeru izpostavitve biološkim dejavnikom. Uporabili smo zgoščen les duglazije in hibridnega topola, obdelan s termo-hidro-mehansko metodo zgoščevanja. Les obeh vrst je bil obdelan po 3 različnih postopkih zgoščevanj, ki so se razlikovali glede na temperaturo in vlažnost v komori v času mehanskega stiskanja vzorcev: 170 °C v prehodnih pogojih vodne pare (TS); 170 °C z nasičeno vodno paro (SS); 170 °C z nasičeno vodno paro (SS) ter z dodatnim segrevanjem do 200 °C (SS+PHT). Vzorce lesa smo izpostavili glivam navadne tramovke in pisane ploskocevke za obdobje 2, 4, 6 in 8 tednov in opazovali spremembe dimenzij, barve, izgube mase, mehanskih lastnosti in kemičnih sprememb. Rezultati so pokazali, da so v proučevanih postopkih zgoščevanja uporabljene temperature prenizke, in trajanje izpostavitve tem temperaturam prekratko, za izboljšanje odpornosti zgoščenega lesa proti glivam. Zato zgoščen les, izpostavljen biološkemu razkroju, brez zaščite ni ustrezen za uporabo v konstrukcijske namene.

KEY WORDS DOCUMENTATION

- DN Dn
- DC UDC 630*842:630*844.2
- CX wood/Douglas fir/poplar/thickening/mechanical properties/colour/thickness/FTIR/
Trametes versicolor/Gloeophyllum trabeum
- AU ERŽEN, Simon
- AA HUMAR Miha (supervisor)/KUTNAR Andreja (co-advisor)/ŠERNEK Milan
(reviewer)
- PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, Cesta VIII/34
- PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science
and Technology
- PY 2014
- TI EXPOSURE OF DENSIFIED POPLAR AND DOUGLAS WOOD
TO FUNGHUS DECAY AND ITS INFLUENCE
ON MECHANICAL, COLOUR AND CHEMICAL PROPERTIES
- DT Graduation thesis (University studies)
- NO VIII, 51 p., 6 tab., 23 fig., 46 ref.
- LA sl
- AL sl/en
- AB Due to increased environmental awareness, large demands for structural timber and shrinking natural stands, much attention is paid to finding new methods for the production of quality wood, also in structural use. Wood densification has had a long tradition, and it is again coming into focus because of the growing importance of renewable land resources, also of plantation wood. Densified wood has better mechanical properties than uncompressed wood of the same species. The thesis tries to verify if the densified plantation timber could be used for construction purposes also in the case of exposure to biological influence. Compressed Douglas fir and hybrid poplar wood were used and treated with thermo-hydro-mechanical method of densification by 3 different procedures of compression, varying according to the temperature and humidity in the chamber during the mechanical compression of samples: 170 °C in the transient conditions of water vapor (TS); 170 °C with saturated water vapor (SS); 170 °C with saturated water vapor (SS), and by further heating to 200 °C (SS+PHT). Wood specimens were exposed to *Gloeophyllum trabeum* and *Trametes versicolor* species for a period of 2, 4, 6 and 8 weeks, and the changes in dimension, colour, weight loss, mechanical properties and chemical characteristics of wood were observed. The results showed that in the studied processes the densification temperature used was too low and the duration of exposure to heat was too short for densified wood to have an improved resistance to fungi. Therefore, densified wood without an adequate protection against biological degradation is not suitable for structural use.

KAZALO VSEBINE

	str.
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	VIII
1 UVOD	1
2 PREGLED OBJAV	3
2.1 LES S PLANTAŽ.....	3
2.2 ZGOŠČEVANJE LESA.....	3
2.2.1 Sorptivnost in dimenzijska stabilnost zgoščenega lesa	6
2.2.2 Postopki THM zgoščevanja lesa	6
2.3 FTIR SPEKTROSKOPIJA.....	7
2.3.1 FTIR spekter zgoščenega lesa	8
2.4 MEHANSKE LASTNOSTI LESA IN ZGOŠČENEGA LESA.....	10
2.5 NAVADNA AMERIŠKA DUGLAZIJA (<i>PSEUDOTSUGA MENZIESII</i>).....	11
2.5.1 Anatomska zgradba duglazije	12
2.6 AMERIŠKI ČRNI TOPOL (<i>POPULUS DELTOIDES</i>).....	13
2.6.1 Anatomska zgradba topola	14
2.7 GLIVE.....	14
2.7.1 Navadna tramovka (<i>Gloeophyllum trabeum</i>)	15
2.7.2 Pisana ploskocevka (<i>Trametes versicolor</i>)	15
3 MATERIALI IN METODE	16
3.1 PRIPRAVA VZORCEV LESA.....	16
3.2 MERITVE PRED IZPOSTAVITVIJO GLIVAM.....	17
3.2.1 Meritve mehanskih lastnosti	18
3.2.2 Meritve barv vzorcev	19
3.2.3 FTIR spektroskopija	20
3.3 PRIPRAVA HRANILNEGA GOJIŠČA.....	20

3.4	INOKULACIJA GLIV IN VNOS VZORCEV V KOZARCE	22
3.5	ČIŠČENJE IN SUŠENJE	24
3.6	MERITVE VZORCEV PO IZPOSTAVITVI GLIVAM.....	24
4	REZULTATI IN RAZPRAVA.....	26
4.1	GOSTOTA LESA.....	26
4.2	BIOLOŠKA ODPORNOST	27
4.3	FTIR SPEKTRI LESA LESA.....	30
4.4	SPREMEMBE BARVE	36
4.5	MEHANSKE LASTNOSTI.....	40
5	SKLEPI.....	42
6	POVZETEK.....	44
7	VIRI.....	46
	ZAHVALA	

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Trakovi v nihajnih (FTIR) spektrih lesa (1- Harrington in sod., 1964; 2- Michell, 1989; 3- Bolker in Somerville, 1963; 4- Liang in sod., 1960; 5- Michell in sod., 1965), 6- Sarkanen in sod., 1967)	9
Preglednica 2: Gostote vzorcev pri relativni zračni vlažnosti (RH) in temperaturi (T) (vrednosti v oklepajih so standardni odklon)	27
Preglednica 3: Izguba mase vzorcev v odvisnosti od časa izpostavitve glivam. Vzorci duglazije so bili izpostavljeni glivi navadne tramovke, vzorci topola pa glivi pisane ploskocevke (vrednost med oklepajem je standardni odklon) 29	29
Preglednica 4: Sprememba barve vzorca duglazije glede na čas izpostavitve glivi navadne tramovke.....	38
Preglednica 5: Sprememba barve vzorca topola glede na čas izpostavitve glivi pisane ploskocevke	39
Preglednica 6: Sprememba MOE in MOR vzorcev duglazije in topola zaradi delovanja gliv (vrednost med oklepajem je standardni odklon).....	41

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: Vzorci duglazije pred izpostavitvijo glivi, od leve proti desni: TS, SS, SS+PHT in kontrolni vzorec.....	17
Slika 2: Vzorci duglazije pred izpostavitvijo glivi, od leve proti desni: TS, SS, SS+PHT in kontrolni vzorec.....	17
Slika 3: Univerzalni testirni stroj Zwick/Roell Z005 za merjenje mehanskih lastnosti materialov	18
Slika 4: Razmak med podporama univerzalnega testirnega stroja pri ugotavljanju MOE in MOR	19
Slika 5: CIELAB-sistem za numerično vrednotenje barve (Pavlič in Petrič, 2009: 58)	19
Slika 6: Samolepilni brusni papir za izvajanje FTIR spektroskopije	20
Slika 7: Kozarec, v katerem smo vzorce lesa izpostavili glivi	21
Slika 8: Naprava za avtoklaviranje.....	22
Slika 9: HDPE mreža za preprečevanje stika med micelijem in vzorcem	23
Slika 10: Kozarci z vzorci tik po izpostavitvi glivi	24
Slika 11: Razkrojenost vzorcev po izpostavitvi glivama v različnem časovnem obdobju..	29
Slika 12: Vzorci topola pred izpostavitvijo glivi pisane ploskocevke.....	31
Slika 13: Vzorci duglazije pred izpostavitvijo glivi navadne tramovke.....	31
Slika 14: Kontrolni vzorci topola pred in po izpostavitvi glivi pisane ploskocevke.....	32
Slika 15: Vzorci topola TS pred in po izpostavitvi glivi pisane ploskocevke.....	33
Slika 16: Vzorci topola SS pred in po izpostavitvi glivi pisane ploskocevke.....	33
Slika 17: Vzorci topola SS+PHT pred in po izpostavitvi glivi pisane ploskocevke	34
Slika 18: Kontrolni vzorci duglazije pred in po izpostavitvi glivi navadne tramovke.....	34
Slika 19: Vzorci duglazije TS pred in po izpostavitvi glivi navadne tramovke.....	35
Slika 20: Vzorci duglazije SS pred in po izpostavitvi glivi navadne tramovke	35
Slika 21: Vzorci duglazije SS+PHT pred in po izpostavitvi glivi navadne tramovke	36
Slika 22: Grafični prikaz izmerjenih vrednosti sprememb barv vzorcev duglazije pred in po izpostavitvi glivi navadne tramovke. Številke v stolpcu predstavljajo čas izpostavitve (v tednih).	38

1 UVOD

Človek in gozd sta bila vedno tesno povezana. Tako že od nekdaj uporabljamo naraven, obnovljiv in človeku prijazen material, ki ga ustvarja narava - les. Ob nepravilni rabi ali izpostavitvi vremenskim vplivom je les nagnjen k počasnem razpadanju. Zato so že naši predniki pri izdelavi izdelka skrbno izbrali drevesno vrsto z lastnostmi, ki so najbolj ustrezale uporabi izdelka. Dandanes se zaradi naraščanja povpraševanja po določenih drevesnih vrstah dvigajo tudi cene. Zaradi zavedanja posledic globalnega segrevanja, se strmo povečuje raba lesa, zato je vse več plantažnega gojenja dreves, s hitrorastočimi vrstami lesa. Les raste v pogojih, ki so idealizirani za hiter prirast lesne mase. Tak les bi bil zaradi svojega majhnega padca premera, majhne vejnatosti in ravnih debel idealen za konstrukcijsko uporabo. Zaradi hitre rasti pa je gostota lesa iz plantažnih nasadov nizka, posledično ima les tudi slabše mehanske ter biološke lastnosti. Zato z različnimi metodami poskušamo izboljšati njegove lastnosti. S termično modifikacijo mu lahko izboljšamo odpornost na biološke dejavnike razkroja, s termohidro-mehanskimi metodami, ang. Thermo-Hygro-Mechanical treatment (THM), pa mehanske lastnosti. Z uporabo teh okolju prijaznih metod modifikacije lesa, obdržimo željene lastnosti, kot so naravnost, nizka poraba energije za pridobivanje in obdelavo ter pridobimo dobre mehanske lastnosti. S povišano temperaturo, vplivom pare in tlačnih sil med THM postopki lahko vplivamo na kemične in fizikalne lastnosti, ki se izražajo kot barvne spremembe (Tjeerdsma in sod., 1998; Koch in sod., 2003; Sundqvist in sod., 2006; Varga in van der Zee, 2008) in imajo močan vpliv na lastnosti površine lesa (Kutnar in sod., 2008b).

Pri uporabi lesa je zelo pomembna odpornost materiala na biološke dejavnike razkroja, ki ga povzročajo glive. Skyba in sod. (2008) so ugotovili, da je THM postopek pri smreki izboljšal odpornost proti mehki trohnobi, vendar pa to ne velja za bukov les in les hibridnega topola (Kutnar in sod., 2011). Schwarze in Spycher (2005) pa sta ugotovila, da je THM zgoščen les, ki je naknadno segrevan na 180 °C, bolj odporen na vplive gliv rjave trohnobe.

Namen diplomskega dela je bil raziskati vpliv dveh vrst gliv na zgoščen les duglazije in hibridnega topola. V glavnem nas je zanimala sprememba mehanskih lastnosti lesa, določili pa smo tudi izgubo mase, spremembo sestave vzorcev po izpostavitvi in spremembo barve in odtenka proučevanih vzorcev lesa.

V raziskavi smo uporabili les navadne ameriške duglazije (*Pseudotsuga menziesii*) in hibridnega topola (*Populus trichocarpa x Populus deltoides*). Les je bil razdeljen v 4 skupine vzorcev, 1 kontrolno in 3 skupine zgoščenih vzorcev, ki so bili zgoščeni z različnimi postopki THM obdelave lesa. Vzorce smo izpostavili dvema glivama, navadni tramovki (*Gloeophyllum trabeum*) in pisani ploskocevkki (*Trametes versicolor*) za obdobje 2, 4, 6 in 8 tednov ter opazovali nastale spremembe.

2 PREGLED OBJAV

2.1 LES S PLANTAŽ

Les je količinsko in tudi sicer že od nekdaj ena najpomembnejših surovin. Njegova poraba tudi danes nenehno narašča, v razvitih državah predvsem na račun velike porabe papirja. Les nastaja ob blagodejnem vplivu na okolje. Gozdovi predstavljajo najpomembnejši vir lesa kot surovine. Ker je njihov prirastni potencial omejen in ker se površine gozdov v nekaterih predelih stalno zmanjšujejo, bo prihodnja oskrba z lesom v veliki meri odvisna tudi od nasadov (Čufar, 2006). Tako imenovana »zelena revolucija« je povečala zavedanje o učinkoviti izrabi lesa in zaščiti gozdnih površin, posebno starih gozdnih sestojev. Zaradi tega je prišlo do zasuka v dostopnosti osnovnih surovin od lesa iz starih, naravnih sestojev k sestojem s prirejenimi pogoji rasti. Veliko drevesnih vrst je sedaj vzgajanih v nasadih, kjer so razmere prirejene tako, da spodbujajo hitro rast dreves. Na žalost pa ta les ne zadosti zahtevam v določenih uporabah lesnih proizvodov zaradi nizke gostote in mehanskih lastnosti, ki ne dopuščajo, da bi se ga uporabilo kot konstrukcijski material (Kutnar in sod., 2008a).

2.2 ZGOŠČEVANJE LESA

Zgodovina zgoščevanja lesa sega v leto 1886, ko zasledimo prvo idejo o zgoščevanju lesa v radialni smeri (Kollman in Cote, 1968). Leta 1900 je bil patentiran prvi postopek zgoščevanja lesa (Kollmann in sod., 1975). V dvajsetih letih 20. stoletja je bil raziskan vpliv vode in visoke temperature na plastifikacijo lesa. V Nemčiji je bil kmalu razvit postopek pod imenom Lignostone (Kollman in Cote, 1968), med drugo svetovno vojno pa podoben postopek pod imenom Staypak v Združenih državah Amerike (Seborg in sod., 1945). Oba postopka se izvajata pri temperaturah od 160 °C do 180 °C in tlakih od 7 MPa do 15 MPa. Zgoščevanje s tema postopkoma je izboljšalo določene mehanske lastnosti, vendar je bil proizvod zelo nestabilen, ob navlaževanju in segrevanju je lahko prišlo tudi do 100 % povrnitve tlačne deformacije. Zato so se uporabljali različni kemični, fizikalni in mehanski postopki stabilizacije tlačne deformacije (Inoue in sod., 1993). Čeprav je med

vsemi postopki dimenzijske stabilizacije zgoščenega lesa temperaturni postopek najbolj učinkovit, traja pri 180 °C 20 ur in pri 200 °C 5 ur (Inoue in sod., 1993).

Med novejšimi postopki zgoščevanja lesa je Calignum proces, ki je bil patentiran leta 1997. Postopek se izvaja v stiskalnici, ki ima na eni strani ravno ploščo, na drugi stani pa gumijasto opno, v katero se črpa olje in tako doseže pritiske do 140 MPa. Pri tem postopku se les obdeluje pri sobni temperaturi in s tlaki nad 80 MPa, zgoščen les pa dobi nepravilno obliko. Drugi novejši postopek je viskoelastično toplotno zgoščevanje (ang. Viscoelastic thermal compression, VTC), ki sta ga razvila Kamke in Sizemore (2008). Proces je bil primarno razvit za izrabo hitrorastočih nizko-gostotnih drevesnih vrst. Kljub temu se lahko postopek VTC uporabi na katerikoli lesni vrsti, različnih gostot in vlažnosti. Proizvod je namenjen uporabi v lesnih kompozitih, kot so večslojne plošče. Večslojni kompoziti bi bili v veliki meri lahko uporabljani v konstrukcijskih aplikacijah, npr. 3-slojni kompoziti z uporabo zgoščenega lesa v zunanjih slojih, medtem ko je za sredico uporabljen les z nizko gostoto in nizko togostjo (Kutnar in sod., 2008a). Z namenom proučevanja vplivov parametrov zgoščevanja na lastnosti proizvedenega lesa, predvsem z namenom iskanja optimalnih pogojev za proizvodnjo visoko stabilnega zgoščenega lesa, sta se proučevala Kutnar in Kamke (2012). Vsi ti postopki vedno sledijo naslednjim korakom (Morsing, 2000):

- 1 mehčanje in plastificiranje celične stene,
- 2 zgoščevanje pravokotno na obdelovanec,
- 3 ohlajevanje in sušenje v deformiranem stanju,
- 4 fiksacija deformacije.

Zgostitev lesa je rezultat zmanjšanja praznih prostorov v celični zgradbi lesa. Za sam postopek ni pomembna lesna vlažnost, temveč dimenzije obdelovancev. Ker sta gibanje in izguba vlažnosti ključnega pomena, so za zgoščevanje bolj uporabni elementi majhnih debelin, saj se hitreje uravnesijo v temperaturnih in vlažnostih pogojih, ki se uporabljajo v postopku zgoščevanja (Kutnar in sod., 2008a). Debeline obdelovancev npr. pri VTC postopku se predvidoma gibljejo od 3 mm do 12 mm. Vlažnost lesa naj bi bila od 15 % do 30 %, vendar je lahko tudi večja (Kutnar in sod., 2008a). Med procesom se uporablja para pod povišanim tlakom, s katero se zagotovi, da obdelovanci so v območju nad točko steklastega prehoda, kar omogoča proizvodnjo izdelkov z visoko gostoto brez poškodb

celičnih sten (Kutnar in sod., 2009). Visok pritisk, ki se pojavi pri THM procesu, deformira celični lumen in ga drastično zmanjša, celica pa se deformira brez loma celičnih sten. Med THM procesom so celične stene lesa podvržene termičnemu razpadu hemiceluloz in lignina, čemur sledijo polimerizacijske reakcije razpadlih produktov pod vplivom pare in povišane temperature (Kutnar in sod., 2008b). THM proces plastificira in stabilizira končni proizvod. Proizvod, viskoelastično termično zgoščen les, kaže zmanjšano higroskopičnost in znatno izboljšane mehanske lastnosti (Kamke, 2006). Trdnost in togost lesnega tkiva se tako z zgoščevanjem sorazmerno izboljšujeta (Kutnar in sod., 2009). Območje stopnje zgostitve, ki ga lahko dosežemo z zgoščevanjem lesa je široko, od približno 25 % pa vse do 500 % zgostitve. Navadno se uporablja spekter od 100 % do 200 % zgostitve lesa. Visoka gostota in nepoškodovana celična struktura vodita do visoke trdnosti in dimenzijske stabilnosti (Kamke, 2006). Rezultati upogibnega testa so pokazali, da THM proces znatno vpliva na modul elastičnosti (ang. Modulus of Elasticity, MOE) in upogibno trdnost (ang. Modulus of Rupture, MOR) lesa (Kutnar in sod., 2008a). V primeru THM lesa s 63 % stopnjo zgostitve se je MOE v primerjavi s kontrolnim nezgoščenim lesom izboljšal za 37 %, medtem ko je za 98 % in 132 % stopnjo zgostitve MOE narasel za 84 % in 129 %. Podobno se je MOR za zgoščen les s 63 %, 98 % in 132 % zgostitve zvišal za 32 %, 66 % in 102 % v primerjavi s kontrolnim nezgoščenim lesom (Kutnar in sod., 2008a). Med prilagojenim THM procesom so bile celične stene lesa podvržene termični razgradnji hemiceluloz in lignina, čemur je sledila polimerizacijska reakcija razgrajenih produktov zaradi povišane temperature in vroče pare (Kutnar in sod., 2008b), kar bi lahko spremenilo odpornost lesa na glivni razkroj. Ugotovljeno je bilo, da THM obdelava ni izboljšala odpornosti lesa smreke ali bukve na *Trametes versicolor* in *Trametes pubescens* (Skyba in sod., 2009). V zgoščenem lesu se namreč s stopnjo zgostitve znižuje prostornina praznih prostorov (Kutnar in sod., 2009). V vzrocu z najmanj praznimi prostori v lesu so hife rastle primarno znotraj celičnih sten, medtem ko so pri ostalih vzorcih z nižjimi stopnjami zgoščenosti rastle tudi v celičnih lumnih (Kutnar in sod., 2011). V celicah tenzijskega lesa, ki je bil okužen z glivo *Trametes versicolor* se je med sekundarno steno in srednjo lamelo pojavil neselektiven tip razkroja (Blanchette in sod., 1994). Proces je povzročil spremembe v obliki želatinastega sloja, ki se je skrčil in v nekaterih primerih ločil od celične stene. Deformiran želatinasti sloj THM lesa je še dodatno spodbudil rast hif, česar posledica je bila večja absolutna izguba mase zgoščenih vzorcev (Kutnar in sod., 2011).

2.2.1 Sorptivnost in dimenzijska stabilnost zgoščenega lesa

Dimenzijska stabilnost je pomemben dejavnik pri gradnji objektov in izdelavi pohištva iz lesa, saj nihanje vlage v zraku povzroča dimenzijske spremembe lesa. Prostorninski nabrek je primerljiv s količino higroskopsko sprejete vode, povezan pa je tudi z gostoto lesa; pri manj gostih lesovih pride med sorpcijo do rahlega krčenja lumnov, pri gostejših pa do rahlega povečanja lumnov (Gorišek, 2009). Količina vezane vode v lesu je odvisna od števila sorpcijskih mest. Sestavine lesa, ki najbolj privlačijo vodo nase, so polioze (hemiceluloze), za njimi sta celuloza in lignin. Zgoščen les tako kot nezgoščen nabreka zaradi navzemanja vode, kar pri zgoščenem lesu predstavlja še sproščanje določenih notranjih napetosti, ki so nastale zaradi zgoščevanja. Raziskava THM vzorcev, potopljenih v vodo, je pokazala, da je bil učinek povrnitve v prvotno stanje sorazmeren s stopnjo zgoščenosti. Les z največjo stopnjo zgoščenosti je imel največjo stopnjo povratka tlačne deformacije (Kutnar in sod., 2009), torej največji nabrek, tudi do 100 % povrnitve v začetno stanje. Vendar pa ima THM les zaradi deformacije celic zaprte lumne. Tako so bile v primerjavi THM lesa in nezgoščenega lesa hidrofobne lastnosti zgoščenega lesa veliko boljše, tudi celotna površinska energija lesa je bila znantno manjša. V 65 % relativne zračne vlažnosti in pri 20 °C se zgoščeni les navlaži do 7 % ravnovesne vlažnosti, kar je 5 % manj od običajnega nespremenjenega lesa, ki se sicer uravnovesi na 12 % ravnovesne vlažnosti (Kutnar in sod., 2008b).

2.2.2 Postopki THM zgoščevanja lesa

Prva stopnja THM procesa je mehčanje celičnih sten z zviševanjem temperature in vlažnosti lesa do ali čez temperaturo steklastega prehoda (Grossman, 1976). Amorfnimi polimeri lesa se lahko obnašajo kot viskoelastični materiali, viskozne tekočine ali linearno elastični materiali. Obnašanje lesa je odvisno od temperature, vlažnosti ter časa izpostavitve zunanjim dejavnikom, ki povzročajo deformacijo. Ker so polimerne molekule v celični steni sedaj raztegnjene oziroma pod obremenitvijo, je treba te napetosti še sproščati. Temperaturo procesa povišamo, kar poveča molekularno gibanje in pomaga pri sproščanju. Med samim postopkom s povišano temperaturo nastopijo nekatere spremembe v celični steni. Lignin v celičnih stenah se zaradi povišane temperature pare, s katero se

segreva les, plastificira in dovoli, da se dolge molekule celuloze premikajo in tvorijo skupke, z ohladitvijo pa se nova oblika lesa zopet zamreži (Kutnar in sod., 2011).

2.3 FTIR SPEKTROSKOPIJA

Fourjejeva transformacija infra-rdeče svetlobe (ang. Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) je metoda določanja materialov oziroma njihovih molekularnih vezi. Tako lahko hitro določimo vsebnost elementov v vzorcu. Postopek je hiter, čist in enostaven. Spekter infra-rdeče svetlobe je poslan na vzorec, del te svetlobe se vsrka (absorbira), del pa preide skozi (transmitira). Tako nam metoda omogoča ugotoviti, kateri elementi oziroma molekule in njihove vezi ter v kakšni količini so v vzorcu in katerih v vzorcu ni. FTIR spektrometer je sestavljen iz vira IR (infra-rdeče) svetlobe, tako imenovanega interferometra, od koder sevamo naenkrat svetlobo celotnega svetlobnega spektra valovne dolžine od 400 cm^{-1} do 4000 cm^{-1} IR svetlobe. Ta žarek gre skozi razdelilnik žarka, ki žarek razdeli v dva žarka. Eden je poslan na fiksno oz. nepremično ogledalo, drugi pa na ogledalo na vodilih, ki se lahko premika par milimetrov od razdelilnika. Ker je eno ogledalo pri miru, drugo pa se konstantno premika, dobimo »motenje« signalov, kar pomeni, da dobimo celoten interferogram proučevanega vzorca. Določene valovne dolžine žarka, ki gredo skozi vzorec, imajo enako valovno dolžino kot določene vezi molekul, ki to valovno dolžino vpijejo. Preostali spekter pade na tipalo, s katerim se odčita jakosti in frekvence žarka. Tako dobimo spekter vzorca. Vendar je še vedno treba vse podatke razbrati in urediti. Dekodiranje izmerjenih spektrov je izvedeno s Fourier-jevo transformacijo in s pomočjo računalnika. Na ekranu se izpiše graf ujetih spektrov meritev. Kalibracija stroja je prav tako pomembna, pri čemer se jo opravi tako, da se v FTIR spektrometer ne vstavi vzorca, temveč se samemu žarku izmeri spekter. Prednosti FTIR sistema izvajanja meritev so v njegovi hitrosti, natančnosti, mehanični enostavnosti in notranjem kalibriranju. Prednosti skupaj z mnogimi drugimi postavljajo to metodo v ospredje, saj je zelo natančna in ima širok nabor matematičnih algoritmov za raznorazne načine preiskav (Thermo Nicolet Corporation, 2001).

2.3.1 FTIR spekter zgoščenega lesa

Kutnar in sod. (2008b) so ugotovili, da se FTIR spekter THM lesa ni zelo razlikoval od spektra navadnega lesa, kar je bila najverjetneje posledica kratkega časa zgoščevanja, ki je trajal le 15 minut. Analiza je bila usmerjena v karakteristične pasove v infrardečem spektru lesa, vendar med štirimi testnimi skupinami ni bilo opaženih sprememb. Posebna pozornost je bila posvečena spektru hemiceluloze, ki je približno 1730 cm^{-1} , vendar niso opazili nobenih sprememb. Preglednica 1 prikazuje trakove v nihajnih spektrih lesa.

Preglednica 1: Trakovi v nihajnih (FTIR) spektrih lesa (1- Harrington in sod., 1964; 2- Michell, 1989; 3- Bolker in Somerville, 1963; 4- Liang in sod., 1960; 5- Michell in sod., 1965), 6- Sarkanen in sod., 1967)

Valovno število [cm^{-1}]	Prisoja	Vir
680	Upogibno nihanje COH skupine pri celulozi	3
775	Nihanja v galaktanu pri hemicelulozi	4
809	Nihanja v mananu pri hemicelulozi	2
810	Upogibno nihanje v 1,3,4 substituiranih benzenovih obročih lignina	2
870	Upogibno nihanje v 1,3,4 substituiranih benzenovih obročih lignina	2
895	Nihanja skupin na C1 atomih v celulozi in hemicelulozi	2, 3, 5
1050	C-O valenčno nihanje pri celulozi in hemicelulozi	2, 3, 5
1110	Trak O-H skupin pri celulozi in hemicelulozi	2, 5
1160	C-O-C asimetrično nihanje pri celulozi in hemicelulozi	2, 5
1230	Nihanje v siringilnih enotah lignina ali nihanje C=O skupin ksilana	5, 6
1263	C-O valenčno nihanje pri ligninu in hemicelulozi	4
1275	Nihanje v gvajacilnih enotah lignina	6
1315	Kolebno nihanje CH ₂ skupin pri celulozi	2
1325	Kolebno nihanje CH ₂ skupin pri celulozi	3, 5
1330	OH deformacijsko nihanje pri celulozi in hemicelulozi	2
1370	CH ₂ upogibno nihanje pri celulozi in hemicelulozi	2, 3, 5
1425	CH ₂ strižno nihanje pri celulozi, C=C nihanje pri aromatskih skupinah lignina	2, 3, 4, 5
1453	Valenčno nihanje aromatskega obroča in CH ₂ nihanja pri celulozi	2
1460	CH ₃ deformacijsko nihanje pri ligninu in CH ₂ upogibno nihanje pri ksilanu	2, 3, 5
1505	Valenčno nihanje aromatskega obroča pri ligninu	1, 2, 3, 5
1600	Valenčno nihanje aromatskega obroča pri ligninu	1, 2, 3, 5
1643	H-O-H deformacijsko nihanje v vezani vodi	2
1660	Nihanje keto-karbonilne skupine konjugirane z benzenovim obročem	1
1730	C=O valenčno nihanje pri ksilanu	3, 5
2900	C-H valenčno nihanje	2, 3, 5
3300	Valenčno nihanje O-H skupin	2, 3, 5

2.4 MEHANSKE LASTNOSTI LESA IN ZGOŠČENEGA LESA

Pri uporabi lesa v gradbeništvu so zelo pomembne njegove mehanske lastnosti, ki so zelo odvisne od lesne vlažnosti, temperature in drugih dejavnikov. Njegove najpomembnejše lastnosti, ki vplivajo na mehanske lastnosti, so gostota, orientacija in potek lesnih vlaken, mikrofibrilni kot ter druge rastne posebnosti. Les je viskoelastičen material, pri katerem se ob dolgotrajnih obremenitvah pokažejo trajne plastične deformacije. Vendar v večini primerov elastična deformacija tudi po daljšem času obremenitve predstavlja glavno komponento. Večina materialov se po doseženi zgornji meji napetosti v trenutku poruši, kar je v gradbeništvu zelo nezaželeno. Les spada v kategorijo materialov, kjer se po doseženi največji porušitveni vrednosti pojavi več delnih porušitev, a material nekaj časa še vedno drži obremenitev, kar je zelo pomemben dejavnik z varnostnega vidika. Nadvse pomembna pri vgranji lesa je tudi njegova vlažnost, saj imata suh in vlažen les zelo različne mehanske lastnosti, kar je ključnega pomena pri nosilnosti. Navadno se uporablja za konstrukcijo objekta zračno sušen les. Za upogibne deformacije lesa je potrebna mnogo manjša sila kot za natezne ali tlačne deformacije. Z mikroskopskega vidika na elastičnost zelo vplivata celuloza in inkrustrirani amorfni lignin, slednji predvsem povečuje togost lesa (Gorišek, 2009). Zgoščen les ima večjo gostoto in posledično večjo trdnost, žilavost ter trdoto. Različni postopki zgoščevanja nam dajo zelo različne rezultate. Večji, kot je koeficient zgoščevanja, boljše so mehanske lastnosti. Rezultati upogibnega testa zgoščenega lesa so pokazali, da sta MOE in MOR zelo izboljšana. MOE in MOR sta se približno sorazmerno večala z višanjem zgostitve lesa (Kutnar in sod., 2009).

2.5 NAVADNA AMERIŠKA DUGLAZIJA (*Pseudotsuga menziesii*)

Kraljestvo: *Plantae* (rastline)

Deblo: *Pinophyta* (iglavci)

Razred: *Pinopsida*

Red: *Pinales* (borovci)

Družina: *Pinaceae* (borovke)

Rod: *Pseudotsuga* duglazija

Vrsta: *Pseudotsuga menziesii*

Navadna ameriška duglazija je vednozeleno, na naravnih rastiščih kar, do 100 m visoko in do 4 m debelo drevo. Duglazija ima v mladosti ozko, pozneje pa širšo stožčasto krošnjo. Skorja je v mladosti siva, gladka in polna smolnih mešičkov, pri starih drevesih pa je rdečkastorjava, debela, plutasta in globoko vzdolžno razbrazdana. Poganjki so najprej zeleni in nato sivorjavi ter dlakavi, brsti temno rjavi, podolgovato zašiljeni in dolgi do 1 cm. Igllice merijo v dolžino 2 cm do 4 cm, v širino pa 1 mm do 1,5 mm. So ploščate, mehke, tope ali zašiljene, a ne bodeče; svetlo zelene do temno zelene in na spodnji strani s po dvema progama listnih rež. Zdrobljene prijetno dišijo po sadju. Razporejene so okrog poganjka in na drevesu ostanejo 8 ali več let. Moški cvetovi so 1 cm do 2 cm dolgi in rumenkastorjavi, ženska storžasta socvetja so zelenkasta ali rdečkasta, do 3 cm dolga in izraščajo na koncu poganjkov. Storži so viseči, valjasti, 5 cm do 10 cm dolgi in 2,5 cm 3,5 cm debeli, svetlorjavi, izpod zaokroženih plodnih lusk se za 1 cm 2 cm kažejo zelo značilne, na tri konice razcepljene krovne luske. Na vsaki plodni luski sta po dve semeni. Je enodomna in vetrocvetna vrsta, cveti aprila in maja. Razmnožuje se največ s semenom, vegetativno lahko s potaknjenci v pesku ali drugi podlagi, manj uspešno tudi s cepljenjem. V povprečju potrebuje visoko zračno in talno vlago ter globoka, sveža, zračna, nekoliko zakisana tla, nekaj slabše raste na apnencu. Ne mara plitvih in revnih tal, prav tako ne zbitih tal z zastajajočo vodo. Je polsvetloljubna do polsencozdržna vrsta, več sence prenese v mladosti. Bolje kot smreka prenese sušo in obremenitev s snegom, čeprav jo v čistih nasadih rad upogne sneg. Moker sneg, žled in močan veter tudi odraslim drevesom radi polomijo vrhove, ki pa se precej hitro in uspešno obrastejo oziroma nadomestijo. Duglazija

izvira iz zahodnega dela Severne Amerike. Njena površina se v dolžini skoraj 4500 km razteza po gorovjih vse od Britanske Kolumbije v Kanadi na severu do Mehike na jugu. Njena vertikalna razširjenost sega od obal do 3260 m n. v. V Sloveniji ni samonikla, vendar je ena najbolj razširjenih tujih drevesnih vrst. V gozdove so jo v nasadih za proizvodnjo lesa začeli vnašati konec 19. stoletja, največ jih je nastalo v prvi polovici 20. stoletja. Ker je v zadnjih letih v naših gozdovih skoraj ne sadijo več in ker se sama ne pomlajuje, se bo že tako majhen delež duglazije v naših gozdovih v prihodnosti še zmanjševal. Pri nas so nekoč najbolj priporočali sajenje v mešanih sestojih z bukvijo, smreko in jelko, najbolje v gorskih gozdovih med 500 m n.v. in 1000 m n.v. Verjetno največja duglazija v Sloveniji raste pri lovski koči pod Smrekovcem pri Rovtah. Visoka je 36 m, njen obseg je 408 cm. Pri vnašanju v gozd je potrebna previdnost pri izboru prave lokacije in prave varietete oziroma različka, ki ga sadimo, saj se med seboj zelo razlikujejo po ekoloških lastnostih. V Sloveniji že več kot 20 let potekajo poskusi na določenih površinah z zeleno duglazijo v Brkinih in na Javornikih, kjer se ugotavljajo najprimernejši rastni pogoji za določena območja. V naših razmerah med vsemi tremi najbolje uspeva prav zelena duglazija. V zahodnem delu Severne Amerike je duglazija zaradi velike razširjenosti in hitrega priraščanja ena gospodarsko najpomembnejših drevesnih vrst. V zadnjih 150 letih, odkar poteka intenzivno izkoriščanje, se je površina naravnih, t. i. primarnih gozdov duglazije s pragozdnim značajem v zahodnem Oregonu in Washingtonu s 4,5 mil. ha zmanjšala na 0,5 mil. ha. Za njihovo ohranitev so sečnjo v teh gozdovih od leta 1990 naprej omejili, tako da danes večino lesa pridobijo iz sekundarnih, umetno zasajenih gozdov. Les je precej težek, trd, kakovosten in zelo široko uporaben. Tudi marsikje v zahodni Evropi jo zaradi hitre rasti pogosto sadijo v gozdnih nasadih za proizvodnjo lesa. Slaba gojitvena lastnost je velika vejnatost debla, saj spodnje veje tudi v gostem sestoju le nerade odpadajo (Brus, 2011).

2.5.1 Anatomska zgradba duglazije

Barva jedrovine je zelo različna od rumenkaste ali blede rdečkastorumene barve, kasneje potemni do temnordeče. Beljava je ozka do zmerno široka, bela do rdečkasto bela. Smolni kanali so pretežno v kasnem lesu, ozki, maloštevilni in vidni z lupo, pogosto v kratkih tangencialnih skupinah. Les je srednje gost z gostoto od 320 kg/m^3 do 730 kg/m^3 , z

zmernim krčenjem, z zelo dobro stabilnostjo in trdnostnimi lastnostmi (Čufar, 2006). Najpogostejše rastne napake so malolesnost, grčavost, spiralen potek aksialnih elementov, neenakomerno priraščanje in obilna smola, ki se izloča pri višjih temperaturah. Druge opazne napake so še razpoke, rovi insektov in obarvanje lesa v stiku z železom ob prisotnosti vlage, ki spominja na modrivost, ki jo povzročajo glive (Čufar, 2006).

2.6 AMERIŠKI ČRNI TOPOL (*Populus deltoides*)

Kraljestvo: *Plantae* (rastline)

Deblo: *Magnoliophyta* (kritosemenke)

Razred: *Magnoliopsida* (dvokaličnice)

Red: *Malpighiales*

Družina: *Salicaceae* (vrbovke)

Rod: *Populus* (topol)

Sekcija: *Aegiros*

Vrsta: *Populus deltoides*

Ameriški črni topol je od 30 m do 50 m veliko, hitrorastoče listopadno drevo (Brus, 2011). Na odprtem rastišču je navadno deblo večjih premerov in nizko, hitro se razdeli v več močnih vej in tvori mogočno krošnjo nepravilne oblike. V gostem sestoju ima dolgo ravno deblo, na koncu katerega je majhna krošnja okrogle oblike. Koreninski sistem je običajno široko razrasel, vendar plitev. Tolerira zmrzal, težko ali peščeno zemljo in tudi mokro rastišče. Zaradi netolerantnosti na konkurenco in slabih pogojev za kalitev se sestoji slabše obnavljajo. Naravna rastišča so v severni Ameriki vse do 1000 m n.v. s povprečno letno temperaturo od 8 °C do 14 °C in 600 mm/m² do 1500 mm/m² padavin letno (Orwa in sod., 2009). Listi so srčasti do široko jajčasti, zašiljeni, od 8 cm do 12 cm dolgi, imajo nad 6 cm dolg, rdečkast dlakav pecelj, na njegovem prehodu v list pa 2 do 3 žleze (Brus, 2011). Popki so lepljivi in niso dišeči. Topol prvič zacveti že pri 5 letih rasti in zacveti, še preden poženejo listi, moški popki pa dozoriijo pred ženskimi in so večji. Moški cvetovi so dolgi 8 cm do 13 cm, imajo 40 do 60 rdečkastih prašnikov ter so bolj opazni kot ženski. Ženski cvetovi so dolgi od 15 cm do 30 cm. Cvetenje ima lahko zamik do enega meseca med zgodnjimi in poznimi vrstami. Zgodnje vrste se ne morejo križati s poznimi. Skoraj vsako

leto proizvede veliko količino semen z laski, ki jih veter lažje nese na večje razdalje (Orwa in sod., 2009). Mladike so gole, rumenozelene in robate. Plodovi rastejo v grozdih dolžine od 25 cm do 30 cm (Erker, 1957). Razširjen je po skoraj vsej Severni Ameriki. V Sloveniji ga sadimo zelo redko, mnogo pomembnejši pa je kot ena od dveh izhodiščnih vrst, iz križanja katerih je nastal kanadski oz. hibridni topol (Brus, 2011).

2.6.1 Anatomska zgradba topola

Les topola je belo-siv, rdečkast do rjavkast, delno progast, s pogosto vpadljivo širokimi branikami. Uvrščamo ga med najredkejše domače lesne vrste z gostoto od 370 kg/m^3 do 520 kg/m^3 . Zaradi homogene strukture se le malo krči, stabilnost je dobra, obrabna trdnost je visoka, posebno les z zelo širokimi branikami ima pogosto vlaknato površino (tenzijski les). Ni odporen proti vremenskim vplivom, insektom in glivam. Napake topola so krivost, necentričnost, spiralen potek aksialnih elementov, sekundarni poganjki, tenzijski les, obarvanja, razpoke, poškodbe pri sečnji, okužbe z glivami in insekti (Čufar, 2006).

2.7 GLIVE

Glive so po sistematizaciji popolnoma samostojno in zelo bogato živalsko kraljestvo. Po svojih značilnostih se razlikujejo od živali kot tudi od rastlin. Preživljajo se lahko na račun živih organizmov kot zajedavke (paraziti), simbionti (mikoriza) ali pa se hranijo s snovmi mrtvih organizmov kot gniloživke (saprofiti). Glive se nahajajo prav povsod - od vode, kopnega in celo v zraku kot spore. Gliva je sestavljena iz hif, gradnikov prehranjevalnega in tudi razmnoževalnega dela organizma. Vegetativni del glive začne z deljenjem celic in povečevanjem njihove koncentracije na enem mestu graditi podgobje, na njem pa trosnjak. Splet hif se spremeni v trosnjak, ki v svoji zreli dobi proizvaja ogromne količine spor. Veter te spore odnaša kilometre daleč. Glede na njihovo trdoživost lahko nekatere spore v suhem okolju čakajo na ugoden trenutek za kalitev tudi par let (Benko in sod., 1987).

2.7.1 Navadna tramovka (*Gloeophyllum trabeum*)

Zelo razširjena je v Evropi, Avstraliji, na Novi Zelandiji, V Afriki in Severni Ameriki. Okužuje iglavce (smreka, bor) in listavce (bukev, robinija, cipresa). Najdemo jo predvsem na lesnih konstrukcijah. Aktivni trosnjaki so temno rumene barve. Lamela in pore imajo nepravilno obliko in razpored. Trosi so brezbarvni, cilindrični, veliki $7\ \mu\text{m}$ do $11\ \mu\text{m}$ x $3\ \mu\text{m}$ do $4\ \mu\text{m}$. Na začetku je klobuk temno rumen, s starostjo potemni, včasih pa tudi zbledi. Optimalna temperatura za razvoj te glive je $35\ \text{°C}$, najvišja pa nad $40\ \text{°C}$. Trosi ohranijo kaljivost v suhem stanju tudi po enem letu. Po navlažitvi vzklijejo v enem do dveh dneh. Micelji je odporen na visoke temperature, vendar pri $69\ \text{°C}$ odmre v eni uri. Povzroča temno prizmatično trohno, podobno drugim vrstam *Gloeophyllum*. Les po navadi v notranjosti popolnoma strohni, medtem ko zunanji del ostane nedotaknjen. Je zelo nevarna razkrojevalka stavbnega in gradbenega lesa (Benko in sod., 1987).

2.7.2 Pisana ploskocevka (*Trametes versicolor*)

Gliva je izredno razširjena in napada predvsem les listavcev kot so bukev, hrast, kostanj in robinja. Na iglavcih jo najdemo le poredko, in sicer na smreki ali boru. Najraje se naseli na ograje, drogove, jamski les, šture in hlodovino ter na les odmrlih dreves. Barve in oblike trosnjakov se med seboj zelo razlikujejo, od belih, rjavih pa do črnih in rdečkastih, ki so običajno konzolasti, kožasti in tanki. Trosnjaki so enoletne narave in drugo leto poženejo novi. Trosišče je običajno belo oziroma rumenkasto ter ima zelo majhne pore s cilindričnimi in brezbarvnimi trosi. Optimalna temperatura za rast glive je $30\ \text{°C}$ in je izredno odporna proti dolgotrajnejšim sušam in visokim temperaturam. Povzroča klasično belo trohno beljave, zlasti hitro napreduje pri bukovem lesu. V laboratorijskih razmerah bukov les po štirih mesecih izgubi več kot 35 % mase (Kervina-Hamović, 1990). Gliva povzroča tipično belo trohno beljave na raznih listavcih. V začetku okužbe dobiva les bele pege, pozneje pa postane popolnoma bel in lahek. Gliva razgrajuje lignin in celulozo (Benko in sod., 1987).

3 MATERIALI IN METODE

3.1 PRIPRAVA VZORCEV LESA

Za raziskovalni del smo uporabili les hibridnega topola (*Populus deltoides* × *Populus trichocarpa*) in duglazije (*Pseudotsuga menziesii*), ki smo ju dobili iz Združenih držav Amerike, natančneje iz zvezne države Oregon. Vzorci (sliki 1 in 2) so bili zgoščeni s tremi različnimi postopki termo-hidro-mehanskega zgoščevanja lesa, ki so se razlikovali glede na temperaturo in vlažnostjo v komori, v času mehanskega stiskanja vzorcev: A. Pri 170 °C v prehodnih pogojih vodne pare (TS); B. Pri 170 °C in nasičeno vodno paro (SS); C. Pri 170 °C in nasičeno vodno paro (SS) ter dodatnim z dodatnim segrevanjem do 200 °C (SS+PHT). Kontrolni vzorci obeh vrst lesa so bili nezgoščeni. Oznaka TS predstavlja vzorce, ki so po 3 minutnem parjenju šli skozi 10 sekundno fazo brez zunanjih dejavnikov, nakar je sledilo stiskanje. Vzorci z oznako SS so bili pod vplivom nasičene vodne pare čez celoten postopek stiskanja pri 5,5 MPa, ki je trajal 3 minute. Medtem, ko so vzorci z oznako SS+PHT imeli enak postopek kot SS prvih 6 minut, nato pa se je temperatura dvignila na 200 °C v 90 sekundah in trajala 1 minuto. Vsi vzorci so bili brez makroskopskih, s prostim očesom vidnih napak, kot so grče ali zavita rast.

Predhodno zgoščen les je imel dimenzije 44 mm × 16 mm × 2 mm. Pripravili smo še kontrolne vzorce smreke (*Picea abies*) in bukve (*Fagus sylvatica*). Dimenzije vzorcev so bile 40 mm × 15 mm × 5 mm, poskobljani na debelinskem skobeljnem stroju, dolžinsko razžagani na krožnem žagalnem stroju in ročno obrušeni po robovih. Brusili smo jih z namenom odstranitve drobnih zatrganin in kosmatosti vzorca. Služili so kot referenčni vzorci lesa, s katerimi smo kontrolirali razkroj oziroma dogajanje v lončkih. Vzorci nezgoščenega lesa topola in duglazije so bili dimenzij 44 mm × 16 mm × 6 mm s potekom vlaken vzporedno z daljšo stranico vzorca. Kot dodatek h kontrolnim vzorcem smo dodali še skupino daljših nezgoščenih vzorcev topola in duglazije z dimenzijami 64 mm × 16 mm × 6 mm in enako usmeritvijo. Ti vzorci so nam bili v pomoč pri merjenju mehanskih lastnosti nezgoščenega lesa pred in po izpostavitvi glivam razkrojjevalkam.



Slika 1: Vzorci duglazije pred izpostavitvijo glivi, od leve proti desni: TS, SS, SS+PHT in kontrolni vzorec



Slika 2: Vzorci duglazije pred izpostavitvijo glivi, od leve proti desni: TS, SS, SS+PHT in kontrolni vzorec

3.2 MERITVE PRED IZPOSTAVITVIJO GLIVAM

Vzorci smo najprej po vrsti oštevilčili, nato pa jih v sušilni komori ST-45 proizvajalca Kambič sušili pri temperaturi $(103 \pm 1) ^\circ\text{C}$ in 24 ur do 0 % lesne vlažnosti, kar smo kasneje uporabili za izračun izgube mase. Vzorce smo nato uravnovesili na ravnovesno vlažnost v komori s konstantno relativno zračno vlažnostjo 65 % in $20 ^\circ\text{C}$. Izenačevanje je trajalo 2 dni. Dimenzije smo vzorcem izmerili s kljunastim merilom Mitutoyo, maso pa s tehtnico proizvajalca Tehtnica Železniki tip Exacta 6120 EB. V času izvajanja meritev smo poskušali vzorce kar se da kratkotrajno izpostavljati zraku v prostoru. Shranjevali smo jih v polietilenskih vrečah, iz katerih smo jih jemali zgolj za obdobje meritve enega vzorca. Tako smo zmanjšali nabrek oziroma navzem vlage iz okolice.

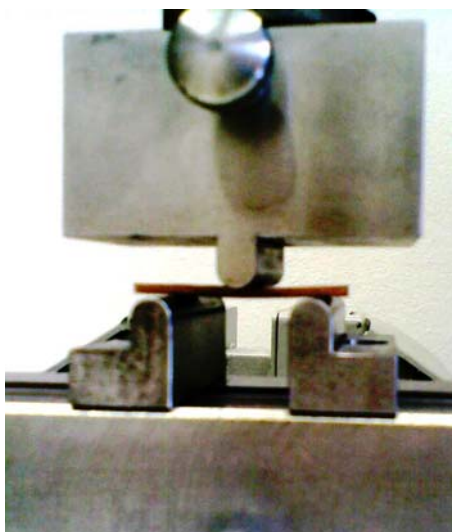
3.2.1 Meritve mehanskih lastnosti

Meritve mehanskih lastnosti smo izvajali na univerzalnem testirnem stroju Zwick/Roell Z005 z metodo tritočkovnega upogiba (slika 3).



Slika 3: Univerzalni testirni stroj Zwick/Roell Z005 za merjenje mehanskih lastnosti materialov

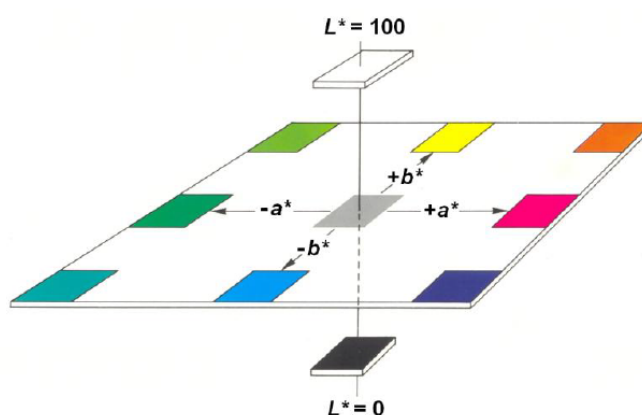
Razmak med podporama je bil 30 mm (slika 4) za vzorce dolžine 45 mm, za vzorce dolžine 65 mm je bil razmak med podporama 50 mm. Obremenitev na vse vzorce se je izvajala na polovici razdalje med podporama. Vzorce smo upognili za 1 mm v času (90 ± 30) sekund, s 30 % največje obremenitve in hitrostjo 2 mm/min. Rezultati MOE in MOR so bili izračunani glede na debelino vzorca in časovno trajanje testa, kontrolnega in zgoščenega lesa. Vzorcem smo izmerili MOE pred in po izpostavitvi.



Slika 4: Razmak med podporama univerzalnega testirnega stroja pri ugotavljanju MOE in MOR

3.2.2 Meritve barv vzorcev

Vzorci smo pred izpostavitvijo skenirali s HP skenerjem Scanjet G4050, ker so bili preozki za merjenje barve s kolorimetrom. Programska oprema Corel Draw 8 nam je omogočila izmeriti barvo po sistemu CIE-LAB. Sistem CIE-LAB je sestavljen iz koordinatnega sistema (slika 5), kjer koordinata L^* predstavlja svetlost oz. spekter od črne (0) do bele (100) barve. Koordinata a^* določa lego od rdeče (+) do zelene (-), b^* pa od rumene (+) do modre (-) barve. Podani rezultati so povprečja meritev 7 vzorcev.



Slika 5: CIELAB-sistem za numerično vrednotenje barve (Pavlič in Petrič, 2009: 58)

3.2.3 FTIR spektroskopija

FTIR spektroskopijo smo izvajali z merilno napravo Perkin Elmer FT-IR Spektrum ONE. Merili smo spekter nezgoščenega in zgoščenega lesa topola in duglazije. Uporabljena metoda je bila DRIFT (difuzno odbojna infra-rdeča fourjejeva spektroskopija) metoda merjenja IR spektrov. Spekter je merjen med 450 cm^{-1} in 4000 cm^{-1} . Vzorec lesa smo s pomočjo samolepilnega brusnega papirja okrogle oblike za enkratno uporabo odbrusili s površine vzorca. Naprava uporablja brusno ploščo granulacije 600, PK/100 s premerom kroga 10 mm, ki jo nalepimo na podstavek, kot prikazuje slika 6. Pri brušenju je bilo treba paziti, da smo za kvalitetno meritev na papirju imeli ravno pravšnjo količino materiala. Papir z nanešenimi vlakni lesa smo nato nalepili na podlago, ki smo jo vstavili v spektrometer. Meritve so bile opravljene pri resoluciji 4 cm^{-1} , opravljenih je bilo 16 ponovitev na en vstavljen vzorec. Računalnik je izračunal povprečno vrednost. Spektrometer je med drugim tudi javljal ali je na brusnem papirju dovolj lesnega materiala ali ga je mogoče preveč in tako meritev ne bi bila natančna. Za vsak vzorec smo pripravili po tri brusne papirje z lesno maso tako, da smo med tremi grafi izbrali tistega, ki je imel najkvalitetnejše meritve.



Slika 6: Samolepilni brusni papir za izvajanje FTIR spektroskopije

3.3 PRIPRAVA HRANILNEGA GOJIŠČA

Pripravili smo laboratorijske kozarce prostornine 600 mL (slika 7), jih očistili z vodo in detergentom za pomivanje posode, splaknili z vodo ter jih osušili na zraku. Uporabljeni so bili pokrovčki, na katerih je bila v luknjo na sredini vstavljena vata, ki je služila za izmenjavo zraka z okolico, vendar je klicam in bakterijam preprečevala vstop v kozarec. V

lončke smo predhodno pripravili hranilno gojišče, ki smo ga skuhalo v loncu na štedilniku. Med samim kuhanjem je bilo treba skrbno paziti in mešati, da se hranilno gojišče ni prismodilo, saj bi v tem primeru spremenilo barvo. Hranilnost takšnega pripravka ne bi bila več optimalna, saj bi vplivala na pretvorbo sladkorja v njem. V vsak kozarec smo nalili približno 5 mm debelo plast pripravka s površino sloja približno 115 cm². Kozarce smo pokrili in jih pustili do drugega dne, da se je pripravek ohladil in zgostil.



Slika 7: Kozarec, v katerem smo vzorce lesa izpostavili glivi

Naslednji korak sta bila segrevanje in sterilizacija približno 250 kozarcev s pripravkom v avtoklavu proizvajalca Sutjeska Beograd (slika 8). Avtoklav je valjaste oblike, električne izvedbe, notranji plašč je iz nerjavečega jekla, pod katerim so grelna telesa. Kozarci so se med avtoklaviranjem segreti na 121 °C, hranilno gojišče v njih pa se je zaradi vročine zopet utekočinilo. Postopek je trajal približno 300 minut in je služil za sterilizacijo kozarcev in hranilnega medija. Postopek smo ponovili trikrat zaradi premajhne kapacitete avtoklava. Po avtoklaviranju so se kozarci s hranilnim gojiščem čez noč ohladili.

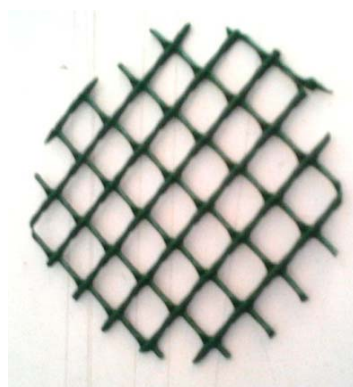


Slika 8: Naprava za avtoklaviranje

3.4 INOKULACIJA GLIV IN VNOS VZORCEV V KOZARCE

Inokulacijo gliv oziroma njihov vnos na ohlajeno hranilno gojišče smo izvajali v brezprašni komori SMBC 122 proizvajalca ISKRA PIO. Omogočala nam je čisto delo in ohranjanje sterilnega okolja pri delu s cepljenjem gliv na hranilno gojišče v lončkih. V lončku se ni smela pojaviti nobena druga okužba, plesen ali gliva, ki bi lahko vplivala na rast izbrane glive. Komora ima filter za zrak in ves zrak, ki ga črpa iz okolice, se s tem filtrom prečisti. Tako je v komori konstantno nadtlak, ki ne dovoli, da bi zrak iz okolice z nečistočami ter klicami prodrl v notranjost. Vanjo smo naložili določeno količino kozarcev, jo zaprli in prižgali UV (ultra-vijolično) svetilko za 15 minut, ki je uničila bakterije ter ostale organizme na površini kozarcev. Med tem časom smo iz gojitvene komore prinesli seve gob v petrijevkah. Cepitev glive na hranilno gojišče v kozarcu je potekalo tako, da smo vse orodje, s katerim smo delali v komori, obžgali z ognjem. Prijeli smo zaprt kozarec, ga obžgali na spoju med pokrovčkom in kozarcem ter ga odprli. Iz petrijevke smo s predhodno obžgano žličko izrezali majhen krog z glivo. Ta vzorec smo vstavili na pripravek v našem kozarcu, ki smo ga zaprli in zopet obžgali z ognjem po spoju. Postopek smo ponovili za vsak kozarec posebej. Istočasno smo na nalepke pisali začetne črke gliv, vnešene v kozarec.

V gojitveni komori se je vršila rast gliv v lončkih, kasneje pa tudi sama izpostavitve vzorcev glivam. Pripravljene kozarce smo za 2 tedna postavili v komoro s temperaturo 20 °C in 65 % relativne zračne vlažnosti. Med tem časom, ko se je goba razraščala v komori, smo pripravili še plastične okrogle mrežice (slika 9), ki smo jih kasneje potrebovali za preprečevanje takojšnjega direktnega stika vzorca z glivo. Mrežice smo zlagali v čaše in ko so bile čaše polne, smo jih zalili z alkoholom ter pokrili s folijo. Mrežice smo zatem še sterilizirali s paro, podobno kot lesne vzorce. Vzorce smo zložili na steklene petrijevke in jih prav tako pokrili s folijo ter jih 20 minut sterilizirali pri 121 °C. Nato se je nadaljevalo delo v brezprašni komori.



Slika 9: HDPE mreža za preprečevanje stika med micelijem in vzorcem

V komoro smo zložili kozarce in priključil UV svetilko za 15 minut. Tokrat smo kozarec obžgali in ga odprli. Iz čaše z mrežicami smo vzeli HDPE mrežo okrogle oblike in jo obžgali in jo položilina hranilno gojišče v kozarcu, kjer se je že dobro razrastel micelij glive.

Na to mrežo smo položili kontrolni in zgoščeni vzorec, ki sta bila postavljena tako, da se med seboj nista dotikala. Pripravljene kozarce (Slika 10) pa smo zopet zložili v komoro, kjer smo jih inkubirali 2, 4, 6 ali 8 tednov.



Slika 10: Kozarci z vzorci tik po izpostavitvi glivi

3.5 ČIŠČENJE IN SUŠENJE

Prvih 50 kozarcev smo iz komore izolirali po 2 tednih, ji odprli in vzorce s papirjem in krtačo očistili tako, da smo s površine vzorcev poskušali odvzeti zgolj micelij, ne pa tudi lesnega tkiva. Očiščene vzorce smo stekali še vlažne in jih nato sušili v laboratorijski sušilnici pri 103 °C 24 ur in jim določili maso. Izmerjene mase suhih vzorcev pred in po izpostavitvi glivama so nam omogočile izračun izgube mase vzorcev. Enak postopek smo ponavljali vsaka 2 tedna vse do 8 tedna, ko smo iz komore izolirali zadnjih 50 vzorcev. Vse vzorce skupaj smo odnesli v komoro z relativno zračno vlažnostjo 65 % in temperaturo 20 °C, pri čemer se je les v komori uravnovešal 10 dni.

3.6 MERITVE VZORCEV PO IZPOSTAVITVI GLIVAM

Naš nadaljni korak je bil ugotoviti spremembe vzorcev zaradi vpliva gliv. Vzorce smo po ponovnem uravnovešanju zaprli v polietilenske vreče in jim izmerili maso na laboratorijski tehtnici A02109 proizvajalca Tehtnica Železniki ter dimenzije z digitalnim kljunastim merilom. S spektrometrom smo izmerili spektre izpostavljenih vzorcev. Pridobljene spektre

smo obdelali v programski opremi naprave Perkin Elmer FTIR Spectrum 2000 ONE, jih uredili ter pripravili za interpretacijo. Opazovali smo spremembo barve, nastale zaradi razkroja lesa, ki so ga povzročile glive. Vzorce smo po izpostavitvi glivam skenirali in računalniško obdelali na enak način kot pred izpostavitvijo. Zanimala nas je sprememba odtenska barve (ΔE), ki jo še lahko zazna človeško oko, kar smo izračunali z enačbo:

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2} \quad \dots (1)$$

pri čemer so bili podatki Lab pred izpostavitvijo ($L_1a_1b_1$) in po izpostavitvi ($L_2a_2b_2$) preračunani v ΔE . Meritve mehanskih lastnosti smo izvedli tudi po izpostavitvi glivam. Tako smo ugotovili spremembo mehanskih lastnosti zgoščenega ali naravnega lesa topola in duglazije. Vzorcem smo izmerili mehanske lastnosti po izpostavitvi na Zwick/Roell univerzalnem testirnem stroju, z enakimi nastavitvami kot pri merjenju pred izpostavitvijo glivam, vendar pa so se tokrat izvajale meritve do porušenja vzorca, ki je moralo nastopiti v času (90 ± 30) sekund. Vse meritve so se izvajale pri temperaturi $20 \text{ }^\circ\text{C}$ in 65 % relativne zračne vlažnosti. Razmak med podporama je ostal enak (30 mm) ne glede na končne dimenzije izpostavljenih vzorcev.

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

4.1 GOSTOTA LESA

Les dveh različnih drevesnih vrst, uporabljen v raziskavi, je bil zgoščen po treh različnih postopkih THM zgoščevanja lesa, uravnovešen v relativni zračni vlažnosti (ang. Relative Humidity, RH) 65 % in temperaturi 20 °C. Vzorci so bili med zgoščevanjem v stiskalnici pod obremenitvijo 5,5 MPa. Začetna gostota in dimenzije vzorcev so ključno vplivale na končno debelino vzorca, pri čemer je bila končna gostota vzorca približno konstantna predvsem pri topolu, gibala se je okrog 1150 kg/m³. Manjša začetna gostota (424 kg/m³) lesa listavca je nudila manjši odpor lesa proti zunanjim dejavnikom zgoščevanja. Pokazala se je kot nižji zgostitveni modul ter večja zgostitvena deformacija lesa. Les topola je bolj deformabilen tudi zaradi raztreseno porozne celične zgradbe, kar se je pokazalo v tem, da razlike v zgoščenosti vzorcev med postopki skoraj ni bilo (preglednica 2). Les duglazije ima zaradi plasti kasnega lesa naravno pregrado, ki preprečuje prehod pare skozi debele celične stene in plastifikacijo le-teh. Plast gostega nedeformabilnega kasnega lesa pa otežkoča zgoščevanje. Zgoščevanje vzorcev duglazije s postopkom nasičene pare (SS) in postopkom nasičene pare z naknadnim segrevanjem (SS+PHT) sta vodila do produktov z rahlo večjo gostoto, kot postopek TS brez vpliva temperature pare ali tlaka. Manjša gostota vzorcev (TS) predvidoma izvira iz vmesne ohladitve vzorca in izgube časa stiskanja nad steklastim prehodom (T_g) lesa (Lesar in sod., 2013). Zaradi tega so bile molekule lignina manj prilagodljive in niso dopuščale tako izrazitih gibanj celuloznih vlaken znotraj mreže kot ostala dva postopka. Med postopkom obdelave lesa z vročo paro prihaja do sproščanja določenih vezi med molekulami in zaradi tega omogoča večjo elastično in plastično deformacijo lesnih komponent oziroma gradnikov lesa na makroskopski, mikroskopski in molekularni ravni.

Preglednica 2: Gostota vzorcev pri relativni zračni vlažnosti (RH) in temperaturi (T) (vrednost v oklepajih je standardni odklon)

	Duglazija	Topol
Postopek	Gostota pri RH = 65 % T = 20 °C (kg/m ³)	Gostota pri RH = 65 % T = 20 °C (kg/m ³)
Kontrolni	464 (56)	424 (44)
TS	977 (151)	1150 (55)
SS	1046 (55)	1116 (45)
SS+PHT	1028 (100)	1170 (40)

4.2 BIOLOŠKA ODPORNOST

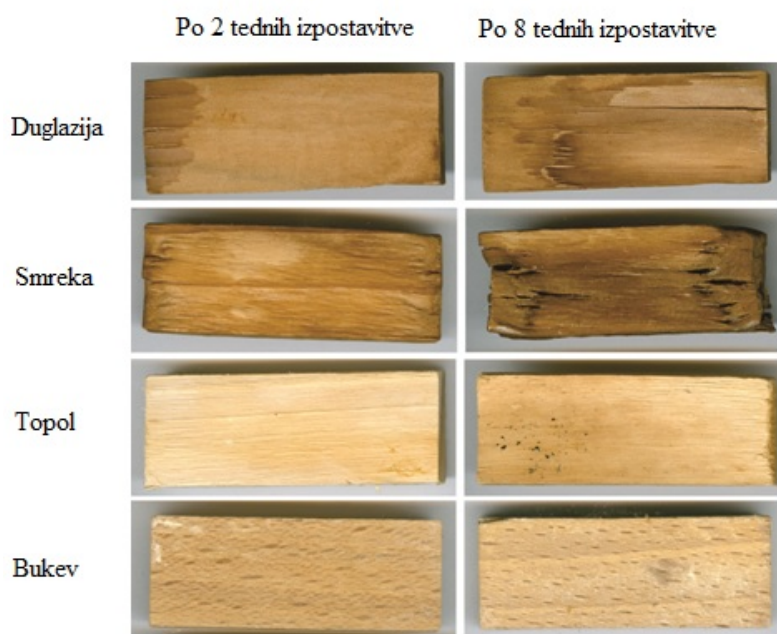
Razkroj lesa bukve in smreke kaže, da sta bili gobi vitalni. Smrekovi vzorci so po 8 tednih izpostavitve izgubili povprečno 39 % svoje prvotne mase, medtem ko je bukev v enakem obdobju izgubila kar 46 % prvotne mase. Obe kontrolni vrsti lesa sta se izkazali kot neodporni lesni vrsti. Že po prvih 2 tednih meritev je bila izguba mase pri obeh kontrolnih lesnih vrstah 7 %. Izkazalo se je, da so bile glive vitalne in aktivne že od vsega začetka izpostavitve. Duglazija je po klasifikaciji standarda EN 350-2 (1994) srednje odporna lesna vrsta. Primerjava izgub mase duglazije (preglednica 3) in smreke je pokazala, da ima duglazija z 8,4 % izgube mase po 8 tednih skoraj 5 krat manjšo izgubo mase kot smreka (39 %). Vzorci duglazije obdelani po postopkih TS in SS niso imeli nič boljših lastnosti kot kontrolni vzorci duglazije. Torej postopek, kjer so vzorci segreti in obdelani s paro na 170 °C za kratek čas, ne vpliva na odpornost proti lesnim glivam. Če bi bil čas izpostavitve pri teh temperaturah daljši, bi bilo za opazen rezultat potrebno les izpostaviti določeno število ur in ne minut. Vzorci, obdelani z metodo zgoščevanja z naknadnim segrevanjem do 200 °C s kratko postopka SS+PHT, so celo imeli rahlo večjo izgubo mase. Izguba je predvidoma povezana z razpadom ekstraktivov in ostalih naravnih inhibitorjev razkroja v lesu duglazije. Navadno pri iglavcih hitro prihaja do izločanja smol in eteričnih olj že pri sušenju v sušilnici, kjer so temperature precej nižje kot pri zgoščevanju, kar pomeni znižanje naravne odpornosti proti dejavnikom razkroja. Dimenzije obdelovancev so večje in zato je izhod in izločanje ekstraktivov iz lesa otežkočeno. Predvsem pa ne prihaja do zgoščevanja vzorcev. Med postopkom zgoščevanja se velik del vode in segrelih ekstraktivov, ki so zaradi povišane temperature in vodne pare še bolj mobilni, hitro

pomakne na površino obdelovanca. Na površini se smole posušijo in zato je bila površina duglazijinih vzorcev videti bolj gladka. Razpad hemiceluloz na enostavnejše sladkorje pomeni boljšo dostopnost hranil za glive razkrojevalke. Postopek SS+PHT s segrevanjem lesa do 200 °C je povzročil razpad hemiceluloz na enostavnejše sladkorje. Del teh sladkorjev se je lahko ob koncu postopka zgoščevanja s hitrim umikom vodne pare pomaknil tudi sam proti površini vzorca, kar bi pomenilo, da je imela gliva več enostavnih sladkorjev dostopnih že na površini sami oziroma tik pod površino, zato bi bila tako večja izguba mase mogoča. Vsaka površina materiala je izpostavljena zunanjim dejavnikom. Določeni elementi nato odhlapijo, razpadejo zaradi UV sevanja ali so odnešeni s površine zaradi trenja in kontakta med ostalimi vzorci. Podobno so opazili tudi Ünsal in sod. (2008) pri borovih panelnih ploščah, kjer so zaradi razpada ekstraktivov plošče manj odporne na biološki razkroj.

Topol je kot naravni material precej manj odporen proti biološkim dejavnikom razkroja kot duglazija. To je opisano tudi v standardu EN 350-2 (1994), kjer ga uvrščajo med les z nizko naravno odpornostjo. Izguba mase topolovih zgoščenih vzorcev (preglednica 3) po 8 tednih je med 24,8 % in 31 %, kar je malo manj kot so bile izgube kontrolnih smrekovih vzorcev. To nam jasno pokaže, da je čas zgoščevanja in parjenja pri teh temperaturah prekratek za kakršnokoli izboljšanje bioloških lastnosti. Kot je razvidno s slike 11, je odpornost različnih lesnih vrst, uporabljenih v raziskavi različna, najbolj opazen je razkroj pri lesu smreke.

Preglednica 3: Izguba mase vzorcev v odvisnosti od časa izpostavitve glivam. Vzorci duglazije so bili izpostavljeni glivi navadne tramovke, vzorci topola pa glivi pisane ploskocevke (vrednost med oklepajem je standardni odklon)

Tretma	Čas izpostavitve glivi (teden)	Duglazija		Topol	
		Izguba mase		Izguba mase	
		(%)	(g)	(%)	(g)
Kontrolni	2	2,7 (2,0)	0,06 (0,05)	4,2 (1,6)	0,09 (0,05)
	4	3,4 (1,5)	0,07 (0,04)	19,1 (6,8)	0,30 (0,04)
	6	3,7 (3,3)	0,09 (0,09)	26,5 (7,4)	0,46 (0,09)
	8	8,4 (3,6)	0,17 (0,11)	34,0 (9,2)	0,50 (0,11)
TS	2	1,3 (1,1)	0,03 (0,03)	6,8 (3,1)	0,13 (0,03)
	4	3,1 (1,3)	0,08 (0,04)	25,9 (8,3)	0,46 (0,04)
	6	7,1 (2,4)	0,21 (0,08)	26,0 (8,2)	0,49 (0,08)
	8	6,0 (1,8)	0,15 (0,04)	30,8 (9,6)	0,55 (0,04)
SS	2	4,3 (1,3)	0,10 (0,03)	6,6 (3,4)	0,11 (0,05)
	4	5,3 (2,0)	0,12 (0,04)	10,7 (3,2)	0,18 (0,04)
	6	9,0 (1,1)	0,34 (0,31)	26,4 (4,8)	0,44 (0,31)
	8	7,5 (1,0)	0,17 (0,01)	24,8 (8,8)	0,39 (0,01)
SS+PHT	2	5,5 (1,5)	0,12 (0,04)	4,9 (2,6)	0,08 (0,04)
	4	8,0 (1,0)	0,17 (0,03)	20,7 (6,3)	0,37 (0,03)
	6	11,9 (2,3)	0,27 (0,08)	27,8 (8,0)	0,46 (0,08)
	8	11,0 (2,0)	0,23 (0,05)	29,0 (7,4)	0,60 (0,05)

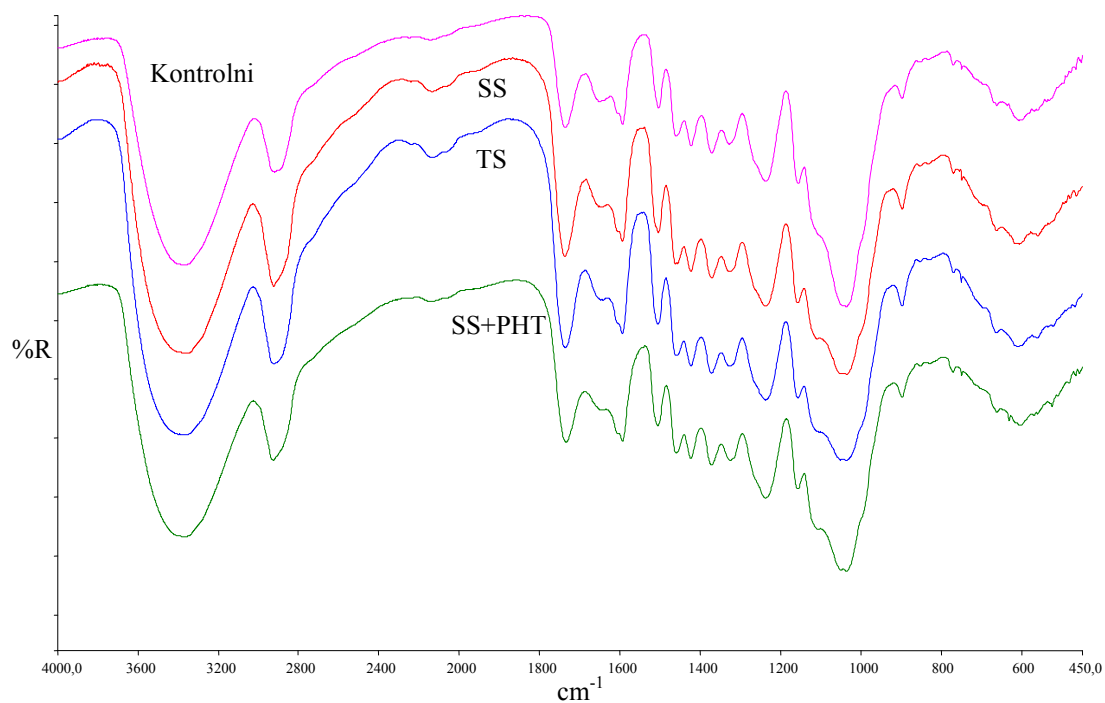


Slika 11: Razkrojenost vzorcev po izpostavitvi glivama v različnem časovnem obdobju

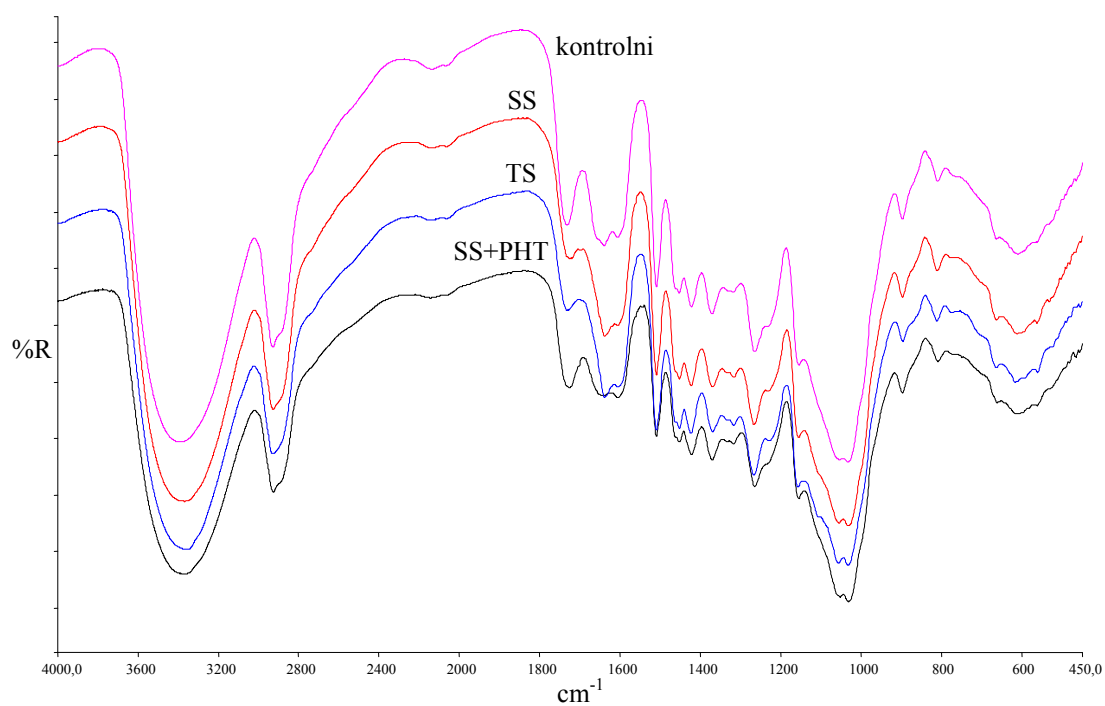
4.3 FTIR SPEKTRI LESA LESA

S FTIR spektroskopijo materialov lahko ugotovimo njihovo sestavo. Naš namen je bil ugotoviti kemične in mehanske lastnosti zgoščenega in delno razkrojenega lesa in ne samo njegove obstojnosti. Material za meritve smo odvezemali s površine, zato ne predstavlja kemične zgradbe celotnega vzorca, ker je bila površina vzorca neposredno v kontaktu z micelijem. Glede na predhodne podatke vidimo, da je pri vzorcih teh dimenzij celotna površina kolonizirana v obdobju enega tedna (Humar in sod., 2006). Pri termično obdelanem lesu je bilo odkrito, da se zgodi mnogo kemičnih sprememb med samo obdelavo vzorcev že pri dokaj nizkih temperaturah. Prve kemične spremembe v smislu razpadov določenih ekstraktivov se dogajajo že pri temperaturah od 40 °C do 90 °C. Pri temperaturah od 90 °C do 150 °C se spremembe začnejo dogajati v vseh lesnih komponentah, najpomembnejša sta temperatura in čas izpostavitve, slednji pripomore najprej k razpadu hemiceluloz in cepljenju kondenzacijskih produktov lignina. Pomembno je tudi poudariti, da je razpadanje večje pri parjenju, to je obdelava lesa z vročo paro kot pri segrevanju suhega lesa. Para hitreje segreje les po celotnem prerezu, kot pa se to dogaja pri vplivu suhega segrevanja lesa, medtem ko ima segrevanje v inertnih pogojih še dosti manjše vplive na elemente lesa, saj zaradi odsotnosti kisika ne prihaja do oksidacije. Spremembe FTIR spektra lesa so bile že raziskane v mnogih primerih (Tjeerdsma in Militz, 2005; Hakkou in sod., 2005, 2006; Yildiz in Gümüşkaya, 2007). V našem primeru topol ni imel tako opaznih sprememb, kot so bile opisane v drugih študijah (slika 12). Predvidevamo, da je za skromne spremembe FTIR spektrov vzorcev krivo blago segrevanje do 170 °C in pod vplivom pare, ki ima največji vpliv na les, vendar je bil čas izpostavitve vzorcev tem razmeram prekratek, da bi lahko povzročil večje kemične spremembe v molekularni zgradbi lesa. Glede na preučeno literaturo (Tjeerdsma in Militz, 2005; Hakkou in sod., 2005, 2006; Yildiz in Gümüşkaya, 2007) smo pričakovali večje kemične spremembe topolovih vzorcev, ki bi v primeru ostrejšega režima tudi bile. Več sprememb je bilo zaznati pri lesu duglazije (slika 13), kjer je najbolj viden karbonilni pas pri 1730 cm^{-1} , ki kaže na razpad hemiceluloz (Tjeerdsma in Militz 2005). Pri spektru valovne dolžine 1330 cm^{-1} se pokaže še ena manjša sprememba pri SS+PHT in se nanaša na kristalinično celulozo ter nakazuje na to, da je lahko prišlo do spremembe v

kristaliničnosti same celuloze (Hakkou in sod., 2005, 2006). Ker so bili podatki zajeti na površini, ne držijo tudi za notranjost vzorca.

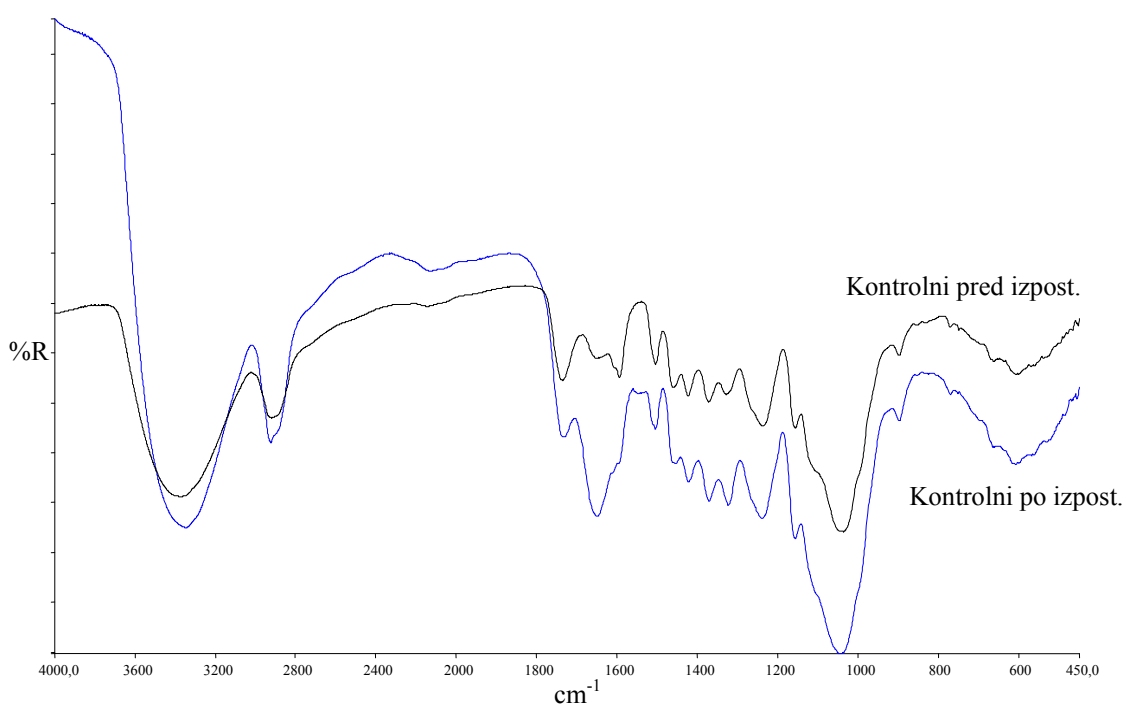


Slika 12: Vzorci topola pred izpostavitvijo glivi pisane ploskocevke

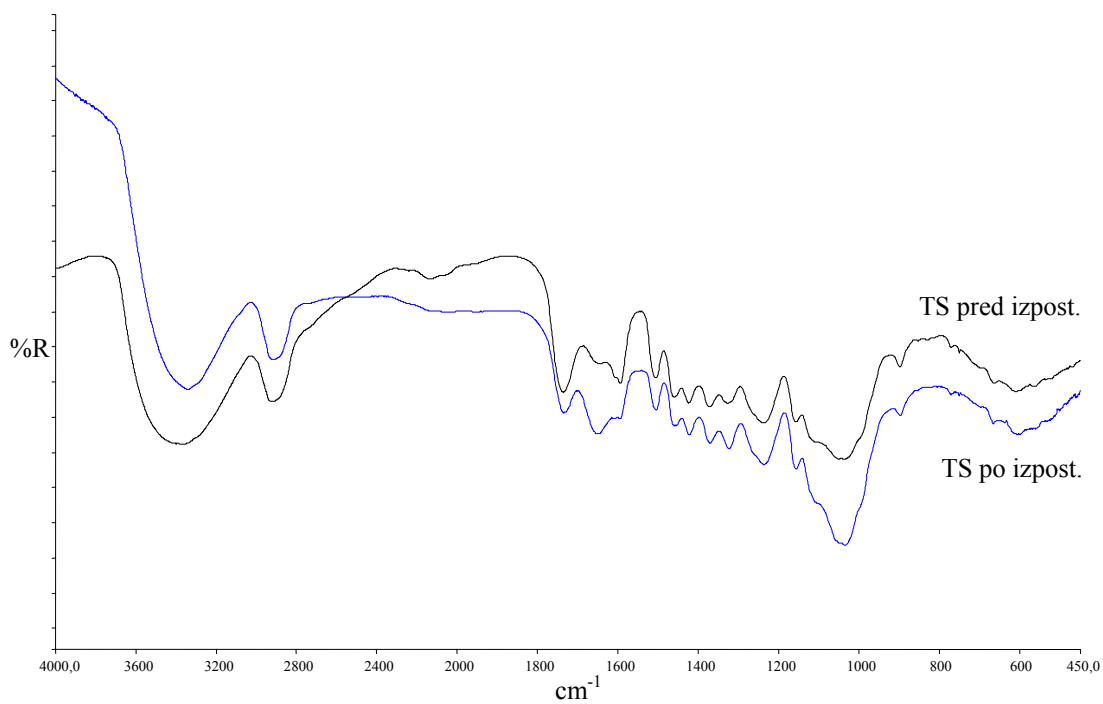


Slika 13: Vzorci duglazije pred izpostavitvijo glivi navadne tramovke

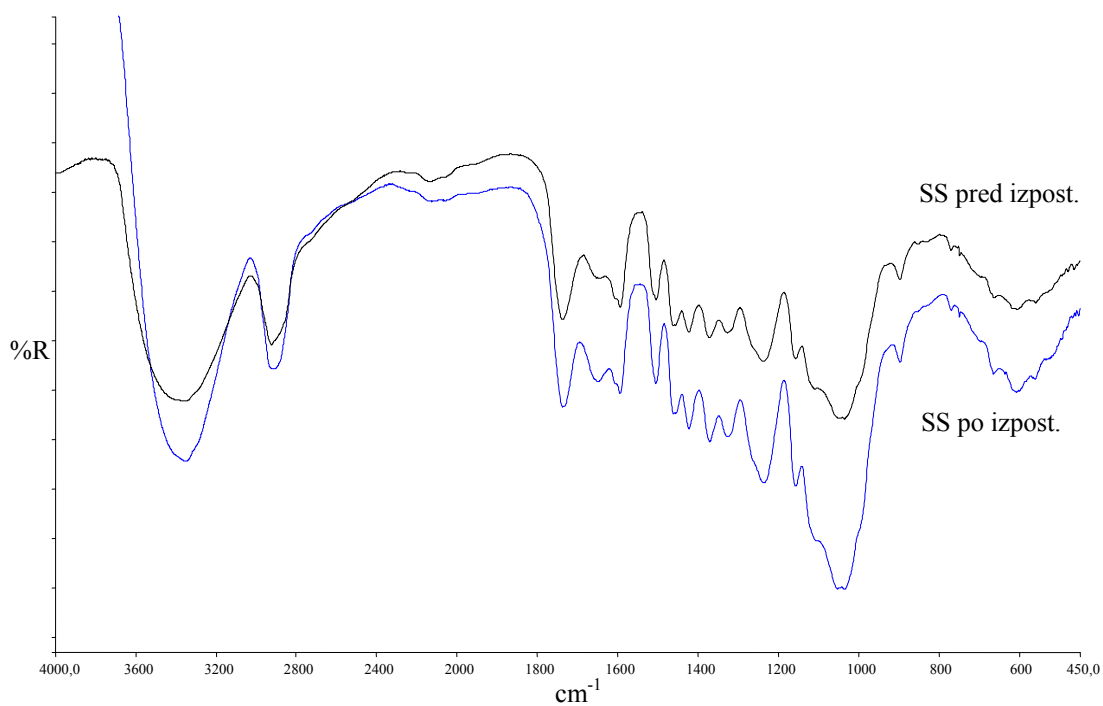
Prve spremembe, ki se pokažejo že po 2 tednih izpostavitve, ostanejo tudi po izpostavitvi vzorcev glivi 8 tednov. Razlog za tako hitro zaznavo sprememb je prav v tem, da smo opazovali površino vzorca, ki je bil najprej in najbolj izpostavljen delovanju gliv. Micelij je s časom napredoval tudi v notranjost, vendar se je najizrazitejše razpadanje pojavilo na površini vzorcev. Glive bele trohnobe razkrajajo predvsem hemiceluloze in lignin. Pri topolu so bile zaradi tega spremembe vidne pri trakovih 1730 cm^{-1} za hemiceluloze in 1600 cm^{-1} za lignin, vendar le pri metodi SS+PHT, pri čemer je med termično obdelavo prišlo do povišane temperature nad 200 °C , zaradi česar so hemiceluloze začele razpadati. Ostali dve metodi zgoščevanja v lesu nista spremenili kemijske zgradbe. Odstopanje od ostalih dveh metod ni veliko (slika 14, 15, 16, 17). Les duglazije je bolj odporen kot les topola, zato razkroj s strani rjave trohnobe ni povzročil opaznih sprememb TS, SS in SS+PHT ter kontrolnih vzorcev (slika 18, 19, 20, 21). Največje spremembe je bilo opaziti pri vzorcih SS+PHT pri pasovih, ki pripadajo hemicelulozi (1730 cm^{-1}), aromatskem obroču (1595 cm^{-1}) in celulozi (1160 cm^{-1}).



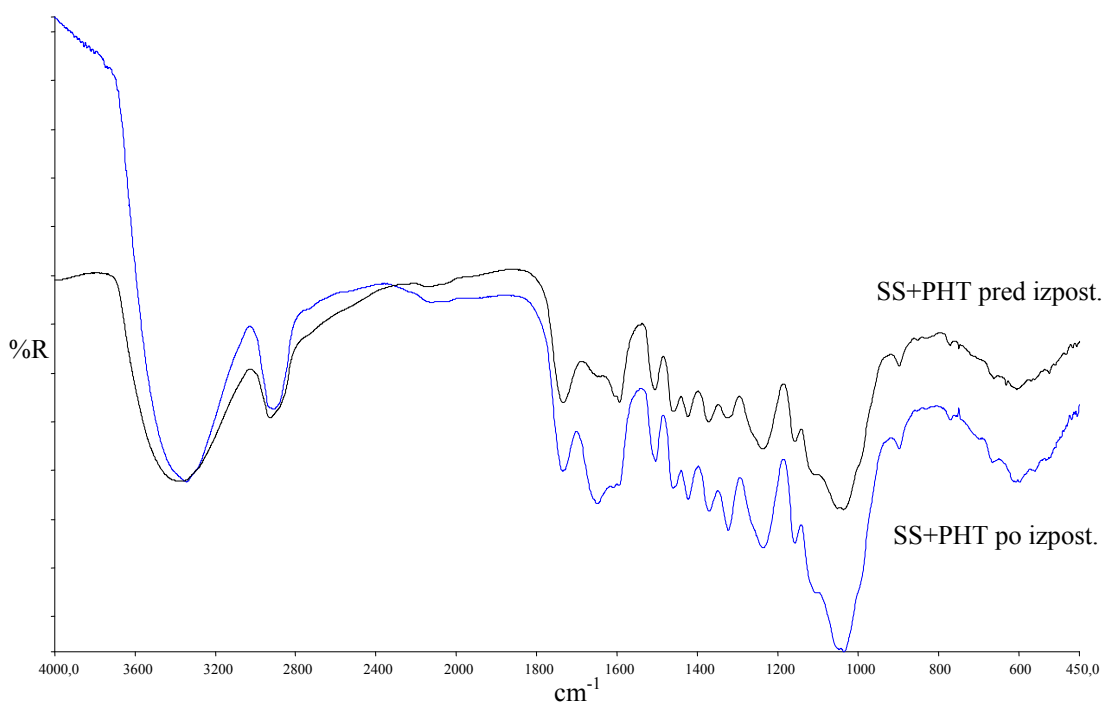
Slika 14: Kontrolni vzorci topola pred in po izpostavitvi glivi pisane ploskocevke



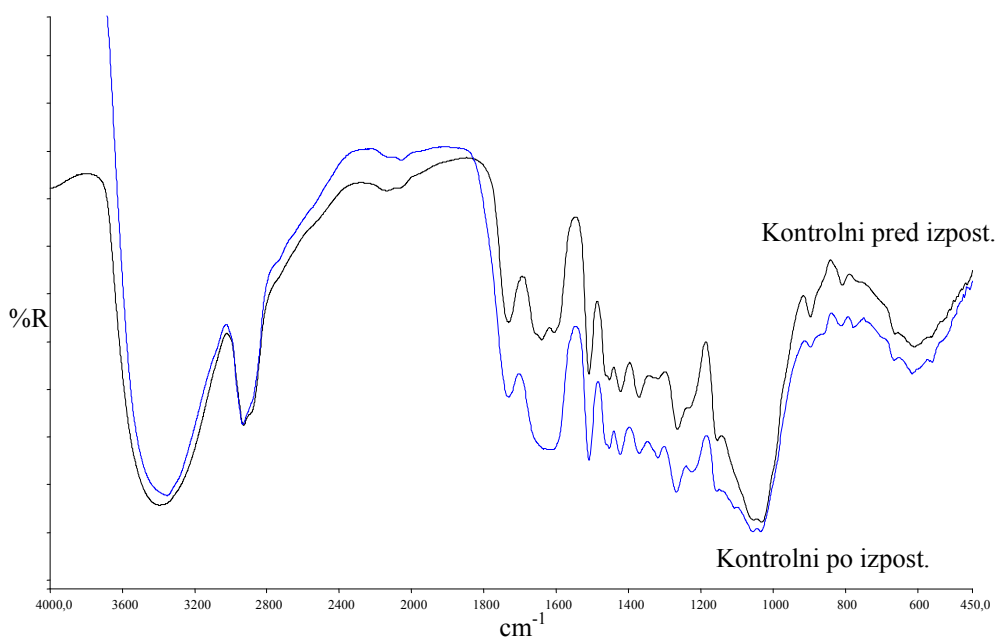
Slika 15: Vzorci topola TS pred in po izpostavitvi glivi pisane ploskocevke



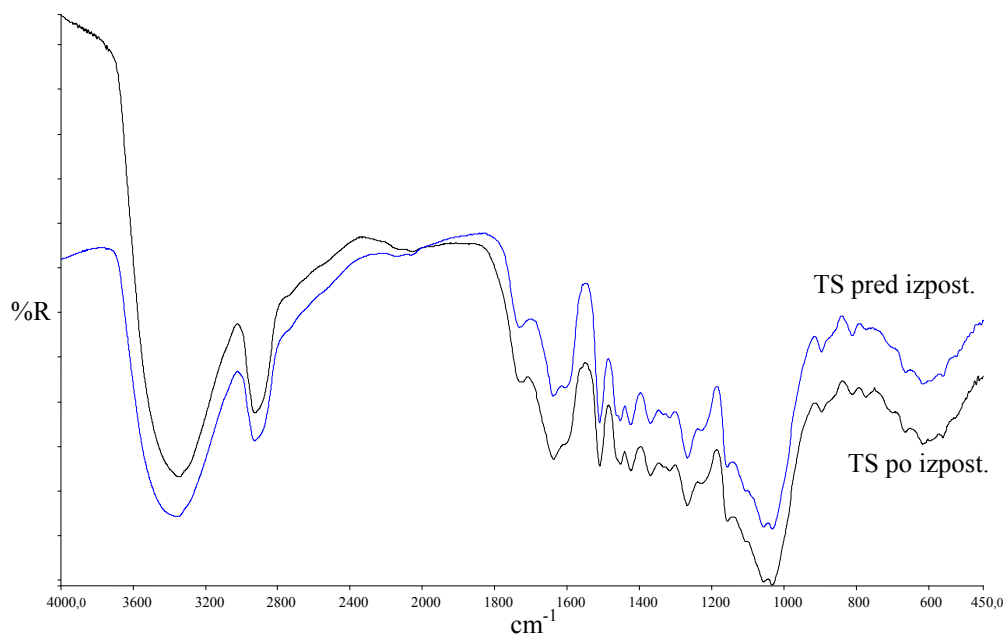
Slika 16: Vzorci topola SS pred in po izpostavitvi glivi pisane ploskocevke



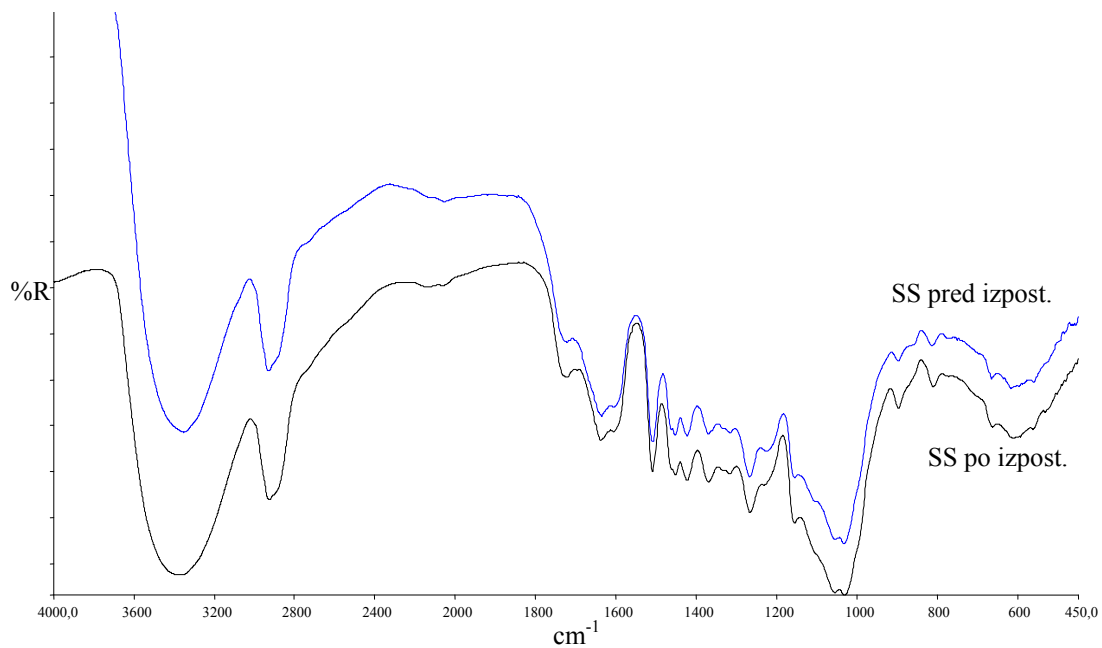
Slika 17: Vzorci topola SS+PHT pred in po izpostavitvi glivi pisane ploskocevke



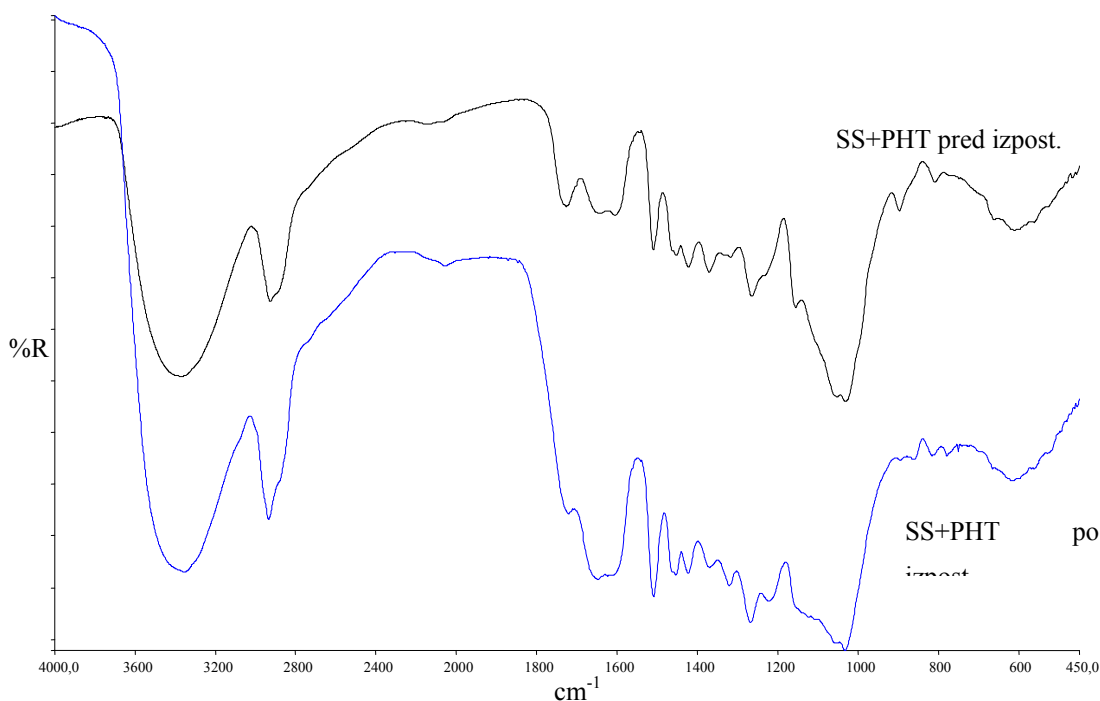
Slika 18: Kontrolni vzorci duglazije pred in po izpostavitvi glivi navadne tramovke



Slika 19: Vzorci duglazije TS pred in po izpostavitvi glivi navadne tramovke



Slika 20: Vzorci duglazije SS pred in po izpostavitvi glivi navadne tramovke



Slika 21: Vzorci duglazije SS+PHT pred in po izpostavitvi glivi navadne tramovke

Rezultati meritev gostote, izgube mase in FTIR analize so pokazali, da je zgoščen THM les podoben nezgoščenemu lesu. V lesu obeh drevesnih vrst zaradi povišanih temperatur ni prišlo do opaznih sprememb v odpornosti na razkroj. Potrebno je opozoriti, da je les jedrovine duglazije že po naravi bolj odporen na biološke dejavnike razkroja od lesa topola.

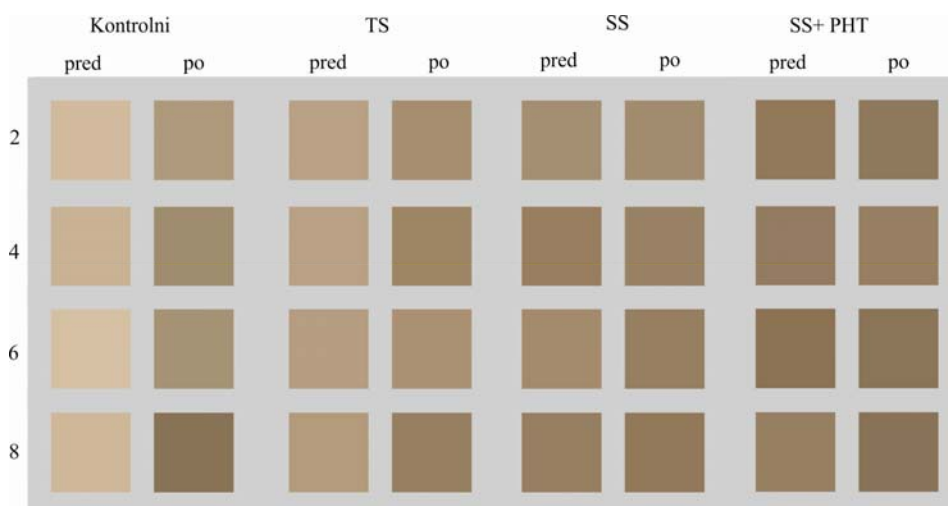
4.4 SPREMEMBE BARVE

Naravna barva lesa se z naraščanjem in trajanjem visokih temperatur ter vroče vodne pare spreminja. Les dobi temnejšo patino zaradi kemičnih in strukturnih sprememb. Višja kot je temperatura ali daljši kot je čas obdelave, temnejša je barva, ki je lahko dosežena s hidrotermičnim postopkom (Esteves in sod., 2008). Navadno se les termično ne modificira zaradi barvnega tona, temveč zaradi izboljšanja odpornosti na glive. Vpliv termičnega in hidrotermičnega tretmaja je bil predmet raziskav že pri mnogih raziskovalcih (Tjeerdsma in sod., 1998; Koch in sod., 2003; Sundqvist in sod., 2006; Varga in van der Zee, 2008), vendar kemični razlogi za spremembo barve še niso bili v celoti pojasnjeni. Sklepa se, da

izhajajo iz sprememb in razpada hemiceluloz, lignina in ekstraktivov (Sundqvist in Morén, 2002). Meritve barve lesa smo izvajali v skladu s sistemom CIELAB. Po zgoščevanju lesa so vzorci spremenili barvo le v smeri komponente L, ki predstavlja svetlost vzorca. Vzorci, ki so bili izpostavljeni višjim temperaturnim pogojem goščevanja, so bili temnejši. Vzorci duglazije TS (preglednica 4) s prehodnim obdobjem so imeli najmanjšo stopnjo potemnitve ($L=66,2$), SS v nasičeni pari so bili znatno temnejši ($L=58,1$) in SS+PHT z zaključnim segrevanjem do 200 °C pa so dobili najtemnejšo patino ($L=54,3$), vendar pa je s slike 22 dobro razvidno, da je imel THM postopek zgoščevanja največji vpliv na spremembo barve. Meritve barve po izpostavitvi so pokazale, da sama izpostavitvev ni imela večjega vpliva na zgoščene vzorce, saj so barve ostale enake. Na nezgoščene vzorce pa je imela določen vpliv, saj so postali temnejši, torej se jim je spremenila komponenta L. Takšni rezultati meritev barve so bili pričakovani, saj glive rjave trohnobe razkrojijo predvsem celulozo in oksidirajo lignin (Tomak in sod., 2011). Les je spremenil barvo kmalu po izpostavitvi, nato pa se s trajanjem izpostavitve glivam barva ni spreminjala. Barva nezgoščenega neizpostavljenega topolovega lesa (preglednica 5) je bila svetla ($L=97,4$), rahlo zelenkasta ($a=-0,9$) in rdečkasta ($b=8$). Po izpostavitvi je les postal temnejši ($L=83,0$) in rumenkast ($a=4,7$), s prevladujočo rdečo barvo ($b=17,8$). Kot že napisano, je les spremenil barvo po 2 tednih izpostavitve (slika 23), meritve pa so bile izvedene le na površini vzorcev. Nanjo vplivajo temperaturni pogoji in zato je les zgoščenega topola temnejši od neobdelanega naravnega lesa. Pri zgoščenih vzorcih, ki imajo temnejši odtenek zaradi zgoščevanja samega so z izpostavitvijo vzorci dobili svetlejšo barvo, saj *Trametes versicolor* razkraja predvsem lignin in celulozo.

Preglednica 4: Sprememba barve vzorca duglazije glede na čas izpostavitve glivi navadne tramovke

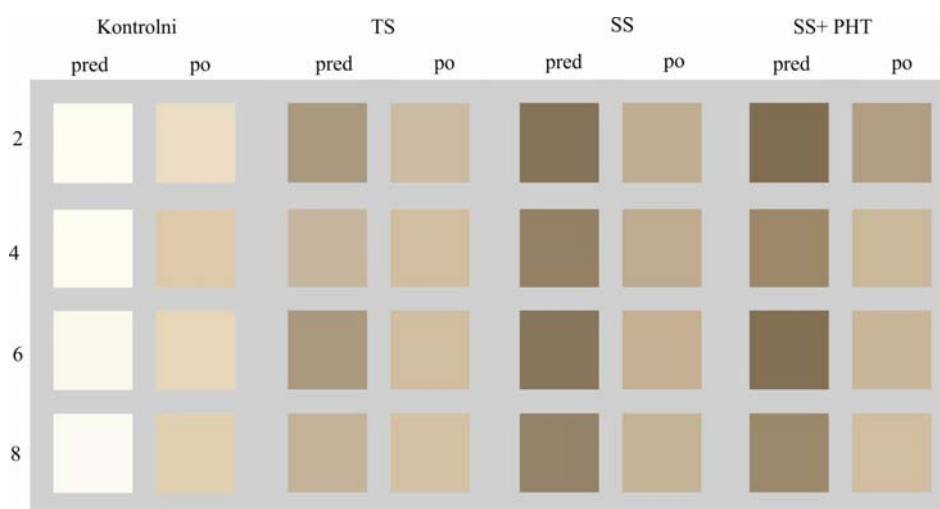
Vzorci duglazije	Čas izpostavitve glivi (teden)	Sprememba barve						
		L	A	b	ΔL	Δa	Δb	ΔE
Kontrolni	2	76	7	17	11,5	0,2	-0,5	11,6
	4	73	7	18	13,2	1,2	-0,2	13,3
	6	78	7	17	15,1	1	-0,9	15,4
	8	75	8	17	23	1	-0,7	23,1
TS	2	67	7	17	5,2	0,1	-1,2	6
	4	67	8	17	7,6	0,5	-2,1	8,5
	6	66	7	17	3,7	-1,2	-0,5	5,6
	8	65	8	18	8,6	0,9	-1,2	8,8
SS	2	61	7	17	-0,1	0,1	-0,3	2,8
	4	56	8	18	-1,5	1,1	0,4	2,6
	6	60	7	18	3,7	0,3	-0,4	4,4
	8	56	8	18	2,5	0,7	-0,4	4
SS+PHT	2	54	7	19	-1,3	0,3	1,4	2,5
	4	55	7	16	-1,2	0,4	-1,4	3,6
	6	52	7	19	-0,1	0,5	1,6	4,8
	8	56	7	18	4,7	0,7	1,7	5,3



Slika 22: Grafični prikaz izmerjenih vrednosti sprememb barv vzorcev duglazije pred in po izpostavitvi glivi navadne tramovke. Številke v stolpcu predstavljajo čas izpostavitve (v tednih)

Preglednica 5: Sprememba barve vzorca topola glede na čas izpostavitve glivi pisane ploskocevke

Vzorci topola	Čas izpostavitve glivi (teden)	Sprememba barve						
		L	a	b	ΔL	Δa	Δb	ΔE
Kontrolni	2	99	-1	7,5	10,4	-4,4	-6,2	13
	4	99	-1	6,6	17,3	-6,6	-12,6	22,5
	6	98	-1	8,1	12,2	-5,3	-9,3	16,2
	8	99	-1	6	15,6	-5,4	-11,7	20,3
TS	2	64	4,4	15	-13	0,1	-0,2	12,7
	4	74	3,7	14	-3,6	-1,2	-3,8	7,4
	6	64	4,5	15	-13	-0,2	-1,8	13,9
	8	73	4	15	-4,6	-0,6	-2,3	6,9
SS	2	52	4,5	15	-19	-0,3	-0,8	18,6
	4	56	4,8	16	-14	-0,3	0	13,9
	6	53	4,8	15	-19	-0,2	-1,1	19,3
	8	57	4,4	15	-15	-0,9	-1,3	15,4
SS+PHT	2	50	5,2	17	-17	0,4	1,5	16,7
	4	59	5,1	18	-16	0,1	0,4	16
	6	51	5	16	-22	0,5	0,6	22,4
	8	59	4,6	17	-17	-0,2	0,1	17,4



Slika 23: Grafični prikaz izmerjenih vrednosti sprememb barv vzorcev topola pred in po izpostavitvi glivi pisane ploskocevke. Številke v stolpcu predstavljajo čas izpostavitve (v tednih).

4.5 MEHANSKE LASTNOSTI

Vzorcem smo določili mehanske lastnosti, in sicer MOE in MOR, pred in po izpostavitvi glivam. Na rezultate meritev (preglednica 6) so vplivali vrsta lesa, stopnja zgoščenosti, metoda THM zgoščevanja lesa (TS, SS, SS+PHT) ter čas izpostavitve vzorca eni ali drugi glivi. Pri deformacijah in generiranju skupkov vlaken zaradi zgoščevanja lesa brez deformacij materiala se trdnost in trdota navadno sorazmerno povečata s stopnjo zgostitve (Kutnar in sod., 2009). Analiza mehanskih lastnosti je pokazala, da se zaradi postopka MOE in MOR izrazito izboljšata v primerjavi z lastnostmi nezgoščenega kontrolnega lesa iste vrste. Izpostavitve lesa glivam razkrojjevalkam zniža MOE in MOR. Sprememba MOE in MoR je odvisna od časa izpostavitve glivam in posledično od izgube mase zaradi vpliva biotskih dejavnikov razkroja. Največjo izgubo MOE so imeli vzorci, ki so bili obdelani po postopku TS, najmanjšo pa vzorci obdelani po postopku SS+PHT. Iz primerjave izgube mase, ki je bila pri vzorcih SS+PHT največja in upada MOE, ki je bila najmanjša lahko sklepamo, da so strukturne komponente lesa ostale v glavnem nepoškodovane. Razkroj se je torej vršil na gradnikih lesa, ki k mehanskim lastnostim ne doprinesejo bistveno. To je pokazala tudi FTIR analiza, s katero smo ugotovili, da so se večje spremembe dogajale v hemicelulozah in kristaliničnosti celuloze, kar za mehanske lastnosti ni ključnega pomena. MOR se je spreminjal sorazmerno s časom izpostavitve in izgubo mase. Večja izguba mase je pomenila tudi manjši MOR. Po 8 tednih izpostavitve so imeli najmanjši MOR vzorci nezgoščenega lesa duglazije in največjega vzorci SS. Vzorci hibridnega topola so zaradi izpostavitve utrpeli izgubo mehanskih lastnosti. Največja izguba MOE s časom izpostavitve se je pokazala pri vzorcih TS tretmaja zgoščevanja. Najmanjša izguba odstotka MOE pa je bila zabeležena pri kontrolnih vzorcih topola. Daljši čas izpostavitve glivam se je izražal pri topolu kot večja izguba odstotka MOE. Tudi na MOR je vplival čas izpostavitve glivam, saj so po 8 tednih izpostavitve vzorci SS imeli največji MOR, najmanjšega pa kontrolni vzorci.

Preglednica 6: Sprememba MOE in MOR vzorcev duglazije in topola zaradi delovanja gliv (vrednost med oklepajem je standardni odklon)

Tretma	Čas izpostavitve glivi (teden)	Duglazija			Topol		
		Gostota RH = 65 % T=20 °C (kg/m ³)	ΔMOE (%)	MOR (N/mm ²)	Gostota RH = 65 % T=20 °C (kg/m ³)	ΔMOE (%)	MOR (N/mm ²)
Kontrolni	2		/	4,5 (1,0)		35,0 (6,8)	60,5 (11,5)
	4	464 (56)	48,7 (19,6)	34,6 (11,8)	424 (44)	55,4 (14,7)	32,8 (11,3)
	6		51,4 (16,5)	43,5 (14,5)		67,2 (13,9)	33,8 (18,5)
	8		61,8 (15,6)	34,8 (9,1)		68,6 (14,9)	15,5 (6,6)
TS	2		977 (151)	98,1 (0,9)		5,4 (2,1)	1150 (55)
	4	77,6 (12,1)		73,5 (30,3)	90,5 (7,5)	42,7 (17,4)	
	6	81,3 (5,0)		68,6 (31,3)	89,0 (5,0)	44,7 (5,6)	
	8	87,9 (9,0)		84,0 (45,1)	95,1 (3,0)	33,1 (16,1)	
SS	2	1046 (55)	91,0 (6,5)	9,9 (4,1)	1116 (45)	66,0 (16,3)	106,0 (34,7)
	4		37,5 (6,5)	124,6 (30,7)		63,9 (3,1)	121,8 (26,1)
	6		68,7 (24,6)	75,3 (7,2)		79,5 (3,1)	66,8 (12,3)
	8		52,8 (28,1)	101,0 (21,6)		68,6 (14,9)	70,9 (22,0)
SS+PHT	2	1028 (100)	94,9 (1,3)	10,7 (2,9)	1170 (40)	65,7 (4,5)	129,6 (15,2)
	4		7,3 (15,3)	87,3 (25,6)		81,7 (11,3)	73,0 (37,3)
	6		63,0 (29,1)	59,9 (14,3)		78,3 (9,1)	71,8 (30,5)
	8		41,7 (9,1)	80,0 (30,6)		83,5 (16,4)	60,5 (27,4)

5 SKLEPI

Na osnovi proučevanja lastnosti lesa topola in duglazije, ki smo ga zgostili po treh postopkih zgoščevanja, smo ugotovili spremembe pri meritvah mase, gostote, barve, kemičnih in mehanskih lastnosti. Kot pričakovano so imeli vzorci jedrovine duglazije boljšo odpornost od vzorcev topola. Razlika med izgubo mase vzorcev je bila približno 4-kratna.

Topol je imel slabšo odpornost na glivni razkroj v primerjavi z duglazijo, in sicer je po 8 tednih izgubil povprečno 31 % mase. V naših raziskavah je bila temperatura zgoščevanja prenizka, da bi lahko vplivala na izboljšanje bioloških lastnosti vzorcev. Pričakovali smo, da bodo vsaj vzorci SS+PHT lesa duglazije, naknadno segreti na 200 °C, imeli boljše odpornostne lastnosti na lesne glive, vendar se izkazalo za ravno nasprotno. Vzorci so imeli največjo izgubo mase prav zaradi dodatnega razpada ekstraktivov v lesu. Čas izpostavitve povišani temperaturi je bil prekratek, da bi lahko vplival na odpornost lesa proti biološkim dejavnikom razkroja.

Pri meritvah FTIR spektrov topola smo pričakovali večje spremembe v sestavi lesa glede na raziskano literaturo, kar pa iz naših rezultatov ni razvidno. Pri meritvah FTIR spektrov duglazije so se pokazale spremembe pri pasu hemiceluloz in karbonilnega pasu celuloze že po 2 tednih izpostavitve. Meritve spektrov so bile izvedene na površini vzorca in ne predstavljajo molekularne sestave celotnega vzorca.

Opaziti je bilo, da je barva vzorcev odvisna od intenzivnosti postopka zgoščevanja. Najmanjša sprememba je za vzorce TS in največja sprememba za vzorce z najintenzivnejšim tretmajem zgoščevanja SS+PHT. Ugotovili smo, da se barva spreminja s trajanjem izpostavitve vzorcev glivam razkrojevalkam. Z izpostavitvijo se najbolj spremeni komponenta L, ki vpliva na svetlost barve. Barva vzorcev duglazije se z izpostavitvijo ni vidno spremenila, vendar pa se je tako zgoščenim, kot nezgoščenim vzorcem znižala komponenta L. Kontrolnim vzorcem topola se je komponenta L v koordinantnem sistemu CIELAB znižala, medtem ko se je vsem zgoščenim vzorcem topola komponenta L zvišala in so tako postali svetlejši.

Tritočkovni upogibnostni test MOE in MOR je pokazal, da imajo zgoščeni vzorci boljše mehanske lastnosti v primerjavi z nezgoščenim lesom. Izpostavitev glivam je negativno vplivala na mehanske lastnosti vseh vzorcev.

Ker je zgoščen les predvidoma namenjen konstrukcijski uporabi je pomembno, da se v prihodnje posvetimo raziskavi postopkov, ki lahko izboljšajo tudi biološke lastnosti izdelka.

6 POVZETEK

Danes poraba lesa narašča vzporedno z okoljsko ozaveščenostjo o varovanju naravnih gozdnih sestojev pred izsekavanjem, zato je potreba po nadomestnem plantažnem lesu vedno večja, vendar ne zadosti vsem mehanskim zahtevam konstrukcijskega lesa. Metode obdelave lesa so z uporabo povišane temperature vodne pare in zgoščevanja v stiskalnicah odprle nove možnosti na področju pridobivanja konstrukcijskega lesa. Takšen les ohrani vse dobre lastnosti naravnega lesa in pridobi na gostoti ter na mehanskih lastnostih. Namen diplomskega dela je bil ugotoviti ali je mogoče plantažni les uporabiti v konstrukcijske namene v primeru vpliva bioloških dejavnikov. Opazovali smo izgubo mase, mehanskih lastnosti, FTIR spektra in barve dveh lesnih vrst v primeru izpostavitve dvema glivama za 2, 4, 6, 8 tednov. V raziskavi je bil uporabljen les duglazije (*Pseudotsuga menziesii*) in hibridnega topola (*Populus trichocarpa x Populus deltoides*), zgoščen po treh različnih postopkih termo- hidro- mehanskega zgoščevanja in izpostavljen glivama navadni tramovki (*Gloeophyllum trabeum*) in pisani ploskocevki (*Trametes versicolor*). Del vzorcev obeh lesnih vrst je bil nezgoščen, del pa zgoščen po modificirani metodi VTC (Viscoelastic Thermal Compression) zgoščevanja. Vzorci smreke (*Picea abies*) in bukve (*Fagus sylvatica*) so nam služili kot kontrolni vzorci razkroja. Meritve mas, dimenzij, MOE (Modulus of Elasticity), MOR (Modulus of Rupture), FTIR spektrov in barve smo izvajali pred in po izpostavitvi glivama z uravnovešenimi vzorci. Začetna gostota vzorcev je ključno vplivala na končno gostoto vzorcev, ki je bila pri topolu konstantna, medtem ko se je za duglazijo razlikovala glede na postopek zgoščevanja. Izguba mase je bila največja pri kontrolnem lesu bukve, nekaj manjšo pa je imela smreka, kar je dokaz za vitalnost gliv. Duglazija je imela po 8 tednih v primerjavi z bukvijo petkrat manjšo izgubo mase, medtem ko je imel topol podobno izgubo mase kot smreka. Pri FTIR spektroskopiji smo lesno maso za izvajanje meritev nabirali na površini vzorcev, kjer je bila izpostavljenost glivi največja, zato spektri ne predstavljajo celotnega vzorca. Ugotovili smo, da so spremembe v spektru opaznejše pri duglaziji kot pri topolu. Mehanske lastnosti vzorcev so pokazale, da se z časom izpostavitve spremenita tudi MOE in MOR. Zanimivo je, da so imeli vzorci SS+PHT (Saturated Steam + Post Heat Treatment) najmanjšo izgubo MOE, čeprav so imeli največjo izgubo mase. Med drugim so imeli vzorci TS (Transient Steam) največjo

izgubo MOE. MOR je bil skupno največji pri SS (Saturated Steam) postopku zgoščevanja v primeru obeh lesnih vrst. Izpostavitve glivi je najbolj vplivala na svetlost vzorca, in sicer so vzorci duglazije postali svetlejši. Nezgoščeni topolovi vzorci so postali temnejši, zgoščeni pa svetlejši. Zgoščen les ima dober potencial, vendar bo potrebno postopek zgoščevanja še izpopolniti ali pa ga kombinirati z zaščitnimi premaznimi sredstvi za boljšo obstojnost in manjše izgube mehanskih lastnosti, ki so ključnega pomena za uporabo v gradbeništvu.

7 VIRI

- Benko R., Kervina-Hamović L., Gruden M. 1987. Patologija lesa, lesna fitopatologija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, VTOZD za lesarstvo: 122 str.
- Blanchette R. A., Obst J. R., Timell T. E. 1994. Biodegradation of compression wood and tension wood by white and brown rot fungi. *Holzforschung*, 48: 34–42
- Bolker N. I., Somerville N. G. 1963. Infrared spectroscopy of lignins. Part II. Lignins in unbleached pulp. *Pulp and paper Canada*, 4, 4: 187-193
- Brus R. 2011. Dendrologija za gozdarje. 3. izdaja. Ljubljana, Oddelek za gozdrastvo in obnovljive gozdne vire: 408 str.
- Čufar K. 2006. Anatomija lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 185 str.
- EN 350-2. Durability of wood and wood-based products, Natural durability of solid wood, Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe. 1994: 2del
- Erker R. 1957. Opis gozdnega drevja in grmovja: Dendrografija. Ljubljana, Državna založba Slovenije: 210 str.
- Esteves B., Marques A. V., Domingos I., Pereira H. 2008. Heat-induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Science and Technology*, 42: 369-384
- Gorišek Ž. 2009. Les: zgradba in lastnosti: njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178 str.

- Grossman P. U. A. 1976. Requirements for a model that exhibits mechano-sorptive behavior. *Wood Science and Technology*, 10: 163-168
- Hakkou M., Petrissans M., Gerardin P., Zoulalian A. 2006. Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood. *Polymer Degradation and Stability*, 91: 393-397
- Hakkou M., Petrissans M., Zoulalian A., Gerardin P. 2005. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. *Polymer Degradation and Stability*, 89: 1-5
- Harrington K. J., Higgins H. G., Michell A. J. 1964. Infra red spectra of *Eucalyptus regnans* F. Muell. and *Pinus radiata* D. Dan. *Holzforschung*, 18, 2: 108-113
- Humar M., Amartey S. A., Pohleven F. 2006. Influence of corn steep liquor and glucose on colonization of control and CCB (Cu/Cr/B)-treated wood by brown rot fungi. *Waste Management*, 26, 5: 459-465
- Inoue M., Norimoto M., Tanahashi M., Rowell R. M. 1993. Steam or heat fixation of compressed wood. *Wood and Fiber Science*, 25, 3: 224-235
- Kamke F. A., Sizemore H. 2008. Viscoelastic thermal compression of wood. ZDA patentna prijava. ZDA št. patenta, 7.404.422
- Kervina-Hamović L. 1990. Zaščita lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, VTOZD za lesarstvo: 126 str.
- Koch G., Puls J., Bauch J. 2003. Topochemical characterisation of phenolic extractives in discoloured beechwood. *Fagus sylvatica* L., *Holzforschung*, 57, 4: 339-345

- Kollmann F. P., Cote W. A. 1968. Principles of wood science and technology, solid wood. Heidelberg, Springer-Verlag: 592 str.
- Kollmann F. P., Kuenzi E. W., Stamm A. J. 1975. Principles of wood science and technology, woodbased materials. Heidelberg, Springer- Verlag: 703 str.
- Kutnar A., Humar M., Kamke F. A., Šernek M. 2011. Fungal decay of viscoelastic thermal compressed VTC wood. Review of research. European Journal of Wood and Wood Products, 68, 2: 325-328
- Kutnar A., Kamke F. A. 2012. Compression of wood under saturated steam, superheated steam, and transient conditions at 150°C, 160°C, and 170°C. Wood Science and Technology, 46, 1/3: 73-88
- Kutnar A., Kamke F. A., Šernek M. 2008a. The mechanical properties of densified VTC wood relevant for structural composites. Review of research. European Journal of Wood and Wood Products, 66, 6: 439-446
- Kutnar A., Petrič M., Kamke F. A., Šernek M. 2008b. The influence of viscoelastic thermal compression on the chemistry and surface energetics of wood. Colloids and Surfaces A, Physicochemical and Engineering Aspects, 329: 82-86
- Kutnar A., Kamke F. A., Šernek M. 2009. Density profile and morphology of viscoelastic thermal compressed wood. Wood Science and Technology, 43, 1/2: 57-68
- Lesar B., Humar M., Kamke F. A., Kutnar A. 2013. Influence of the thermo-hydro-mechanical treatments of wood on the performance against wood-degrading fungi. Wood Science and Technology, 47, 5: 977-992
- Liang C. Y., Bassett K. H., McGinnes E. A., Marchessault R. H. 1960. Infrared spectra of crystalline polysaccharides. VII Thin Wood Sections. Tappi, 43, 13: 1017-1024

Michell A. J. 1989. Second derivate FTIR spectra of woods. V: Wood and Cellulosic Chemistry. D. N. S. Hon (ur.), N. Shiraishi (ur.) New York, Marcel Dekker, Inc.: 3-395

Michell A. J., Wetson A. J., Higgins H. G. 1965. An infrared spectroscopic study of delignification of *Eucalyptus regnans*. Tappi, 48, 6: 520-532

Morsing N. 2000. Densification of wood – the influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to the grain. Department of structural engineering and materials technical university of Denmark, 79: 138 str.

Orwa C., Mutua A., Kindt R., Jamnadass R., Simons A. 2009. Agroforestry database. A tree reference and selection guide version 4.0
(<http://www.worldagroforestry.org/af/treedb/>), (December 2013)

Pavlič M., Petrič M. 2009. Lastnosti površinskih premazov v odvisnosti od njihovih interakcij s termično obdelanim lesom. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 155 str.

Sarkanen K.V., Cheang H.M., Ericsson B. 1967. Species variation in lignins. I. Infrared spectra of Guaiacyl and Syringyl models. Tappi, 50, 6: 572-575

Schwarze F. W. M. R., Spycher M. 2005. Resistance of thermo-hydro-mechanically densified wood to colonisation and degradation by brown-rot fungi. Holzforschung, 59: 358-363

Seborg R. M., Millet M. A., Stamm A. J. 1945. Heat-stabilized compressed wood. Staypak. Mechanical engineering, 67: 25-31

Skyba O., Niemz P., Schwarze F. W. M. R. 2008. Degradation of thermo-hydro-mechanically (THM)-densified wood by soft-rot fungi. Holzforschung, 62, 3: 277-283

- Skyba O., Niemz P., Schwarze F. W. M. R. 2009. Resistance of thermohygro-mechanically (THM)-densified wood to degradation by white rot fungi. *Holzforschung*, 63, 639–646
- Sundqvist B., Karlsson O., Westermark U. 2006. Determination of formic-acid and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and its relation to colour, strength and hardness. *Wood Science and Technology*, 40, 7: 549-561
- Sundqvist B., Morén T. 2002. The influence of wood polymers and extractives on wood colour induced by hydrothermal treatment. *European Journal of Wood and Wood Products*, 60: 375-376
- Tjeerdsma B. F., Boonastra M., Pizzi A., Tekely P., Militz H. 1998. Characterization of thermally modified wood, molecular reasons for wood performance improvement. *European Journal of Wood and Wood Products*, 56, 3: 149-153
- Tjeerdsma B. F., Militz H. 2005. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 63: 102-111
- Thermo Nicolet Corporation. 2001. Introduction to Fourier Transform Infrared Spectroscopy (<http://mmrc.caltech.edu/FTIR/FTIRintro.pdf>), (December 2013)
- Tomak E. D., Viitanen H., Yildiz U. C., Hughes M. 2011. The combined effects of boron and oil heat treatment on the properties of beech and Scots pine wood. Part 2: water absorption, compression strength, color changes, and decay resistance. *Journal of Materials Science*, 46, 3: 608-615
- Ünsal O., Kartal S. N., Candan Z., Arango R., Clausen C. A., Green F. 2008. Preliminary investigation of biological resistance. Water absorption and swelling of thermally compressed pine wood panels. Stockholm.

Varga D., van der Zee M. E. 2008. Influence of steaming on selected wood properties of four hardwood species. *European Journal of Wood and Wood Products*, 66, 1: 11-18

Yildiz S, Gümüşkaya E. 2007. The effect of thermal modification on crystalline structure of cellulose in soft and hardwood. *Building and Environment*, 42: 62-67.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Mihi Humarju in somentorici doc. dr. Andreji Kutnar za vso strokovno pomoč in nasvete pri izdelavi diplomskega dela ter prof. dr. Milanu Šerneku za strokovno recenzijo.

Zahvala gre tudi vsem ostalim, ki so mi omogočili dokončanje študija.