

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Dušan ŠTIGL

**RELAKSACIJA SUŠILNIH NAPETOSTI V
NIHAJOČIH KLIMATSKIH POGOJIH**

DIPLOMSKI PROJEKT

Univerzitetni študij - 1. stopnja

Ljubljana, 2011

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Dušan ŠTIGL

**RELAKSACIJA SUŠILNIH NAPETOSTI V NIHAJOČIH
KLIMATSKIH POGOJIH**

DIPLOMSKI PROJEKT
Univerzitetni študij - 1. stopnja

**RELAXATION OF DRYING STRESSES DURING OSCILLATED
DRYING CONDITONS**

B. SC. THESIS
Academic Study Programmes

Ljubljana, 2011

Diplomski projekt je zaključek Univerzitetnega študija Lesarstva – 1. stopnja. Delo je bilo opravljeno na Katedri za tehnologijo lesa.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Željka Goriška, za recenzenta pa doc. dr. Aleša Stražeta.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Diplomski projekt je rezultat lastnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svojega diplomskega projekta na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je projekt, ki sem ga oddal v elektronski obliki, identičen tiskani verziji.

Dušan Štigl

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Du1
DK	UDK 630*847.2
KG	sušenje lesa/oscilirajoča klima/vlažnostni gradient/mehanske lastnosti
AV	ŠTIGL, Dušan
SA	GORIŠEK, Željko (mentor)/ STRAŽE Aleš (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c.VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2011
IN	RELAKSACIJA SUŠILNIH NAPETOSTI V NIHAJOČIH KLIMATSKIH POGOJIH
TD	Diplomski projekt (Univerzitetni študij - 1. stopnja)
OP	VI, 32 str., 9 pregl., 28 sl., 17 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Sušenje v standardnih klimatskih pogojih je problematično zaradi pojava močnega zaskorjenja na koncu sušenja. Z vpeljavo sušenja v oscilirajočih klimatskih pogojih smo poskušali ugotoviti vpliv le-teh na izboljšanje kakovosti osušenega lesa. Oba postopka smo primerjali z intervalnim odvzemanjem vzorcev. Merili smo povprečno vlažnost, vlažnostni gradient, zaskorjenje in ugotavljali mehanske lastnosti lesa v sredinskih in površinskih slojih. Povprečna vlažnost osušenega lesa je bila v standardnih klimatskih pogojih nižja kot pri sušenju v oscilirajočih klimatskih pogojih. Vlažnostni gradient je bil v oscilirajočih klimatskih pogojih manjši kot pri sušenju v standardnih klimatskih pogojih. Pri sušenju v oscilirajočih klimatskih pogojih je bilo zaskorjenje zunanjih slojev lesa na koncu sušenja manjše kot pri sušenju v standardnih klimatskih pogojih. Mehanske lastnosti so bile pri sušenju v standardni klimi boljše kot pri sušenju v oscilirajočih klimatskih pogojih.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Du1

DC UDC 630*847.2

CX wood drying/oscilating schedule/moisture content/mechanical properties

AU ŠTIGL, Dušan

AA GORIŠEK, Željko (supervizor)/STRAŽE Aleš (reviewer)

PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c.VIII/34

PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology

PY 2011

TY RELAXATION OF DRYING STRESSES DURING OSCILLATED CLIMATIC CONDITONS

DT B. Sc. Thesis (Academic Study Programmes)

NO VI, 32 p., 9 tab., 28 fig., 17 ref.

LA sl

Al sl/en

AB Drying at standard conditions is problematic due to the emergence of a strong casehardening at the end of drying, especially in species with large shrinkage. By bringing in the oscillatory drying climatic conditions, we tried to determine the effect of these on improving the quality of dried wood. Both procedures were compared by intermittent removal of samples. We measured the average moisture content, moisture gradient and casehardening; then the mechanical properties of the wood in the middle and on the surface layers were identified. The final average moisture content of wood dried in standard climatic conditions was lower than that in the oscillating process; while moisture gradient was greater. Casehardening of outer wood layers at the end of oscillated drying was lower than that at the standard air drying conditions. Mechanical properties at drying in standard climatic conditions were better than those in oscillatory conditions.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	II
KEY WORDS DOCUMENTATION	III
KAZALO VSEBINE	IV
KAZALO PREGLEDNIC	V
KAZALO SLIK	VI
1 UVOD	1
1.1 PREDSTAVITEV PROBLEMA	1
1.2 PREDPOSTAVKA	1
1.3 CILJI NALOGE	2
2 PREGLED LITERATURE	3
2.1 VODA V LESU	3
2.1.1 Distribucija vode v lesu	4
2.2 MEHANIZEM SUŠENJA	5
2.2.1 Izhlapevanje vode s površine	5
2.2.2 Tok vode v lesu	6
2.2.3 Permeabilnost	6
2.2.4 Difuzivnost	7
2.3 SUŠILNE NAPETOSTI	8
3 MATERIAL IN METODE	9
3.1 MATERIAL	9
3.2 METODE	9
3.2.1 Sušilni postopek	9
3.2.2 Določanje vlažnosti in vlažnostnega gradienta	11
3.2.3 Upogibni test	11
4 REZULTATI	13
4.1 KINETIKA SUŠENJA	13
4.2 VLAŽNOSTNI GRADIENTI	15
4.3 VPLIV SUŠILNEGA POSTOPKA NA MEHANSKE LASTNOSTI LESA	19
5 RAZPRAVA	22
5.1 ZASKORJENJE V ODVISNOSTI OD LESNE VLAŽNOSTI	22
5.2 TOGOST LESA V ODVISNOSTI OD VLAŽNOSTI	25
5.3 MEHANSKE LASTNOSTI LESA V ODVISNOSTI OD VLAŽNOSTI	28
6 SKLEPI	30
7 VIRI	31
ZAHVALA	

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1 Program sušenja s standardnim postopkom.....	10
Preglednica 2 Vlažnostni gradienti ($\Delta u/\Delta x$), upogibi lamel pri testiranju zaskorjenja (f) in povprečna vlažnost (u) v odvisnosti od časa sušenja radialnih desk sušenih s standardnim sušilnim programom.....	15
Preglednica 3 Vlažnostni gradienti ($\Delta u/\Delta x$), upogibi lamel pri testiranju zaskorjenja (f) in povprečna vlažnost (u) v odvisnosti od časa sušenja tangencialnih desk sušenih s standardnim sušilnim programom.....	16
Preglednica 4 Vlažnostni gradienti ($\Delta u/\Delta x$), upogibi lamel pri testiranju zaskorjenja (f) in povprečna vlažnost (u) v odvisnosti od časa sušenja radialnih desk sušenih z oscilirajočim sušilnim programom.....	16
Preglednica 5 Vlažnostni gradienti ($\Delta u/\Delta x$), upogibi lamel pri testiranju zaskorjenja (f) in povprečna vlažnost (u) v odvisnosti od časa sušenja tangencialnih desk sušenih v oscilirajočih klimatskih pogojih.....	17
Preglednica 6 Vpliv lesne vlažnosti na mehanske lastnosti radialnih desk sušenih s standardnim sušilnim programom: t- čas sušenja; u – povprečna lesna vlažnost; MoE_{bz} , MoE_{bn} – upogibni elastičnosti modul zunanjskega in notranjega sloja; σ_{bz} , σ_{bn} – natezna trdnost zunanjskega in notranjega sloja; E – natezni elastični modul; σ – natezna trdnost.....	20
Preglednica 7 Vpliv lesne vlažnosti na mehanske lastnosti radialnih desk sušenih s standardnim sušilnim programom: t- čas sušenja; u – povprečna lesna vlažnost; MoE_{bz} , MoE_{bn} - upogibni modul elastičnosti zunanjskega in notranjega sloja; σ_{bz} , σ_{bn} – natezna trdnost zunanjskega in notranjega sloja; E – natezni modul elastičnosti; σ – natezna trdnost.....	20
Preglednica 8 Vpliv lesne vlažnosti na mehanske lastnosti tangencialnih desk sušenih s standardnim sušilnim programom.....	20
Preglednica 9 Vpliv lesne vlažnosti na mehanske lastnosti radialnih desk sušenih z oscilacijskim sušilnim programom.	21

KAZALO SLIK

Slika 1 Nomogram ravnovesna vlažnost lesa v odvisnosti od temperature in relativne zračne vlažnosti (Gorišek 2005).....	3
Slika 2 Shematski prikaz pretoka vode v lesu (Gorišek 2005).....	4
Slika 3 Radialni vlažnostni profil bukovine (Gorišek 2005).....	4
Slika 4 Difuzijski koeficient vezane vode v vzdolžni smeri za smrekovino (<i>Picea sitchensis</i>) v procesu adsorpcije pri temperaturi 26,7°C v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti, (Stamm 1959, iz Siau 1995).....	7
Slika 5 Postopek odvzema in izdelave preizkušancev za določanje vlažnostnega gradienta.	11
Slika 6 Skica načina izvedbe upogibnega testa.	12
Slika 7 Skica izvedbe nateznega testa.	12
Slika 8 Skica principa merjenja loka.	12
Slika 9 Sušilna krivulja in vlažnostni gradient za radialne deske sušene s standardnim programom	13
Slika 10 Sušilna krivulja in vlažnostni gradient za tangencialne deske sušene s standardnim programom.	13
Slika 11 Sušilna krivulja za radialne deske sušene z oscilirajočim programom.	14
Slika 12 Sušilna krivulja za tangencialne deske sušene v oscilirajočim programom.....	14
Slika 13 Vlažnostni profil radialnih desk, v posameznih fazah sušenja s standardnim sušilnim programom.....	18
Slika 14 Vlažnostni profil tangencialnih desk, v posameznih fazah sušenja s standardnim sušilnim programom.....	18
Slika 15 Vlažnostni profil radialnih desk, v posameznih fazah sušenja z oscilirajočim sušilnim programom.....	18
Slika 16 Vlažnostni profil tangencialnih desk, v posameznih fazah sušenja z oscilirajočim sušilnim programom.....	19
Slika 17 Deflekcija tangencialnih desk sušenih s standardnim sušilnim programom:	22
Slika 18 Deflekcija radialnih desk sušenih s standardnim sušilnim programom.	23
Slika 19 Deflekcija tangencialnih desk sušenih z oscilirajočim sušilnim programom.	24
Slika 20 Deflekcija radialnih desk sušenih z oscilirajočim sušilnim programom.	24
Slika 21 Elastični modul pri sušenju s standardnim sušilnim programom - upogibni test.	26
Slika 22 Elastični modul pri sušenju z oscilirajočim sušilnim programom.	26
Slika 23 Elastični modul pri sušenju s standardnim sušilnim programom - natezni test.	26
Slika 24 Elastični modul pri sušenju z oscilirajočim sušilnim programom - natezni test.	27
Slika 25 Upogibna trdnost lesa sušenega s standardnim programom..	28
Slika 26 Upogibna trdnost lesa sušenega z oscilirajočim sušilnim programom.....	28
Slika 27 Natezna trdnost pri sušenju v standardnih klimatskih pogojih.....	29
Slika 28 Natezna trdnost pri sušenju v oscilirajočih klimatskih pogojih.	29

1 UVOD

1.1 PREDSTAVITEV PROBLEMA

Konvekcijski način sušenja je v Sloveniji kot tudi v Evropi prevladujoč, saj se s takšnim načinom prenosa toplote in vode v lesu srečujemo ne samo pri konvencionalnem sušenju ampak tudi pri nizkotemperaturnem predsušenju ali kondenzacijskem načinu. Vlažnostnemu gradientu se tako ne moremo izogniti, saj predstavlja osnovni potencial pri difuzijskem toku vode iz sredine lesa na površino. V območju pod točko nasičenja celičnih sten (TNCS), ko se pojavi higroskopsko krčenje, je vlažnostni gradient vzrok nastanka diferencialnih notranjih napetosti. Postopek moramo zato voditi v mejah dopustnih napetosti lesa, hkrati pa na ravni, ki dopušča čim hitrejšo premagovanje notranjega snovnega upora in hitro izločanje vezane vode.

Značilen notranji snovni upor navadno prevladuje in kontrolira celotni snovni tok vode pri sušenju lesa, ki je še zlasti pomemben pri gostejših lesnih vrstah. Hitrost sušenja žaganega lesa je običajno odvisna od difuzijskega snovnega upora, ki se pojavi pri osušitvi površine pod točko nasičenja celičnih sten. Intenzivno sušenje ob prevelikem masnem toku vode iz lesa povzroča v lesu nastanek velikega vlažnostnega gradienta, ki generira napetosti. Kot posledica se pojavijo ireverzibilne napake, kot so zaskorjenje in raznovrstne razpoke.

1.2 PREDPOSTAVKA

Vlažnostni gradient, ki se vzpostavi med sušilnim postopkom je odvisen od sušilnih lastnosti lesa (predvsem difuzivnosti) in od sušilnih pogojev, ki jih uravnavamo s temperaturo in relativno vlažnostjo zraka v sušilni komori. Tako lahko tudi z ustrezno ostrino sušenja direktno vplivamo na sušilne napetosti in posledično možnost nastanka sušilnih napak. Blažji programi sušenja povzročajo manjše vlažnostne gradiente, posledično so tudi generirane napetosti manjše in obratno. Sušenje z visoko ostrino vodi do velikih sušilnih napetosti in velike nevarnosti napak. Domneva se, da lahko kratkotrajno navlaževanje površine žaganega lesa med procesom sušenja zmanjša napetosti in tveganje za nastanek sušilnih napak, saj naj bi zaradi mehanosorptivnega efekta potekala relaksacija

sušilnih napetosti že med samim postopkom sušenja. Nekatere raziskave kažejo (Milić, 2011), da kratkotrajno navlaževanje površine žaganega lesa ne vpliva značilno na zmanjšanje hitrosti sušenja.

Menimo, da z oscilirajočimi oziroma nihajočimi klimatskimi pogoji zmanjšujemo napetostna stanja in s tem pojav močnega zaskorjenja na koncu sušenja.

1.3 CILJI NALOGE

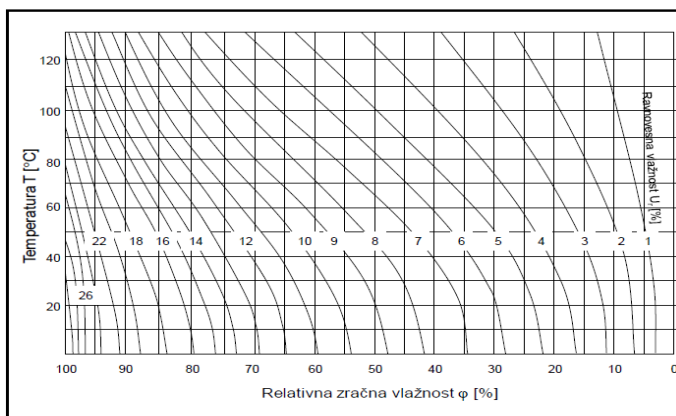
S primerjavo sušenja med standardnim programom in z oscilirajočo klimo želimo na primeru bukovine ugotoviti njun vpliv na:

- kinetiko sušenja in pojav vlažnostnega gradienta,
- velikost zaskorjenja ter
- trdnostne karakteristike lesa v odvisnosti od poteka sušenja in vlažnosti.

2 PREGLED LITERATURE

2.1 VODA V LESU

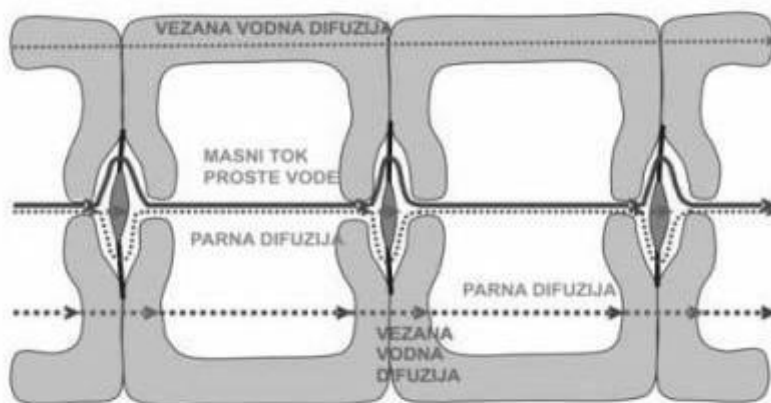
Vsebnost vode v svežem posekanem lesu je zelo različna. Vlažnost lesa v svežem stanju lahko znaša tudi 200% ali pa le 40%. Vlažnost lesa v svežem stanju je odvisna od drevesne vrste in tudi od oddaljenosti mesta merjenja od kambija. Les navadno sušimo, do ravnovesne vlažnosti, ki pa je odvisna od mesta vgradnje lesa. V vlažnih okoljih je ravnovesna vlažnost lesa nekje pri 20%, v bolj suhih okoljih pa ravnovesna vlažnost znaša med 6 in 8% (Walker in sod., 1993). Za vrtno pohištvo bomo les osušili do 14 oz. 16%, za parket pa med 7 in 10%. Ravnovesna vlažnost lesa je odvisna od relativne zračne vlažnosti in temperature zraka v prostoru. Pri temperaturi 20 °C in relativni zračni vlažnosti 60 %, kar razumemo kot normalno klimo, znaša ravnovesna vlažnost lesa približno 11% (slika 1).



Slika 1 Nomogram ravnovesna vlažnost lesa v odvisnosti od temperature in relativne zračne vlažnosti (Gorišek 2005).

Les v svežem stanju vsebuje veliko količino vode, ki pogosto predstavlja večjo maso od dejanske mase lesa. Les v svežem stanju vsebuje tako vezano kot tudi prosto vodo. Vezana voda se nahaja v celični steni, prosta voda pa se nahaja v lumnih celic. Les pri sušenju najprej izgublja prosto vodo, ko pa vlažnost lesa pade pod točko nasičenja celičnih sten pa tudi vezano vodo.

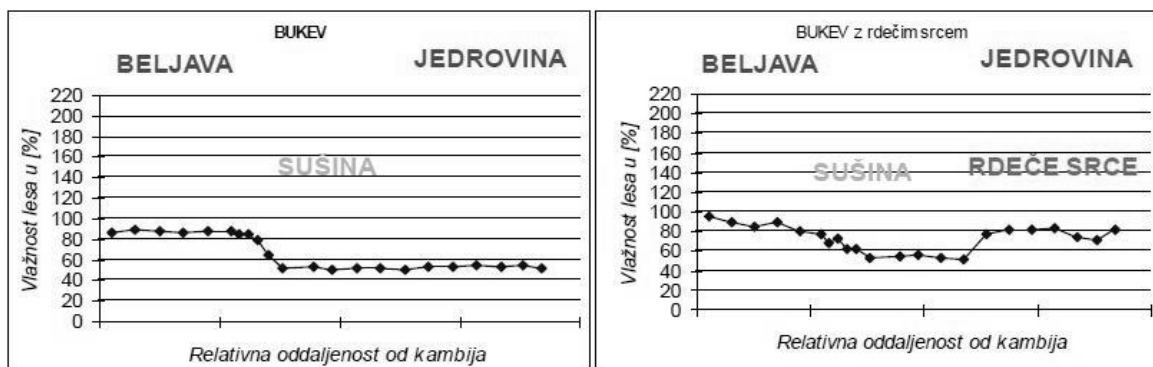
Prosta voda se nahaja v celičnih lumnih in se prevaja preko lumnov in medsebojnih pikenjskih odprtin, difuzijski tok pa poteka po celičnih stenah in skozi celične lumne (slika 2). Vezana voda se veže na proste hidroksilne skupine celuloze in hemiceluloze ali pa v mikro razpokah celične stene kondenzira. Količina vode v lesu je odvisna od gostote lesa. Lesovi z nižjo gostoto imajo višjo napojitveno vlažnost, saj vsebujejo večji delež celičnih lumnov in posledično lahko sprejmejo večjo količino vode.



Slika 2 Shematski prikaz pretoka vode v lesu (Gorišek 2005).

2.1.1 Distribucija vode v lesu

Za natančno načrtovanje procesa je potrebno poznati distribucijo vode ali radialni vlažnostni profil. V praksi se vse več materiala suši takoj po poseku, zato je za optimalno vodenje sušilnega postopka nujno poznavanje radialnega vlažnostnega profila. Iz grafov (slika 3) je razvidno, da se na začetku sušenja srečamo z visokimi vlažnostmi lesa.



Slika 3 Radialni vlažnostni profil bukovega lesa (Gorišek 2005).

Vlažnost lesa je pričakovano najvišja v beljavi ob kambijeви coni, tam znaša pri bukovini do 90 %. Zunanji dejavniki in spreminjanje klime, vplivajo na nihanje vlažnosti med zunanjimi branikami. V notranjosti debla ostaja vlažnost v prevodnih delih na visoki vrednosti, sredina pa pričakovano dosega najnižje vlažnosti. Večja odstopanja se pojavijo v diskoloriranem lesu (npr. rdeče srce pri bukvi, rjavo pri jesenu in topol, ...) ali mokrinah (npr. jelka).

2.2 MEHANIZEM SUŠENJA

Večina interpretacij konvekcijsko sušenje deli na dva dela. Prvi del je izhlapevanje vode s površine, drugi pa tok vode s sredice na površino. Notranji snovni tok pa poteka kot tok proste vode in kot difuzijski tok vezane vode.

2.2.1 Izhlapevanje vode s površine

Pretok zraka pri sušenju opravlja dve funkciji, je v vlogi nosilca toplote in kot medij za prenos izhlapele vode s površine. Čas in kakovost posušenega lesa sta odvisna od hitrosti zraka in njegovega enakomernega kroženja. Nastavitev hitrosti ventilatorjev mora biti prilagojena intenzivnosti izparevanja vode s površine. Če je kroženje prepočasno, se topel zrak pri prehodu skozi zložaj ohladi, s tem pa se mu poviša relativna zračna vlažnost. Posledica so premalo posušene deske na koncu zložajev.

Najmanjša hitrost zraka, ki še zagotavlja izenačene razmere sušenja pri počasi sušečih se lesovih, je 1,3 m/s. Za sušenje gostejših listavcev se priporočajo hitrosti od 1,5 do 2,5 m/s, za sušenje iglavcev pa hitrosti od 3 do 4 m/s.

Spremljanje sušenja zahteva tudi nadzor klimatskih pogojev v sušilni komori. (Walker s sod., 1993; Keey s sod., 2000). Hitrost sušenja lesa je pogojena s kontrolo relativne zračne vlažnosti, temperature in hitrosti pretoka zraka skozi zložaje. Material v zložajih razvrstimo po drevesni vrsti, debelini, vlažnosti in po lokaciji beljave in jedrovine.

2.2.2 Tok vode v lesu

Bolj, ko nam je poznana struktura lesa, bolj natančno lahko prikažemo razporeditev vode. Na podlagi razporeditve vode v lesu lahko natančneje prikažemo kinetiko sušenja. Zasledimo lahko, da se pri bolj permeabilnih vrstah že na začetku sušenja vzpostavi konstantna sušilna hitrost, a se s časoma na površini lahko pojavi tanek suhi sloj, ki prosti vodi preprečuje izhlapevanje. Nastali suhi sloj je posledica prehitrega sušenja, saj struktura lesa ne dovoljuje dejansko izpostavljenega masnega toka vode na površini. S tem pride do vzpostavitve notranjega vlažnostnega gradienta.

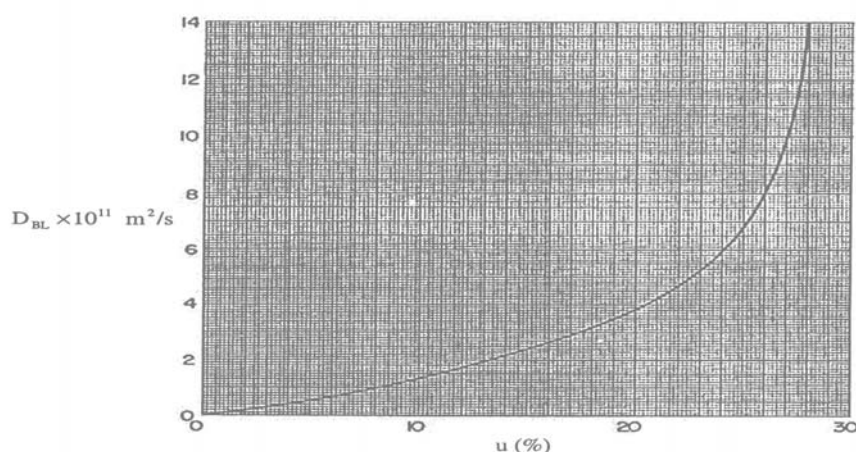
2.2.3 Permeabilnost

Permeabilnost lesa se največkrat določa v vzdolžni smeri, kjer je v razponu $1 : 5 \times 10^6$ pri listavcih pri iglavcih pa $1 : 0.5 \times 10^6$. Raziskave so potrdile velike razlike prevodnih lastnosti, med vrstami v različnih smereh. Del variabilnosti lahko pripišemo razlikam permeabilnosti beljave in jedrovine zaradi otiljenja in zaradi akumuliranja ekstraktivov v jedrovini listavcev, pri iglavcih pa za glavni razlog navajajo aspiracijo pikenj. Na splošno so lesne vrste iglavcev manj permeabilne, saj nimajo specifičnih prevodnih elementov. Med prevodnimi traheidami pa majhne pikenjske povezave povzročajo velik upor pri pretoku tekočin. Tudi v prečni smeri lesa so razlike v permeabilnosti velike, kar vpliva na proces izločanja vode pri sušenju. Permeabilnost v radialni smeri se tako pojasnjuje z različno prevodnostjo trakovnega tkiva. Tangencialna permeabilnost pa je odvisna od stanja pikenj v radialnih stenah celic, kjer je njihova gostota največja. Iz tega sledijo tudi velike razlike med permeabilnostjo v vzdolžni in tangencialni smeri. Razmerje med permeabilnostjo v vzdolžni in tangencialni smeri, znaša pri iglavcih od $1 : 500$ do $1 : 80 \times 10^3$, razmerje med vzdolžno in radialno permeabilnostjo pa znaša od $1 : 15$ do $1 : 50 \times 10^3$. (Bramhall, 1971; Meyer, 1971; Kauman in sod., 1994; Siau, 1995).

Permeabilnost je lastnost materiala, ki vpliva na transport proste vode iz lesa. Raziskave, tako tekočinske kot tudi plinske permeabilnosti, so potrdile, da se permeabilnost lesa zmanjšuje z dolžino transportne razdalje. Rezultati kažejo, da se permeabilnost z dolžino transportne poti neenakomerno zmanjšuje, odvisnost pa se največkrat interpretira z eksponentnim matematičnim modelom (Perre in Karimi, 2002).

2.2.4 Difuzivnost

Difuzivnost vpliva na kinetiko sušenja pri vlažnostih lesa pod točko nasičenja celičnih sten. Raziskave hkrati potrjujejo, da se difuzivnost lesa s padanjem lesne vlažnosti zmanjšuje (Stamm, 1959) in obratno višja lesna vlažnost povečuje difuzijski koeficient (slika 4). To lahko razložimo z manjšo vezalno energijo med sorpcijskimi mesti in vezanimi vodnimi molekulami pri nižji vlažnosti. Pri višji vlažnosti je potrebno za premik oziroma zamenjavo molekul manj energije. Pri višjih vlažnostih se vodne molekule premikajo v skupinah, kar predstavlja učinkovitejši tok.



Slika 4 Difuzijski koeficient vezane vode v vzdolžni smeri za smrekovino (*Picea sitchensis*) v procesu adsorpcije pri temperaturi 26,7°C v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti, (Stamm 1959, iz Siau 1995).

Ker se gibanje vezane vode dosega z vzpostavitvijo koncentracijskih razlik vodne pare, raziskave potrjujejo, da na ta proces dodatno ne moremo vplivati z dvigovanjem hitrosti gibanja zraka. V praksi se uporabljajo nižje vrtilne hitrosti ventilatorjev v sušilnih komorah, s čimer se zmanjša poraba energije. Pri tem ugotavljajo, da zniževanje hitrosti ventilatorjev bistveno ne vpliva na podaljšanje časa sušenja in ekonomičnosti sušilnega postopka.

2.3 SUŠILNE NAPETOSTI

Veženja in porušitve (razpoke) lesnih sortimentov pripisujemo trem osnovnim vzrokom generiranja napetosti v lesnem tkivu. Rastne napetosti se inkorporirajo že v rastočem drevesu, med sušenje pa se pojavijo napetosti zaradi prečne krčitvene anizotropije in vlažnostnega gradienta.

Sušilne napake, kot so razpoke in zvijanje (veženja) nastanejo v glavnem zaradi sušilnih napetosti in krčitvene anizotropije. S počasnim sušenjem so tudi manjše sušilne napetosti, vendar se zaradi počasnega postopka energijska učinkovitost zmanjša in cena sušenja poveča. Sušilne napetosti moramo zato obravnavati tudi kot kontrolni parameter v sušilnem postopku (Hanhijärvi s sod. 2005). Tako lahko hitrost sušenja prilagodimo ne da bi se v lesu pojavile trajne deformacije.

Tudi po končanem sušenju lahko sušilne napetosti vplivajo na kakovost osušenega lesa, ne da bi vizualno zaznali prisotnost razpok in veženj. Napako poznamo kot zaskoritev in se kot napaka pojavi pri nadaljnji predelavi ali uporabi. Zaskorejne je proces razvoja nateznih sušilnih napetosti, ki se začne s sušenjem površine pod točko nasičenja celičnih stena in s tem povezanim krčenjem. Če nastale natezne napetosti v površinskih slojih prekoračijo elastično območje, se pojavijo trajne deformacije, posledica pa je manjše krčenje površinskih slojev. V nadaljevanju sušenja, ko se tudi sredica suši proti končni vlažnosti in se pri tem krči normalno ali celo več, se napetosti obrnejo. Tako je na koncu sušenja površina obremenjena na tlak, sredica pa na nateg.

Zaskoritev ocenjujemo v praksi z viličnim testom ali prežagovalno metodo, poznane pa so še ekstenziometriška metoda, defleksijska metoda in mnoge druge.

Na notranje napetosti, ki nastanejo med sušenjem, močno vplivajo procesni parametri sušenja kot so temperatura, relativna zračna vlažnost in hitrost zraka v sušilni komori, s katerimi lahko proces sušenja tudi nadziramo.

3 MATERIAL IN METODE

3.1 MATERIAL

Za določanje kinetike sušenja, zaskorjenja in napetostnih stanj, smo izbrali les evropske bukve (*Fagus sylvatica* L). Bukev je pogosta slovenska lesna vrsta, hkrati pa je znana kot za sušenje problematična vrsta. Tekom sušenja se pogosto pojavljajo razna veženja lesa kot so lok, koritavost in usločenost, pri sušenju pa se zaradi velikih skrčkov bukovine pogosto pojavijo tudi razpoke. Vsa veženja in razpoke pa vplivajo na končno kakovost sušenja. Cilj sušenja je, da les posušimo do želene končne vlažnosti brez zgoraj naštetih napak.

Primerjavo kakovosti sušenja s standardnim sušilnim prog in s postopkom nihajoče klime, smo izvedli na bukovih deskah debeline 42 mm, širine 120 mm in dolžine 0,5 metra v nihajočih klimatskih pogojih ter dolžine 1 meter v standardnih klimatskih pogojih. V vsaki šarži smo sušili po 8 tangencialno in 8 radialno orientiranih desk.

3.2 METODE

3.2.1 Sušilni postopek

Sušenje smo izvedli v dveh sušilnih postopkih, od katerih je bil prvi standardni, drugi pa modificiran standardni režim z oscilirajočimi sušilnimi pogoji. Standardni sušilni postopek (preglednica 1), je imel fazo segrevanja do temperature 40 °C, med sušenjem je temperatura postopoma naraščala, končna temperatura pa je znašala 56 °C. Po končanem sušenju pa so sledile faze izenačevanja, kondicioniranja in ohlajanja. Med sušilnim postopkom je psihrometerska razlika postopno naraščala, največjo vrednost pa dosegla 21 °C. Oscilacijski sušilni postopek je imel enako fazo segrevanja kot standardni. V glavni fazi sušenja smo temperaturo spreminjali glede na vlažnost lesa enako kot v standardnem postopku, medtem ko smo relativno zračno vlažnost oscilirajoče spreminjali v triurnih intervalih; ravnovesna vlažnost je bila tri ure nižja v naslednjem triurnem intervalu pa višja od primerjalne v standardnem programu. Ravnovesno vlažnost smo navzgor in navzdol spremenili za 30 %. Sušenje smo zaključili z izenačevanjem, kondicioniranjem in ohlajanjem.

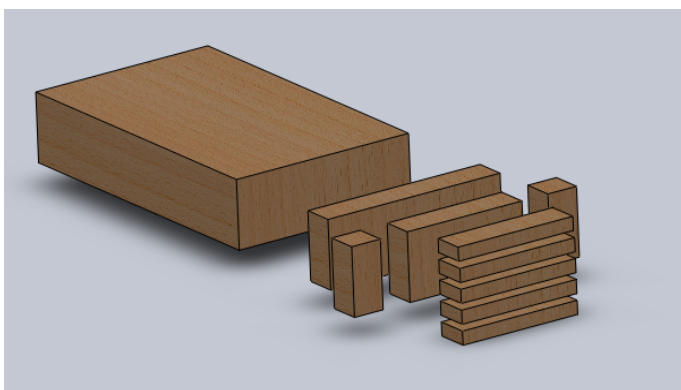
Preglednica 1 Program sušenja s standardnim postopkom.

REŽIM 1			
ČAS	Ts	ΔT	UGL
0	25	2	17,6
12	40	2	18,1
24	40	2	18,1
36	40	3	15,7
48	40	3	15,7
60	40	4	13,8
72	40	5	12,6
84	40	6,5	10,9
96	42	8	9,8
108	44	9	9,2
120	45	9,5	8,8
132	45	11	7,8
144	46	12	7,4
156	46	12	7,4
168	48	12	7,2
180	48	13	7
192	50	14	6,6
204	50	15	6,1
216	51	15,5	5,8
228	53	16,5	5,7
240	55	17,5	5,3
252	55	18	5,2
264	55	18,5	5
276	55	19	4,9
288	55	20	4,6
300	55	20,5	4,5
312	55	21	4,5
324	56	21	4,4
336	56	21	4,4
348	56	21	4,4
360	56	21	4,4
372	56	21	4,4
384	40	12	7,1
396	40	12	7,1

Kontrolo kakovosti smo izvajali tako, da smo v časovnih intervalih v katerih smo predvidevali, da se je vlažnost znižala za približno 5%, odvzeli preizkušance za določitev povprečne vlažnosti, vlažnostnega gradienta, zaskorjenja ter upogibne in natezne trdnosti.

4.2.2 Določanje vlažnosti in vlažnostnega gradienta

Spremembe vlažnosti tekom sušilnega postopka smo določevali z gravimetrično metodo z intervalnim tehtanjem preizkušancev. Vzoredno smo vlažnost lesa določevali še z uporovnim merilnikom lesne vlažnosti. Od vsake deske smo odvzeli preizkušanec širine 20 mm (slika 5).



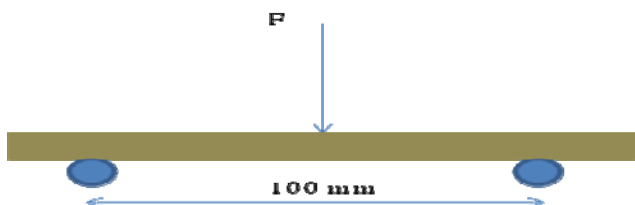
Slika 5 Postopek odvzema in izdelave preizkušancev za določanje vlažnostnega gradienta.

Od tega preizkušanca smo na vsakem koncu odžagali bočni del širine 20 mm, zaradi izničenja robnega učinka. Preizkušanec, ki nam je ostal smo razžagali po debelini na pet lamel enakih debelin, s katerimi smo določili vlažnostni gradient. Vlažnost smo določili s standardizirano gravimetrično metodo (SIST EN 13183 – 1).

3.2.3 Upogibni test

Elastični modul in upogibne trdnosti površinskih in notranjih slojev smo določili po nekoliko spremenjeni standardni metodi (SIST EN 408). Merjenje upogibne trdnosti smo izvajali na univerzalnem trgalnem stroju (Zwick). Pri vsakem vzorčenju smo odžagali dva vzorca debeline 20 mm, ki smo ju prečno razslojili na tri lamele. Prve tri lamele smo testirali tako, da je bila pri upogibnem testu stran bližje površine deske obremenjena na

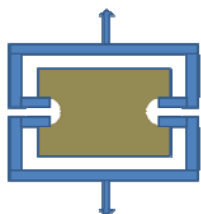
nateg, notranjost pa na tlak (slika 6). Druge tri lamele pa smo testirali tako, da je bila pri upogibnem testu stran bližje površine deske obremenjena na tlak, notranjost pa na nateg. Povprečno vrednost upogibne trdnosti smo dobili z aritmetično sredino prve in druge meritve.



Slika 6 Skica načina izvedbe upogibnega testa.

3.2.4 Natezni test

Natezni test se po standardu izvaja na preizkušancih prereza 20 mm x 20 mm (slika 7). Pri naših preizkušancih smo se skušali tem dimenzijam čim bolj približati. Od vsake deske smo odvzeli dva preizkušanca. Razlog za odvzem dveh preizkušancev je, da smo se s tem izognili mogočim napakam in odstopanjem. Na vseh preizkušancih smo na sredini naredili utore, ki so služili kot prijemno mesto za čeljusti trgalnega stroja.



Slika 7 Skica izvedbe nateznega testa.

3.2.5 Zaskorjenje

Zaskorjenje smo merili na lamelah, ki smo jih naredili za upogibni test. Stopnjo zaskorjenja smo določili z merjenjem velikosti loka lamele (slika 8). Lok smo merili z merilno uro, natančno na 0,01 mm. Z rezultati dobljenih meritev smo ocenili stopnjo zaskorjenja pri posameznih deskah v posamezni stopnji sušenja, in tudi smer le-te (SIST ENV 14464).



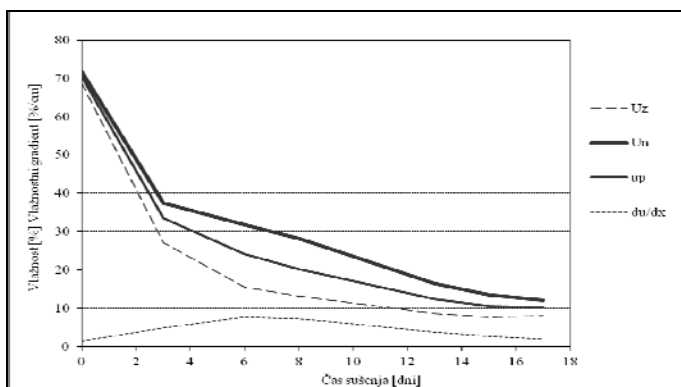
Slika 8 Skica principa merjenja loka.

4 REZULTATI

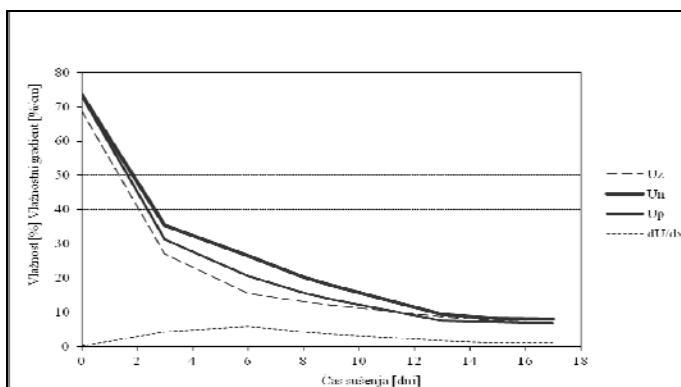
4.1 KINETIKA SUŠENJA

Oba postopka sušenja, tako s standardnim kot tudi z oscilirajočim programom, sta potekala po programu z le manjšimi odstopanji.

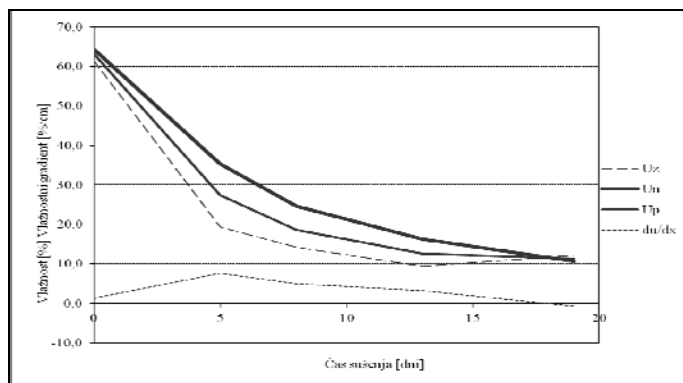
Sušenje bukovine je s standardnim sušilnim programom potekalo 396 ur (slika 9 in slika 10), medtem ko je bilo sušenje v nihajočih klimatskih pogojih nekoliko daljše in je trajalo 454 ur (slika 11 in slika 12).



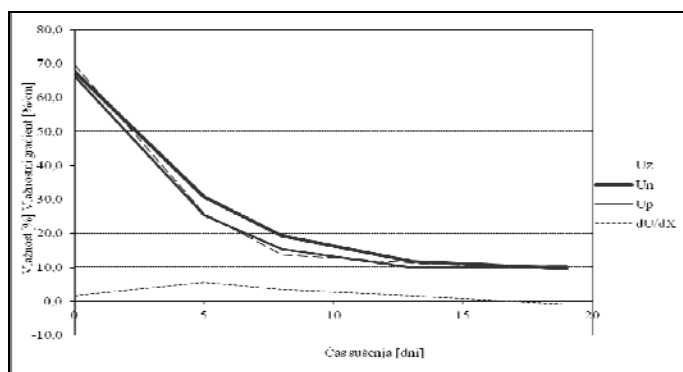
Slika 9 Sušilna krivulja in vlažnostni gradient za radialne deske sušene s standardnim programom.
 U_z = vlažnost zunanjih slojev, U_n = vlažnost notranjih slojev, U_p = povprečna vlažnost lesa, du/dx = vlažnostni gradient.



Slika 10 Sušilna krivulja in vlažnostni gradient za tangencialne deske sušene s standardnim programom.
 U_z = vlažnost zunanjih slojev, U_n = vlažnost notranjih slojev, U_p = povprečna vlažnost, du/dx = vlažnostni gradient.



Slika 11 Sušilna krivulja za radialne deske sušene z oscilirajočim programom za površinski in sredinski sloj ter povprečno vlažnost. U_z = vlažnost zunanjih slojev, U_n = vlažnost notranjih slojev, U_p = povprečna vlažnost, du/dx = vlažnostni gradient.



Slika 12 Sušilna krivulja za tangencialne deske sušene v oscilirajočim programom za površinski in sredinski sloj ter povprečno vlažnost. U_z = vlažnost zunanjih slojev, U_n = vlažnost notranjih slojev, U_p = povprečna vlažnost, du/dx = vlažnostni gradient.

4.2 VLAŽNOSTNI GRADIENTI

Vlažnostni gradient je bil pri sušenju z oscilirajočim sušilnim programom, manjši tako pri radialno orientiranih deskah (preglednica 2 in preglednica 4), kot tudi pri tangencialno orientiranih deskah (preglednica 3 in preglednica 5), od vlažnostnega gradienta pri sušenju s standardnim sušilnim programom.

Največji vlažnostni gradient smo izmerili po 142 urah sušenja pri radialnih deskah sušenih po standardnem sušilnem programu (preglednica 3) in je znašal 6,3 %/cm. To je bilo še v drugi fazi sušenja, ko je bila vlažnost srednjih slojev še vedno nad točko nasičenja celičnih sten, vlažnost vseh ostalih slojev pa že pod njo.

Preglednica 2 Vlažnostni gradienti ($\Delta u/\Delta x$), upogibi lamel pri testiranju zaskorjenja (f) in povprečna vlažnost (u) v odvisnosti od časa sušenja radialnih desk sušenih s standardnim sušilnim programom.

odvzem	t		u	$\Delta u/\Delta x$	f
	[h]		[%]	[%/cm]	[mm]
1	0	Xpovp	70,6	0,925	0,70
		st. dev.	3,88	0,923	0,23
2	70	Xpovp	33,5	5,591	0,84
		st. dev.	6,00	2,272	0,35
3	142	Xpovp	24,1	6,293	0,79
		st. dev.	7,32	0,287	0,33
4	190	Xpovp	20,2	4,900	1,44
		st. dev.	6,31	0,256	0,60
5	221	Xpovp	18,7	4,700	0,99
		st. dev.	5,88	0,433	0,44
6	310	Xpovp	12,5	2,620	1,07
		st. dev.	3,41	0,241	0,62
7	358	Xpovp	10,6	2,093	1,18
		st. dev.	2,65	0,134	0,70
8	396	Xpovp	10,1	1,621	1,68
		st. dev.	1,95	0,121	0,71

Preglednica 3 Vlažnostni gradienti ($\Delta u/\Delta x$), upogibi lamel pri testiranju zaskorjenja (f) in povprečna vlažnost (u) v odvisnosti od časa sušenja tangencialnih desk sušenih s standardnim sušilnim programom.

odvzem	t		u	$\Delta u/\Delta x$	f
	[h]		[%]	[%/cm]	[mm]
1	0	Xpovp	73,2	0,360	0,76
		st. dev.	5,24	1,983	0,26
2	70	Xpovp	31,3	4,031	1,75
		st. dev.	4,79	0,122	1,51
3	142	Xpovp	20,6	5,044	1,45
		st. dev.	6,00	0,555	1,20
4	190	Xpovp	15,8	3,211	1,83
		st. dev.	4,02	0,475	1,21
5	221	Xpovp	13,8	2,683	1,48
		st. dev.	3,59	0,505	1,22
6	310	Xpovp	7,5	1,477	1,27
		st. dev.	1,81	0,129	0,47
7	358	Xpovp	7,2	1,008	2,22
		st. dev.	1,89	0,695	1,36
8	396	Xpovp	6,8	0,578	1,71
		st. dev.	1,18	0,448	1,47

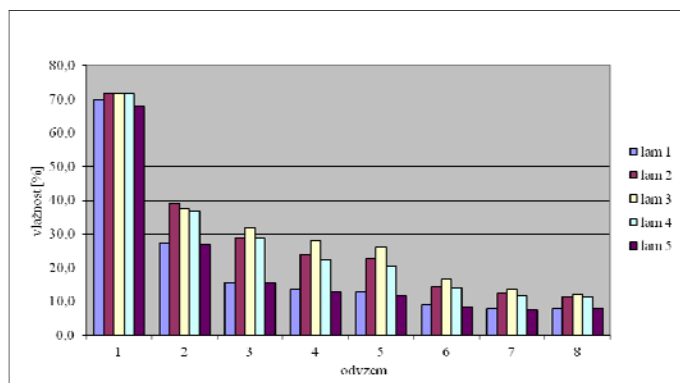
Preglednica 4 Vlažnostni gradienti ($\Delta u/\Delta x$), upogibi lamel pri testiranju zaskorjenja (f) in povprečna vlažnost (u) v odvisnosti od časa sušenja radialnih desk sušenih z oscilirajočim sušilnim programom.

odvzem	čas		u	du/dx	f
	[h]		[%]	[%/cm]	[mm]
1	0	Xpovp	63,10	0,374	0,14
		st. dev.	2,23	0,153	0,04
2	120	Xpovp	27,45	1,231	0,76
		st. dev.	7,81	0,866	0,33
3	190	Xpovp	18,60	0,926	1,09
		st. dev.	4,55	0,065	0,68
4	289	Xpovp	12,68	0,574	1,10
		st. dev.	3,74	0,176	0,62
5	454	Xpovp	11,32	-0,171	1,02
		st. dev.	0,89	0,053	0,69

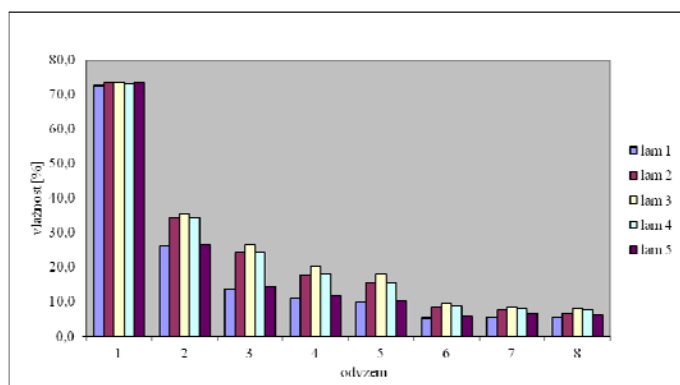
Preglednica 5 Vlažnostni gradienti ($\Delta u/\Delta x$), upogibi lamel pri testiranju zaskorjenja (f) in povprečna vlažnost (u) v odvisnosti od časa sušenja tangencialnih desk sušenih z oscilirajočim sušilnim programom.

odvzem	t		u	$\Delta u/\Delta x$	f
	[h]		[%]	[%/cm]	[mm]
1	0	Xpovp	66,40	0,613	0,15
		st. dev.	7,23	0,541	0,03
2	120	Xpovp	25,31	1,298	1,02
		st. dev.	5,60	0,113	0,93
3	190	Xpovp	15,45	0,587	2,41
		st. dev.	3,17	0,069	1,59
4	289	Xpovp	10,09	0,374	2,23
		st. dev.	1,75	0,080	1,38
5	454	Xpovp	10,42	-0,193	1,47
		st. dev.	0,96	0,012	1,34

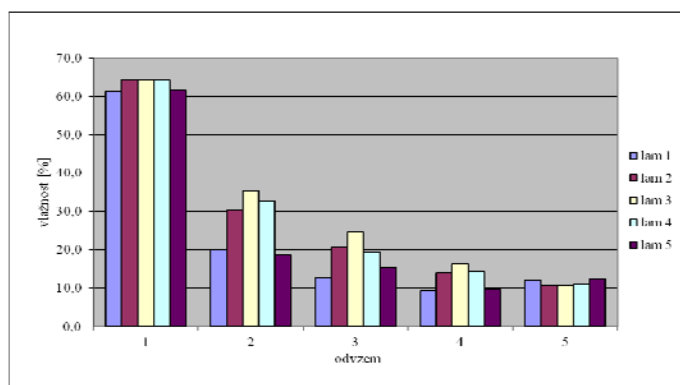
Razlika med vlažnostjo zunanjih in notranjih slojev je večja pri sušenju s standardnim, (slika 13 in slika 14) kot pri sušenju z oscilirajočim (slika 15 in slika 16) sušilnim programom. Tangencialne deske (slika 14 in slika 16) so se sušile bolj enakomerno kot radialne (slika 13 in slika 15) deske. Vlažnostni gradient se je pri sušenju z oscilirajočim sušilnim programom (slika 15 in slika 16) na koncu sušenja obrnil, tako da je bila vlažnost notranjih slojev nižja kot vlažnost površinskih slojev lesa.



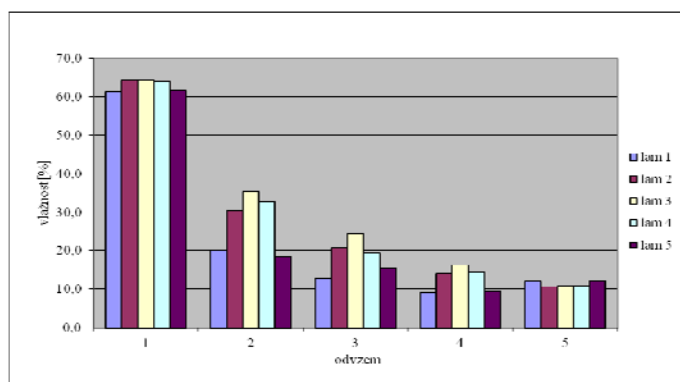
Slika 13 Vlažnostni profil radialnih desk, v posameznih fazah sušenja s standardnim sušilnim programom. Lam 1 = prva lamela (zgornja površina); lam 2 = druga lamela; lam 3 = tretja lamela (sredina); lam 4 = četrta lamela; lam 5 = peta lamela (spodnja površina).



Slika 14 Vlažnostni profil tangencialnih desk, v posameznih fazah sušenja s standardnim sušilnim programom. Lam 1 = prva lamela (zgornja površina); lam 2 = druga lamela; lam 3 = tretja lamela (sredina); lam 4 = četrta lamela; lam 5 = peta lamela (spodnja površina).



Slika 15 Vlažnostni profil radialnih desk, v posameznih fazah sušenja z oscilirajočim sušilnim programom. Lam 1 = prva lamela (zgornja površina); lam 2 = druga lamela; lam 3 = tretja lamela (sredina); lam 4 = četrta lamela; lam 5 = peta lamela (spodnja površina)



Slika 16 Vlažnostni profil tangencialnih desk, v posameznih fazah sušenja z oscilirajočim sušilnim programom. Lam 1 = prva lamela (zgornja površina); lam 2 = druga lamela; lam 3 = tretja lamela(sredina); lam 4 = četrta lamela; lam 5 = peta lamela (spodnja površina)

4.3 VPLIV SUŠILNEGA POSTOPKA NA MEHANSKE LASTNOSTI LESA

Les ima pri nižji vlažnosti večinoma boljše mehanske lastnosti (preglednica 6, preglednica 7, preglednica 8, preglednica 9). Tangencialne deske imajo pri sušenju s standardnim sušilnim programom boljše (preglednica 7), pri sušenju z oscilirajočim sušilnim programom (preglednica 9) pa slabše mehanske lastnosti kot radialno usmerjene deske (preglednica 6 in preglednica 8).

Tangencialne deske, sušene s standardnim sušilnim programom, (preglednica 7) imajo boljše lastnosti od tangencialnih desk, sušenih z oscilirajočim sušilnim programom (preglednica 9). Radialno usmerjene deske imajo pri sušenju s standardnim sušilnim programom (preglednica 6) slabše mehanske lastnosti od radialnih desk sušenih z oscilirajočim (preglednica 8) sušilnim programom.

Notranji sloji lesa imajo na začetku sušenja s standardnim sušilnim programom (preglednica 6 in preglednica 7) boljše mehanske lastnosti od zunanjih slojev lesa. Zunanji sloji lesa pa imajo boljše lastnosti na koncu sušenja. Pri sušenju z oscilirajočim sušilnim programom (preglednica 8 in preglednica 9) pa imajo zunanji sloji tangencialnih desk na koncu sušenja slabše lastnosti, vsi ostali (zunanji sloji radialnih, notranji sloji radialnih, notranji sloji tangencialnih) pa boljše mehanske lastnosti na koncu sušenja.

Z nižjo vlažnostjo se mehanske lastnosti lesa izboljšujejo. Elastični modul je bil pri deskah sušenih s standardnim (preglednica 6 in preglednica 7) sušilnim programom veliko večji, (tako na začetku kot na koncu) kot pa pri sušenju z oscilirajočim sušilnim programom

(preglednica 8 in preglednica 9). Natezna trdnost je bila boljša pri deskah sušenih s standardnim programom (tako na začetku kot na koncu), vendar je bila relativna razlika med vrednostmi manjša.

Preglednica 6 Vpliv lesne vlažnosti na mehanske lastnosti radialnih desk sušenih s standardnim sušilnim programom: t- čas sušenja; u – povprečna lesna vlažnost; MoE_{bz} , MoE_{bn} – »upogibni« elastični modul zunanega in notranjega sloja; σ_{bz} , σ_{bn} – natezna trdnost zunanega in notranjega sloja; E – »natezni« elastični modul; σ – natezna trdnost.

t [h]		u [%]	Upogib				Nateg	
			MoE_{bz} [MPa]	MoE_{bn} [MPa]	σ_{bz} [N/mm ²]	σ_{bn} [N/mm ²]	E [MPa]	σ [N/mm ²]
0h	x povp	70,6	675,3	822,4	11,31	12,63	538,6	3,28
	st dev	3,88	220,3	198,5	3,09	2,56	52,6	0,20
70h	x povp	33,5	705,3	548,2	11,74	8,41	487,0	2,81
	st dev	6,00	254,3	101,1	4,05	2,47	77,8	0,64
142h	x povp	24,1	766,2	526,8	11,43	10,39	734,4	3,92
	st dev	7,32	340,7	203,3	5,36	2,61	72,9	0,27
190h	x povp	20,2	1106,3	732,8	17,21	12,29	706,8	3,47
	st dev	6,31	249,2	161,6	2,50	2,01	62,0	0,75
221h	x povp	18,7	992,7	664,6	13,85	11,56	866,4	4,56
	st dev	5,88	312,9	146,9	6,09	2,23	121,5	0,58
310h	x povp	12,5	1315,7	957,6	19,11	12,80	897,6	4,69
	st dev	3,41	276,9	259,8	3,16	3,07	95,7	0,77
358h	x povp	10,6	1232,7	1030,9	18,48	14,90	1048,3	4,30
	st dev	2,65	406,5	178,1	3,96	2,21	163,5	1,22
396h	x povp	10,1	1053,3	1019,1	16,45	13,28	1025,3	3,67
	st dev	1,95	363,4	164,4	5,20	1,74	149,1	0,75

Preglednica 7 Vpliv lesne vlažnosti na mehanske lastnosti tangencialnih desk sušenih s standardnim sušilnim programom. t- čas sušenja; u – povprečna lesna vlažnost; MoE_{bz} , MoE_{bn} – »upogibni« elastični modul zunanega in notranjega sloja; σ_{bz} , σ_{bn} – natezna trdnost zunanega in notranjega sloja; E – »natezni« elastični modul; σ – natezna trdnost.

t [h]		u [%]	Upogib				Nateg	
			MoE_{bz} [MPa]	MoE_{bn} [MPa]	σ_{bz} [N/mm ²]	σ_{bn} [N/mm ²]	E [MPa]	σ [N/mm ²]
0h	x povp	73,2	524,6	563,1	8,70	8,97	480,0	2,93
	st dev	5,24	197,4	275,7	3,03	3,57	59,6	0,50
70h	x povp	31,3	847,8	744,1	14,64	12,67	470,8	2,76
	st dev	4,79	170,7	137,8	2,89	2,83	73,9	0,52
142h	x povp	20,6	1218,3	842,6	19,34	14,40	714,1	4,27
	st dev	6,00	122,1	106,6	2,05	0,96	44,0	0,68
190h	x povp	15,8	960,3	548,3	13,45	10,39	784,8	4,01
	st dev	4,02	367,9	179,0	5,75	2,12	86,7	0,96
221h	x povp	13,8	842,3	580,4	14,41	10,80	883,6	4,20
	st dev	3,59	370,6	248,4	5,78	2,74	148,4	0,43
310h	x povp	7,5	1086,9	838,1	16,57	13,04	859,9	4,49
	st dev	1,81	437,8	135,8	5,98	1,86	102,5	0,72
358h	x povp	7,2	1558,1	1401,3	24,54	17,35	1101,1	5,11
	st dev	1,89	118,4	53,8	5,74	1,03	151,2	0,70
396h	x povp	6,8	1253,8	1115,6	19,44	14,66	988,1	3,86
	st dev	1,18	363,1	242,1	3,98	3,17	241,4	1,01

Preglednica 8 Vpliv lesne vlažnosti na mehanske lastnosti radialnih desk sušenih z oscilirajočim sušilnim programom. t- čas sušenja; u – povprečna lesna vlažnost; MoE_{bz} , MoE_{bn} – »upogibni« elastični modul zunanega in notranjega sloja; σ_{bz} , σ_{bn} – natezna trdnost zunanega in notranjega sloja; E – »natezni« elastični modul; σ – natezna trdnost.

t [h]		u [%]	Upogib				Nateg	
			MoE_{bz} [MPa]	MoE_{bn} [MPa]	σ_{bz} [N/mm ²]	σ_{bn} [N/mm ²]	E [MPa]	σ [N/mm ²]
0h	xpovp	64,1	428,0	488,9	8,44	9,06	111,3	1,74
	st dev	5,32	70,8	135,8	1,75	2,54	24,7	0,28
120h	xpovp	25,5	984,1	684,8	15,21	11,69	328,8	2,01
	st dev	7,32	72,7	81,4	2,03	0,99	50,8	0,37
190h	xpovp	17,7	1020,7	738,0	15,31	11,98		
	st dev	4,90	92,7	57,6	1,53	0,85		
289h	xpovp	11,5	1086,3	1119,5	16,79	15,61	504,6	4,26
	st dev	3,70	237,5	112,5	3,79	2,32	104,5	0,55
454h	xpovp	11,3	913,6	1261,3	14,93	16,61	457,3	2,69
	st dev	0,75	98,4	61,7	2,04	1,66	90,3	0,68

Preglednica 9 Vpliv lesne vlažnosti na mehanske lastnosti tangencialnih desk sušenih z oscilirajočim sušilnim programom. t- čas sušenja; u – povprečna lesna vlažnost; MoE_{bz} , MoE_{bn} – »upogibni« elastični modul zunanega in notranjega sloja; σ_{bz} , σ_{bn} – natezna trdnost zunanega in notranjega sloja; E – »natezni« elastični modul; σ – natezna trdnost.

t [h]		u [%]	Upogib				Nateg	
			MoE_{bz} [MPa]	MoE_{bn} [MPa]	σ_{bz} [N/mm ²]	σ_{bn} [N/mm ²]	E [MPa]	σ [N/mm ²]
0h	xpovp	66,8	548,8	635,4	9,61	10,60	88,8	1,64
	st dev	7,55	240,2	278,2	3,66	3,77	25,0	0,45
120h	xpovp	23,8	590,2	502,1	9,82	9,47	469,1	3,26
	st dev	5,32	40,11	120,15	2,15	1,43	92,2	0,84
190h	xpovp	15,4	593,1	478,4	11,15	9,22		
	st dev	3,20	51,7	44,9	0,92	0,72		
289h	xpovp	9,5	652,4	652,4	13,27	11,23	568,4	4,82
	st dev	1,72	38,6	38,6	2,28	0,99	63,1	0,47
454h	xpovp	10,5	517,4	723,38	10,25	11,67	578,1	3,39
	st dev	0,82	49,6	27,8	1,43	0,94	73,2	0,43

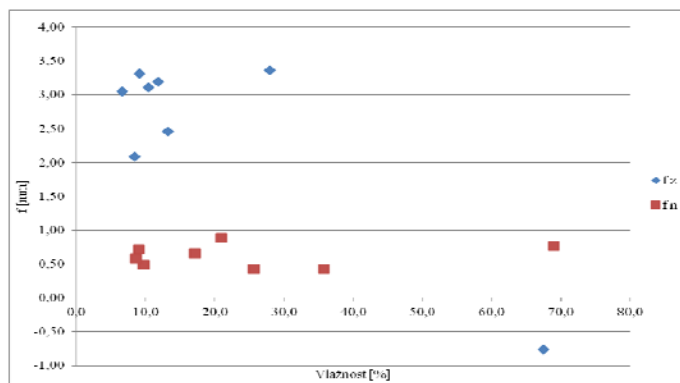
5 RAZPRAVA

5.1 ZASKORJENJE V ODVISNOSTI OD LESNE VLAŽNOSTI

Pred začetkom sušenja se napetosti v lesu pojavljajo zaradi značilnega priraščanja lesa. Celice kambija se namreč delijo in pri tem nastajajo celice lesa in celice živega dela skorje oziroma floema. Med novo nastalimi in starejšimi celicami nastanejo napetosti. Zunanji sloji lesa vzdolž lesnih vlaken so obremenjeni natežno, notranji pa tlačno. Posledica tega napetostnega stanja so lahko deformacije oblike pred začetkom sušenja.

Med sušenjem je deformacija odvisna od izgube vode. Ko vlažnost lesa pade pod točko nasičenja celičnih sten, začne iz lesa izhajati tudi vezana voda, ki se nahaja v celičnih stenah. S tem, ko les izgublja vezano vodo se celična stena krči, posledično pa se v lesu generirajo napetosti. Posledica teh generiranih napetosti so razne deformacije oblike. V primeru, da so generirane napetosti večje od trdnosti lesa pa pride do porušitve lesnega tkiva.

Velikost generiranih napetosti smo merili z velikostjo loka, ki je nastal po tem, ko smo vzorce prežagali na več lamel. Les se najbolj krči v tangencialni smeri zato je bila, deflekcija tangencialno usmerjenih vzorcev največja (slika 17).

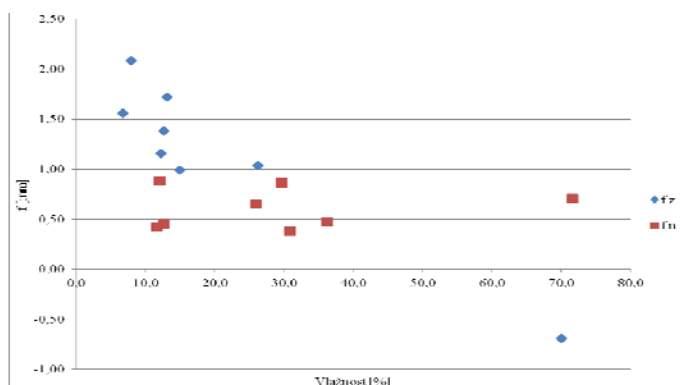


Slika 17 Deflekcija tangencialnih desk sušenih s standardnim sušilnim programom:
fz = deflekcija zunanjih slojev, fn = deflekcija notranjih slojev.

Deflekcija srednjih slojev tangencialnih desk je bila precej konstantna in se s sušenjem lesa ni kaj dosti spreminjala. Deflekcija zunanjih slojev pa se je s sušenjem lesa povečevala. Lamle zunanjih slojev so se na začetku sušenja usločile na vznoter, kar pomeni, da so bili na začetku sušenja zunanji sloji lesa obremenjeni na nateg notranji pa na tlak.

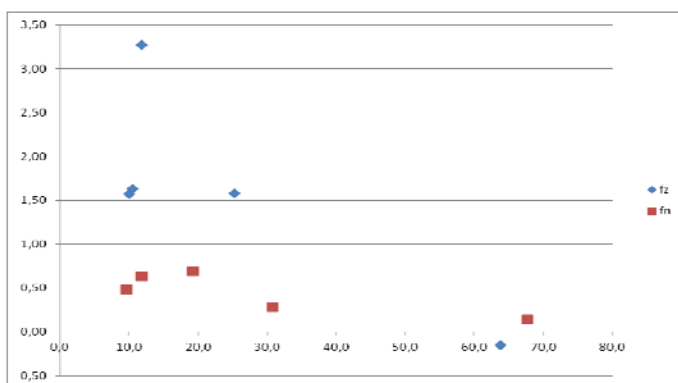
Na koncu sušenja se je to napetostno stanje obrnilo tako, da so bili notranji sloji lesa obremenjeni na nateg zunanji pa na tlak. Na koncu sušenja je prišlo do precejšnje razpršenosti podatkov, saj so sloji posameznih desk lesa pri približno enaki vlažnosti zavzeli več različnih vrednosti. Delni razlog za to razpršenost je verjetno v anatomski zgradbi lesa, saj ta vpliva na potek sušenja in posledično zaskorjenje lesa.

Ravno tako kot pri tangencialnih deskah se je tudi pri radialnih deskah s sušenjem lesa deflekcija zunanjih slojev lesa večala, napetostno stanje lesa pa se je proti koncu sušenja obrnilo (slika 18). Zunanji sloji so bili na začetku sušenja obremenjeni na nateg notranji pa na tlak. Po koncu sušenja pa so bili notranji sloji obremenjeni na nateg, zunanji pa na tlak. V primerjavi s tangencialnimi deskami je pri radialnih veliko bolj tesna zveza med deflekcijo in vlažnostjo.



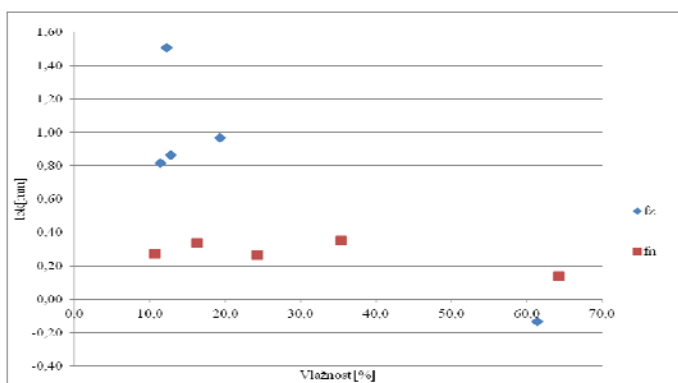
Slika 18 Deflekcija radialnih desk sušenih s standardnim sušilnim programom.
fz = deflekcija zunanjih slojev, fn = deflekcija notranjih slojev.

Deflekcija notranjih slojev se tudi s sušenjem z oscilirajočim sušilnim programom ni veliko spreminjala (slika 19), med tem, ko se je deflekcija zunanjih slojev tekom sušenja izrazito večala. Deflekcija je bila pri prvem merjenju negativna, kar pomeni, da so bili notranji sloji obremenjeni na nateg zunanji pa na tlak.



Slika 19 Deflekcija tangencialnih desk sušenih z oscilirajočim sušilnim programom.
fz = deflekcija zunanjih slojev, fn = deflekcija notranjih slojev.

Radialne deske sušene z oscilirajočim sušilnim programom (slika 20) imajo najmanjšo deflekcijo med vsemi obravnavanimi deskami. Deflekcija notranjih slojev se je tekom sušilnega postopka zelo malo spreminjala. Napetostno stanje se je tudi v tem primeru proti koncu sušenja obrnilo.



Slika 20 Deflekcija radialnih desk sušenih z oscilirajočim sušilnim programom.
fz = deflekcija zunanjih slojev, fn = deflekcija notranjih slojev.

Deflekcija desk sušenih z oscilirajočim sušilnim programom (preglednica 4 in 5) je bila manjša kot pri sušenju s standardnim sušilnim programom (preglednica 2 in 3). Z intervalnim navlaževanjem pa lahko vplivamo na zmanjšanje zaskorjenja tako radialnih kot tangencialnih desk (preglednica 2, 3, 4, 5).

Intervalno navlaževanje, pripomore k zmanjšanju zaskornjenja in napetostnih stanj na koncu sušenja

5.2 TOGOST LESA V ODVISNOSTI OD VLAŽNOSTI

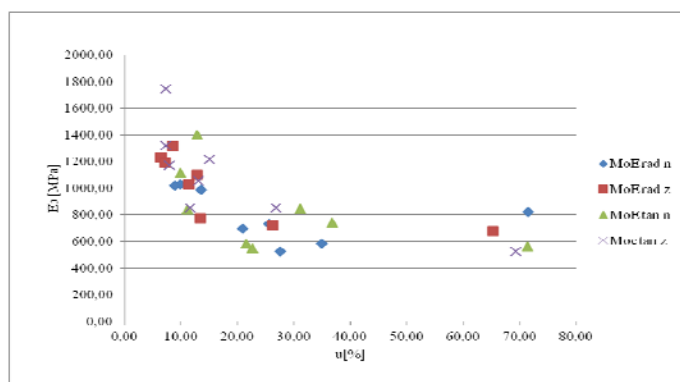
Elastični modul se je s sušenjem lesa večal. Na začetku sušenja (slika 21) so razlike med radialnim in tangencialnimi deskami majhne. Bistvene razlike so se začele pojavljati po tem, ko se je les osušil pod točko nasičenja celičnih sten. Na koncu sušenja so imele tangencialne deske višji elastični modul kot tangencialne.

Modul elastičnosti se je pri radialnih deskah s sušenjem izrazito večal (slika 22), pri tangencialnih deskah pa se s sušenjem ni tako izrazito spreminjal. Elastični modul radialnih desk je bil pod točko nasičenja celičnih sten veliko večji od modula tangencialnih desk.

Pri sušenju z oscilirajočim sušilnim programom (slika 23 in slika 24) je prišlo do večjih razlik med radialnimi in tangencialnimi deskami, kot pri standardnem postopku (slika 21 in slika 22) sušenja.

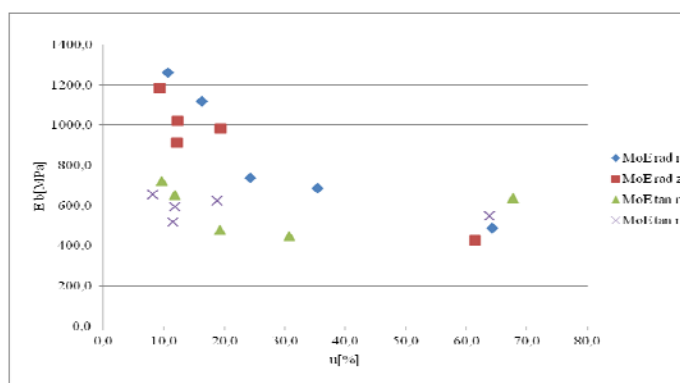
Z oscilirajočimi pogoji sušenja negativno vplivamo na elastični modul (primerjava slike 21 in 22) določen pri upogibnem obremenjevanju. Na oscilacijo vlažnosti so bolj kot radialne, občutljive tangencialne deske. Iz tega lahko sklepamo, da je imelo nihanje pogojev večji vpliv na tangencialne deske.

Modul elastičnosti pri nateznem testu se je s sušenjem lesa povečeval (slika 23 in slika 24). Modul elastičnosti je bil v svežem stanju lesa višji pri radialno usmerjenih deskah. Po končanem sušenju pa so imele tangencialno usmerjene deske višji elastični modul.



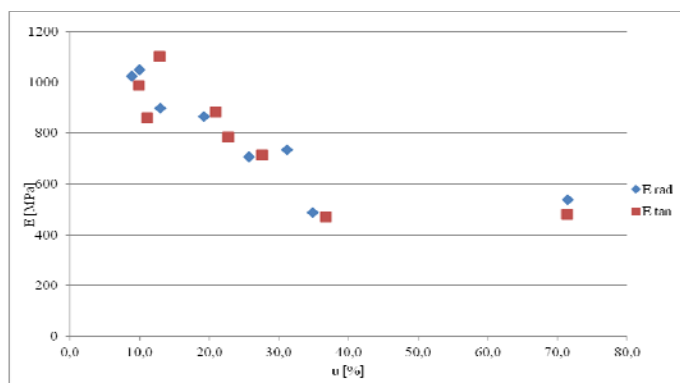
Slika 21 Elastični modul pri sušenju s standardnim sušilnim programom - upogibni test.

MoE rad n = modul elastičnosti notranjih slojev radialnih desk, MoE rad z = modul elastičnosti zunanjih slojev radialnih desk, MoE tan n = modul elastičnosti notranjih slojev tangencialnih desk, MoE tan z = modul elastičnosti zunanjih slojev tangencialnih desk.



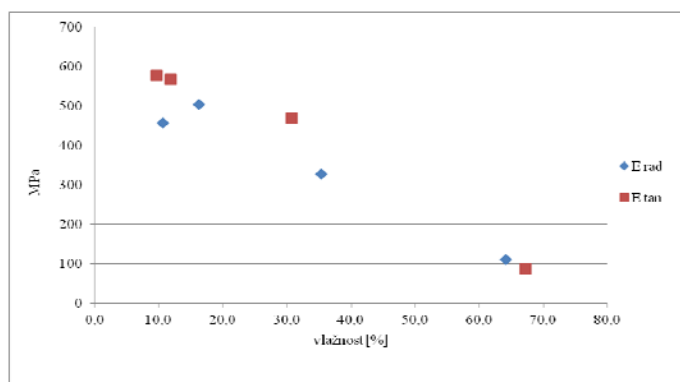
Slika 22 Elastični modul pri sušenju z oscilirajočim sušilnim programom – upogibni test.

MoE rad n = modul elastičnosti notranjih slojev radialnih desk, MoE rad z = modul elastičnosti zunanjih slojev radialnih desk, MoE tan n = modul elastičnosti notranjih slojev tangencialnih desk, MoE tan z = modul elastičnosti zunanjih slojev tangencialnih desk.



Slika 23 Elastični modul pri sušenju s standardnim sušilnim programom - natezni test.

E rad = elastični modul radialnih desk, E tan = elastični modul tangencialnih desk.



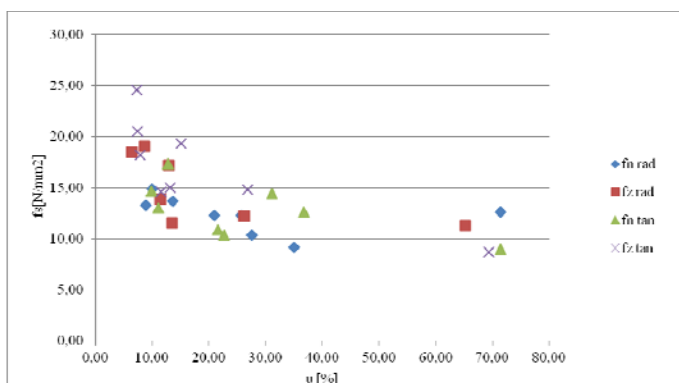
Slika 24 Elastični modul pri sušenju z oscilirajočim sušilnim programom - natezni test.

E rad = elastični modul radialnih desk, E tan = elastični modul tangencialnih desk.

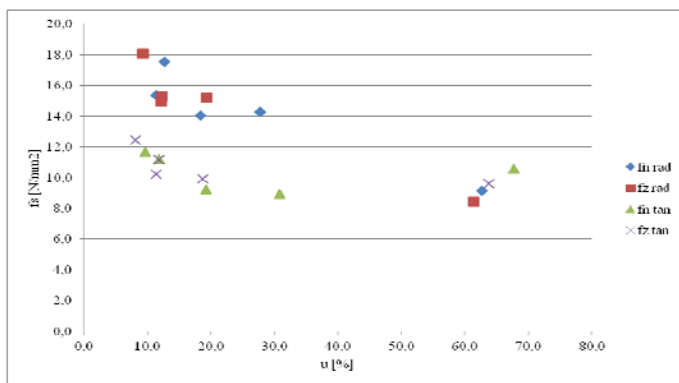
Oscilirajoča klima negativno vpliva na elastični modul med in po samem postopku sušenja (slika 21, slika 22, slika 23, slika 24). Razlog za nastalo razliko vidimo v intervalnem navlaževanju lesa. S tem, ko les med sušenjem intervalno navlažujemo, mu na nek način »mehčamo« zunanje že zaskorele sloje lesa. Zaradi »mehkejših« zunanjih slojev lesa pa je elastični modul lesa, ki smo ga posušili z oscilirajočim sušilnim programom nižji, kot pri lesu posušenem s standardnim sušilnim programom.

5.3 MEHANSKE LASTNOSTI LESA V ODVISNOSTI OD VLAŽNOSTI

Upogibna trdnost lesa (slika 25 in slika 26) se je s sušenjem lesa povečevala. Na začetku sušenja, so imele tangencialne deske nižjo upogibno trdnost od radialnih desk. Na koncu sušenja pa so imele tangencialno orientirane deske višjo upogibno trdnost od radialnih desk.

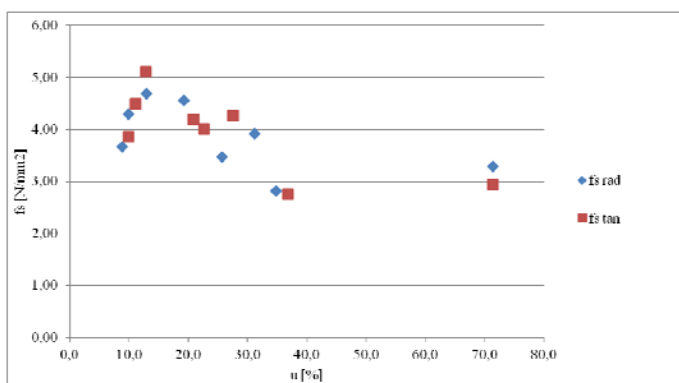


Slika 25 Upogibna trdnost lesa sušenega s standardnim programom. $f_{i\text{ rad}}$ = upogibna trdnost notranjih slojev radialnih desk, $f_{z\text{ rad}}$ = upogibna trdnost zunanjih slojev radialnih desk, $f_{i\text{ tan}}$ = upogibna trdnost notranjih slojev tangencialnih desk, $f_{z\text{ tan}}$ = upogibna trdnost zunanjih slojev tangencialnih desk.

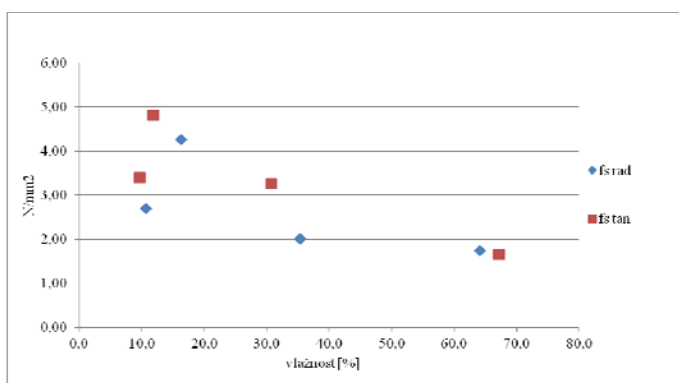


Slika 26 Upogibna trdnost lesa sušenega z oscilirajočim sušilnim programom. $f_{i\text{ rad}}$ = prečna upogibna trdnost notranjih slojev radialnih desk, $f_{z\text{ rad}}$ = prečna upogibna trdnost zunanjih slojev radialnih desk, $f_{i\text{ tan}}$ = prečna upogibna trdnost zunanjih slojev tangencialnih desk, $f_{z\text{ tan}}$ = prečna upogibna trdnost zunanjih slojev tangencialnih desk

Natezna trdnost se je s sušenjem povečevala tako pri sušenju s standardnim programom kot v nihajočih pogojih (slika 27 in slika 28), radialno usmerjene deske so imele v območju točke nasičenosti celičnih sten višjo, na koncu sušenja pa nižjo natezno trdnost od tangencialnih desk, vendar razlike niso značilne. Tudi razlike med radialnimi in tangencialnimi deskami niso značilne.



Slika 27 Natezna trdnost pri sušenju v standardnih klimatskih pogojih. fs rad = natezna trdnost radialnih desk, fs tan = natezna trdnost tangencialnih desk.



Slika 28 Natezna trdnost pri sušenju v oscilirajočih klimatskih pogojih. fs rad = natezna trdnost radialnih desk, fs tan = natezna trdnost tangencialnih desk.

Z intervalnim navlaževanjem slabšamo mehanske lastnosti lesa. Z navlaževanjem lesa bolj kot na trdnost (slika 25, slika 26, slika 27, slika 28) vplivamo na elastični modul lesa (slika 21, slika 22, slika 23 in slika 24). Na navlaževanje so bolj občutljive radialne deske.

6 SKLEPI

Osnovne eksperimentalne ugotovitve:

- Z eksperimentalnim delom raziskave smo ugotovili, da z intervalnim navlaževanjem lahko vplivamo na zmanjšanje vlažnostnega gradienta, s tem pa tudi na zmanjšanje možnosti pojava zaskorjenja na koncu sušenja.
- S sušenjem v oscilacijskih pogojih smo dosegli, da je bil vlažnostni gradient na koncu sušenja negativen, kar pomeni, da so imeli površinski sloji višjo vlažnost od sredinskih slojev lesa.
- Čas sušenja je pri standardnem sušilnem postopku znašal 396 ur, pri sušenju z oscilacijskem režimom sušenja pa je ta čas znašal 454 ur. Razvidno je, da se je čas sušenja podaljšal za 58 ur ali za slabih 15%.
- Pri sušenju v oscilacijskih klimatskih pogojih so bile mehanske lastnosti slabše že med samim postopkom sušenja. Razlika pa je prišla še bolj do izraza po koncu sušenja. Takrat je denimo elastični modul zunanjih slojev merjen pri upogibnem testu, dosegel samo dobrih 41% vrednosti, primerljivih vzorcev sušenih s standardnim programom.

7 VIRI

Bramhall G. 1971. The validity of Darcy's law in the axial penetration of wood. *Wood Science and Technology*, 5: 121-134

Gorišek Ž. Variabilna in heterogena zgradbe lesa. *Korak (N. Gorica)*, 2005, letn. 6, št. 5, str. 23-24.

Hanhijärvi A., Wahl P., Räsänen J., Silbennoinen R. 2003. Observation of Development of Microcracks on Wood Surface Caused by Drying Stresses. *Holzforschung*, 57: 561-565

Kauman W.G., Ananias R.A., Gutierrez M., Valenzuela H. 1994. Non-Darcian permeability in Chileau Tepa (*Laurelia philippiana*). *Holzforschung*, 48: 77-81

Keey R.B., Langrish T.A.G., Walker J.C.F. 2000. *Kiln-Drying of Lumber*. Berlin, Springer: 326 str.

Meyer R.W. 1971. Influence of pit aspiration on earlywood permeability of Douglas fir. *Wood and Fiber*, 2: 328-339

Milić G. 2011. Mogućnost primene oscilatornog sušenja piljenja grade bukve u konvencionalnim sušerama Doktorska dizertacija Beograd: 112 str.

Perre P., Karimi A. 2002. Fluid migration in two species of beech (*Fagus sylvatica* and *Fagus orientalis*): a percolation model able to account for macroscopic measurements and anatomical observations. *MADERAS: Cince & Technologia*, 4: 50-68

Siau J.F. 1984. *Transport processes in wood*. Berlin, Springer-Verlag: 245 str.

Siau J.F. 1995. *Wood: Influence of moisture on physical properties*. Blacksburg, Department of Wood Science and Forest Products. Virginia Polytechnic INstitute and State University: 227 str.

Siau J.F., Avramidis S. 1996. The surface emission coefficient for wood. *Wood and Fiber Science*, 28: 178-185

SIST ENV 408: 2010. Lesene konstrukcije – Konstrukcijski les in lepljeni lamelirani les - Ugotavljanje nekaterih fizikalnih in mehanskih lastnosti. Timber Structres-Structural timber and glued laminated timber- Determination of some physical and mechanical properties

SIST ENV 13183-1: 2003. Žagan les – Metoda za določitev vlažnosti. Raund and sawn timber – Method of measurement of moisture content-Part 1: Method for dermining moisture content of a piece of sawn timber (Oven dry method)

SIST ENV 14464: 2003. Žagan les – Metoda za ocenjevanje zaskorjenosti. Sawn timber-Method of assessment of case-hardening.

Stamm A. J. 1959. Bound water diffusion into wood in the fiber direction. Forest Products Journal 9: 27-32.

Stamm A. J. 1964. Wood and cellulose science. New York, Ronald: 549 str.

Walker J.C.F., Butterfield B.G., Langrish T.A.G., Harris J.M., Uprichard J.M. 1993. Primary Wood Processing. London, Chapman and Hall: 595 str.

ZAHVALA

Prof. Dr. Željku Goršku se zahvaljujem za mentorstvo pri izdelavi diplomskega projekta in za čas, ki si ga je vzel v zadnjih dneh pred zagovorom.

Asist. Dr. Alešu Stražetu se zahvaljujem za strokovno opravljeno recenzijo in za čas, ki si ga je vzel v zadnjem tednu pred zagovorom.

Zahvaljujem se svoji družini, ki mi je ves čas študija stala ob strani in mi nudila vso podporo.