

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Tilen JELOVČAN

**VPLIV TEMPERATURE IN OSTRINE SUŠENJA NA ZASKORJENJE  
IN KAKOVOST OSUŠENE BUKOVINE**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2012

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Tilen JELOVČAN

**VPLIV TEMPERATURE IN OSTRINE SUŠENJA NA ZASKORJENJE  
IN KAKOVOST OSUŠENE BUKOVINE**

DIPLOMSKO DELO  
Visokošolski strokovni študij

**INFLUENCE OF TEMPERATURE AND DRYING POTENTIAL ON  
CASEHARDENING AND DRYING QUALITY OF BEECH WOOD**

GRADUATION THESIS  
Higher professional studies

Ljubljana, 2012

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega študija Lesarstva. 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. Dominiko Gornik Bučar.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

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

Tilen Jelovčan

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- ŠD Vs
- DK UDK 630\*847
- KG les/sušenje/čas sušenja/kakovost/mehanske lastnosti
- AV JELOVČAN, Tilen
- SA GORIŠEK, Željko (mentor)/GORNIK BUČAR Dominika (recenzent)
- KZ SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c.VIII/34
- ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
- LI 2012
- IN VPLIV TEMPERATURE IN OSTRINE SUŠENJA NA ZASKORJENJE IN  
KAKOVOST OSUŠENE BUKOVINE
- TD Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)
- OP VIII, 40 str., 12 pregl., 28 sl., 15 vir.
- IJ sl
- JI sl/en
- AI Dolgotrajni postopek sušenja lesa skušamo skrajšati s povečano ostrino in temperaturo sušenja, hkrati pa želimo ohraniti zadovoljivo kakovost osušenega lesa. Primerjali smo vpliv ostrejših in milejših pogojev sušenja na hitrost in kakovost sušenja bukovine. 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. Hitrost sušenja je bila pri ostrejših pogojih sušenja večja, posledično je bil čas sušenja krajši. Vlažnostni gradient je bil pri blažjem sušenju manjši in je izkazoval tudi manjše zaskorjenje. Mehanske lastnosti so bile pri sušenju z blažjim postopkom boljše kot pa pri sušenju z ostrejšim.

## KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Vs

DC UDC 630\*847

CX wood/drying/drying time/quality/mechanical properties

AU JELOVČAN, Tilen

AA GORIŠEK, Željko (supervisor)/GORNIK BUČAR Dominika (reviewer)

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

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

PY 2012

TY INFLUENCE OF TEMPERATURE AND DRYING POTENTIAL ON CASEHARDING AND DRYING QUALITY OF BEECH WOOD

DT Graduation Thesis (Higher professional studies)

NO VIII, 40 p., 12 tab., 28 fig., 15 ref.

LA sl

AL sl/en

AB Wood drying is a long time process, which we try to shorten by increasing of drying potential and drying temperature, while maintaining a satisfactory quality of dried wood. We compared the effects of harsh and mild drying conditions on drying rate and quality of beech wood. Both procedures were compared by intermittent removal of samples. We measured the average moisture content, moisture gradient and casehardening, and we tested the mechanical properties of wood in the middle and surface layers. The drying rate was higher in harsh drying conditions, so the drying time was shorter. Moisture content gradient was lower in mild drying process and showed smaller casehardening. Mechanical properties were better in mild drying condition than in harsh drying condition.

## KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	IX
<b>1 UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA .....	1
1.2 DELOVNE HIPOTEZE .....	1
<b>2 PREGLED LITERATURE</b> .....	<b>2</b>
2.1 VODA V LESU .....	2
<b>2.1.1 Distribucija vode v lesu</b> .....	<b>3</b>
2.2 MEHANIZEM SUŠENJA .....	4
<b>2.2.1 Izhlapevanje vode s površine</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2.2 Tok vode v lesu</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2.3 Permeabilnost</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2.4 Difuzivnost</b> .....	<b>5</b>
<b>3 MATERIAL IN METODE</b> .....	<b>8</b>
3.1 MATERIAL .....	8
3.2 METODE .....	8
<b>3.2.1 Sušilni postopek</b> .....	<b>8</b>
<b>3.2.2 Določanje vlažnosti in vlažnostnega gradienta</b> .....	<b>10</b>
<b>3.2.3 Upogibni test</b> .....	<b>10</b>
<b>3.2.4 Natezni test</b> .....	<b>11</b>
<b>3.2.5 Zaskorjenje</b> .....	<b>12</b>
<b>4 REZULTATI</b> .....	<b>13</b>
4.1 KINETIKA SUŠENJA .....	13
4.2 VLAŽNOSTNI GRADIENT .....	15

4.3	VPLIV SUŠILNEGA POSTOPKA NA NEKATERE MEHANSKE LASTNOSTI LESA .....	21
<b>5</b>	<b>RAZPRAVA .....</b>	<b>28</b>
5.1	ZASKORJENJE V ODVISNOSTI OD LESNE VLAŽNOSTI.....	28
5.2	TOGOST LESE V ODVISNOSTI OD VLAŽNOSTI.....	31
5.3	NEKATERE MEHANSKE LASTNOSTI BUKOVINE V ODVISNOSTI OD VLAŽNOSTI.....	34
<b>6</b>	<b>SKLEPI .....</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>POVZETEK.....</b>	<b>39</b>
<b>8</b>	<b>VIRI.....</b>	<b>41</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1 Povprečna vlažnost ( $u$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in lok lamele pri testiranju zaskorjenja ( $f$ ) v odvisnosti od časa sušenja radialnih desk sušenih z ostrejšim režimom sušenja. ....	16
Preglednica 2 Povprečna vlažnost ( $u$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in lok lamele pri testiranju zaskorjenja ( $f$ ) v odvisnosti od časa sušenja tangencialnih desk sušenih z ostrejšim režimom sušenja. ....	16
Preglednica 3 Povprečna vlažnost ( $u$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in lok lamele pri testiranju zaskorjenja ( $f$ ) v odvisnosti od časa sušenja radialnih desk sušenih z milejšim režimom sušenja. ....	17
Preglednica 4 Povprečna vlažnost ( $u$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in lok lamele pri testiranju zaskorjenja ( $f$ ) v odvisnosti od časa sušenja tangencialnih desk sušenih z milejšim režimom sušenja. ....	18
Preglednica 5 Vpliv časa sušenja in vlažnosti na modul elastičnosti in upogibno trdnost radialnih desk sušenih z ostrejšo klimo: $u$ – povprečna lesna vlažnost; $E_{not}$ , $E_{zu}$ – modul elastičnosti notranjega in zunanjega sloja; $\sigma$ – upogibna trdnost notranjega in zunanjega sloja. ....	22
Preglednica 6 Vpliv časa sušenja in vlažnosti na modul elastičnosti in upogibno trdnost tangencialnih desk sušenih z ostrejšo klimo: $u$ – povprečna lesna vlažnost; $E_{not}$ , $E_{zu}$ – modul elastičnosti notranjega in zunanjega sloja; $\sigma$ – upogibna trdnost notranjega in zunanjega sloja. ....	22
Preglednica 7 Vpliv časa sušenja in vlažnosti na modul elastičnosti in upogibno trdnost radialnih desk sušenih z milejšo klimo: $u$ – povprečna lesna vlažnost; $E_{not}$ , $E_{zu}$ – modul elastičnosti notranjega in zunanjega sloja; $\sigma$ – upogibna trdnost notranjega in zunanjega sloja. ....	23
Preglednica 8 Vpliv časa sušenja in vlažnosti na modul elastičnosti in upogibno trdnost tangencialnih desk sušenih z milejšo klimo: $u$ – povprečna lesna vlažnost; $E_{not}$ , $E_{zu}$ – modul elastičnosti notranjega in zunanjega sloja; $\sigma$ – upogibna trdnost notranjega in zunanjega sloja. ....	24



Preglednica 9	Vpliv časa sušenja in vlažnosti na modul elastičnosti in natezno trdnost radialnih desk sušenih z ostrejšo klimo: $u$ – povprečna lesna vlažnost; $E$ – modul elastičnosti; $\sigma$ – natezna trdnost.....	25
Preglednica 10	Vpliv časa sušenja in vlažnosti na modul elastičnosti in natezno trdnost tangencialnih desk sušenih z ostrejšo klimo: $u$ – povprečna lesna vlažnost; $E$ – modul elastičnosti; $\sigma$ – natezna trdnost.....	25
Preglednica 11	Vpliv časa sušenja in vlažnosti na modul elastičnosti in natezno trdnost radialnih desk sušenih z milejšo klimo: $u$ – povprečna lesna vlažnost; $E$ – modul elastičnosti; $\sigma$ – natezna trdnost.....	26
Preglednica 12	Vpliv časa sušenja in vlažnosti na modul elastičnosti in natezno trdnost tangencialnih desk sušenih z milejšo klimo: $u$ – povprečna lesna vlažnost; $E$ – modul elastičnosti; $\sigma$ – natezna trdnost.....	27

## KAZALO SLIK

Slika 1	Nomogram ravnovesne vlažnosti lesa v odvisnosti od temperature in relativne zračne vlažnosti (Gorišek 2005). .....	2
Slika 2	Shemeatski prikaz pretoka vode v lesu (Gorišek 2005). .....	3
Slika 3	Program sušenja z ostrejšo klimo. $T_s$ = temperatura suhega termometra ( $^{\circ}\text{C}$ ); UGL = ravnovesna vlažnost lesa (%); $u$ = vlažnost lesa (%); $T_v$ = vlažna temperatura vlažnega termometra ( $^{\circ}\text{C}$ ). .....	9
Slika 4	Program sušenja z milejšo klimo. $T_s$ = temperatura suhega termometra ( $^{\circ}\text{C}$ ); UGL = ravnovesna vlažnost lesa (%); $u$ = vlažnost lesa (%); $T_v$ = vlažna temperatura vlažnega termometra ( $^{\circ}\text{C}$ ). .....	9
Slika 5	Postopek odvzema in izdelave vzorcev za določanje vlažnostnega gradienta, zaskorjenja in mehanskih lastnosti. ....	10
Slika 6	Skica princip izvedbe upogibnega testa.....	11
Slika 7	Skica izvedbe nateznega testa.....	11
Slika 8	Slika naprave za merjenje loka .....	12
Slika 9	Sušilna krivulja in vlažnostni gradient za radialne deske sušene z ostrejšim postopkom sušenja. $V_s$ = vlažnost sredine; $V_p$ = vlažnost površine; $P_v$ = povprečna vlažnost; $V_g$ = vlažnostni gradient. ....	13
Slika 10	Sušilna krivulja in vlažnostni gradient za tangencialne deske sušene z ostrejšim postopkom sušenja. $V_s$ = vlažnost sredine; $V_p$ = vlažnost površine; $P_v$ = povprečna vlažnost; $V_g$ = vlažnostni gradient. ....	14
Slika 11	Sušilna krivulja in vlažnostni gradient za radialne deske sušene z blažjim postopkom sušenja. $V_s$ = vlažnost sredine; $V_p$ = vlažnost površine; $P_v$ = povprečna vlažnost; $V_g$ = vlažnostni gradient. ....	14
Slika 12	Sušilna krivulja in vlažnostni gradient za tangencialne deske sušene z blažjim postopkom sušenja. $V_s$ = vlažnost sredine; $V_p$ = vlažnost površine; $P_v$ = povprečna vlažnost; $V_g$ = vlažnostni gradient. ....	15
Slika 13	Vlažnostni profil radialnih desk v posameznih fazah sušenja z ostrejšim postopkom sušenja. SLOJ 1 - prva, zgornja lamela; SLOJ 2 - druga lamela; SLOJ 3 - sredinska lamela; SLOJ 4 - četrta lamela; SLOJ 5 - peta, spodnja lamela.....	19

Slika 14	Vlažnostni profil tangencialnih desk v posameznih fazah sušenja z ostrejšim postopkom sušenja. SLOJ 1 - prva, zgornja lamela; SLOJ 2 - druga lamela; SLOJ 3 - sredinska lamela; SLOJ 4 - četrta lamela; SLOJ 5 - peta, spodnja lamela.....	19
Slika 15	Vlažnostni profil radialnih desk v posameznih fazah sušenja z milejšim postopkom sušenja. SLOJ 1 - prva, zgornja lamela; SLOJ 2 - druga lamela; SLOJ 3 - sredinska lamela; SLOJ 4 - četrta lamela; SLOJ 5 - peta, spodnja lamela.....	20
Slika 16	Vlažnostni profil tangencialnih desk v posameznih fazah sušenja z milejšim postopkom sušenja. SLOJ 1 - prva, zgornja lamela; SLOJ 2 - druga lamela; SLOJ 3 - sredinska lamela; SLOJ 4 - četrta lamela; SLOJ 5 - peta, spodnja lamela.....	20
Slika 17	Deflekcija radialnih desk sušenih z ostrejšo klimo v odvisnosti od lesne vlažnosti. $f_{zg}$ – deflekcija zgornjega sloja; $f_{sr}$ – deflekcija srednjega sloja; $f_{sp}$ – deflekcija spodnjega sloja. ....	28
Slika 18	Deflekcija tangencialnih desk sušenih z ostrejšo klimo v odvisnosti od lesne vlažnosti. $f_{zg}$ – deflekcija zgornjega sloja; $f_{sr}$ – deflekcija srednjega sloja; $f_{sp}$ – deflekcija spodnjega sloja. ....	29
Slika 19	Deflekcija radialnih desk sušenih z milejšo klimo v odvisnosti od lesne vlažnosti. $f_{zg}$ – deflekcija zgornjega sloja; $f_{sr}$ – deflekcija srednjega sloja; $f_{sp}$ – deflekcija spodnjega sloja. ....	30
Slika 20	Deflekcija tangencialnih desk sušenih z milejšo klimo v odvisnosti od lesne vlažnosti. $f_{zg}$ – deflekcija zgornjega sloja; $f_{sr}$ – deflekcija srednjega sloja; $f_{sp}$ – deflekcija spodnjega sloja. ....	30
Slika 21	Modul elastičnosti iz upogibnega testa bukovine pri sušenju z ostrejšo klimo v odvisnosti od vlažnosti. Enot rad – modul elastičnosti notranjega sloja radialnih desk; Enot tan - modul elastičnosti notranjega sloja tangencialnih desk; Ezu rad - modul elastičnosti zunanjih slojev radialnih desk; Ezu tan - modul elastičnosti zunanjih slojev tangencialnih desk. ....	32
Slika 22	Modul elastičnosti iz upogibnega testa bukovine pri sušenju z milejšo klimo v odvisnosti od vlažnosti. Enot rad – modul elastičnosti notranjega sloja radialnih desk; Enot tan - modul elastičnosti notranjega sloja tangencialnih desk; Ezu rad	

	- modul elastičnosti zunanjih slojev radialnih desk; $E_{zu\ tan}$ - modul elastičnosti zunanjih slojev tangencialnih desk. ....	32
Slika 23	Modul elastičnosti bukovine iz nateznega testa pri sušenju z ostrejšo klimo v odvisnosti od vlažnosti. $E_{rad}$ – modul elastičnosti radialnih desk; $E_{tan}$ - modul elastičnosti tangencialnih desk. ....	33
Slika 24	Modul elastičnosti bukovine iz nateznega testa pri sušenju z milejšo klimo v odvisnosti od vlažnosti. $E_{rad}$ – modul elastičnosti radialnih desk; $E_{tan}$ - modul elastičnosti tangencialnih desk. ....	33
Slika 25	Upogibna trdnost bukovine sušene z ostrejšim režimom v odvisnosti od vlažnosti. $\sigma_{not\ rad}$ – upogibna trdnost notranjih slojev radialnih desk; $\sigma_{not\ tan}$ - upogibna trdnost notranjih slojev tangencialnih desk; $\sigma_{zu\ rad}$ - upogibna trdnost zunanjih slojev radialnih desk; $\sigma_{zu\ tan}$ - upogibna trdnost zunanjih slojev tangencialnih desk. ....	34
Slika 26	Upogibna trdnost bukovine sušene z milejšim režimom v odvisnosti od vlažnosti. $\sigma_{not\ rad}$ – upogibna trdnost notranjih slojev radialnih desk; $\sigma_{not\ tan}$ - upogibna trdnost notranjih slojev tangencialnih desk; $\sigma_{zu\ rad}$ - upogibna trdnost zunanjih slojev radialnih desk; $\sigma_{zu\ tan}$ - upogibna trdnost zunanjih slojev tangencialnih desk. ....	35
Slika 27	Natezna trdnost bukovine sušene z ostrejšim režimom v odvisnosti od vlažnosti. $\sigma_{rad}$ – natezna trdnost radialnih desk; $\sigma_{tan}$ - natezna trdnost tangencialnih desk. ....	36
Slika 28	Natezna trdnost bukovine sušene z milejšim režimom v odvisnosti od vlažnosti. $\sigma_{rad}$ – natezna trdnost radialnih desk; $\sigma_{tan}$ - natezna trdnost tangencialnih desk. ....	36

# 1 UVOD

## 1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Sušenje je med najdaljšimi obdelovalnimi in predelovalnim postopki v lesni industriji. S povečano ostrino in temperaturo sušenja želimo ta čas skrajšati, hkrati pa ohraniti zadovoljivo kakovost osušenega lesa. Zaradi velikega dimenzijskega delovanja bukovine, se med sušilnim postopkom pojavijo intenzivna veženja, po prerezu lesa pa velike sušilne napetosti, ki se na osušenem lesu lahko izrazijo celo kot sataste razpoke. Vendar pa tudi preostale sušilne napetosti (zaskoritev) predstavljajo težave v nadaljnjih predelovalnih postopkih.

Intenzivnosti sušenja, ki jo določata temperatura in ostrina sušenja, ima bistven učinek na pojav veženj in sušilnih napetosti na posameznih intervalih sušenja. Glede na kinetiko sušenja se zaskorjenje različno odraža v posameznih območjih vlažnosti, zato tudi kritične razmere niso vezane le na območje nasičenih celičnih sten. Predlaganje optimalnih sušilnih programov moramo zato izvajati v vseh fazah sušilnega postopka.

## 1.2 DELOVNE HIPOTEZE

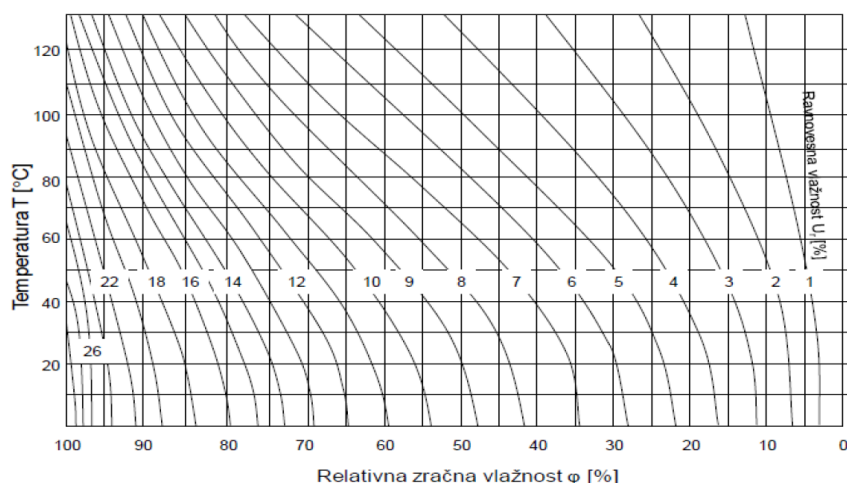
Kinetika sušenja določa kakovost osušenega lesa. Predpostavljamo, da lahko s primerno izbiro sušilnih parametrov in njihovim spreminjanjem zagotovimo ustrezno kakovost osušenega lesa tudi ob doseganju zadovoljivih časov sušenja. Spreminjajoče klimatske razmere naj bi pripomogle tudi k relaksaciji sušilnih napetosti po prerezu lesa.

Na primeru bukovine (*Fagus sylvatica* L.), kot najpomembnejšega domačega listavca smo preučevali vpliv ostrine sušenja, kot jo določata temperatura in relativna vlažnost na pojav deformacij, razpok in zaskorjenja v različnih intervalih sušenja. S spremljanjem spremembe vlažnosti lesa smo formirali sušilno krivuljo in diagram, vzporedno pa smo merili deformacije in razpoke ter s sukcesivnim odvzemanjem manjših vzorcev kontrolirali tudi kakovost sušenja z določanjem vlažnostnega gradienta in zaskorjenosti.

## 2 PREGLED LITERATURE

### 2.1 VODA V LESU

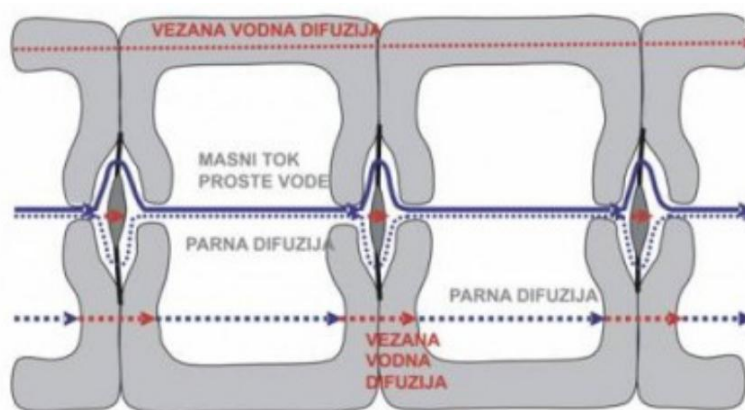
Vsebnost vode v svežem posekanem lesu je zelo različna. Vlažnost lesa v svežem stanju lahko znaša 200 % ali pa le 40 %. Vlažnost lesa v svežem stanju je odvisna od drevesne vrste in tudi od oddaljenosti kambija od mesta merjenja. Les navadno sušimo do ravnovesne vlažnosti, ki pa je odvisna od mesta uporabe lesa. V vlažnih okoljih je ravnovesna vlažnost lesa okoli 20 %, v bolj suhih okoljih pa 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 okolice (Sl. 1). Pri temperaturi 20 °C in relativni zračni vlažnosti 60 %, kar razumemo kot normalno klimo, zanaša ravnovesna vlažnost lesa približno 11 %.



Slika 1 Nomogram ravnovesne vlažnosti 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 ter medsebojnih pikenjskih odprtin, difuzijski tok pa poteka po celičnih stenah in skozi celične lumne (Sl. 2). Vezana voda se veže na proste hidroksilne skupine celuloze in hemiceluloze ali pa v mikro razpokah celične stene. 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 Shemeatski prikaz pretoka vode v lesu (Gorišek 2005).

### 2.1.1 Distribucija vode v lesu

Za natančno načrtovanje procesa je potrebno poznati distribucijo vode v svežem lesu ali radialni vlažnostni profil. V praksi se vse več materiala suši takoj po poseku, zato je za optimalno vodenje sušilnega postopka nujno poznavanje vlažnostnega profila. 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 topolu, ...) 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 lesa na površino. Notranji snovni tok 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 na površino lesa in medij za prenos izhlapele vode s površine. Čas in kakovost posušenega lesa sta v prvi fazi sušenja odvisna od hitrosti gibanja zraka in njegovega enakomernega kroženja. Nastavitev hitrosti ventilatorjev in s tem hitrost gibanja zraka mora biti prilagojena intenzivnosti izparevanja vode s površine. Če je kroženje prepočasno, se topel zrak pri prehodu skozi zložaj preveč ohladi, s tem pa se mu poveša 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 med 1,5 in 2,5 m/s, za sušenje iglavcev pa hitrosti med 3 in 4 m/s.

Spremljanje sušenja zahteva tudi nadzor klimatskih pogojev v sušilni komori. (Walker s sod., 1993; Keey s sod., 2000). Hitrost sušenja lesa v prvi fazi poleg pretoka zraka skozi zložaje, določa še relativna zračna vlažnost, oziroma psihrometrška razlika. Da zagotovimo enakomerno sušenje les v zložajih razvrstimo po drevesni vrsti, debelini, vlažnosti in po lokaciji beljave in jedrovine.

### 2.2.2 Tok vode v lesu

Čim bolje poznamo strukturo lesa, tem bolj natančno lahko sklepamo na razporeditev vode v njem. Na podlagi razporeditve vode v lesu lahko natančneje prikažemo kinetiko sušenja. Zasedimo lahko, da se pri bolj permeabilnih vrstah že na začetku sušenja vzpostavi konstantna sušilna hitrost, a se s časom na površini lahko pojavi tanek suhi sloj, ki prosti vodi preprečuje izhlapevanje. Nastali suhi sloj je posledica prehitrega sušenja, saj struktura



lesa ne dovoljuje dejanskega izpostavljenega masnega toka vode iz sredice proti 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, otiljenj in akumulaciji ekstraktivov v jedrovini. Pri iglavcih za glavni razlog navajajo aspiracijo pikenj. Na splošno so lesne vrste iglavcev v prečni smeri 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 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 vlažnost povečuje difuzijski koeficient. 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. Ker se gibanje vezane vode dosega z vzpostavitev koncentracijskih razlik vodne pare, raziskave potrjujejo, da na ta proces dodatno ne moremo vplivati z dvigovanjem hitrosti ventilatorjev v sušilnih komorah, s čimer se zmanjša poraba energije. Pri tem ugotavljajo, da zniževanje hitrosti ventilatorjev bistveno ne vpliva na podaljšanje in ekonomičnosti sušilnega postopka.

### 2.3 SUŠILNE NAPETOSTI

Zvijanje (veženje) in razpoke lesnih sortimentov pripisujemo trem osnovnim vzrokom generiranja napetosti v lesnem tkivu; A/ rastne napetosti se inkorporirajo že v rastočem drevesu, med sušenjem pa se pojavijo napetosti. B/ zaradi prečne krčitvene anizotropije in C/ zaradi vlažnostnega gradienta.

Sušilne napake, kot so razpoke in zvijanje, nastanejo v glavnem zaradi sušilnih napetosti in krčitvene anizotropije. S počasnim sušenjem so tudi sušilne napetosti manjše, 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 pokaže pri nadaljnji predelavi ali uporabi. Zaskorjenje je proces razvoja sušilnih napetosti po prerezu lesa, ki se začne s sušenjem površine pod točko nasičenja celičnih sten in s tem povezanim krčenjem. Če nastale natezne napetosti v površinskih slojih prekoračijo območje elastičnosti, 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 so še: ekstenziometrijska metoda, defleksijska metoda in mnoge druge.

Na notranje napetosti, ki nastanejo med sušenjem, močno vplivajo procesni parametri sušenja, kot na primer: 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 ugotavljanje vpliva temperature in ostrine sušenja na zaskorjenje in kakovost osušenega lesa, smo izbrali les evropske bukve (*Fagus sylvatica* L.), ki je znana kot za sušenje problematična vrsta. Tekom sušenja se pogosto pojavijo nepravilnosti: lok, koritavost in usločenost, zaradi velikih skrčkov pa se med sušenjem pojavijo tudi razpoke. Veženja in razpoke vplivajo na kakovost sušenja. Cilj sušenja je, da les posušimo do želene končne vlažnosti brez zgoraj navedenih napak.

Za sušenje pod različnimi pogoji in z različnimi režimi sušenja smo izbrali vzorce bukovine, debeline 38 mm, širine 120 mm in dolžine 1 m. V vsaki sarži smo sušili 8 desk po 4 radialne in 4 tangencialne deske.

#### 3.2 METODE

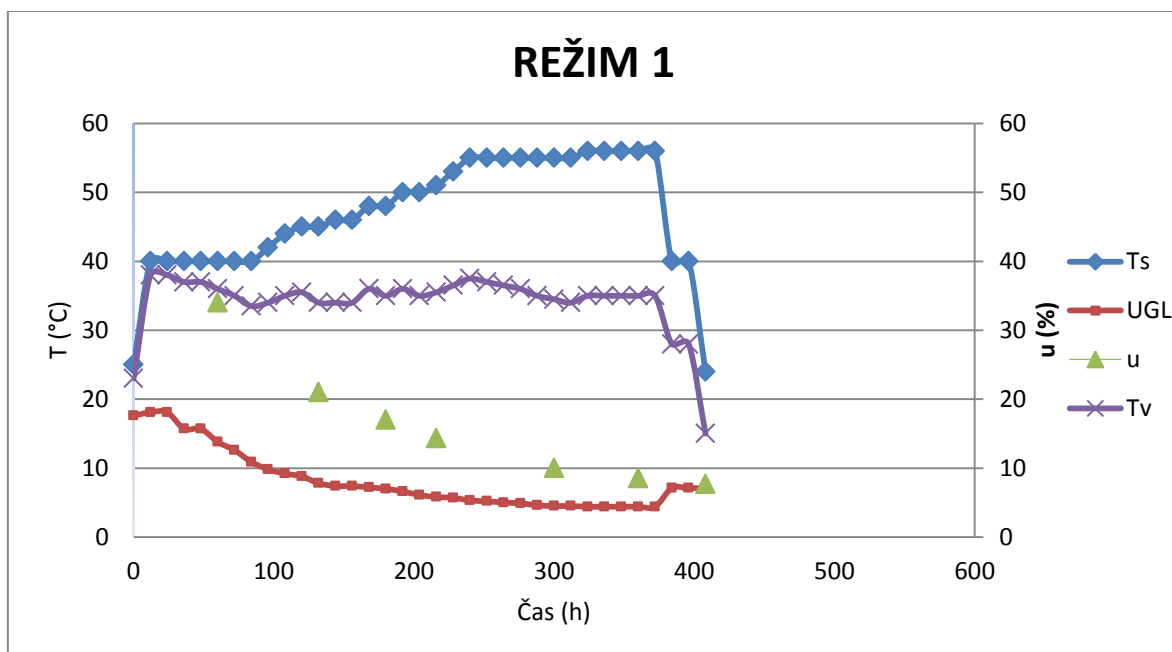
##### 3.2.1 Sušilni postopek

Sušili smo po dveh sušilnih postopkih. V prvem postopku smo pospešili hitrost sušenja z ostrejšo klimo, v drugem postopku pa smo sušili z blažjo klimo, kar je podaljšalo sam postopek sušenja.

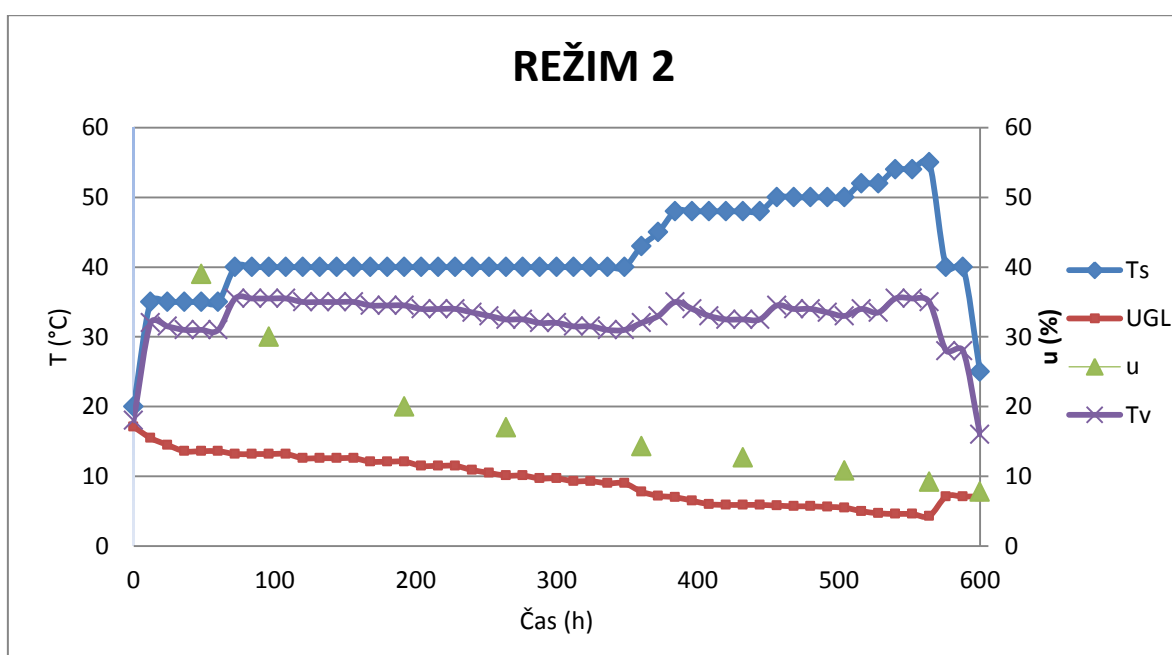
V prvem postopku (Sl. 3) smo v prvi fazi segrevali zrak do 40 °C, nato pa smo postopoma zviševali temperaturo zraka do 56 °C. Po končanem sušenju so sledile še faze izenačevanja, kondicioniranja in ohlajanja. Med sušilnim postopkom je psihrometska razlika postopoma naraščala do najvišje vrednosti 21 °C.

V drugem postopku (Sl. 4) smo v prvi fazi segrevali zrak do 35 °C, nato pa smo temperaturo zraka postopoma dvigovali do 55 °C. Temperatura zraka se je v drugem postopku dvigovala počasneje kot pa v prvem postopku. Po končanem sušenju so sledile faze izenačevanja, kondicioniranja in ohlajanja. Med sušilnim postopkom je psihrometska razlika postopoma naraščala do najvišje vrednosti 20 °C.

Kontrolo kakovosti smo izvajali tako, da smo na vsakih 50 do 70 ur odvzeli vzorce (Sl. 5) in jim določili povprečno vlažnost, zaskorjenje, upogibno in natezno trdnost.



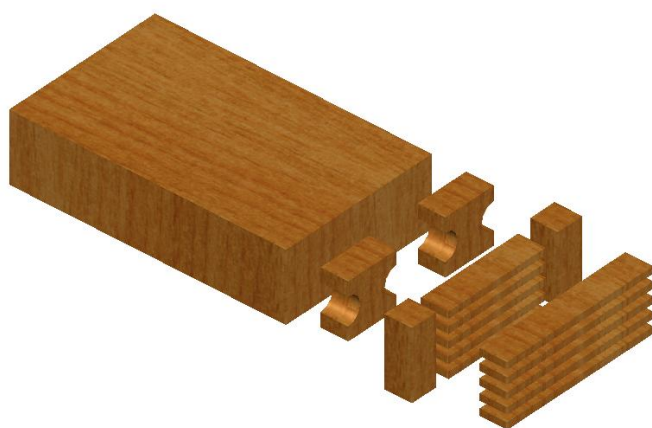
Slika 3 Program sušenja z ostrejšo klimo.  $T_s$  = temperatura suhega termometra ( $^{\circ}\text{C}$ ); UGL = ravnovesna vlažnost lesa (%);  $u$  = vlažnost lesa (%);  $T_v$  = vlažna temperatura vlažnega termometra ( $^{\circ}\text{C}$ ).



Slika 4 Program sušenja z milejšo klimo.  $T_s$  = temperatura suhega termometra ( $^{\circ}\text{C}$ ); UGL = ravnovesna vlažnost lesa (%);  $u$  = vlažnost lesa (%);  $T_v$  = vlažna temperatura vlažnega termometra ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### 3.2.2 Določanje vlažnosti in vlažnostnega gradienta

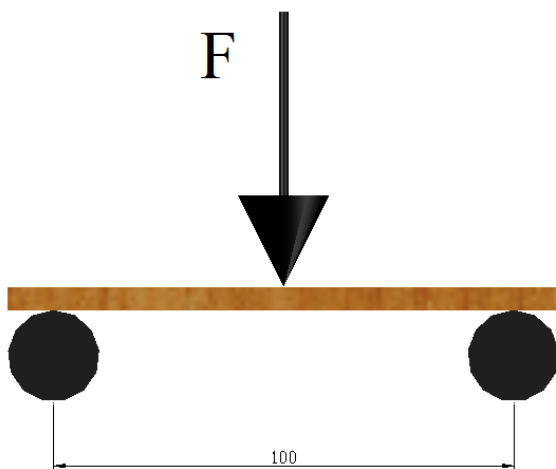
Spremembo vlažnosti lesa med sušenjem smo določali s standardno gravimetrično metodo (SIST EN 13183 – 1) z intervalnim tehtanjem preizkušancev. Vzporedno smo vlažnost lesa merili še z uporovnim merilnikom lesne vlažnosti med samim postopkom sušenja. Vlažnost smo določali tako, da smo iz desk izžagali vzorce širine 20 mm, ki smo jim na vsakem koncu odžagali bočni del zaradi izločitve robnega učinka. Srednji del preizkušancev pa smo razrezali na pet enako debelih rezin, ki smo jih tehtali (Sl. 5).



Slika 5 Postopek odvzema in izdelave vzorcev za določanje vlažnostnega gradienta, zaskorjenja in mehanskih lastnosti.

### 3.2.3 Upogibni test

Modul elastičnosti in upogibne trdnosti površinskih in notranjih slojev smo določali po nekoliko spremenjeni standardni metodi (SIST EN 408). Merjenje upogibne trdnosti smo izvajali na univerzalnem stroju (Zwick Roell Z005). Pri vsakem vzorčenju smo odžagali dva vzorca debeline 20 mm, ki smo ju prečno razslojili na tri lamele debeline približno 6 mm. Prve tri lamele smo testirali tako, da je bila pri upogibnem testu stran, ki je bila bližje površini obremenjena na nateg, notranjost pa na tlak. Druge tri lamele pa smo testirali tako, da je bila stran, ki je bila bližje površini, obremenjena na tlak, notranjost pa na nateg (Sl. 6). Povprečno vrednost upogibne trdnosti smo dobili z aritmetično sredino prve in druge meritve.



Slika 6 Skica princip izvedbe upogibnega testa

### 3.2.4 Natezni test

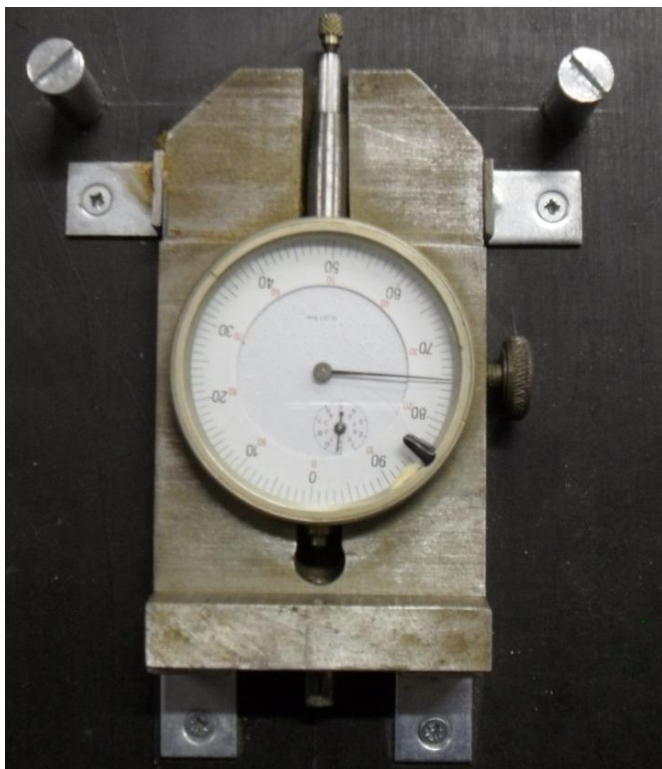
Natezno trdnost smo določali po nekoliko spremenjeni metodi, ki jo predpisuje standard (SIST EN 408) saj smo se predpisanim dimenzijam prečnega prereza (20 mm × 20 mm (Sl. 7)) čim bolj približali. Iz vsake deske smo izžagali po dva vzorca, s tem pa smo se izognili možnim napakam in odstopanjem. Na vzorcih smo naredili utora na levi in desni strani vzorca, ki sta služila kot prijemalo za trgalni stroj.



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 loka lamele (Sl. 8). Lok smo merili z merilno uro, z natančnostjo 0,01 mm. Z rezultati dobljenih meritev smo ocenili stopnjo zaskorjenja pri posameznih deskah v določenih fazah sušenja (SIST ENV 14464).



Slika 8 Slika naprave za merjenje loka



## 4 REZULTATI

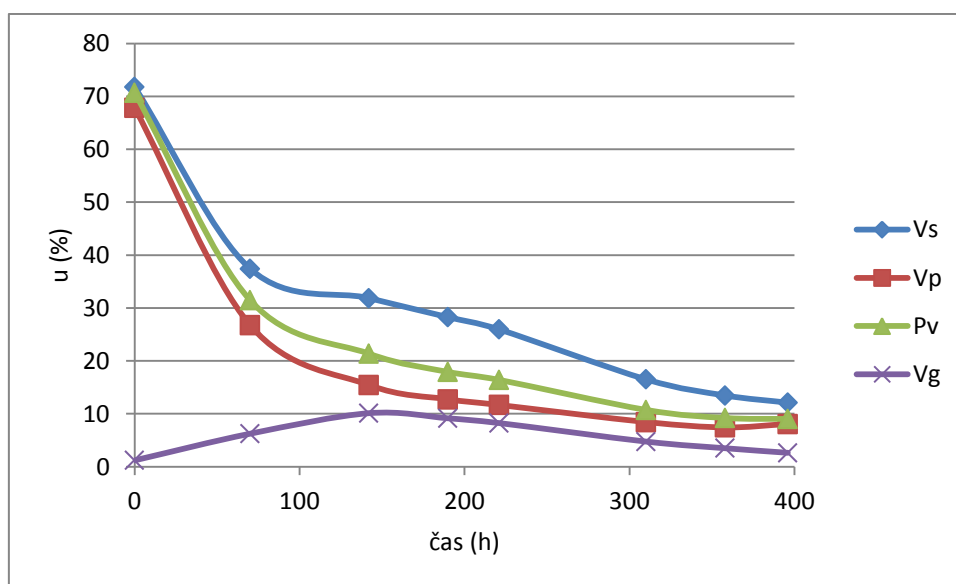
### 4.1 KINETIKA SUŠENJA

Oba postopka sušenja sta potekala po predvidenem planu (Sl. 3 in Sl. 4).

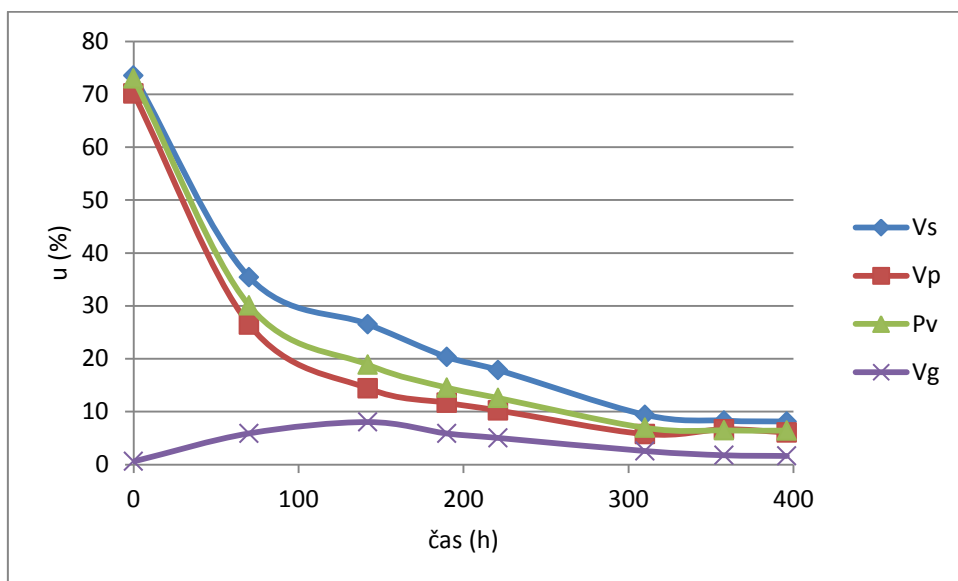
Prvo sušenje bukovine z ostrejšim programom sušenja je potekalo 396 ur. Les se je osušil do točke nasičenja po približno 80 urah, do končne vlažnosti se je sušil še dobrih 300 ur (Sl. 9 in Sl. 10).

Drugo sušenje z milejšim programom sušenja pa je potekalo dalj časa, in sicer 608 ur. Les se je osušil do točke nasičenja v približno 100 urah, do končne vlažnosti pa smo potrebovali še 500 ur (Sl. 11 in Sl. 12).

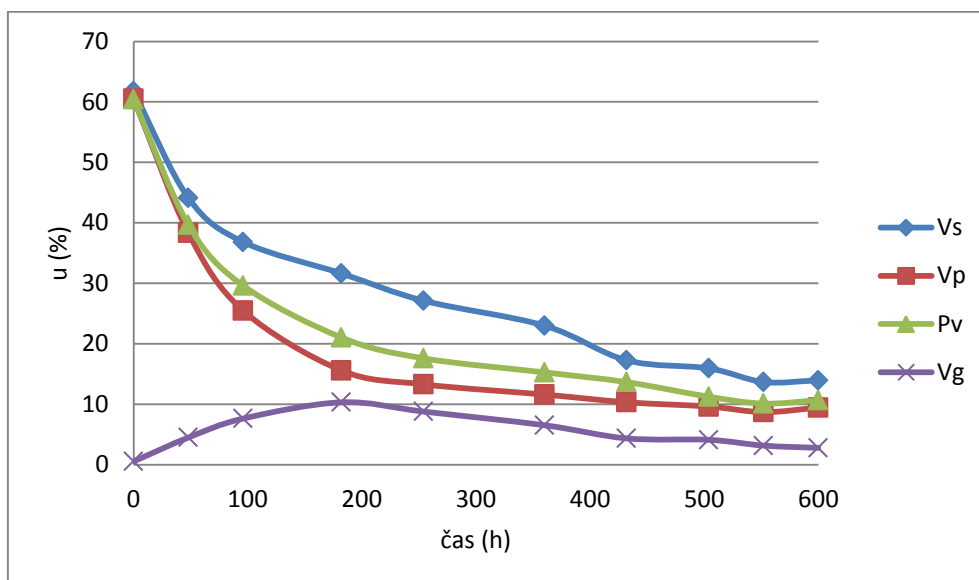
V vseh primerih se je površina sušila hitreje kot pa notranjost desk, saj je tok vode iz notranjosti lesa proti površini počasnejši, kot pa izhlapevanje vode s površine. Les tangencialne usmeritve se je sušil hitreje od radialno usmerjenega lesa, radialno usmerjen les pa je imel tudi višji vlažnostni gradient (Sl. 9, Sl. 10, Sl. 11, Sl. 12). Voda iz radialno usmerjenega lesa izhaja počasneje zaradi slabše pikenjske povezave, bolj pa iz tangencialno usmerjenega lesa, kjer voda izhaja skozi dokaj obilno trakovno tkivo.



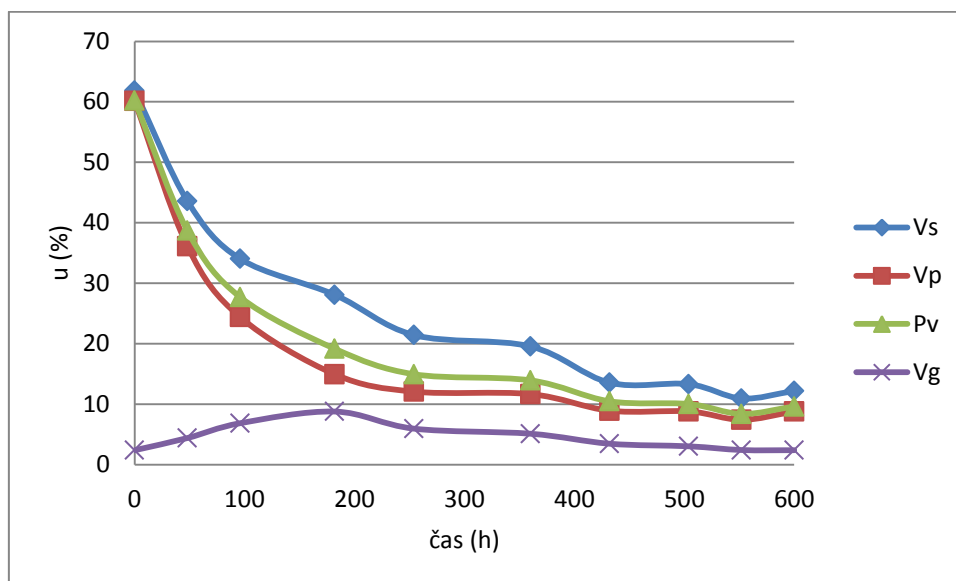
Slika 9 Sušilna krivulja in vlažnostni gradient za radialne deske sušene z ostrejšim postopkom sušenja. Vs = vlažnost sredine; Vp = vlažnost površine; Pv = povprečna vlažnost; Vg = vlažnostni gradient.



Slika 10 Sušilna krivulja in vlažnostni gradient za tangencialne deske sušene z ostrejšim postopkom sušenja. Vs = vlažnost sredine; Vp = vlažnost površine; Pv = povprečna vlažnost; Vg = vlažnostni gradient.



Slika 11 Sušilna krivulja in vlažnostni gradient za radialne deske sušene z blažjim postopkom sušenja. Vs = vlažnost sredine; Vp = vlažnost površine; Pv = povprečna vlažnost; Vg = vlažnostni gradient.



Slika 12 Sušilna krivulja in vlažnostni gradient za tangencialne deske sušene z blažjim postopkom sušenja. Vs = vlažnost sredine; Vp = vlažnost površine; Pv = povprečna vlažnost; Vg = vlažnostni gradient.

#### 4.2 VLAŽNOSTNI GRADIENT

Padec vlažnosti desk je bolj postopen pri deskah, ki so bile sušene z milejšim režimom sušenja (pregl. 3 in pregl. 4), kot pa pri deskah sušenih z ostrejšim režimom sušenja (pregl. 1 in pregl. 2). Razlika med vlažnostjo zunanjih in notranjih slojev je malenkost večja pri postopku z ostrejšim režimom sušenja, kot pa pri postopku z milejšim režimom sušenja. Pri obeh postopkih sušenja so se tangencialne deske sušile bolj enakomerno, kot pa radialne deske.

Največji vlažnostni gradient smo izmerili po 182 urah sušenja pri radialnih deskah, sušenih z milejšim režimom sušenja (pregl. 3). Znašal je 13,6 %/cm. V tej fazi sušenja je bila vlažnost srednjih slojev še nad točko nasičenja celičnih sten, vlažnost zunanjih slojev pa pod točko nasičenja celičnih sten.

Možno je, da je prišlo do napake pri odvzemanju vzorcev ali pa do napake pri sušenju, saj vlažnostni gradient po 182 urah pri radialnih deskah, sušenih z milejšim režimom izstopa in je proti pričakovanjem v primerjavi z drugimi vzorci.

Preglednica 1 Povprečna vlažnost (u), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in lok lamele pri testiranju zaskorjenja (f) v odvisnosti od časa sušenja radialnih desk sušenih z ostrejšim režimom sušenja.

čas (h)		u (%)	$\Delta u/\Delta x$ (%/cm)	f (mm)
0	<b>Xpovp.</b>	<b>70,7</b>	<b>1,81</b>	<b>0,69</b>
	st. dev.	1,56	1,989	0,060
70	<b>Xpovp.</b>	<b>31,5</b>	<b>8,33</b>	<b>0,79</b>
	st. dev.	0,82	2,894	0,295
142	<b>Xpovp.</b>	<b>21,4</b>	<b>13,31</b>	<b>0,81</b>
	st. dev.	0,55	3,484	0,341
190	<b>Xpovp.</b>	<b>17,9</b>	<b>11,00</b>	<b>1,63</b>
	st. dev.	0,91	2,265	0,532
221	<b>Xpovp.</b>	<b>16,4</b>	<b>10,29</b>	<b>0,99</b>
	st. dev.	0,92	2,330	0,400
310	<b>Xpovp.</b>	<b>10,7</b>	<b>5,81</b>	<b>1,17</b>
	st. dev.	0,58	1,245	0,578
358	<b>Xpovp.</b>	<b>9,2</b>	<b>4,49</b>	<b>1,28</b>
	st. dev.	0,63	1,109	0,762
396	<b>Xpovp.</b>	<b>9,0</b>	<b>3,44</b>	<b>1,33</b>
	st. dev.	0,49	0,948	0,627

Preglednica 2 Povprečna vlažnost (u), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in lok lamele pri testiranju zaskorjenja (f) v odvisnosti od časa sušenja tangencialnih desk sušenih z ostrejšim režimom sušenja.

čas (h)		u (%)	$\Delta u/\Delta x$ (%/cm)	f (mm)
0	<b>Xpovp.</b>	<b>73,0</b>	<b>0,77</b>	<b>1,02</b>
	st. dev.	5,38	3,508	0,141
70	<b>Xpovp.</b>	<b>30,1</b>	<b>8,24</b>	<b>1,62</b>
	st. dev.	1,81	2,541	1,198
142	<b>Xpovp.</b>	<b>18,9</b>	<b>10,64</b>	<b>1,65</b>
	st. dev.	2,09	2,987	0,980
190	<b>Xpovp.</b>	<b>14,5</b>	<b>7,15</b>	<b>1,51</b>
	st. dev.	0,88	1,770	0,901
221	<b>Xpovp.</b>	<b>12,6</b>	<b>6,04</b>	<b>1,35</b>
	st. dev.	1,35	1,488	0,869
310	<b>Xpovp.</b>	<b>6,9</b>	<b>3,22</b>	<b>1,28</b>
	st. dev.	0,60	0,752	0,987
358	<b>Xpovp.</b>	<b>6,4</b>	<b>2,20</b>	<b>1,41</b>
	st. dev.	1,29	1,497	0,755
396	<b>Xpovp.</b>	<b>6,4</b>	<b>1,57</b>	<b>1,98</b>
	st. dev.	0,41	0,789	1,435

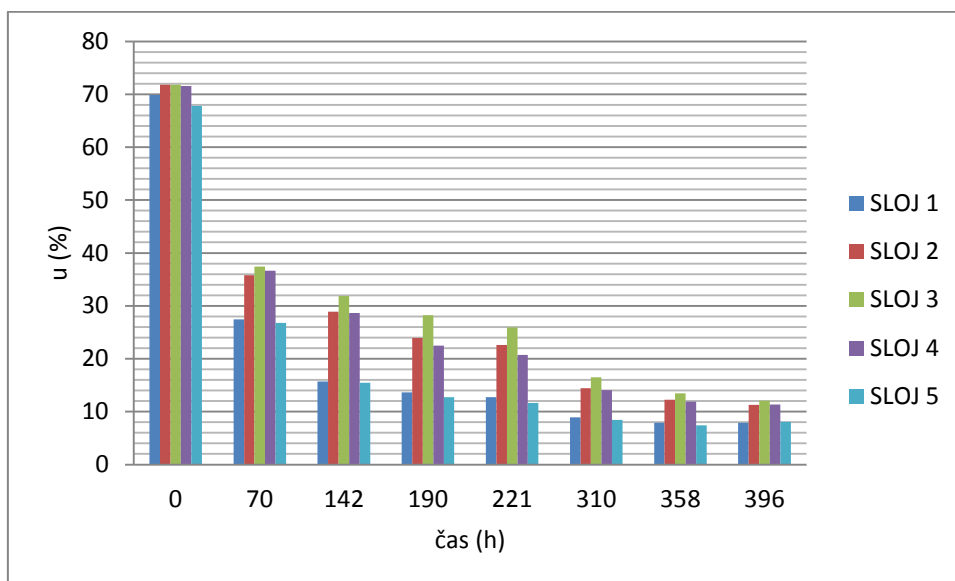
Preglednica 3 Povprečna vlažnost ( $u$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in lok lamele pri testiranju zaskorjenja ( $f$ ) v odvisnosti od časa sušenja radialnih desk sušenih z milejšim režimom sušenja.

čas (h)		$u$ (%)	$\Delta u/\Delta x$ (%/cm)	$f$ (mm)
0	<b>Xpovp.</b>	<b>60,4</b>	<b>0,87</b>	<b>0,14</b>
	st. dev.	9,88	1,792	0,055
48	<b>Xpovp.</b>	<b>39,6</b>	<b>5,96</b>	<b>0,24</b>
	st. dev.	1,10	2,061	0,138
96	<b>Xpovp.</b>	<b>29,6</b>	<b>10,61</b>	<b>0,88</b>
	st. dev.	1,43	3,506	0,762
182	<b>Xpovp.</b>	<b>21,0</b>	<b>13,58</b>	<b>1,14</b>
	st. dev.	1,23	4,190	0,840
254	<b>Xpovp.</b>	<b>17,6</b>	<b>10,48</b>	<b>1,16</b>
	st. dev.	1,64	2,824	0,885
360	<b>Xpovp.</b>	<b>15,3</b>	<b>8,15</b>	<b>0,76</b>
	st. dev.	1,35	2,491	0,523
432	<b>Xpovp.</b>	<b>13,6</b>	<b>5,21</b>	<b>0,86</b>
	st. dev.	3,03	1,146	0,509
504	<b>Xpovp.</b>	<b>11,2</b>	<b>5,06</b>	<b>0,92</b>
	st. dev.	1,11	1,475	0,566
552	<b>Xpovp.</b>	<b>10,1</b>	<b>4,09</b>	<b>1,07</b>
	st. dev.	1,55	1,302	0,688
600	<b>Xpovp.</b>	<b>10,6</b>	<b>3,61</b>	<b>1,1</b>
	st. dev.	1,36	1,153	0,759

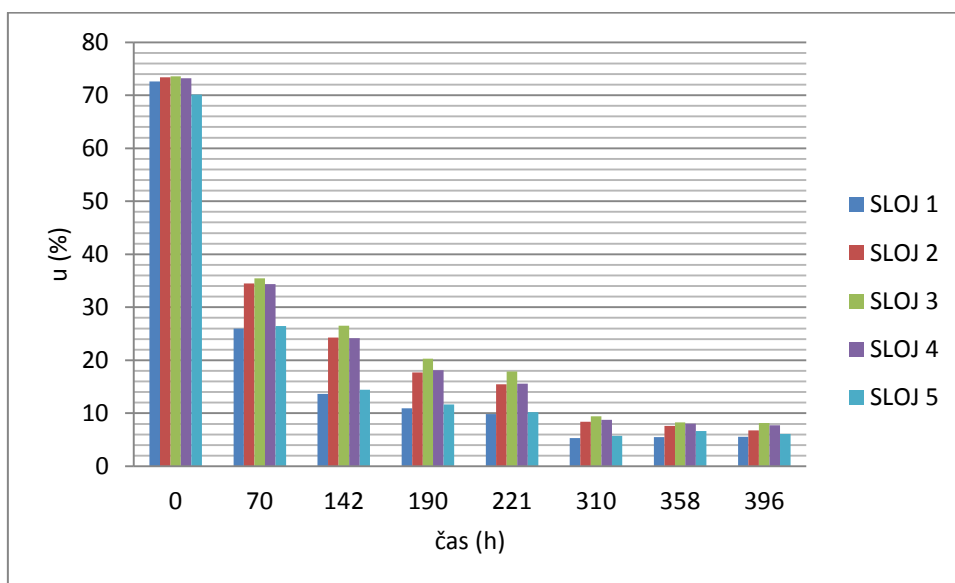
Preglednica 4 Povprečna vlažnost ( $u$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in lok lamele pri testiranju zaskorjenja ( $f$ ) v odvisnosti od časa sušenja tangencialnih desk sušenih z milejšim režimom sušenja.

čas (h)		$u$ (%)	$\Delta u/\Delta x$ (%/cm)	$f$ (mm)
0	<b>Xpovp.</b>	<b>60,2</b>	<b>2,76</b>	<b>0,06</b>
	st. dev.	6,73	2,215	0,160
48	<b>Xpovp.</b>	<b>38,7</b>	<b>5,77</b>	<b>0,18</b>
	st. dev.	2,29	1,699	0,308
96	<b>Xpovp.</b>	<b>27,7</b>	<b>9,37</b>	<b>0,66</b>
	st. dev.	1,72	2,891	0,939
182	<b>Xpovp.</b>	<b>19,2</b>	<b>11,44</b>	<b>0,90</b>
	st. dev.	1,30	3,056	1,195
254	<b>Xpovp.</b>	<b>14,9</b>	<b>7,20</b>	<b>0,91</b>
	st. dev.	2,02	2,533	1,279
360	<b>Xpovp.</b>	<b>13,9</b>	<b>6,15</b>	<b>0,97</b>
	st. dev.	0,95	1,505	1,316
432	<b>Xpovp.</b>	<b>10,5</b>	<b>4,52</b>	<b>0,71</b>
	st. dev.	1,28	1,576	1,187
504	<b>Xpovp.</b>	<b>10,0</b>	<b>3,91</b>	<b>0,77</b>
	st. dev.	0,94	1,092	1,141
552	<b>Xpovp.</b>	<b>8,4</b>	<b>3,11</b>	<b>0,95</b>
	st. dev.	0,85	0,833	1,323
600	<b>Xpovp.</b>	<b>9,6</b>	<b>3,00</b>	<b>0,80</b>
	st. dev.	0,54	0,759	1,251

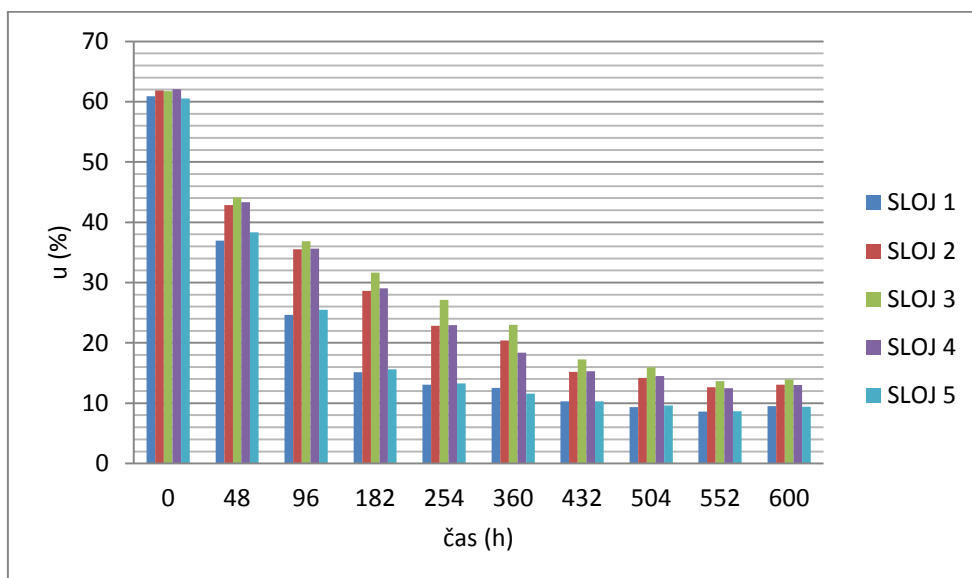
Razlika med vlažnostjo zunanjih in notranjih slojev je podobna tako pri sušenju z ostrejšo klimo (Sl. 13, Sl. 14), kot pri sušenju z milejšo klimo (Sl. 15, Sl. 16). Tangencialne deske so se v obeh primerih (Sl. 14, Sl. 16) sušile bolj enakomerno kot radialne deske (Sl. 13, Sl. 15).



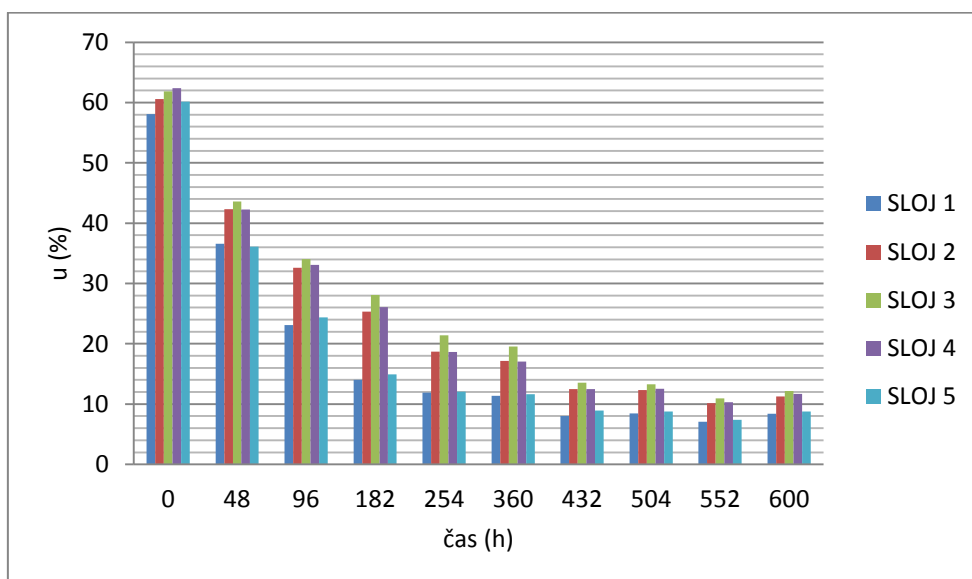
Slika 13 Vlažnostni profil radialnih desk v posameznih fazah sušenja z ostrejšim postopkom sušenja. SLOJ 1 - prva, zgornja lamela; SLOJ 2 - druga lamela; SLOJ 3 - sredinska lamela; SLOJ 4 - četrta lamela; SLOJ 5 - peta, spodnja lamela.



Slika 14 Vlažnostni profil tangencialnih desk v posameznih fazah sušenja z ostrejšim postopkom sušenja. SLOJ 1 - prva, zgornja lamela; SLOJ 2 - druga lamela; SLOJ 3 - sredinska lamela; SLOJ 4 - četrta lamela; SLOJ 5 - peta, spodnja lamela.



Slika 15 Vlažnostni profil radialnih desk v posameznih fazah sušenja z milejšim postopkom sušenja. SLOJ 1 - prva, zgornja lamela; SLOJ 2 - druga lamela; SLOJ 3 - sredinska lamela; SLOJ 4 - četrta lamela; SLOJ 5 - peta, spodnja lamela.



Slika 16 Vlažnostni profil tangencialnih desk v posameznih fazah sušenja z milejšim postopkom sušenja. SLOJ 1 - prva, zgornja lamela; SLOJ 2 - druga lamela; SLOJ 3 - sredinska lamela; SLOJ 4 - četrta lamela; SLOJ 5 - peta, spodnja lamela.



#### 4.3 VPLIV SUŠILNEGA POSTOPKA NA NEKATERE MEHANSKE LASTNOSTI LESA

Les je imel pričakovano pri nižjih vlažnostih večinoma boljše mehanske lastnosti, kot pa pri višjih vlažnostih (pregl. 5, pregl. 6, pregl. 7, pregl. 8). Radialne deske sušene z milejšim režimom sušenja so imele boljše mehanske lastnosti, kot tangencialne deske, sušene z milejšim režimom sušenja. Radialne deske sušene z milejšim režimom sušenja so imele na koncu boljše mehanske lastnosti, kot radialne deske, sušene z ostrejšim režimom. Tangencialne deske sušene z milejšim režimom so imele boljše mehanske lastnosti, kot tangencialne deske, sušene z ostrejšim režimom sušenja.

Deske sušene z milejšim režimom sušenja so imele na splošno boljše mehanske lastnosti, kot pa deske sušene z ostrejšim režimom sušenja, ker je les manj zaskorjen in je posledično manj poškodb v lesu.

Pri radialnih deskah, sušenih z ostrejšim režimom so imeli zunanji sloji deske nekoliko boljše mehanske lastnosti, kot notranji sloj. Pri tangencialnih deskah, sušenih z ostrejšo klimo so imeli srednji sloj na koncu boljše mehanske lastnosti kot pa zunanji sloji.

Pri radialnih deskah, sušenih z milejšim režimom si imeli zunanji sloji nekoliko boljše mehanske lastnosti, kot notranji sloj. Tudi pri tangencialnih deskah sušenih z milejšim režimom, so imeli zunanji sloji nekoliko boljše mehanske lastnosti kot notranji sloj.

Notranji sloji lesa pri obeh načinih so imeli slabše mehanske lastnosti, kar lahko pripišemo zaskorjenju in krčitveni anizotropiji, ki je prisotna ob sušenju.

Modul elastičnosti je bil višji pri deskah sušenih z ostrejšim režimom kot pri deskah sušenih z milejšim režimom.

Preglednica 5 Vpliv časa sušenja in vlažnosti na modul elastičnosti in upogibno trdnost radialnih desk sušenih z ostrejšo klimo:  $u$  – povprečna lesna vlažnost;  $E_{not}$ ,  $E_{zu}$  – modul elastičnosti notranjega in zunanega sloja;  $\sigma$  – upogibna trdnost notranjega in zunanega sloja.

čas (h)		$u$ (%)	$E_{not}$ (MPa)	$E_{zu}$ (MPa)	$\sigma_{not}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{zu}$ (N/mm <sup>2</sup> )
0	<b>Xpovp.</b>	<b>70,7</b>	<b>916,3</b>	<b>815,3</b>	<b>13,8</b>	<b>13,1</b>
	st. dev.	1,56	78,79	60,66	0,98	1,23
70	<b>Xpovp.</b>	<b>31,5</b>	<b>845,4</b>	<b>901,8</b>	<b>14,3</b>	<b>15,2</b>
	st. dev.	0,82	43,02	91,55	0,67	1,43
142	<b>Xpovp.</b>	<b>21,4</b>	<b>905,1</b>	<b>1251,3</b>	<b>15,1</b>	<b>19,8</b>
	st. dev.	0,55	51,05	80,81	0,96	1,67
190	<b>Xpovp.</b>	<b>17,9</b>	<b>853,0</b>	<b>1181,9</b>	<b>13,7</b>	<b>18,2</b>
	st. dev.	0,91	57,00	141,30	1,05	1,42
221	<b>Xpovp.</b>	<b>16,4</b>	<b>861,3</b>	<b>1265,6</b>	<b>14,1</b>	<b>19,6</b>
	st. dev.	0,92	115,83	182,59	1,08	2,73
310	<b>Xpovp.</b>	<b>10,7</b>	<b>1135,0</b>	<b>1401,5</b>	<b>15,4</b>	<b>20,7</b>
	st. dev.	0,58	41,75	141,20	1,10	1,84
358	<b>Xpovp.</b>	<b>9,2</b>	<b>1401,3</b>	<b>1581,4</b>	<b>17,4</b>	<b>24,5</b>
	st. dev.	0,63	53,84	82,20	1,03	4,48
396	<b>Xpovp.</b>	<b>9,0</b>	<b>1341,3</b>	<b>1503,1</b>	<b>18,6</b>	<b>22,3</b>
	st. dev.	0,49	117,40	168,08	1,25	1,59

Preglednica 6 Vpliv časa sušenja in vlažnosti na modul elastičnosti in upogibno trdnost tangencialnih desk sušenih z ostrejšo klimo:  $u$  – povprečna lesna vlažnost;  $E_{not}$ ,  $E_{zu}$  – modul elastičnosti notranjega in zunanega sloja;  $\sigma$  – upogibna trdnost notranjega in zunanega sloja.

čas (h)		$u$ (%)	$E_{not}$ (MPa)	$E_{zu}$ (MPa)	$\sigma_{not}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{zu}$ (N/mm <sup>2</sup> )
0	<b>Xpovp.</b>	<b>73,0</b>	<b>467,5</b>	<b>411,1</b>	<b>7,6</b>	<b>7,2</b>
	st. dev.	5,38	175,21	51,66	1,89	0,90
70	<b>Xpovp.</b>	<b>30,1</b>	<b>467,6</b>	<b>389,1</b>	<b>6,9</b>	<b>7,0</b>
	st. dev.	1,81	74,37	108,44	0,86	1,51
142	<b>Xpovp.</b>	<b>18,9</b>	<b>434,3</b>	<b>542,9</b>	<b>9,0</b>	<b>9,6</b>
	st. dev.	2,09	89,91	63,08	0,87	2,67
190	<b>Xpovp.</b>	<b>14,5</b>	<b>464,5</b>	<b>266,3</b>	<b>9,1</b>	<b>4,1</b>
	st. dev.	0,88	44,22	22,27	1,00	2,55
221	<b>Xpovp.</b>	<b>12,6</b>	<b>503,0</b>	<b>566,4</b>	<b>9,7</b>	<b>10,6</b>
	st. dev.	1,35	97,52	26,39	0,86	3,03
310	<b>Xpovp.</b>	<b>6,9</b>	<b>735,8</b>	<b>387,7</b>	<b>11,2</b>	<b>5,9</b>
	st. dev.	0,60	67,40	125,32	1,74	2,00
358	<b>Xpovp.</b>	<b>6,4</b>	<b>839,8</b>	<b>748,5</b>	<b>12,5</b>	<b>14,0</b>
	st. dev.	1,29	109,06	100,07	1,05	0,65
396	<b>Xpovp.</b>	<b>6,4</b>	<b>911,3</b>	<b>386,6</b>	<b>12,6</b>	<b>6,5</b>
	st. dev.	0,41	71,66	45,31	1,13	1,02

Preglednica 7 Vpliv časa sušenja in vlažnosti na modul elastičnosti in upogibno trdnost radialnih desk sušenih z milejšo klimo:  $u$  – povprečna lesna vlažnost;  $E_{not}$ ,  $E_{zu}$  – modul elastičnosti notranjega in zunanjšega sloja;  $\sigma$  – upogibna trdnost notranjega in zunanjšega sloja.

čas (h)		$u$ (%)	$E_{not}$ (MPa)	$E_{zu}$ (MPa)	$\sigma_{not}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{zu}$ (N/mm <sup>2</sup> )
0	<b>Xpovp.</b>	<b>60,4</b>	<b>615,3</b>	<b>582,3</b>	<b>11,6</b>	<b>11,6</b>
	st. dev.	9,88	118,75	78,23	1,67	1,24
48	<b>Xpovp.</b>	<b>39,6</b>	<b>703,6</b>	<b>752,9</b>	<b>13,3</b>	<b>13,4</b>
	st. dev.	1,10	263,79	230,67	4,35	3,47
96	<b>Xpovp.</b>	<b>29,6</b>	<b>644,6</b>	<b>824,0</b>	<b>12,5</b>	<b>14,4</b>
	st. dev.	1,43	174,66	201,52	1,46	2,64
182	<b>Xpovp.</b>	<b>21,0</b>	<b>746,4</b>	<b>1187,9</b>	<b>14,7</b>	<b>21,4</b>
	st. dev.	1,23	190,11	327,83	1,96	4,22
254	<b>Xpovp.</b>	<b>17,6</b>	<b>741,6</b>	<b>1061,8</b>	<b>13,9</b>	<b>18,4</b>
	st. dev.	1,64	77,59	343,93	0,53	4,76
360	<b>Xpovp.</b>	<b>15,3</b>	<b>771,1</b>	<b>1213,1</b>	<b>15,5</b>	<b>22,9</b>
	st. dev.	1,35	142,80	367,30	1,98	4,66
432	<b>Xpovp.</b>	<b>13,6</b>	<b>949,8</b>	<b>1249,2</b>	<b>16,5</b>	<b>20,2</b>
	st. dev.	3,03	171,33	276,63	1,85	4,55
504	<b>Xpovp.</b>	<b>11,2</b>	<b>1100,8</b>	<b>1400,9</b>	<b>18,5</b>	<b>23,9</b>
	st. dev.	1,11	270,62	453,20	2,60	6,25
552	<b>Xpovp.</b>	<b>10,1</b>	<b>1196,9</b>	<b>1276,8</b>	<b>18,0</b>	<b>21,7</b>
	st. dev.	1,55	152,29	305,27	2,12	4,37
600	<b>Xpovp.</b>	<b>10,6</b>	<b>1224,9</b>	<b>1453,3</b>	<b>21,8</b>	<b>25,9</b>
	st. dev.	1,36	306,81	444,88	3,30	5,36

Preglednica 8 Vpliv časa sušenja in vlažnosti na modul elastičnosti in upogibno trdnost tangencialnih desk sušenih z milejšo klimo:  $u$  – povprečna lesna vlažnost;  $E_{not}$ ,  $E_{zu}$  – modul elastičnosti notranjega in zunanjega sloja;  $\sigma$  – upogibna trdnost notranjega in zunanjega sloja.

čas (h)		$u$ (%)	$E_{not}$ (MPa)	$E_{zu}$ (MPa)	$\sigma_{not}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{zu}$ (N/mm <sup>2</sup> )
0	<b>Xpovp.</b>	<b>60,2</b>	<b>505,6</b>	<b>419,1</b>	<b>9,5</b>	<b>8,2</b>
	st. dev.	6,73	74,93	78,24	1,06	1,54
48	<b>Xpovp.</b>	<b>38,7</b>	<b>495,5</b>	<b>555,1</b>	<b>10,1</b>	<b>9,6</b>
	st. dev.	2,29	144,26	171,70	2,32	3,19
96	<b>Xpovp.</b>	<b>27,7</b>	<b>440,8</b>	<b>558,6</b>	<b>9,9</b>	<b>11,1</b>
	st. dev.	1,72	39,14	52,06	1,04	1,23
182	<b>Xpovp.</b>	<b>19,2</b>	<b>557,1</b>	<b>853,0</b>	<b>12,1</b>	<b>16,7</b>
	st. dev.	1,30	118,14	278,58	1,96	3,80
254	<b>Xpovp.</b>	<b>14,9</b>	<b>625,6</b>	<b>881,1</b>	<b>12,7</b>	<b>16,8</b>
	st. dev.	2,02	84,89	292,92	1,16	4,73
360	<b>Xpovp.</b>	<b>13,9</b>	<b>671,4</b>	<b>883,5</b>	<b>13,9</b>	<b>17,6</b>
	st. dev.	0,95	165,53	274,85	1,63	3,40
432	<b>Xpovp.</b>	<b>10,5</b>	<b>712,6</b>	<b>859,7</b>	<b>13,1</b>	<b>16,0</b>
	st. dev.	1,28	125,06	158,92	1,42	2,65
504	<b>Xpovp.</b>	<b>10,0</b>	<b>850,6</b>	<b>1018,6</b>	<b>15,4</b>	<b>18,4</b>
	st. dev.	0,94	198,76	315,08	1,19	3,22
552	<b>Xpovp.</b>	<b>8,4</b>	<b>872,5</b>	<b>866,3</b>	<b>15,5</b>	<b>14,9</b>
	st. dev.	0,85	122,53	298,77	1,71	5,34
600	<b>Xpovp.</b>	<b>9,6</b>	<b>1001,0</b>	<b>1019,8</b>	<b>17,8</b>	<b>18,7</b>
	st. dev.	0,54	254,25	404,58	1,81	4,65

Preglednica 9 Vpliv časa sušenja in vlažnosti na modul elastičnosti in natezno trdnost radialnih desk sušenih z ostrejšo klimo: u – povprečna lesna vlažnost; E – modul elastičnosti;  $\sigma$  – natezna trdnost.

čas (h)		u (%)	E (MPa)	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )
0	<b>Xpovp.</b>	<b>70,7</b>	<b>556,1</b>	<b>3,4</b>
	st. dev.	1,56	24,21	0,17
70	<b>Xpovp.</b>	<b>31,5</b>	<b>460,9</b>	<b>2,9</b>
	st. dev.	0,82	83,70	0,86
142	<b>Xpovp.</b>	<b>21,4</b>	<b>730,5</b>	<b>3,9</b>
	st. dev.	0,55	44,82	0,18
190	<b>Xpovp.</b>	<b>17,9</b>	<b>640,6</b>	<b>3,0</b>
	st. dev.	0,91	34,15	0,12
221	<b>Xpovp.</b>	<b>16,4</b>	<b>813,6</b>	<b>4,2</b>
	st. dev.	0,92	24,42	0,20
310	<b>Xpovp.</b>	<b>10,7</b>	<b>862,1</b>	<b>4,6</b>
	st. dev.	0,58	91,42	0,33
358	<b>Xpovp.</b>	<b>9,2</b>	<b>1101,1</b>	<b>5,1</b>
	st. dev.	0,63	157,72	0,69
396	<b>Xpovp.</b>	<b>9,0</b>	<b>1065,3</b>	<b>4,3</b>
	st. dev.	0,49	91,25	0,64

Preglednica 10 Vpliv časa sušenja in vlažnosti na modul elastičnosti in natezno trdnost tangencialnih desk sušenih z ostrejšo klimo: u – povprečna lesna vlažnost; E – modul elastičnosti;  $\sigma$  – natezna trdnost.

čas (h)		u (%)	E (MPa)	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )
0	<b>Xpovp.</b>	<b>73,0</b>	<b>475,1</b>	<b>3,0</b>
	st. dev.	5,38	21,61	0,46
70	<b>Xpovp.</b>	<b>30,1</b>	<b>501,4</b>	<b>2,8</b>
	st. dev.	1,81	69,12	0,51
142	<b>Xpovp.</b>	<b>18,9</b>	<b>693,5</b>	<b>4,1</b>
	st. dev.	2,09	47,14	0,16
190	<b>Xpovp.</b>	<b>14,5</b>	<b>771,4</b>	<b>4,0</b>
	st. dev.	0,88	112,14	0,89
221	<b>Xpovp.</b>	<b>12,6</b>	<b>878,8</b>	<b>4,5</b>
	st. dev.	1,35	120,00	0,44
310	<b>Xpovp.</b>	<b>6,9</b>	<b>857,0</b>	<b>4,5</b>
	st. dev.	0,60	91,46	0,37
358	<b>Xpovp.</b>	<b>6,4</b>	<b>960,6</b>	<b>3,5</b>
	st. dev.	1,29	96,01	0,91
396	<b>Xpovp.</b>	<b>6,4</b>	<b>1042,3</b>	<b>3,8</b>
	st. dev.	0,41	136,20	0,49

Preglednica 11 Vpliv časa sušenja in vlažnosti na modul elastičnosti in natezno trdnost radialnih desk sušenih z milejšo klimo:  $u$  – povprečna lesna vlažnost;  $E$  – modul elastičnosti;  $\sigma$  – natezna trdnost.

čas (h)		$u$ (%)	$E$ (MPa)	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )
0	<b>Xpovp.</b>	<b>60,4</b>	<b>706,9</b>	<b>3,2</b>
	st. dev.	9,88	86,12	0,27
48	<b>Xpovp.</b>	<b>39,6</b>	<b>846,1</b>	<b>3,5</b>
	st. dev.	1,10	50,60	0,86
96	<b>Xpovp.</b>	<b>29,6</b>	<b>777,3</b>	<b>3,7</b>
	st. dev.	1,43	114,90	0,48
182	<b>Xpovp.</b>	<b>21,0</b>	<b>1071,8</b>	<b>5,3</b>
	st. dev.	1,23	126,17	0,26
254	<b>Xpovp.</b>	<b>17,6</b>	<b>1086,8</b>	<b>4,8</b>
	st. dev.	1,64	122,85	0,29
360	<b>Xpovp.</b>	<b>15,3</b>	<b>1721,9</b>	<b>5,9</b>
	st. dev.	1,35	457,90	0,21
432	<b>Xpovp.</b>	<b>13,6</b>	<b>1421,0</b>	<b>5,0</b>
	st. dev.	3,03	512,26	1,35
504	<b>Xpovp.</b>	<b>11,2</b>	<b>1812,4</b>	<b>6,0</b>
	st. dev.	1,11	486,38	1,06
552	<b>Xpovp.</b>	<b>10,1</b>	<b>1590,6</b>	<b>5,6</b>
	st. dev.	1,55	180,76	0,40
600	<b>Xpovp.</b>	<b>10,6</b>	<b>1257,0</b>	<b>5,4</b>
	st. dev.	1,36	504,54	1,13

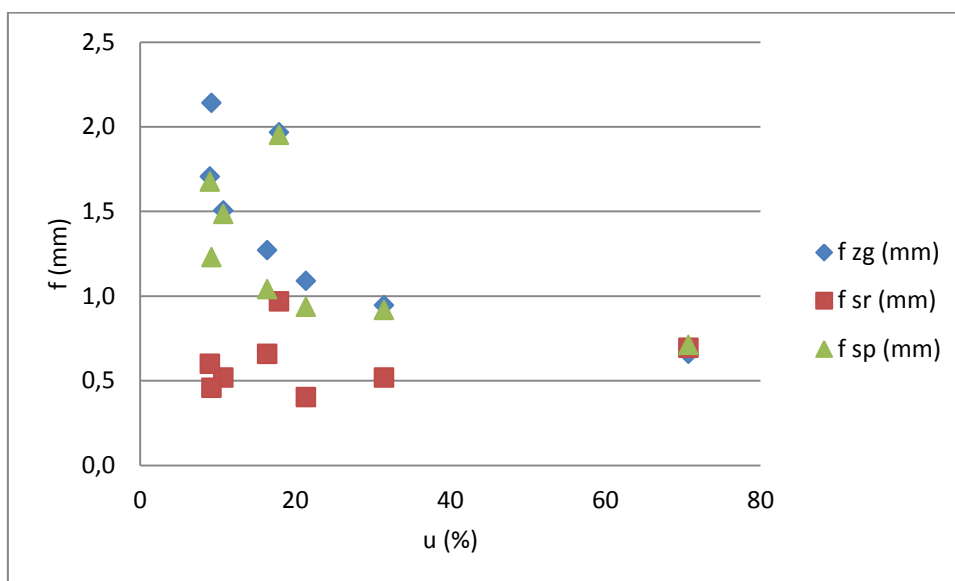
Preglednica 12 Vpliv časa sušenja in vlažnosti na modul elastičnosti in natezno trdnost tangencialnih desk sušenih z milejšo klimo:  $u$  – povprečna lesna vlažnost;  $E$  – modul elastičnosti;  $\sigma$  – natezna trdnost.

čas (h)		$u$ (%)	$E$ (MPa)	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )
0	<b>Xpovp.</b>	<b>60,2</b>	<b>619,1</b>	<b>2,7</b>
	st. dev.	6,73	73,08	0,24
48	<b>Xpovp.</b>	<b>38,7</b>	<b>795,5</b>	<b>2,8</b>
	st. dev.	2,29	136,72	0,80
96	<b>Xpovp.</b>	<b>27,7</b>	<b>892,3</b>	<b>4,2</b>
	st. dev.	1,72	172,18	0,94
182	<b>Xpovp.</b>	<b>19,2</b>	<b>1016,0</b>	<b>5,3</b>
	st. dev.	1,30	116,99	1,05
254	<b>Xpovp.</b>	<b>14,9</b>	<b>1186,5</b>	<b>5,6</b>
	st. dev.	2,02	210,55	1,23
360	<b>Xpovp.</b>	<b>13,9</b>	<b>2024,5</b>	<b>5,9</b>
	st. dev.	0,95	430,86	0,73
432	<b>Xpovp.</b>	<b>10,5</b>	<b>1460,6</b>	<b>5,7</b>
	st. dev.	1,28	462,74	1,36
504	<b>Xpovp.</b>	<b>10,0</b>	<b>1815,6</b>	<b>5,4</b>
	st. dev.	0,94	477,85	0,90
552	<b>Xpovp.</b>	<b>8,4</b>	<b>1276,1</b>	<b>5,8</b>
	st. dev.	0,85	277,74	0,89
600	<b>Xpovp.</b>	<b>9,6</b>	<b>1064,0</b>	<b>5,7</b>
	st. dev.	0,54	242,60	1,39

## 5 RAZPRAVA

### 5.1 ZASKORJENJE V ODVISNOSTI OD LESNE VLAŽNOSTI

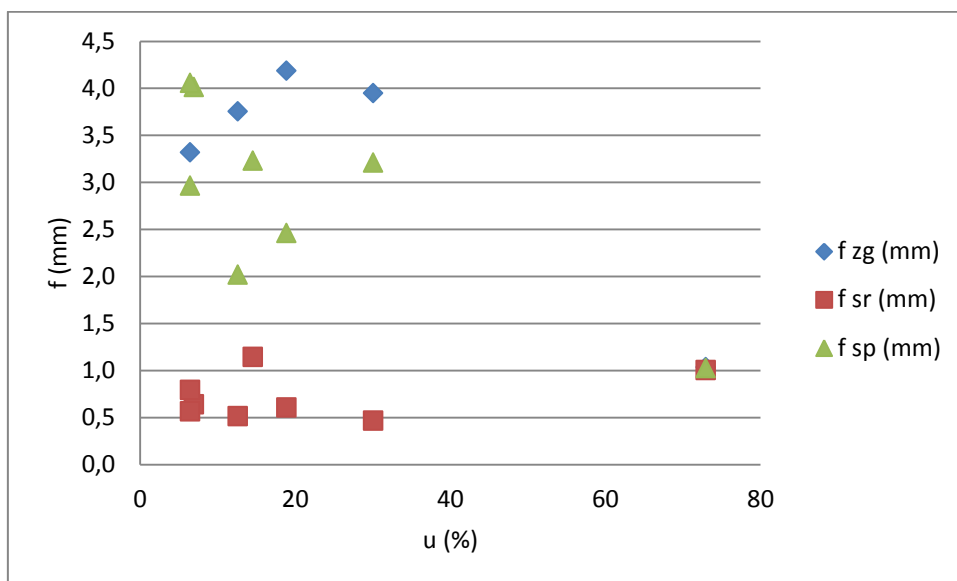
Pri radialnih deskah, sušenih z ostrejšo klimo (Sl. 17), se je upogib lamel (deflekcija) s sušenjem povečeval. Največja deflekcija je bila pri zgornjem sloju lesa, nekoliko manjša pri spodnjem sloju, najmanjša deflekcija pa je bila pri srednjem sloju lesa.



Slika 17 Deflekcija radialnih desk sušenih z ostrejšo klimo v odvisnosti od lesne vlažnosti. f\_zg – deflekcija zgornjega sloja; f\_sr – deflekcija srednjega sloja; f\_sp – deflekcija spodnjega sloja.

Ravno tako kot pri radialnih deskah, se je tudi pri tangencialnih deskah (Sl. 18) deflekcija povečevala s sušenjem. Največja deflekcija je bila pri zgornjem sloju, kjer je pri določenih vlažnostih les tako počil, da upogiba lamel ni bilo mogoče meriti. Nekoliko manjša deflekcija je bila pri spodnjem sloju, najmanjša deflekcija pa je bila pri srednjem sloju, kjer se je les tekom sušenja najmanj zvija.

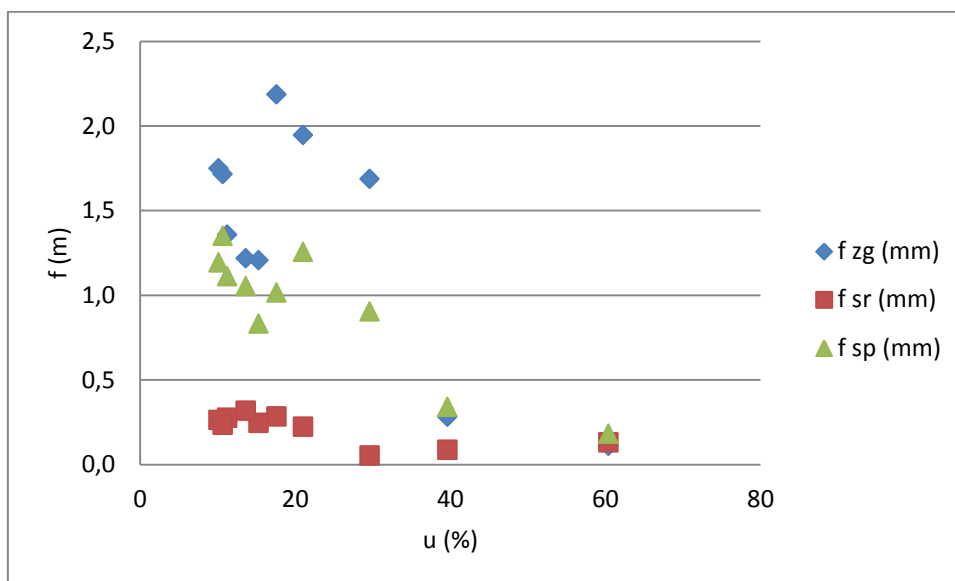




Slika 18 Deflekcija tangencialnih desk sušenih z ostrejšo klimo v odvisnosti od lesne vlažnosti. f zg – deflekcija zgornjega sloja; f sr – deflekcija srednjega sloja; f sp – deflekcija spodnjega sloja.

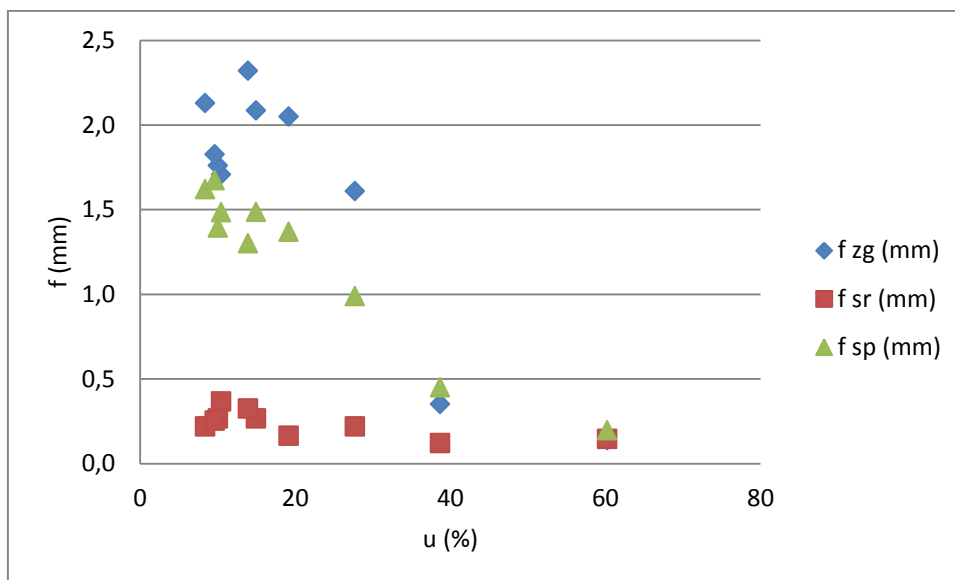
Podobna deflekcija kot pri sušenju z ostrejšo klimo, se je pojavljala tudi pri sušenju z milejšo klimo, le da so bile vrednosti pri slednjem postopku v povprečju nižje zaradi manjšega delovanja lesa med sušenjem.

Pri radialnih deskah sušenih z milejšo klimo (Sl. 19) je imel največjo deflekcijo zgornji sloj desk, spodnji sloj je imel nekoliko manjšo deflekcijo, medtem ko je srednji sloj imel najmanjšo deflekcijo.



Slika 19 Deflekcija radialnih desk sušenih z milejšo klimo v odvisnosti od lesne vlažnosti. f zg – deflekcija zgornjega sloja; f sr – deflekcija srednjega sloja; f sp – deflekcija spodnjega sloja.

Pri tangencialnih deskah sušenih z milejšo klimo (Sl. 20) je imel največjo deflekcijo zgornji sloj desk, spodnji sloj je imel manjšo deflekcijo, medtem ko je srednji sloj imel najmanjšo deflekcijo.



Slika 20 Deflekcija tangencialnih desk sušenih z milejšo klimo v odvisnosti od lesne vlažnosti. f zg – deflekcija zgornjega sloja; f sr – deflekcija srednjega sloja; f sp – deflekcija spodnjega sloja.

Les se najbolj krči v tangencialni smeri, zato je bila deflekcija tangencialno usmerjenih vzorcev v obeh primerih večja. Največja deflekcija je bila pri tangencialnih deskah sušenih

z ostrejšo klimo, kjer so zgornji sloji pogosto pokali. Pri sušenju z milejšo klimo je bil les manj zaskorjen in je imel manjšo deflekcijo kot pa les, sušen z ostrejšo klimo. Ta bolj deluje zaradi ostrejšše klime in je bila posledično deflekcija večja.

## 5.2 TOGOST LESA V ODVISNOSTI OD VLAŽNOSTI

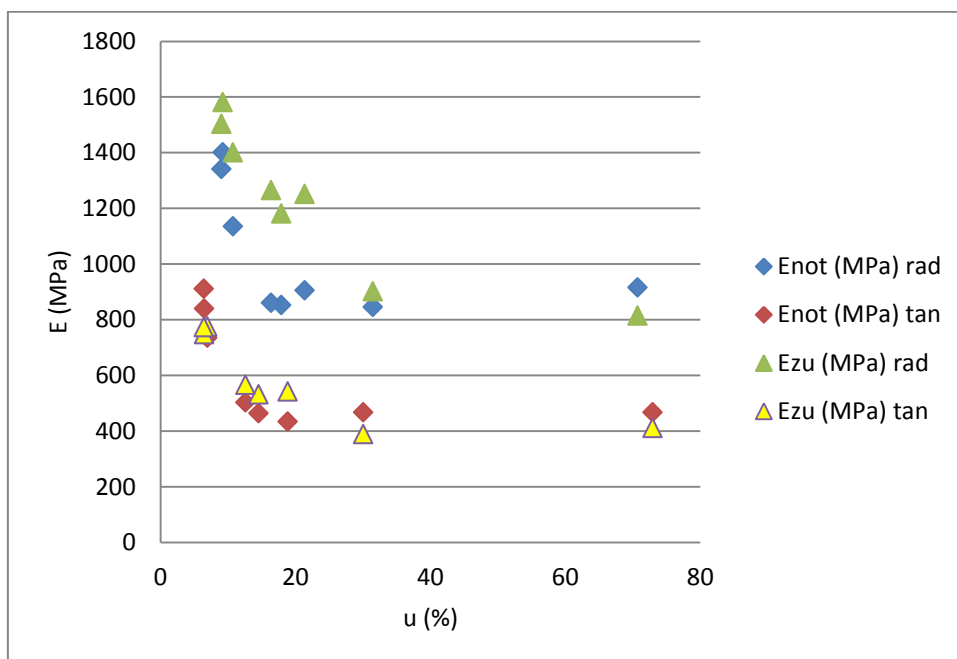
Modul elastičnosti se je tekom sušenja večal. Do točke nasičenja ni bilo velikih razlik, saj je bil modul elastičnosti dokaj konstanten, ko pa se je les začel sušiti pod točko nasičenja, se je modul elastičnosti začel večati. Na koncu sušenja so imele radialne deske višji modul elastičnosti, kot pa tangencialne.

Modul elastičnosti je bil višji pri radialnih deskah kot pri tangencialnih deskah in to pri obeh načinih sušenja (Sl. 21 in Sl. 22).

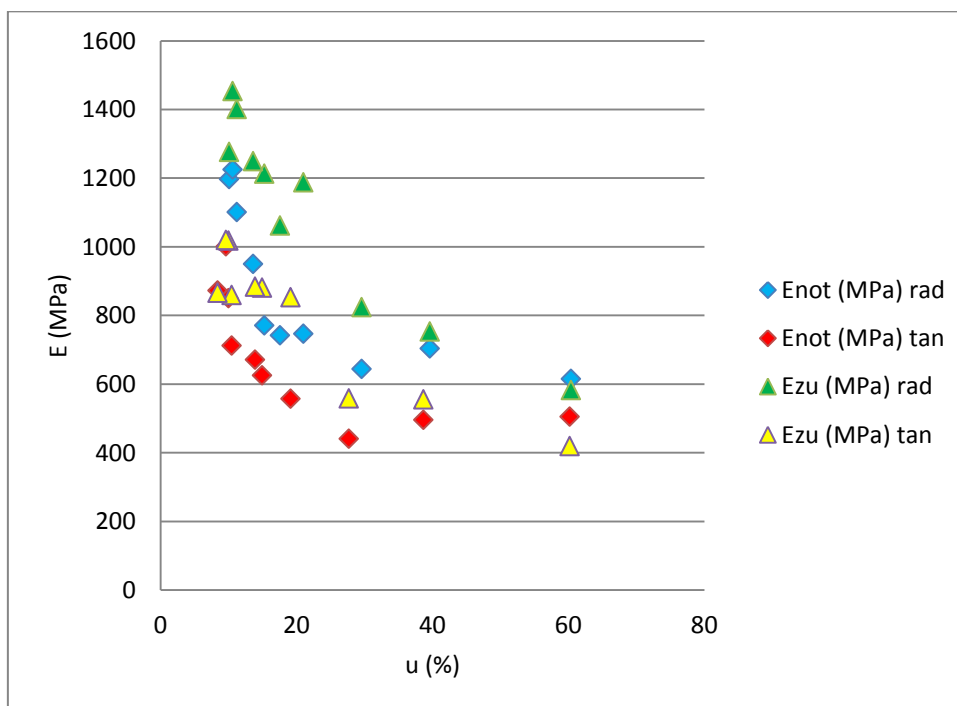
Pri sušenju z ostrejšo klimo (Sl. 21) je prišlo do večjih razlik modula elastičnosti med tangencialnimi in radialnimi deskami kot pa pri sušenju z milejšo klimo, kjer ni tako velikih razlik.

Pri obeh primerih sušenja imajo zunanji sloji radialnih desk višji modul elastičnosti, nižji modul elastičnosti pa imajo v obeh primerih sušenja notranji sloji tangencialnih desk.

Pri sušenju z ostrejšo klimo imamo višji modul elastičnosti določen pri upogibnem obremenjevanju kot pa pri sušenju z milejšo klimo. Vendar so razlike med tangencialnimi in radialnimi deskami pri sušenju z ostrejšo klimo večje kot pa pri sušenju z milejšo klimo.

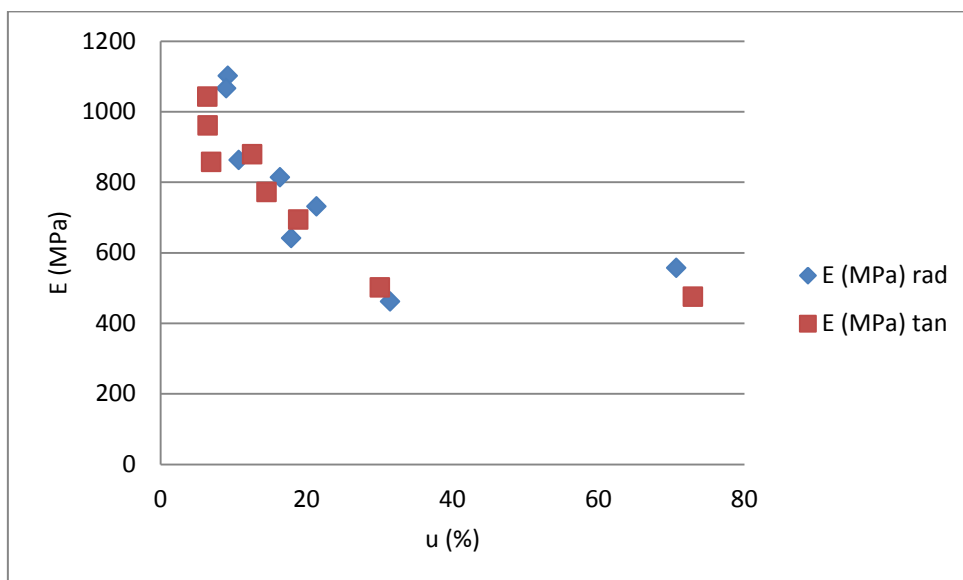


Slika 21 Modul elastičnosti iz upogibnega testa bukovine pri sušenju z ostrejšo klimo v odvisnosti od vlažnosti. Enot rad – modul elastičnosti notranjega sloja radialnih desk; Enot tan - modul elastičnosti notranjega sloja tangencialnih desk; Ezu rad - modul elastičnosti zunanjih slojev radialnih desk; Ezu tan - modul elastičnosti zunanjih slojev tangencialnih desk.

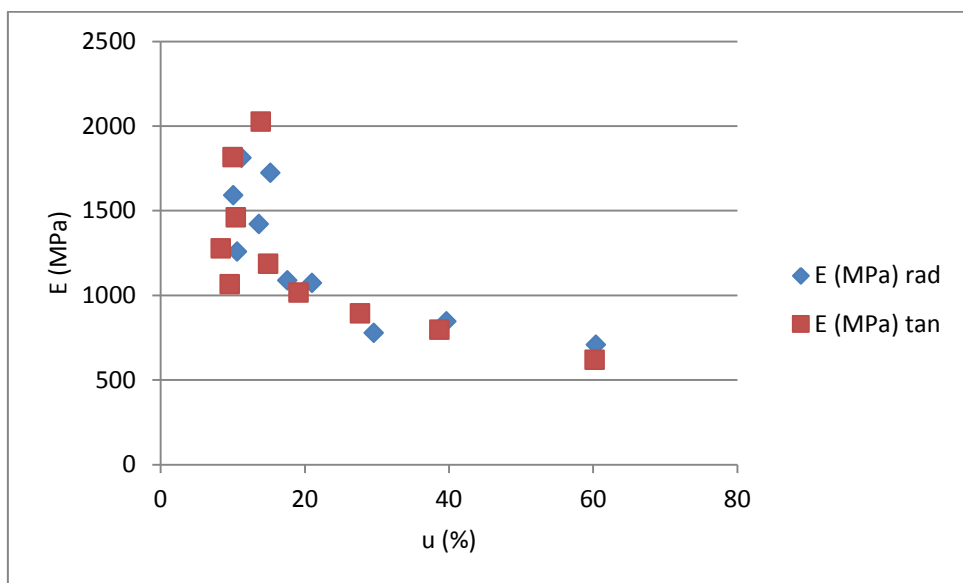


Slika 22 Modul elastičnosti iz upogibnega testa bukovine pri sušenju z milejšo klimo v odvisnosti od vlažnosti. Enot rad – modul elastičnosti notranjega sloja radialnih desk; Enot tan - modul elastičnosti notranjega sloja tangencialnih desk; Ezu rad - modul elastičnosti zunanjih slojev radialnih desk; Ezu tan - modul elastičnosti zunanjih slojev tangencialnih desk.

Modul elastičnosti pri nateznem testu se je tekom sušenja lesa poviševal. Pri sušenju z ostrejšo klimo (Sl. 23) je bil modul elastičnosti nekoliko višji pri radialnih deskah, medtem, ko pri sušenju z milejšo klimo (Sl. 24) ni bilo bistvenih razlik.



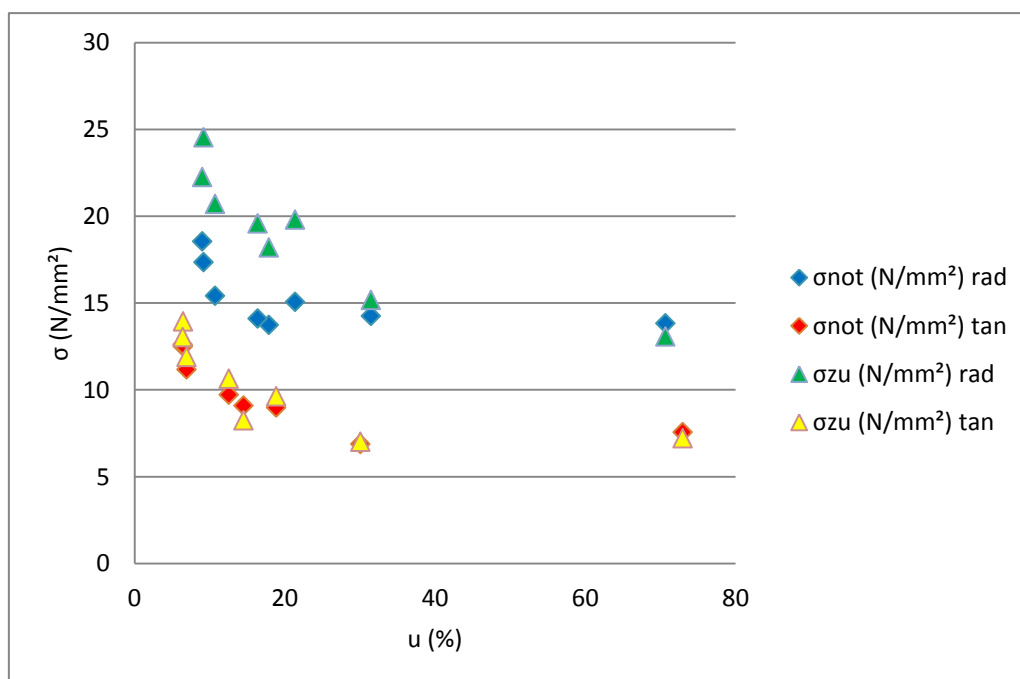
Slika 23 Modul elastičnosti bukovine iz nateznega testa pri sušenju z ostrejšo klimo v odvisnosti od vlažnosti. E rad – modul elastičnosti radialnih desk; E tan - modul elastičnosti tangencialnih desk.



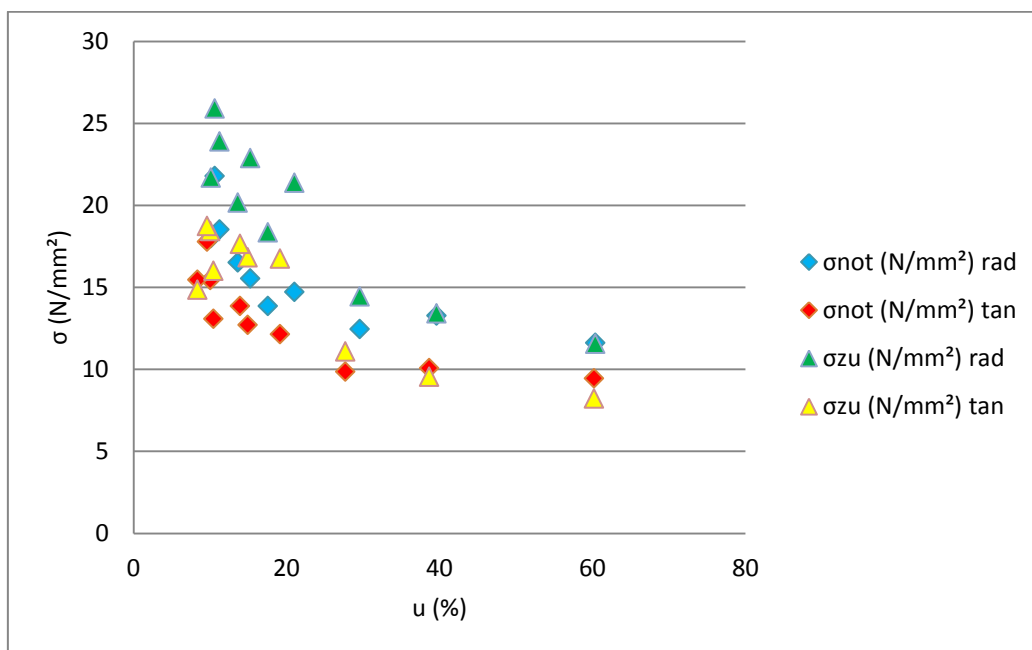
Slika 24 Modul elastičnosti bukovine iz nateznega testa pri sušenju z milejšo klimo v odvisnosti od vlažnosti. E rad – modul elastičnosti radialnih desk; E tan - modul elastičnosti tangencialnih desk.

### 5.3 NEKATERE MEHANSKE LASTNOSTI BUKOVINE V ODVISNOSTI OD VLAŽNOSTI

Upogibna trdnost bukovine se je s sušenjem lesa povečevala. Do točke nasičenja ni bilo velikih razlik, saj je bila trdnost dokaj konstantna, ko pa se je les začel sušiti pod točko nasičenja, se je upogibna trdnost začela večati. Na koncu sušenja so imele radialne deske višjo upogibno trdnost kot pa tangencialne (Sl. 25 in Sl. 26).

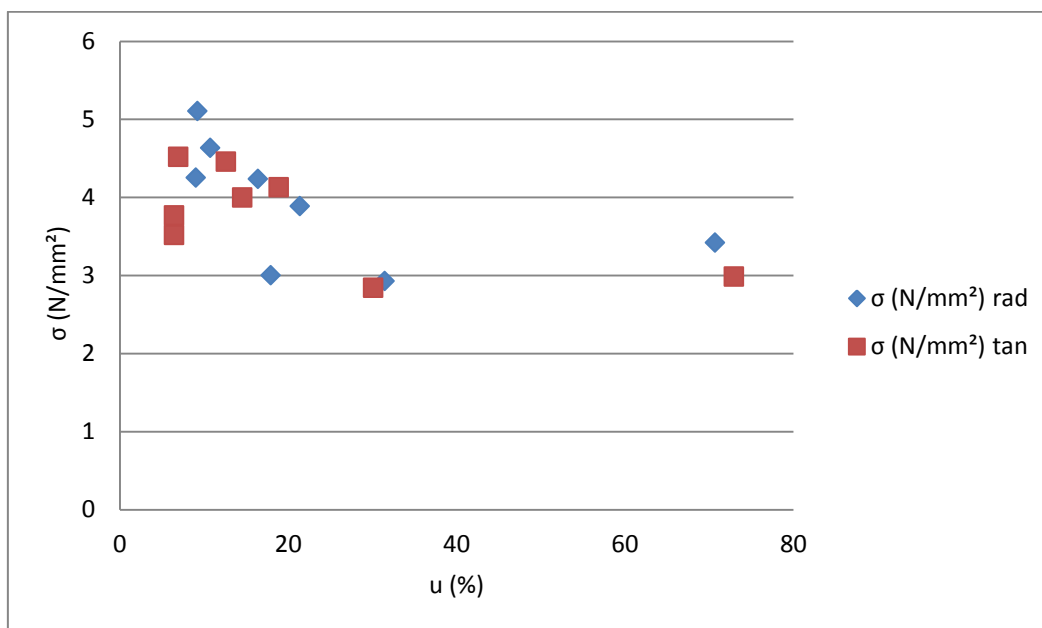


Slika 25 Upogibna trdnost bukovine sušene z ostrejšim režimom v odvisnosti od vlažnosti.  $\sigma_{\text{not rad}}$  – upogibna trdnost notranjih slojev radialnih desk;  $\sigma_{\text{not tan}}$  - upogibna trdnost notranjih slojev tangencialnih desk;  $\sigma_{\text{zu rad}}$  - upogibna trdnost zunanjih slojev radialnih desk;  $\sigma_{\text{zu tan}}$  - upogibna trdnost zunanjih slojev tangencialnih desk.

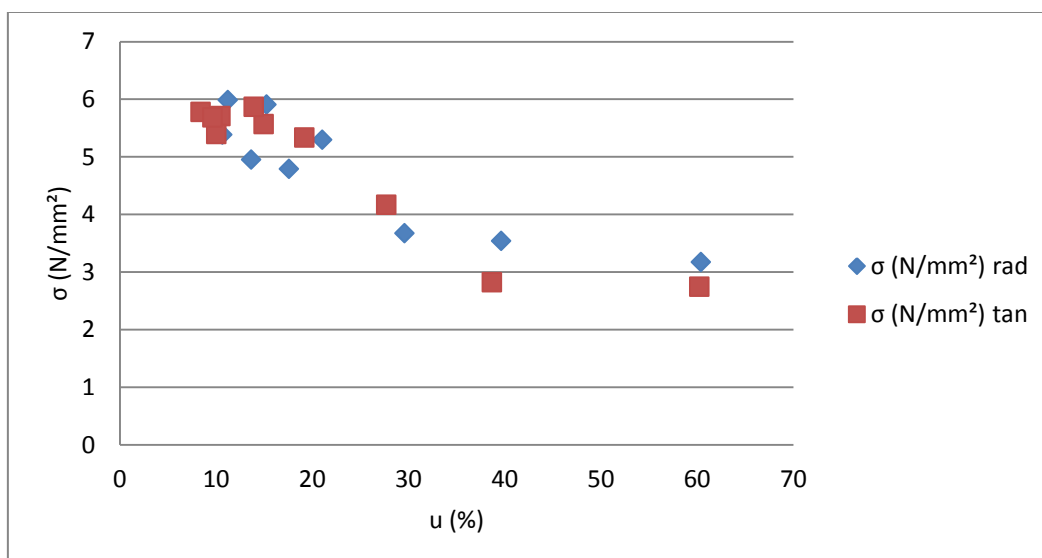


Slika 26 Upogibna trdnost bukovine sušene z milejšim režimom v odvisnosti od vlažnosti.  $\sigma_{\text{not}} \text{ rad}$  – upogibna trdnost notranjih slojev radialnih desk;  $\sigma_{\text{not}} \text{ tan}$  - upogibna trdnost notranjih slojev tangencialnih desk;  $\sigma_{\text{zu}} \text{ rad}$  - upogibna trdnost zunanjih slojev radialnih desk;  $\sigma_{\text{zu}} \text{ tan}$  - upogibna trdnost zunanjih slojev tangencialnih desk.

Natezna trdnost se je tekom sušenja povečevala pri obeh režimih sušenja (Sl. 27 in Sl. 28). Do točke nasičenja so pri obeh režimih sušenja imele radialne deske višjo natezno trdnost kot tangencialne deske, ko pa se je les začel sušiti pod točko nasičenja celičnih sten, so se razlike med tangencialnimi in radialnimi deskami začele zmanjševati, tako pri ostrejši, kot pri milejši klimi.



Slika 27 Natezna trdnost bukovine sušene z ostrejšim režimom v odvisnosti od vlažnosti.  $\sigma$  rad – natezna trdnost radialnih desk;  $\sigma$  tan - natezna trdnost tangencialnih desk.



Slika 28 Natezna trdnost bukovine sušene z milejšim režimom v odvisnosti od vlažnosti.  $\sigma$  rad – natezna trdnost radialnih desk;  $\sigma$  tan - natezna trdnost tangencialnih desk.



## 6 SKLEPI

Osnovne eksperimentalne ugotovitve:

Z eksperimentom smo ugotovili, da sta čas in ostrina sušenja pomembna faktorja. Če sušimo prehitro in s preostro klimo pride do poškodb in napak v lesu, ki bi bile manjše ali pa se sploh nebi pojavile, če bi sušili počasneje in z milejšo klimo.

Vzorci, sušeni z ostrejšo klimo, so imeli večjo deflekcijo kot pa vzorci sušeni v milejši klimi. Posebno se je to videlo pri tangencialno usmerjenih vzorcih. Zato lahko sklepamo, da so bili vzorci, sušeni z ostrejšo klimo, bolj zaskorjeni.

Tangencialno usmerjeni vzorci so se osušili na nižjo končno vlažnost, kot pa radialno usmerjeni vzorci, in to v obeh postopkih sušenja. Zato lahko sklepamo, da piknje v radialnih stenah celic niso bistveno prispevale k prevodnosti, medtem, ko je trakovno tkivo omogočalo hitrejše sušenje tangencialno usmerjenih desk.

Vzorci, sušeni v milejši klimi, so imeli boljšo upogibno in natezno trdnost kot vzorci, sušeni v ostrejši klimi, saj je bil les sušen z milejšo klimo manj zaskorjen in posledično manj poškodovan. Vzorci sušeni v ostrejši klimi pa so imeli nekoliko boljši modul elastičnosti kot vzorci sušeni v milejši klimi.

Najvišji vlažnostni gradient je bil izmerjen po 182 urah pri radialnih deskah sušenih v milejši klimi in je znašal 13,57 %/cm, kar lahko smatramo za napako v postopku sušenja ali pa za napako pri samem odvzemanju vzorcev, saj smo imeli nekaj tehničnih težav, katerim smo se morali prilagoditi.

Na splošno lahko sklepamo, da so imeli vzorci sušeni v milejši klimi boljše mehanske lastnosti kot pa vzorci sušeni v ostrejši klimi. Prav tako lahko sklepamo, da so imeli vzorci radialne teksture boljše mehanske lastnosti kot pa vzorci tangencialne teksture.

Čas sušenja pri sušenju z ostrejšo klimo je znašal 396 ur, pri sušenju z milejšo klimo pa 600 ur, kar je kar 204 ure razlike.

## 7 POVZETEK

Naloga sušenja lesa je v najkrajšem času in čim bolj kakovostno osušiti les do vlažnosti, ki je primerna za nadaljnjo uporabo. Na kakovostno izvajanje sušilnih procesov vplivajo najrazličnejši dejavniki, ki jih nikakor ne moremo obravnavati ločeno.

V raziskavi smo uporabili bukovino (*Fagus sylvatica* L.) prav zaradi njenih specifičnih lastnosti, problematike sušenja in razširjenosti te drevesne vrste v proizvodnji. Primerjalno smo ovrednotili kakovost posameznega sušilnega postopka in posušenega lesa z vidika hitrosti sušenja, doseganja končne vlažnosti, nekaterih mehanskih lastnosti in nekaterih napak med postopkom sušenja. To smo ovrednotili s pomočjo dveh različnih načinov sušenja; pri prvem načinu sušenja smo sušili z ostrejšo klimo sušenja, pri drugem načinu sušenja pa z milejšo klimo sušenja.

Pri sušenju z ostrejšim režimom smo bukovino posušili do končne vlažnosti približno 8 % v 396 urah, pri sušenju z milejšim režimom pa smo bukovino posušili do končne vlažnosti približno 10 % v 600 urah. Padec vlažnosti je bolj postopen pri sušenju z milejšim režimom kot pa pri sušenju z ostrejšim režimom. Razlika med vlažnostjo zunanjih in notranjih slojev je bila nekoliko višja pri sušenju z ostrejšim režimom sušenja.

Tekom sušenja smo jemali vzorce bukovine, ki smo jih testirali na upogib in nateg pri različnih vlažnostih in ugotovili, da imajo vzorci sušeni z milejšim režimom boljše testirane mehanske lastnosti. Vzorci sušeni z ostrejšim režimom sušenja imajo višji modul elastičnosti pri upogibnem testu in nižji elastični modul pri nateznem testu od vzorcev sušenih z milejšim režimom sušenja. Na splošno so imeli notranji sloji lesa pri obeh načinih sušenja slabše testirane mehanske lastnosti, kar lahko pripišemo zaskorjenju in krčitveni anizotropiji, ki je prisotna ob sušenju.

Stopnjo zaskorjenja smo določali z merjenjem loka vzorcev, ki smo jih jemali med sušenjem. Najmanjši lok je bil pri vzorcih odvzetih iz sredine radialno usmerjene deske bukovine, sušene z milejšim režimom sušenja. Največji lok pa je bil pri tangencialno

orientiranih vzorcih odvzetih iz zgornje strani desk, sušenih z ostrejšim režimom sušenja. Manjši lok so imeli vzorci sušeni z milejšim režimom kot pa vzorci, sušeni z ostrejšim režimom, ker je les med sušenjem manj deloval. V povprečju so imeli manjši lok radialni vzorci kot tangencialni vzorci.

## 8 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. 2005. Variabilna in heterogena zgradba lesa, 6, 5: 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-Durcian permeability in Chilean Tepa (*Laurelia philippiana*). *Holzforschung*, 48: 77-81
- Key R.B., Langrish T.A.G., Walker J.C.F. 2000. *Kiln-Drying of Lumber*. Berlin, Springer: 326 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. 1995. *Wood: Influence of moisture on physical properties*. Blacksburg, Department of Wood Science and Forest Products. Virginia Polytechnic Institute and State University: 227 str.
- SIST ENV 408: 2010. Lesene konstrukcije – Konstrukcijski les in lepljeni lamelirani les - Ugotavljanje nekaterih fizikalnih in mehanskih lastnosti. *Timber Structures - Structural timber and glued laminated timber- Determination of some physical and mechanical properties*
- SIST ENV 13183-1: 2003. Žagan les – Metoda za določitev vlažnosti. *Round and sawn timber – Method of measurement of moisture content-Part 1: Method for determining 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.

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**

Za pomoč pri izvajanju, oblikovanju in urejanju diplomskega dela se zahvaljujem vsem, ki so mi kakorkoli pomagali pri mojem diplomskem delu.

Posebej se želim zahvaliti mentorju prof. dr. Željku Gorišku, recenzentki doc. dr. Dominiki Gornik Bučar, asistentu dr. Alešu Stražetu in Urošu Firštu, ki sta mi bila v pomoč pri izvedbi eksperimenta.

Zahvaliti pa se želim tudi družini, ki mi je ves čas študija nesebično pomagala in mi stala ob strani.

Najlepša hvala vsem!