

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Andrej ROMŠAK

**VPLIV OSTRINE SUŠENJA NA GENERIRANJE
NOTRANJIH NAPETOSTI**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2016

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Andrej ROMŠAK

**VPLIV OSTRINE SUŠENJA NA GENERIRANJE NOTRANJIH
NAPETOSTI**

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

**INFLUENCE OF DRYING CONDITIONS ON STRESS
DEVELOPMENT**
GRADUATION THESIS
Higher professional studies

Ljubljana, 2016

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega strokovnega študija lesarstva. Opravljeno jebilo na katedri za Tehnologijo lesa, na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Željka Goriška, za recenzenta pa prof. dr. Primoža Ovna.

Mentor: prof. dr. Željko Gorišek

Recenzent: prof. dr. Primož Oven

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

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

Andrej Romšak

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- ŠD Vs
- DK 630*847
- KG les/bukovina (*Fagus sylvatica* L.)/sušenje/vlažnostni gradient/zaskorjenje/sušilne napetosti/kakovost
- AV ROMŠAK, Andrej
- SA GORIŠEK, Željko (mentor)/OVEN, Primož (recenzent)
- KZ S1-1000 LJUBLJANA, Rožna dolina, c. VIII/34
- ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
- LI 2016
- IN VPLIV OSTRINE SUŠENJA NA GENERIRANJE NOTRANJIH NAPETOSTI
- TD Diplomsko delo (visokošolski študij)
- OP XII, 41 str., 15 pregl., 29 sl., 8 pril., 23 vir.
- IJ sl
- JI sl/en
- AI Bukev je naša najpomembnejša domača listnata lesna vrsta. Med sušenjem je bukovina zelo nagnjena k pokanju, veženju in obarvanosti, kar zahteva skrben pristop k načrtovanju in izvajanju sušilnega postopka. Na 25 mm in 50 mm debelih žaganih elementih, ki smo jih sušili z 2 ostrinama sušenja, smo intervalno, pri vsakem padcu vlažnosti za pribl. 5 %, določali povprečno vlažnost, vlažnostni gradient in sušilne napetosti. Ostrejši režim je vplival na večjo sušilno hitrost, predvsem pri sušenju pod točko nasičenja celičnih sten. Hitrost sušenja tangencialno orientiranih vzorcev je bila večja (0,064 %/h) od hitrosti sušenja radialnih (0,05 %/h). Prav tako so se v tangencialnih elementih generirale večje sušilne napetosti. Kritična faza sušenja z največjimi sušilnimi napetostmi je pri povprečni vlažnosti 15–20 %. Vlažnostni gradient je v radialnih elementih (2,36 %/cm) nekoliko večji kot v tangencialnih (1,82 %/cm).

KEY WORDS DOCUMENTATION

- DN Vs
- DC 630*847
- CX wood/beech (*Fagus sylvatica* L.)/drying/moisture gradient/casehardening/drying stresses/quality
- AU ROMŠAK, Andrej
- AA GORIŠEK, Željko (supervisor)/OVEN, Primož (co-supervisor)
- PP S1-1000 LJUBLJANA, Rožna dolina, c. VIII/34
- PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
- PY 2016
- TI INFLUENCE OF DRYING CONDITIONS ON STRESS DEVELOPMENT
- DT Graduation Thesis (Higher professional studies)
- NO XII, 41 p., 15 tab., 29 fig., 8 ann., 23 ref.
- LA sl
- AL sl/en
- AB Beech wood is the most important Slovenian hardwood. During drying process its tendency to cracking and banding demands carefully planning and performing drying programme. In experiment, 25 mm and 50 mm thick boards were included, which were dried in 2 different drying conditions. Control samples for moisture, moisture gradient and drying stresses were taken frequently, every time when moisture in boards fell down for about 5 %. The influence of sharper drying conditions on drying speed was indicative when moisture fell under fibre saturation point (FSP). The drying speed in tangential samples (0.064 %/h) was higher than in radial samples (0.05 %/h). Drying stresses were also higher in tangential samples. Critical phase in the drying process with highest drying stresses was 15–20 % at average moisture. Moisture gradient was a little higher in radial samples (2.36 %/cm) than in tangential samples (1.82 %/cm).

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE.....	V
KAZALO PREGLEDNIC.....	VII
KAZALO SLIK.....	IX
KAZALO PRILOG	XIX
1 UVOD.....	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA.....	1
1.2 HIPOTEZA	2
1.3 CILJI NALOGE.....	2
2 PREGLED OBJAV	3
2.1 SUŠILNE KARAKTERISTIKE BUKOVINE.....	3
2.1.1 Rastne napetosti v svežem lesu.....	3
2.1.2 Prečna krčitvena anizotropija.....	3
2.1.3 Permeabilnost in difuzivnost bukovine	4
2.1.4 Obarvanje bukovine.....	4
2.2 MEHANIZEM SUŠENJA LESA	5
2.2.1 Odstranjevanje vode s površine lesa.....	5
2.2.2 Transport proste vode.....	6
2.2.3 Transport vezane vode.....	7
2.3 VLAŽNOSTNI GRADIENT	7
2.4 NASTANEK NOTRANJIH NAPETOSTI	8
2.5 METODE ZA DOLOČANJE NOTRANJIH NAPETOSTI	10
3 MATERIALI IN METODE	15
3.1 MATERIAL	15
3.2 METODE	15

3.2.1	Programi sušenja	17
3.2.2	Določanje sušilnih parametrov	18
3.2.2.1	Določanje sušilne hitrosti	18
3.2.2.2	Merjenje vlažnostnega gradienta.....	18
3.2.2.3	Merjenje zaskorjenja (sušilnih napetosti).....	19
4	REZULTATI	20
4.1	ČAS SUŠENJA	20
4.2	SUŠILNA HITROST	22
4.3	VLAŽNOSTNI GRADIENT	23
4.4	NOTRANJE NAPETOSTI	25
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	28
5.1	RAZPRAVA	28
5.1.1	Sušilna hitrost	28
5.1.2	Vlažnostni gradient	30
5.1.3	Notranje napetosti	33
5.1.4	Kakovost sušenja	36
5.2	SKLEPI	37
6	POVZETEK	39
7	VIRI	40

ZAHVALA

PRILOGE

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Primerjava deleža vezane vode in krčenja pri različnih lesnih vrstah.....	3
Preglednica 2.2: Delež celičnih sten, vezane in proste vode za posamezne drevesne vrste..	4
Preglednica 2.3: Mejne vrednosti vlažnostnega gradienta za posamezne kakovostne razrede po EDG.....	8
Preglednica 3.1: režim sušenja za elemente debeline 50mm sušene z blažjim režimom....	15
Preglednica 3.2: režim sušenja za elemente debeline 50mm sušene z ostrejšim režimom..	15
Preglednica 4.1: Trajanje posamezne faze sušenja in povprečne začetne vlažnosti sledilnih vzorcev, merjene z uporovnim merilnikom vlažnosti, ločeno za blažji in ostrejši režim.....	18
Preglednica 4.2: Povprečna sušilna hitrost in osnovna statistika, ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.....	20
Preglednica 4.3: Povprečna sušilna hitrost in osnovna statistika, ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti za elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.....	21
Preglednica 4.4: Povprečni vlažnostni gradient med sredico in površino in osnovna statistika, ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti in časa sušenja za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.....	21
Preglednica 4.5: Povprečni vlažnostni gradient med sredico in površino in osnovna statistika, ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti in časa sušenja za elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.....	22
Preglednica 4.6: Povprečne vrednosti notranjih napetosti, merjenih s prežagovalno metodo (velikost reže) in osnovna statistika ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti in časa sušenja za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.....	24
Preglednica 4.7: Povprečne vrednosti notranjih napetosti merjenih s prežagovalno metodo (velikost reže) in osnovna statistika ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti in časa sušenja za elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.....	25

Preglednica 5.1: Prikaz procenta desk, ki ustrezajo posameznemu kakovostnemu sušilnemu razredu, glede na velikost vlažnostnega gradienta.....	36
Preglednica 5.2: Prikaz procenta desk, ki ustrezajo posameznemu kakovostnemu sušilnemu razredu, glede na velikost notranjih napetosti.....	36

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Shematski prikaz pretoka vode v lesu pri sušenju: pri svežem lesu prevladuje masni tok proste vode, pod vlažnostjo točke nasičenja celičnih sten pa kombinacija vezane vode skozi celične stene in parne difuzije prek lumnov (Gorišek, 2004).....	5
Slika 2.2: Odvisnost difuzijskega koeficienta vezane vode in pare od lesne vlažnosti in temperature.....	6
Slika 2.3: Razvoj sušilnih napetosti med sušilnim procesom (Kolin 2000).....	9
Slika 2.4: Sločenje lamel pri prežagovalni metodi in mesto kjer merimo velikost reže.....	10
Slika 2.5: Prikaz notranjih napetosti z viličnim testom: a – brez notranjih napetosti, b – zaskorjenje, c – obratno zaskorjenje.....	10
Slika 2.6: Način določevanja notranjih napetosti z ekstenziometersko metodo: a - velikost vzorca pred razžagovanjem, b – lamele po razžagovanju.....	12
Slika 3.1: Leseni okvir, ki je v sušilni komori zagotavljal enakomeren pretok zraka okrog elementov (Laboratorij za sušenje lesa, Oddelek za lesarstvo).....	15
Slika 3.2: Prikaz razžagovanja testnih vzorcev za meritev notranjih napetosti in vlažnostnega gradienta.....	16
Slika 3.3: Kontrolni vzorec za merjenje notranjih napetosti po izdelavi.....	19
Slika 4.1: Spreminjanje lesne vlažnosti, psihrometerske razlike in temperature sušenja v odvisnosti od časa sušenja, med blažjim sušilni režimom za elemente debeline 50 mm.....	21
Slika 4.2: Spreminjanje lesne vlažnosti, psihrometerske razlike in temperature sušenja v odvisnosti od časa sušenja, med ostrejšim sušilni režimom za elemente debeline 50 mm.....	21
Slika 4.3: Povprečni vlažnostni profil desk v odvisnosti od časa sušenja za elemente debeline 50mm sušene z blažjim režimom.....	23
Slika 4.4: Povprečni vlažnostni profil desk v odvisnosti od časa sušenja za elemente debeline 50mm sušene z ostrejšim režimom.....	23
Slika 4.5: Povprečne vrednosti notranjih napetosti v odvisnosti od časa sušenja, merjenih z prežagovalno metodo (velikost reže), takoj po odvzemu in po 48h urah (ko se izniči vpliv vlažnostnega gradienta) za elemente debeline 50mm sušene z blažjim režimom.....	25

Slika 4.6: Povprečne vrednosti notranjih napetosti v odvisnosti od časa sušenja, merjenih z prežagovalno metodo (velikost reže), takoj po odvzemu in po 48h urah (ko se izniči vpliv vlažnostnega gradienta) za elemente debeline 50mm sušene z ostrejšim režimom.....	26
Slika 5.1: Primerjava sušilne hitrosti ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.....	27
Slika 5.2: Primerjava sušilne hitrosti ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti za elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.....	28
Slika 5.3: Primerjava sušilne hitrosti med ostrejšim in blažjim režimom za radialne elemente debeline 50 mm v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti.....	28
Slika 5.4: Primerjava sušilne hitrosti med ostrejšim in blažjim režimom za tangencialne elemente debeline 50 mm v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti.....	29
Slika 5.5: Primerjava vlažnostnega gradienta ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti, za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.....	30
Slika 5.6: Primerjava vlažnostnega gradienta ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti, za elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.....	30
Slika 5.7: Primerjava vlažnostnega gradienta med ostrejšim in blažjim režimom za radialne elemente debeline 50 mm v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti....	31
Slika 5.8: Primerjava vlažnostnega gradienta med ostrejšim in blažjim režimom za tangencialne elemente debeline 50 mm v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti.....	31
Slika 5.9: Primerjava notranjih napetosti merjenih s prežagovalno metodo (velikost reže) takoj po odvzemu in po 48h v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti, za radialne elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.....	32
Slika 5.10: Primerjava notranjih napetosti merjenih s prežagovalno metodo (velikost reže) takoj po odvzemu in po 48h, v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti, za tangencialne elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.....	33
Slika 5.11: Primerjava notranjih napetosti merjenih s prežagovalno metodo (velikost reže) takoj po odvzemu in po 48h v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti, za radialne elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.....	33

- Slika 5.12: Primerjava notranjih napetosti merjenih s prežagovalno metodo (velikost reže) takoj po odvzemu in po 48h, v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti, za tangencialne elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.....34
- Slika 5.13: Primerjava notranjih napetosti merjenih s prežagovalno metodo (velikost reže) med blažjim in ostrejšim režimom po 48h, v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti za radialne elemente debeline 50 mm.....34
- Slika 5.14: Primerjava notranjih napetosti merjenih s prežagovalno metodo (velikost reže) med blažjim in ostrejšim režimom po 48h, v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti za tangencialne elemente debeline 50 mm.....35

KAZALO PRILOG

- Priloga A: Vlažnost kontrolnih vzorcev po vsakem odvzemu za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.
- Priloga B: Vlažnost kontrolnih vzorcev po vsakem odvzemu za elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.
- Priloga C: Sušilna hitrost ločeno za radialne in tangencialne elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.
- Priloga D: Sušilna hitrost ločeno za radialne in tangencialne elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.
- Priloga E: Rezultati meritev vlažnostnega gradienta za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.
- Priloga F: Rezultati meritev vlažnostnega gradienta za elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.
- Priloga G: Rezultati meritev velikosti reže za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.
- Priloga H: Rezultati meritev velikosti reže za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.

1 UVOD

1.1. OPREDELITEV PROBLEMA

Bukev je en izmed najpogostejših in tudi najpomembnejših lesnih vrst v Sloveniji, razširjena pa je tudi po celotni srednji Evropi vse do Kavkaza. V slovenskih gozdovih se je načrtno pogozdovala v 20. stoletju, zato so na trgu prisotne velike količine tega lesa. Premeri debel, zaradi manjšega etata kot znaša letni prirastek in skrbnega gospodarjenja z gozdovi, dosegajo tudi preko 50 cm. Velike količine tega lesa še vedno predelamo v kurivo, debela večjih premerov pa prodamo v sosednje države. Za lesno industrijo bi bilo bolj smotrno, da se ta les predela v Sloveniji in se mu tako doda večjo dodano vrednost.

Bukovina (*Fagus sylvatica* L) ima glede na gostoto dobre mehanske lastnosti, neatraktivno teksturo (v zadnjem času se poudarja tekstura rdečega srca, ki je lahko zelo atraktivna) in je zahtevnejša za sušenje. Les ima visoko gostoto in trdoto, vendar je dokaj neodporen proti glivam in atmosferskim vplivom, zato je potrebna hitra predelava, da ne pride do razvrednotenja. Za bukovino so značilni veliki skrčki, kar vpliva na nastanek velikih notranjih napetosti med sušenjem. Le te povzročajo zvijanje in pokanje tudi v nadaljnji obdelavi. Med procesom sušenja lahko pride tudi do rjavo-rdečkastega obarvanja, zato spada med lesne vrste, ki zahtevajo veliko pozornosti med sušilnim procesom. Sušenje dodatno otežuje tudi pogosto otiljenje trahej (Wagenfher, 1996).

Med naravnim sušenjem bukovine na skladišču ali takoj po razžaganju je le ta podvržena napadu gliv še posebej, če je gibanje zraka nezadostno. Zaradi visoke gostote in velikih količin vezane vode, so časi sušenja daljši kot pri primerljivih lesnih vrstah. Zaradi otiljenja trahej in pojava diskoloriranega lesa (rdeče srce), ki vsebuje večje količine vode, se časi lahko še podaljšajo. Posledično so zaradi velike količine vezane vode tudi skrčki lesa neprimerno večji, kar pomeni večje napetosti v lesu med samim sušenjem. Na napetostno polje vplivajo tudi rastne napetosti, ki so se v les vgradile v fazi diferenciacije vlaken, velikost rastnih napetosti pa narašča s premerom debla. Rastne napetosti v povezavi z sušilnimi napetostmi povzročajo krivljenje in zvijanje lesa (Gorišek in sod. 1994).

Izhajanje vezane vode pod točko nasičenja celičnih sten (TNCS) predstavlja kritični interval v procesu sušenja. Takrat se po prerezu obdelovanca pojavi vlažnostni gradient, saj se voda iz površine izloča hitreje kot pa voda iz sredice. Posledica hitrejšega sušenja površine je nastajanje natezних napetosti na površini in tlačnih v sredici. Zaradi različnega krčenja lesa v različnih smereh (anizotropnost) pa so napetosti v tangencialnih elementih večje kot v radialnih (Gorišek, 2004).

Če notranje napetosti prekoračijo trdnost lesnega tkiva, se na elementih pojavijo razpoke in satavost. Posledice notranjih napetosti po koncu sušenja velikokrat ostanejo skrite, pokažejo pa se v nadaljnji obdelavi, kjer prihaja do večjega izmeta materiala.

1.2. HIPOTEZA

Predpostavljamo, da na velikost sušilnih napetosti lahko vplivamo s pravilno izbiro sušilnega programa ter ustreznim kondicioniranjem. Menimo, da mora izbira ustreznega sušilnega programa temeljiti na optimizaciji celotnega procesa z vidika doseganja čim krajših časov sušenja in doseganju najvišje možne kakovosti posušenega lesa. Pričakujemo, da bo z naraščanjem ostrine sušenja padala kakovost posušenega lesa, prav tako pa se bodo zmanjševali časi sušenja. Poleg tega pričakujemo pri tangencialnih elementih nižji vlažnostni gradient ter višjo sušilno hitrost in večje sušilne napetosti, v primerjavi z radialnimi elementi.

1.3. CILJI NALOGE

Z izvajanjem sušilnega postopka z različnimi procesnimi parametri želimo ugotoviti in proučiti:

- kinetiko sušilnega postopka v različnih fazah procesa. Določitev sušilne hitrosti med posameznimi intervali in preučiti vpliv orientacije elementov na intenzivnost izhajanja vode med procesom sušenja.
- dinamiko nastajanja vlažnostnega gradienta v celotnem postopku sušenja. Ugotoviti pri kateri vlažnosti je vlažnostni gradient največji in preučiti vpliv orientacije elementov na njegovo velikost.
- razvoj napetostnega polja po prerezu lesa v različnih časovnih intervalih sušenja; določitev vlažnosti pri kateri so sušilne napetosti najintenzivnejše, preučiti vpliv orientacije elementov in sušilnega programa na njihov razvoj.
- korelacijo pojavljanja napetostnega polja od vlažnostnega gradienta in ostrine sušenja.
- rezultati naj bi omogočili načrtovanje sušilnega postopka za optimalno doseganje kakovosti osušene bukovine.

2. PREGLED OBJAV

2.1. SUŠILNE KARAKTERISTIKE BUKOVINE

Bistvene lastnosti bukovine, ki vplivajo na sušilne karakteristike, uvrščajo to lesno vrsto med težavnejše. Negativno učinkujejo izrazite rastne napetosti, močno izražena prečna krčitvena anizotropija, ter splošno slabše permeabilnostne in difuzijske značilnosti.

2.1.1. Rastne napetosti v svežem lesu

Notranje ali rastne napetosti se v les vgradijo v zadnji fazi diferenciacije vlaken v kambijevi coni, ko se le te skušajo vzdolžno skrčiti in bočno razširiti, to pa jim preprečujejo starejša vlakna. Periferija debela je v aksialni smeri obremenjena na nateg, sredina pa na tlak. V tangencialni smeri pa je zunanja stran debela obremenjena na tlak, sredica debela pa je natezno obremenjena. Velikost notranjih napetosti narašča s premerom debela. Sproščanje teh napetosti povzroča pokanje in krivljenje lesa takoj po razrezu in pa tudi med samim procesom sušenja. V lesu bukve se lahko pojavljajo znatne rastne napetosti, ki pa jih s parjenjem pred sušenjem lahko zmanjšamo (Čufar, 2002).

2.1.2. Prečna krčitvena anizotropija

Krčenje lesa spada med njegove najneugodnejše lastnosti, saj zaradi higroskopnosti ne ostane dimenzijsko stabilen niti po osušitvi na primerno vlažnost. Volumensko krčenje je količinsko enako volumnu oddane vezane vode, celični lumni se v procesu sušenja praktično ne spreminjajo (Gorišek, 2009).

Zaradi nehomogene sestave lesa v različnih anatomskih smereh, se le ta v različnih smereh različno krči. V grobem velja razmerje med longitudinalnim, radialnim in tangencialnim krčenjem 1 : 10 : 20. Prečna krčitvena anizotropija pa poleg vlažnostnega gradienta največ prispeva k generiranju notranjih napetosti. Na krčenje pa vpliva tudi prisotnost tenzijskega lesa iz večjim krčenjem v vzdolžni smeri, ki znaša do 1,5 %.

Preglednica 2.1: Primerjava deleža vezane vode in krčenja pri različnih lesnih vrstah (Gorišek, 2004).

LESNA VRSTA	GOSTOTA ρ_0 (kg/m ³)	DELEŽ VEZANE VODE (%)	SKRČEK		
			VOLUMENSKI (%)	RADIALNI (%)	TANGENCIALNI (%)
Bukev	680	35,6	14 - 21	5,8	11,8
Brest	680		11,8 – 13,8	4,6 – 4,8	6,9 – 8,3
Hrast	650	24,5	12,2 - 15	3,5 - 4,7	7,7 - 10
Javor	590		11,5 - 11,8	3	8
Breza	610	28,9	13,7 - 14,2	5,3	7,8
Oreh	640		13,4 - 14	5,4	7,5
Jesen	690		12,8 - 13,6	4,6 - 5	8 - 8,4

Les bukve vsebuje veliko vezane vode, zato je tudi krčenje večje kot pri lesnih vrstah s primerljivo gostoto (pregl. 2.1). Poleg tega lahko vsebuje tudi večje deleže tenzijskega lesa kar še poveča nagnjenost k distorzijam (Gorišek, 2004).

2.1.3. Permeabilnost in difuzivnost bukovine

Za sušenje lesa sta zelo pomembni lastnosti permeabilnost in difuzivnost. Permeabilnost je pomembna predvsem za prvo fazo sušenja, ko iz lesa izhaja prosta voda. Količina proste vode (preglednica 2.2) je odvisna od drevesne vrste, letnega časa. Prevodnost ali permeabilnost je mera za vrednotenje sposobnosti toka fluida skozi porozni material pod vplivom tlačnega gradienta. Permeabilnost pri bukovini pogosto zmanjšuje močno otiljenje še posebej, če je prisotno rdeče srce.

Difuzivnost je definirana kot molekularno gibanje pod vplivom gradienta koncentracije. Odvisna je predvsem od temperature, lesne vlažnosti, količine stenskega matricala oz. gostote (pregl. 2.2). Koeficient vezane vodne difuzije se povečuje z naraščanjem temperature, z njo pa narašča tudi kinetična energija vodnih molekul. Bukovina spada med gostejše drevesne vrste in posledično ima višji delež celičnih sten, kar negativno vpliva na difuzivnost (Gorišek, 2004).

Preglednica 2.2: Delež celičnih sten, vezane in proste vode za posamezne drevesne vrste (Gorišek, 2004).

LESNA VRSTA	GOSTOTA ρ_0 (kg/m ³)	DELEŽ VEZANE VODE (%)	DEL PROSTE VODE (%)	DELEŽ CELIČNIH STEN	
				SUH LES (%)	VLAŽEN LES (%)
Bukev	680	35,6	80	37,2	55,1
Hrast	650	24,5	86	38	50,6
Breza	610	28,9	97	35,1	48,8
Robinija	730	19,5	70	43,1	54,4

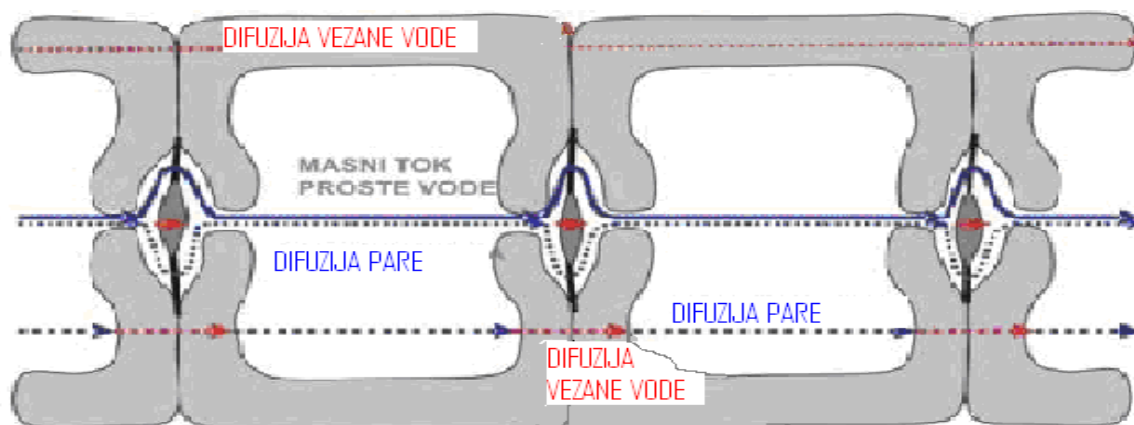
2.1.4. Obarvanje bukovine

Les bukve je na prostem zelo neobstojen, zato so pogosta različna obarvanja, ki so lahko biotskega ali abiotskega izvora. Obarvanja zaradi gliv preprečimo z zadostnim kroženjem zraka na skladišču, če pa se je že pojavilo ga omilimo s parjenjem pred začetkom sušenja. Pogosto pa do obarvanja bukovine pride zaradi previsokih začetnih temperatur sušenja. Periferija elementov je svetle barve, sredica pa se rdečkasto obarva. Ta pojav preprečimo s sušenjem pri nizkih temperaturah do TNCS, nato pa se temperatura dvigne.

2.2. MEHANIZEM SUŠENJA LESA

Sušenje lesa je sestavljeno iz odstranjevanja vode s površine lesa in toka vode iz notranjosti na površino. Od prevladujočega upora je odvisna vzpostavitev ustreznih parametrov v sušilnici (temperature, relativne zračne vlažnosti in hitrosti kroženja zraka). Voda iz notranjosti na površino prehaja na več načinov (sl. 2.1.):

- gibanje proste vode zaradi kapilarne tenzije oz. tlačnega gradienta kot rezultata vlažnostnega gradienta;
- gibanje higroskopsko vezane vode v parnem agregatnem stanju skozi celične lumne ali kot difuzija vode skozi celične stene kot posledica razlik v koncentracijah.



Slika 2.1: Shematski prikaz pretoka vode v lesu pri sušenju: pri svežem lesu prevladuje masni tok proste vode, pod vlažnostjo točke nasičenja celičnih sten pa kombinacija difuzije vezane vode skozi celične stene in difuzije pare prek lumnov (Gorišek, 2004).

2.2.1. Odstranjevanje vode s površine lesa

Pri konvekcijskem sušenju se kot prenosnik toplote uporablja topel in vlažen zrak. Na površini vlažnega lesa se vzpostavi temperatura vlažnega oz. mokrega termometra (T_m), zrak, ki kroži nad površino, pa ima temperaturo suhega termometra (T_s). Količina prenesene toplote iz zraka na površino lesa je premo sorazmerna s psihrometrsko razliko. Večji pomen imata še hitrost kroženja zraka in oblika površine.

Dokler je površina vlažna, je sušilna hitrost konstantna. Če se vlažnost površine zmanjša, se zmanjšata temperaturna in vlažnostna razlika med površino in zrakom. Tik pod površino lesa nastane difuzijski upor, ki v nadaljevanju postopka sušenja narekuje ustrezne pogoje sušenja.

2.2.2. Transport proste vode

Nad točko nasičenja celičnih sten (TNCS) se v lumnih celic nahaja prosta voda. Gibanje proste vode razlagamo s kapilarno tenzijo, ki obstaja med tekočino in plinom. Za masni tok proste vode iz notranjosti na površino, morata biti izpolnjena dva pogoja po Hawleyovi hipotezi: v prosti vodi morajo biti prisotni zračni mehurčki, ki so večji kot pore v

pikenjskih membranah in med celicami mora obstajati sklenjena povezava (les je permeabilen)(Kolin, 2000).

Med sušilnim procesom je najpomembnejši radialni in tangencialni tok vode, saj čela premazujemo, da onemogočimo vzdolžno izhajanje vode. Prehod vode skozi celične lumne je dokaj enostven, upočasnjeni pa se, ko le ta prehaja skozi pikenje. Velikost odprtih v pikenjih ni pomembna le z vidika pretoka vode v lesu, ampak tudi z vidika nastale kapilarne tenzije, ki ob prekoračitvi prečne tlačne trdnosti lesa privede do kolapsa. Vzdolžni pretok proste vode pri listavcih poteka po trahejah. Bolj kot pri iglavcih je pri listavcih učinkovit radialni pretok po trakovih, tok v tangencialni smeri pa je odvisen od pikenjske povezave.

Transport proste vode pri listavcih pogosto ovirajo sekundarne spremembe lesa. Najpomembnejša je ojedritev. V tem procesu se nizko molekularne jedrovinske snovi odlagajo v celično steno, lumne in na pikenjsko membrano (margo), česar pa pri bukovini ne zasledimo. Druga sekundarna sprememba pa je otiljenje – vraščanje parenhimskih celic skozi pikenje v lumne trahej, kjer se razrastejo in popolnoma zaprejo trahejo. Oba pojava zmanjšujeta prevodnost (permeabilnost) lesa in s tem podalšujeta čase sušenja. Negativni učinek teh procesov lahko s parjenjem, (ekstrahiranjem, kemisko obdelavo,..) pred sušenjem tudi zmanjšamo (Siau, 1995).

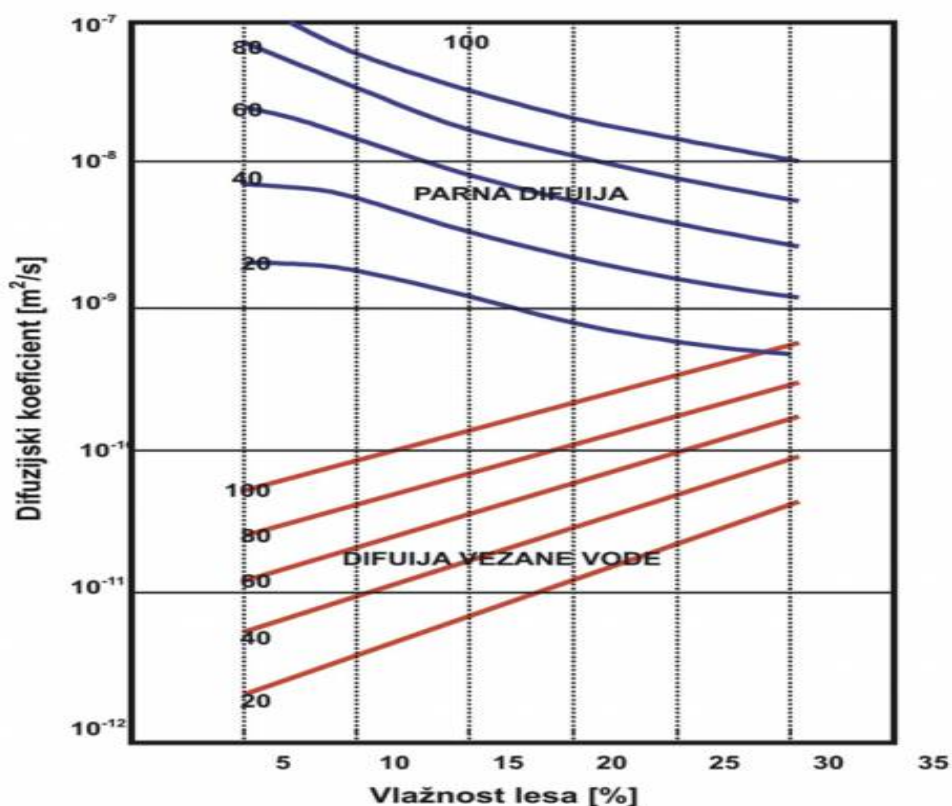
Najugodnejše razmere izločanja proste vode dosežemo, če ostane površina vlažna, kapilarni vlek po porozni strukturi lesa pa se vzpostavi vse do sredine. Na hitrost sušenja vplivamo s pretokom zraka ter možno razliko vlažnosti in temperature (psihrometrsko razliko) med površino lesa in zrakom. Pri prevodnih lesovih lahko ob ustreznih razmerah sušenja vzpostavimo kapilarni tok do sredine deske, kar pomeni najugodnejše razmere sušenja. Z neprimernim sušenem prevodnih lesov oz. pri sušenju neprevodnih lesov se na površini vzpostavi difuzijski upor. V takih razmerah se morajo večje količine proste vode prenesti iz notranjosti na površino po močno upočasnjenem difuzijskem toku.

2.2.3. **Transport vezane vode**

Pod vlažnostjo točke nasičenja celičnih sten (TNCS) je značilen difuzijski tok vode, sestavljen iz difuzije vezane vode skozi celične stene in parne difuzije skozi celične lumne.

Difuzijsko gibanje vezane vode skozi celične stene poteka hitreje pri višji vlažnosti lesa, pospešimo pa ga lahko tudi s povišanjem temperature. Difuzija v radialni smeri je od 17 do 25 odstotkov večja od difuzije v tangencialni. Razlog je v radialno potekajočih trakovih in razporedu mikrofibril v radialnih stenah. Hkrati je difuzijski koeficient vezane vode v vzdolžni smeri približno 2,5-krat večji kot v tangencialni. Na tok vezane vode pomembno vpliva tudi ojedritev, ki povečuje gostoto in hkrati deluje kot difuzijska pregrada (Siau, 1995).

Koeficient difuzije pare v lumnih je veliko večji od koeficienta difuzije vezane vode. Temperaturno narašča zaradi naraščanja parnega tlaka, medtem ko je pri visokih vlažnostih manjši kot pri nižjih. Čeprav je parna difuzija skozi lumne 100 – 1000 krat hitrejša (sl. 2.2) le ta skorajda ne poteka skozi pikenje, saj so le te premajhne in premalo številčne.



Slika 2.2: Odvisnost difuzijskega koeficienta vezane vode in pare od lesne vlažnosti in temperature (Gorišek, 2004).

Na difuzivnost lesnega tkiva vpliva več dejavnikov, od katerih so najpomembnejši: smer toka, gostota, temperatura, vlažnost in usmerjenost vlaken. Posebno pri nizkih vlažnostih lesa (do 15 odstotkov) postane upornost pare v celičnih lumnih zanemarljiva v primerjavi z difuzijskim tokom v celičnih stenah. Prečna difuzija, ki je prevladujoča pri sušenju lesa, je zato odvisna le od vezane vodne difuzije v celičnih stenah in poroznosti lesa oziroma deleža celičnih sten (Perre, 2007).

V sušilnem procesu difuzijski tok prevzame prevladujočo vlogo takoj, ko se površina lesa osuši pod točko nasičenja celičnih sten (Gorišek s sod., 1994, 2004).

2.3. VLAŽNOSTNI GRADIENT

Zaradi mehanizma sušenja se v obdelovancu vzpostavi vlažnostni gradient, z njegovo velikostjo pa narašča hitrost izhajanja vezane vode. Gradient pa ne sme biti prevelik, saj se površina preveč osuši, kar povzroča napake zaradi krčenja in nastajanja sušilnih napetosti. Posledično je kakovost posušenih asortimentov posredno odvisna od velikosti vlažnostnega gradienta med samim sušilnim procesom, kot tudi po koncu sušenja. Vlažnostni gradient lahko izrazimo na dva načina: v praksi vlažnostni gradient pogosto

predstavimo kot razliko med vlažnostjo notranjih in zunanjih slojev sušičnega se elementa ali pa ga natančneje izračunamo po formuli:

$$\frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{u_{sre.} - u_{zu.}}{\Delta x} = [\% / cm] \quad \dots(1)$$

Δx – razdalja med površino in sredino deske (cm)

u_{sre} – vlažnost v sredini deske (%)

$u_{zu.}$ – vlažnost na površini deske (%)

Najbolj zanesljiva metoda za ugotavljanje vlažnostnega gradienta je razžaganje kontrolnega vzorca na neparno število lamel, ter nato določanje vlažnosti posamezne lamele z gravimetrično metodo. Ker pa je metoda destruktivna, se v industriji vlažnostni gradient spremlja z uporovnim merilnikom vlage, z namestitvijo elektrod na različnih globinah. Hiba te metode je manjša zanesljivost.

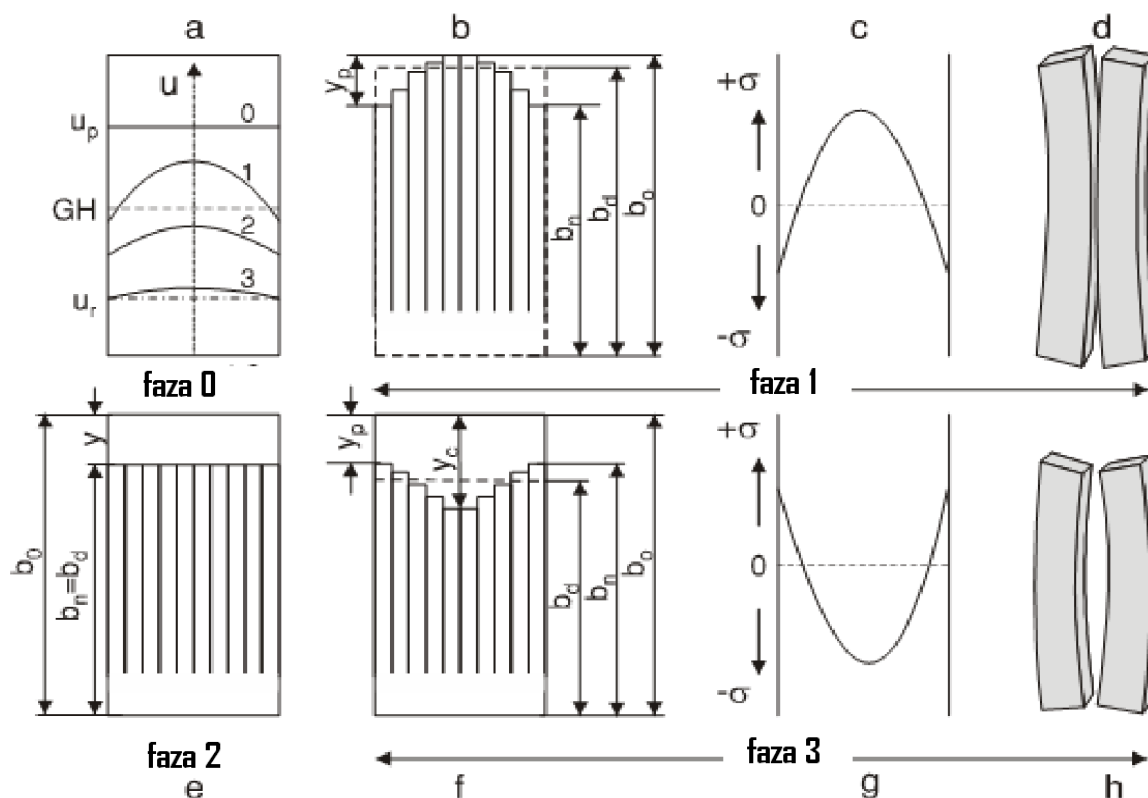
Po priporočilu European Drying Group (EDG) naj bi se elektrode vlagomera pri določanju vlažnosti površine nahajale na 1/6 debelin deske, povprečna vlažnost deske naj bi bila izmerjena na 1/3 deske, vlažnost centralnega dela deske pa na 1/2 deske (pregl. 2.3).

Preglednica 2.3: Mejne vrednosti vlažnostnega gradienta za posamezne kakovostne razrede po EDG.

Kakovostni razred	90% vseh izmerjenih vrednosti mora biti manjši od
S	$U_k \times 0.4$
Q	$U_k \times 0.3$
E	$U_k \times 0.2$

2.4. NASTANEK NOTRANJJIH NAPETOSTI

Med konvekcijskim sušenjem voda prehaja z mesta z večjo vlažnostjo na mesta z manjšo vlažnostjo, po prerezu se pojavi vlažnostni gradient. Površina z nižjo vlažnostjo se krči bolj, kot sredica z višjo vlažnostjo, v lesu nastane napetostno polje. Kolin (2000) je razvoj napetostnega polja razdelil v 3 faze (sl.2.3).



Slika 2.3: Razvoj sušilnih napetosti med sušilnim procesom : a) vlažnostni gradient v različnih fazah sušenja; b), c) in d) napetostno polje v 1. fazi generiranja napetosti in njegov vpliv na obdelovance po razžagovanju ; e) napetostno polje v 2. fazi; f), g) ter h) napetostno polje po koncu sušenja in njegov vpliv na obdelovance po razžagovanju (Kolin, 2000).

Faza 1

Površina lesa se osuši pod TNCS, v notranjosti pa se še vedno nahaja prosta voda. Površina se pričenja krčiti, vendar je krčenje manjše kot bi lahko bilo, če se sredica temu ne bi upirala. Če v tej fazi vzorec razrežemo na tanke lamele (sl. 2.3 b), ugotovimo da se zunanje lamele skrajšajo (zavzamejo trenutno ravnovesno stanje). Njihova dolžina znaša b_n in je manjša od dolžine vzorca pred razžagovanjem b_d . Nasprotno pa se centralne lamele podaljšajo, njihova dolžina b_0 je večja od dolžine vzorca b_d . To pomeni, da je periferija obremenjena na nateg, sredica vzorca pa na tlak (sl. 2.3 c). Za hitro preverjanje napetostnega stanja pa vzorec prežagamo na polovico (prežagovalna metoda), napetostno stanje se odrazi kot deformacija lamel v obliki korita (sl. 2.3 d).

Faza 2

Vlažnost je po celotni debelini padla pod TNCS, vendar pa še vedno obstaja vlažnostni gradient. To je faza v kateri notranje napetosti menjajo predznak. Ker les ni idealno elastičen material, se površina trajno natezno deformira, sredica pa tlačno.

Faza 3

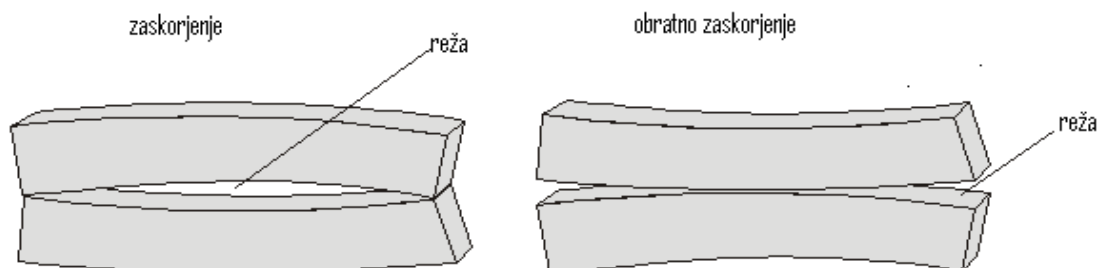
Vlažnost je po celotnem prerezu približno enaka ravnovesni vlažnosti lesa v danih pogojih. Rezultat trajnih deformacij v lesu je večje krčenje sredice kot zunanjih slojev (sl. 2.3 f). Posledično se na površini pojavijo tlačne napetosti, v sredici pa natezne (sl. 2.3 d). Lamele za prežagovalno metodo se deformirajo obratno kot v prvi fazi (sl. 2.3 e).

Pri konvektivnem sušenju se je nemogoče popolnoma izogniti zaskorjenju, vendar pa je mogoče s pravilnim sušilnim programom in spremljanjem sušilnega procesa notranje napetosti toliko zmanjšati, da le te ne presežejo trdnosti lesnega tkiva (Kolin, 2000).

2.5. METODE ZA DOLOČANJE NOTRANJIH NAPETOSTI

Če želimo notranje napetosti zmanjšati, jih moramo najprej zaznati in ovrednotiti, šele nato lahko s spremembo sušilnega programa vplivamo na njihovo zmanjšanje. Poznamo več različnih načinov vendar pa so večinoma vsi destruktivni.

Defleksijska ali prežagovalna metoda je definirana na krivljenju lamel zaradi napetostnega gradienta. Z merilnim klinom ali kljunastim merilom izmerimo velikost reže, velikost le te pa nam predstavlja velikost notranjih napetosti (sl. 2.4).

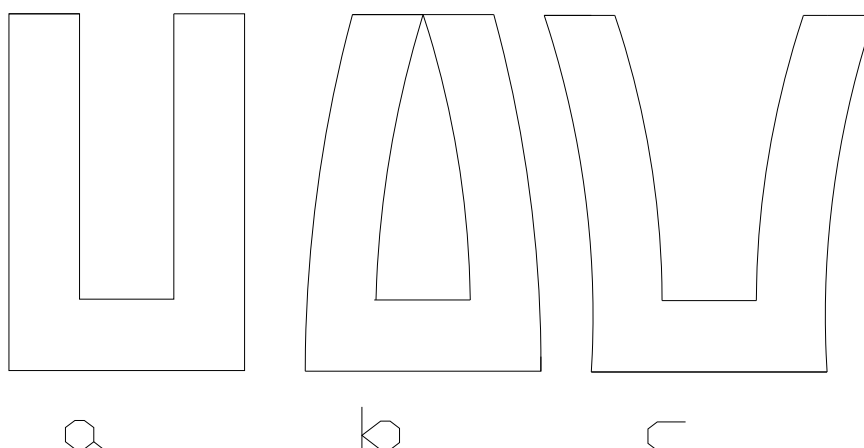


Slika 2.4: Sločenje lamel pri prežagovalni metodi in mesto kjer merimo velikost reže.

Način izdelovanja lamel je sledeč (Welling, 1994): iz kontrolnih desk se izrežejo vzorci debeline 15mm (v smeri vlaken). Nato vzorec na strani obrežemo za nekaj milimetrov, nato pa ga odrežemo na končno dolžino 100mm. S tem načinom izdelave vzorca se najbolj približamo realnim situacijam v proizvodnji. Vzorec nato prežagamo na polovico in lamele pustimo stati pri sobnih pogojih; za iglavce je to 24 ur za listavce pa 48 ur. Potem času izmerimo velikost reže, ki je nastala med lamelama. Enak postopek je opisan tudi v standardu EN 14461, ki predpisuje postopek merjenja zaskorjenosti.

EDG (European drying group) priporoča, da 90 % vseh izmerjenih vrednosti manjših od 3 mm, če želimo najnižjo kakovost posušenega lesa (S), za srednjo kakovost (Q) naj bo velikost reže manjše od 2 mm in za največjo kakovost (E) naj bodo vrednosti manjše od 1 mm (Gorišek, 1997 in Milić, 2006).

Naslednja metoda je vilični test. Vzorce iz sušečih se elementov izrežemo na primerni oddaljenosti od čela, da zanemarimo vpliv hitrejšega sušenja s prečnih čelnih površin. Vzorcem nato izrežemo sredico, da dobimo proste roglje.



Slika 2.5. prikaz notranjih napetosti z viličnim testom: a – brez notranjih napetosti, b – zaskorjenje, c – obratno zaskorjenje.

Če se roglji upognejo navznoter (zaskorjenje sl. 2.5 b) pomeni, da so zunanje strani vzorca tlačno obremenjene, notranja stran pa natezno. V primeru, da se roglji ukrivijo navzven (obratno zaskorjenje sl. 2.5 c), pa je zunanost obremenjena na nateg sredica pa na tlak. Vilični test je dokaj težaven za izdelavo, zato je za kontroliranje v proizvodnji bolj primerna prežagovalna metoda.

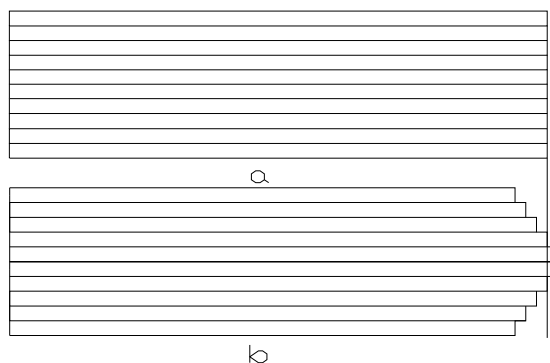
Cassens (2002) navaja, da so deformacije posledica vlažnostnega gradienta, zaostalih napetosti ali pa mešanica obeh vzrokov. Zaostale napetosti so vzrok deformacijam, ki se pojavijo takoj po razžagovanju kontrolnih vzorcev. Deformacije, katerih vzrok pa se skriva v vlažnostnem gradientu, se popolnoma odrazijo po 12 urah. V primeru, da se deformacije pojavijo takoj in kasneje naraščajo, takrat so posledica obeh vzrokov. Cassens (2002) pojasnjuje deformacije vilic po kondicioniranju z naslednjimi dejavniki:

1. Po izdelavi viličnega testa ni deformacij	Po 12 urah pri sobnih pogojih:
	1. ni deformacij: v elementu ni notranjih napetosti in vlažnostnega gradienta.
	2. vilice obrnjene navznoter (zaskorjenje): sredica ima višjo vlažnost kot površina.
	3. vilice obrnjene navzven (obratno zaskorjenje): površina ima višjo vlažnost kot sredica, v praksi redke pojav.

2. Po izdelavi viličnega testa se vilice obrnejo navznoter	Po 12 urah pri sobnih pogojih:
	1. deformacija ostane enaka: v elementu je napetostno polje vendar ni vlažnostnega gradienta; vzrok je nepravilno kondicioniranje.
	2. vilice se še bolj obrnejo navznoter: sredica ima višjo vlažnost kot površina.
	3. vilice manj obrnjene navznoter: pogosto v praksi, vzrok je nepravilno kondicioniranje.
	4. vilice ravne: površina ima višjo vlažnost kot sredica; vzrok je previsoka zračna vlažnost v prostoru kjer se je vzorec nahajal.

3. Po izdelavi viličnega testa se vilice obrnejo navzven	Po 12 urah pri sobnih pogojih:
	1. deformacija ostane enaka: v elementu je napetostno polje vendar ni vlažnostnega gradienta; vzrok je nepravilno kondicioniranje.
	2. vilice se še bolj obrnejo navzven: površina ima višjo vlažnost kot sredica; vzrok je previsoka zračna vlažnost v prostoru kjer se je vzorec nahajal.
	3. vilice manj obrnjene navzven: notranji sloji so bili vlažnejši od zunanjih, vendar je kondicioniranje predolgo trajalo.
	4. vilice ravne: vlažnost zunanjih slojev nižja od notranjih; stanje je posledica prenizke zračne vlažnosti v prostoru, kjer se je vzorec nahajal.

Ekstenziometriška metoda: pri tej metodi merimo deformacije in s tem napetosti na nizu lamel, izrezanih po debelini vzorca. Lamlele iz tlačno obremenjenih delov se podaljšajo, iz natezno obremenjenih pa zmanjšajo (sl.2.6). Prav tako kot vilični test, se tudi ta metoda v praksi ne uporablja pogosto.



Slika 2.6: Način določevanja notranjih napetosti z ekstenziometersko metodo: a - velikost vzorca pred razžagovanjem, b – lamele po razžagovanju.

Metode, ki niso destruktivne, pa slonijo predvsem na poznavanju napetostnih funkcij in parametrov materiala. Notranje napetosti je mogoče posredno izračunati iz vlažnostnega gradienta. Trenutno najbolj uporabna nedestruktivna metoda se zdi metoda akustične emisije, ki jo je mogoče direktno vključiti v regulacijski krog, vendar pa je še v razvojni fazi (Gorišek s sod., 1994).

V procesu sušenja v lesu nastajajo majhne razpoke, zaradi sušilnih napetosti. Med tem se sproščajo zvočni signali (poki), ki jih beležimo z metodo akustične emisije. Prednost te metode je takojšnje zaznavanje sprememb v strukturi lesa (notranje razpoke, ki so posledica sušilnih napetosti), brez prekinjanja sušilnega procesa. To omogoča hitre spremembe sušilnega programa, v smeri zmanjšanja sušilnih razpok ob maksimalni sušilni hitrosti. Vodenje sušilnega procesa poteka tako, da ne presežemo kritičnih vrednosti, ki so odvisne od lesne vrste, velikosti asortimentov, temperature, želene končne kvalitete posušenega lesa (Danigelova in Viglasky, 2004).

2.6 RELAKSACIJA NOTRANJIH NAPETOSTI

Notranje napetosti povzročajo krivljenje, razpoke na površini, pa tudi satavost elementov. Velikost notranjih napetosti je odvisna od sušilnega programa, vlažnosti, orientiranosti elementov, intenzivnost krčenja. Ostrejši sušilni programi povzročajo večje notranje napetosti in s tem večje deformacije lesa pri nadaljnji obdelavi.

Zaskorjenje je ena izmed najbolj pogostih napak med procesom sušenja. Vzrok je prehitro sušenje površine lesa na začetku druge faze sušilnega procesa, ko vlažnost površine pade pod TNCS. Izognemo se mu lahko s sušenjem pri višji relativni zračni vlažnosti na začetku druge faze sušenja. Če pa do zaskorjenja vseeno pride in to zaznamo med samim sušenjem, ga saniramo z navlaževanjem v krajših intervalih (2 - 4 ure). Navlaževanje poteka pri temperaturi sušenja ($T_{suš.}$) oz. le to nekoliko povečamo pri lesnih vrstah, ki to dopuščajo ($T_{suš.} + 5$ do 10 °C). Navlažujemo toliko časa, da se površina navlaži do povprečne vlažnosti lesa. Med navlaževanjem voda iz osrednjega dela še vedno prehaja na površino,

tako da sušenje ni prekinjeno. Skrajna oblika zaskorjenja je satavost, ki pa ga ne moremo sanirati.

Sušilne napetosti, ki so bile v les vnesene med procesom sušenja, zmanjšamo s kondicioniranjem. V tej fazi na les deluje zrak povišane temperature in vlažnosti. Kondicioniranje se prične, ko najbolj vlažen vzorec doseže končno vlažnost. Temperatura suhega termometra (T_s) ostane enaka, temperaturo vlažnega termometra (T_m) pa določimo tako, da je ravnovesna vlažnost za 3-4 % višja od končne vlažnosti. Za fazo kondicioniranja je pomembno, da v komori zagotovimo želeno ravnovesno vlažnost (vlažnost, ki jo bo les vzpostavil v okolju, kjer se bo uporabljala), ki je odvisna od temperature in relativne zračne vlažnosti. Kontroliranje relativne zračne vlažnosti poteka s pomočjo psihrometra in psihrometriških tablic, ali pa s pomočjo furnirja limbe ali celuloze, ki zaradi svoje higroskopičnosti v trenutku spreminjata svojo vlažnost zaradi spremembe klime. Proces navlaževanja komore poteka z vodno paro ali vodo. Pri navlaževanju z vodno paro je potrebno komoro predhodno delno ohladiti.

Visoka relativna vlažnost zraka v sušilnici povzroči navlaževanje površinskih slojev lesa (les absorbira vlago iz zraka), ki imajo nižjo vlažnost kot sredica. Istočasno pa poteka difuzija vezane vode iz sredice proti zunanjim slojem. Končni rezultat kondicioniranja je enakomeren razpored vlage po celotnem prerezu.

Z vidika sušilnih napetosti pa so zunanji sloji pred kondicioniranjem obremenjeni na tlak. V sredini elementov pa vlada obratno stanje. Posledica teh dodatnih tlačnih napetosti je zmanjševanje predhodnih nateznih napetosti, ki so nastale med procesom sušenja. Če kondicioniranje prekinemo v trenutku, ko so natezne napetosti enake tlačnim, v materialu ni nobenih napetosti. V primeru, da je faza kondicioniranja predolga in se zunanji sloji preveč navlažijo, nastanejo v zunanjem sloju velike trajne natezne napetosti. Posledica tega je obratno zaskorjenje (Kolin, 2000).

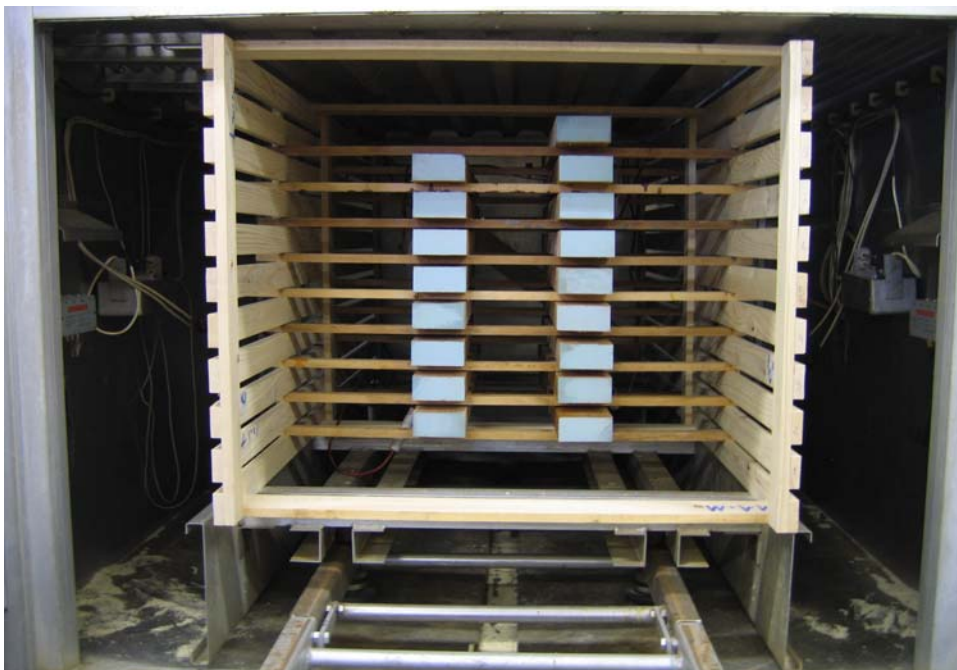
3. MATERIALI IN METODE

3.1. MATERIAL

V eksperimentu so bile uporabljene sveže robljene bukove deske (*Fagus sylvatica* L.) debeline 50 in 25 mm. Začetna vlažnost desk je bila med 47 in 89%. Dolžina desk je znašala 1100 mm, širina pa od 110 do 115 mm. Pri blažjem režimu je bilo v eksperiment vključenih 6 tangencialnih in 11 radialnih desk debeline 50 mm. V ostrejšem režimu pa je bilo vključenih 6 tangencialnih in 10 radialnih elementov debeline 50 mm in 7 tangencialnih in 14 radialnih elementov debeline 25mm.

3.2. METODE

Eksperiment je potekal v pilotski eksperimentalni sušilni komori. Deske so bile pred začetkom sušenja na čelih premazane s premazom nepropustnim za vodo in paro (prav tako so bila čela premazana po vsakem odvzemu kontrolnih vzorcev), s čimer smo preprečili prehitro sušenje čelnih površin, zmanjšale so se razlike v vlažnosti po debelini elementov in preprečil pojav čelnih razpok. Deske so se nato zložile v poseben lesen okvir s katerim se je zagotovil enakomeren pretok zraka okrog vseh desk (sl. 3.1).



Slika 3.1: Leseni okvir, ki je v sušilni komori zagotavljal enakomeren pretok zraka okrog elementov (Laboratorij za sušenje lesa, Oddelek za lesarstvo).

Spremembo vlažnosti smo spremljali na štirih sledilnih deskah z uporovnim merjenjem lesne vlažnosti. Vzporedno z električnimi meritvami lesne vlažnosti, smo vlažnost sukcesivno v intervalih na dva dni določali tudi z gravimetrično metodo. Sledilni vzorci so bili odvzeti 50 mm od čela, da smo izključili vpliv robnega sušenja s čelnih površin.

Pri vsakem odvzemu so bili izžagani trije vzorci debeline 15 mm (v smeri vlaken). Pri vsakem odvzemu smo spremljali vlažnost, vlažnostni gradient in notranje napetosti (sl. 3.2) Začetna vlažnost desk je bila določena s standardno gravimetrično metodo (EN 13183-1):

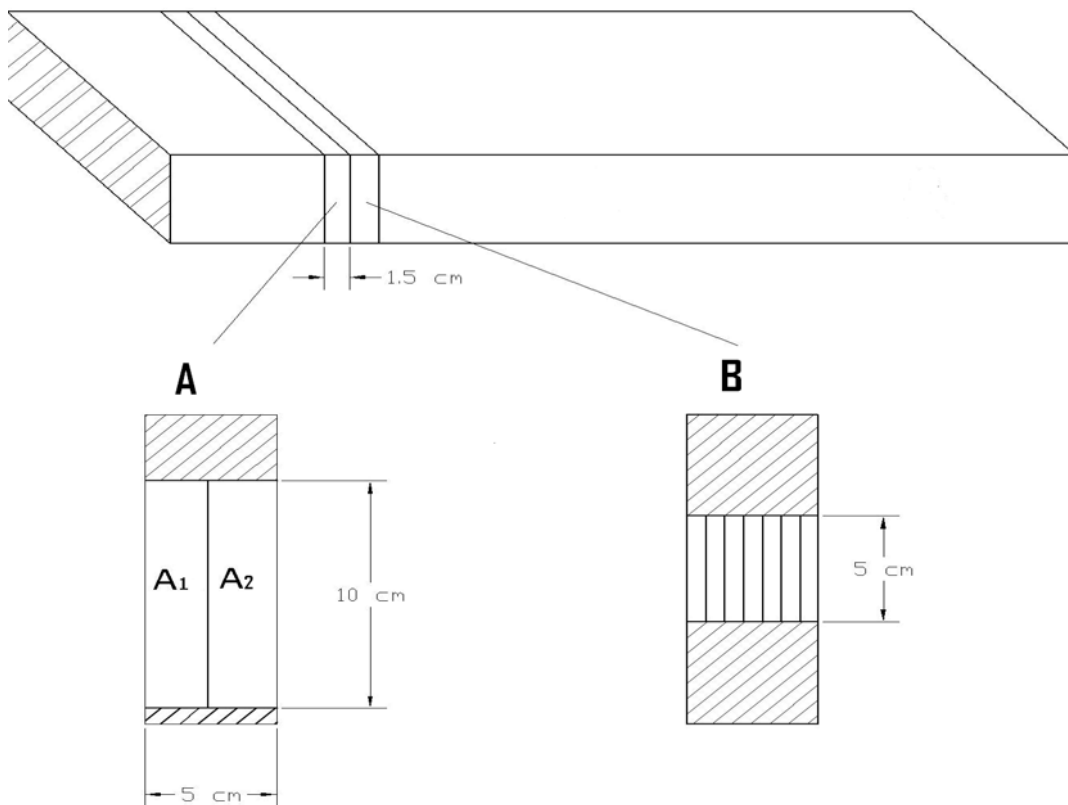
$$u = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 = [\%] \quad \dots (2)$$

Kjer je:

u - vlažnost lesa (%)

m_1 - masa vzorca v vlažnem stanju (g)

m_0 - masa absolutno suhega lesa (g)



Slika 3.2: Prikaz razžaganja testnih vzorcev za meritev notranjih napetosti in vlažnostnega gradienta.

3.2.1. Programi sušenja

Uporabljeni so bili nekoliko modificirani standardni sušilni programi – režimi, tako, da smo v enem primeru režim poostriili v drugem pa omilili. V začetnih fazah sušenja so bile nastavljene nižje temperature sušenja, da bi preprečili obarvanje obdelovancev. Segrevanje sušilnice in materiala je trajalo 15 h, kondicioniranje pa 30h (enako za oba režima). Sušilni programi so predstavljeni v preglednici 3.1 in 3.2. Ostrino sušenja smo nadzorovali posredno, preko trenutne vlažnosti elementov v sušilnici in ravnovesne vlažnosti. Ostrina sušenja je izračunana po naslednji formuli:

$$OS. = \frac{u_{trenutna}}{u_r} \quad \dots(3)$$

Kjer je: os. – ostrina sušenja

$u_{trenutna}$ – trenutna vlažnost

u_r – ravnovesna vlažnost

Preglednica 3.1: Režim sušenja za elemente debeline 50mm sušene z blažjim režimom.

FAZA	u (%)	Ts (°C)	ΔT (°C)	Tv (°C)	φ (%)	ur (%)	ostrina
SEGREVANJE	70	32	1	31	93	22,4	3,57
SUŠENJE	70	32	2	30	87	17,9	4,47
	60	32	2	30	87	17,9	3,91
	50	32	2	30	87	17,9	3,35
	40	32	2	30	87	17,9	2,79
	35	34	2	32	87	18	2,22
	30	36	3	33	81	15,6	2,24
	25	38	5	33	70	12,4	2,42
	20	40	13	27	36	6,6	3,79
	15	48	18	30	28	5	4,00
8	56	19	37	29	4,9	3,06	
KONDICIONIRANJE	8	56	4	52	81	13,9	0,58
OHLAJANJE	8	30	7	23	55	9,7	0,82

Preglednica 3.2: Režim sušenja za elemente debeline 50mm sušene z ostrejšim režimom.

FAZA	u (%)	Ts (°C)	ΔT (°C)	Tv (°C)	φ (%)	ur (%)	ostrina
SEGREVANJE	70	30	1	29	93	22,3	3,6
SUŠENJE	70	30	2	28	86	17,9	4,5
	60	30	3	27	79	15,3	4,6
	50	30	3	27	79	15,3	3,9
	40	30	3	27	79	15,3	3,3
	30	30	3	27	79	15,3	2,6
	25	32	3	29	80	15,4	1,9
	22	34	5	29	69	12,1	2,1
	20	40	13	27	36	6,6	3,3
	15	55	18	37	32	5,2	3,8
	8	65	19	46	35	5,1	2,9
KONDICIONIRANJE	8	65	4	61	82	13,6	0,6
OHLAJANJE	8	30	7	23	55	9,7	0,8

3.2.2. Določanje sušilnih parametrov

3.2.2.1. Določanje sušilne hitrosti

Sušilna hitrost smo na vsakem intervalu določali gravimetrično po naslednji enačbi:

$$\frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{\bar{u}_p - \bar{u}_t}{t_p - t_t} = [\% / h] \quad \dots (3)$$

Kjer je: $\Delta u / \Delta t$ - sušilna hitrost

$\bar{u}_p - \bar{u}_t$ - razlika povprečnih vlažnosti med dvema intervaloma

$t_p - t_t$ - čas med dvema vzorčenjema

3.2.2.2. Merjenje vlažnostnega gradienta

Vlažnostni gradient smo na deskah debeline 50 mm določili na 5 lamel, pri deskah debeline 25 mm pa na treh. Shema izrezovanja je prikazana na sliki 3.2A. Pri vsakem odvzemu so bile na tračni žagi po debelini vzorca narezane lamele in odstranili stranski deli. Lamelle smo nato stehali in potem sušili do konstantne mase. Sledilo je ponovno tehtanje. Vlažnost posamezne lamele smo določili z gravimetrično metodo, ter določili vlažnostni gradient po enačbi:

$$\frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{u_{sre.} - u_{zu.}}{\Delta x} = \frac{u_{sre.} - \left(\frac{u_1 + u_5}{2} \right)}{\Delta x} = [\% / cm]$$

Kjer je: $\Delta u / \Delta x$ – vlažnostni gradient

$u_{srednja}$ – povprečna vlažnost lamele v sredini vzorca

$u_{zunanja}$ – povprečna vlažnost zunanjih lamel

Δx – razdalja med zunanjo in srednjo lamelo

3.2.2.3. Merjenje zaskorjenja (sušilnih napetosti)

Sušilne napetosti med sušilnim postopkom smo spremljali po standardizirani metodi prežagovanja (ENV 14464). Za merjenje notranjih napetosti je bilo potrebno vzorec na tračni žagi prerezati na polovico, dolžina lamel je znašala 100 mm. Velikost odprtine med lamelama določa velikost notranjih napetosti (sl. 3.3). Meritev se je izvajala takoj po odvzemu in po 48h, ko se je vlažnost enakomerno porazdelila po celotnem prerezu. Lamelle so bile med tem časom zavite v neprepustne vrečke. Shema meritve je prikazana na sliki 3.2B.



Slika 3.3: Kontrolni vzorec za merjenje notranjih napetosti po izdelavi.

4. REZULTATI

4.1. ČAS SUŠENJA

Z izbiro blažjega in ostrejšega sušilnega programa smo vplivali na dejansko doseženi čas izvajanja posameznih faz sušilnega procesa. Sušenje se je izvajalo po sušilnih programih opisanih v preglednicah 3.1 in 3.2 s pomočjo mikroprocesorskega vodenja. Dejanski padec vlažnosti in časi posameznih sušilnih faz pa so prikazani v preglednici 4.1.

Preglednica 4.1: Trajanje posameznih intervalov sušenja ločeno za blažji in ostrejši režim (vlažnost spremljana z uporovnim merilnikom).

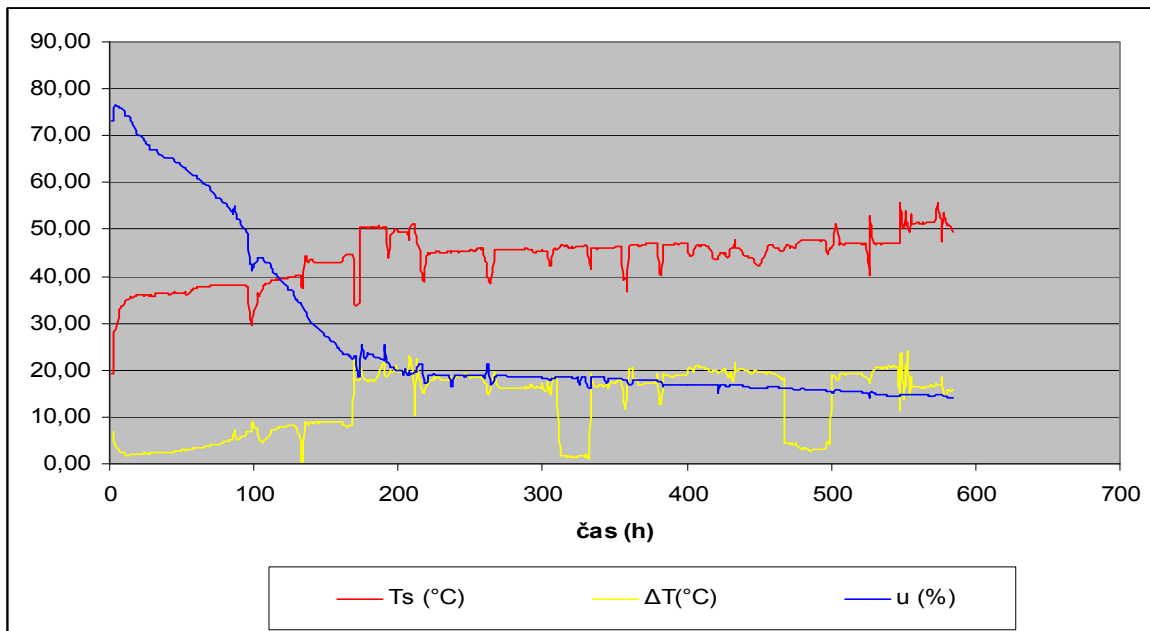
FAZA	Blažji režim		Ostrejši režim	
	čas (h)	u (%)	čas (h)	u (%)
SEGREVANJE	14	74,1	10	71,85
SUŠENJE (1)	21	70,1	15	69,85
SUŠENJE (2)	64	60,1	58	59,6
SUŠENJE (3)	92	51,1	86	50,05
SUŠENJE (4)	115	40,5	119	39,78
SUŠENJE (5)	128	36,5	157	24,25
SUŠENJE (6)	139	30,3	174	22,25
SUŠENJE (7)	157	25,8	201	20,25
SUŠENJE (8)	322	18,25	244	19,75
SUŠENJE (9)	544	14,75	449	13,3
SUŠENJE (10)			470	13,3
KONDICIONIRANJE	574	14,55	502	12,08
OHLAJANJE	576	14	504	12,55

Celotni čas sušenja je pri blažjem režimu znašal 576 ur (24 dni), čas sušenja z ostrejšim režimom pa je bil za 14,3 % krajši in je trajal 504 ure (21 dni). Segrevanje elementov je pri blažjem režimu trajalo 14 ur, pri ostrejšem pa 10h. Aktivna faza sušenja je potekala 530 ur pri blažjem režimu in 460 ur pri ostrejšem režimu, kondicioniranje elementov pa 30 ur pri blažjem in 32 ur pri ostrejšem sušenju, ohlajanje elementov pa je pri obeh režimih trajalo 2 uri.

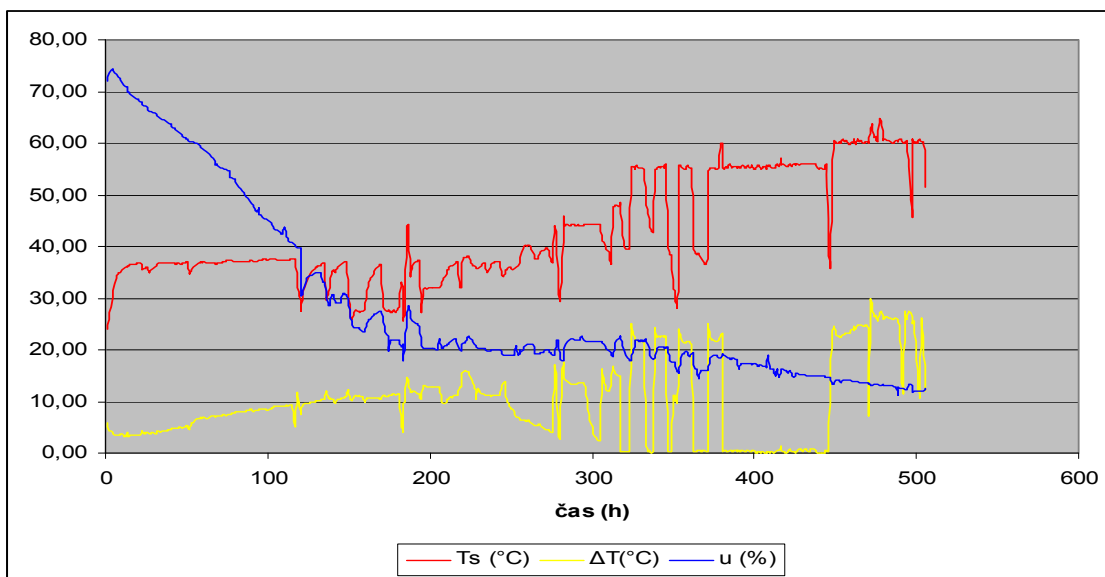
Začetna vlažnost bukovine je bila pri blažjem režimu (pril. A) med 65 in 92 % ($u_{pov.} = 78,9$ %), pri ostrejšem režimu (pril.B) je tako bila med 42 in 66 % ($u_{pov.} = 53,2$ %). Končna vlažnost elementov sušenih z blažjim režimom je znašala od 8,8 do 12,4 % ($u_{pov.} = 10,8$ %), pri ostrejšem režimu pa med 7,6 in 11,9 % ($u_{pov.} = 9,7$ %). Med sušenjem se je iz lesa v povprečju izločilo 68,1 % vode pri blažjem in 43,5 % vode pri ostrejšem režimu. Povprečna vlažnost radialnih elementov je bila 11,3% (ostrejši režim: 10,3%) in 9,8% pri tangencialnih elementih (ostrejši režim: 8,7 %).

Temperatura je pri obeh režimih v fazi segrevanja narasla na 36 °C, nato pa se je pričela aktivna faza sušenja, v kateri se je temperatura postopno dvignila na 50 °C pri blažjem režimu in na 57 °C pri ostrejšem režimu. Kondicioniranje elementov pri blažjem režimu, je

potekalo pri temperaturi med 51 in 57 °C, pri ostrejšem pa med 52 °C do 60 °C. Sušilni parametri in njihovo nihanje med sušenjem so prikazani na sliki 4.1 in 4.2.



Slika 4.1: Spreminjanje lesne vlažnosti, psihrometerske razlike in temperature sušenja v odvisnosti od časa sušenja med blažjim sušilni režimom za elemente debeline 50 mm.



Slika 4.2: Spreminjanje lesne vlažnosti, psihrometerske razlike in temperature sušenja v odvisnosti od časa sušenja med ostrejšim sušilni režimom za elemente debeline 50 mm.

4.2. SUŠILNA HITROST

Hitrost sušenja je z zmanjševanjem vlažnosti padala, kar je razvidno iz preglednic 4.1 in 4.2. Pri obeh režimih se je sušilna hitrost skokovito zmanjšala, ko je vlažnost padla pod TNCS, prav tako je za oba režima je značilna večja sušilna hitrost pri tangencialnih elementih.

Pri sušenju z blažjim režimom (pregl 4.2 in pril. C), je povprečna sušilna hitrost nad TNCS znašala 0,234 %/h za radialne elemente in 0,509 %/h za tangencialne elemente. Pri ostrejšem režimu (pregl. 4.3 in pril. D) pa 0,206 %/h pri radialnih elementih in 0,173%/h pri tangencialnih elementih.

Preglednica 4.2: Povprečna sušilna hitrost ($V_{\text{sušenja}}$) in osnovna statistika, ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.

Radialni elementi $V_{\text{sušenja}}$ (%/h)	Nad TNCS	Pod TNCS					
$U_{\text{povprečna}}$ med intervaloma (%)	55,42	30,98	25,22	22,28	18,61	14,14	11,62
povprečje	0,436	0,112	0,053	0,059	0,038	0,030	0,009
standardni odklon	0,081	0,029	0,016	0,018	0,022	0,013	0,013
min.	0,339	0,045	0,013	0,010	0,010	0,006	-0,019
maks.	0,601	0,153	0,076	0,074	0,098	0,044	0,027
Tangencialni elementi $V_{\text{sušenja}}$ (%/h)	Nad TNCS	Pod TNCS					
$U_{\text{povprečna}}$ med intervaloma (%)	61,85	31,66	24,38	20,79	17,22	12,13	9,51
povprečje	0,509	0,141	0,082	0,062	0,039	0,041	0,019
standardni odklon	0,108	0,053	0,017	0,031	0,008	0,007	0,006
min.	0,343	0,082	0,060	0,002	0,029	0,028	0,012
maks.	0,653	0,216	0,105	0,090	0,047	0,047	0,029

Sušilna hitrost se je pri obeh režimih občutno zmanjša takoj po padcu povprečne vlažnosti pod TNCS. Pri radialnih elementih je pri blažjem režimu znašala 0,112 %/h in 0,071 %/h pri ostrejšem režimu. Sušilna hitrost pri tangencialnih elementih je nekoliko večja in je bila pri blažjem režimu 0,141 %/h, pri ostrejšem režimu pa 0,093 %/h. Najmanjša sušilna hitrost je bila zabeležena na koncu sušenja in je pri radialnih elementih, ki so bili sušeni z blažjim režimom, znašala 0,009 %/h, pri ostrejšem režimu pa 0,042 %/h. Pri tangencialnih elementih je pri ostrejšem režimu znašala 0,045 %/h, pri blažjem režimu pa 0,019 %/h.

Preglednica 4.3: Povprečna sušilna hitrost ($V_{\text{sušenja}}$) in osnovna statistika, ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti za elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.

Radialni elementi $V_{\text{sušenja}}$ (%/h)	Nad TNCS	Pod TNCS				
$U_{\text{povprečna}}$ med intervaloma (%)	42,4	27,9	22,8	18,2	14,6	11,6
povprečje	0,206	0,071	0,056	0,054	0,037	0,042
standardni odklon	0,076	0,022	0,013	0,007	0,009	0,005
min.	0,096	0,030	0,042	0,043	0,026	0,032
maks.	0,106	0,074	0,054	0,064	0,026	0,038
Tangencialni elementi $V_{\text{sušenja}}$ (%/h)	Nad TNCS	Pod TNCS				
$U_{\text{povprečna}}$ med intervaloma (%)	41,0	27,7	21,6	16,8	13,1	10,0
povprečje	0,173	0,093	0,061	0,055	0,038	0,045
standardni odklon	0,049	0,023	0,020	0,009	0,007	0,014
min.	0,089	0,067	0,032	0,041	0,029	0,037
maks.	0,218	0,128	0,091	0,065	0,047	0,072

4.3. VLAŽNOSTNI GRADIENT

Iz meritev vlažnostnega gradienta je razvidno, da je le ta v prvih dveh intervalih naraščal, nato pa je začel postopoma padati. Iz primerjave obeh režimov je razvidno, da je vlažnostni gradient večji v radialnih kot v tangencialnih elementih.

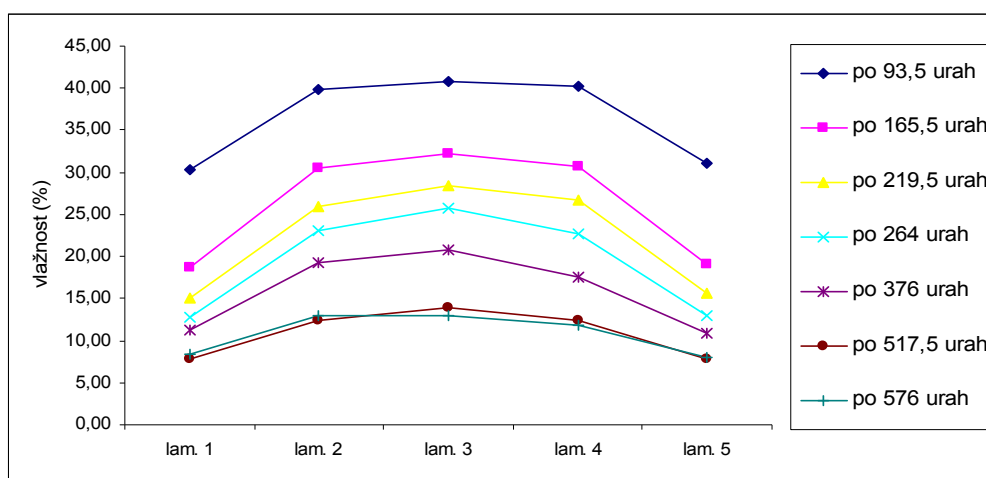
Preglednica 4.4: Povprečni vlažnostni gradient med sredico in površino in osnovna statistika, ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti in časa sušenja za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.

čas sušenja (h)	93,5	165,5	219,5	264	376	517,5	576
Radialni elementi							
$U_{\text{povprečna}}$ (%)	35,2	26,8	23,7	20,9	16,4	11,9	11,3
Vlažnostni gradient (%/cm)							
povprečje	4,56	6,34	6,49	6,26	5,13	3,09	2,36
standardni odklon	0,40	0,36	0,22	0,44	0,36	0,44	0,35
min.	4,00	5,83	6,25	5,27	4,45	2,41	1,91
maks.	5,47	6,87	6,90	6,57	5,52	3,72	2,97
Tangencialni elementi							
$U_{\text{povprečna}}$ (%)	36,7	26,6	22,2	19,4	15,0	9,2	9,8
Vlažnostni gradient (%/cm)							
povprečje	4,59	5,61	5,35	5,06	3,20	2,20	1,82
standardni odklon	0,84	0,35	0,42	0,79	0,44	0,37	0,28
min.	3,92	5,36	4,88	3,97	2,82	1,82	1,53
maks.	5,77	6,27	5,88	6,35	3,78	2,92	2,30

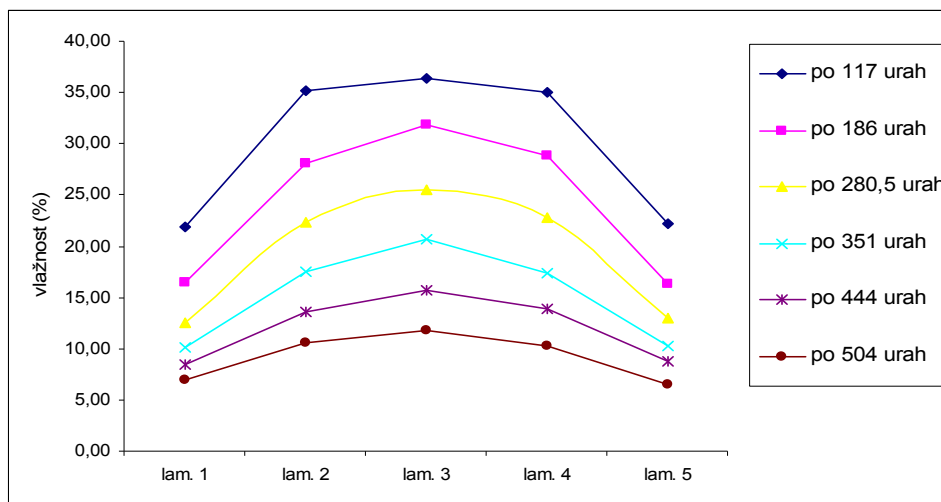
Pri sušenju z blažjim režimom (pregl. 4.4 in pril. E) so bile najvišje vrednosti vlažnostnega gradienta zabeležene pri povprečni vlažnosti 26 %. Le ta je v povprečju pri radialnih elementih znašal 6,34 %/cm, pri tangencialnih elementih pa 5,61 %/cm. Najvišje vrednosti pri ostrejšem režimu (pregl.4.5 in pril. F) so bile dosežene pri vlažnosti okrog 25 % in so v povprečju znašale pri radialnih elementih 6,89 %/cm in 7,2 %/cm pri tangencialnih elementih. Po zaključku sušenja z blažjim režimom je povprečni vlažnostni gradient pri radialnih elementih znašal 2,36 %/cm in 1,82 %/cm pri tangencialnih elementih. Pri ostrejšem sušenju pa 2,66 %/cm pri radialnih in 1,94 %/cm pri tangencialnih elementih.

Preglednica 4.5: Povprečni vlažnostni gradient med sredico in površino in osnovna statistika, ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti in časa sušenja za elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.

čas sušenja (h)	117 h	186 h	280,5h	351h	444 h	504 h
Radialni elementi						
$u_{\text{povprečna}}$ (%)	30,3	25,4	20,1	16,3	12,8	10,3
vlažnostni gradient (%/cm)						
povprečje	6,44	6,89	6,22	4,94	3,42	2,66
standardni odklon	0,41	0,59	0,35	0,45	0,53	0,42
min.	5,91	6,25	5,75	4,37	2,66	2,10
maks.	7,18	7,98	6,65	5,62	3,96	3,09
Tangencialni elementi						
$u_{\text{povprečna}}$ (%)	30,9	24,5	18,8	14,9	11,4	8,7
vlažnostni gradient (%/cm)						
povprečje	6,19	7,20	5,33	3,79	2,53	1,94
standardni odklon	0,60	0,76	0,52	0,22	0,38	0,32
min.	5,43	6,09	4,83	3,60	2,06	1,69
maks.	6,81	7,74	6,09	4,16	3,11	2,46



Slika 4.3: Povprečni vlažnostni profil desk v odvisnosti od časa sušenja za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.



Slika 4.4: Povprečni vlažnostni profil desk v odvisnosti od časa sušenja za elemente debeline 50mm sušene z ostrejšim režimom.

Na slikah 4.3 in 4.4 je grafično prikazano spreminjanje vlažnostnega profila skozi celoten sušilni proces. Iz primerjava slik je razvidno, da so se zunanji sloji elementov hitreje sušili z ostrejšim režimom, kot pa pri blažjem režimu.

4.4. NOTRANJE NAPETOSTI

Meritve notranjih napetosti smo izvajali takoj po odvzemu in po 48 urah, ko se je vlažnost izenačila po celotnem prerezu. Vrednosti v preglednicah 4.5 in 4.6 opisujejo stanje po 48 urah, medtem, ko je na slikah 4.5 in 4.6 prikazano stanje notranjih napetosti v zaporednih intervalih sušilnega postoka. Za oba sušilna programa je značilno, da je reža pri tangencialno orientiranih elementih večja, kot pri radialnih. Prav tako ima pri obeh režimih velik vpliv na velikost reže enakomerna razporeditev vlage po prerezu. Negativni predznak pri meritvah reže pomeni, da so se pri prežagovalni metodi lamele ukrivile navznoter, medtem ko je pozitiven predznak uporabljen takrat, ko so se lamele ukrivile navzven.

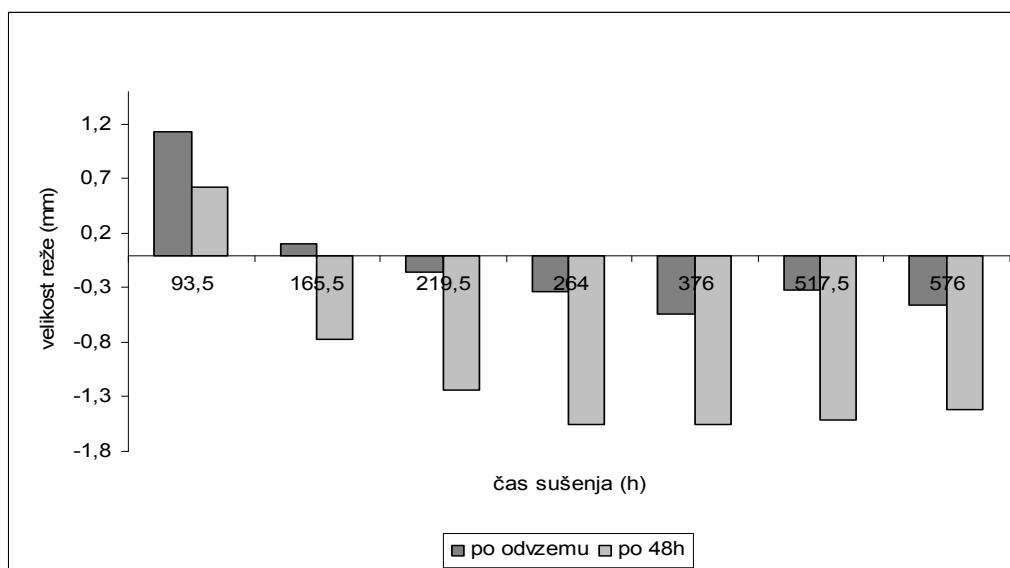
Prvi odvzem vzorcev pri blažjem režimu (pregl. 4.6 in pril. G) je bil opravljen pri vlažnosti okrog 35 % (območje nasičenja celičnih sten). Povprečna velikost reže je skoraj enaka tako za radialne (0,6 mm) in tangencialne (0,65 mm) elemente. S padanjem vlažnosti se je nato velikost reže povečevala in zamenjala predznak.

Največja reža pri radialnih elementih, je bila izmerjena pri vlažnosti 20 % in je v povprečju znašala -1,24 mm, pri tangencialnih elementih je največja reža znašala -1,67 mm, pri vlažnosti 15 %. Povprečne vrednosti so pričakovano najnižje po zaključku sušenja in pri radialnih elementih znaša -1,27 mm, pri tangencialnih elementih pa -1,67 mm.

Na sliki 4.5. je grafično prikazana primerjava notranjih napetosti (blažji režim) takoj po odvzemu in po končanem izenačevanju vlage po prerezu. Iz slike je razvidno nekajkratno povečanje reže po 48 urah, razen po prvem odvzemu, kjer se je velikost reže zmanjšala.

Preglednica 4.6: Povprečne vrednosti notranjih napetosti, merjenih s prežagovalno metodo (velikost reže) in osnovna statistika ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti in časa sušenja za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.

čas sušenja (h)	93,5	165,5	219,5	264	376	517,5	576
Radialni elementi							
$U_{\text{povprečna}}$ (%)	35,2	26,8	23,7	20,9	16,4	11,9	11,3
velikost reže (mm)							
povprečje	0,65	-0,60	-1,12	-1,47	-1,24	-1,32	-1,27
standardni odklon	0,48	0,40	0,30	0,21	0,27	0,30	0,19
min.	0,00	-1,20	-1,50	-1,70	-1,80	-1,80	-1,70
maks.	1,30	0,00	-0,50	-0,90	-0,80	-1,00	-1,00
Tangencialni elementi							
$U_{\text{povprečna}}$ (%)	36,7	26,6	22,2	19,4	15,0	9,2	9,8
velikost reže (mm)							
povprečje	0,60	-1,10	-1,55	-1,68	-2,13	-1,87	-1,67
standardni odklon	0,65	0,69	0,24	0,56	0,76	0,22	0,20
min.	0,00	-2,00	-1,80	-2,20	-2,90	-2,10	-2,00
maks.	1,50	-0,20	-1,30	-0,80	-1,10	-1,50	-1,50



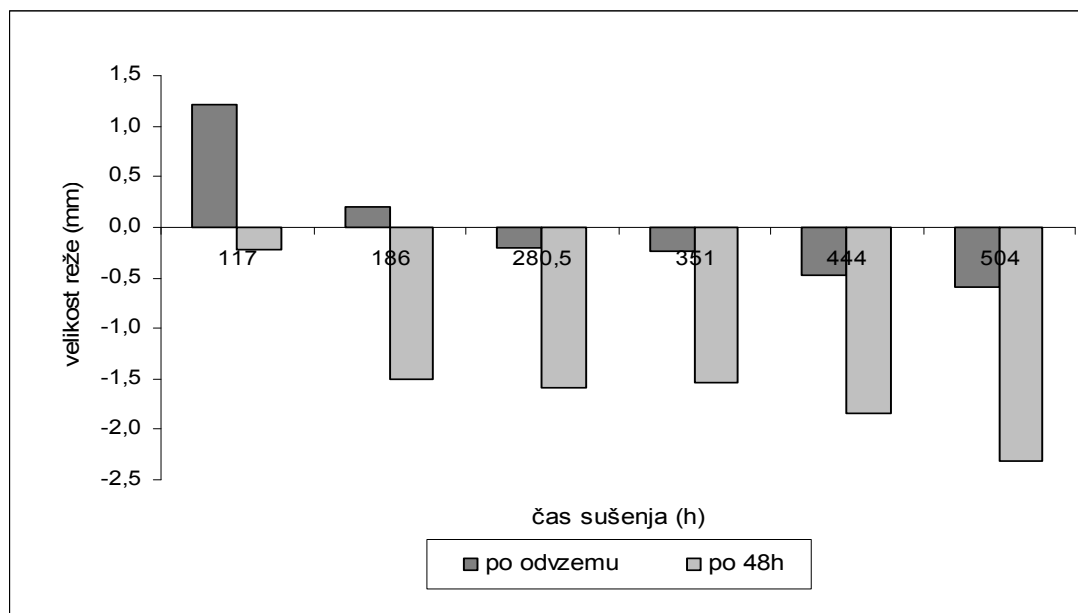
Slika 4.5: Razvoj notranjih napetosti v odvisnosti od časa sušenja, merjenih z prežagovalno metodo (velikost reže), takoj po odvzemu in po 48h urah (ko se izniči vpliv vlažnostnega gradienta) za elemente debeline 50mm sušene z blažjim režimom.

Pri ostrejšem sušilnem režimu (preg. 4.7 in pril. H) je bil prvi odvzem vzorcev izvršen nekoliko kasneje (vlažnost 30 %), zato so vrednosti negativne (zaskorjenje). Velikost reže je pri radialnih elementih znašala -0,33 mm, pri tangencialnih elementih pa -0,48 mm. S padanjem vlažnosti je velikost reže vseskozi naraščala in dosegla največje vrednosti na koncu sušilnega procesa; pri radialnih elementih je znašala -2,13 mm (vlažnost 10 %) in -2,48 mm pri tangencialnih elementih (vlažnost 11,4 %).

Preglednica 4.7: Povprečne vrednosti notranjih napetosti merjenih s prežagovalno metodo (velikost reže) in osnovna statistika ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti in časa sušenja za elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.

čas sušenja (h)	117	186	280,5	351	444	504
Radialni elementi						
$U_{\text{povprečna}}$ (%)	30,3	25,4	20,1	16,3	12,8	10,3
velikost reže (mm)						
povprečje	-0,33	-1,27	-1,17	-1,27	-1,55	-2,13
standardni odklon	0,43	0,32	0,24	0,38	0,33	0,17
min.	-1,00	-1,90	-1,40	-1,80	-2,10	-2,40
maks.	0,50	-0,90	-0,80	-0,80	-1,10	-1,90
Tangencialni elementi						
$U_{\text{povprečna}}$ (%)	30,9	24,5	18,8	14,9	11,4	8,7
velikost reže (mm)						
povprečje	-0,48	-1,74	-2,15	-2,25	-2,48	-2,38
standardni odklon	0,58	0,38	0,38	0,47	0,46	0,25
min.	-1,20	-2,00	-2,60	-2,70	-2,80	-2,60
maks.	0,00	-1,10	-1,60	-1,80	-1,80	-2,00

Razvoj reže pri ostrejšem režimu je grafično prikazan na sliki 4.6. Tako kot pri blažjem režimu, tudi tu opazimo znatno povečanje reže po 48 urah, vendar je trend v nasprotju z blažjim režimom, vseskozi pozitiven in doseže svoj maksimum na koncu sušenja.



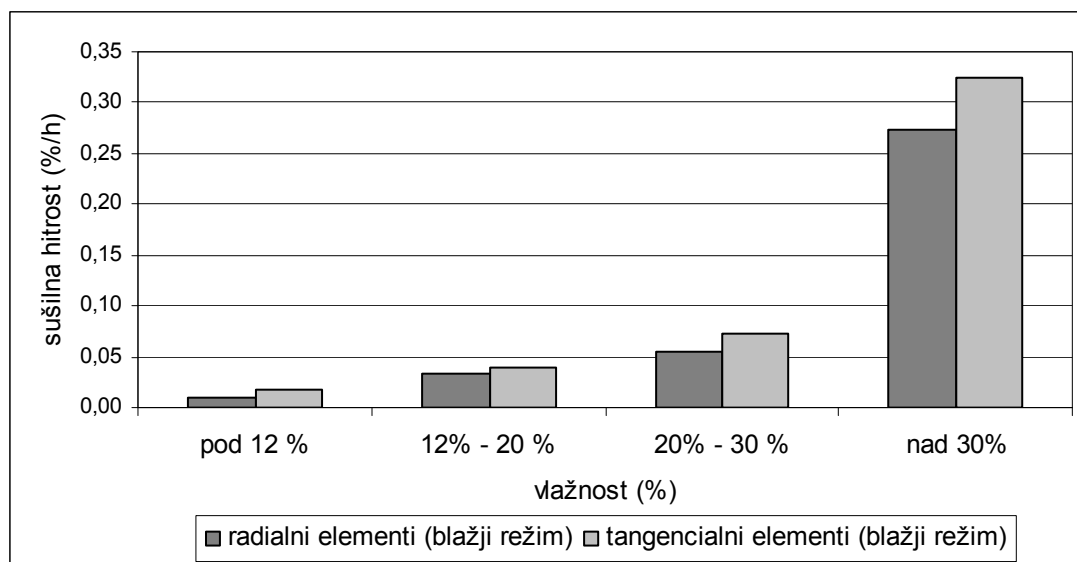
Slika 4.6: Razvoj notranjih napetosti v odvisnosti od časa sušenja, merjenih z prežagovalno metodo (velikost reže), takoj po odvzemu in po 48h urah (ko se izniči vpliv vlažnostnega gradienta) za elemente debeline 50mm sušene z ostrejšim režimom.

5. RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1. RAZPRAVA

5.1.1. Sušilna hitrost

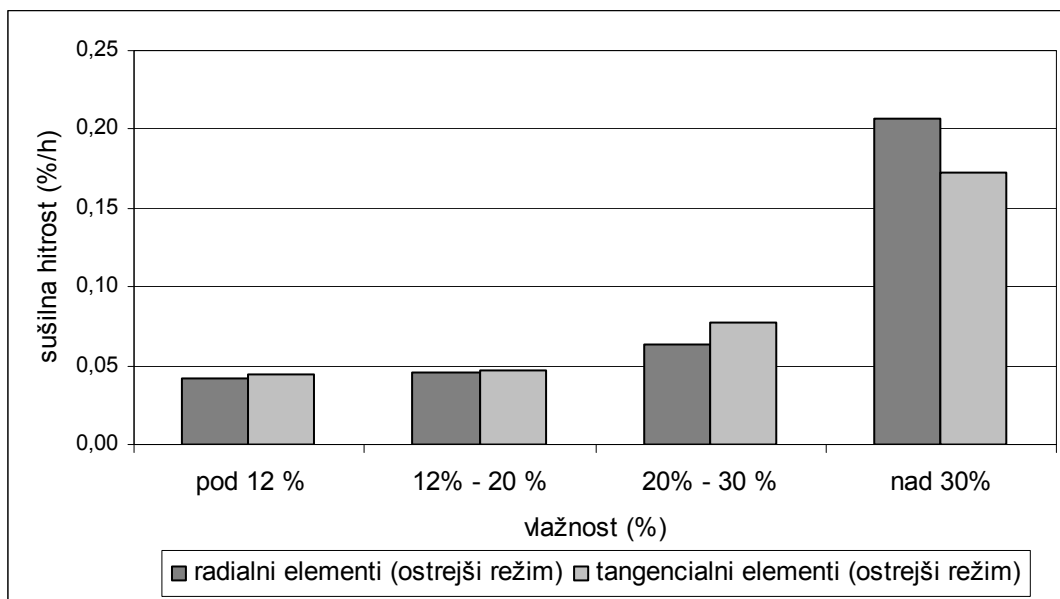
Čas sušenja je pri blažjem režimu znašal 576 ur (24 dni), sušenje z ostrejšim režimom pa je bilo krajše za 14,3 % in je trajalo 504 ure (20 dni). Vzrok temu so ostrejši pogoji sušenja in 25,7 % nižja začetna vlažnost pri ostrejšem režimu, saj so se elementi nekoliko že osušili na prostem. Sušilna hitrost je bila med tangencialnimi in radialnimi elementi različna. Vzrok temu je različna prevodnost lesnega tkiva v radialni in tangencialni smeri. Hitrejše sušenje tangencialnih elementov pripisujemo učinku bolj prevodnega radialno potekajočega trakovnega tkiva.



Slika 5.1: Primerjava sušilne hitrosti ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.

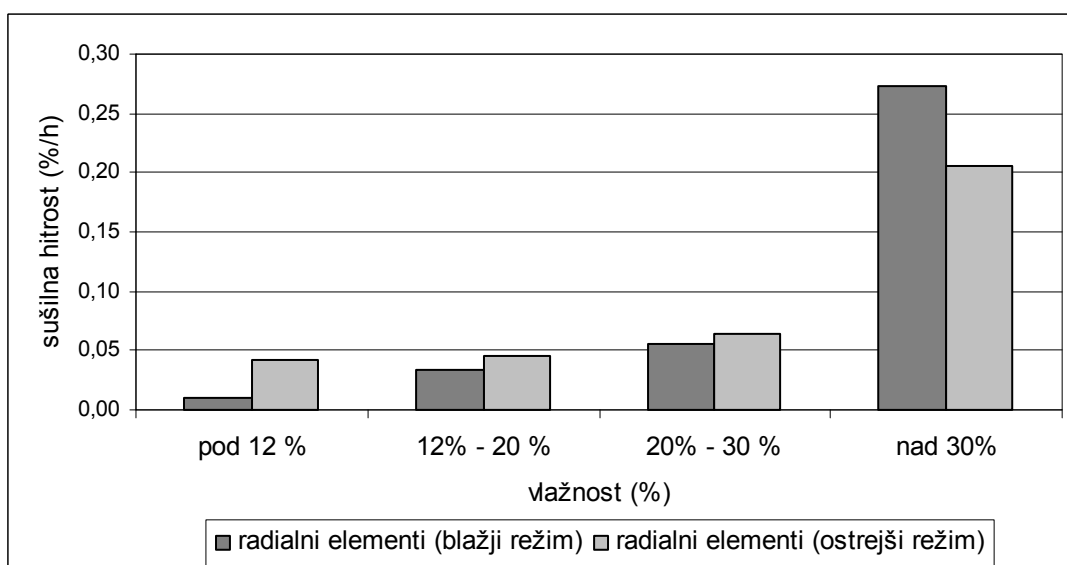
Pri blažjem režimu (sl. 5.1) je sušilna hitrost pri radialnih elementih vseskozi manjša, razlika med radialno in tangencialno orientiranimi elementi, pa se s padanjem lesne vlažnosti povečuje. Vzrok temu pojavu je verjetno hitrejše izhajanje vode v radialni smeri, saj so bile začetne vlažnosti teh elementov v povprečju 8 % višje, kot pri radialnih elementih.

Pričakovano je sušilna hitrost v območju pod 30 % vlažnosti, pri ostrejšem režimu (sl. 5.2) v primerjavi z blažjim vseskozi večja. To velja za radialne in tangencialne elemente. Pri vlažnosti nad 30 % pa je sušilna hitrost pri tangencialnih elementih v primerjavi z radialnimi manjša za 20 %. To je verjetno posledica 3,4 % nižje povprečne začetne vlažnosti tangencialnih elementov in višje točke nasičenja celičnih sten v tangencialnem tkivu in s tem hitrejši prehod iz kapilarnega toka vode, na močno upočasnen difuzijski tok vezane vode.



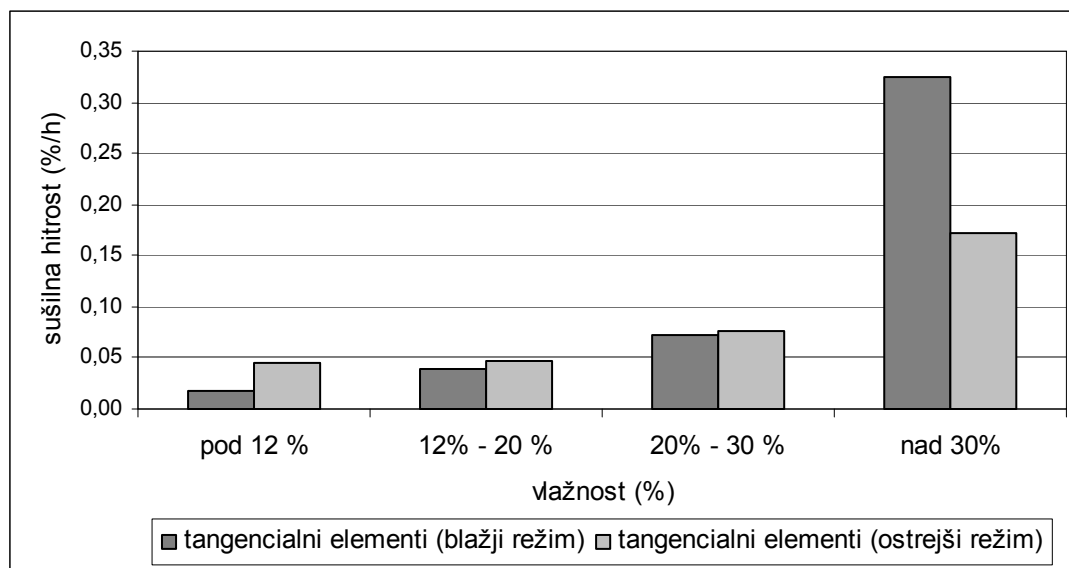
Slika 5.2: Primerjava sušilne hitrosti ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti za elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.

Primerjava režimov po ostrini sušenja je prikazana ločeno za tangencialne in radialne elemente na slikah 5.3 in 5.4. Iz slik je razvidna manjša hitrost sušenja svežega lesa z ostrejšim režimom v primerjavi z milejšim. Sušilna hitrost je pri radialnih elementih manjša za 22 %, pri tangencialnih elementih pa za 47 %. To je moč pojasniti z nižjo začetno vlažnostjo pri ostrejšem režimu in nižjimi temperaturami v začetni fazi sušenja pri ostrejšem režimu, s katerimi smo želeli preprečiti obarvanje elementov.



Slika 5.3: Primerjava sušilne hitrosti med ostrejšim in blažjim režimom za radialne elemente debeline 50 mm v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti.

Občutnejša razlika v sušilni hitrosti se med režimoma očitneje pokaže pod vlažnostjo 20 %. Pojavi se tako pri radialnih kot tangencialnih elementih, vendar je ta opaznejša pri radialnih elementih. Največji razkorak med njima se pojavi pod vlažnostjo 12 %, saj je tu sušilna hitrost ostrejšega režima pri radialnih elementih štirikrat, pri tangencialnih elementih pa dvakrat večja. Ta velika razlika v sušilni hitrosti, se odrazi predvsem pri generiranju sušilnih napetosti. Vzrok tej razliki so višje temperature pri ostrejšem režimu, saj je bila v tem intervalu sušenja ostrina sušenja nekoliko večja pri blažjem režimu.



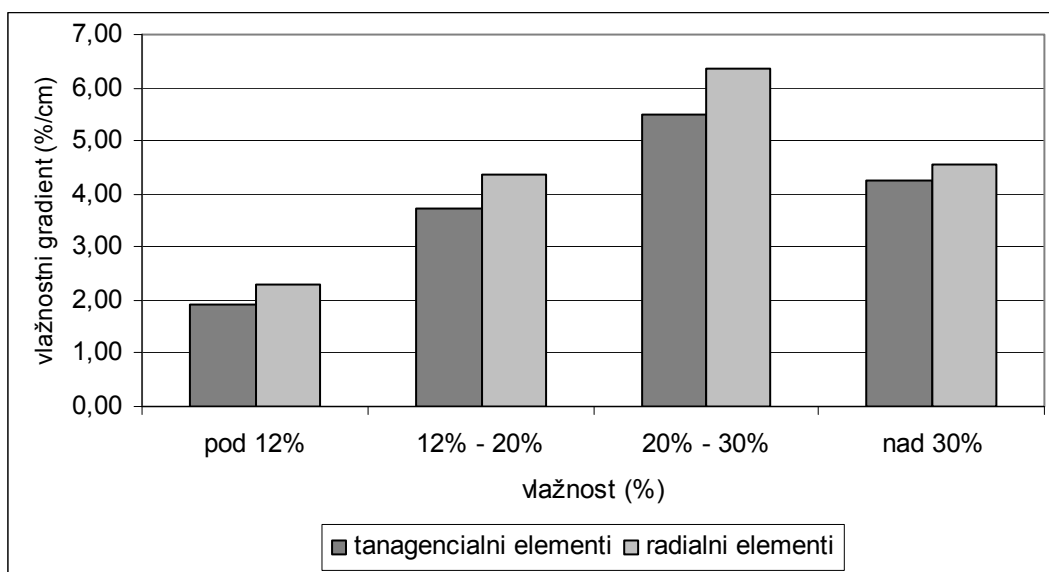
Slika 5.4: Primerjava sušilne hitrosti med ostrejšim in blažjim režimom za tangencialne elemente debeline 50 mm v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti.

5.1.2. Vlažnostni gradient

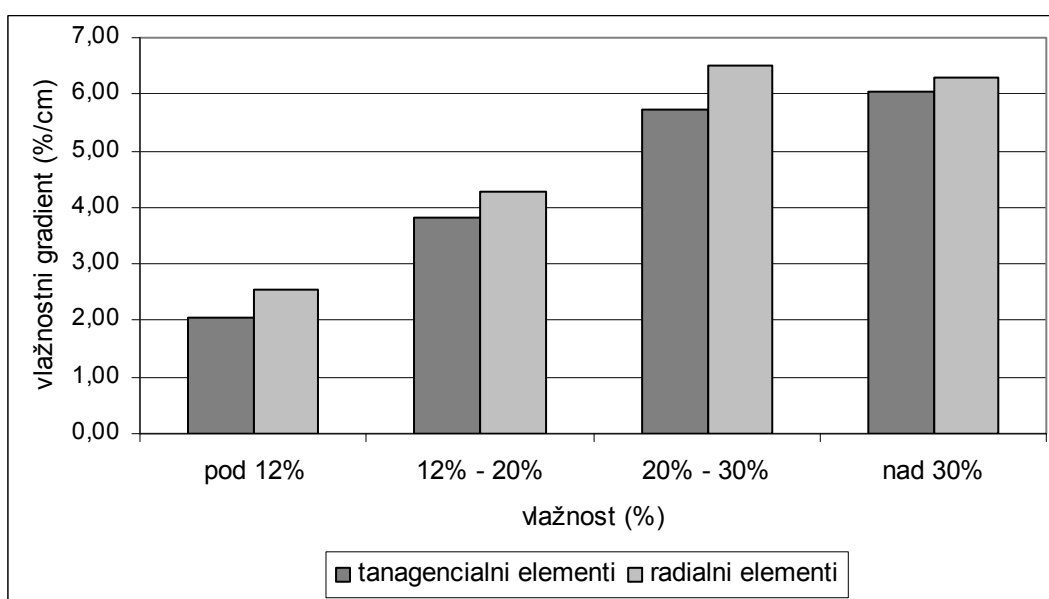
Meritve vlažnosti po debelini deske so pokazale, da obstaja vlažnostni gradient med površino in sredico deske med celotnim sušilnim procesom. Niti po končanem sušenju vlažnost ni po celotnem prerezu popolnoma enaka. Vlažnostni gradient je posledica mehanizma sušenja .

Za oba režima je značilno, da je vlažnostni gradient s padanjem lesne vlažnosti naraščal in dosegel najvišje vrednosti v območju povprečne vlažnosti 20 do 30 %. V tem času je vlažnost sredice padla pod TNCS, iz lesa je bila odstranjena vsa prosta voda. Transport vode je začel potekati po močno upočasnjem difuzijskem toku, zato se tu pojavi največja razlika med vlažnostjo sredice in površine .

Spremembe vlažnostnega gradienta so bile pri blažjem režimu večje, medtem ko so bile pri ostrejšem režimu porazdeljene na višjem nivoju (sl. 5.5 in 5.6).

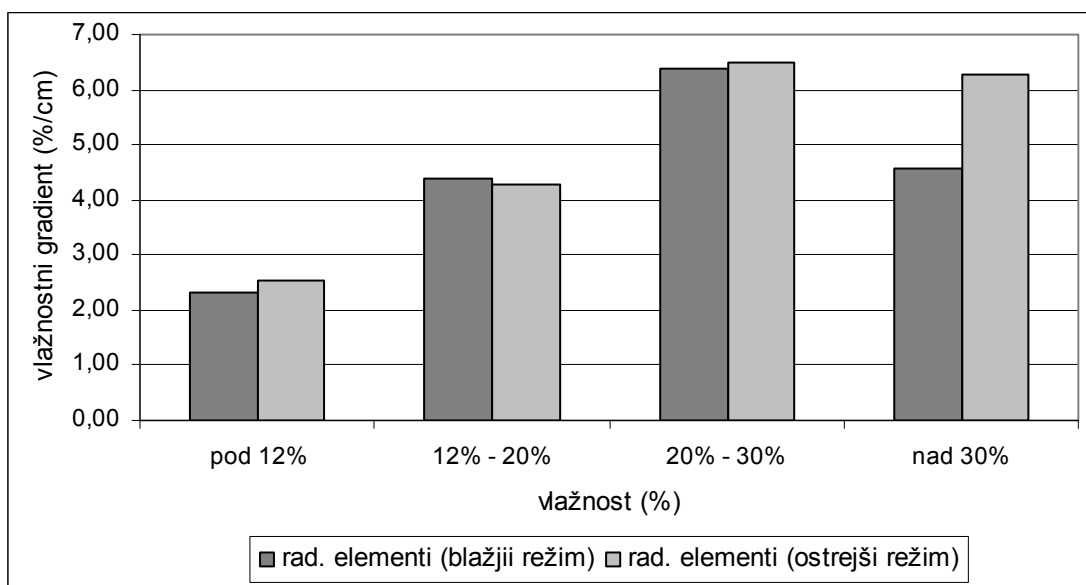


Slika 5.5: Primerjava vlažnostnega gradienta ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti, za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.

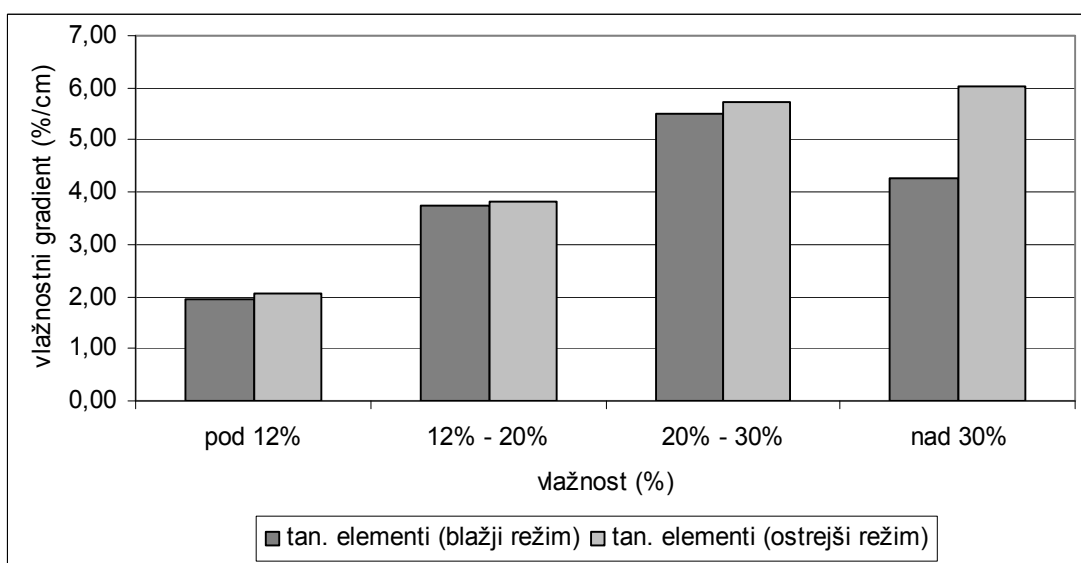


Slika 5.6: Primerjava vlažnostnega gradienta ločeno za radialne in tangencialne elemente v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti, za elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.

Vlažnostni gradient se s padanjem vlažnosti na končno vrednost zmanjšuje, razlika med radialnimi in tangencialnimi elementi pa je vseskozi približno enaka in znaša med 14% in 17%. Po končanem sušenju pri blažjem režimu znaša 17%, pri ostrejšem pa se poveča na 25%. Ta razlika je posledica hitrejšega prehajanja vode (radialni transport) v tangencialnih elementih in s tem hitrejšega izenačevanja vlažnosti po prerezu. Ostrejši klimatski pogoji v sušilnici pa razliko samo še povečajo. Primerjava režimov ločeno za radialne in tangencialne elemente (sl. 5.7 in 5.8) kaže zelo majhne razlike med režimoma.



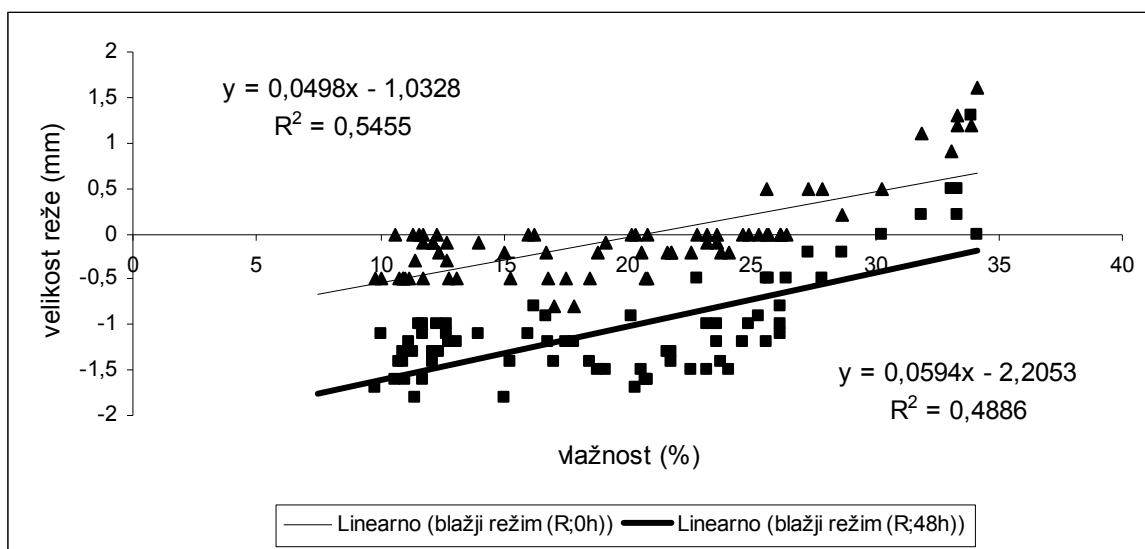
Slika 5.7: Primerjava vlažnostnega gradienta med ostrejšim in blažjim režimom za radialne elemente debeline 50 mm v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti.



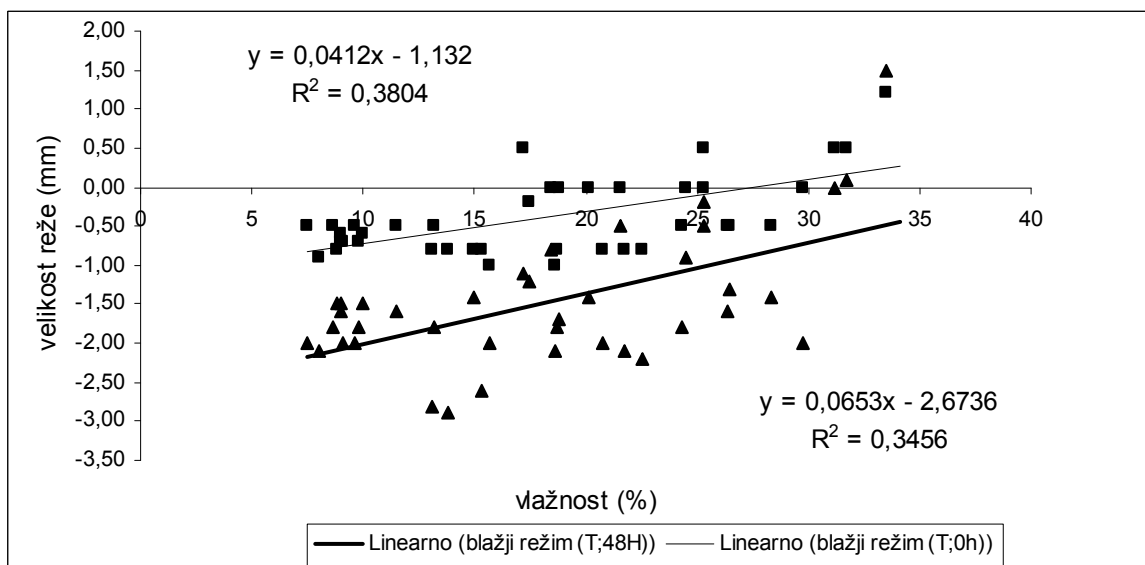
Slika 5.8: Primerjava vlažnostnega gradienta med ostrejšim in blažjim režimom za tangencialne elemente debeline 50 mm v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti.

5.1.3. Notranje napetosti

Meritve reže med lamelama so pokazale velik vpliv vlažnostnega gradienta na velikost sušilnih napetosti. Velikost reže se je po 48 urah znatno povečala potem, ko se je vlaga enakomerno porazdelila po lamelah. Odvisnost velikosti reže od vlažnostnega gradienta je prikazan na slikah 5.9 do 5.12.

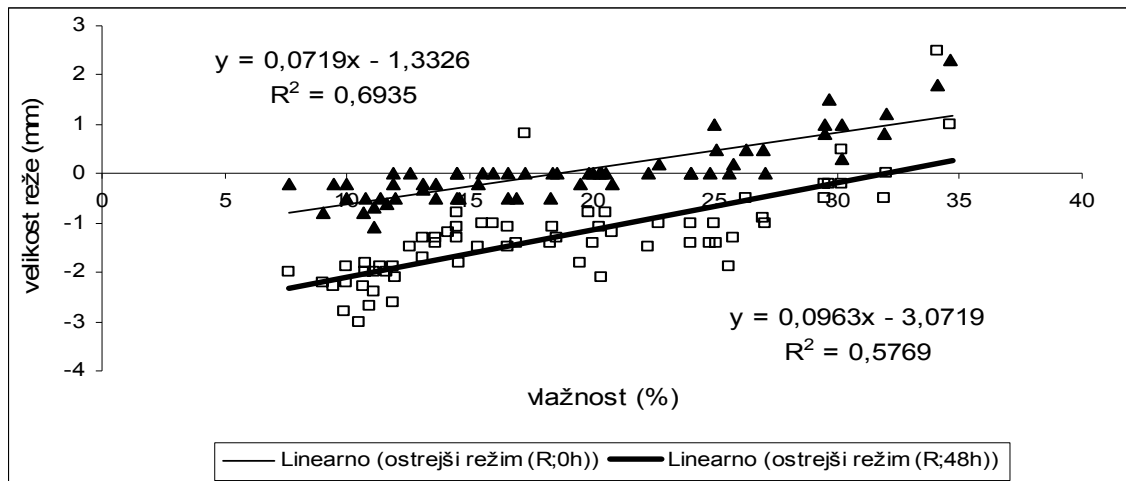


Slika 5.9: Primerjava notranjih napetosti merjenih s prežagovalno metodo (velikost reže) takoj po odvzemu in po 48h v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti za radialne elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.

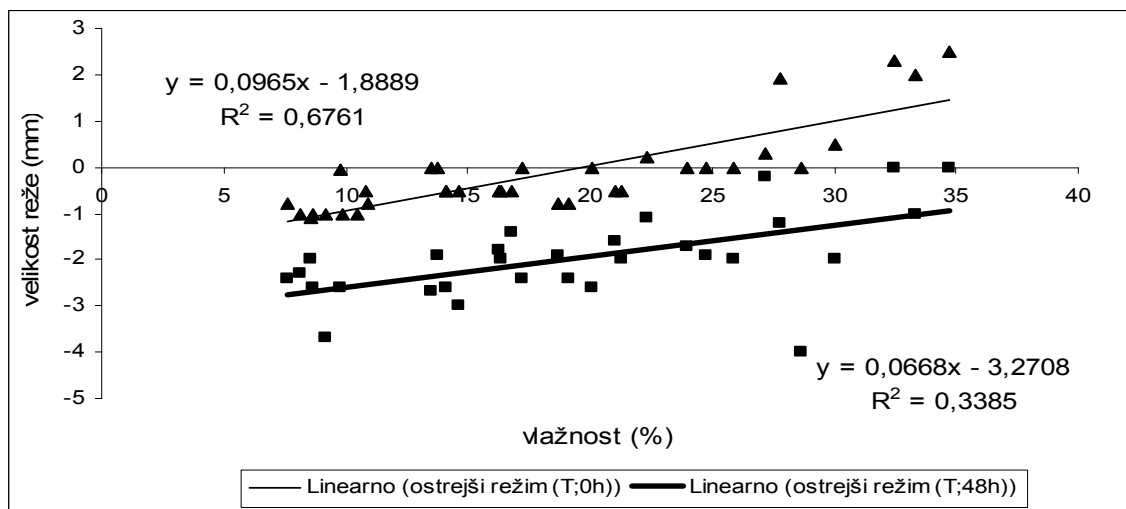


Slika 5.10: Primerjava notranjih napetosti merjenih s prežagovalno metodo (velikost reže) takoj po odvzemu in po 48h, v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti za tangencialne elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.

Velikost reže se po izenačitvi vlažnosti po prerezu, pri blažjem režimu v povprečju poveča za 80 % pri radialnih elementih in 70 % pri tangencialnih elementih. Pri ostrejšem režimu pa ta razlika znaša pri radialnih elementih 82 % in 75 % pri tangencialnih elementih.



Slika 5.11: Primerjava notranjih napetosti merjenih s prežagovalno metodo (velikost reže) takoj po odvzemu in po 48h v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti, za radialne elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.

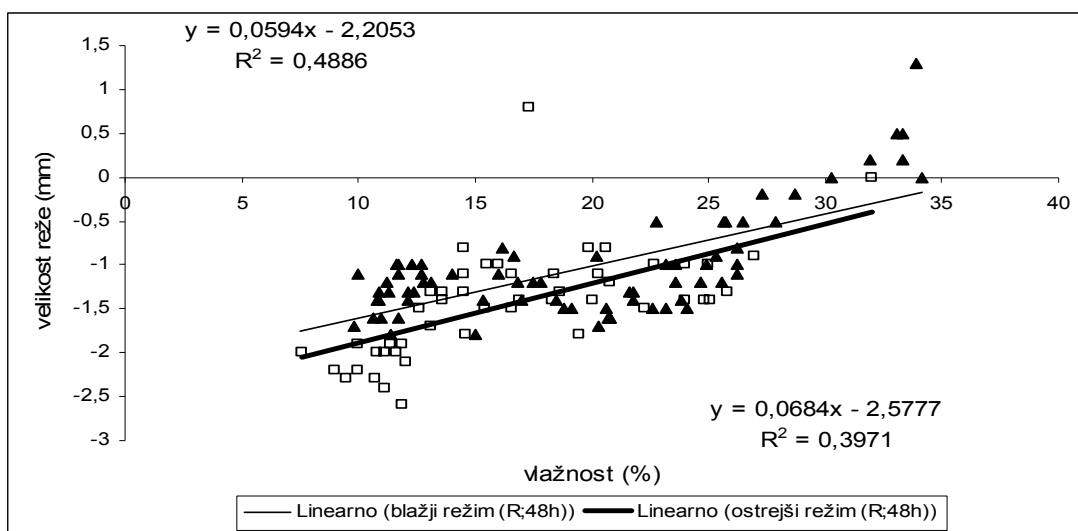


Slika 5.12: Primerjava notranjih napetosti merjenih s prežagovalno metodo (velikost reže) takoj po odvzemu in po 48h, v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti, za tangencialne elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.

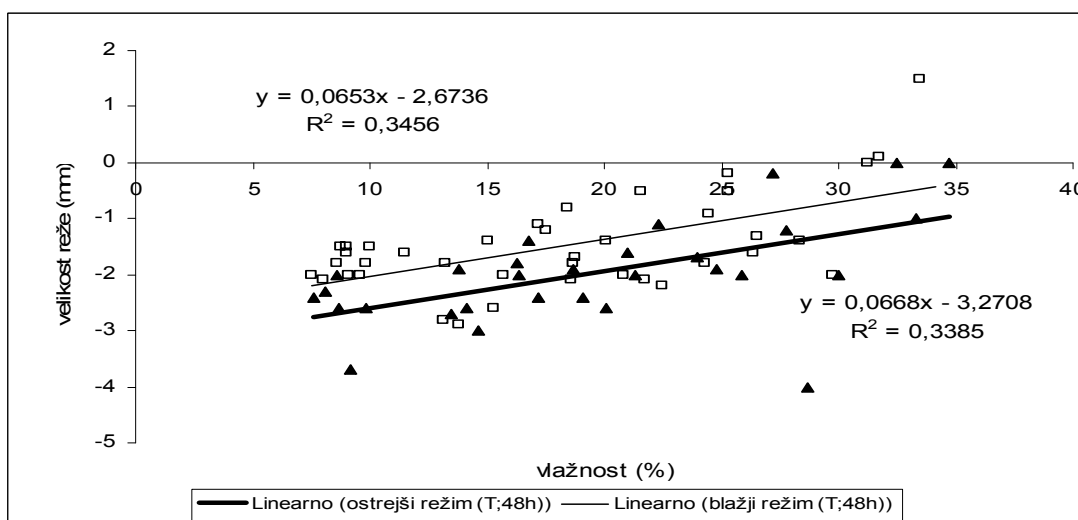
Različno povečanje reže pri radialnih in tangencialnih elementih gre pripisati vlažnostnemu gradientu. Razlika v vlažnostnem gradientu med radialnimi in tangencialnimi elementi je približno enaka razliki v povečanju reže med radialnimi in tangencialnimi elementi. Velikost reže pri tangencialnih elementih je vseskozi večja kot pri radialnih. Vzrok temu je večje tangencialno krčenje v primerjavi z radialnim. Pri blažjem režimu je razlika po sušenju znašala 31,4 %, pri ostrejšem režimu pa 11,7 %.

Zmanjšanje razlike v velikosti reže med radialnimi in tangencialnimi elementi, sušenimi z ostrejšim režimom, je mogoče pojasniti z vzporednim povečanjem razlike med radialnimi in tangencialnimi vrednostmi vlažnostnega gradienta.

Na slikah 5.13 in 5.14 je prikazana primerjava med radialnimi in tangencialnimi elementi sušenimi z različnima režimoma. Tako pri radialnih kot tangencialnih deskah je opaziti povečanje reže pri elementih, ki so bili sušeni z ostrejšim režimom. Po končanem sušenju je velikost reže pri radialnih elementih, sušenih z ostrejšim režimom večja za 67,7%, pri tangencialnih elementih pa za 42,5 %, v primerjavi z blažjim režimom



Slika 5.13: Primerjava notranjih napetosti merjenih s prežagovalno metodo (velikost reže) med blažjim in ostrejšim režimom po 48h, v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti za radialne elemente debeline 50 mm.



Slika 5.14: Primerjava notranjih napetosti merjenih s prežagovalno metodo (velikost reže) med blažjim in ostrejšim režimom po 48h, v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti za tangencialne elemente debeline 50 mm.

5.1.4. Kakovost sušenja

Iz razvrstitev desk v kvalitetne razrede sušenja po EDG (European drying grup), kjer mora biti 90% vseh izmerjenih vrednosti manjših od mejne vrednosti, so bili ugotovljeni naslednji rezultati: standardna kvaliteta sušenja je bila dosežena pri obeh debelinah in režimih, za uvrstitev v višje kvalitetne razrede pa je bil odstotek desk, ki so ustrezale višjim zahtevam premajhen. Splošno gledano pa je bila najvišja kvaliteta dosežena pri blažjem režimu (deb. 50mm), najslabša pa pri ostrejšem režimu (deb. 50mm). Prav tako je bila dosežena višja kvaliteta pri tangencialnih elementih kot pa pri radialnih elementih. Podatki so predstavljeni v preglednicah 5.1 in 5.2.

Preglednica 5.1: Prikaz procenta desk, ki ustrezajo posameznemu kakovostnemu sušilnemu razredu, glede na velikost vlažnostnega gradienta.

kvaliteta sušenja	blažji režim 50mm	ostrejši režim 50mm
Vse deske	%	%
S 3,2%/cm	100	100
Q 2,4%/cm	70	56
E 1,6%/cm	0	0
R deske		
S 3,2%/cm	100	100
Q 2,4%/cm	63	40
E 1,6%/cm	0	0
T deske		
S 3,2%/cm	100	100
Q 2,4%/cm	100	83
E 1,6%/cm	0	0

Preglednica 5.2: Prikaz procenta desk, ki ustrezajo posameznemu kakovostnemu sušilnemu razredu, glede na velikost notranjih napetosti.

kvaliteta sušenja	blažji režim 50mm	ostrejši režim 50mm
Vse deske	%	%
S 3mm	100	100
Q 2mm	100	43,5
E 1mm	0	0
R deske		
S 3mm	100	100
Q 2mm	100	60
E 1mm	0	0
T deske		
S 3mm	100	100
Q 2mm	100	16
E 1mm	0	0

5.2. SKLEPI

Rezultate raziskave lahko strnemo v naslednje sklepe:

Čas sušenja bukovine je pri blažjem režimu znašal 576 ur, pri ostrejšem režimu pa 504 ure, kar pomeni 14,3 % krajše sušenje ob enaki končni kakovosti desk.

Povprečna sušilna hitrost med sušilnim procesom nad TNCS, je pri blažjem režimu znašala 0,436 %/h pri radialnih elementih in 0,509 %/h pri tangencialnih elementih. Sušilna hitrost radialnih elementov sušenih z ostrejšim programom pa je bila 0,206 %/h, pri tangencialnih elementih pa 0,173 %/h. Nižja sušilna hitrost pri ostrejšem programu sušenja je posledica nižje začetne vlažnosti elementov. Povprečna sušilna hitrost pod TNCS je bila znatno nižja in je pri blažjem režimu znašala pri radialnih elementih 0,05 %/h in 0,064 %/h pri tangencialnih elementih. Pri ostrejšem režimu pa je bila pri radialnih elementih 0,052 %/h, pri tangencialnih pa 0,058 %/h. Rezultati raziskave so potrdili hipotezo hitrejšega sušenja v tangencialni smeri, prav tako je bila sušilna hitrost pod TNCS večja pri ostrejšem režimu.

Vlažnostni gradient je bil prisoten pri vseh elementih. Najvišje vrednosti so bile pri blažjem režimu zabeležene pri vlažnosti 26 %, kjer je pri radialnih elementih znašal 6,34 %/cm in 5,61 %/cm pri tangencialnih elementih. Pri elementih, ki so bili sušeni z ostrejšim režimom pa so bile najvišje vrednosti izmerjene pri vlažnosti 24 – 25 %. Pri radialnih elementih je bil povprečni vlažnostni gradient 6,89 %/cm in 7,2 %/cm pri tangencialnih elementih. Po končanem sušenju je bil vlažnostni gradient pri obeh režimih manjši pri tangencialnih elementih, kot pri radialnih. Povprečni vlažnostni gradient pri tangencialnih elementih sušenih z blažjim režimom, je bila na koncu sušenja 6,5 % manjši, kot pri elementih sušenih z ostrejšim režimom. Pri radialno orientiranih elementih pa je razlika med režimoma znašala 12,7 %, v prid blažjemu režimu.

Sušilne napetosti so bile prisotne pri vseh elementih skozi celoten eksperiment. Največje sušilne napetosti pri blažjem režimu, so se pri radialnih elementih pojavile pri vlažnosti 20 %, povprečna velikost reže pa je bila 1,47 mm. Pri tangencialnih elementih pa je bila največja povprečna velikost reže izmerjena pri vlažnosti 15 % in je znašala 2,13 mm. Rezultati meritev pri ostrejšem režimu, pa kažejo največje sušilne napetosti pri radialnih elementih po končanem sušenju, kjer je bila povprečna velikost reže 2,13 mm. Najvišja vrednost 2,48 mm pri tangencialnih elementih pa je bila izmerjena pri vlažnosti 11,4 %. Rezultati raziskave so potrdili predpostavko, da se v tangencialnih elementih generirajo večje sušilne napetosti, kot v radialnih in da ostrejši sušilni parametri povečujejo sušilne napetosti v elementih. Povprečna velikost reže pri radialnih elementih, sušenih z blažjim režimom, je bila po končanem sušenju manjša za 67,7%, v primerjavi z elementi sušenimi z ostrejšim režimom. Razlika pri tangencialnih elementih pa je znašala 42,5 % v prid blažjemu režimu.

Iz rezultatov raziskave je razvidno, da najvišje vrednosti vlažnostnega gradienta ne sovpadajo z največjimi sušilnimi napetostmi (se ne pojavljajo pri enaki vlažnosti). Pomeni, da se vpliv vlažnostnega gradienta na velikost sušilnih napetosti ne pokaže takoj ampak šele kasneje, pri nižjih vlažnostih. Sušilne napetosti so se na koncu sušenja pri blažjem režimu zmanjševale, nasprotno pa so pri ostrejšem režimu naraščale. To je verjetno

posledica višjih sušilnih temperatur na koncu sušenja pri ostrejšem režimu in s tem povezano intenzivnejše krčenje.

Za doseganje višje končne kvalitete posušenih desk, kot je osnovni razred S, bi bilo potrebno ostrino sušenja še zmanjšati in na koncu sušenja sušiti z nižjimi temperaturami. Posledično bi se časi sušenja podaljšali, s tem pa tudi stroški sušenja. Kondicioniranje po končanem sušenju je potekalo pri obeh režimih 30 h. Kakovost posušenih elementov bi lahko povečali tudi z daljšim kondicioniranjem ali pa z aktivnim kondicioniranjem.

6 POVZETEK

Sušenje lesa je faza, ki se ji v lesarstvu ni mogoče izogniti. Njena naloga je čim hitreje les posušiti na želeno končno vlažnost, ob minimalnem zmanjšanju njegove kvalitete.

V eksperimentu je bila uporabljena bukovina (*Fagus sylvatica* L), predvsem zaradi njene razširjenosti v slovenskih gozdovih in s tem v lesni industriji. Za bukovino so značilne dobre mehanske lastnosti, vendar pa je problematična za sušenje, zaradi podvrženosti obarvanju in velikim sušilnim napetostim, ki so posledica njenih specifičnih lastnosti. Primerjalno smo ovrednotili dva sušilna programa z vidika hitrosti sušenja in kakovost posušenih asortimentov z vidika vlažnostnega gradienta in velikosti notranjih napetosti. Za vrednotenje vlažnostnega gradienta in notranjih napetosti smo uporabili standardizirane metode, ki jih predpisujejo evropski standardi. Sušilna programa sta se razlikovala v ostrini sušenja, sta bila določena s pomočjo ravnovesne vlažnosti. Poleg tega smo primerjali tudi sušilno hitrost med režimoma.

Rezultati eksperimenta so potrdili domnevo, da večja ostrina sušenja pozitivno vpliva na sušilno hitrost in negativno na končno kakovost posušenih asortimentov gledano z vidika vlažnostnega gradienta in notranjih napetosti.

Skupni čas sušenja pri blažjih pogojih je trajal 576 ur, pri blažjem režimu pa je bil za 14,3 % krajši in je znašal 504 ure. Povprečna sušilna hitrost pod območjem nasičenja celičnih sten (TNCS) je pri blažjem režimu znašala 0,03 %/h, pri ostrejšem režimu pa 0,05 %/h, kar pomeni 40 % manjšo hitrost sušenja. Razlika v skupnem času sušenja pa kljub veliki razliki v sušilni hitrosti pod TNCS ni tako izrazita. Prav tako je bilo v eksperimentu potrjeno, da je sušilna hitrost večja v tangencialnih elementih, kjer je več trakovnega tkiva.

Primerjava radialnih in tangencialnih elementov je pokazala nekoliko večje vrednosti vlažnostnega gradienta v radialno orientiranih elementih. V povprečju je bil višji za 12 %, velja za oba režima. Razlika med režimoma je po končanem sušenju znašala 12,7 % pri radialnih elementih in 6,5 % pri tangencialnih elementih.

Velika razlika v sušilni hitrosti pa se bolj izrazito pokaže pri meritvah notranjih napetosti. Le te so največje na koncu sušenja. Povprečna velikost reže pri radialnih elementih, sušenih z blažjim režimom je -1,27 mm, pri ostrejšem režimu pa -2,13 mm, kar pomeni za 67,7 % večje notranje napetosti. Pri tangencialnih elementih pa je bila velikost reže pri blažjih pogojih -1,67 mm, pri ostrejših pogojih pa je večja za 42,5 % in je znašala -2,38 mm.

Končna kvaliteta elementov je glede na vlažnostni gradient in notranje napetosti, zadostovala za standardni kvalitetni razred (S). Za doseganje višjih kvalitetnih razredov pa bi bilo potrebno sušilne režime omiliti v zadnjih fazah sušenja in (ali) podaljšati fazo kondicioniranja.

7 VIRI

- Cassens D. 2002. Quality control in lumber purchasing: Lumber stress/casehardening. Forestry and Natural Resources. Purdue University: 4 str.
- Čufar K. 2002. Anatomija lesa. Nerecenzirano študijsko gradivo. Ljubljana. 120 str.
- Danihelova A., Viglasky J. 2004. The use of acoustic emissions to identify high levels of stress during wood drying. Wood research, 49, 3: 9-15
- prEN 14298 Sawn timber – Assessment of drying quality, 2004.
- ENV 14464 Sawn timber – Method for assessment of case-hardening, 2002.
- Esping B. 2001. Moisture content – the misunderstood drying quality. What can we do about it? V: Proceedings of the 3rd COST E15 Workshop, Helsinki, Finland
- Fuller J. 1995. Conditioning stress development and factors that influence the prong test. Res. Pap. FPL-RP-537. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory
- Gorišek Ž., Geršak M., Velušček V., Čop T., Mrak C. 1994. Sušenje lesa. Ljubljana, lesarska založba: 235 str.
- Gorišek Ž. 1994. Točka nasičenja celičnih sten kot kritična točka v procesu sušenja. Les, 46, 3: 53- 58
- Gorišek Ž. 1997. Ocenjevanje kakovosti sušenja lesa. Les, 5: 138-141
- Gorišek Ž. 2004a. Sušenje lesa, 1. del. Korak, 5, 1: 19
- Gorišek Ž. 2004b. Sušenje lesa, 2. del. Korak, 5, 2: 23
- Gorišek Ž. 2004. Les: zgradba in lastnosti, njegova variabilnost in heterogenost. Interno gradivo. Ljubljana.
- Gu H., Sharp A. 1999. Measurement of moisture gradients during kiln-drying. Forest Products Journal, 49, 4: 77-86
- Kolin B. 2000. Hidrotermička obrada drveta. Beograd, Jugoslavijapublik: 238 str.
- PERRÉ P., 2007. Fundamentals of wood drying. A.R.BO.LOR., Nancy: 366 str.
- Ranta-Maunus A. 2001. Analysis of case hardening. V:3rd COST E15 Workshop, Helsinki, Finska: 10 str.
- Sandland K.M., Tronstad S. 2001. Possibilities to control deformations in wood during

drying to meet the requirements from timber end-users. V: 3rd COST E15 Workshop, Helsinki, Finska: 12 str.

Siau J.F. 1995. Wood: Influence of Moisture on Physical Properties. Department of Wood Science and forest products: 227 str.

Welling J. 1994. EDG-Recommendation, Assessment of drying quality of timber, pilot edition

Welling J. 2002. State of the art of the standardisation process on wood drying in Europe. V: 4th COST E15 Workshop "Methods for improving drying quality of wood", Santiago de Compostela, Spain

ZAHVALA

Zahvaljujem se vsem, ki so mi kakorkoli pomagali pri izvedbi diplomskega dela, še posebej pa mentorju prof. dr. Željku Gorišku in recenzentu prof. dr. Primožu Ovnu ter doc. dr. Alešu Stražetu.

PRILOGE

Priloga A: Vlažnost kontrolnih vzorcev po vsakem odvzemu za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.

	0	93,5	165,5	219,5	264	376	517,5	576
vzorec	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]
1.1. R	66,31	34,14	26,2	23,2	20,8	17,5	12,7	12,4
2.1. R	88,76	41,28	30,29	26,2	24,1	13,1	12,3	11,7
3.1.R	74,96	33,92	26,46	23,6	20,3	17	11,7	10,8
4.1.R	91,24	35,01	25,31	21,8	18,8	15	11	10
5.1.R	70,43	33,11	25,73	23,2	20,6	16,7	12,1	11,3
6.1.R	86,70	36,91	27,34	23,8	20,8	16	11,4	9,8
7.1.R	70,88	31,92	24,62	21,8	19,1	15,3	11,7	10,9
8.1.R	70,23	33,32	25,62	22,8	20,2	16,2	12,1	11,2
9.1.R	72,06	36,19	28,68	25,6	22,6	18,5	14	12,8
11.1.R	78,57	38,09	27,9	24,9	21,6	17,8	11,6	12,7
12.1.R	65,02	33,33	22,83	23,6	20,7	16,8	10,6	10,9
13.1.T	76,50	31,2	25,31	20,1	17,5	13,1	9,5	8,8
14.1.T	92,78	31,75	25,31	21,6	18,4	15	9	10
15.1.T	98,06	43,88	28,36	24,3	20,8	15,7	9,1	9,8
16.1.T	90,50	39,66	26,35	21,7	18,6	15,3	8,6	9,6
17.1.T	75,70	33,5	24,49	18,8	18,7	13,8	10	9
18.1.T	72,37	40,33	29,75	26,5	22,5	17,2	13,2	11,5
u _{povprečna}	78,9	35,7	26,5	23,1	20,4	15,9	11,2	10,8
Rad. Elementi	75,9	35,2	26,5	23,7	20,9	16,4	11,9	11,3
Tan. Elementi	84,3	36,7	26,6	22,2	19,4	15,0	9,9	9,8

Priloga B: Vlažnost kontrolnih vzorcev po vsakem odvzemu za elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.

čas sušenja (h)	0	117	186	280,5	351	444	504
vzorec	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]
3.2. R	42,6	30,2	25,1	20	15,5	13,1	10,8
5.2. R	58,0	29,5	25,6	20,8	16,9	13,6	11,1
6.2.R	57,7	27,1	22,3	18,3	14,6	11,4	9,5
7.2.R	47,3	26,3	22,7	18,4	15,4	12,6	10
8.2.R	61,6	29,5	24,8	20,6	17,3	14,5	11,9
9.2.R	66,6	29,7	25	19,9	16,6	13,6	11,1
10.2.R	50,2	30,2	24	18,6	14,5	10	7,6
11.2.R	65,0	34,1	32	24	19,5	14,5	11,6
13.2.R	43,1	31,9	25,8	20,4	16,6	13,1	10,7
14.2.R	52,4	34,6	27	20,3	16	12	9
1.2.T	58,3	34,7	25,9	19,1	14,6	10,5	8,1
2.2.T	51,7	27,2	22,3	17,2	13,8	10,8	8,6
12.2.T	55,5	30	24	21	16,8	14,1	9,8
16.2.T	52,1	32,5	24,8	18,7	14,1	10,9	8,7
17.2.T	45,3	27,8	21,3	16,4	13,5	9,9	7,6
18.2.T	43,7	33,3	28,7	20,1	16,3	11,9	9,2
$u_{\text{povprečna}}$	53,2	30,5	25,1	19,6	15,8	12,3	9,7
Rad. Elementi	54,4	30,3	25,4	20,1	16,3	12,8	10,3
Tan. Elementi	51,1	30,9	24,5	18,8	14,9	11,4	8,7

Priloga C: Sušilna hitrost ločeno za radialne in tangencialne elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.

blažji režim debelina 50mm	nad TNCS	pod TNCS					
odvzem	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
U _{povprečna} (%)	35,7	26,7	23,1	20,4	15,9	11,0	10,8
čas sušenja (h)	93,5	165,5	219,5	264	376	517,5	576
deska	V _{sušenja} (%/h)	V _{sušenja} (%/h)	V _{sušenja} (%/h)	V _{sušenja} (%/h)	V _{sušenja} (%/h)	V _{sušenja} (%/h)	V _{sušenja} (%/h)
1.1. R	0,246	0,110	0,056	0,054	0,029	0,034	0,005
2.1. R	0,169	0,153	0,076	0,047	0,098	0,006	0,010
3.1.R	0,248	0,104	0,053	0,074	0,029	0,037	0,015
4.1.R	0,236	0,135	0,065	0,067	0,034	0,028	0,017
5.1.R	0,257	0,103	0,047	0,058	0,035	0,033	0,014
6.1.R	0,216	0,133	0,066	0,067	0,043	0,033	0,027
7.1.R	0,269	0,045	0,013	0,010	0,010	0,007	0,001
8.1.R	0,254	0,107	0,052	0,058	0,036	0,029	0,015
9.1.R	0,224	0,104	0,057	0,067	0,037	0,032	0,021
11.1.R	0,203	0,142	0,056	0,074	0,034	0,044	-0,019
12.1.R	0,254	0,099	0,048	0,065	0,035	0,044	-0,005
13.1.T	0,277	0,082	0,096	0,058	0,039	0,040	-0,022
14.1.T	0,271	0,089	0,069	0,072	0,030	0,042	-0,017
15.1.T	0,141	0,216	0,075	0,079	0,046	0,047	-0,012
16.1.T	0,187	0,185	0,086	0,070	0,029	0,047	-0,017
17.1.T	0,252	0,125	0,105	0,002	0,044	0,041	-0,017
18.1.T	0,179	0,147	0,060	0,090	0,047	0,028	0,029

Priloga D: Sušilna hitrost ločeno za radialne in tangencialne elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.

ostrejši režim debelina 50mm	nad TNCS	pod TNCS				
odvzem	1.	2.	3.	4.	5.	6.
U _{povprečna} (%)	30,54	25,08	19,61	15,75	12,28	9,71
čas sušenja (h)	117 h	186 h	280,5h	351h	444 h	504 h
deska	V _{sušenja} (%/h)	V _{sušenja} (%/h)	V _{sušenja} (%/h)	V _{sušenja} (%/h)	V _{sušenja} (%/h)	V _{sušenja} (%/h)
3.2. R	0,230	0,074	0,054	0,064	0,026	0,038
5.2. R	0,236	0,057	0,051	0,055	0,035	0,042
6.2.R	0,256	0,070	0,042	0,052	0,034	0,032
7.2.R	0,263	0,052	0,046	0,043	0,030	0,043
8.2.R	0,236	0,068	0,044	0,047	0,030	0,043
9.2.R	0,234	0,068	0,054	0,047	0,032	0,042
10.2.R	0,230	0,090	0,057	0,058	0,048	0,040
11.2.R	0,197	0,030	0,085	0,064	0,054	0,048
13.2.R	0,215	0,088	0,057	0,054	0,038	0,040
14.2.R	0,192	0,110	0,071	0,061	0,043	0,050
1.2.T	0,191	0,128	0,072	0,064	0,044	0,040
2.2.T	0,256	0,071	0,054	0,048	0,032	0,037
12.2.T	0,232	0,087	0,032	0,060	0,029	0,072
16.2.T	0,210	0,112	0,065	0,065	0,034	0,037
17.2.T	0,250	0,094	0,052	0,041	0,039	0,038
18.2.T	0,203	0,067	0,091	0,054	0,047	0,045

Priloga E: Rezultati meritev vlažnostnega gradienta za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.

čas sušenja (h)	93,5	165,5	219,5	264	376	517,5	576
$u_{\text{povprečna}}$ (%)	35,7	26,7	23,1	20,4	15,9	11,0	10,8
vlažnostni gradient	%/cm	%/cm	%/cm	%/cm	%/cm	%/cm	%/cm
1.1. R	4,69	6,26	6,33	6,04	5,07	3,40	2,72
2.1. R	7,15	6,87	7,26	7,31	5,52	3,24	2,35
3.1.R	4,60	6,87	6,47	6,57	5,43	3,37	2,46
4.1.R	4,33	5,89	5,44	5,27	3,72	2,02	1,94
5.1.R	4,48	6,50	6,58	6,52	4,81	2,83	2,31
6.1.R	4,32	6,53	6,69	6,54	4,45	2,41	1,91
7.1.R	4,00	5,14	5,25	5,44	3,73	2,43	2,00
8.1.R	4,52	5,83	6,25	6,34	4,89	2,88	2,33
9.1.R	5,47	6,07	6,90	7,09	5,48	3,72	2,97
11.1.R	2,72	6,28	6,35	6,47	5,27	3,28	2,81
12.1.R	4,67	6,27	6,37	6,36	5,27	3,32	2,21
13.1.T	4,06	5,36	5,20	3,97	2,82	1,82	1,54
14.1.T	3,92	5,71	4,88	5,35	3,78	2,04	1,53
15.1.T	4,59	5,59	5,88	4,76	4,19	2,23	1,82
16.1.T	5,77	5,37	5,45	5,06	2,90	2,12	1,85
17.1.T	2,99	5,37	4,07	4,85	3,31	2,10	1,86
18.1.T	7,49	6,27	6,92	6,35	4,64	2,92	2,30

Priloga F: Rezultati meritev vlažnostnega gradienta za elemente debeline 50 mm sušene z ostrejšim režimom.

čas sušenja (h)	117 h	186 h	280,5h	351h	444 h	504 h
$u_{\text{povprečna}}$ (%)	30,54	25,08	19,61	15,75	12,28	9,71
vlažnostni gradient	%/cm	%/cm	%/cm	%/cm	%/cm	%/cm
3.2. R	6,03	6,55	5,78	4,73	3,35	2,29
5.2. R	6,29	7,19	6,24	5,11	3,90	3,09
6.2.R	5,91	5,74	5,03	4,37	2,75	2,26
7.2.R	7,18	6,69	5,75	4,42	3,25	2,46
8.2.R	6,64	6,25	6,10	5,20	3,93	3,09
9.2.R	6,72	6,82	6,65	5,51	3,92	2,80
10.2.R	6,33	7,98	6,58	4,69	2,66	1,71
11.2.R	9,06	9,20	6,46	6,74	4,56	3,09
13.2.R	6,71	7,33	6,52	5,62	3,96	2,88
14.2.R	6,14	6,30	5,93	4,76	3,01	2,10
1.2.T	6,81	7,34	5,60	4,16	2,53	1,79
2.2.T	5,43	6,09	4,84	3,74	2,47	1,69
12.2.T	6,96	7,74	6,09	5,64	3,99	2,46
16.2.T	6,19	5,47	4,83	3,77	2,45	1,80
17.2.T	5,79	8,47	5,00	3,60	2,06	1,69
18.2.T	6,75	7,63	5,63	3,66	3,11	2,23

Priloga F: Rezultati meritev velikosti reže za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.

čas sušenja (h)	93,5	165,5	219,5	264	376	517,5	576
$u_{\text{povprečna}} (\%)$	35,7	26,7	23,1	20,4	15,9	11,0	10,8
velikost reže	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1.1. R	0	-1,1	-1,5	-1,6	-1,2	-1	-1,3
2.1. R	0,2	0	-0,8	-1,5	-1,2	-1	-1
3.1.R	1,3	-0,5	-1,2	-1,7	-1,4	-1,1	-1,4
4.1.R	1,1	-0,9	-1,3	-1,5	-1,8	-1,6	-1,1
5.1.R	0,5	-0,5	-1	-1,5	-0,9	-1,3	-1,3
6.1.R	1	-0,2	-1,4	-1,6	-1,1	-1,8	-1,7
7.1.R	0,2	-1,2	-1,4	-1,5	-1,4	-1,6	-1,3
8.1.R	0,2	-0,5	-0,5	-0,9	-0,8	-1,4	-1,2
9.1.R	1,3	-0,2	-1,2	-1,5	-1,4	-1,1	-1,2
11.1.R	0,8	-0,5	-1	-1,3	-1,2	-1	-1,1
12.1.R	0,5	-1	-1	-1,6	-1,2	-1,6	-1,4
13.1.T	0	-0,5	-1,4	-1,2	-2,8	-2	-1,5
14.1.T	0,1	-0,2	-0,5	-0,8	-1,4	-1,5	-1,5
15.1.T	0	-1,4	-1,8	-2	-2	-2	-1,8
16.1.T	1	-1,6	-2,1	-2,1	-2,6	-1,8	-2
17.1.T	1,5	-0,9	-1,7	-1,8	-2,9	-2,1	-1,6
18.1.T	1	-2	-1,3	-2,2	-1,1	-1,8	-1,6

Priloga F: Rezultati meritev velikosti reže za elemente debeline 50 mm sušene z blažjim režimom.

čas sušenja (h)	117	186	280,5	351	444	504
$u_{\text{povprečna}} (\%)$	30,54	25,08	19,61	15,75	12,28	9,71
velikost reže	mm	mm	mm	mm	mm	mm
3.2. R	0,5	-1,4	-1,4	-1	-1,3	-2
5.2. R	-0,5	-1,9	-1,2	-1,4	-1,3	-2,4
6.2.R	-1	-1,5	-1,4	-1,8	-1,9	-2,3
7.2.R	-0,5	-1	-1,1	-1,5	-1,5	-2,2
8.2.R	-0,2	-1,4	-0,8	0,8	-1,1	-1,9
9.2.R	-0,2	-1	-0,8	-1,1	-1,4	-2
10.2.R	-0,2	-1	-1,3	-0,8	-1,9	-2
11.2.R	2,5	0	-1,4	-1,8	-1,3	-2
13.2.R	-0,5	-1,3	-2,1	-1,5	-1,7	-2,3
14.2.R	1	-0,9	-1,1	-1	-2,1	-2,2
1.2.T	0	-2	-2,4	-3	-3	-2,3
2.2.T	-0,2	-1,1	-2,4	-1,9	-1,8	-2
12.2.T	-2	-1,7	-1,6	-1,4	-1,2	-2,6
16.2.T	0	-1,9	-1,9	-2,6	-2,7	-2,6
17.2.T	-1,2	-2	-2	-2,7	-2,8	-2,4
18.2.T	-1	-4	-2,6	-1,8	-2,6	