

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Matic MAVSAR

**VPLIV OSCILACIJE KLIME NA KINETIKO IN  
KAKOVOST SUŠENJA SMREKOVINE**

DIPLOMSKI PROJEKT

Visokošolski strokovni študij - 1. stopnja

Ljubljana, 2013

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Matic MAVSAR

**VPLIV OSCILACIJE KLIME NA KINETIKO IN KAKOVOST  
SUŠENJA SMREKOVINE**

DIPLOMSKI PROJEKT  
Visokošolski strokovni študij - 1. stopnja

**INFLUENCE OF OSCILLATION CLIMATE ON KINETICS AND  
DRYING QUALITY OF SPRUCE WOOD**

B. SC. THESIS  
Professional Study Programmes

Ljubljana, 2013

Diplomski projekt je zaključek Visokošolskega strokovnega študija Tehnologije lesa in vlaknatih kompozitov – 1. stopnja. Delo je bilo opravljeno na Katedri za Tehnologijo lesa.

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

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

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

Matic Mavsar

**KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

ŠD	Dv1
DK	UDK 630*847.2
KG	les/smrekovina/sušenje/kinetika/oscilacija
AV	MAVSAR, Matic
SA	GORIŠEK, Željko (mentor)/STRAŽE, Aleš (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2013
IN	VPLIV OSCILACIJE KLIME NA KINETIKO IN KAKOVOST SUŠENJA SMREKOVINE
TD	Diplomski projekt (Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja)
OP	IX., 35 str., 2 pregl., 22 sl., 6 pril., 17 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Kinetiko in kakovost sušenja smrekovine ( <i>Picea abies</i> (L) Karst.) smo raziskovali pri 3 različnih pogojih sušenja; s standardnim postopkom z blago, ostro in oscilacijsko klimo. Uporabili smo stranske deske debeline 25 mm in jih osušili na končno vlažnost 11 %. Pri vseh postopkih smo z intervalnim odvzemom merili: povprečno vlažnost, vlažnostni gradient in zaskorjenje. Končna vlažnost osušenega lesa je bila pri vseh 3 eksperimentih podobna z zanemarljivim odstopanjem. Najvišji vlažnostni gradient smo izmerili pri standardnem programu z ostro klimo, sledil je standardni program z oscilacijsko klimo, najmanjši pa je nastal pri programu z blago klimo. Pri sušenju v oscilacijskih in ostrih klimatskih pogojih se je pojavila zaskorjenost. Stopnja zaskorjenosti pri ostri klimi je bila višja kot pri oscilacijski. Delovne hipoteze, da oscilacija klime omogoča kakovostnejše sušenje, nismo v celoti potrdili.

## KEY WORDS DOCUMENTATION

ND Dv1  
DC UDC 630\*847.2  
CX wood/spruce/drying/kinetics/oscillation  
AU MAVSAR, Matic  
AA GORIŠEK, Željko (supervisor)/STRAŽE, Aleš (co-advisor)  
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34  
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science  
and Technology  
PY 2013  
TY INFLUENCE OF CLIMATE OSCILLATION ON KINETICS  
AND DRYING QUALITY OF SPRUCE WOOD  
DT B. Sc. Thesis (Professional Study Programmes)  
NO IX., 35 p., 2 tab., 22 fig., 6 ann., 17 ref.  
LA sl  
Al sl/en  
AB Drying kinetics and drying quality of spruce wood (*Picea abies* (L.) Karst.) were investigated at 3 different drying conditions. Drying was performed using a standard procedure with mild, sharp and with oscillatory drying climatic conditions. 25 mm thick side boards were dried till they reached final moisture of 11 %. All procedures were compared by intermittent removal of samples and by measuring the following properties of wood: average moisture content, moisture gradient and casehardening. The final value of the dried wood moisture in all 3 experiments was the same with negligible variations. The maximum moisture content gradient was gained using a drying procedure with the sharp climate, medium by oscillatory climate, and the lowest in the standard program with a mild climate. The casehardening occurred when dried in oscillating and sharp climatic conditions. Rate of casehardening in sharp climate was higher than in the oscillatory climate. The working hypothesis that the oscillating climate enables better drying was not completely confirmed.

## KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO SLIK	VII
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO PRILOG	IX

<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA.....	1
1.2 DELOVNE HIPOTEZE .....	1
1.3 CILJI NALOGE.....	2
<b>2 PREGLED OBJAV .....</b>	<b>3</b>
2.1 OPIS SMREKOVINE.....	3
<b>2.1.1 Makroskopska zgradba smrekovine .....</b>	<b>3</b>
2.2 UPORABA SMREKOVINE .....	4
<b>2.2.1 Sušenje smrekovine.....</b>	<b>4</b>
2.3 VODA V LESU .....	4
2.4 MEHANIZEM SUŠENJA .....	6
<b>2.4.1 Izhlapevanje vode s površine.....</b>	<b>6</b>
<b>2.4.2 Tok vode v lesu .....</b>	<b>7</b>
2.4.2.1 Permeabilnost .....	7
2.4.2.2 Difuzivnost.....	8
<b>2.4.3 Sušilne napetosti .....</b>	<b>8</b>
2.5 KINETIKA SUŠENJA .....	9
<b>2.5.1 Režimi sušenja .....</b>	<b>10</b>
2.6 KAKOVOST SUŠENJA LESA .....	11
<b>3 MATERIAL IN METODE .....</b>	<b>12</b>
3.1 MATERIAL.....	12
3.2 SUŠILNI POSTOPEK .....	14

3.3 DOLOČANJE VLAŽNOSTI IN VLAŽNOSTNEGA GRADIENTA .....	17
3.4 KONTROLA KAKOVOSTI SUŠENJA .....	19
<b>4 REZULTATI.....</b>	<b>20</b>
4.1 KINETIKA SUŠENJA .....	20
4.2 VLAŽNOSTNI GRADIENT .....	22
4.3 OCENA KAKOVOSTI .....	24
<b>5 RAZPRAVA.....</b>	<b>27</b>
<b>6 SKLEPI .....</b>	<b>31</b>
<b>7 POVZETEK.....</b>	<b>32</b>
<b>8 VIRI .....</b>	<b>33</b>
<b>ZAHVALA</b>	
<b>PRILOGE</b>	

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Radialna porazdelitev vlažnosti za smrekovino v odvisnosti od relativne oddaljenosti od stržena .....	5
Slika 2: Odvisnost ravnovesne vlažnosti lesa od temperature in relativne zračne vlažnosti. ....	5
Slika 3: Shematski prikaz pretoka vode v lesu .....	6
Slika 4: Preizkušanci smrekovine, uporabljeni pri različnih režimih sušenja. ....	12
Slika 5: Preizkušanci smrekovine z zaščitenimi čeli (premazno sredstvo STIPOLA-AF), uporabljeni pri različnih režimih sušenja.....	13
Slika 6: Preizkušanci v sušilnem kanalu z zaprtim tokokrogom zraka (Kambič) .....	13
Slika 7: Program sušenja smrekovine z blago klimo.....	15
Slika 8: Program sušenja smrekovine z ostro klimo.....	16
Slika 9: Program sušenja smrekovine z oscilirajočim načinom .....	17
Slika 10: Označeni preizkušanci v laboratorijskem sušilniku. ....	18
Slika 11: Sušilna krivulja slojev za blagi režim sušenja.....	20
Slika 12: Sušilna krivulja slojev za ostri režim sušenja .....	21
Slika 13: Sušilna krivulja slojev za oscilacijsko sušenje .....	22
Slika 14: Povprečni vlažnostni gradient pri standardnem sušilnem programu z blago klimo. ....	23
Slika 15: Povprečni vlažnostni gradient pri standardnem sušilnem programu z ostro klimo. ....	23
Slika 16: Povprečni vlažnostni gradient pri oscilacijskem programu sušenja.....	24
Slika 17: Odklon preizkušancev, sušenih s standardno metodo z blagim režimom v odvisnosti od lesne vlažnosti .....	25
Slika 18:Odklon preizkušancev, sušenih s standardno metodo z ostrim režimom v odvisnosti od lesne vlažnosti .....	26
Slika 19: Odklon preizkušancev, sušenih z oscilacijsko klimo v odvisnosti od lesne vlažnosti.....	26
Slika 20: Sušilne krivulje v posameznih režimih sušenja.....	27
Slika 21: Povprečni vlažnostni gradient v režimih sušenja. ....	28
Slika 22: Odklon lamel preizkušancev v posameznih režimih sušenja.....	29

## **KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Program sušenja smrekovine s standardnim postopkom z blago klimo..... 14

Preglednica 2: Program sušenja smrekovine s standardnim postopkom z ostro klimo..... 15

## KAZALO PRILOG

Priloga A: Program sušenja z blago klimo in dejanski sušilni proces.

Priloga B: Program sušenja s standardnim postopkom z blago klimo v obliki tabele.

Priloga C: Program sušenja z ostro klimo in dejanski sušilni proces.

Priloga Č: Program sušenja s standardnim postopkom z ostro klimo v obliki tabele.

Priloga D: Program sušenja z oscilacijsko klimo v obliki tabele.

Priloga E: Program sušenja z oscilacijsko klimo in dejanski sušilni proces.

## 1 UVOD

### 1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Sušenje lesa je eno izmed najdaljših in najzahtevnejših operacij v lesni industriji. S povečevanjem ostrine in temperature skušamo skrajšati čas sušenja ter stroške te operacije in pri tem ohraniti čim boljše lastnosti lesa pri končni vlažnosti. Pri sušenju moramo biti pozorni, da ne zvišujemo temperature v sušilni komori, dokler je v lesu prosta voda. Pri sušenju pod točko nasičenja celičnih sten (TNCS), ki je približno pri 30-ih % lesne vlažnosti, potrebujemo več energije za izhajanje vezane vode iz lesa. Izbrati moramo pravilne procesne parametre sušenja, da ne tvegamo nastanka sušilnih napak in razvrednotenja lesa.

Znani so že pozitivni učinki navlaževanja lesa na relaksacijo napetosti po končanem ciklusu sušenja. Intervalno navlaževanje se uporablja tudi pri preprečevanju zaskorjenja med postopkom sušenja. Manj so raziskani vplivi neprekinjene oscilacije klimatskih pogojev na hitrost in kakovost sušenja.

### 1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Kakovost osušenega lesa določa kinetika sušenja, značilen vpliv pa ima tudi vstopna kakovost žaganega lesa. Predpostavljamo, da s pravilno izbiro sušilnega programa in parametrov sušenja lahko dosežemo kakovostno osušen material v primerem času. Pričakujemo, da se zaradi mehano-sorptivnih učinkov v oscilacijski klimi sušenja zmanjša nevarnost zaskorjenja in notranjih napetosti. Zaradi nihajoče klime pričakujemo, da bi le-ta omogočila hitro sušenje, še posebno v primerih, ko se pri intenzivnem sušenju v površinskih slojih pojavi difuzijska bariera.

### 1.3 CILJI NALOGE

Na konkretnem primeru sušenja smrekovine bomo preverili učinek večjih ali manjših oscilacij ostrine sušenja glede na hitrost in kakovost sušenja. Ugotoviti želimo, kako nihanje klime vpliva na kinetiko sušenja po posameznih fazah in na celotni čas sušenja. Vzporedno bomo s kinetiko sušenja spremljali tudi učinke nihajoče klime na kakovost lesa med sušilnim procesom. Kakovost bomo dodatno spremljali z intervalnim gravimetričnim določanjem vlažnostnega gradiента, z določanjem zaskorjenosti ter vizualno z analizo nastalih površinskih napak med sušilnim procesom.

## 2 PREGLED OBJAV

### 2.1 OPIS SMREKOVINE

Areal smreke (*Picea abies* (L) Karst.) se nahaja v severnih in hribovitih delih Srednje Evrope. Pri nas uspeva po celi Sloveniji, redkeje na Primorskem in v Istri. Ima veliko gospodarsko pomembnost in jo že od nekdaj načrtno gojijo.

Deblo iz sestojev je polnolesno, ravno in vitko. Krošnja je piramidalna oz. stožčasta. Prsni premer meri tudi do 2 metra, v višino pa zraste od 30 do 50 metrov. Ima tanko gladko rjavu rdečkasto-skorjo. Storži so viseči, iglice pa razporejene okoli veje, trde, ošiljene in štirioglate (Pipa, 1990).

#### 2.1.1 Makroskopska zgradba smrekovine

Barva smrekovine je rumenkasto bela do rumenkasto rjave barve. Beljava in jedrovina sta barvno nerazločni zaradi neobarvane jedrovine. Les je elastičen, lahko cepljiv, se dobro suši in lušči ter se na splošno lahko obdeluje. Trajnost na prostem je slaba in neodpora, to pa povečamo z ustreznimi zaščitnimi sredstvi. Les je podoben jelovini (*Abies alba* (L)). Les smreke je smolnat, smolni kanali so majhni in slabo vidni, smolni žepki pa so kar pogost pojav.

Smrekovina je lahek les, minimalna gostota znaša  $300 \text{ kg/m}^3$ , maksimalna pa  $640 \text{ kg/m}^3$ , v povprečju znaša vrednost  $430 \text{ kg/m}^3$ . Pri 12 %-ni vlažnosti lesa je gostota smrekovine  $470 \text{ kg/m}^3$ . Krčenje lesa je zmerno:

- volumensko (11,6–12 [%]);
- radialno (3,5–3,7 [%]);
- tangencialno (7,8–8 [%]).

Vlažnost nasičenja celičnih sten ( $u_{TNCS}$ ) pri smrekovini je uvrščena v razred vlažnosti od 30–34 % (les iglavcev z neobarvano jedrovino) (Gorišek in sod., 1994).

## 2.2 UPORABA SMREKOVINE

Smrekovina ima širok spekter uporabe, in sicer kot gradbeni in konstrukcijski les, uporablja pa se tudi pri stavbnem pohištву in mizarski panogi. Uporablja se za embalažo, leseno volno, proizvodnjo celuloze in papirja ter za proizvodnjo lesnih tvoriv (vezane, mizarske, iverne in vlaknene plošče ter za furnir). Resonančni les smreke je zelo cenjen in se uporablja za izdelavo glasbil, športnih orodij, letal, plovil ipd.

### 2.2.1 Sušenje smrekovine

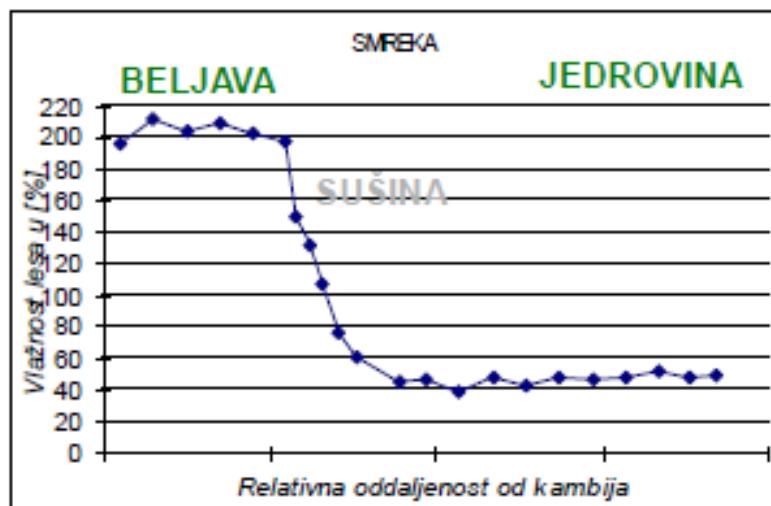
Smrekovina ni težavna za sušenje, lahko se pojavi le mehanske napake kot so razpoke in veženja, obarvanje površine ali notranjih slojev. V kasnejši obdelavi se lahko pokažejo še napake zaradi rastnih lastnosti ali notranjih napetosti. Nekaj problemov nam povzroča tudi iztekanje smole na površino (temperatura 60–65 °C), ki jo odstranimo z enostavnim postopkom skobljanja in krpanja. Za preprečitev tega pojava potrebujemo maksimalno temperaturo sušenja od 55 do 60 °C. Cilj operacije je, da poskušamo les posušiti do končne vlažnosti s čim manjšimi številom napak oz. idealno brez vseh naštetih napak.

## 2.3 VODA V LESU

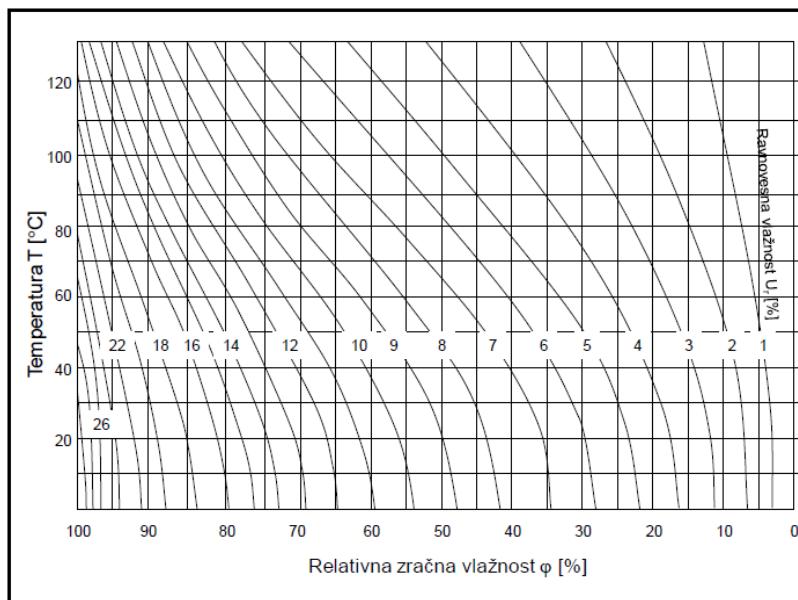
Vodo v lesu delimo na prosto (kapilarno) vodo in vezano (higroskopno) vodo. Prosta voda ni vezana v celično steno in se nahaja v lumnih traheid celic, medtem ko se vezana voda zadržuje v celičnih stenah. Količina proste vode je odvisna od drevesne vrste, rastišča in letnega časa.

Iglavci imajo ogromne razlike v deležu proste vode. Glede na absolutno suho maso lesa vsebuje beljava 100 do 200 % (nekatere vrste celo 250 %) vode; jedrovina le od 30 do 40 % (Slika 1). Pomembna je tudi oddaljenost kambija od mesta merjenja. Pri meji z jedrovino vlažnost strmo pada. Les navadno sušimo do ravnotesne vlažnosti, ki je odvisna od klimatskih pogojev na mestu vgradnje (Slika 2). V bolj vlažnih okoljih je ravnotesna

vlažnost lesa od 18 do 20 %, v normalni klimi (pri relativni zračni vlažnosti 65 % ( $\phi = 65\%$ ) in temperaturi  $20^{\circ}\text{C}$  ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ )) je približno 12 %, v ogrevanih prostorih pa 6 do 10 %, pri vrtnem pohištву pa 14 do 16 % (Gorišek, 2009).



Slika 1: Radialna porazdelitev vlažnosti za smrekovino v odvisnosti od relativne oddaljenosti od stržena (Distribucija vode ..., 2013).



Slika 2: Odvisnost ravnovesne vlažnosti lesa od temperature in relativne zračne vlažnosti (Gorišek, 2009).

Prosta ali kapilarna voda ni vezana v celično steno, nahaja se v lumnih celic in vpliva samo na maso lesa, ne pa tudi na lastnosti le-tega. Tok poteka prek medsebojnih pikenjskih odprtin in prek lumnov. Skozi lumne in celične stene pa poteka difuzijski tok. Z velikostjo prostornine lumnov je pogojena količina kapilarne vode v lesu, delež lumnov pa določa poroznost. Z gostoto lesa je pogojena tudi količina vode v lesu. Nižja je gostota lesa, večjo ima napotitveno vlažnost. Posledično lahko sprejme večje količine vode, saj vsebujejo večji delež celičnih lumnov.

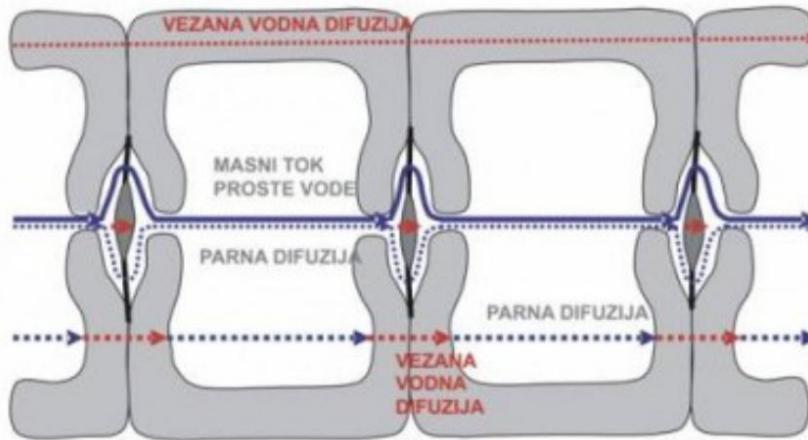
Vezana ali higroskopna voda pa je vrinjena v celično steno in je vezana na proste polarne skupine osnovnih lesnih komponent: na hemicelulozo, na celulozo in nekaj tudi na lignin.

## 2.4 MEHANIZEM SUŠENJA

Večina interpretacij konvekcijsko sušenje deli na dva segmenta in sicer:

- na izhlapevanje vode s površine, in
- na tok vode s sredice na površino.

Notranji tok poteka kot snovni tok proste vode in kot difuzijski tok vezane vode (Slika 3).



Slika 3: Shematski prikaz pretoka vode v lesu (Gorišek, 2005).

### 2.4.1 Izhlapevanje vode s površine

Zrak pri sušenju opravlja dve funkciji: je v vlogi nosilca toplote na površino lesa ter medij za prenos izhlapele vode s površine. Čas in kakovost posušenega lesa sta v prvi fazi

sušenja odvisna od hitrosti gibanja zraka in njegovega enakomernega kroženja. Nastavitev hitrosti ventilatorjev in s tem hitrost gibanja zraka mora biti prilagojena intenzivnosti izparevanja vode s površine. Če je kroženje prepočasno, se lahko topel zrak pri prehodu skozi zložaj preveč ohladi, s tem pa se mu poviša relativna zračna vlažnost. Posledica so premalo posušene deske na koncu zložajev.

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

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

## 2.4.2 Tok vode v lesu

Prosta voda prehaja iz sredine lesa na površino preko pikenjskih povezav med celičnimi lumni. Sposobnost lesa za prevajanje proste vode določamo s permeabilnostjo, tok vezane vode na površino pa poteka po difuzijskih principih.

### 2.4.2.1 Permeabilnost

Permeabilnost ali prevodnost je sposobnost prevajanja tekočin (kapljevin in plinov), kjer je potreben tudi tlačni potencial. Raziskave za plinsko in tekočinsko permeabilnost so potrdile, da se z dolžino transportne razdalje permeabilnost lesa zmanjšuje (Perre in Karimi, 2002). Za učinkovito prevajanje oz. permeabilnost morata biti dosežena dva pogoja: material mora biti porozen, kar pomeni, da ima v lesu »prazne prostore«, oz. t.i. lumne; ter med lumni mora obstajati možnost snovnega toka. Povezava med lumni celic poteka preko pikenj. Gostota in poroznost sta odvisni ena od druge, medtem ko zveza s prevodnostjo ni nujna. Prevodnost kapljevin skozi kapilarne sisteme pojasnjuje Darcyjev zakon, ki podaja linearno zvezo med tokom oz. pretokom tekočine in tlačnim gradientom.

Na prevodnost pri iglavcih vpliva predvsem aspiracija obokanih pikenj in odlaganje jedrovinskih snovi na margo. Povprečna velikost pikenj za iglavce znaša  $0,3 \mu\text{m}$  (Gorišek, 2009/2010). Pri iglavcih je razmerje med permeabilnostjo: v tangencialni in vzdolžni smeri  $1 : 500 - 1 : 80 \times 10^3$ , med vzdolžno in radialno smerjo pa meri razmerje  $1 : 15 - 1 : 50 \times 10^3$  (Bramhall, 1971; Kauman in sod., 1994; Siau, 1984).

#### 2.4.2.2 Difuzivnost

Difuzijski tok predstavlja molekularno gibanje pod vplivom gradijeta koncentracije. Tok vezane vode obravnavamo kot difuzijski tok. Tok lahko poteka po celičnih stenah kot difuzija vezane vode, po celičnih lumnih pa poteka difuzijski tok vodne pare. Pri sušenju je pomembna tudi kombinacija obeh tokov. Obstajajo tudi trditve, da kapilarna voda med procesom sušenja lesa ostaja v celoti ujeta v celičnih lumnih. Do njenega transporta naj bi prihajalo šele, ko vlažnost celičnih sten pade pod vlažnost nasičenja in se voda iz lesa v nadaljevanju izloča difuzijsko, kot posledica koncentracijskega gradijeta (Whitaker, 1977).

#### 2.4.3 Sušilne napetosti

Sušilne napetosti so posledica anizotropnega krčenja lesa in vlažnostnega gradijeta. V rastočem drevesu že lahko nastanejo rastne napetosti, katere so nato še bolj izrazite v fazi sušenja in povzročajo težave. Zaradi vlažnostnega gradijeta nastanejo najpomembnejše krčitvene napetosti pri procesu sušenja (Gorišek s sod., 1994).

Sušilne napake, kot so razpoke in zvijanje (veženja) nastanejo v glavnem zaradi sušilnih napetosti in krčitvene anizotropije ter rastnih nepravilnosti – anomalij. S počasnim sušenjem so manjše tudi sušilne napetosti, vendar se zaradi počasnega postopka energijska učinkovitost zmanjša in strošek sušenja poveča. Sušilne napetosti moramo zato obravnavati tudi kot kontrolni parameter v sušilnem postopku (Hanhijärvi s sod. 2003). Tako lahko hitrost sušenja prilagodimo, ne da bi se v lesu pojavile trajne deformacije.

Tudi po končanem sušenju obstaja nevarnost sušilnih napetosti, le da te niso vidne, tako kot razpoke ali zvijanje. Zaskorjenje je huda napaka, ki nastane, ko je periferija oz. zunanjji sloj obremenjen tlačno, sredica pa natezno. Tak les lahko pri obdelavi poka, se zvija in krivi ter je praktično neuporaben v nadaljnji obdelavi.

Obremenitve pri sušenju površinske plasti nastanejo pod TNCS, ko se les prične krčiti. Nastane zunanja zaskorjenost, kar pomeni, da se krčenju zunanjih plasti upirajo notranje plasti, katere še niso dosegle TNCS. Zunanje plasti so obremenjene na nateg in se pri velikih napetostih trajno plastično deformirajo. Notranjost lesa je obremenjena na tlak. V zadnji fazi sušenja se napetostno polje obrne, ker je krčenje površinskih slojev – zaradi trajnih plastičnih deformacij – manjše od krčenja sredice. Napetostno stanje, kjer je sredica obremenjena na nateg, površina pa na tlak, imenujemo zaskorjenje.

Zaskorjenje je možno preprečiti s sušenjem z blagim režimom oz. manjšo ostrino in navlaževanjem zunanjih plasti proti koncu sušilnega procesa.

Zaskorjenost ocenujemo z viličnim testom ali prežagovalno metodo, poznamo pa tudi ekstenziometrsko metodo, defleksijsko metodo in mnogo drugih.

Na notranje napetosti, ki nastanejo med sušenjem, močno vplivajo procesni parametri sušenja, kot so temperatura, relativna zračna vlažnost in hitrost zraka v sušilni komori, s katerimi lahko proces sušenja tudi nadziramo (Geršak in Velušček 2003, Gorišek in sod., 1994).

## 2.5 KINETIKA SUŠENJA

Kinetika opisuje časovni potek sušilnega procesa in predstavlja spremembo povprečne vlažnosti in povprečne temperature ter zračne vlažnosti tekom sušilnega procesa. Poznamo različne faze sušenja med samim procesom. Pri segrevanju pregrevemo les po celotnem prerezu, temperatura lesa pa mora znašati vsaj toliko, kot začetna temperatura sušenja. Les se med to fazo ne osušuje.

Glavni prevladujoči del sušenja razdelimo na tri faze. Med prvo fazo konstantne hitrosti sušenja izhaja prosta voda lesa; ta faza poteka, dokler na površini ne dosežemo TNCS. Pri

smrekovini predstavlja to od 30–34 % lesne vlažnosti. Zaradi slabe trdnosti lesa sušimo v teh pogojih z zmerno klimo in majhno psihrometsko razliko.

Sledi faza kombiniranega pretoka proste in vezane vode v lesu, kjer se vlažnost sredice približuje TNCS, zunanje plasti pa se uravnovesijo s sušilnim zrakom. Temperature še ne spreminja, tako da ta ostaja na začetni nizki stopnji ali pa jo le počasi dvigujemo.

Faza difuzijskega sušenja pa nastopi, ko ima les po celotnem prerezu vlažnost pod TNCS; ta faza traja do želene oz. končne vlažnosti. Temperaturo sušenja v tej fazi dvignemo, trdnost lesa začne naraščati, hitrost sušenja pa močno upada.

Z izenačevanjem poskrbimo za osuševanje preizkušancev, ki še vedno vsebujejo višjo vlažnost, kot je želena oz. končna vlažnost.

Ohlajevanje je postopek, s katerim preprečimo nastanek dilatacijskih razpok in presušitev zunanjih slojev. V tej fazi mora imeti zrak, s katerim sušimo, higroskopsko ravnotežje z želeno vlogo preizkušanca (Cividini, 1962).

### **2.5.1 Režimi sušenja**

Z režimi ali programi sušenja vodimo postopek sušenja, z reguliranjem klime zraka v sistemu in s tem dovolj hitro in brez napak osušimo les. Za vsako vrsto lesa je določen posamezen program sušenja. Poznamo tri najpogosteje režime sušenja: na osnovi vlažnosti lesa, na osnovi časa sušenja in na osnovi ostrine sušenja. Standardni režim sušenja z blago klimo je najbolj varen program za sušenje. Začetna in končna temperatura je nizka, prav tako pa tudi hitrost zraka. Hitrost sušenja je dolga, kar pomeni tudi višji strošek sušilnega procesa. Standardni režim sušenja z ostro klimo ima nasprotne lastnosti kot režim z blago klimo. Začetna in končna temperatura je višja in tudi hitrost zraka se zviša. Hitrost sušenja se skrajša in tudi stroški so nižji. Cilj je ohraniti kakovost lesa. Zaradi velike ostrine sušenja lahko nastanejo določene napake. S programom oscilacije skušamo izničiti napake, ki bi utegnile nastati. Lastnosti sistema so iste kot pri ostrem režimu, le ravnovesna vlažnost se spreminja (povečuje in zmanjšuje) za določen odstotek v določenem časovnem intervalu. Z meritvami med in po sušilnem programu določimo ustreznost izbire posameznega režima sušenja. Po končanem procesu lahko ugotovimo oz.

sestavimo optimalni režim, tj. režim, pri katerem se les posuši brez napak v najkrajšem možnem času.

## 2.6 KAKOVOST SUŠENJA LEZA

Kakovost osušenega lesa mora ostati nespremenjena, oz. se mora – zaradi boljših lastnosti suhega lesa – celo izboljšati. Glede na uporabo in namen osušenega lesa moramo predčasno določiti, kakšna naj bi bila kakovost lesa. Vpliv inherentnih značilnosti lesa vpliva tako na kakovost lesa kot tudi na kakovost sušenja. Lastnosti, na katere moramo biti pozorni, so naslednje: gostota, mehanske lastnosti, krčenje in nabrekanje, notranje napetosti, orientacija vlaken, grče, smolike, reakcijski les, juvenilni les in sorpcijske značilnosti lesa. Smrekovina ni težavna za sušenje, saj je gostota lesa dokaj nizka, krčenje in nabrekanje lesa pa je zmerno. Sušenje nekoliko ovira iztekanje smole in spiralna rast vlaken. Dejavniki, ki vplivajo na končno kakovost lesa so nepravilna končna vlažnost in vlažnostni gradient, mehanske napake, obarvanje lesa in prisotnost notranjih napetosti. Kontrola kakovosti poteka že pred sušilnim postopkom, med samim postopkom in po končanem procesu sušenja. Kakovost se oceni po končnem osuševanju po določenih kriterijih in se nato uvrsti v primeren kakovostni razred.

### 3 MATERIAL IN METODE

#### 3.1 MATERIAL

V vseh sušilnih eksperimentih smo izbrali les navadne smreke (*Picea abies* (L) Karst.) in preučevali kinetiko sušenja, zaskorjenje, ostrino sušenja ter vlažnostni gradient.

Za sušilne programe z različnimi pogoji in različnimi režimi sušenja smo vzeli pripravljene preizkušance smrekovega žaganega lesa: debeline 25 mm, širine 150 mm in dolžine 1.000 mm (Slika 4). Sušili smo iz svežega stanja do končne oz. ciljne vlažnosti 11 %, čela preizkušancev pa smo zatesnili s parotesnim premazom Stipol AF ® (Slika 5). Uporabili smo stranske deske smrekovine ter v vsakem eksperimentu sušili po 10 preizkušancev in 4 sledilne preizkušance.

Eksperimenti so bili izvedeni v sušilnem kanalu z zaprtim tokokrogom zraka. Sušilni kanal je produkt podjetja Kambič (Slika 6).



Slika 4: Preizkušanci smrekovine, uporabljeni pri različnih režimih sušenja.



Slika 5: Preizkušanci smrekovine z zaščitenimi čeli (premazno sredstvo STIPOLA-AF), uporabljeni pri različnih režimih sušenja.



Slika 6: Preizkušanci v sušilnem kanalu z zaprtim tokokrogom zraka (Kambič).

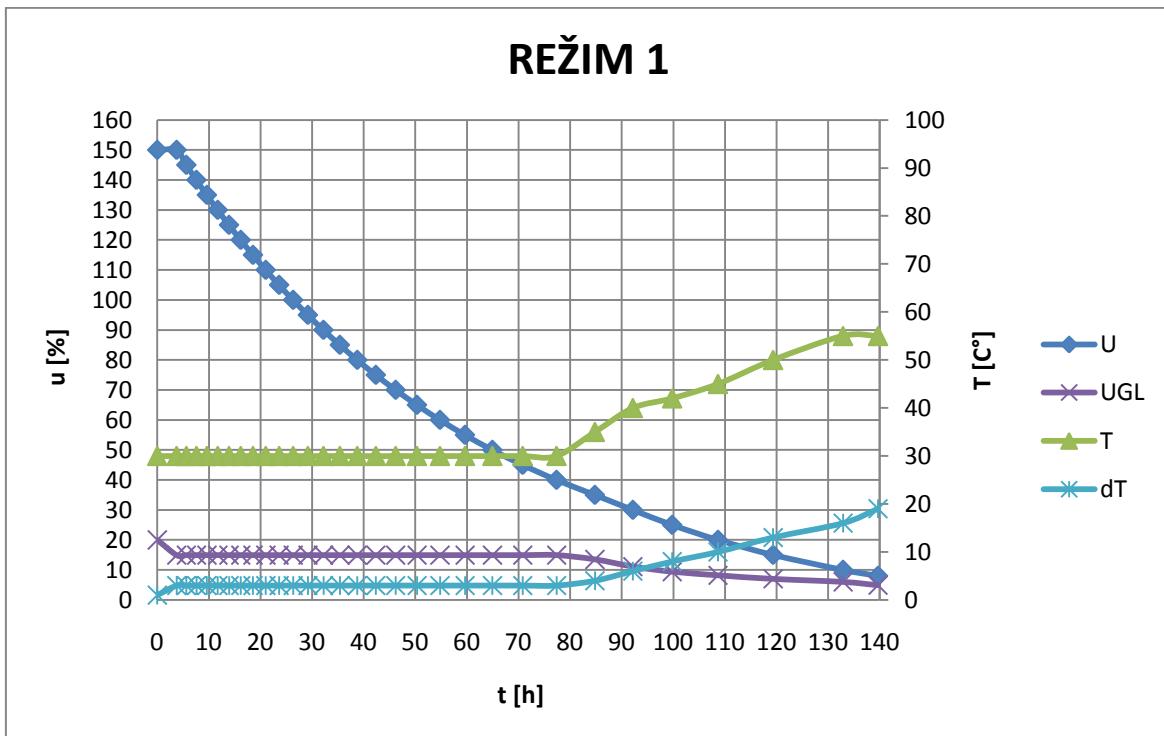
### 3.2 SUŠILNI POSTOPEK

Sušili smo po treh različnih postopkih sušenja. V prvem postopku smo sušili s standardnim postopkom z blago klimo in daljšim trajanjem postopka. V drugem postopku smo sušili s standardnim postopkom z ostro klimo in s tem pospešili hitrost sušenja. Zadnji tretji režim pa je bil modificiran standardni režim z oscilirajočimi sušilnimi pogoji.

Pri standardnem sušilnem postopku z blago klimo (Slika 7) smo fazo segrevanja izvajali do 30 °C, med sušenjem pa je temperatura postopoma naraščala in na koncu dosegla 55 °C (Preglednica 1). Hitrost kroženja zraka je bila konstantna, in sicer 1,5 m/s. Po končanem sušenju so sledili še postopek izenačevanja, kondicioniranja in nato ohlajanja. Med sušilnim procesom je psihrometska razlika postopoma naraščala in dosegla maksimalno vrednost 19 °C.

Preglednica 1: Program sušenja smrekovine s standardnim postopkom z blago klimo (u – vlažnost lesa; T – temperatura suhega termometra; dT – psihrometska razlika in UGL – ravnovesna vlažnost lesa).

ČAS	u [%]	T [°C]	dT [°C]	UGL [%]
0	150	30	1	20
3,75	150	30	3	14,9
84,8	35	35	4	13,5
92,2	30	40	6	11,1
99,8	25	42	8	9,4
108,7	20	45	10	8,2
119,3	15	50	13	7
132,9	10	55	16	6
139,7	8	55	19	4,9

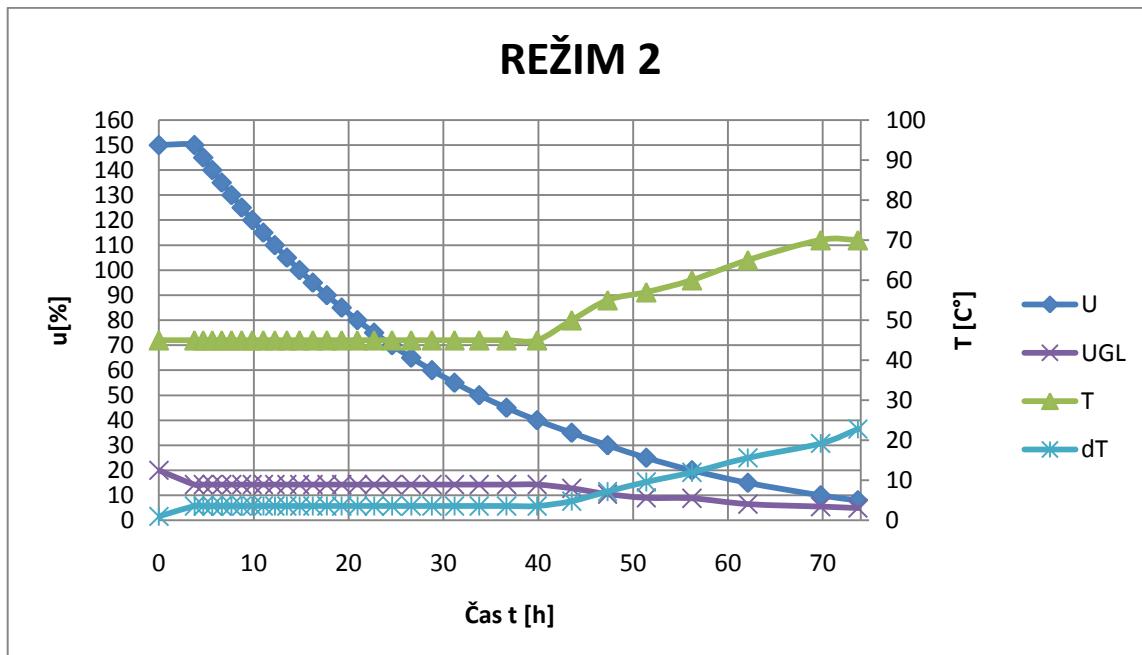


Slika 7: Program sušenja smrekovine z blago klimo (U – vlažnost lesa (%); UGL – ravnovesna vlažnost lesa (%); T – temperatura zraka (°C) in dT – psihrometrsko razlika (°C)).

Pri standardnem sušilnem postopku z ostro klimo (Slika 8) smo med fazo segrevanja les ogreli na 45 °C, med sušenjem pa je temperatura postopno naraščala in na koncu dosegla 70 °C (Preglednica 2). Hitrost zraka je bila konstantna in je znašala 2,5 m/s. Po končanem sušenju so sledili postopek izenačevanja, kondicioniranja in nato ohlajanja. Med sušenjem je naraščala tudi psihrometrsko razliko in dosegla maksimalno vrednost 22,8 °C.

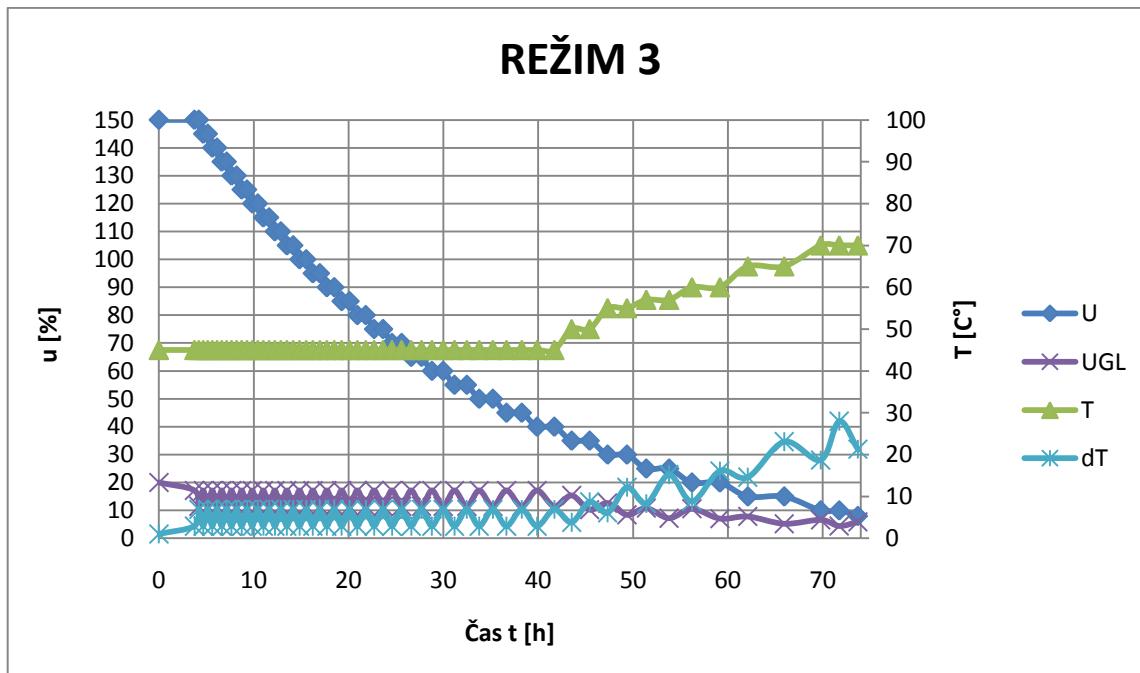
Preglednica 2: Program sušenja smrekovine s standardnim postopkom z ostro klimo (u – vlažnost lesa; T – temperatura suhega termometra; dT – psihrometrsko razlika in UGL – ravnovesna vlažnost lesa).

ČAS	u [%]	T [°C]	dT [°C]	UGL [%]
0	150,0	45	1	20
3,75	150,0	45	3,6	14,3
43,5	35,0	50	4,8	12,8
47,3	30,0	55	7,2	10,5
51,4	25,0	57	9,6	9
56,2	20,0	60	12	8,8
62,1	15,0	65	15,6	6,5
69,8	10,0	70	19,2	5,5
73,7	8,0	70	22,8	4,9



Slika 8: Program sušenja smrekovine z ostro klimo (U – vlažnost lesa (%); UGL – ravnovesna vlažnost lesa (%); T – temperatura zraka (°C) in dT – psihrometska razlika (°C)).

Oscilacijski postopek sušenja (Slika 9) je imel fazo segrevanja enako, kot standardni postopek z ostro klimo (45 °C; maks. 70 °C). Hitrost zraka pri sušenju je bila konstantna (2,5 m/s). V glavni fazi smo spremenjali temperaturo glede na vlažnost lesa prav tako, kot v standardnem sušilnem postopku z ostro klimo. Relativno zračno vlažnost smo oscilacijsko menjali na enourni interval. Tako je bila relativna zračna vlažnost eno uro višja, naslednjo uro pa za enak interval nižja. Razmerje med višjo in nižjo relativno zračno vlažnostjo pri oscilaciji je znašalo 33,3 %. Sušilni proces smo zaključili s postopkom izenačevanja, kondicioniranja ter ohlajanja.



Slika 9: Program sušenja smrekovine z oscilirajočim načinom (U – vlažnost lesa (%); UGL – ravnovesna vlažnost lesa (%); T – temperatura zraka (°C) in dT – psihrometsrska razlika (°C)).

Kontrolo kakovosti smo izvajali v naslednjih časovnih intervalih: pri blagem režimu smo odvzemali preizkušance na 24 do 48 ur, pri ostrem režimu ter oscilaciji pa na 24 ur. Kakovost smo ocenili vizualno in določili povprečno vlažnost, vlažnostni gradient ter zaskorjenje.

### 3.3 DOLOČANJE VLAŽNOSTI IN VLAŽNOSTNEGA GRADIENTA

Spremembe vlažnosti tekom sušilnega procesa smo določali s standardno gravimetrično metodo z intervalnim tehtanjem sušilnih kosov (SIST ENV 13183 – 1). Meritvene kose debeline 25 mm smo izžagali v primerni oddaljenosti od čela, jih dobro očistili iverja in žagovine in še v vlažnem stanju stehtali. V naslednjem koraku smo preizkušance osušili do absolutnega suhega stanja (pri temperaturi  $103\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ ) tako dolgo, da se masa preizkušanca v 48 urah ni spremenila več, kot za 0,1 %.

Vlažnost smo izračunali po naslednji enačbi:

$$u = (m_{vode}) / m_0 = (m_{vl} - m_0) / m_0 \times 100 \quad (\dots 1)$$

$u$  ... lesna vlažnost (kg/kg; %)

$m_{vl}$  ... masa vlažnega odrezka (kg)

$m_0$  ... masa absolutnega suhega odrezka (pri konstanti masi) (kg)

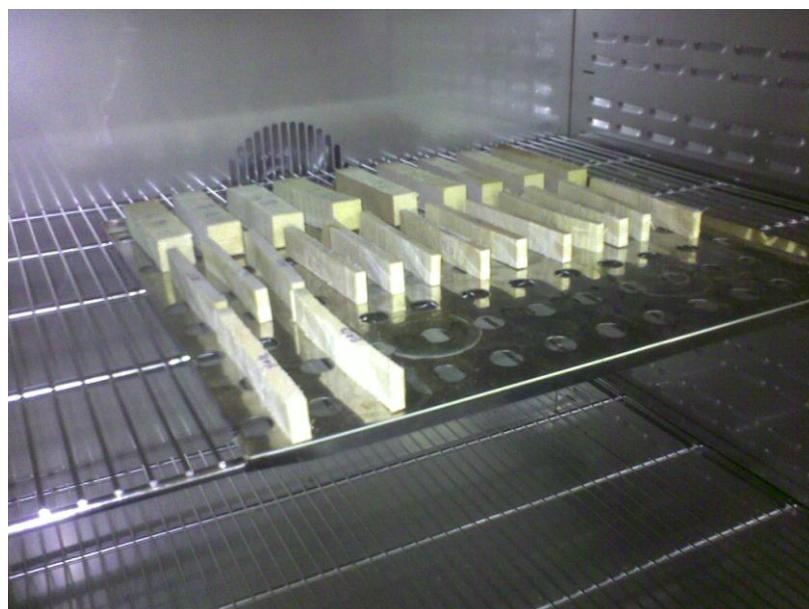
Pri določanju vlažnostnega gradiента smo izžagali preizkušance debeline 25 mm (Slika 10). Vsak posamezen preizkušanec smo razžagali na tri enake sloje, jih označili in stehtali. V laboratorijskem sušilniku smo jih osušili do konstantne mase (absolutno suh les) pri temperaturi  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . V absolutnem suhem stanju smo preizkušance ponovno stehtali in nato z enačbo izračunali vlažnostni gradient:

$$(\%/\text{cm}) = (u_b - u_a) / (d_b - d_a) \quad (\dots 2)$$

$u_b$  ... vlažnost notranjih plasti (%)

$u_a$  ... vlažnost zunanjih plasti (%)

$d_b - d_a$  ... razdalja med sredino zunanje in notranje lamele (cm)



Slika 10: Označeni preizkušanci v laboratorijskem sušilniku.

### 3.4 KONTROLA KAKOVOSTI SUŠENJA

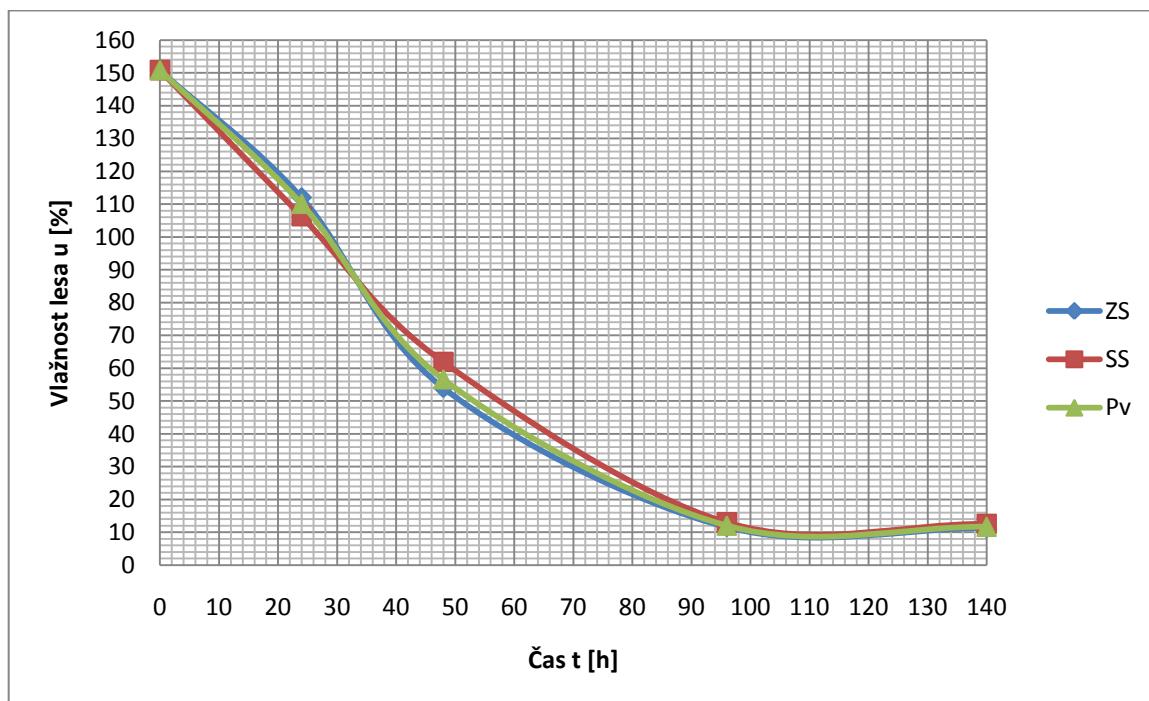
S prežagovalno metodo po standardu SIST ENV 14464 smo določali notranje napetosti naših preizkušancev. Na tračnem žagalmu stroju smo izžagali preizkušanec debeline 25 mm ter ga razpolovili. Zaskorjenost smo ocenili z merjenjem reže na merilni uri z natančnostjo do 0,01 mm, razdalja med naslonoma pa je znašala 100 mm. Žagano površino smo prislonili na naslon in z merilne ure odčitali velikost odklona lamele od ravnine. Nato smo jih nepredušno zaprli v plastične vrečke, da smo izničili vpliv vlažnostnega gradiента. Meritev smo ponovili v obdobju 24 do 48 ur. S seštevanjem odklonov obeh lamel smo izračunali povprečno zaskorjenost preizkušanca.

## 4 REZULTATI

### 4.1 KINETIKA SUŠENJA

Vsi postopki sušenja, tj. blagi, ostri in oscilacijski režim, so potekali po začrtanem programu sušenja.

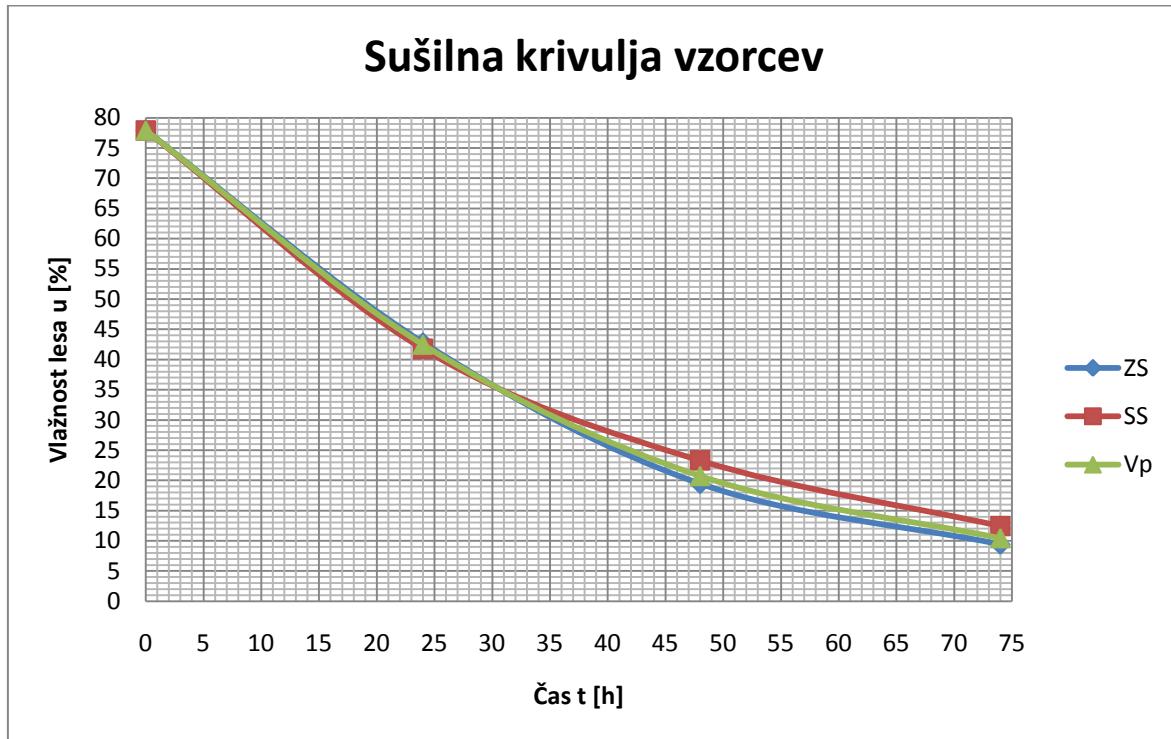
Sušenje smrekovine s standardnim blagim režimom (Slika 11) je trajalo približno 140 ur. Do TNCS-ja je bilo časovno potrebno približno 70 ur, torej polovica sušilnega cikla. Začetna vlažnost je bila izredno visoka (150,8 %), zato se je sušilni proces časovno podaljšal.



Slika 11: Sušilna krivulja slojev za blagi režim sušenja: (u – vlažnost lesa (%); t – čas ( h ); ZS – vlažnost zunanjih slojev (%); SS – vlažnost srednjega sloja ( % ) in Pv – povprečna lesna vlažnost ( % )).

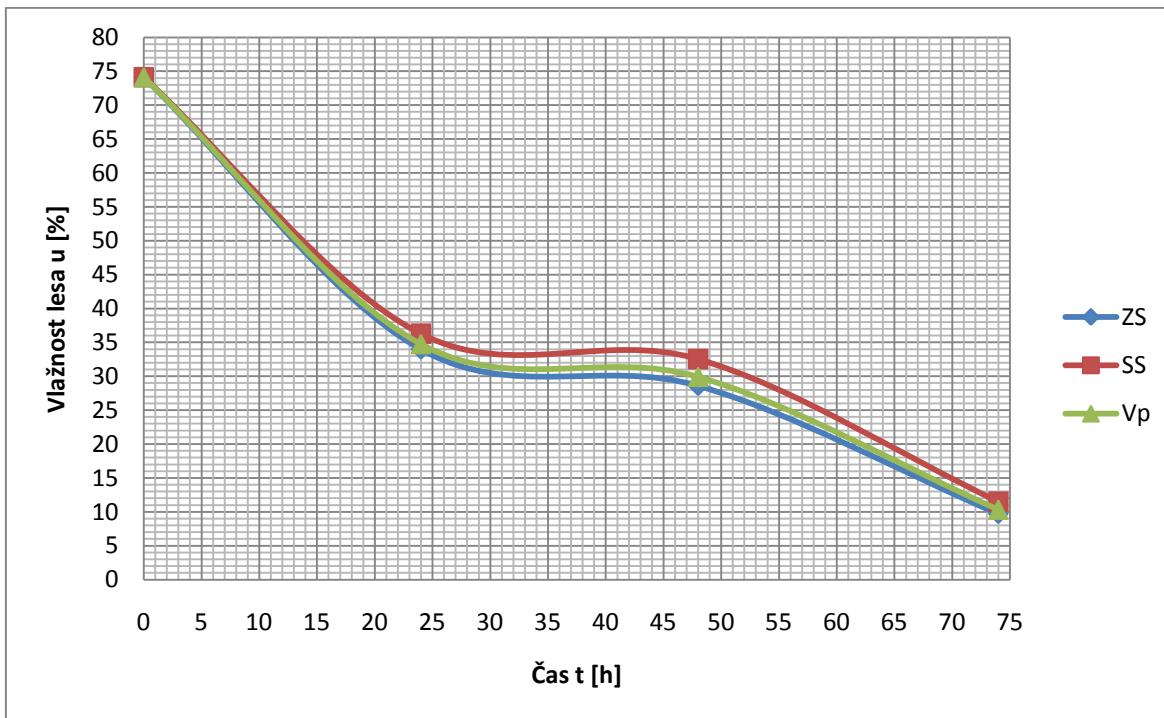
Sušilni program s standardnim ostrim režimom sušenja (slika 12) je bil časovno krajši, trajal je okoli 74 ur. Čas je bil krajši zaradi ostrejše klime sušenja in občutno nižje začetne

vlažnosti lesa (77,9 %). TNCS je nastopila po 35. uri sušenja. Za konec sušenja in dosego ciljne vlažnosti lesa je bilo potrebnih še dodatnih 39 ur.



Slika 12: Sušilna krivulja slojev za ostri režim sušenja: (u – vlažnost lesa (%); t – čas ( h ); ZS – vlažnost zunanjih slojev (%); SS – vlažnost srednjega sloja ( % ) in Pv – povprečna lesna vlažnost ( % )).

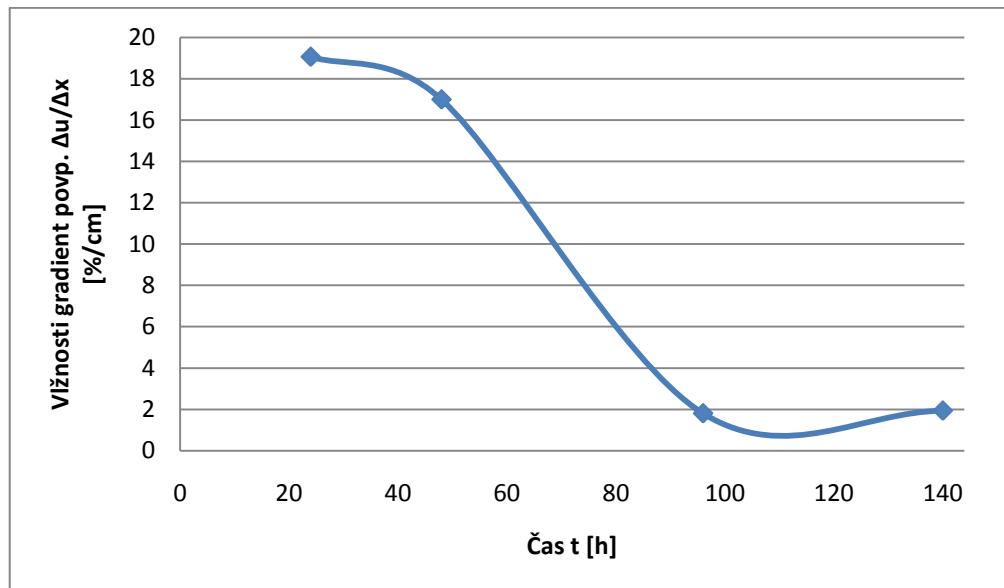
Sušenje v oscilirajoči (nihajoči) klimi (Slika 13) je bilo časovno enako sušenju s standardnim ostrom sušilnim režimom in sicer okoli 74 ur. TNCS je bila dosežena po 30-ih urah sušenja. Glede na potek sušilne krivulje smatramo, da bi bilo sušilni postopek smotrno nadaljevati s krajšim izenačevanjem in kondicioniranjem.



Slika 13: Sušilna krivulja slojev za oscilacijsko sušenje: (u – vlažnost lesa (%); t – čas ( h ); ZS – vlažnost zunanjih slojev (%); SS – vlažnost srednjega sloja ( % ), Pv – povprečna lesna vlažnost ( % )).

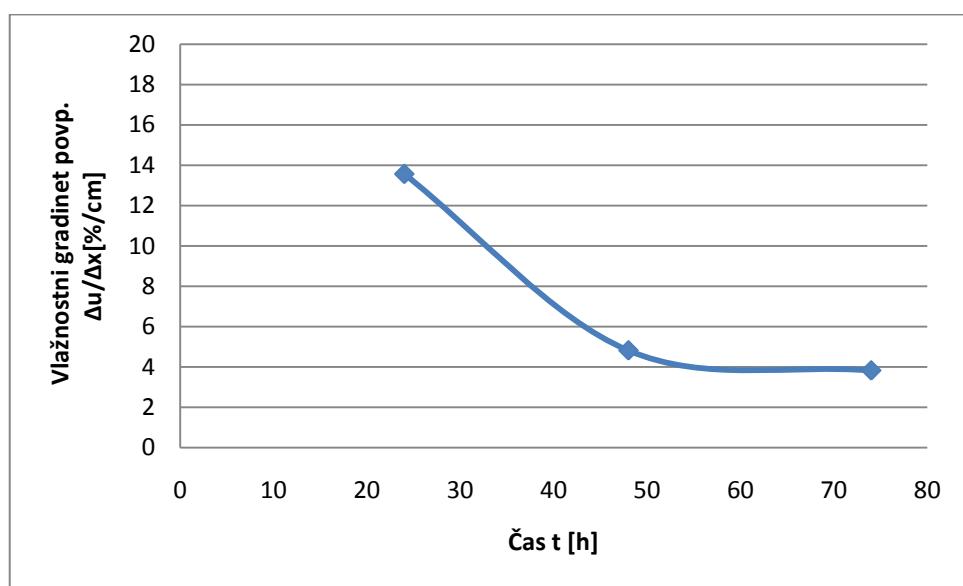
#### 4.2 VLAŽNOSTNI GRADIENT

Začetni vlažnostni gradient – pri standardnem sušilnem programu z blago klimo – je imel visoko vrednost (Slika 14) zaradi visoke začetne vlažnosti preizkušancev. Proti koncu sušilnega postopka se je enakomerno zmanjševal in v končnem območju dosegel nizko vrednost. Slednja je nastala zaradi blagih klimatskih pogojev in časovno daljšega sušenja. Iz sušilne krivulje (Slika 11) razberemo, da je bil sušilni postopek podaljšan zaradi nekoliko podaljšanih faz izenačevanja in kondicioniranja. Brez zaključnih faz, bi lahko sušilni proces skrajšali za 30 ur; torej bi se zaključil po 110-ih urah sušenja.



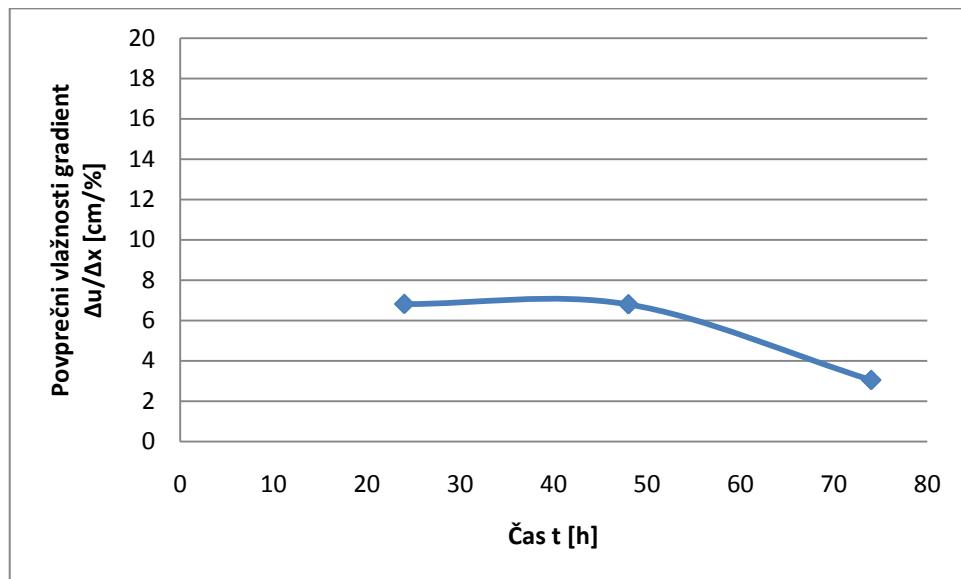
Slika 14: Povprečni vlažnostni gradient pri standardnem sušilnem programu z blago klimo.

Pri standardnem sušilnem programu z ostro klimo je bil vlažnostni gradient na začetku sušenja relativno visok (Slika 15), vendar je imel zaradi nižje začetne vlažnosti preizkušancev nižjo vrednost, kot pri blagi klimi. S sušenjem se je vlažnostni gradient konstantno zniževal in je po 50-ih urah sušenja dosegel konstantno vrednost in s tem tudi najnižjo pri tem programu. Vlažnostni gradient je bil po koncu sušenja relativno visok in tudi višji, kot pri sušenju z blago klimo.



Slika 15: Povprečni vlažnostni gradient pri standardnem sušilnem programu z ostro klimo.

Vlažnostni gradient pri oscilacijskem programu sušenja je imel začetno vrednost najnižjo (Slika 16) v primerjavi s prvima dvema šaržama sušenja. Dolgo (približno 24 ur) se vrednost vlažnostnega gradiента ni spremenila in je stagnira, nato pa je strmo padla, zaradi toplotnih izgub in sprememb klimatskih pogojev. Vlažnostni gradient je bil po končanem sušenju nekoliko višji, kot pri blagih klimatskih pogojih, in nižji v primerjavi s sušenjem z ostro klimo.



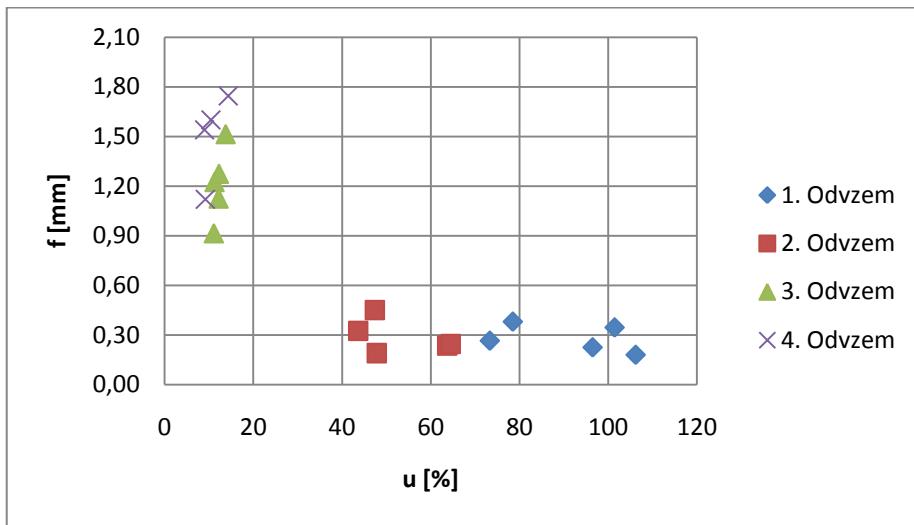
Slika 16: Povprečni vlažnostni gradient pri oscilacijskem programu sušenja.

#### 4.3 OCENA KAKOVOSTI

Pri vizualni kontroli kakovosti osušenega lesa nismo zaznali bistvenih razpok ali veženj, zato lahko ocenimo, da je bil les iz vseh treh šarž sušenja primerljive kakovosti. Zaradi nizke sušilne temperature smo onemogočili pojav obarvanja. Ker so bila čela zaščitena z neprepustnim premazom se je znižala nevarnost čelnih razpok. Zaznali nismo niti vidnih površinskih napak.

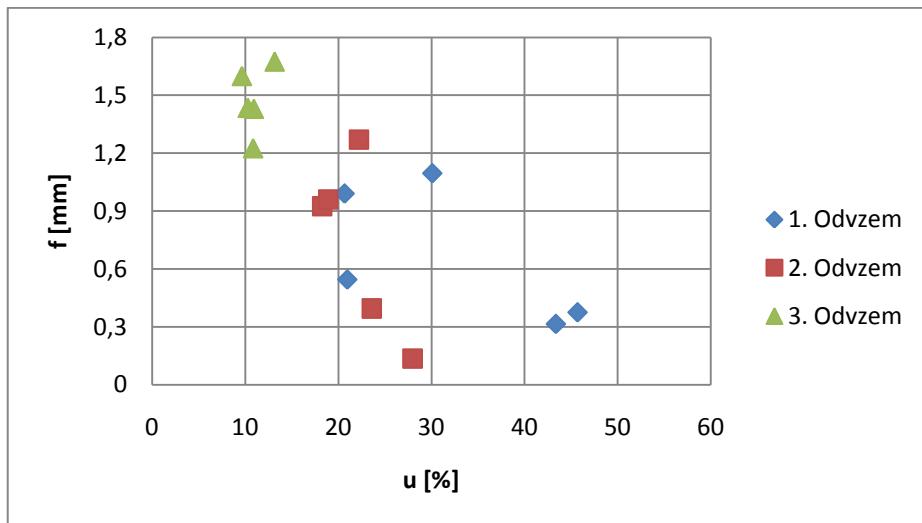
Zaskorjenje smo merili v vseh sušilnih programih. Pri standardnem programu sušenja z blago klimo se je odklon preizkušancev, določen po SIST ENV 14464, povečeval z nižanjem vlažnosti lesa (Slika 17). Pri prvem odvzemu je bil povprečni odklon 0,28 mm,

na koncu sušenja pri zadnjem odvzemu preizkušancev pa je imel povprečni odklon vrednost kar 1,50 mm.



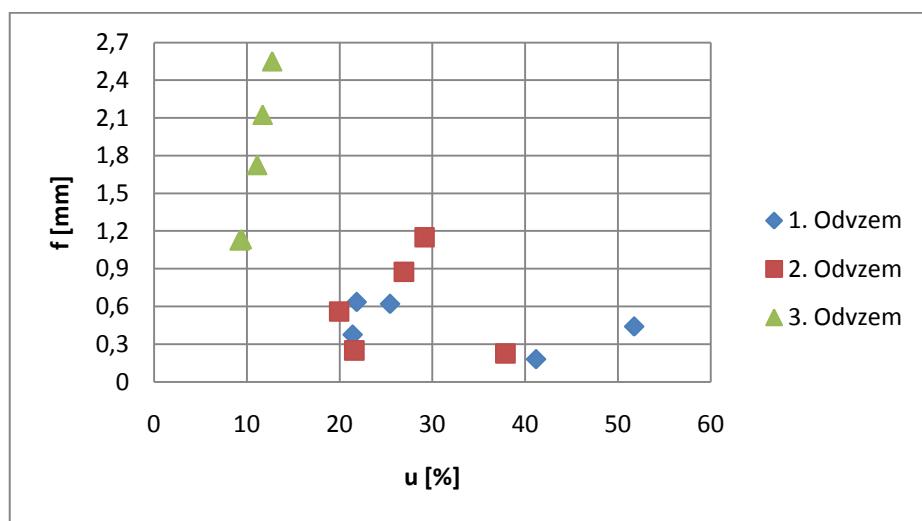
Slika 17: Odklon preizkušancev, sušenih s standardno metodo z blagim režimom v odvisnosti od lesne vlažnosti (1. odvzem = pri 24 urah, 2. odvzem = pri 48 urah, 3. odvzem = pri 96 urah, 4. odvzem = pri 140 urah).

Pri standardnem sušilnem programu z ostrim režimom sušenja smo vizualno zaznali čelne razpoke, veženje v obliki koritavosti in smolne madeže. Odklon, s katerim smo določali zaskorjenje, je med sušenjem naraščal (Slika 18). Vrednosti so podobne, kot pri blagem režimu, in sicer je bila pri prvem odvzemu povprečna vrednost odklona 0,66 mm. Ob zadnjem odvzemu pri 11 %-ni vlažnosti lesa je znašala povprečna vrednost odklona 1,47 mm.



Slika 18: Odklon preizkušancev, sušenih s standardno metodo z ostrom režimom v odvisnosti od lesne vlažnosti (1. odvzem = pri 24 urah, 2. odvzem = pri 48 urah, 3. odvzem = pri 74 urah).

Pri sušenju z oscilacijo klime smo vizualno zasledili napake v obliki manjših čelnih razpok, smolne madeže in nizko stopnjo koritavosti preizkušancev. Opazili smo tudi naraščanje odklona s sušenjem. Pri prvem odvzemu smo izmerili povprečno vrednost 0,45 mm, pri zadnji meritvi pa je bila 1,73 mm.

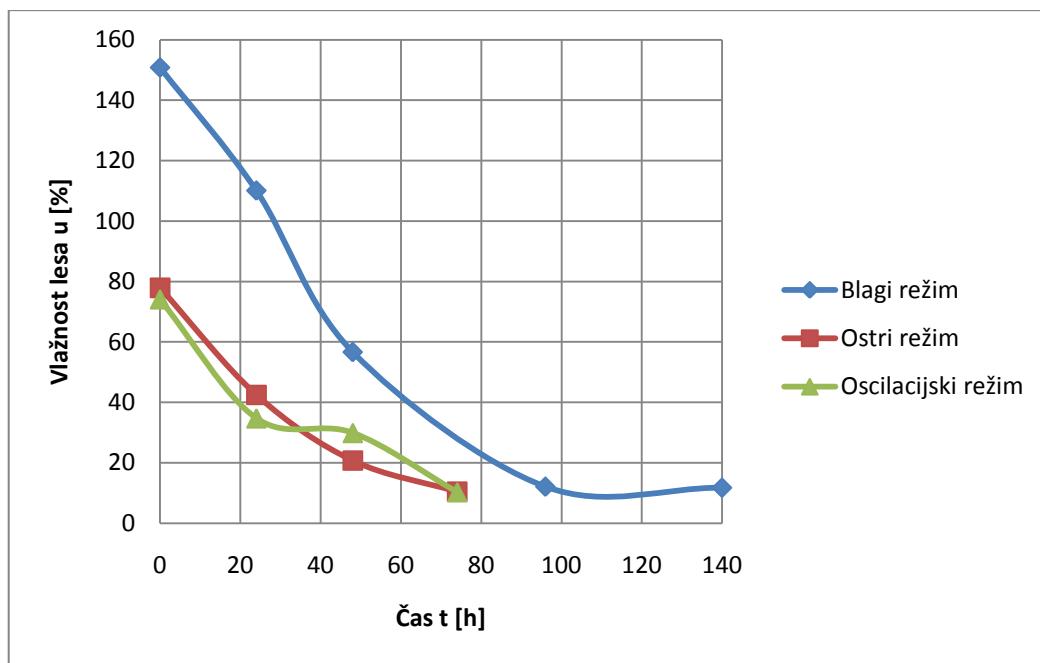


Slika 19: Odklon preizkušancev sušenih z oscilacijsko klimo v odvisnosti od lesne vlažnosti (1. odvzem = pri 24 urah, 2. odvzem = pri 48 urah, 3. odvzem = pri 74 urah).

## 5 RAZPRAVA

Sušilni proces z blago klimo je potekal po začrtanem režimu (Priloga A) zaradi podobne začetne vlažnosti lesa, kot jo predpisuje režim. Pri oscilacijskem in ostrem sušilnem procesu je bila začetna vlažnost lesa nižja (Priloga C in E) zaradi osušitve preizkušancev med skladiščenjem.

Pri blagem režimu so bile razlike med hitrostjo sušenja zunanjih in notranjih slojev majhne, ker smo sušili pri nizkih temperaturah, majhni psihrometrski razlici in majhni hitrosti zraka. Tako smo preprečili hitro sušenje zunanjih slojev. Ostri režim sušenja je imel najbolj strmo sušilno krivuljo zaradi hitrega osuševanja preizkušancev, visoke psihrometrsko razliko in hitrosti zraka. Pri oscilacijskem načinu sušenja se je pri TNCS-ju osuševanje upočasnilo zaradi tehnične napake pri krmiljenju sušilnega postopka, nato pa se je les postopoma osušil na končno vlažnost (Slika 20).

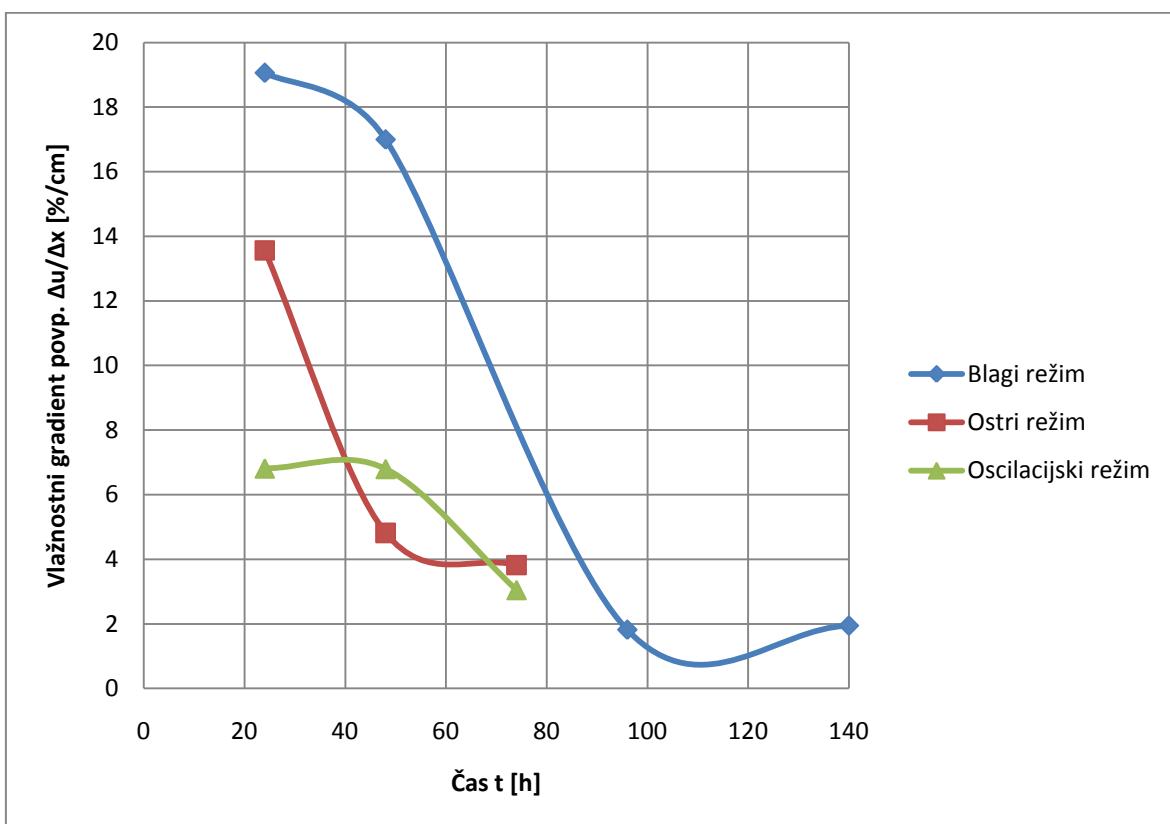


Slika 20: Sušilne krivulje v posameznih režimih sušenja.

Po končanem sušenju je najmanjši vlažnostni gradient nastal pri blagi klimi sušenja (Slika 21) zaradi postopnega počasnega sušenja, kot nam prikazuje krivulja sušenja (Slika 20).

Pri ostrem režimu sušenja se je vlažnostni gradient v zelo kratkem času občutno zmanjšal. Vlažnostni gradient je ostal relativno visok in se ni več nižal. Napako bi lahko rešili z dodatnim navlaževanjem slojev ali zmanjšanjem ostrine sušenja.

Začetni vlažnostni gradient pri oscilacijskem režimu sušenja je bil bistveno nižji, kot pri blagem in ostrem sušilnem postopku. Ta razlika je nastala zaradi intervalnega navlaževanja materiala in osciliranja klime v sušilnem programu. S podaljšanjem in modifikacijo sušilnega programa bi lahko podaljšali fazo izenačevanja in kondicioniranja ter s tem še dodatno znižali vrednost vlažnostnega gradiента pri oscilirajoči klimi sušenja (Slika 21).

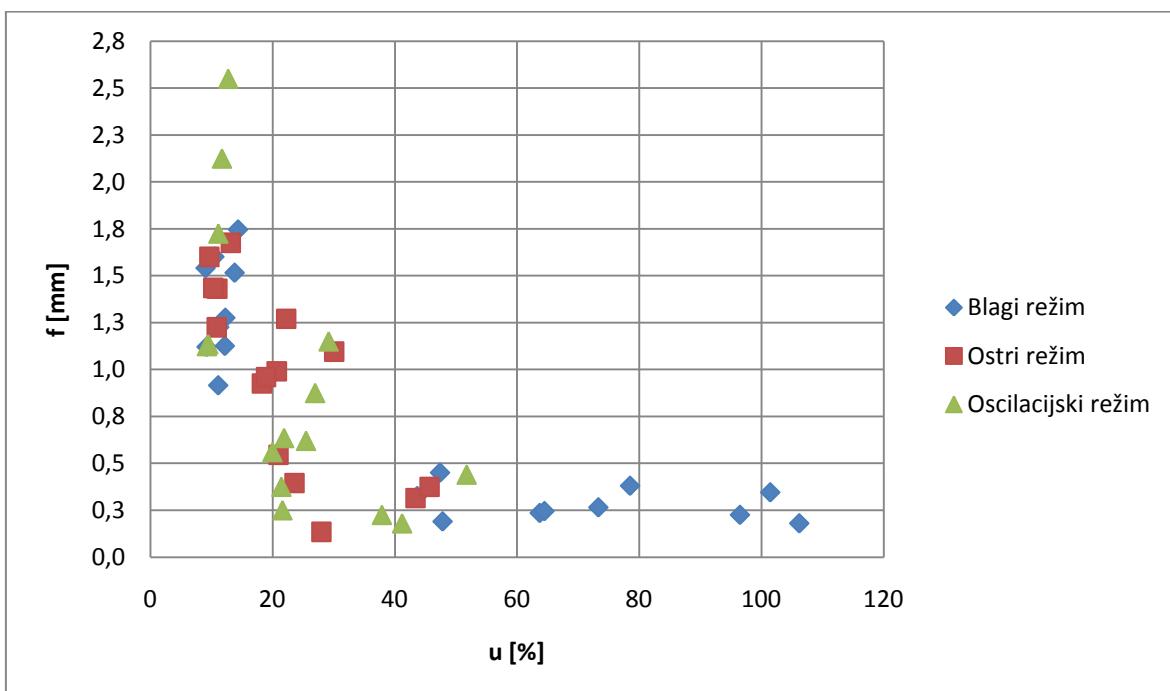


Slika 21: Povprečni vlažnostni gradient v režimih sušenja.

Zaskorjenje, ki smo ga določali z merjenjem odklona preizkušancev, se je med sušenjem v vseh sušilnih programih večalo. Odklon se je občutno povečal, ko smo dosegli TNCS. Najmanjši odklon oz. zaskorjenost preizkušancev je nastala pri blagem režimu, saj je krčenje lesa bolj enakomerno po celotnem prerezu. Ugotovili smo, da sta blagi in ostri

sušilni program, čeprav z drugačnimi karakteristikami sušilnih parametrov, dosegla podobne vrednosti odklona lamel oz. t. i. zaskorjenost.

Pri oscilacijskem režimu sušenja se je odklon lamel v zadnji fazi močno zvišal, verjetno zaradi prekratkega sušilnega procesa oz. izpuščenih faz izenačevanja in kondicioniranja. Preizkušance bi z daljšim časom kondicioniranja in z izenačevanjem v samem sušilnem procesu enakomernejše osušili in s tem zmanjšali odklon lamel v zadnji fazi sušenja (Slika 22).



Slika 22: Odklon lamel preizkušancev v posameznih režimih sušenja.

Pri vseh eksperimentih smo dosegli glavni cilj sušilnega procesa, tj. ciljno končno vlažnost (11 %). Z raziskavo smo dokazali, da so najboljšo kakovost dosegli preizkušanci v blagi klimi, saj praktično nismo zaznali kakšnih večjih vizualnih napak, zaskorjenje pa je bilo minimalno. Slaba lastnost programa pa je dolgotrajno sušenje. Oscilacijski način sušenja je bil zadovoljiv, vendar z manjšimi vizualnimi napakami in zaskorjenostjo, pri čemer je še dosegel zadovoljivo kakovost. Z ostrim režimom smo dosegli veliko vizualnih in notranjih

napak in večjo stopnjo zaskorjenosti, zato kakovost osušenega lesa ni dosegla zadanih kakovostnih standardov.

## 6 SKLEPI

Z raziskavo smo ugotovili, da sta zelo pomembna faktorja pri sušenju lesa čas in ostrina sušenja. Pri sušenju s preostro klimo nastanejo poškodbe in napake v lesu, katerim bi se lahko izognili s sušenjem s primerno ostrino in hitrostjo sušenja.

Sušilni čas pri standardnem sušilnem postopku z blago klimo je znašal 140 ur, standardni sušilni postopek z ostro klimo in oscilacijski način sušenja pa sta časovno potekala enako dolgo (74 ur). Standardni sušilni postopek z blago klimo je torej potekal 66 ur dlje od ostalih dveh sušilnih postopkov. Tako velika časovna razlika je nastala zaradi razlik v začetni vlažnosti in zaradi tehnične napake pri delu krmiljenja sušilnega procesa za blago klimo.

Z eksperimentalnim delom smo dokazali, da lahko z intervalnim navlaževanjem vplivamo na velikost vlažnostnega gradienta, pri čemer pa zaskorjenosti ni bilo mogoče izničiti.

Preizkušanci, sušeni z oscilacijskim načinom, so imeli najvišje vrednosti odklona lamel v primerjavi z ostrom in blagim režimom sušenja. Sklepamo lahko, da so bili preizkušanci, osušeni v oscilacijskem in ostrem sušilnem programu, bolj zaskorjeni v primerjavi z blagim sušilnim postopkom in s tega vidika niso dosegli želene kakovosti.

Sklepamo lahko tudi, da so imeli preizkušanci, sušeni v standardnem programu z blago klimo, boljše mehanske lastnosti in boljšo kakovost na koncu sušilnega procesa, kot pa preizkušanci, ki so bili sušeni v ostri klimi ter v oscilacijskem načinu.

## 7 POVZETEK

Les poskušamo osušiti v najkrajšem času in čim bolj kakovostno do ciljne vlažnosti, ki je primerna za nadaljnjo obdelavo oz. uporabo. Veliko je dejavnikov, ki vplivajo na kakovost sušilnih procesov. Dejavnike moramo obravnavati v medsebojni odvisnosti in nikakor ne posamezno.

V raziskavi smo uporabili les smrekovine (*Picea abies* (L) Karst.) zaradi velike razširjenosti v proizvodnji in njene vsestranske uporabe. Proučevali smo kinetiko in kakovost normalno-temperaturnega konvekcijskega komorskega sušenja smrekovine s tremi različnimi programi sušenja; prvi način sušenja je bil standardni program z blago klimo, drugi je bil standardni program z ostro klimo, zadnji način pa je bil program sušenja z oscilacijskimi klimatskimi pogoji. Primerjalno smo ovrednotili vse sušilne programe in kakovost osušenega lesa. Pozorni smo bili na čas in hitrost sušenja ter doseganje končne vlažnosti lesa, vlažnostnega gradiента in zaskorjenja.

Pri vseh režimih sušenja je bila končna (ciljna) vlažnost lesa enaka, tj. približno 11 %. Razlika v vlažnosti notranjih in zunanjih slojev elementov je bila nekoliko višja pri sušenju z ostrom režimom sušenja.

Med sušilnim postopkom smo na preizkušancih ocenjevali stopnjo zaskorjenosti z merjenjem odklona lamel preizkušancev nevtralne ravnine. Najmanjši lok je nastal pri preizkušancih, sušenih pri blagim režimu, največji pa pri oscilacijskem načinu sušenja.

Delovna hipoteza diplomskega projekta ni bila v celoti potrjena. Predvidevali smo sicer, da se v oscilacijski klimi sušenja dosežejo ugodni mehano-sorptivni učinki, s čimer se zmanjša nevarnost zaskorjenja ter sušilne napetosti. Tekom eksperimenta s primerjavo rezultatov različnih sušilnih programov smo prišli do ugotovitve, da oscilacijska klima ni v celoti zmanjšala sušilnih napetosti in stopnje zaskorjenosti.

## 8 VIRI

- Bramhall, G. 1971. The Validy of Darcy's law in the Axial Penetration of Wood. *Wood Science and Tehnology*, 5: 121–134.
- Cividini, R. 1962. Nekaj osnovnih pravil za rokovanje s sušilnico. *Les*, 8/9: 1–17.
- Geršak, M.; Velušček, V. 2003. Sušenje lesa. Ljubljana, Zveza lesarjev Slovenije, Lesarska založba: 194.
- Gorišek Ž. 2005. Variabilna in heterogena zgradba lesa. *Korak (N. Gorica)*, 6/5: 23–24.
- Gorišek Ž. 2009. Les: zgradba in lastnosti: njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178.
- Gorišek Ž. 2009/10. Sušenje lesa, interna literatura.
- Gorišek, Ž.; Geršak, M.; Velušček, V.; Čop, T.; Mrak C. 1994. Sušenje lesa. Ljubljana, Zveza društev inženirjev in tehnikov lesarstva Slovenije, Lesarska založba: 235.
- Hanhijärvi, A.; Wahl, P.; Räsänen, J.; Silbennoinen, R. 2003. Observation of Development of Microcracks on Wood Surface Caused by Drying Stresses. *Holzforschung*, 57: 561–565.
- Kauman, W.G.; Ananias, R.A.; Gutierrez, M.; Valenzuela, H. 1994. Non-Durcian permability in Chilean Tepa (*Laurelia philippiana*). *Holzforschung*, 48: 77–81.
- Perre, P.; Karimi, A. 2002. Fluid migration in two species of beech (*Fagus sylvatica* and *Fagus orientalis*): a percolation model able to account for macroscopic measurements and anatomical observations. *Maderas: Cince & Technologia*, 4: 50–68.

Pipa, R. 1990. Anatomija in tehnologija lesa. Tehnologija tvoriv. Ljubljana, Zveza inženirjev in tehnikov gozdarstva in lesarstva, Lesarska založba: 136.

Siau, J. F. 1984. Transport Processes in Wood. Berlin, Springer-Verlag: 227.

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

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

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

Whitaker, S. 1977. Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: A theory of drying. V: Hartnett, J. P.; Irvine, T. F. J. Advances in Heat Transfer. New York, Academic Press: 119–203.

Distribucija vode v svežem lesu, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo:

[http://les.bf.uni-lj.si/uploads/media/03\\_Distribucija\\_vode\\_v\\_svezem\\_lesu\\_03.pdf](http://les.bf.uni-lj.si/uploads/media/03_Distribucija_vode_v_svezem_lesu_03.pdf)

(povzeto 28. 8. 2013).

## **ZAHVALA**

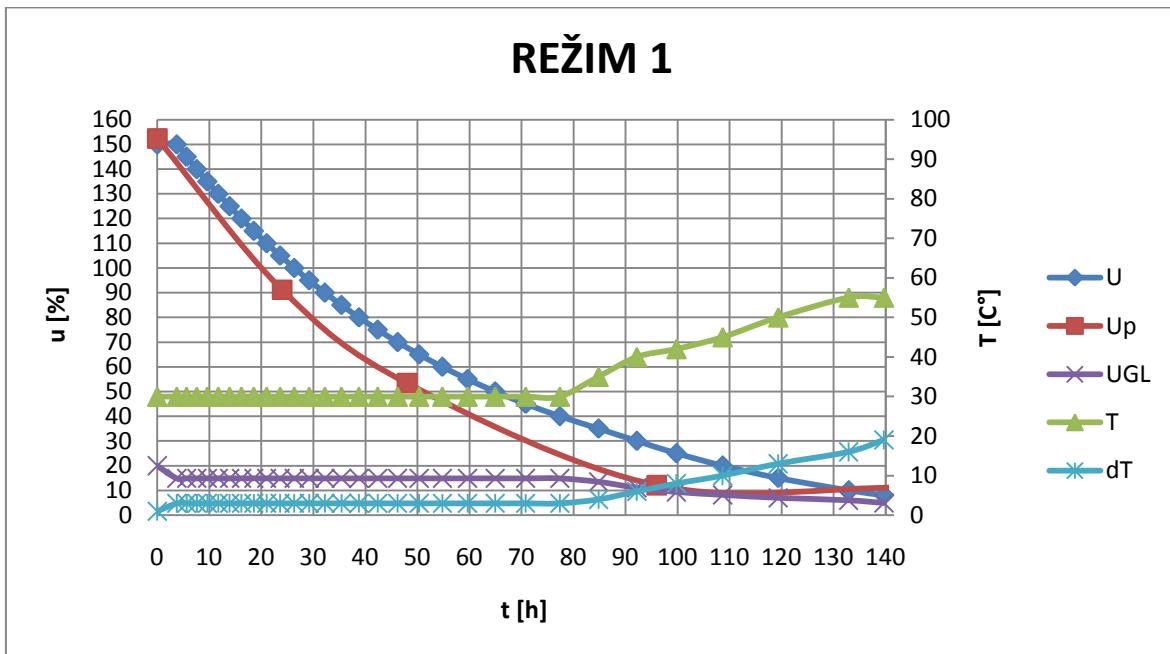
Za pomoč pri izdelavi, oblikovanju in urejanju diplomske naloge se zahvaljujem mentorju prof. dr. Željku Gorišku in asistentu doc. dr. Alešu Stražetu.

Asistentu doc. dr. Alešu Stražetu se zahvaljujem za recenzijo diplomskega projekta.

Zahvaljujem se tudi vsem svojim najbližnjim za podporo in potrpežljivost pri pisanju tega projekta. Hvala vsem, ki ste me pri tem spodbujali in mi pomagali.

## PRILOGE

Priloga A: Program sušenja z blago klimo in dejanski sušilni proces ( $U$  – vlažnost sistema (%);  $Up$  – povprečna vlažnost lesa (%);  $UGL$  – ravnovesna vlažnost lesa (%);  $T$  – segrevanje zraka ( $^{\circ}$ C);  $dT$  – psihrometska razlika ( $^{\circ}$ C)).

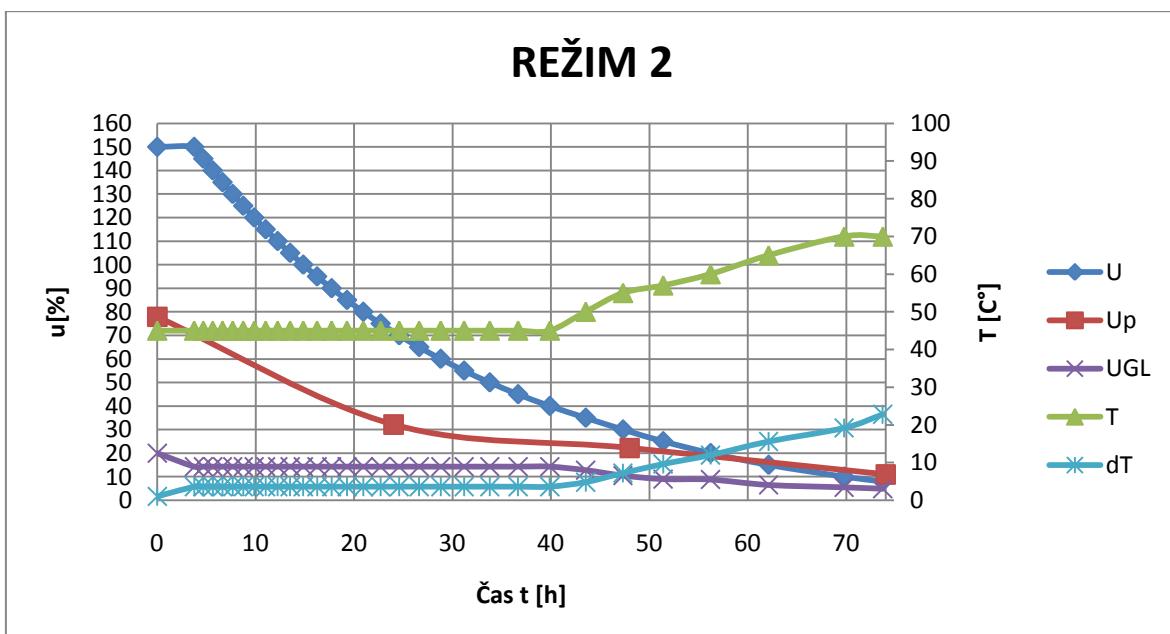


Priloga B: Program sušenja s standardnim postopkom z blago klimo v obliki tabele ( $t$  – čas (h);  $u$  – vlažnost sistema (%);  $T$  – temperatura ( $^{\circ}$ C);  $UGL$  – ravnovesna vlažnost lesa (%);  $v$  – hitrost vetra (m/s);  $dT$  – psihrometska razlika ( $^{\circ}$ C)).

STOPNJA	t(h)	u [%]	T [ $^{\circ}$ C]	UGL [%]	RH [%]	v [m/s]	dT [ $^{\circ}$ C]	t [h]	$\Sigma t$ [h]
1	3,75	150,0	30	20	90	1,5	1	3,75	0
2	1,89	150,0	30	14,9	78	1,5	3	1,89	3,75
3	1,95	145,0	30	14,9	78	1,5	3	1,95	5,6
4	2,03	140,0	30	14,9	78	1,5	3	2,03	7,6
5	2,10	135,0	30	14,9	78	1,5	3	2,10	9,6
6	2,18	130,0	30	14,9	78	1,5	3	2,18	11,7
7	2,27	125,0	30	14,9	78	1,5	3	2,27	13,9
8	2,37	120,0	30	14,9	78	1,5	3	2,37	16,2
9	2,48	115,0	30	14,9	78	1,5	3	2,48	18,5
10	2,59	110,0	30	14,9	78	1,5	3	2,59	21,0
11	2,72	105,0	30	14,9	78	1,5	3	2,72	23,6
12	2,86	100,0	30	14,9	78	1,5	3	2,86	26,3

13	3,01	95,0	30	14,9	78	1,5	3	3,01	29,2
14	3,18	90,0	30	14,9	78	1,5	3	3,18	32,2
15	3,38	85,0	30	14,9	78	1,5	3	3,38	35,4
16	3,59	80,0	30	14,9	78	1,5	3	3,59	38,8
17	3,84	75,0	30	14,9	78	1,5	3	3,84	42,4
18	4,13	70,0	30	14,9	78	1,5	3	4,13	46,2
19	4,46	65,0	30	14,9	78	1,5	3	4,46	50,3
20	4,85	60,0	30	14,9	78	1,5	3	4,85	54,8
21	5,31	55,0	30	14,9	78	1,5	3	5,31	59,6
22	5,87	50,0	30	14,9	78	1,5	3	5,87	64,9
23	6,56	45,0	30	14,9	78	1,5	3	6,56	70,8
24	7,44	40,0	30	14,9	78	1,5	3	7,44	77,4
25	7,36	35,0	35	13,5	74	1,5	4	7,36	84,8
26	7,62	30,0	40	11,1	65	1,5	6	7,62	92,2
27	8,88	25,0	42	9,4	56	1,5	8	8,88	99,8
28	10,68	20,0	45	8,2	49	1,5	10	10,68	108,7
29	13,55	15,0	50	7	42	1,5	13	13,55	119,3
30	6,78	10,0	55	6	36	1,5	16	6,78	132,9
31		8,0	55	4,9	28	1,5	19		139,7

Priloga C: Program sušenja z ostro klimo in dejanski sušilni proces (U – vlažnost sistema (%); Up – povprečna vlažnost lesa (%); UGL – ravnovesna vlažnost lesa (%); T – segrevanje zraka (°C); dT – psihrometrsko razliko (°C)).



**Priloga Č:** Program sušenja s standardnim postopkom z ostro klimo v obliki tabele (t – čas (h); u – vlažnost sistema (%); T – temperatura (°C); UGL – ravnovesna vlažnost lesa (%); v – hitrost vetra (m/s); dT – psihrometrsko razliko (°C)).

STOPNJA	t(h)	u [%]	T [°C]	UGL [%]	RH [%]	v [m/s]	dT [°C]	t [h]	Σt [h]
1	3,75	150,0	45	20	90	2,5	1	3,75	0
2	0,93	150,0	45	14,3	79	2,5	3,6	0,93	3,75
3	0,96	145,0	45	14,3	79	2,5	3,6	0,96	4,7
4	0,99	140,0	45	14,3	79	2,5	3,6	0,99	5,6
5	1,03	135,0	45	14,3	79	2,5	3,6	1,03	6,6
6	1,07	130,0	45	14,3	79	2,5	3,6	1,07	7,7
7	1,12	125,0	45	14,3	79	2,5	3,6	1,12	8,7
8	1,16	120,0	45	14,3	79	2,5	3,6	1,16	9,8
9	1,21	115,0	45	14,3	79	2,5	3,6	1,21	11,0
10	1,27	110,0	45	14,3	79	2,5	3,6	1,27	12,2
11	1,33	105,0	45	14,3	79	2,5	3,6	1,33	13,5
12	1,40	100,0	45	14,3	79	2,5	3,6	1,40	14,8
13	1,48	95,0	45	14,3	79	2,5	3,6	1,48	16,2
14	1,56	90,0	45	14,3	79	2,5	3,6	1,56	17,7
15	1,66	85,0	45	14,3	79	2,5	3,6	1,66	19,3
16	1,76	80,0	45	14,3	79	2,5	3,6	1,76	20,9
17	1,89	75,0	45	14,3	79	2,5	3,6	1,89	22,7
18	2,03	70,0	45	14,3	79	2,5	3,6	2,03	24,6
19	2,19	65,0	45	14,3	79	2,5	3,6	2,19	26,6
20	2,38	60,0	45	14,3	79	2,5	3,6	2,38	28,8
21	2,60	55,0	45	14,3	79	2,5	3,6	2,60	31,2
22	2,88	50,0	45	14,3	79	2,5	3,6	2,88	33,8
23	3,22	45,0	45	14,3	79	2,5	3,6	3,22	36,7
24	3,65	40,0	45	14,3	79	2,5	3,6	3,65	39,9
25	3,79	35,0	50	12,8	75	2,5	4,8	3,79	43,5
26	4,08	30,0	55	10,5	66	2,5	7,2	4,08	47,3
27	4,81	25,0	57	9	58	2,5	9,6	4,81	51,4
28	5,90	20,0	60	8,8	51	2,5	12	5,90	56,2
29	7,67	15,0	65	6,5	43	2,5	15,6	7,67	62,1
30	3,92	10,0	70	5,5	37	2,5	19,2	3,92	69,8
31		8,0	70	4,9	28	2,5	22,8		73,7

**Priloga D:** Program sušenja z oscilacijsko klimo v obliki tabele (t – čas (h); u – vlažnost sistema (%); T – temperatura (°C); UGL – ravnovesna vlažnost lesa (%); v – hitrost vetra (m/s); dT – psihrometrsko razliko (°C)).

1/2 STOPNJA	STOPNJA	t(h)	u [%]	T [°C]	UGL [%]	RH [%]	v [m/s]	dT [°C]	t [h]	Σt [h]
1	1	3,75	150,0	45	20	90	2,5	1	3,75	0
2	2	0,46	150,0	45	17,16	83	2,5	2,9	0,93	3,75
2	3	0,46	150,0	45	11,44	63	2,5	6,9		4,21

3	4	0,48	145,0	45	17,16	83	2,5	2,9	0,96	4,7
3	5	0,48	145,0	45	11,44	63	2,5	6,9		5,16
4	6	0,50	140,0	45	17,16	83	2,5	2,9	0,99	5,6
4	7	0,50	140,0	45	11,44	63	2,5	6,9		6,13
5	8	0,52	135,0	45	17,16	83	2,5	2,9	1,03	6,6
5	9	0,52	135,0	45	11,44	63	2,5	6,9		7,15
6	10	0,54	130,0	45	17,16	83	2,5	2,9	1,07	7,7
6	11	0,54	130,0	45	11,44	63	2,5	6,9		8,20
7	12	0,56	125,0	45	17,16	83	2,5	2,9	1,12	8,7
7	13	0,56	125,0	45	11,44	63	2,5	6,9		9,29
8	14	0,58	120,0	45	17,16	83	2,5	2,9	1,16	9,8
8	15	0,58	120,0	45	11,44	63	2,5	6,9		10,43
9	16	0,61	115,0	45	17,16	83	2,5	2,9	1,21	11,0
9	17	0,61	115,0	45	11,44	63	2,5	6,9		11,62
10	18	0,64	110,0	45	17,16	83	2,5	2,9	1,27	12,2
10	19	0,64	110,0	45	11,44	63	2,5	6,9		12,86
11	20	0,67	105,0	45	17,16	83	2,5	2,9	1,33	13,5
11	21	0,67	105,0	45	11,44	63	2,5	6,9		14,16
12	22	0,70	100,0	45	17,16	83	2,5	2,9	1,40	14,8
12	23	0,70	100,0	45	11,44	63	2,5	6,9		15,53
13	24	0,74	95,0	45	17,16	83	2,5	2,9	1,48	16,2
13	25	0,74	95,0	45	11,44	63	2,5	6,9		16,97
14	26	0,78	90,0	45	17,16	83	2,5	2,9	1,56	17,7
14	27	0,78	90,0	45	11,44	63	2,5	6,9		18,49
15	28	0,83	85,0	45	17,16	83	2,5	2,9	1,66	19,3
15	29	0,83	85,0	45	11,44	63	2,5	6,9		20,10
16	30	0,88	80,0	45	17,16	83	2,5	2,9	1,76	20,9
16	31	0,88	80,0	45	11,44	63	2,5	6,9		21,81
17	32	0,94	75,0	45	17,16	83	2,5	2,9	1,89	22,7
17	33	0,94	75,0	45	11,44	63	2,5	6,9		23,64
18	34	1,01	70,0	45	17,16	83	2,5	2,9	2,03	24,6
18	35	1,01	70,0	45	11,44	63	2,5	6,9		25,59
19	36	1,09	65,0	45	17,16	83	2,5	2,9	2,19	26,6
19	37	1,09	65,0	45	11,44	63	2,5	6,9		27,70
20	38	1,19	60,0	45	17,16	83	2,5	2,9	2,38	28,8
20	39	1,19	60,0	45	11,44	63	2,5	6,9		29,98
21	40	1,30	55,0	45	17,16	83	2,5	2,9	2,60	31,2
21	41	1,30	55,0	45	11,44	63	2,5	6,9		32,47
22	42	1,44	50,0	45	17,16	83	2,5	2,9	2,88	33,8
22	43	1,44	50,0	45	11,44	63	2,5	6,9		35,21
23	44	1,61	45,0	45	17,16	83	2,5	2,9	3,22	36,7
23	45	1,61	45,0	45	11,44	63	2,5	6,9		38,26
24	46	1,82	40,0	45	17,16	83	2,5	2,9	3,65	39,9
24	47	1,82	40,0	45	11,44	63	2,5	6,9		41,70
25	48	1,90	35,0	50	15,36	80	2,5	3,8	3,79	43,5
25	49	1,90	35,0	50	10,24	58	2,5	8,7		45,42
26	50	2,04	30,0	55	12,6	71	2,5	6,1	4,08	47,3

26	51	2,04	30,0	55	8,4	47	2,5	12,2		49,35
27	52	2,41	25,0	57	10,8	63	2,5	8,3	4,81	51,4
27	53	2,41	25,0	57	7,2	39	2,5	15,2		53,80
28	54	2,95	20,0	60	10,56	63	2,5	8,8	5,90	56,2
28	55	2,95	20,0	60	7,04	39	2,5	16,1		59,15
29	56	3,84	15,0	65	7,8	46	2,5	14,6	7,67	62,1
29	57	3,84	15,0	65	5,2	25	2,5	23,1		65,94
30	58	1,96	10,0	70	6,6	38	2,5	18,7	3,92	69,8
30	59	1,96	10,0	70	4,4	20	2,5	28		71,74
31	60		8,0	70	5,88	32	2,5	21,3		73,7

Priloga E: Program sušenja z oscilacijsko klimo in dejanski sušilni proces (U – vlažnost sistema (%); Up – povprečna vlažnost lesa (%); UGL – ravnovesna vlažnost lesa (%); T – segrevanje zraka ( $^{\circ}$ C); dT – psihometrska razlika ( $^{\circ}$ C)).

