UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Janko MAZI

VPLIV SUŠILNIH POGOJEV NA KONVEKCIJSKO SUŠENJE BUKOVINE

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2010

POPRAVKI:

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Janko MAZI

VPLIV SUŠILNIH POGOJEV NA KONVEKCIJSKO SUŠENJE BUKOVINE

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

IMPACT OF DRYING CONDITION ON CONVECTIVE DRYING OF EUROPEAN BEECHWOOD

GRADUATION THESIS

University studies

Ljubljana, 2010

Diplomsko delo je zaključek Univerzitetnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na katedri za Tehnologijo lesa v laboratoriju za tehnologijo sušenja lesa.

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

Mentor: prof. dr. Željko Gorišek

Recenzent: prof. dr. Milan Šernek

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datuma zagovora:

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

Janko Mazi

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Dn

DK UDK 630*847.2

KG les/sušenje/transport vode/snovna upornost/vlažnost lesa/bukev (*Fagus sylvatica* L.)

AV MAZI, Janko

SA GORIŠEK, Željko (mentor)/ŠERNEK, Milan (recenzent)

KZ SI 1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34

ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

LI 2010

IN VPLIV SUŠILNIH POGOJEV NA KONVEKCIJSKO SUŠENJE BUKOVINE

TD Diplomsko delo (univerzitetni študij)

OP X, 40 str., 2 pregl., 24 sl., 5 pril., 40 vir.

IJ sl

JI sl/en

AI Na vzorcih bukovine (*Fagus sylvatica* L.) smo proučevali vpliv procesnih parametrov sušenja na hitrost masnega kapilarnega toka in na vzpostavljeni vlažnostni profil po prerezu lesa. Poskuse smo izvedli na radialno orientiranih preizkušancih debeline 6 mm, 12 mm, 18 mm in 24 mm. Konvekcijsko sušenje lesa smo simulirali v laboratorijskem sušilnem kanalu pri konstantni temperaturi (T = 30 °C) in konstantni relativni zračni vlažnosti (φ = 85 %), z variiranjem hitrosti zraka (h) od 0,6 m/s do 2,1 m/s. Med sušenjem smo v zaporednih časovnih intervalih gravimetrično določali povprečno lesno vlažnost (u), vlažnostni gradient ($\Delta u/\Delta x$) in masni tok vode iz lesa vzorcev v okolico. Sušilna hitrost se je povečevala s hitrostjo gibanja zraka v sušilni komori ter zmanjševala z večanjem debeline preizkušancev. Povečanje začetne sušilne hitrosti je povzročilo krajšanje faze konstantne sušilne hitrosti. Prevelika začetna stopnja sušenja je povzročila takojšnjo nepovratno zaustavitev začetnega masnega toka vode in znatno podaljšala postopek sušenja.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dn

DC UDC 630*847.2

CX wood/drying/water transport/mass transfer resistance/moisture content/beech (*Fagus sylvatica* L.)

AU MAZI, Janko

AA GORIŠEK, Željko (supervisor)/ŠERNEK, Milan (co-advisor)

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

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

PY 2010

TI IMPACT OF DRYING CONDITIONS ON CONVECTIVE DRYING OF EUROPEAN BEECHWOOD

DT Graduation Thesis (University studies)

NO X, 40 p., 2 tab., 24 fig., 5 ann., 40 ref.

LA sl

AL sl/en

AB The impact of climate conditions on capillary mass flow and induced moisture content gradient was monitored during convective drying of beechwood (*Fagus sylvatica* L.). 6 mm, 12 mm, 18 mm, 24 mm radially oriented beechwood specimens were used. Series of conventional drying processes were carried out in a laboratory tunnel drier at constant drying temperature of 30 °C and constant relative humidity (RH) of 85 % with varying air velocity (h) from 0.6 m/s to 2.1 m/s. During the drying, moisture content, moisture content gradient ($\Delta u/\Delta x$) and water mass flow were gravimetrically determined at successive time intervals. Increasing the air velocity, the drying rate generally increased; increasing the thickness of wood the drying rate decreased. Increase of the air velocity shortened the period of initial constant drying rate, and eliminated it at greater material thicknesses ($\geq$ 18 mm). A high initial drying rate caused immediate irreversible reduction of initial water mass flow, and significantly prolonged the drying procedure.

KAZALO VSEBINE

str.
KAZALO PREGLEDNIC VI
KAZALO SLIK VII
KAZALO PRILOG IX
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI X

1 UVOD 1
1.1 CILJI NALOGE 3
2 SPLOŠNI DEL 4
2.1 VODA V LESU 4
2.1.1 Radialni vlažnostni profili 6
2.2 MEHANIZEM SUŠENJA 7
2.2.1 Izhlapevanje vode s površine 7
2.2.2 Tok vode v lesu 9
2.2.2.1 Permeabilnost 10
2.2.2.2 Difuzivnost 12
3 MATERIALI IN METODE 15
3.1 NAČIN VZORČENJA 15
3.2 METODE 16
3.3 IZRAČUNI 19
4 REZULTATI 22
4.1 POTEK SUŠENJA LESA V ODVISNOSTI OD HITROSTI ZRAKA 22
4.1.1 Masni tok vode iz lesa 25
4.2 ODVISNOST MASNEGA TOKA VODE OD VLAŽNOSTI LESA 26
4.3 VPLIV HITROSTI SUŠENJA NA VLAŽNOSTNI GRADIENT 29
5 RAZPRAVA 33
6 SKLEPI 35
7 VIRI 36
ZAHVALA
PRILOGE

KAZALO PREGLEDNIC

str.

Preglednica 1 Maksimalen masni tok (a), vlažnost zaključka linearnega dela sušilne krivulje (u_T) in lesna vlažnost pri največjem pojemku hitrosti sušenja (u_k) v odvisnosti od debeline preizkušancev (d_1, d_2, d_3, d_4) in hitrosti gibanja zraka (h_1, h_2, h_3). 26

Preglednica 2 Odvisnost vlažnostnega gradienta ($\Delta u/\Delta x$) na globini 3 mm (x_2-x_1), x_1 = 1,5 mm, x_2 = 4,5 mm) pri sušenju bukovih preizkušancev, debelin (d_1 = 6 mm, d_2 = 12 mm, d_3 = 18 mm, d_4 = 24 mm), od hitrosti gibanja zraka (h_1 = 0,6 m/s, h_2 = 1,1 m/s, h_3 = 2,1 m/s) in časa odvzema. 30

KAZALO SLIK

str.

Slika 1 Sušenje lesa na prostem. 4

Slika 2 Shematski prikaz pretoka vode v lesu pri sušenju5

Slika 3 Radialni vlažnostni profil bukovine 6

Slika 4 Radialni vlažnostni profil bukovine v svežem stanju 6

Slika 5 Različni tipi komor za konvekcijsko sušenje lesa 8

Slika 6 Odvisnost deleža aktivnih por v vzdolžni smeri bukovine od dolžine preizkušanca 9

Slika 7 Teoretični temperaturni in vlažnostni profil na stiku vlažne površine lesa z okoliškim zrakom. 10

Slika 8 Odvisnost specifične permeabilnosti bukovine (*Fagus sylvatica* L.) v vzdolžni smeri od dolžine preizkušanca 11

Slika 9 Difuzijski koeficient vezane vode v prečni smeri (D_{BT}) in difuzijski koeficienti vodne pare (D_V) pri različnih temperaturah v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa ($\bar{u}$) 12

Slika 10 Difzijski koeficient vezane vode v vzdolžni smeri za smrekovino (*Picea sitchensis*) v procesu adsorpcije pri temperaturi 26,7°C v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti 13

Slika 11 Izdelava radialno orientiranih lamel in vzorcev za sušilne eksperimente. 15

Slika 12 Vzorčenje za sušenje preizkušancev, z debelino 6 mm (d_1), 12 mm (d_2), 18 mm (d_3), 24 mm (d_4) in mesto na policah v laboratorijskem sušilnem tunelu. 16

Slika 13 Sušilni kanal TLS-01 z zaprtim tokokrogom zraka in namestitev preizkušancev v sušilni komori. 17

Slika 14 Teoretični izračun časa sušenja po debelini preizkušancev pri posamezni zračni hitrosti sušenja. 18

Slika 15 Prikaz metode razslojevanja in sušenje v laboratorijskem sušilniku. 19

Slika 16 Analiza masnega toka vode: a – začetni masni tok vode, k – hitrost pojemanja masnega toka vode s padanjem povprečne lesne vlažnosti, u_k – prevoj funkcije, u_T – vlažnost ireverzibilnega prehoda v fazo padajoče sušilne hitrosti. 20

Slika 17 Sušilne krivulje bukovine pri hitrosti zraka h_1 = 0,6 m/s za vse debeline vzorcev. 22

Slika 18 Sušilne krivulje bukovine pri hitrosti zraka h_2 = 1,1 m/s za vse debeline vzorcev. 23

Slika 19 Sušilne krivulje bukovine pri hitrosti zraka h_3 = 2,1 m/s za vse debeline vzorcev. 24

Slika 20 Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine, različnih debelin (d_1 = 6 mm, d_2 = 12 mm, d_3 = 18 mm, d_4 = 24 mm), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih zraka (h_1 = 0,6 m/s, h_2 = 1,1 m/s, h_3 = 2,1 m/s). 28

Slika 21 Porazdelitev vlažnosti po prerezu bukovih preizkušancev debeline 6 mm na globini x_1 = 1,5 mm in x_2 = 4,5 mm v odvisnosti od časa sušenja (t), pri različnih hitrostih gibanja zraka (h_1 = 0,6 m/s (zgoraj-levo), h_2 = 1,1 m/s (zgoraj-desno) in h_3 = 2,1m/s (spodaj). 31

Slika 22 Porazdelitev vlažnosti pri preizkušancih iz bukovine debeline 24 mm pri različnih sušilnih hitrostih, h_1 = 0.6 m/s (zgoraj), h_2 = 1,1 m/s (sredina) in h_3 = 2,1m/s (spodaj) ob različnih časovnih intervalih. 32

Slika 23 Prikaz prehoda med konstantno in padajočo stopnjo sušenja šarže pri hitrosti zraka 0,6 m/s (h_1), 1,1 m/s (h_2) in 2,1 m/s (h_3). 34

KAZALO PRILOG

Priloga A Vrednosti koeficientov v modelu masnega toka vode (Enačba 4) (a - začetni masni tok, u_k - prevoj funkcije, k - hitrost pojemanja masnega toka, dm/dt_k – masni tok v prevojni točki (u_k), u_T - vlažnost prehoda iz faze konstantne v fazo padajoče sušilne hitrosti) v odvisnosti od hitrosti zraka nad površino lesa (h_1 = 0,6 m/s, h_2 = 1,1 m/s, h_3 = 2,1 m/s)

Priloga B Povprečne vlažnosti (u_p) in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx), debeline 6 mm (d_1), ter površinski vlažnostni gradient (x_2 - x_1) – med 1. in 2. slojem

Priloga C Povprečne vlažnosti (u_p) in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx), debeline 6 mm (d_1), ter površinski vlažnostni gradient (x_2 - x_1) – med 1. in 2. slojem

Priloga D Povprečne vlažnosti (u_p) in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx), debeline 6 mm (d_1), ter površinski vlažnostni gradient (x_2 - x_1) – med 1. in 2. slojem

Priloga E Povprečne vlažnosti (u_p) in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx), debeline 6 mm (d_1), ter površinski vlažnostni gradient (x_2 - x_1) – med 1. in 2. slojem

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

A	površina, prečni prerez [m^2],
a	začetni masni tok [$g\ m^{-2}h^{-1}$],
α	koeficient lesne vrste,
D	difuzijski koeficient [$m^2\ s^{-1}$],
d	debelina [m],
dm/dt_k	masni tok v prevoju modela, pri povprečni vlažnosti lesa u_k [%],
h	hitrost kroženja zraka [m/s],
φ	relativna zračna vlažnost [%],
k	hitrost masnega toka s padanjem povprečne lesne vlažnosti[1/%],
K	specifična permeabilnost [$m^3\ m^{-1}$],
K_{ef}	efektivna prevodnost [$kg^2\ m^{-1}\ s^{-1}\ J^{-1}$],
Δl	dolžina [m],
λ	toplotna prevodnost [$W\ m^2\ K^{-1}$],
m_0	masa lesa v absolutno suhem stanju [g],
m_{vode}	masa vode [g],
$\dot{m}$	snovni, masni tok [$kg\ s^{-1}$],
T	temperatura [K],
t	čas [s],
u	vlažnost lesa [%],
u_{max}	napojitvena vlažnost lesa [%],
u_k	povprečna vlažnost lesa v prevoju modela masnega toka vode [%],
u_p	povprečna vlažnost lesa [%],
u_r	ravnovesna vlažnost lesa [%],
u_T	vlažnost prehoda iz faze konstantne v fazo padajoče sušilne hitrosti [%],
u_z	začetna vlažnost [%],
u_{TNCS}	vlažnost nasičenja celičnih sten [%],
u_k	končna vlažnost lesa [%],
x	dimenzija, lokacija [mm].

1 UVOD

Lastnosti lesa kot tudi sam les so nam poznane že od nekdaj, pa vendar nas neštetokrat preseneti s pojavom napak. Kot naraven higroskopen material tudi deluje naravno, se spreminja z okoljem in se mu prilagaja. Prav vse lesne vrste ob poseku vsebujejo ogromno količino vode, tako proste kot vezane, ki jo moramo izločiti, da pridobimo ustrezne dimenzijske in mehanske lastnosti za naše proizvode. Te lahko izboljšamo v tehnološki fazi sušenja lesa, kjer les osušimo do ravnovesne vlažnosti mesta vgraditve oziroma primerne vlažnosti za nadaljnjo uporabo.

Najpomembnejši proces pri proizvodnji žaganega lesa in lesnih izdelkov je torej sušenje lesa. Les bukve je treba po poseku takoj spraviti iz gozda, saj je nezaščitena bukovina podvržena okužbam z glivami in insekti. Proces sušenja vpliva na deformacije, površinske razpoke, razbarvanja in s tem na kakovost proizvodov in proizvodnih stroškov. Raziskave na tem področju so zelo pomembne za lesno industrijo, saj je potrebno proces industrijskega sušenja vedno nadgrajevati, kot to zahteva povpraševanje na trgu, s tem pa razvijati tudi nove izdelke.

Potrebe kot tudi zahteve po lesu so vsak dan večje, zato moramo tudi naše znanje in poznavanje najrazličnejših parametrov, ki so nam v pomoč pri obdelavi in predelavi lesa, razširiti do meje, ki nam omogoča optimizacijo in maksimalen izkoristek, ob tem pa minimalen izmet, saj se parametri nenehno spreminjajo s klimo in pa tudi s samo izbiro lesne vrste, kjer se srečujemo z velikimi vlažnostnimi in napetostnimi gradienti (Hanhijärvi in sod., 2003). Glede na namen in lokacijo kjer naj bi predmet uporabili, si izberemo optimalno lesno vrsto, njen način priprave in končne obdelave. Največkrat izberemo konvekcijsko sušenje, kjer zlahka nadzorujemo in sprotno prilagajamo procesne parametre, s tem pa kontroliramo kakovost dokončno osušenega materiala.

Konvekcijsko sušenje delimo na izločanje proste vode, to je prva faza sušenja, ko je temperatura lesa nižja od okoliškega zraka, prisoten naj bi bil kapilarni tok, sušilna hitrost pa je konstantna (Perre in sod., 1993; Perre in Martin, 1994) in na difuzijsko izločanje vezane vode, kot posledica vzpostavljenega gradienta vlažnosti. Voda se iz notranjosti, kjer je vlažnost še nad točko nasičenja celičnih sten (TNCS), giblje preko osušene površine kot difuzijski tok vezane vode (Perre in sod., 1993; Perre in Martin, 1994) ali pa je difuzijski tok vzpostavljen po celotnem prerezu lesa.

Visoke začetne hitrosti sušenja lahko povzročijo difuzijsko bariero, ki se ustvari tik pod sušečo površino (Hukka in Oksanen, 1999; Tremblay in sod., 2000; Remond in sod., 2005). Posledično se postopek sušenja podaljša, prosta voda ostane pod osušenim slojem lesa, vlažnostni in napetostni gradienti pa se povečajo (Hunter, 2002), ker je potrebno preostalo vodo izločiti difuzijsko. V začetni fazi lahko ob nizkih temperaturah, tudi pod 30 °C, zagotovimo hitrejše sušenje in tako zmanjšamo možnost obarvanja bukovine (Gorišek, 2000). Ob konstantni nizki temperaturi lahko še pospešimo proces sušenja s hitrostjo zraka in ostrino sušenja (Salin, 2007), kar pa ob prevelikih vrednostih lahko privede do nezaželene difuzije še preden izločimo vso prosto vodo (Wiberg, 1999; Rosenkilde in Glover, 2002). Posledično se lahko na zunanjih slojih pojavijo razpoke in lokalno zaskorjenje lesa (Kowalski in Rybicki, 2007).

Učinkovito izhlapevanje vode s površine pri sušenju nad točko nasičenja celičnih sten dosežemo z velikim masnim tokom vode (Perre, 2004). Poznati moramo torej prevodnost lesnega tkiva in pa povezave med vezano in prosto vodo (Perre in Karimi, 2002). Na izločanje vode nad točko nasičenja pa vplivajo tudi strukturne in morfološke značilnosti obdelave površine (Salin, 2008a). Raziskave potrjujejo značilen vpliv glede obdelave površine lesa na gibanje zraka, kar vpliva tudi na kinetiko sušenja (Rosen, 1978; Cai in Avramidis, 1993; Siau in Avramidis, 1996).

1.1 CILJI NALOGE

Cilj raziskave je analizirati kinetiko sušenja bukovine (*Fagus sylvatica* L.) z uporabo nizkotemperaturnih pogojev sušenja. Želimo ugotoviti in določiti čas trajanja sušilnega postopka ter poiskati ali obstaja konstanten masni tok vode, ko le tega spremljamo pri konstantnih sušilnih pogojih, zgolj pri variiranju hitrosti zraka. Proučiti želimo vpliv hitrosti gibanja zraka na hitrost izločanja vode iz lesa, ter hkrati preveriti učinek debeline materiala. Rezultati bodo omogočili izdelavo napovedovalnega modela masnega toka vode med sušenjem.

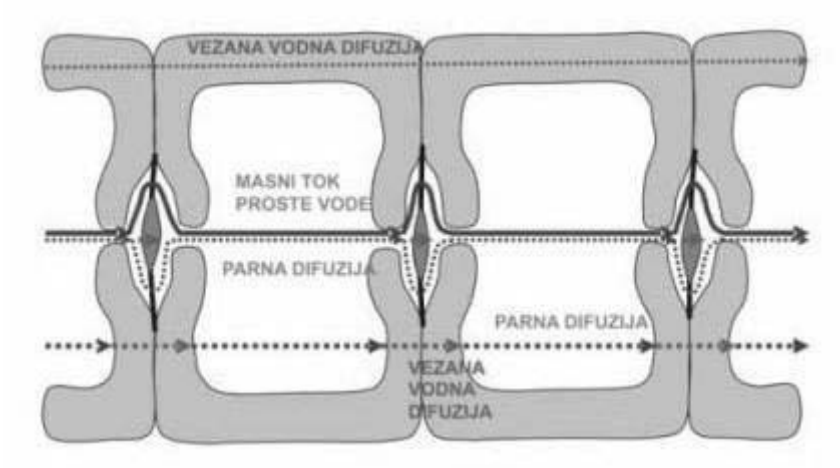
2 SPLOŠNI DEL

2.1 VODA V LESU

Vsebnost vode v sveže posekanem lesu je zelo različna, od več kot 200% pa vse do le 40%. Ko se posekano deblo začne sušiti, in če ni v stiku z vlago in zaščiteno pred dežjem, se sčasoma osuši. Sušenje se nadaljuje po razžagovanju hlodovine v žagan les, ki ga sušimo na prostem (Slika 1) do ravnovesne vlažnosti okolja. V vlažnem okolju je to nekje pri 20%, v bolj vročih, suhih podnebjih pa na 6% (Walker in Langrish, 1993). Kadarkoli se les osuši pod točko nasičenja, je pričakovati krčenje.

Slika 1 Sušenje lesa na prostem (Langrish in Walker, 1993) .

Les v svežem stanju vsebuje veliko količino vode, ki pogosto predstavlja večjo maso od dejanske mase lesa. Sušenje lesa se začne s površine in nadaljuje v notranjost, pri čemer je nujno, da vzpostavimo ustrezen tok po prerezu, da zagotovimo še sušenje notranjosti. Odvisnost prevajanja proste in vezane vode je pogojena z lesno vrsto in z njenimi inherentnimi lastnostmi. Prosta voda se nahaja v lumnih celic in se prevaja preko lumnov in medsebojnih pikenjskih odprtin, difuzijski tok pa poteka po celičnih stenah in skozi celične lumne (Slika 2).



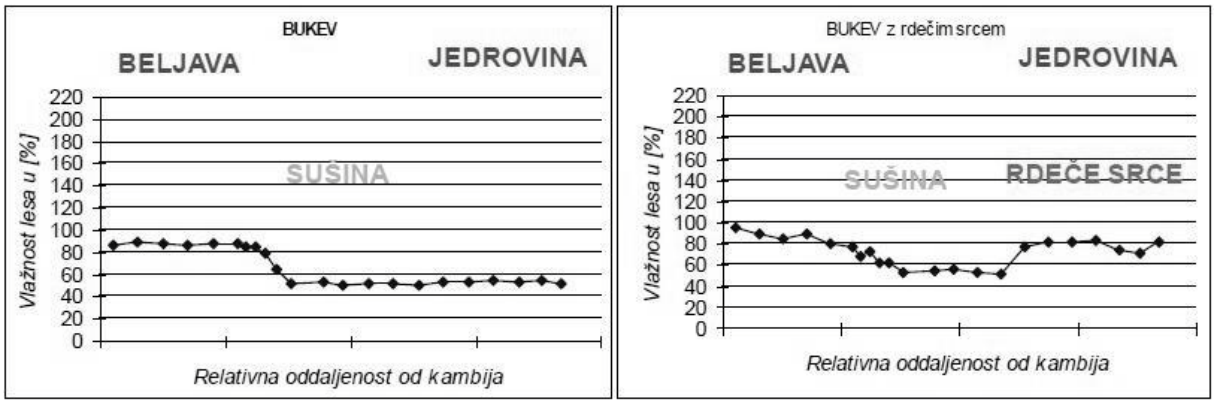
Slika 2 Shematski prikaz pretoka vode v lesu pri sušenju (Gorišek, 2004).

Vezana voda se veže na les s pomočjo vodikovih vezi na proste hidroksilne skupine celuloze, ter polioz / hemiceluloze. V stoječem drevesu gibanje vode omogoča prevodna beljava. Voda se prevaja po porah oziroma preko prevodnih kapilar tik ob kambiju. Pri prevajanju intenzivno sodeluje le nekaj zunanjih branik. Količina vode pa je odvisna od gostote materiala, večja ko je gostota, manj je praznih prostorov, manjša je napojitvena vlažnost.

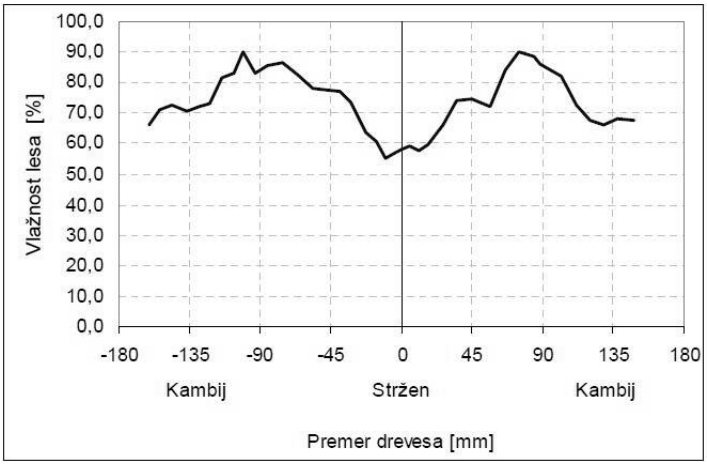
Med sušenjem se pojavljajo tudi površinske razpoke. Pogost vzrok pojava je preoster režim sušenja, kar pa najpogosteje poizkušamo reševati s prilagajanjem klimatskih pogojev dejanskim sušilnim lastnostim lesnih vrst in sortimentov. Vodenje procesa sušenja se bistveno izboljša, v primeru da imamo v vsakem trenutku zanesljive podatke merilnih naprav v sušilnici (hitrost zraka in smer kroženja, relativna zračna vlažnost, povprečna reprezentativna vlažnost materiala). Kljub tem pa je postopek sušenja kompleksen proces, saj ima vsak element specifične lastnosti. Tako imamo opraviti z veliko variabilnostjo lastnosti materiala v sušilni komori. V praksi proces sušenja obravnava elemente kot populacijo, pri čemer nam sušenje v vsakem primeru postreže z drugačnimi, variabilnimi rezultati. Želeni končni izid je, da minimiziramo razlike vlažnosti v šarži, kot tudi pojav vlažnostnega gradienta znotraj elementov, brez pretirane degradacije lesa in v razumnem roku.

2.1.1 Radialni vlažnostni profili

Za natančno načrtovanje sušilnega procesa je pomembna tudi informacija o začetni vlažnosti materiala. Ker se v praksi vse več materiala suši takoj po poseku oziroma razžagovanju, ko je vlažnost lesa podobna kot v drevesu, poznavanje razporeditve vode v lesu omogoča tudi optimalno vodenje sušilnega procesa. Tako lahko iz grafov (Slika 3, Slika 4) razberemo, da se že na začetku sušenju lesa srečamo z visokimi vlažnostmi. Radialna razporeditev vlažnosti pri bukovini (Slika 4) je v prevodni beljavi tik ob kambijevi coni nad 60%. Zunanji dejavniki in spreminjanje klime pa vplivajo na nihanje vlažnosti med zunanjimi branikami.



Slika 3 Radialni vlažnostni profil bukovine (Gorišek, 2004).



Slika 4 Radialni vlažnostni profil bukovine v svežem stanju (Šifrar, 2009).

2.2 MEHANIZEM SUŠENJA

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

2.2.1 Izhlapevanje vode s površine

Pretok zraka opravlja dve funkciji, je v vlogi nosilca toplote in kot medij za prenos izhlapele vode s površine. Čas sušenja in kakovost posušenega lesa sta odvisna predvsem od hitrosti zraka in njegovega enakomernega kroženja. Če je hitrost ventilatorjev prevelika, bo zrak prehitro zaokrožil skozi zložaj, sprejel pa le manjši del vlage, ki jo se sposoben sprejeti s površine. Posledica tega je prekomerna poraba energije. Nasprotno, če je kroženje prepočasno, se topel zrak medtem ohladi in navlaži, deske na koncu zložajev pa se sušijo bistveno počasneje.

Najmanjša, še sprejemljiva hitrost zraka (Gorišek, 2004), ki še zagotavlja izenačene razmere sušenja pri zelo počasi sušečih se lesovih, je 1,3 m/s, za sušenje gostejših listavcev pa se priporočajo hitrosti od 1,5 do 2,5 m/s (kar pomeni od 0,15 do 0,3 kW instalirane moči na kubični meter lesa) in za iglavce od 3 do 4 m/s (od 0,25 do 0,4 kW instalirane moči na kubični meter).

Spremljanje sušenja zahteva tudi nadzor klimatskih pogojev v sušilni komori (Walker s sod., 1993; Keey s sod., 2000). Stalno težimo k minimaliziranju stroškov in k vedno bolj učinkoviti tehnologiji. Hitrost sušenja je pogojena s kontrolo relativne zračne vlažnosti, temperature zraka in hitrosti pretoka zraka skozi zložaje. Pri veliki hitrosti zraka se lahko površino osuši do te mere, da nastane na površini tanek suhi sloj, ki prekine tok proste vode, ustvari se difuzijska bariera.

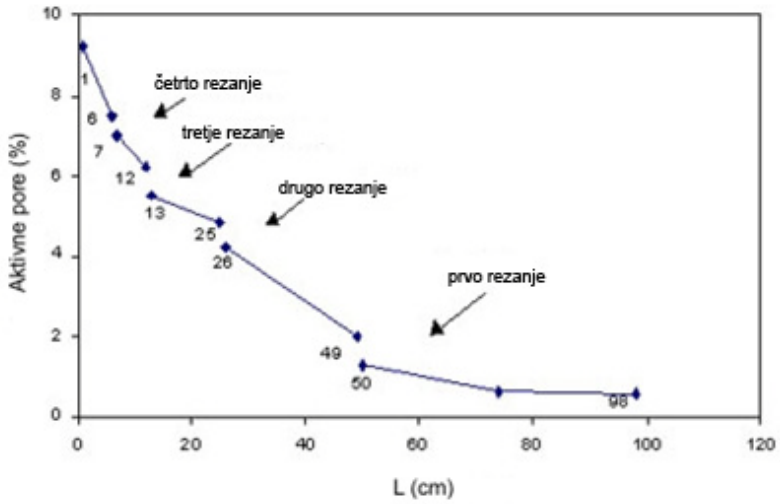
Za sušenje les zložimo v zložaje. Material v zložaje razvrščamo po drevesni vrsti, debelini, vlažnosti, pa tudi po lokaciji beljave in jedrovine. Iz prakse nam je znano, da se deske na katerih je več beljave, sušijo dalj časa, saj imajo že na samem začetku višjo vlažnost. Sušenje lesa se začne že pri sami postavitvi zložajev in pravilni umestitvi le tega v konvekcijsko komoro (Slika 5).

Slika 5 Različni tipi komor za konvekcijsko sušenje lesa (Gorišek, 2004).

Prosta voda se izloča vse do točke nasičenja, ki je v večini primerov med 25 in 40%, pri tem pa se večina fizikalnih lastnosti lesa ne spremeni. Zaradi zmanjšanja površinske napetosti, prihaja do ukrivljenja mejne površine in posledično do tlačnega gradienta, saj je les nagnjen k izenačevanju vlage z relativno vlažnostjo in temperaturo okoliškega zraka.

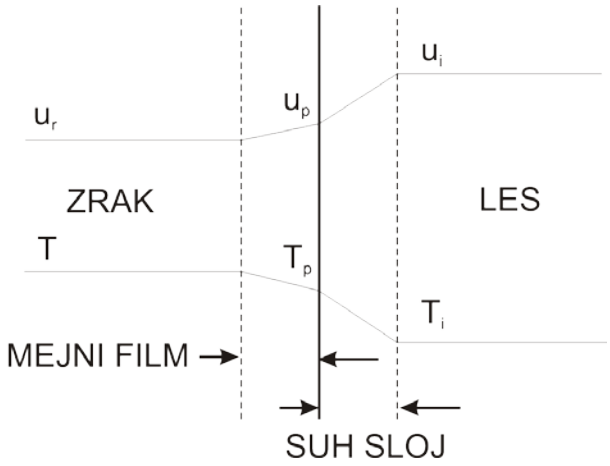
2.2.2 Tok vode v lesu

Pri proučevanju navzema, kot ekvivalentnemu pojavu masnemu kapilarnemu toku proste vode (vode v vzdolžni smeri bukovine) so tako poleg določanja tekočinske permeabilnosti spremljali tudi način gibanja kapljevine v porozni lesni strukturi (Comstock, 1967; Choong in sod., 1974; Bolton in Petty, 1978). Pri tem so ugotovili, poleg odvisnosti od transportne razdalje, tudi odvisnost izmerjene tekočinske permeabilnosti od časa trajanja eksperimenta. Med razlogi za ta pojav se tako kot v podobnih raziskavah (Perre in Karimi, 2002), omenja predvsem možnost formiranja lokalnih zračnih mehurčkov, ki preprečujejo učinkovit kapilarni transport. Z mikroskopsko analizo vzorcev bukovine, ki so bili izpostavljeni penetraciji obarvane vode v kapilarni sistem, pa so hkrati tudi ugotovili, da v lesu obstaja le del kapilar, ki imajo aktivno funkcijo. Rezultati so pokazali, da se število t.i. aktivnih por pri tem z oddaljenostjo od vpojne površine vzorcev eksponentno zmanjšuje, podobno kot tudi izmerjena permeabilnost lesa (Slika 6). Dodatno pri primerjavi števila aktivnih por pri kratkem (t = 10 min) in dolgem času navzemanja vode (t = 300 min) niso potrdili značilnih razlik v njihovem številu (Comstock, 1970). Tudi pri iglavcih je bilo potrjeno s podobno tehniko navzemanja tekočin, da ima le majhen del tkiva tudi prevajalno funkcijo. V beljavi jelovine (*Abies grandis* L.) so denimo le pri 2,8% traheid (več v kasnem lesu) potrdili sodelovanje pri prevajanju vode (Petty in Puritsch, 1970).



Slika 6 Odvisnost deleža aktivnih por v vzdolžni smeri bukovine od dolžine preizkušanca (Perre, 2002).

Bolj ko nam je poznana struktura lesa, bolj natančno lahko prikažemo porazdelitev vode in kinetiko sušenja. Tako lahko zasledimo, da se pri bolj permeabilnih vrstah že na začetku sušenja vzpostavi konstantna sušilna hitrost, a se sčasoma na površini lahko pojavi tanek suhi sloj, ki prosti vodi preprečuje izhlapevanje. Nastali suhi površinski sloj (Slika 7) je posledica prehitrega sušenja, saj struktura lesa ne dovoljuje dejansko izpostavljenega masnega toka vode na površini lesa. S tem pride do vzpostavitve notranjega vlažnostnega gradienta.



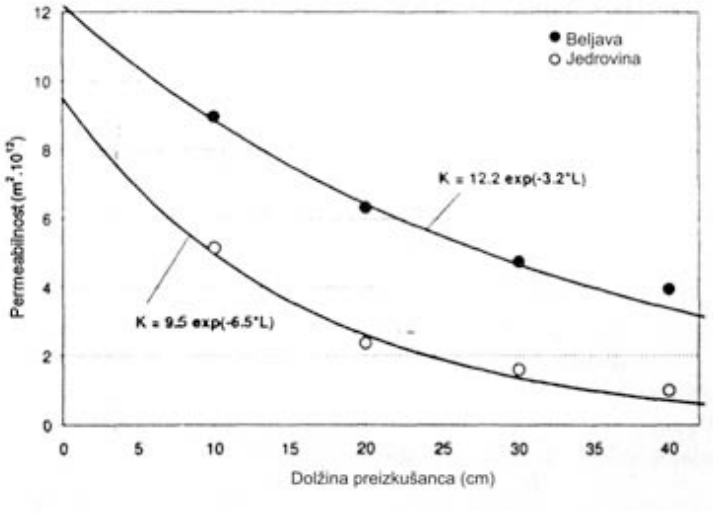
Slika 7 Teoretični temperaturni in vlažnostni profil na stiku vlažne površine lesa z okoliškim zrakom.

2.2.2.1 Permeabilnost

Permeabilnost lesa se največkrat določa v vzdolžni smeri lesa, kjer je v razponu $1 : 5 \times 10^6$ pri listavcih, pri iglavcih pa $1 : 0{,}5 \times 10^6$. Raziskave so potrdile velike razlike osnovne permeabilnosti med lesnimi vrstami v različnih anatomskih smereh. Del variabilnosti lahko pripišemo permeabilnosti beljave in jedrovine zaradi otiljenja in akumuliranje ekstraktivov v jedrovini listavcev, pri iglavcih pa za glavni razlog navajajo aspiracijo pikenj. Pri iglavcih določa permeabilnost specifična prevodnost med prevodnimi traheidami odvisno od pikenjske povezave, ki povzročajo velik upor proti pretoku tekočin. Tudi v prečni smeri lesa so razlike v permeabilnosti velike, s čimer značilno vplivajo na proces izločanja vode pri sušenju. Variabilnost permeabilnosti v radialni smeri se tako pogosto pojasnjuje z različno prevodnostjo radialno potekajočih trakov, tangencialna permeabilnost pa je zelo odvisna od stanja pikenj v radialnih stenah celic, kjer je njihova gostota največja. Iz tega sledi tudi veliko razmerje med permeabilnostjo v vzdolžni in tangencialni smeri, ki znaša denimo pri iglavcih

med 1 : 500 do 1 : 80 × 10^3, vzdolžna permeabilnost pa je z radialno v razmerju od 1 : 15 do 1 : 50 × 10^3 (Bramhall, 1971; Meyer, 1971; Kauman in sod., 1994; Siau, 1995).

Permeabilnost je inherentna lastnost materiala, ki posledično vpliva na fazo konstantne sušilne hitrost, torej na transport proste vode iz lesa. Raziskave permeabilnosti lesa, tako kapljevinske kot tudi plinske permeabilnosti, pa so potrdile, da se permeabilnost lesa zmanjšuje z dolžino transportne razdalje (Perre in Karimi, 2002). Pri določanju vzdolžne plinske permeabilnosti pri bukovini (*Fagus sylvatica* L.) tako denimo ugotavljajo, da se permeabilnost več kot 2-krat hitreje zmanjšuje z dolžino transportne poti v beljavi, kot pa v jedrovini (Perré in Karimi, 2002) (Slika 8). Navaja pa se tudi obratno razmerje, kjer so denimo pri vzorcih z nizko izhodiščno permeabilnostjo (L = 0) potrdili večji padec permeabilnosti z dolžino transportne razdalje, kot pa v primeru bolj permeabilnega lesa (Siau, 1984). Rezultati kažejo, da se permeabilnost z dolžino transportne poti neenakomerno zmanjšuje, odvisnost pa se največkrat interpretira z eksponentnim matematičnim modelom (Perre in Karimi, 2002). Poleg efektivne permeabilnosti lesa K_{ef} v odvisnosti od dolžine vzorca oz. transportne poti, lahko iz tega modela določimo tudi teoretično permeabilnost K, ki jo predstavlja začetna vrednost funkcije (L = 0).

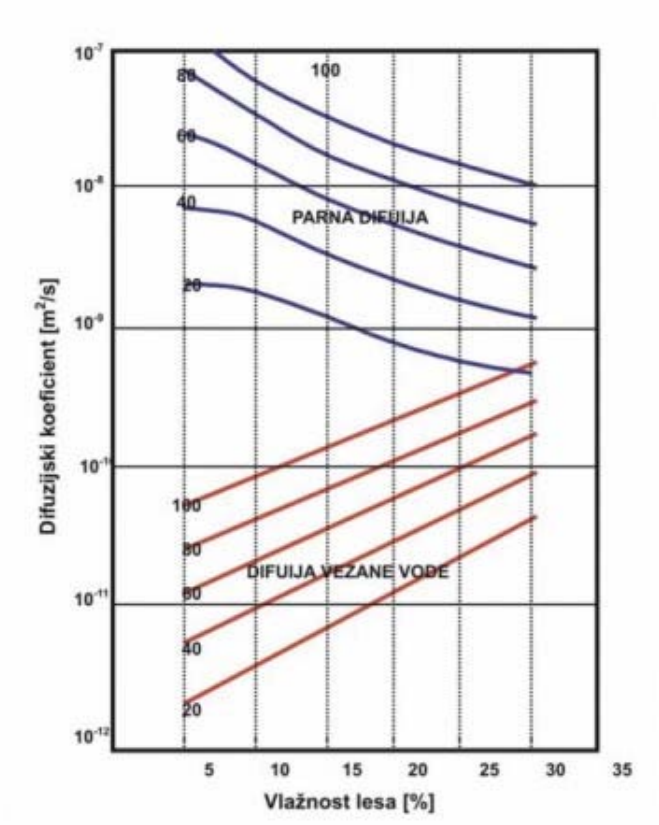


Slika 8 Odvisnost specifične permeabilnosti bukovine (*Fagus sylvatica* L.) v vzdolžni smeri od dolžine preizkušanca (Perré in Karimi, 2002).

2.2.2.2 Difuzivnost

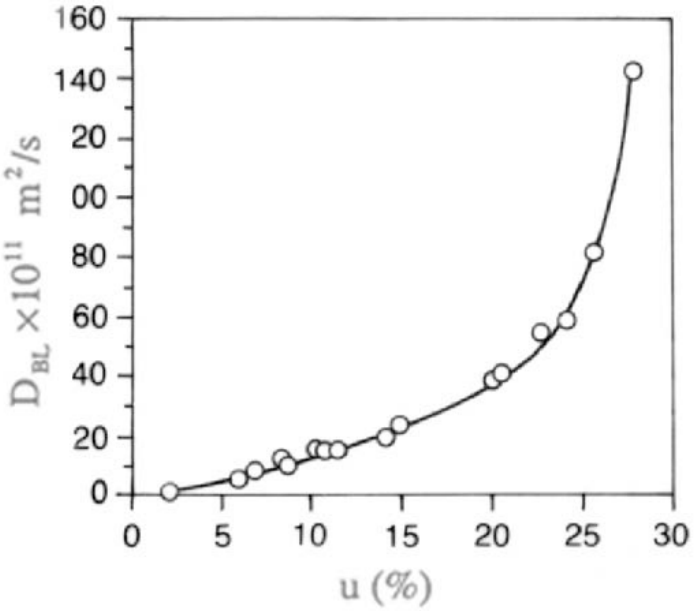
V splošnem difuzivnost vpliva na kinetiko sušenja pri vlažnostih lesa pod točko nasičenja celičnih sten, v primeru velikih vlažnostnih gradientov (difuzijska bariera) pa ta inherentna lastnost materiala lahko vpliva tudi na postopek sušenja pri visokih lesnih vlažnostih.

Sicer je znano, da se difuzivnost, kot sposobnost prevajanja vezane vode, povečuje z naraščanjem temperature (Stamm, 1961), kot tudi z gostoto lesne vrste (Kang, 1997). V splošnem to izkoriščajo režimi v trenutni sušilni praksi, kjer se večinoma pri vlažnostih lesa pod točko nasičenja celičnih sten sušenje pospešuje z dviganjem temperature (Slika 9).



Slika 9 Difuzijski koeficient vezane vode v prečni smeri (D_{BT}) in difuzijski koeficienti vodne pare (D_V) pri različnih temperaturah v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa (u) (Siau 1995).

Hkrati pa raziskave tudi potrjujejo, da se difuzivnost s padanjem lesne vlažnosti zmanjšuje (Stamm, 1959) in obratno, višja lesna vlažnost povečuje difuzijski koeficient (Slika 10). To lahko razložimo z manjšo vezalno energijo med sorpcijskimi mesti in vezanimi vodnimi molekulami pri višji vlažnosti. Pri višji vlažnosti je namreč za premik oz. zamenjavo v celično steno sorbiranih vodnih molekul potrebno manj energije. Nižja kot je vlažnost, bolj direktno so molekule vezane na sorpcijska mesta. Pri višjih vlažnostih ima celična substanca bolj odprto strukturo; zato je adsorpcija lažja, kot pri nižjih vlažnostih.



Slika 10 Difzijski koeficient vezane vode v vzdolžni smeri za smrekovino (*Picea sitchensis*) v procesu adsorpcije pri temperaturi 26,7°C v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti, (Stamm, 1964 cit. po Siau 1995).

Ker se gibanje vezane vode dosega z vzpostavitvijo koncentracijskih razlik vodne pare, raziskave potrjujejo, da ta proces dodatno ne moremo bistveno pospeševati z dviganjem hitrosti gibanja zraka. V praksi tako zasledimo, da se pri nizkih vlažnostih lesa uporabljajo nižje vrtilne hitrosti ventilatorjev v sušilnih komorah, s čimer se zmanjšuje tudi poraba energije. Pri tem ugotavljajo, da ta tehnika bistveno ne podaljšuje časa sušenja in ekonomičnosti postopka.

Difuzijski koeficient parne difuzije z naraščajočo vlažnostjo pada, nasprotno kot koeficient vezane vodne difuzije (Slika 9). Zato postane še posebno pri nizkih vlažnostih lesa nizka upornost v celičnih lumnih zanemarljiva v primerjavi z difuzivnostjo celične stene.

Koeficient parne difuzije z naraščajočo vlažnostjo pri nižjih temperaturah in nizkih vlažnostih lesa pada počasi in ostreje pri višjih vlažnostih. Koeficient difuzije vodne pare v lumnih temperaturno narašča zaradi naraščanja parnega tlaka.

Osnovni namen sušenja pri višji temperaturi je povečati stopnjo prenosa vode na površino. Povišana temperatura drastično poveča difuzijo vodnih molekul skozi celične stene. Difuzija se s temperaturo povečuje enako sorazmerno kot je naraščanje tlaka nasičene vodne pare.

Les v komori miruje, spreminja se klima, ki jo prilagajamo vlažnosti lesa glede na vrsto in debelino. Les sušimo pri najvišji možni temperaturi in ob hitrem gibanju zraka, tako da se čim prej posuši. Da bi zagotovili kontinuirano proizvodnjo in visoko kakovost, les po sušenju še »temperiramo« in »umirimo« v prostoru z nadzorovano klimo (Gorišek, 2004).

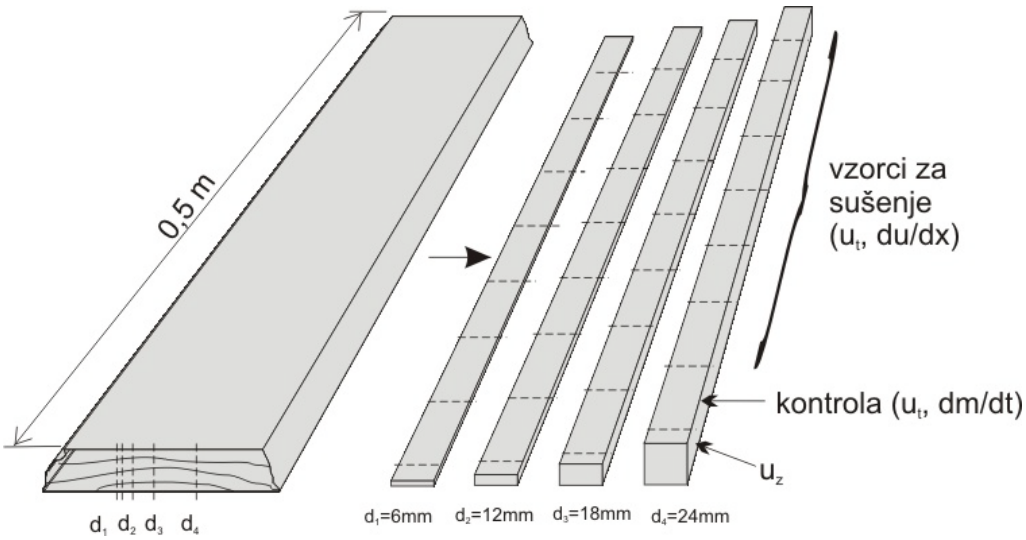
S temperaturo se povečuje tudi vlažnostna kapaciteta zraka. Z dvigom temperature mokrega lesa zmanjšamo energijo, ki je potrebna za izhlapevanje vode s površine.

Predhodna mehanska obdelava materiala vpliva na hitrost in kakovost sušenja. Postopek sušenja se ob nepravilni, grobi obdelavi tudi podaljša oziroma pride do prehitrega sušenja tako površine kot notranjosti materiala ter tako do nepotrebnih napak.

3 MATERIALI IN METODE

3.1 NAČIN VZORČENJA

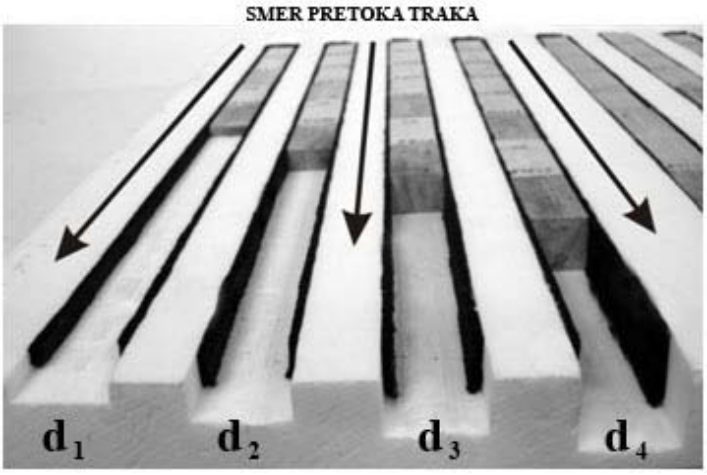
Vzorci bukovine (*Fagus sylvatica* L.) so bili izžagani iz svežih tangencialnih desk dolžine 2 m in debeline 32 mm na vzporedne serije radialno orientiranih lamel dolžine 430 mm in širine 25 mm. Lamele smo nato pripravili s tračnim žagalnim strojem na debelino 6 mm, 12 mm, 18 mm in 24 mm, jih zavili v plastične vrečke in postopoma globoko zamrznili pri temperaturi -20 °C, da bi ohranili začetne pogoje vlažnosti.



Slika 11 Izdelava radialno orientiranih lamel in vzorcev za sušilne eksperimente.

Pred vzorčenjem elementov smo posamezne lamele počasi odmrznili (10 °C/uro) na sobno temperaturo in jih razžagali na 8 enakih delov dolžine 50 mm in širine 25 mm ter debelinsko poskobljali na ustrezne debeline (Slika 11). To je pravzaprav polovična debelina deske, ki bi se sušila na obeh straneh. Vzorci so bili izmerjeni s kljunastim merilom z natančnostjo 0,01 mm, stehtani z natančnostjo 0,001g, nato pa zaporedno vstavljeni v poprej izdelane profile plošč Styrodura® različnih globin (6, 12, 18 in 24 mm). Prvih sedem vzorcev je služilo za intervalno preverjanje masnega toka in gradienta, zadnji osmi pa je bil namenjen kontroli.

Robovi izdelanih profilov so bili oblečeni z vodotesno gumo, s tem smo preprečili sušenje vzorcev z bočne strani in zagotovili optimalno površino sušenja (Slika 12). Med sedmim in kontrolnim vzorcem, ter na koncu vsakega profila, je bil vstavljen vzorec bukovine primerljive vlažnosti in primerne debeline, da smo izničili še sušenje čel vzorcev.



Slika 12 Vzorčenje za sušenje preizkušancev, z debelino 6 mm (d_1), 12 mm (d_2), 18 mm (d_3), 24 mm (d_4) in mesto na policah v laboratorijskem sušilnem tunelu.

3.2 METODE

Eksperiment smo izvedli v sušilnem kanalu podjetja Kambič (Slika 13) z zaprtim tokokrogom zraka, ki se poganja z zmogljivim radialnim ventilatorjem, klimatske pogoje pa preko programiranega logičnega krmilnika zagotavljamo s toplotno črpalko, grelcem in vlažilnikom. V kanalu, s prečnim prerezom 0,2 m^2 (višina × globina: 0,4 m × 0,5 m), je omogočen homogen pretok zraka s hitrostmi med 0 m/s in 10 m/s (Δh = ± 0,1 m/s). Sistem lahko vzdržuje ali niha temperature v območju od 10 °C do 90 °C (ΔT = ± 0,1 °C), in relativno zračno vlažnost med 10% in 90% ($\Delta\varphi$ = ± 1%). Eksperimentalni del tega kanala predstavlja komora, dolžine 0,7 m, kjer so možne številne konfiguracije preizkušancev in merilne opreme.

Slika 13 Sušilni kanal TLS-01 z zaprtim tokokrogom zraka in namestitev preizkušancev v sušilni komori.

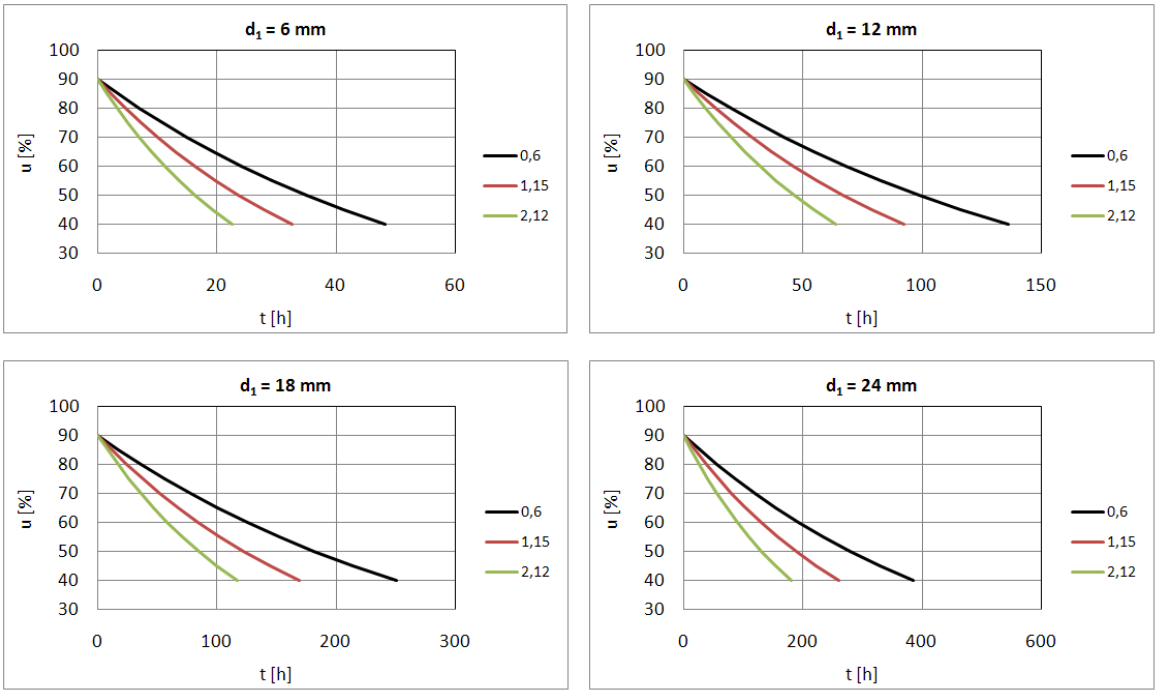
Pri sušenju šarže smo v sušilniku skozi celoten postopek sušenja vzpostavili konstantne pogoje, temperaturo 30 °C (± 0,2 ° C) in relativno vlažnost zraka 85% (± 1%). Hitrost zraka smo določili z anemometrom (Testo 435-4), 1 cm nad površino sušenja preizkušancev kot povprečje meritev in tako dobili tri hitrosti 0,6 m/s, 1,1 m/s in 2,1 m/s (± 0,1 m/s).

Preizkušance smo spremljali skozi celoten postopek sušenja s sprotnim odvzemom in kontrolo materiala. Interval odvzema je bil predhodno določen s teoretičnim izračunom časa sušenja (Kollmann, 1975) za posamezno debelino vzorca (Slika 14):

$$t = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \cdot \frac{u_z}{u_k} \cdot \frac{65}{T} \cdot \left(\frac{d}{25}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{1,5}{h}\right)^{0,6} \qquad \ldots(1)$$

kjer je,

α koeficient lesne vrste,
t čas [s],
u_z začetna vlažnost lesa [%],
u_k končna vlažnost lesa [%],
T temperatura [°C],
d debelina materiala [mm],
h hitrost kroženja zraka [m/s].



Slika 14 Teoretični izračun časa sušenja po debelini preizkušancev pri posamezni zračni hitrosti sušenja.

Kontrola spremljanja je vključevala tehtanje vzorcev pred, med in po končanem postopku sušenja z natančnostjo 0,001 g kot tudi izdelavo vlažnostnih profilov, iz katerih nam je bila razvidna porazdelitev vode pri posameznem preizkušancu po določenem časovnem intervalu.

Vlažnostni profili so bili izdelani destruktivno, z metodo razslojevanja (Slika 15), in sicer na rezine debeline 3 mm ob uporabi gravimetrične metode določanja lesne vlažnosti (SIST EN 13183-1).

Slika 15 Prikaz metode razslojevanja in sušenje v laboratorijskem sušilniku.

3.3 IZRAČUNI

Izmerjeno vlažnost preizkušancev med postopkom sušenja, kot tudi na zadnjem, 8 vzorcu v posamezni skupini, ki je služil kot kontrolni vzorec pri spremljanju in določevanju povprečne vsebnosti vlage, smo gravimetrično določevali pri 2 urnem intervalu (0,001g natančno). Uporabili smo enačbo:

$$u_t = \frac{m_t}{m_z}\left(u_z + 100\right) - 100 \qquad \ldots(2)$$

kjer je,

u_t, u_z - trenutna in začetna vlažnost [%]
m_t, m_z - trenutna in začetna masa sušečega vzorca [g]

Masni tok je bil izračunan med zaporednim odvzemom:

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{m_t - m_{t-1}}{A \cdot \Delta t}\left[\frac{g}{m^2 h}\right] \qquad \ldots(3)$$

kjer je,

$\dot{m}$ - masni tok [g/h],
m_t, m_{t-1} - masa zaporednih tehtanj vzorca pri izmerjenem časovnem interval (Δt),
A = 2.5 cm × 5.0 cm = 12.5 cm^2 - površina izhlapevanja sušečega vzorca.

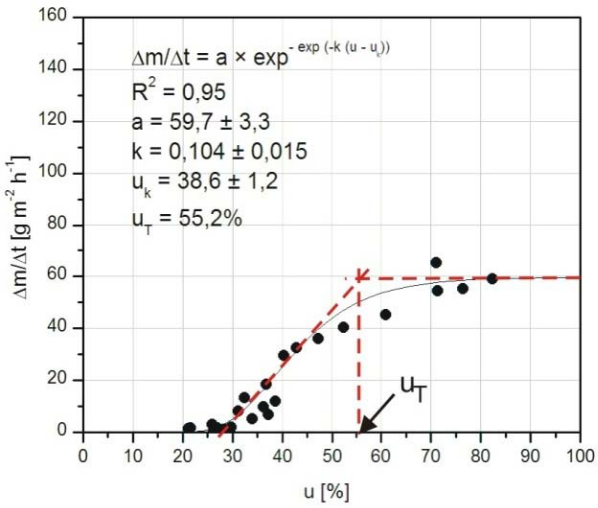
Prilagajanje masnega toka eksperimentalnim podatkom smo ovrednotili z Gompertz-ovo funkcijo. Ta se je izkazala za najustreznejšo zaradi asimetrične oblike. Iskali smo model, ki bi najbolj nazorno pokazal prehod med prevojno točko pri postopku sušenja. Naš namen je bil ugotoviti začetni masni tok (a) ter njegovo pojemanje s padanjem lesne vlažnosti.

$$\frac{\dot{m}}{A} = a \cdot e^{-e^{(-k(u-u_k))}}, \qquad \ldots(4)$$

kjer je:

a - asimptota funkcije oz. masni tok pri začetni, konstantni sušilni hitrosti [g m^{-2} h^{-1}],
k - pojemek masnega toka [1/%] ter
u_k - prevoj funkcije, vlažnost lesa u_k [%].

Prvi odvod funkcije po vlažnosti lesa ($a \cdot k/e$) v prevojni točki (u_k) smo uporabili za določitev enačbe tangente skozi prevojno točko u_k (Slika 16). Z določitvijo presečišča tangente skozi prevojno točko in asimptote (*a*), pa smo določili t.i. tranzicijsko vlažnost lesa (u_T). Pri tej vlažnosti pride do značilnega zmanjšanja masnega toka na zgolj 84% vrednosti začetnega, masnega toka (*a*). Sklepamo, da sušenje lesa pod to vlažnost ireverzibilno preide v območje padajoče sušilne hitrosti, kjer je v celoti odvisno od notranjega snovnega upora. Celotno obdelavo podatkov smo izvedli s programsko opremo OriginPro 8.0.



Slika 16 Analiza masnega toka vode: a – začetni masni tok vode, k – hitrost pojemanja masnega toka vode s padanjem povprečne lesne vlažnosti, u_k – prevoj funkcije, u_T – vlažnost ireverzibilnega prehoda v fazo padajoče sušilne hitrosti.

Vlažnostni gradient smo ugotavljali na vzorcih, ki smo jih pripravili z mikrotomom in razslojevanjem. Vlažnost posameznega sloja smo določali gravimetrično in izračunali vlažnostni gradient po enačbi:

$$\frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{u_{srednji} - u_{zunanji}}{\Delta x} \left[\frac{\%}{cm} \right] \qquad \ldots(5)$$

kjer je,

$\Delta u / \Delta x$ - vlažnostni gradient [% / cm]

$u_{srednji}$ - vlažnost srednjega sloja [%]

$u_{zunanji}$ - vlažnost zunanjega sloja [%]

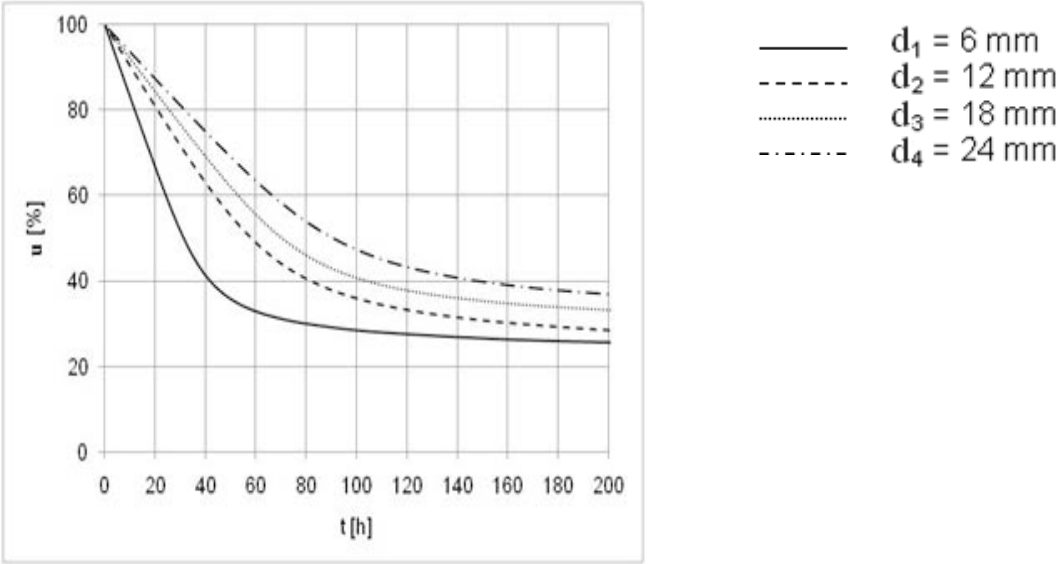
Δx - razdalja med zunanjim in srednjim slojem [cm]

4 REZULTATI

4.1 POTEK SUŠENJA LESA V ODVISNOSTI OD HITROSTI ZRAKA

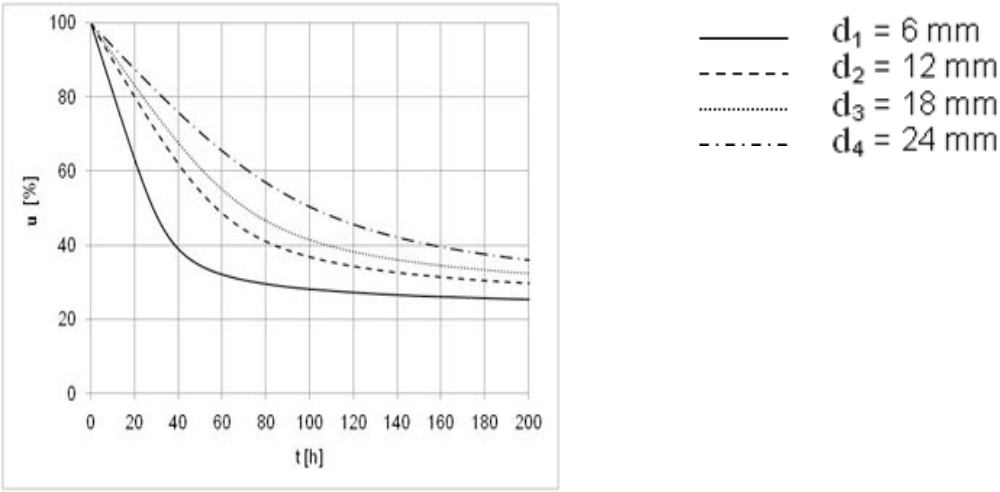
Pri hitrosti zraka 0,6 m/s (Slika 17) v komori, je pri najtanjšem vzorcu (d_1 = 6mm) vlažnost na začetku sušenja strmo a linearno padala s časom, vse do vlažnosti 53,5% (Preglednica 1). Vlažnost je padala počasneje pri debelejših vzorcih. Iz slike je razvidno, da smo pri enaki hitrosti zraka v sušilni komori dosegli različne čase sušenja elementov glede na debelino. Pri najnižji hitrosti zraka je bila sušilna hitrost odvisna od debeline materiala. Vlažnost 40% so najtanjši vzorci pri najnižji hitrosti gibanja zraka, torej 6 mm, dosegli po okoli 41 urah, 80 ur sušenja je bilo potrebno za debelino 12 mm, 105 ur za debelino 18 mm in približno 155 ur za vlažnost vzorcev pri debelini 24 mm.

Iz podatkov (Slika 17, Preglednica 1) je tudi razvidno, da je bil linearni del sušenja najdaljši pri najtanjših vzorcih in se je z debelino vzorcev zmanjševal oziroma se je vlažnost pri kateri je prehajal linearni del v pojemajočo sušilno hitrost, pojavila pri višjih vlažnostih.



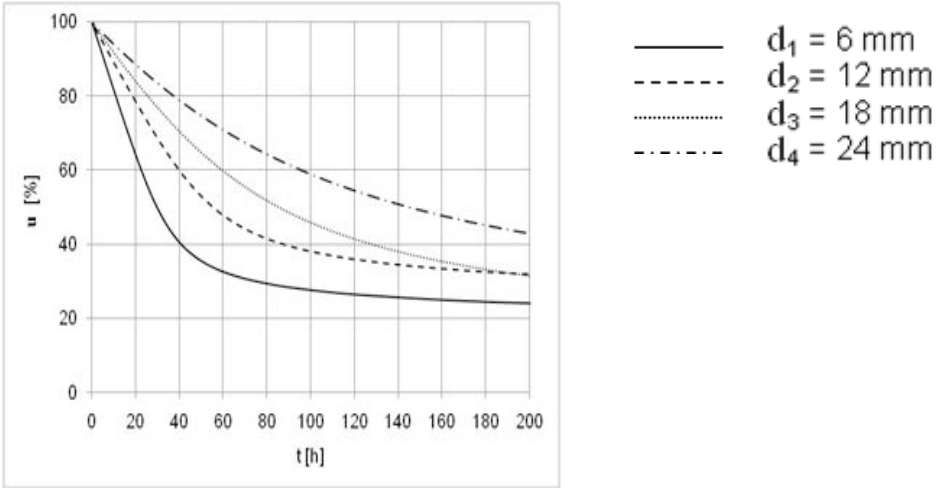
Slika 17 Sušilne krivulje bukovine pri hitrosti zraka h_1 = 0,6 m/s za vse debeline vzorcev.

Tudi pri hitrosti gibanja zraka 1,1 m/s (Slika 18) smo zaznali linearno pojemanje vlažnosti s časom, ki pa se pri najtanjšem vzorcu ustalila pri vlažnosti 60%. Če primerjamo rezultate časa sušenja pri hitrosti zraka 0,6 m/s in pri hitrosti 1,1 m/s (Slika 17 in Slika 18), lahko razberemo, da se je ob povečanju hitrosti sušenja minimalno dvignil tudi čas potreben za doseganje poprej omenjene vlažnosti 40%. Pri hitrosti 1,1 m/s je za najtanjše vzorce potrebnih nekoliko manj, 39 ur, za vzorce debeline 12 mm malo več, 82 ur, pri vzorcih debeline 18 in 24 mm pa je čas ostal nespremenjen, 105 in 155 ur.



Slika 18 Sušilne krivulje bukovine pri hitrosti zraka h_2 = 1,1 m/s za vse debeline vzorcev.

Povišanje hitrosti zraka na 2,1 m/s bistveno ni vplivala na linearni del sušenja najtanjših vzorcev na začetku (Slika 19). Ta se je končala pri nekoliko višji vrednosti od predhodnih in sicer pri vlažnosti 61%. Vpliv hitrosti zraka smo zaznali pri višji vlažnosti lesa glede na debelino vzorcev d_3 in d_4, ta se je v povprečju povečala za 17%. Posledično so se povečali časi sušenja posameznih vzorcev glede na debelino sušenja. Sušenje najtanjših, 6 mm vzorcev do povprečne vlažnosti 40% je potekalo 40 ur, debelino 12 mm smo osušili v 84 urah, za debelino 18 mm pa smo potrebovali bistveno več časa kot v predhodnih primerih, in sicer 125 ur. Še posebno so nas presenetili podatki, ki nam prikažejo krivuljo sušenja za debelino vzorca 24 mm, namreč ta doseže povprečno vlažnost 40% komaj po preteku več kot 200 ur.



Slika 19 Sušilne krivulje bukovine pri hitrosti zraka h_3 = 2,1 m/s za vse debeline vzorcev.

4.1.1 Masni tok vode iz lesa

Pri počasnem sušenju s hitrostjo zraka 0,6 m/s, je pri tankih vzorcih teoretični konstantni masni tok (u_T) trajal vse do vlažnosti 53,5%, pri hitrosti 1,1 m/s do 59,7% in pri 2,1 m/s do 60,9% (Preglednica 1, Priloga A, Slika 20). Pri debelini vzorcev 12 mm so te vlažnosti nekoliko višje, pri hitrosti zraka 0,6 m/s je bila vlažnost vzorcev 63,9%, pri hitrosti 1,1 m/s 67,4% in pri najvišji hitrosti, 2,1 m/s 74,4% vlažnost (Preglednica 1, Priloga A, Slika 20).

Večja ko je hitrost zraka, večji je začetni masni tok vode iz lesa. Ta se povečuje z debelino materiala in s hitrostjo pretoka zraka (Preglednica 1, Priloga A, Slika 20). Vzorci debeline 18 mm dosežejo pri najnižji hitrosti zraka 74,4% vlažnost ko se konstantni masni tok spremeni, pri hitrosti zraka 1,1 m/s 80,4% in pri hitrosti 2,1 m/s 92,3% vlažnost. Stopnja dviga vlažnosti do katere še zaznamo konstantni masni tok vode, pa je, kot že poprej omenjeno, največja pri najdebelejših vzorcih. Tako pri debelini vzorcev 24 mm zaznamo pojemanje sušenja pri hitrosti zraka 0,6 m/s 82,2% vlažnost, pri hitrosti 1,1 m/s 85,6% in 111,6% vlažnost pri najvišji hitrosti 2,1 m/s. Zadnja vrednost kaže, da se je pri največji hitrosti zraka pri debelih (d_4 = 24 mm) vzorcih že takoj na začetku sušenja vzpostavila difuzijska bariera. Teoretično izračunana vlažnost zaključenega konstantnega masnega toka je zato celo višja od napojitvene vlažnosti.

Razvidno je, da je bila faza dokaj konstantne sušilne hitrosti prisotna zgolj pri sušenju najtanjših preizkušancev (Slika 20, Preglednica 1, Priloga A), hkrati pa se je s povečevanjem hitrosti zraka krajšala. Pri večjih debelinah preizkušancev se ta faza zelo skrajša, vlažnost prehoda v izrazito padajočo sušilno hitrost (u_T), pa se viša. Pri debelejših preizkušancih (d_3, d_4) in višjih hitrostih zraka (2,1 m/s) je vlažnost prehoda praktično enaka začetni vlažnosti lesa, s čimer ni možen obstoj začetne konstantne sušilne hitrosti. V teh primerih, zaradi takojšnjega zmanjševanja masnega toka vode od samega začetka sušenja, obstaja velik variacijski razmik vlažnosti prehoda (u_T), kjer se izbran matematični model neposredno ne prilagaja dejanskemu eksperimentalnemu poteku sušenja. Izračunane vlažnosti prehoda (Preglednica 1) so v splošnem pri teh pogojih višje od dejanskih, ki bi jih dosegli z večjim številom ponovitev preizkušancev.

Preglednica 1 Maksimalen masni tok (a), vlažnost zaključka linearnega dela sušilne krivulje (u_T) in lesna vlažnost pri največjem pojemku hitrosti sušenja (u_k) v odvisnosti od debeline preizkušancev (d_1, d_2, d_3, d_4) in hitrosti gibanja zraka (h_1, h_2, h_3).

DEBELINA VZORCEV	h [m/s]	a [g/m^{2}h]	u_T [%]	u_k [%]
d_1= 6 mm	0,6	53,5	53,5	38,5
	1,1	59,7	54,9	38,9
	2,1	60,9	58,6	39,7
d_2= 12 mm	0,6	63,9	60,6	41,4
	1,1	67,4	63,5	43,2
	2,1	74,7	66,4	46,0
d_3= 18 mm	0,6	74,7	58,5	43
	1,1	80,4	66,8	43,5
	2,1	92,3	91,3	51,4
d_4= 24 mm	0,6	82,2	61,7	45,6
	1,1	85,6	81,6	46,9
	2,1	111,6	114,4	65,5

4.2 ODVISNOST MASNEGA TOKA VODE OD VLAŽNOSTI LESA

Pri vseh debelinah vzorcev smo začetno hitrost sušenja pospeševali s hitrostjo gibanja zraka. S povečevanjem gibanja hitrosti zraka smo dosegli višji začetni masni tok. Bolj ko smo dvigovali hitrost, bolj se je začetni masni tok povečeval (Slika 20, d_1 = 6 mm). Velikost masnega toka vode tako določa del naklona tangente na krivuljo, del pa je odvisen od vlažnostnega gradienta v preizkušancu.

V primeru tanjših vzorcev imamo dokaj dolgo dobo konstantnega sušenja, kjer dosežemo nizko vlažnost. Če pa uporabimo večje hitrosti sušenja, se točka prevoja premika proti višjim vlažnostim (Slika 20, d_1 = 6 mm).

Pri sušenju z majhno hitrostjo zraka smo dosegli masni tok 53,5 g/m^{2}h, ki je dolgo trajal. Sledil je hiter padec masnega toku in tako je prevoj dosegel pri 38,5% vlažnosti, pri čemer je bil pojemek masnega toka velik (Slika 20, d_1 = 6 mm). To pomeni, da je bil masni tok počasen a dolgotrajen vse do vlažnosti 53,5%, nato pa je začel hitro padati.

Dobljeni podatki so zadovoljivi, saj nam pokažejo, da v materialu ni bilo močnega vlažnostnega gradienta v začetku. Ker smo počasi sušili, ni bilo pogojev, da bi se ustvarile notranje vlažnostne razlike, pa tudi napetosti ni bilo, saj strmimo k čim daljšemu linearnemu delu sušenja.

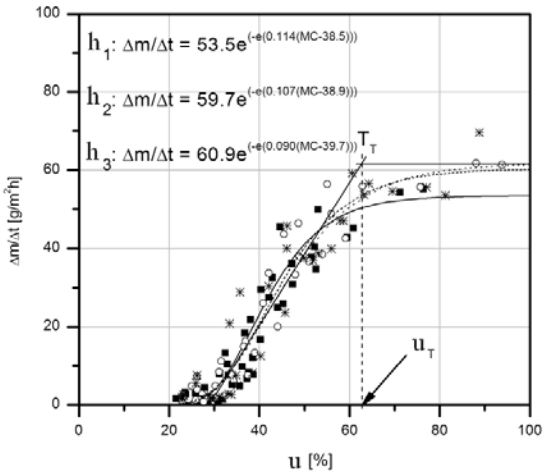
Pri večjih hitrostih zraka je čedalje manj linearnega dela sušenja. Pri večjih hitrosti linearnega dela praviloma ne zaznamo več. Torej domnevamo, da se je že na začetku sušenja vzpostavil vlažnostni gradient, posledica pa je, da se material na površini začne sušiti že na začetku sušenja zaradi prevelike hitrosti kroženja zraka.

Pri povečanemu pretoku zraka, se masni tok dvigne, krivulja postane bolj strma.

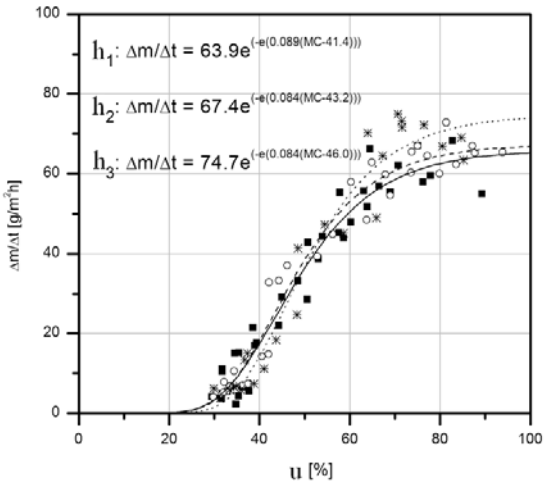
Pri sušenju vzorcev debelin 12 mm (Slika 20, 12 mm) imamo nekoliko krajšo dobo konstantnega sušenja, ki pa začne padati razmeroma hitro, točka prevoja pri teh pogojih pa je visoka.

Ugotovili smo, da je masni tok pri debelini 12 mm začel pojemati hitreje. Pojemek je bolj položen. To pomeni, da se je sušenje začelo upočasnjevati že takoj na začetku. S povečevanjem hitrosti zraka smo dosegli nekoliko višji masni tok vode od predhodnega, vendar se je ta pričel hitro zmanjševati. Prevojna točka je posledično višje, masni tok ves čas pojema, linearni del pa je le še delno opazen.

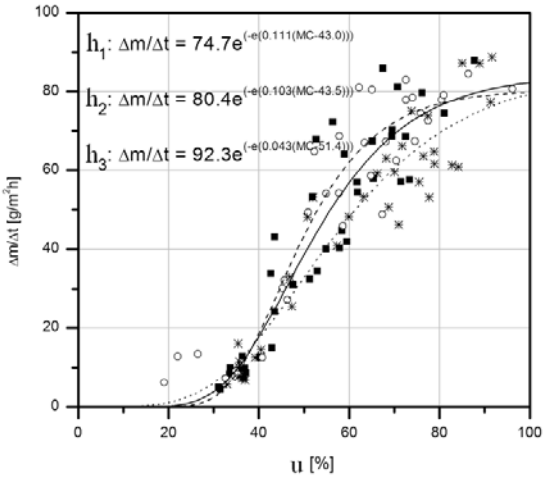
d_1 =6 mm



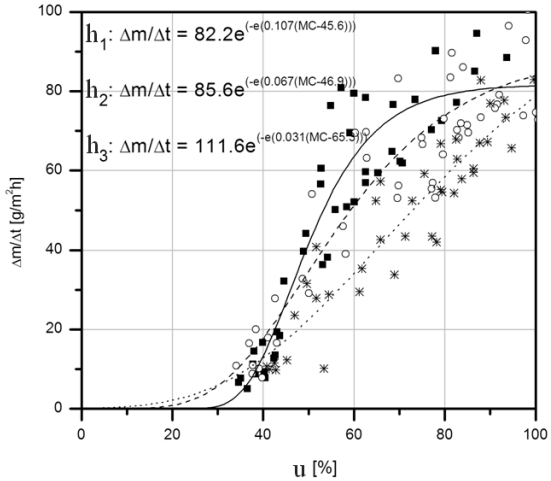
d_2 =12 mm



d_3 =18 mm



d_4 =24 mm



Slika 20 Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine, različnih debelin (d_1 = 6 mm, d_2 = 12 mm, d_3 = 18 mm, d_4 = 24 mm), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih zraka (h_1 = 0,6 m/s, h_2 = 1,1 m/s, h_3 = 2,1 m/s).

Če analiziramo debelejše vzorcih (Slika 20, 18 mm), lahko ugotovimo, da konstantnega začetnega sušenja v nekaterih primerih skoraj da ni več, še posebno, če uporabimo višje hitrosti zraka. Faza padajoče sušilne hitrosti se začne že na začetku sušilnega postopka, kar je posledica višjega masnega toka in še hitrejšega pojemanja.

Večja kot je debelina vzorca, bolj se prevojna točka premika v desno (Slika 20, 24 mm) oziroma se spreminja vlažnost v kateri preide sušenje v zelo nizek masni tok vode. Točka prevoja se pravzaprav pomika proti zelo visokim vlažnostim.

4.3 VPLIV HITROSTI SUŠENJA NA VLAŽNOSTNI GRADIENT

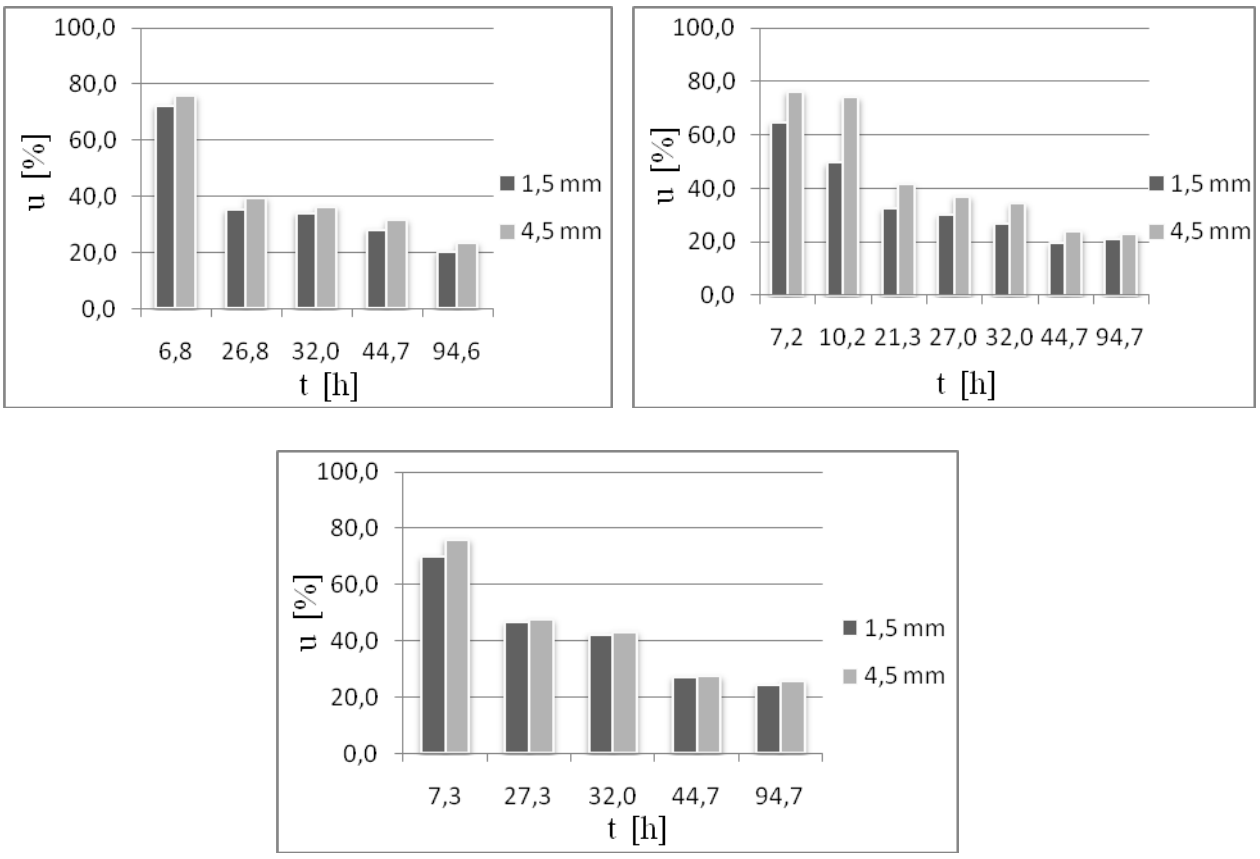
Z grafi (Slika 21, Slika 22), lahko pojasnimo, zakaj se je sušilna hitrost postopoma zmanjševala. Že takoj po prvem odvzemu, je vlažnost površinskega sloja padla na približno 45%, ko so imeli notranji sloji še visoko vlažnost. Če pa primerjamo vzorce z naslednjimi odvzemi, pri daljšem času sušenja vidimo, da se površinski sloji vzorcev od notranjih razlikujejo za približno 5% (Priloga B, Priloga C, Priloga D, Priloga E).

Pri debelejših preizkušancih je bil površinski sloj lesa že na samem začetku zelo suh (Slika 22), kar je povzročilo velik gradient, še posebej izrazit tik pod površino lesa. Torej smo že na začetku uporabili preoster režim sušenja, kar je vplivalo na počasnejše izhlapevanje vode iz notranjosti. Pri vseh vzorcih se je površinski sloj zelo hitro osušil, notranjost pa je ostala bolj vlažna. Pri majhni debelini lesa (d_1, d_2) je površinski vlažnostni gradient kljub vsemu manjši, kot pa pri večjih debelinah (d_3, d_4), če ga primerjamo v enakem časovnem intervalu. Hkrati pa je očitno, da stopnjevanje hitrosti gibanja zraka povečuje tudi vlažnostni gradient tik pod površino, še najbolj očitno na samem začetku sušenja (Preglednica 2, Priloga B, Priloga C, Priloga D, Priloga E). Najmanjši vlažnostni gradient smo tako dosegli pri najnižji hitrosti zraka (h_1), torej pri najmanjšem začetnem masnem toku vode. Stopnjevanje hitrosti zraka pa je povzročilo povečevanje površinskega vlažnostnega gradienta, kjer pa se je pri sušenju z največjo hitrostjo zraka (h_3 = 2,1 m/s) v lesu ustvarila tudi t.i. podpovršinska difuzijska bariera.

Preglednica 2 Odvisnost vlažnostnega gradienta ($\Delta u/\Delta x$) na globini 3 mm (x_2-x_1), x_1 = 1,5 mm, x_2 = 4,5 mm) pri sušenju bukovih preizkušancev, debelin (d_1 = 6 mm, d_2 = 12 mm, d_3 = 18 mm, d_4 = 24 mm), od hitrosti gibanja zraka (h_1 = 0,6 m/s, h_2 = 1,1 m/s, h_3 = 2,1 m/s) in časa odvzema.

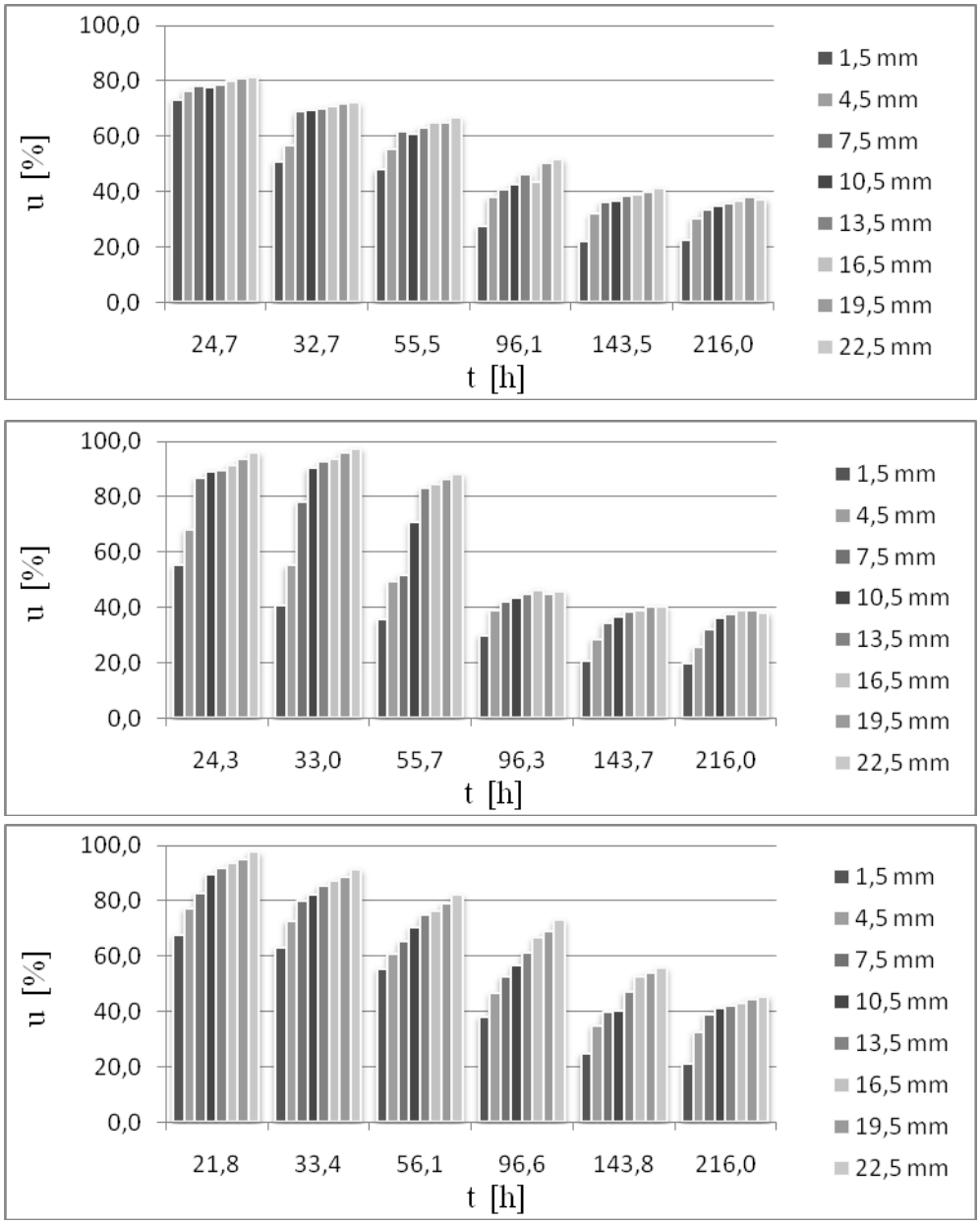
d_1 = 6 mm		Odvzem						
vl. gradient	hitrost	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta u/\Delta x$ (%/cm)	h_1	1,2	1,4	0,7	1,2	1,1		
	h_2	3,8	8,2	3	2,2	2,5	1,5	0,5
	h_3	2	0,3	0,3	0,1	0,5		
d_2 = 12 mm								
$\Delta u/\Delta x$ (%/cm)	h1	2,6	4,5	2,4	2,1	4,5	1,4	2,3
	h_2	2,2	2,3	0,9	2,4	3	2,2	
	h_3	3,7	3,9	0,6	2	1,3	2,6	
d_3 = 18 mm								
$\Delta u/\Delta x$ (%/cm)	h1	4,4	2,7	4,9	3,2	3,7	4,2	4,7
	h_2	4,2	3,8	2,8	1,2	0,8	2,7	
	h_3	4,1	3,2	1,2	4,9	1,8	2,9	
d_4 = 24 mm								
$\Delta u/\Delta x$ (%/cm)	h1	1,1	1,9	2,5	3,5	3,3	2,6	
	h_2	4,3	4,8	4,5	3	2,6	2	
	h_3	3,3	3,2	1,8	2,8	3,4	3,7	

Pri tankih vzorcih (Slika 21) je vlažnostna razlika med zunanjim in notranjim slojem več ali manj zelo podobna pri vseh hitrostih. Razlika vlažnosti je približno 5% in je odvisna tudi od začetne vlažnosti posameznega vzorca. Predvsem pa je površina tankih vzorcev na začetku sušenja visoka, nad 60, 70%, nikoli pa pod 50%.



Slika 21 Porazdelitev vlažnosti po prerezu bukovih preizkušancev debeline 6 mm na globini x_1 = 1,5 mm in x_2 = 4,5 mm v odvisnosti od časa sušenja (t), pri različnih hitrostih gibanja zraka (h_1 = 0,6 m/s (zgoraj-levo), h_2 = 1,1 m/s (zgoraj-desno) in h_3 = 2,1m/s (spodaj).

Pri sušenju debelejših preizkušancev (d_4 = 24 mm) (Slika 22) je pri majhni hitrosti zraka (h_1, h_2) padec vlažnosti površinskega sloja primerljiv s spremembo vlažnosti pri tanjših vzorcih. S preučevanjem hitrosti zraka (h_3) se pri debelejših preizkušancih (d_4) površinski sloj suši hitreje, kar povzroči večji vlažnostni gradient in dodatni difuzijski upor. Posledično se sušilna hitrost zmanjša.



Slika 22 Porazdelitev vlažnosti pri preizkušancih iz bukovine debeline 24 mm pri različnih sušilnih hitrostih, h_1 = 0.6 m/s (zgoraj), h_2 = 1,1 m/s (sredina) in h_3 = 2,1m/s (spodaj) ob različnih časovnih intervalih.

5 RAZPRAVA

Perre in Turner (2001) ugotavljata, da je obstoj začetnega konstantnega masnega toka malo verjeten, večinoma prisoten zgolj pri nizkotemperaturnem sušenju. Ker je naš eksperimentalen proces sušenja temeljil na konvektivnem transportu vode iz lesa pri nizko temperaturnih pogojih, lahko njihove trditve podpremo, hkrati pa dodamo, da se čas konstantnega masnega toka spreminja tudi z debelino materiala in z spreminjanjem hitrosti zraka sušenja.

Straže in Gorišek (2007) ugotavljata tudi, da se lahko konstantni začetni masni tok pojavlja tudi pri sušenju na prostem, kot v primeru počasnejšega sušenja. Naši rezultati prav tako nakazujejo, da počasno sušenje dejansko povzroči konstantni masni tok vode iz lesa, kar je razvidno iz grafov predstavljenih v rezultatih (Slika 20).

Trditev, da se voda iz notranjosti, kjer je vlažnost še nad TNCS, giblje preko osušene površine kot difuzijski tok vezane vode (Perre in sod., 1993; Perre in Martin, 1994) drži. To lahko potrdimo s pridobljenimi rezultati, ki nakazujejo počasnejše izhlapevanje vode s površine zaradi preostrega začetnega režima sušenja, ko smo sušili debelejše vzorce z intenzivnejšim prepihovanjem, kar potrjujejo tudi nekateri drugi raziskovalci (Hukka in Oksanen, 1999; Tremblay in sod., 2000; Remond in sod., 2005).

Izkazalo se je, da če se povprečna vlažnost vrhnjega sloja zmanjšuje do točke nasičenja, se gradient povečuje od površine proti sredini vzorca, čeprav je vlažnost sredine daleč nad točko nasičenja celičnih sten (Slika 21, Slika 22). Posledično se postopek sušenja podaljša, prosta voda ostane pod osušenim slojem lesa, vlažnostni in napetostni gradienti pa se povečajo (Hunter, 2002), ker je potrebno preostalo vodo izločiti difuzijsko.

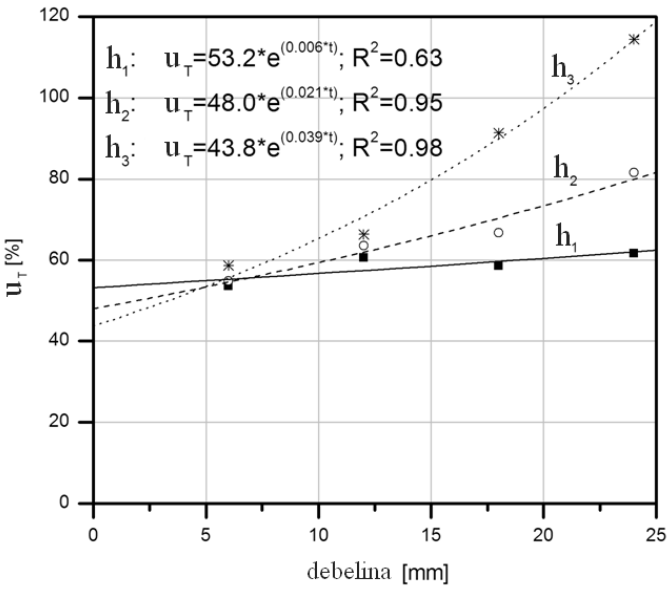
Poleg tega rezultati nakazujejo, da se na površini tvori sloj suhe lupine z velikim gradientom in to kmalu po začetku sušenja, čeprav je povprečna vlažnost nad točko nasičenja.

Vlažnost površine bo padla pod TNCS, s tem se zmanjša sušilnost, vlažnost celotnega vzorca pa je lahko daleč nad točko nasičenja.

Iz rezultatov je razvidno, da vlažnost površinskega sloja pade na nizko vrednost že takoj na začetku sušenja (Slika 21, Slika 22). To pa je tudi razlog, da se nam kasneje tvori velik gradient vlažnosti. Če dvigujemo hitrost sušenja v sušilni komori, nastaja ostrejši, večji vlažnostni gradient. Vzpostavi se močnejši gradient po debelini, predvsem pri debelejših vzorcih, kar pa pri tanjših vzorcih ni opazno. Vlažnost površinskega sloja pri tanjših vzorcih vselej ostane visoka, okoli 60%.

Graf prikazuje prevojne točke (Slika 23), ki so bile povzete po predhodnih modelih, pri treh različnih hitrostih zraka v sušilni komori 0,6 m/s, 1,1 m/s in 2,1 m/s (Slika 20). Kot lahko vidimo, nizka hitrost zraka ne vpliva na prevojno točko. Če pa uporabimo večje hitrosti zraka pri teh pogojih, se prehod med konstantno in padajočo stopnjo sušenja začne pri zelo veliki vlažnosti, ki pa je posledično odvisna tudi od debeline materiala.
Tranzicijska vlažnost (u_T) je vlažnost prehoda iz začetnega masnega toka vode v padajočega. Vrednosti v prevoju se pri nizkih hitrostih zraka pomikajo k nižji vlažnosti lesa, pri višjih pa vrednosti tranzicijske vlažnosti naraščajo.

Če je nizka hitrost zraka na začetku, se tranzicija oziroma sprememba iz konstantnega masnega toka oziroma s konstantne sušilne hitrosti v padajočo, zgodi pri višji vlažnosti lesa.



Slika 23 Prikaz prehoda med konstantno in padajočo stopnjo sušenja šarže pri hitrosti zraka 0,6 m/s (h_1), 1,1 m/s (h_2) in 2,1 m/s (h_3).

6 SKLEPI

Osnovne eksperimentalne ugotovitve pri konvekcijskem sušenju bukovine (*Fagus sylvatica* L.):

- Prisotni sta dve stopnji sušenja, navidezno konstantna in padajoča, ki pa sta odvisni od debeline materiala in pa od hitrosti sušilnega zraka v komori. Kot smo predvidevali, smo dosegli najdaljše navidezno sušenje pri zelo nizkih hitrostih zraka in tako dosegli učinkovit masni tok do najnižjih vlažnosti.

- Teoretično se vlažnost prehoda iz faze konstantne v fazo padajoče sušilne hitrosti povečuje tako z debelino lesa kot tudi z naraščanjem hitrosti kroženja zraka.

- Pri tanjših vzorcih je sprejemljivo povečanje hitrosti zraka. Pri vzorcih večje debeline se ob povečanju hitrosti zraka razlike masnega toka in naklona povečajo. To pomeni, da že zelo hitro vplivamo na zmanjševanje masnega toka vode, ki že od samega začetka sušenja pada hitreje.

- Pri nizki vlažnosti zraka se prevoj v fazo padajoče sušilne hitrosti zgodi pri nižji povprečni vlažnosti lesa. S tem pa se podaljša začetna faza konstantne sušilne hitrosti.

- Večja hitrost sušenja v sušilni komori povzroči večji vlažnostni gradient, tik pod površino preizkušancev. Največji vlažnostni gradient se vzpostavi pri najdebelejših preizkušancih.

- Kot smo pričakovali, je sušenje lesa odvisno od pogojev sušenja, debeline materiala in njegove vlažnosti. Hitrost gibanja zraka značilno vpliva na hitrost izločanja proste vode in se z naraščanjem debeline preizkušancev zmanjšuje.

- Menimo, da je potrebno nadzorovati začetno stopnjo sušenja s spremljanjem masnega toka vode iz lesa. V primeru značilnega pojemanja masnega toka vode pri visoki povprečni lesni vlažnosti, lahko le to upočasnimo z zmanjševanjem hitrosti gibanja zraka.

7 VIRI

Bolton A.J., Petty J.A. 1978. The relationship between axial permeability of wood to dry air and to a non polar solvent. Wood Science and Technology, 12: 111-126

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

Cai L., Avramidis S. 1993. A study on the separation of diffusion and surface emission coefficients in wood. Drying Technology, 15: 1457-1473

Chong E. T. 1963. Movement of moisture through a softwood in the hygroscopic range. Forest Products Journal 13: 489-498

Choong E.T., Tesoro F.O., Manwiller F.G. 1974. Permeability of twenty-two small diameter hardwoods growing on southern pine sites. Wood and Fiber, 6: 91-101

Comstock G.L. 1967. Longitudinal permeability of wood to gases and nonswelling liquids. Forest Products Journal, 17: 41-46

Comstock G.L. 1970. Directional permeability of softwoods. Wood and Fiber, 1: 283-289

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. Tehnično sušenje, Korak, 6

Gorišek Ž., Straže A., Ribič I. 2000. Numerical evaluation of beechwood discolouration during drying. Drvna Industrija, 51: 59-68

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

Hukka A. 1999. The effective diffusion coefficient and mass transfer coefficient of Nordic softwoods as calculated from direct drying experiments. Holzforschung, 53: 534-540

Hunter A.J. 2002. Movement in a board of impermeable wood during drying. Wood Science and Technology, 36: 27-40

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

Kang Ho-Yang 1997. Temperature effect in diffusion coefficient. Wood and fiber science, 4: 325-332

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

Kollmann F. 1975. Principles of wood science and technology. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag: 703 str.

Kowalski S.J., Rybicki A. 2007. Residual stresses in dried bodies. Drying Technology, 25: 629-637

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

Perre P. 2004. Evidence of a dual scale porous mechanismus during fluid migration in hardwood species. Part 2. A dual scale computational model able to describe the experimental results. Chinese Journal of Chemical Engineering, 12: 783-791

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

Perre P., Martin M. 1994. Drying at high temperature of heartwood and sapwood: theory, experiment and practical consequence of kiln control. Drying Technology, 12: 1915-1941

Perre P., Moser M., Martin M. 1993. Advances in transport phenomena during convective drying with superheated steam or moist air. International Journal of Heat and Mass Transfer, 36: 2725-2746

Perre P., Turner I. 2001. Determination of the material property variations across the growth ring of softwood for use in the heterogeneous drying model. Part 1: Capillary pressure, tracheid model and absolute permeability. Holzforschung, 55: 318-323

Petty J.A., Puritsch G.S. 1970. The effects of drying on the structure and permebility of the wood of Abies grandis. Wood Science and Technology, 4: 140-154

Remond R., Perre P., Mougel E. 2005. Using the concept of thin dry layer to explain the evolution of thickness, temperature and moisture content during convective drying of Norway spruce boards. Drying Technology, 23: 249-271

Rosen H.N. 1978. The influence of external resistance on moisture adsorption rates in wood. Wood and Fiber, 10: 218-228

Rosenkilde A., Glover P. 2002. High resolution measurement of the surface layer moisture content during drying of wood using a Novel magnetic resonance imaging technique. Holzforschung, 56: 312-317

Salin J.G. 2007. External heat and mass transfer. V: Fundamentals of wood drying. Perre P. (ur). Nancy, A.R.BO.LOR.: 175-201

Salin J.G. 2008a. Almost all wooden pieces have a damaged surface layer - impact on some properties and quality. V: COST E53 Conference 'Quality control for wood and wood products', Delft, 29-30 Oct. 2008. Gard W.F. (ur). Delft, Delft University of Technology: 135-143

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

Siau J.F. 1995. Wood: Influence of moisture on physical properties. Blacksburg, Department of wood science and forest products. Virginia polytechnic institute and State University: 227 str.

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

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

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

Straže A., Gorišek Ž. 2007. CAE analiza in optimizacija porabe energije pri sušenju žaganega lesa z uvedbo predsušenja na prostem. Les, 59: 142-148

Šifrar U. 2009. Vpliv transpiracijskega sušenja na spremembe barve bukovine med komorskim sušenjem. Višješolska diplomska naloga. Ljubljana, BF, Oddelek za lesarstvo: 82 str.

Tremblay C., Cloutier A., Fortin Y. 2000. Experimental determination of the convective heat and mass transfer coefficients for wood drying. Wood Science and Technology, 34: 253-276

Walker J.C.F., Butterfield B.G., Langrish T.A.G., Harris J.M. and Uprichard J.M. (1993). Primary wood processing. London, Chapman and Hall. 595 str.

Wiberg P., Moren T.J. 1999. Moisture flux determination in wood during drying above fiber saturation point using CT-scanning and digital imaging processing. Holz als Roh- und Werkstoff, 57: 137-144

ZAHVALA

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

Prof. dr. Milanu Šerneku se zahvaljujem za recenzijo diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi podjetju LIKO Vrhnika, ki mi je omogočilo nadaljevati študij in se tako dodobra pripraviti na nadaljnje izzive ter vsem zaposlenim, ki so kakorkoli pomagali.

Prav tako se zahvaljujem vsem svojim najbližjim za podporo in potrpežljivost. Hvala vsem, ki ste mi pomagali in me spodbujali pri izdelavi diplomske naloge.

PRILOGE

Priloga A Vrednosti koeficientov v modelu masnega toka vode (Enačba 4) (a - začetni masni tok, u_k - prevoj funkcije, k - hitrost pojemanja masnega toka, dm/dt_k – masni tok v prevojni točki (u_k), u_T - vlažnost prehoda iz faze konstantne v fazo padajoče sušilne hitrosti) v odvisnosti od hitrosti zraka nad površino lesa (h_1 = 0,6 m/s, h_2 = 1,1 m/s, h_3 = 2,1 m/s).

h_1	**0,6**	**m/s**		
Debelina [mm]	6	12	18	24
a	53,5	63,9	74,7	82,6
k	0,114	0,089	0,111	0,107
u_k	38,5	41,4	43,1	45,6
dm/dt_k	19,7	23,5	27,5	30,4
u_T	**53,5**	**60,6**	**58,5**	**61,7**

h_2	**1,1**	**m/s**		
Debelina [mm]	6	12	18	24
a	59,7	67,4	82,4	89,9
k	0,107	0,085	0,080	0,053
u_k	38,9	43,2	45,3	49,1
dm/dt_k	22,0	24,8	30,3	33,1

h_3	**2,12**	**m/s**		
Debelina [mm]	6	12	18	24
a	61,0	74,7	92,3	111,6
k	0,091	0,084	0,043	0,032
u_k	39,7	46,0	51,4	65,3
dm/dt_k	22,4	27,5	34,0	41,0

Priloga B Povprečne vlažnosti (u_p) in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx), debeline 6 mm (d_1), ter površinski vlažnostni gradient (x_2 - x_1) – med 1. in 2. slojem.

h_1							
d_1 = 6 mm							
Odvzem	1	2	3	4	5	6	7
Δx [mm] \ t [h]	6,8	26,8	32,0	44,7	94,6		
1,5	72,4	35,3	34,1	28,1	20,3		
4,5	75,9	39,4	36,2	31,6	23,5		
$\Delta u/\Delta x$ (x_2-x_1)	1,2	1,4	0,7	1,2	1,1		
u_p	**74,1**	**37,3**	**35,1**	**29,9**	**21,9**		
h_2							
d_1 = 6 mm							
Odvzem	1	2	3	4	5	6	7
Δx [mm] \ t [h]	7,2	10,2	21,3	27,0	32,0	44,7	94,7
1,5	64,7	49,5	32,4	30,3	26,7	19,7	21,2
4,5	76,2	74,0	41,4	37,0	34,2	24,1	22,7
$\Delta u/\Delta x$ (x_2-x_1)	3,8	8,2	3,0	2,2	2,5	1,5	0,5
u_p	**70,5**	**61,7**	**36,9**	**33,6**	**30,5**	**21,9**	**21,9**
h_3							
d_1 = 6 mm							
Odvzem	1	2	3	4	5	6	7
Δx [mm] \ t [h]	7,3	27,3	32,0	44,7	94,7		
1,5	70,0	46,7	42,3	27,1	24,1		
4,5	76,0	47,6	43,2	27,3	25,7		
$\Delta u/\Delta x$ (x_2-x_1)	2,0	0,3	0,3	0,1	0,5		
u_p	**73,0**	**47,1**	**42,8**	**27,2**	**24,9**		

Priloga C Povprečne vlažnosti (u_p) in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx), debeline 12 mm (d_2), ter površinski vlažnostni gradient (x_2 - x_1) – med 1. in 2. slojem.

h_1							
d_2 = 12 mm							
Odvzem	1	2	3	4	5	6	7
Δx [mm] \ t [h]	9,8	21,0	28,0	34,7	43,7	56,4	94,8
1,5	45,6	50,3	48,1	47,1	23,2	23,6	25,1
4,5	53,5	64,0	55,3	53,5	36,7	27,8	31,9
7,5	55,0	71,5	58,9	55,0	41,5	38,7	35,4
10,5	58,1	78,4	64,8	58,1	41,4	35,6	36,3
$\Delta u/\Delta x$ (x_2-x_1)	2,6	4,5	2,4	2,1	4,5	1,4	2,3
u_p	**53,1**	**66,1**	**56,8**	**53,4**	**35,7**	**31,4**	**32,2**
h_2							
d_2 = 12 mm							
Odvzem	1	2	3	4	5	6	7
Δx [mm] \ t [h]	23,4	28,3	35,0	44,1	56,5	94,9	
1,5	49,1	45,2	47,1	28,4	26,5	22,3	
4,5	55,6	52,0	49,9	35,5	35,4	28,9	
7,5	62,2	56,0	50,5	37,0	37,7	33,3	
10,5	72,8	59,7	51,9	39,2	38,6	34,8	
$\Delta u/\Delta x$ (x_2-x_1)	2,2	2,3	0,9	2,4	3,0	2,2	
u_p	**59,9**	**53,2**	**49,9**	**35,0**	**34,6**	**29,8**	
h_3							
d_2 = 12 mm							
Odvzem	1	2	3	4	5	6	7
Δx [mm] \ t [h]	23,3	28,7	34,2	44,3	56,6	95,0	
1,5	67,4	66,0	60,5	48,3	38,6	24,4	
4,5	78,5	77,5	62,2	54,4	42,6	32,1	
7,5	83,9	79,8	70,9	58,3	43,3	36,0	
10,5	89,2	84,3	75,4	62,9	44,8	37,5	
$\Delta u/\Delta x$ (x_2-x_1)	3,7	3,9	0,6	2,0	1,3	2,6	
u_p	**79,8**	**76,9**	**67,3**	**56,0**	**42,3**	**32,5**	

Priloga D Povprečne vlažnosti (u_p) in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx), debeline 18 mm (d_3), ter površinski vlažnostni gradient (x_2 - x_1) – med 1. in 2. slojem.

h_1							
d_3 = 18 mm							
Odvzem	1	2	3	4	5	6	7
Δx [mm] \ t [h]	10,0	21,2	29,0	33,8	55,0	95,2	143,0
1,5	62,3	55,5	48,1	45,2	37,4	25,5	13,8
4,5	75,6	63,7	62,8	54,9	48,4	38,1	27,9
7,5	84,3	73,7	88,5	71,2	50,2	40,9	31,9
10,5	88,6	81,2	95,5	88,8	48,8	41,3	34,3
13,5	91,4	87,6	97,1	88,2	50,1	42,6	35,0
16,5	88,3	88,7	98,3	89,6	47,4	41,2	34,7
$\Delta u/\Delta x$ (x_2-x_1)	4,4	2,7	4,9	3,2	3,7	4,2	4,7
u_p	**81,7**	**75,1**	**81,7**	**73,0**	**47,1**	**38,3**	**29,6**
h_2							
d_3 = 18 mm							
Odvzem	1	2	3	4	5	6	7
Δx [mm] \ t [h]	23,8	29,3	34,1	55,1	95,4	143,2	
1,5	47,5	44,3	45,0	47,8	35,4	18,8	
4,5	60,1	55,7	53,3	51,4	37,9	26,9	
7,5	80,4	72,9	61,6	51,9	41,0	31,1	
10,5	88,1	84,9	82,0	52,8	42,1	33,2	
13,5	89,5	85,4	83,6	54,1	43,5	35,1	
16,5	91,4	86,9	84,7	55,6	45,2	35,0	
$\Delta u/\Delta x$ (x_2-x_1)	4,2	3,8	2,8	1,2	0,8	2,7	
u_p	**76,2**	**71,7**	**68,4**	**52,3**	**40,8**	**30,0**	
h_3							
d_3 = 18 mm							
Odvzem	1	2	3	4	5	6	7
Δx [mm] \ t [h]	23,7	29,6	34,3	55,2	95,6	143,3	
1,5	65,1	64,8	63,6	39,6	33,9	18,3	
4,5	77,5	74,3	67,1	54,2	39,3	27,0	
7,5	83,4	85,5	81,9	63,5	43,3	31,0	
10,5	87,0	87,7	87,7	75,5	45,4	32,8	
13,5	88,4	88,2	88,7	76,4	47,2	34,5	
16,5	90,1	89,7	89,5	78,2	49,1	34,9	
$\Delta u/\Delta x$ (x_2-x_1)	4,1	3,2	1,2	4,9	1,8	2,9	
u_p	**81,9**	**81,7**	**79,7**	**64,6**	**43,1**	**29,7**	

Priloga E Povprečne vlažnosti (u_p) in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx), debeline 24 mm (d_4), ter površinski vlažnostni gradient (x_2 - x_1) – med 1. in 2. slojem.

h_1							
d_4 = 24 mm							
Odvzem	1	2	3	4	5	6	7
Δx [mm] \ t [h]	24,7	32,7	55,5	96,1	143,5	216,0	
1,5	73,1	50,9	47,9	27,4	21,9	22,5	
4,5	76,4	56,7	55,4	37,8	31,9	30,3	
7,5	77,9	68,8	61,5	40,7	36,1	33,4	
10,5	77,8	69,4	60,8	42,4	36,8	34,8	
13,5	78,6	70,0	63,2	46,4	38,2	35,9	
16,5	79,8	70,7	64,7	43,3	39,0	36,7	
19,5	80,7	71,6	65,1	50,2	39,6	38,1	
22,5	81,5	72	66,6	51,7	41,0	37,1	
$\Delta u/\Delta x$ (x_2-x_1)	1,1	1,9	2,5	3,5	3,3	2,6	
u_p	**78,2**	**66,3**	**60,7**	**42,5**	**35,6**	**33,6**	

h_2							
d_4 = 24 mm							
Odvzem	1	2	3	4	5	6	7
Δx [mm] \ t [h]	24,3	33,0	55,7	96,3	143,7	216,0	
1,5	55,3	40,8	35,5	30,0	20,7	19,6	
4,5	68,2	55,1	49,2	39,0	28,5	25,7	
7,5	86,9	78,2	51,7	42,0	34,3	32,1	
10,5	89,2	90,4	71,0	43,3	36,4	35,9	
13,5	89,4	92,5	83,0	44,7	38,5	37,7	
16,5	91,5	93,5	84,6	46,3	38,9	38,8	
19,5	93,4	96,1	86,5	44,7	40,4	38,8	
22,5	96,1	97,4	88,1	45,8	40,3	38,1	
$\Delta u/\Delta x$ (x_2-x_1)	4,3	4,8	4,5	3,0	2,6	2,0	
u_p	**83,7**	**80,5**	**68,7**	**42,0**	**34,8**	**33,3**	

h_3							
d_4 = 24 mm							
Odvzem	1	2	3	4	5	6	7
Δx [mm] \ t [h]	21,8	33,4	56,1	96,6	143,8	216,0	
1,5	67,4	63,1	55,4	38,1	24,7	21,3	
4,5	77,2	72,8	60,8	46,7	35,0	32,5	
7,5	82,8	80,0	65,3	52,6	39,6	39,1	
10,5	89,5	82,4	70,5	56,6	40,2	41,3	
13,5	91,8	85,6	74,8	61,4	47,2	42,1	
16,5	93,5	87,1	76,3	66,6	52,8	43,2	
19,5	95,0	88,7	79,1	69,0	53,9	44,5	

22,5	97,6	91,2	82,1	72,9	55,6	45,4	
$\Delta u/\Delta x$ (x_2-x_1)	3,3	3,2	1,8	2,8	3,4	3,7	
u_p	**86,8**	**81,4**	**70,5**	**58,0**	**43,6**	**38,7**	