

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Primož TOMEĆ

**DIFUZIVNOST NARAVNE IN TOPLOTNO  
OBDELANE BUKOVINE**

MAGISTRSKA NALOGA

Magistrski študij – 2. stopnja

Ljubljana, 2015

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Primož TOMEĆ

**DIFUZIVOST NARAVNE IN TOPLITNO OBDELANE BUKOVINE**

MAGISTRSKA NALOGA  
Magistrski študij – 2. stopnja

**DIFFUSIVITY OF NATURAL AND HEAT TREATED BEECH WOOD**

M. SC. THESIS  
Master Study Programmes

Ljubljana, 2015

Magistrska naloga je zaključek Magistrskega študija lesarstvo – 2. stopnja. Delo je bilo opravljeno na katedri za Tehnologijo lesa, Oddelka za lesarstvo, Biotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani.

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:

Podpisani izjavljam, da je naloga rezultat lastnega raziskovalnega dela. Izjavljam, da je elektronski izvod identičen tiskanemu. Na univerzo neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravici shranitve avtorskega dela v elektronski obliki in reproduciranja ter pravico omogočanja javnega dostopa do avtorskega dela na svetovnem spletu preko Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete.

.

Primož Tomec

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Du2
DK	UDK 630*812.141
KG	difuzivnost/topotna obdelava/bukovina
AV	TOMEĆ, Primož
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	2015
IN	DIFUZIVNOST NARAVNE IN TOPOTNO OBDELANE BUKOVINE
TD	Magistrska naloga (Magistrski študij – 2. stopnja)
OP	IX, 64 str., 6 pregл., 33 sl., 54 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Difuzivnost je najpomembnejša karakteristika lesa, ki določa hitrost dimenzijskih sprememb lesa v nihajočih klimatskih razmerah. Na neobdelani in topotno predelani bukovini ( <i>Fagus sylvatica</i> L.) smo na treh temperaturnih nivojih z nestacionarno metodo in metodo končnih razlik določili koeficiente difuzivnosti v odvisnosti od temperature. Koeficienti difuzivnosti topotno obdelanega lesa so nižji od koeficientov neobdelanega lesa, v obeh primerih pa smo potrdili njihovo naraščanje z naraščajočo temperaturo. Manjšo difuzivnost pripisujemo tudi nižjim vlažnostim topotno obdelanega lesa. Z naraščajočo vlažnostjo lesa koeficient difuzivnosti narašča hitreje pri neobdelanem lesu kot pri topotno obdelanem.

## KEY WORDS DOCUMENTATION

DN	Du2
DC	UDK 630*812.141
CX	diffusivity/heat treatment/beech wood
AU	TOMEĆ, Primož
AA	GORIŠEK, Željko (mentor)/STRAŽE, Aleš (recenzent)
PP	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, C. VIII/34
PB	University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY	2015
TI	DIFFUSIVITY OF NATURAL AND HEAT TREATED BEECH WOOD
DT	M. Sc. Thesis (Master study Programmes)
NO	IX, 64 p., 6 tab., 33 fig., 54 ref.
LA	sl
AL	sl/en
AB	Diffusion is the most important characteristic of wood, which determines the rate of dimensional changes in wood in changing climatic conditions. On the untreated and heat treated beech wood ( <i>Fagus sylvatica</i> L.), diffusion coefficients depending on the wood's moisture were determined at three different temperature levels with the non-stationary method and finite difference method. The coefficients of diffusion of heat-treated wood are lower than the coefficients of untreated wood, in both cases, we have confirmed their growth with increasing temperature. Smaller diffusivity is attributed to the lower moisture of heat-treated wood. With the increasing wood moisture content the diffusion coefficient growing faster in untreated as in the heat-treated wood.

## KAZALO VSEBINE

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

<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1 Cilji raziskovanja .....	1
1.2 Delovne hipoteze .....	2
<b>2 PREGLED OBJAV .....</b>	<b>3</b>
2.1 Voda v lesu .....	3
<b>2.1.1 Sorpcijske lastnosti lesa .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1.2 Kapilarni tok vode v lesu .....</b>	<b>6</b>
2.1.2.1 Permeabilnost lesnega tkiva .....	6
<b>2.1.3 Difuzijski tok vode v lesu .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.4 Molekularni tok vode pri stacionarnih pogojih .....</b>	<b>8</b>
2.1.4.1 Prvi Fickov zakon pri izotermnih pogojih .....	8
2.1.4.2 Difuzija vezane vode v celični steni .....	10
2.1.4.3 Difuzija vodne pare v celičnih lumnih .....	13
2.1.4.4 Difuzija vode v lesu v prečni smeri .....	18
<b>2.1.5 Molekularni tok vode pri nestacionarnih pogojih .....</b>	<b>20</b>
2.1.5.1 Drugi Fickov zakon .....	21
2.1.5.2 Snovna prestopnost in koeficient snovne prestopnosti .....	25
<b>2.1.6 Določanje koeficiente difuzivnosti .....</b>	<b>28</b>
2.1.6.1 Določanje koeficientov difuzivnosti po stacionarni metodi .....	28
2.1.6.2 Določanje koeficientov difuzivnosti po nestacionarni metodi .....	29
2.2 Lastnosti toplotno obdelanega lesa .....	33
<b>2.2.1 Kemične spremembe toplotno obdelanega lesa .....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.2 Izguba mase toplotno obdelanega lesa .....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.3 Barva in vonj toplotno obdelanega lesa .....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.4 Fizikalne lastnosti toplotno obdelanega lesa .....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.5 Postopki toplotne obdelave .....</b>	<b>36</b>
<b>3 MATERIAL IN METODE .....</b>	<b>38</b>
3.1 Material .....	38
<b>3.1.1 Priprava preizkušancev za eksperiment določitve koeficiente difuzivnosti v nestacionarnih pogojih v postopku adsorpcije .....</b>	<b>38</b>

<b>3.1.2 Priprava preizkušancev za določitev vlažnostnega gradiента in koeficiente difuzivnosti z metodo končnih razlik.....</b>	<b>39</b>
3.2 Metode .....	40
<b>3.2.1 Določitev koeficiente difuzivnosti z nestacionarno metodo .....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.2 Določitev vlažnostnega gradiента.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.3 Določitev difuzijskega koeficiente z metodo končnih razlik.....</b>	<b>43</b>
<b>4 REZULTATI IN RAZPRAVA.....</b>	<b>46</b>
4.1 koeficienti difuzivnosti lesa določeni z ne-stacionarno metodo.....	46
4.2 Ravnovesne vlažnosti in vlažnostni profil naravne in toplotno obdelane buk. ....	51
4.3 Difuzijski koeficienti določeni z metodo končnih razlik.....	55
<b>5 SKLEPI .....</b>	<b>58</b>
<b>6 POVZETEK .....</b>	<b>59</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>61</b>
<b>ZAHVALA</b>	

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1 Transportne enačbe s koeficienti in potenciali pri stacionarnih pogojih (Siau, 1984).....	10
Preglednica 2 Koeficienti snovne prestopnosti, izraženi z različnimi potenciali (Siau, 1995) .....	25
Preglednica 3 Povprečni koeficienti difuzivnosti za toplotno obdelano in naravno bukovino, določeni s klasično ne-stacionarno metodo v postopku adsorpcije (CV – koeficient variabilnosti). .....	46
Preglednica 4 Ravnovesne vlažnosti neobdelane in toplotno obdelane bukovine, določene med postopkom adsorpcije pri temperaturah 20 °C, 40 °C in 60 °C (CV je koeficient variabilnosti). .....	51
Preglednica 5 Povprečni koeficienti difuzivnosti za toplotno obdelano in neobdelano bukovino, določeni s metodo končnih razlik v postopku adsorpcije. ....	55
Preglednica 6 Difuzijska razmerja med toplotno predelano in naravno bukovino DHT in DC pri temperaturi 20 °C, 40 °C in 60 °C. ....	57

## KAZALO SLIK

Slika 1 Tipična sorpcijska histereza za les. Desorpcijska in adsorpcijska izoterma zapirata histerezno zanko. Višja je le začetna ali inicialna desorpcijska krivulja (Gorišek, 2009) .....	4
Slika 2 Levo - Temperatura znižuje nivo sorpcijske histereze in zmanjšuje razliko med adsorpcijsko in desorpcijsko krivuljo. Desno - Primerjava sorpcijskih izoterm za polioze, holocelulozo, les in lignin (Gorišek, 2009) .....	4
Slika 3 Razlika v ravnovesni lesni vlažnosti v postopku adsorpcije in desorpcije (Gorišek, 2009) .....	5
Slika 4 Koeficient difuzivnosti vezane vode v vzdolžni smeri ( $D_{BL}$ ) za <i>Picea sitchensis</i> pri 26,7 °C v odvisnosti od povprečne vlažnosti (Spremenjeno po: Stamm, 1959, cit. po Siau, 1984) .....	<b>Napaka! Zaznamek ni definiran.</b>
Slika 5 Odvisnost vlažnosti točke nasičenja celičnih sten od temperature (Spremenjeno po: Stamm in Nelson, 1961, cit. po Siau, 1984) .....	13
Slika 6 Ravnovesje med vlažnostjo celične stene in relativno zračno vlažnostjo v lumnu (Spremenjeno po Siau 1984, s. 159) .....	14
Slika 7 Difuzijski koeficient vezane vode v prečni smeri in difuzijski koeficient vodne pare pri različnih temperaturah v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa (po Siau, 1984) .....	17
Slika 8 Geometrijski model olesenele celice (Spremenjeno po: Siau, 1984) .....	18
Slika 9 Model prečne masne prevodnosti sestavljen iz delnih prevodnosti .....	19
Slika 10 Čaša za določitev koeficiente difuzivnosti po stacionarni metodi (DIN 53122) .....	28
Slika 11 Določitev difuzijskega koeficiente po nestacionarni metodi v primeru obojestranskega navlaževanja (Siau, 1995, str. 154) .....	30
Slika 12 Preizkušance iz naravnega in toplotno obdelanega lesa za določitev koeficiente difuzivnosti z ne-stacionarno metodo .....	38
Slika 13 Preizkušance iz naravnega in toplotno obdelanega lesa za določitev vlažnostnega gradienta in koeficiente difuzivnosti z metodo končnih razlik .....	39
Slika 15 Cepljenje preizkušanca na 7 enakih lamel .....	42
Slika 16 Model enodimenzionalnega prenosa snovi v ravni plošči .....	43
Slika 17 Časovno dimenzijski diagram spremembe lesne vlažnosti .....	44
Slika 18 Koeficient difuzivnosti naravne bukovine pri temperaturah 20 °C, 40 °C in 60 °C .....	47
Slika 19 Koeficienti difuzivnosti toplotno obdelane bukovine pri temperaturah 20 °C, 40 °C in 60 °C .....	47
Slika 20 Difuzijsko razmerje DHT/DC pri temperatur 20 °C, 40 °C in 60 °C .....	48
Slika 21 Difuzijski koeficienti neobdelane in toplotno obdelane bukovine pri temperaturah 20 °C, 40 °C in 60 °C .....	49

Slika 22 Linearna zveza logaritemske vrednosti povprečnega difuzijskega koeficienta in recipročne vrednosti absolutne temperature.....	49
Slika 23 Odvisnost difuzijskega koeficienta (DC60) od gostote pri temperaturi 60 °C za naravno bukovino.....	50
Slika 24 Odvisnost difuzijskega koeficienta (DHT40) od gostote pri temperaturi 40 °C za toplotno obdelano bukovino .....	50
Slika 25 Ravnovesne vlažnosti naravnega in toplotno obdelanega lesa pri 20 °C pri relativni zračni vlažnosti 33 % (levo) in 75 % (desno).....	51
Slika 27 Ravnovesne vlažnosti toplotno obdelanega in naravnega lesa pri 40 °C pri relativni zračni vlažnosti 33 % (levo) in 75 % (desno).....	52
Slika 28 Vlažnostni profili naravnih in toplotno obdelanih preizkušancev med enostransko adsorpcijo pri 20 °C za preizkušance iz elemena A in elementa B. ....	53
Slika 29 Vlažnostni profili naravnih in toplotno obdelanih preizkušancev med adsorpcijo pri 40 °C za preizkušance iz elementa C in elementa D.....	54
Slika 30 Vlažnostni profili naravnih in toplotno obdelanih preizkušancev med adsorpcijo pri 60 °C za preizkušance iz elementa E in elementa F.....	54
Slika 31 Koeficienti difuzivnosti naravne bukovine pri temperaturi 20 °C, 40 °C in 60 °C.....	56
Slika 32 Koeficienti difuzivnosti toplotno obdelane bukovine pri temperaturi 20 °C, 40 °C in 60 °C.....	56
Slika 33 Difuzijsko razmerje DHT/DC pri temperaturi 20 °C, 40 °C in 60 °C .....	57

## 1 UVOD

V zadnjem času se povečuje uporaba toplotno predelanega (v praksi poznano kot termično modificiranega) lesa, ki mu želimo z obdelavo pri temperaturi od 160 °C do 280 °C in trajanju postopka od 15 minut do 24 ur predvsem izboljšati trajnost, dimenzijsko stabilnost, zmanjšati higroskopnost in mu s tem razširiti možnosti uporabe. Zmanjšanje higroskopnosti lesa je predvsem posledica termične razgradnje najbolj higroskopnih in nestabilnih polioz. Med postopkom se les obarva temnejše, zniža se mu gostota in poslabšajo mehanske lastnosti.

Toplotno obdelan les ima velik potencial za uporabo na prostem, kjer je izpostavljen nenehno spreminjačim se podnebnim razmeram, ki povzročajo ciklično navlaževanje in sušenje lesa. Na hitrost adsorpcije (navlaževanja) in desorpcije (sušenja) lesa pod točko nasičenja celičnih sten ima največji vpliv difuzivnost lesnega tkiva. Z določitvijo difuzijskih koeficientov lahko predvidimo hitrost odziva lesa na spremembo klime.

Največji vpliv na difuzivnost lesa pripisujemo gostoti lesa, temperaturi, vlažnosti, kemijski zgradbi, usmerjenosti vlaken in smeri toka. Ker toplotna obdelava spremeni celično strukturo lesa in bistveno zmanjša gostoto lesa, predvidevamo, da v veliki meri vpliva tudi na difuzivnost lesnega tkiva.

### 1.1 CILJI RAZISKOVANJA

Z nestacionarno metodo masnega toka v končni medij v procesu adsorpcije želimo določiti difuzijski koeficient naravne in toplotno obdelane bukovine pri treh različnih temperaturah eksperimenta. Koeficiente želimo med seboj primerjati in poiskati zanesljive korelacije med vplivom toplotne obdelave, temperature in gostote na difuzijski koeficient. Dodatno želimo naravni in toplotno obdelani bukovini na treh temperturnih nivojih določiti ravnovesno vlažnost na začetku in koncu eksperimenta ter gradient vlažnosti skozi celoten proces adsorpcije. Z matematično metodo končnih razlik bomo nato določiti difuzijske koeficiente in analizirali vpliv toplotne obdelave, temperature in lesne vlažnosti na difuzijski koeficient.

## 1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Med toplotno obdelavo lesa se v lesu zgodijo velike morfološke in kemične spremembe. Kljub nižji gostoti toplotno obdelanega lesa, pričakujemo nižji difuzijski koeficient v primerjavi z naravnim lesom. V skladu s podatki v literaturi pričakujemo povečevanje difuzije z višjo temperaturo in lesno vlažnostjo, ter nižjo ravnovesno vlažnost toplotno obdelanega lesa pri vseh klimatskih pogojih.

## 2 PREGLED OBJAV

### 2.1 VODA V LESU

Porazdelitev vode v živem drevesu je odraz prevajalne vloge sekundarnega ksilema (lesa), ki prevaja vodo iz koreninskega sistema v krošnjo. Gibanje vode v lesu pri stoečih drevesih je omejeno na lokacijo prevodne beljave. Pri iglavcih in difuzno poroznih listavcih ima prevodno funkcijo več prirastnih plasti – branik, kjer je pomemben tudi prečni transport vode. Višje razviti venčasto porozni listavci imajo pogosto prevodno le eno ali dve zadnji braniki z zelo učinkovitim transportom vode (Zimmermann, 1983).

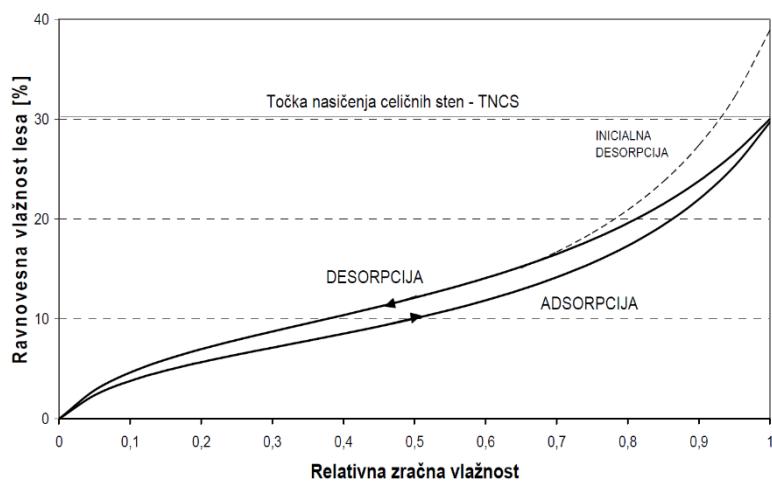
Voda se v lesu nahaja v treh oblikah. Nad točko nasičenosti celičnih sten vsebujejo lumni prosto vodo. Higroskopska ali vezana voda pa je vezana v celično steno s sorpcijo. Voda se v lesu nahaja tudi v obliki pare v celičnih lumnih, ki pa je zaradi majhnih količin zanemarljiva (Gorišek, 1994).

#### 2.1.1 Sorpcijske lastnosti lesa

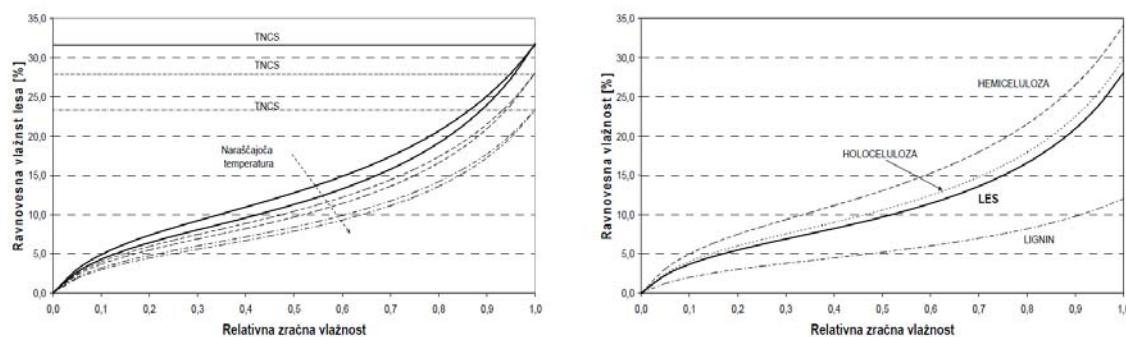
Les je higroskopen zaradi svoje kemične zgradbe in velike notranje površine, ki jo oblikujejo lumni in mikro kapilare v celični steni in zato vedno vsebuje več ali manj vode (Gorišek, 2009). Vlažnost lesa v stanju higroskopnega ravnovesja imenujemo ravnovesna vlažnost ( $u_r$ ). V spreminjačih se klimatskih razmerah niha tudi lesna vlažnost. Količino vezane vode omejuje število sorpcijskih mest, ki lahko vežejo vodne molekule. Razpoložljiva sorpcijska mesta predstavljajo predvsem proste hidroksilne (-OH) skupine. Od gradnikov olesenele celične stene so najbolj higroskopne hemiceluloze (k skupni sorpciji prispevajo 37 %, čeprav je njihov delež le približno 24 %), sledijo celuloza (k skupni sorpciji prispeva 47 %) in lignin (16 %) ter izjemoma nekateri ekstraktivi (Cristensen in Kelsey, 1959, Wangaard in Grandosm 1967, cit. po Gorišek, 2009).

Odvisnost ravnovesne vlažnosti od relativne zračne vlažnosti pri konstantni temperaturi se izraža s sorpcijskimi izotermami (Gorišek, 2009).

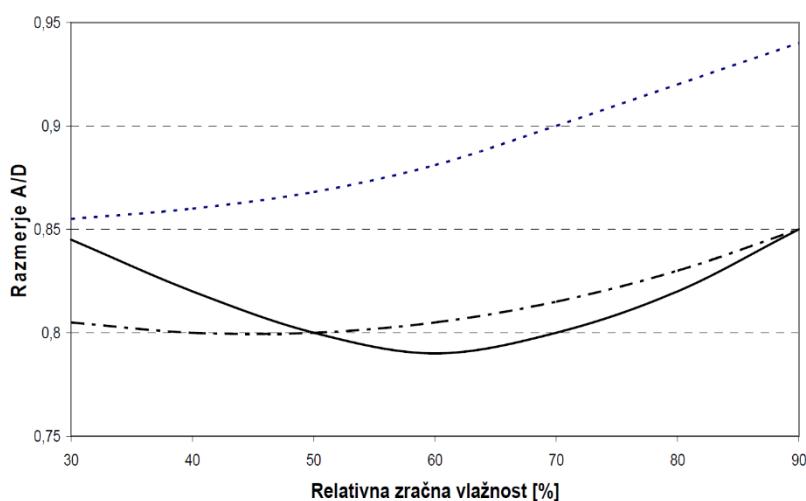
Sorpcijske izoterme za les, ki jih dobimo s postopnim uravnovešanjem v padajočih (desorpcija) oz. v naraščajočih (adsorpcija) relativnih zračnih vlažnostih pri konstantni temperaturi, so sigmoidne in tvorijo histerezno zanko (Slika 1). Zaradi neskladja obeh sorpcijskih izoterm je relativna zračna vlažnost lesa pri adsorpciji vedno nižja od tiste v desorpciji (velja do temperature približno 70 °C) (Slika 2). Razlika v ravovesni vlažnosti dobljeni v procesu adsorpcije in desorpcije je največja v območju relativne zračne vlažnosti  $60\% < \varphi < 80\%$  (Slika 3) (Okoh in Skaar, 1980, Lenth in Kamke, 2001; cit. po Gorišek, 2009).



Slika 1 Tipična sorpcijska histereza za les. Desorpcijska in adsorpcijska izoterma zapirata histerezno zanko. Višja je le začetna ali inicialna desorpcijska krivulja (Gorišek, 2009).



Slika 2 Levo - Temperatura znižuje nivo sorpcijske histereze in zmanjšuje razliko med adsorpcijsko in desorpcijsko krivuljo. Desno - Primerjava sorpcijskih izoterm za polioze, holocelulozo, les in lignin (Gorišek, 2009).



Slika 3 Razlika v ravnovesni lesni vlažnosti v postopku adsorpcije in desorpcije (Gorišek, 2009)

Histerezo se pripisuje polarnim hidroksilnim skupinam celuloze, ki vežejo vodo z vodikovo vezjo. V nasičenem stanju so vse hidroksilne skupine stenskih sestavin nasičene z adsorbirano vodo, dosežena je točka nasičenja celičnih sten (TNCS), ki navzgor tudi omejuje higroskopsko območje. Pri desorpciji hidroksilne skupine oddajajo vodo in se ob krčenju celične stene približajo in med seboj zasitijo. V naslednji adsorpciji te hidroksilne skupine ne vežejo vode takoj, kar povzroči nižjo ravnovesno vlažnost v postopku adsorpcije. Pri temperaturi 70 °C se gibljivost vezane vode poveča, močneje pa niha tudi celulozna kristalinična rešetka. Vezi med sosednjima celuloznima molekulama so šibkejše, kar vodi do manjših razlik pri vezavi vode med desorpcijo in adsorpcijo (Gorišek, 2009).

Higroskopnost in sorpcijske izoterme se med lesovi razlikujejo zaradi variabilnosti kemične zgradbe lesne snovi, higroskopskega potenciala, deleža mikro razpok v celični steni, gostote, predhodnih kemičnih ali hidrotermičnih postopkov in napetostnih stanj. (Skaar, 1972, 1988, Choong, 1969, Shmulsky s sod., 2001; cit. po Gorišek, 2009).

## 2.1.2 Kapilarni tok vode v lesu

Gibanje proste vode razlagamo s kapilarno tenzijo, ki obstaja med tekočino in plinom. Za masni tok proste (kapilarne) vode iz notranjosti na površino morata biti po Hawleyovi hipotezi izpolnjena dva pogoja: v prosti vodi morajo biti prisotni mehurčki, ki so večji kot odprtine – pore v pikenjskih membranah in drugi pogoj, ki pravi, da mora biti les permeabilen, se pravi mora obstajati sklenjena povezava med celicami (Kollmann, 1968).

### 2.1.2.1 Permeabilnost lesnega tkiva

Permeabilnost tudi v največji meri vpliva na hitrost toka proste vode v lesu. V njej se zrcali anizotropnost in variabilnost lesnega tkiva. Raziskave so potrdile velike razlike kot tudi variabilnost permeabilnosti med različnimi lesnimi vrstami v različnih anatomskeh smereh, kot tudi glede na fiziološko stanje lesnega tkiva. Zaradi dovolj velikih pretokov kapljevin in plinov so najpogosteje permeabilnost določali le v vzdolžni smeri, kjer variira med lesnimi vrstami z razmerjem  $1 : 5 \times 10^6$  pri listavcih, pri iglavcih pa  $1 : 0,5 \times 10^6$  (Choong in sod., 1974).

Med najbolj prevodne lesne vrste uvrščamo venčasto porozne listavce, s premeri trahej tudi 500  $\mu\text{m}$ , zelo blizu pa so tudi difuzno porozne drevesne vrste, z večjim številom trahej premera do 50  $\mu\text{m}$ . Splošno so lesne vrste iglavcev manj permeabilne. Radialna permeabilnost je v največji meri odvisna od prevodnosti 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  $1 : 80 \times 103$ , vzdolžna permeabilnost pa je z radialno v razmerju  $1 : 15$  do  $1 : 50 \times 103$  (Perre in Karimi, 2002).

Prevodnost iglavcev v največji meri določata število in velikost odprtin v pikenjskih membranah in fiziološko stanje lesnega tkiva. Prevodnost tako močno zmanjšujejo pojavi kot so odlaganje jedrovinskih snovi na celično steno, lumne in pikenjsko membrano (margo) ter aspiracija obokanih pikenj, ki je posledica kapilarne tenzije v procesu sušenja lesa. Prevodnost listavcev pa v največji meri zmanjšuje otiljenje, pri čemer se parenhimske celice vraščajo v lumne trahej (Gorišek, 1994).

### 2.1.3 Difuzijski tok vode v lesu

Permeabilnost lesnega tkiva je pomembna lastnost, predvsem za transport proste vode, manj pa za gibanje vezane ali higroskopske vode.

Pod vlažnostjo TNCS je značilen difuzijski tok vode, ki sestoji iz difuzije vezane vode skozi celične stene in difuzije pare skozi celične lumne. Čeprav je slednja znatno hitrejša (100 do 1000 krat), le-ta skorajda ne poteka skozi piknje, saj so za parno difuzijo premajhne in premalo številne. Ker poteka difuzija skozi lumne mnogo hitreje kot skozi celične stene, je difuzijski koeficient odvisen predvsem od količine stenskega materiala, t. j. gostote lesa, difuzivnost pa je obratno sorazmerna z gostoto lesa. Na skupno difuzivnost lesnega tkiva vpliva več dejavnikov od katerih so najpomembnejši: gostota, temperatura, vlažnost, smer toka in usmerjenost vlaken (Kollman, 1968, Stamm, 1964, Siau, 1984, Skaar, 1988).

Difuzivnost se kot sposobnost prevajanja vode povečuje z naraščanjem temperature in višjo vlažnostjo lesa (Staam, 1964, Siau, 1984, Skaar, 1988). Z naraščanjem temperature se difuzijski tok povečuje eksponentno in v skladu z Arrheniusovo enačbo, ki opisuje linearen odnos med logaritmom povprečnega koeficiente difuzivnosti in obratno vrednostjo absolutne temperature (Peralta in Lee, 1995).

Difuzija vezane vode v radialni smeri je od 17 do 25 % večja od difuzije vezane vode v tangencialni smeri. V vzdolžni smeri je difuzijski koeficient vezane vodne difuzije približno trikrat večji kot v tangencialni smeri in dvakrat večji kot v radialni smeri (Kollman, 1916, Skaar, 1984, Siau, 1988).

Difuzija vezane vode pada s povečevanjem gostote (Siau, 1988).

Na tok vezane vode pomembno vpliva tudi ojedritev, ki povečuje gostoto in hkrati preprečuje difuzijski tok med sorpcijskimi mesti (Gorišek, 1994).

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

pare v lumnih je veliko večji od koeficiente difuzije vezane vode, temperaturno pa narašča zaradi naraščanja parnega tlaka (Siau, 1995).

#### 2.1.4 Molekularni tok vode pri stacionarnih pogojih

##### 2.1.4.1 Prvi Fickov zakon pri izotermnih pogojih

Difuzivnost je sposobnost omogočanja molekularnega toka, ki se pojavi zaradi razlike koncentracij – koncentracijskega gradiента difundirajoče snovi. V stacionarnih pogojih jo opišemo s prvim Fickovim zakonom, ki je matematično analogen Darcyevemu (za stacionarni kapilarni tok proste vode) in Fourierjevemu zakonu (za stacionarni prenos topote). Prvi Fickov zakon je definiran kot razmerje med pretokom – fluksom in gradientom koncentracije.

Splošna oblika je:  $difuzivnost = \frac{fluks}{gradient}$ .

$$D = \frac{\frac{m}{t} \cdot A}{\frac{\Delta C}{x}} \quad \dots(1)$$

D	difuzijski koeficient	$\left[ \frac{m^2}{s} \right]$
$\frac{m}{t}$	masni tok	$\left[ \frac{kg}{s} \right]$
A	površina vzorca, ki je pravokotna na tok vodne pare	$[m^2]$
x	dolžina v smeri toka	$[m]$
$\Delta C$	razlika koncentracij	$\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

Za transport vode v lesu lahko zakon priredimo tako, da razliko koncentracij izrazimo z razliko vlažnosti vzorca:

$$\Delta C = \frac{\rho \cdot \Delta u}{R_u} \quad \dots(2)$$

$\Delta C$	razlika koncentracij	$\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
$\rho$	gostota vode ( $1000 \frac{kg}{m^3}$ )	$\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
$R_u$	nominalna gostota, pri vlažnosti u	$\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
$\Delta u$	razlika vlažnosti lesa	$\left[ \frac{kg}{kg} \right]$

Z zamenjavo C v enačbi 1 z enačbo 2 dobimo

$$D = \frac{m \cdot \Delta x \cdot R_u}{t \cdot A \cdot \rho \cdot \Delta u} \quad \dots(3)$$

Gradient koncentracije ( $\Delta C/\Delta x$ ) ali vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) lahko izrazimo tudi z gradienti, ki temeljijo na (Skaar in Babiak, 1982, cit. po Siau, 1984):

- potencialu parcialnega tlaka ( $\Delta p$ ),
- kemijskemu potencialu ( $\Delta \mu$ ),
- vodnemu potencialu ( $\Delta \Psi$ ) ali
- potencialu proste energije ( $\Delta G$ ).

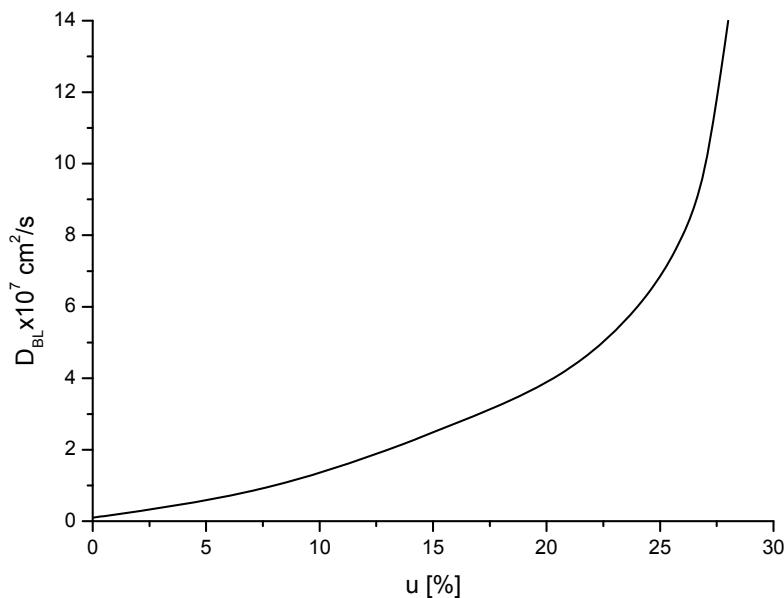
Transportne enačbe z ustreznimi koeficienti in potenciali so enakovredne pod izotermnimi pogoji in jih lahko zapišemo v parcialnih oblikah (Preglednica 1).

Preglednica 1 Transportne enačbe s koeficienti in potenciali pri stacionarnih pogojih (Siau, 1984)

Transportna enačba	Koeficient	Potencial
$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}$	$D = K_u \frac{\partial u}{\partial C}$	$\left[ \frac{m^2}{s} \right] C, \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
$J = -K_u \frac{\partial u}{\partial x}$	$K_u = D \frac{\partial C}{\partial u}$	$\left[ \frac{kg}{m s \%} \right] u, [\%]$
$J = -K_p \frac{\partial p}{\partial x}$	$K_p = K_u \frac{\partial u}{\partial p}$	$\left[ \frac{kg}{m s Pa} \right] p, [Pa]$
$J = -K_\mu \frac{\partial \mu}{\partial x}$	$K_\mu = 100K_u$	$\left[ \frac{kg}{m s} \right] \mu = \frac{u}{100}$
$J = -K_\Psi \frac{\partial \Psi}{\partial x}$	$K_\Psi = K_u \frac{\partial u}{\partial \Psi}$	$\left[ \frac{kg}{m s Pa} \right] \Psi, [Pa]$
$J = -K_G \frac{\partial G}{\partial x}$	$K_G = K_u \frac{\partial u}{\partial G}$	$\left[ \frac{kg mol}{s} \right] C, \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

#### 2.1.4.2 Difuzija vezane vode v celični steni

Osnovni difuzijski upor v prečnih smereh lesnega tkiva predstavljajo celične stene. Difuzijske koeficiente, ki definirajo difuzijo vezane vode skozi celične stene, je prvi izmeril Stamm (1959). Difuzijski koeficient vezane vode skozi celično steno v vzdolžni smeri smrekovine (*Picea sitchensis*) je izmeril pri temperaturi 26,7 °C (Slika 4). Lumni celic so bili med meritvami zapolnjeni z zlitino kositra, svinca in bizmuta. Difuzijski koeficient pa določen z uporabo nestacionarne metode. Ugotovljeno je bilo eksponentno naraščanje difuzijskih koeficientov z naraščajočo vlažnostjo in linearno naraščanje vlažnosti z kvadratnim korenem iz časa do dveh tretjin ravnovesne vlažnosti. Pojav eksponentnega naraščanja difuzijskih koeficientov je razložil z manjšo vezalno energijo med sorpcijskimi mestami in vezanimi vodnimi molekulami pri višji lesni vlažnosti. Molekule vode vezane v celični steni potrebujejo pri višji vlažnosti manj energije za premik oz. zamenjavo sorpcijskih mest. Vrednost vezalne energije se z naraščanjem lesne vlažnosti približuje vrednosti 0, kjer je prosta voda kot posledica kapilarne kondenzacije vezana z relativno majhnimi kapilarnimi silami (Stamm, 1964).



Slika 4 Koeficient difuzivnosti vezane vode v vzdolžni smeri (DBL) za *Picea sitchensis* pri 26,7 °C v odvisnosti od povprečne vlažnosti (Spremenjeno po: Stamm, 1959, cit. po Siau, 1984)

Difuzijski koeficient vezane vode skozi celično steno v longitudinalni smeri je dva do trikrat večji kot v prečnih smereh. Difuzijski koeficient je v radialni smeri 17 – 25% večji kot v tangencialni smeri. Razlog je v radialno potekajočih trakovih in v razporeditvi mikrofibril v radialnih stenah. Difuzijski koeficient je tako v vzdolžni smeri približno 3x večji kot v tangencialni smeri in 2x večji kot v radialni smeri (Stamm, 1964, cit. po Siau, 1984).

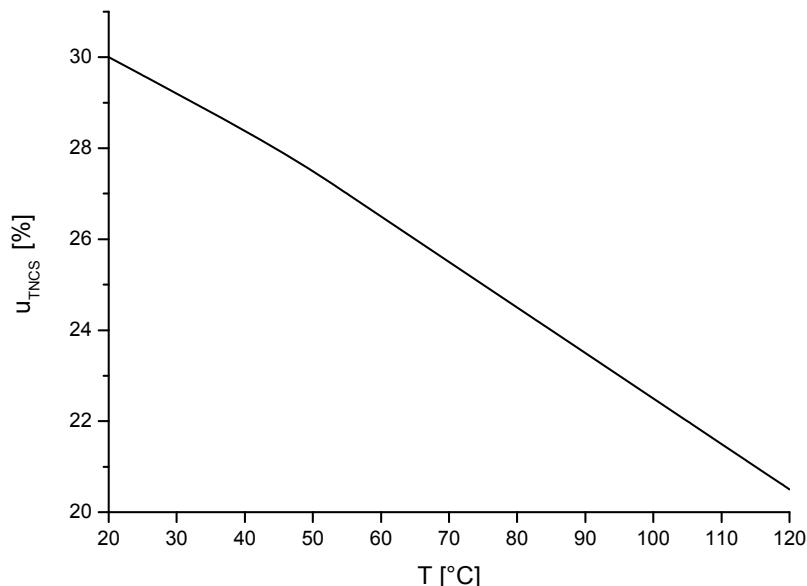
Stamm (1959) je s pomočjo nestacionarne metode ugotovil linearno naraščanje vlažnosti s kvadratnim korenom časa do treh tretjin ravnovesne vlažnosti. Za izračun difuzijskega koeficiente je uporabil povprečno vlažnost, pri kateri je povprečna vrednost difuzijskega koeficiente približno enaka pravemu difuzijskemu koeficientu. Lesna vlažnosti, ki jo je uporabil je natančno  $\frac{2}{3}$  razlike med spodnjo in zgornjo ravnovesno vlažnostjo. Za izračun povprečne lesne vlažnosti je uporabil naslednjo enačbo:

$$\bar{u} = u_1 + \frac{2}{3}(u_2 - u_1) \quad \dots(4)$$

$\bar{u}$	povprečna vlažnost za izračun difuzijskega koeficienta	[%]
$u_1$	nižja ravovesna vlažnost	[%]
$u_2$	višja ravovesna vlažnost	[%]

Comstock (1963) je nadaljeval s primerjavo vrednosti difuzijskih koeficientov izmerjenih v procesu adsorpcije in desorpcije. Pri lesni vlažnosti nižji od 12% ni ugotovil bistvenih razlik, pri vlažnostih višjih od 12% pa je ugotovil nižje difuzijske koeficiente izmerjene v procesu adsorpcije v primerjavi s koeficienti izmerjenimi v procesu desorpcije. Razlike je pripisal notranjim deformacijam zaradi napetostnih stanj v lesnem tkivu. Prav tako je z uporabo stacionarne metode določil višje vrednost difuzijskih koeficientov v primerjavi z uporabo nestacionarne metode. Vzrok se pripisuje predhodno nastalim tlačnim napetostim na površini, zaradi katerih se na površini zniža ravovesna vlažnost (Siau, 1995).

Pri določitvi difuzijskih koeficientov pod točko nasičenja celičnih sten (TNCS) in pri povišani temperaturi, je pomembno poznati vpliv temperature na točko nasičenja celičnih sten. Pri domačih drevesnih vrstah se je pri temperaturi 20°C uveljavila 30% lesna vlažnost. Točka nasičenja celičnih sten se pri povišanju temperature za 1°C zniža za približno 0,1%. Stamm in Nelson (1961) sta objavila vrednosti točke nasičenja celičnih sten do temperature 120°C (Slika 5).



Slika 5 Odvisnost vlažnosti točke nasičenja celičnih sten od temperature (Spremenjeno po: Stamm in Nelson, 1961, cit. po Siau, 1984)

#### 2.1.4.3 Difuzija vodne pare v celičnih lumnih

Difuzija vodne pare v celičnih lumnih izračunamo iz koeficienta notranje difuzije vodne pare v zraku. Pol-empirično enačbo je postavil Dushman (1962) (cit. po Siau, 1984).

$$D_A = 2,2 \times 10^{-5} \left( \frac{1,013 \times 10^5}{P} \right) \times \left( \frac{T}{273} \right)^{1,75} \quad \dots(5)$$

$D_A$  difuzijski koeficient vodne pare v zraku

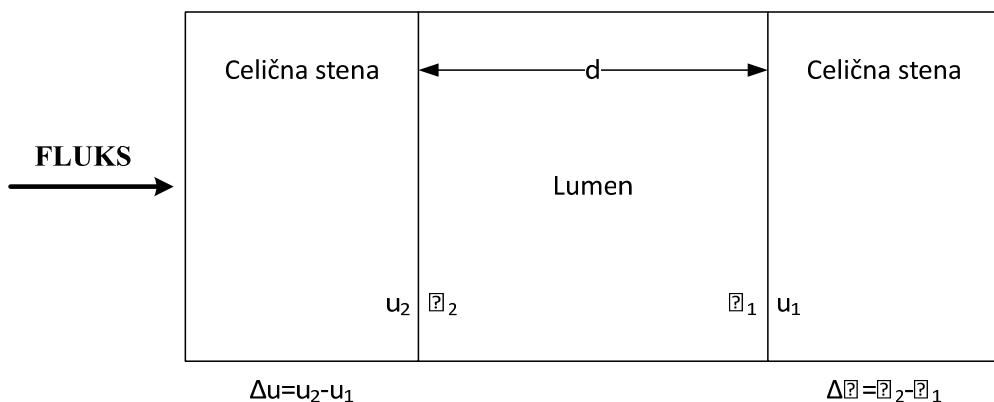
$P$  absolutni tlak

$T$  absolutna temperatura

Kar lahko poenostavimo v:

$$D_A = \frac{2,2}{P} \times \left( \frac{T}{273} \right)^{1,75} \quad \dots(6)$$

Difuzijski koeficient vodne pare v zraku ( $D_A$ ) moramo primerno prirediti, da ga lahko uporabimo v skupni modelni enačbi v kateri nastopa tudi difuzijski koeficient vezane vode v celični steni v prečni smeri ( $D_{BT}$ ). Zveza je razvidna s slike 6, ki prikazuje ravovesno stanje.



Slika 6 Ravovesje med vlažnostjo celične stene in relativno zračno vlažnostjo v lumnu  
 (Spremenjeno po Siau 1984, s. 159)

$$D_V = \frac{D_A \partial C_A}{\partial C_W} \quad \dots(7)$$

$D_V$	difuzijski koeficient vodne pare v lumnih	$\left[ \frac{m^2}{s} \right]$
$C_A$	koncentracija vodne pare v lumnih	$\left[ \frac{m^2}{s} \right]$
$C_W$	koncentracija vezane vode v celični steni	$\left[ \frac{m^2}{s} \right]$

Celična stena je sposobna zadržati vlago v ravovesju z zrakom okolice, zato je  $C_W$  bistveno večji od  $C_A$ . Predpostavimo, da vlaga prihaja z leve proti desni, potem velja  $u_2 > u_1$  in  $\varphi_2 > \varphi_1$ . Torej je  $\Delta u = u_2 - u_1$  in  $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ . Oba potenciala  $\Delta u$  in  $\Delta \varphi$  lahko izrazimo preko sorpcijske izoterme. Razmerje  $\frac{\Delta \varphi}{\Delta u}$  lahko pri zelo majhnih razlikah zapišemo parcialno  $\frac{\partial \varphi}{\partial u}$ . Ta izraz predstavlja recipročno vrednost sorpcijskega koeficiente.

Koncentracijo vodne pare v lumnih lahko izračunamo iz splošne plinske enačbe, ki se nanaša na parcialni tlak:

$$pV = \frac{m}{0,018} \times RT \quad \dots(8)$$

P	parcialni tlak vodne pare v lumnih	[Pa]
M	masa vodne pare	[kg]
V	prostornina zraka	[m <sup>3</sup> ]
R	splošna plinska konstanta (8,31 $\frac{J}{mol K}$ )	$\left[\frac{J}{mol K}\right]$
T	temperatura	[K]

Če v enačbo 8 vstavimo  $p = p_0 \left(\frac{\varphi}{100}\right)$  in nato izrazimo koncentracijo vodne pare v lumnih parcialno, dobimo izraz:

$$\partial C_A = \frac{0,018 p_0 \partial \varphi}{100 RT} \quad \dots(9)$$

Tudi koncentracijo vezane vode v celični steni lahko iz enačbe (7) zapišemo parcialno:

$$\partial C_W = \frac{R_u^W \rho \partial u}{100} \quad \dots(10)$$

$$R_u^W \quad \text{nominalna gostota celične stene pri vlažnosti } u \quad \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

Če enačbi (9 in 10) vstavimo v enačbo ravnovesnega stanja (en. 7), dobimo difuzijski koeficient vodne pare v lumnih, izražen s koncentracijo vezane vode v celični steni.

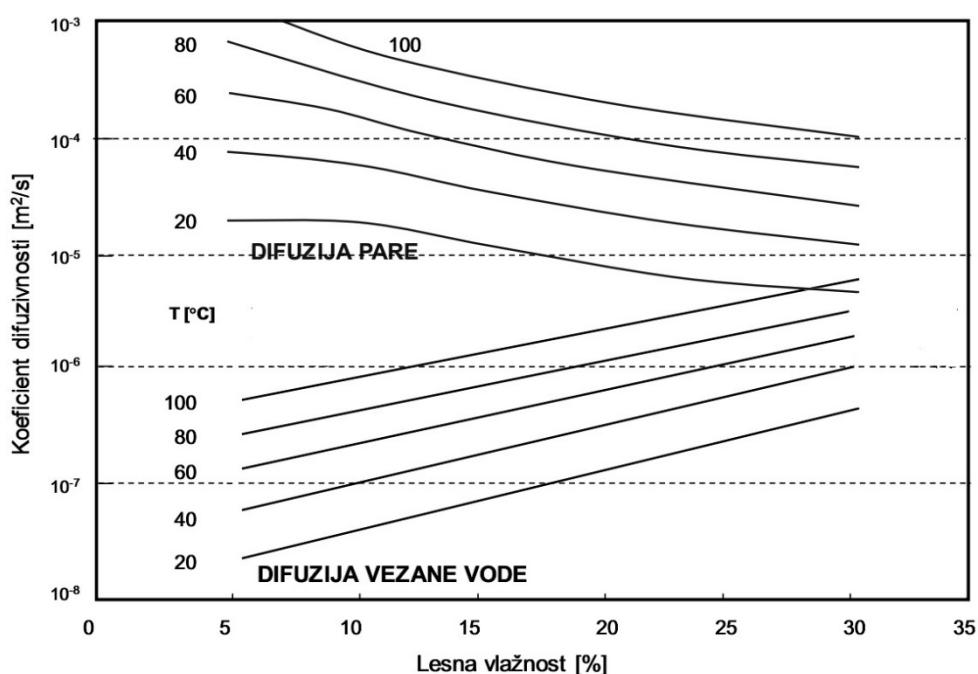
$$D_V = \frac{0,018 D_A p_0}{d_u^w \rho RT} \times \frac{\partial \varphi}{\partial u} \quad \dots(11)$$

$D_V$	difuzijski koeficient vodne pare v lumnih	$\left[ \frac{m^2}{s} \right]$
$d_u^w$	gostota celične stene pri vlažnosti $u$	$\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
$p_0$	nasičen parni tlak vodne pare	$[Pa]$
R	splošna plinska konstanta ( $8,31 \frac{J}{mol K}$ )	$\left[ \frac{J}{mol K} \right]$
T	temperatura	$[K]$
$\frac{\partial \varphi}{\partial u}$	recipročna vrednost sorpcijskega koeficiente	

Gostoto celične stene pri vlažnosti ( $d_u^w$ ) lahko izračunamo iz gostote celične stene v absolutno suhem stanju kot:

$$d_u^w = \frac{1,5}{1 + 0,015 u} \quad \dots(12)$$

Vrednost difuzijskega koeficiente vodne pare ( $D_V$ ), izračunane po enačbi (11) so prikazane na sliki 7, skupaj z vrednostmi difuzijskega koeficiente za vezano vodo v prečni smeri ( $D_{BT}$ ).



Slika 7 Difuzijski koeficient vezane vode v prečni smeri in difuzijski koeficient vodne pare pri različnih temperaturah v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa (po Siau, 1984)

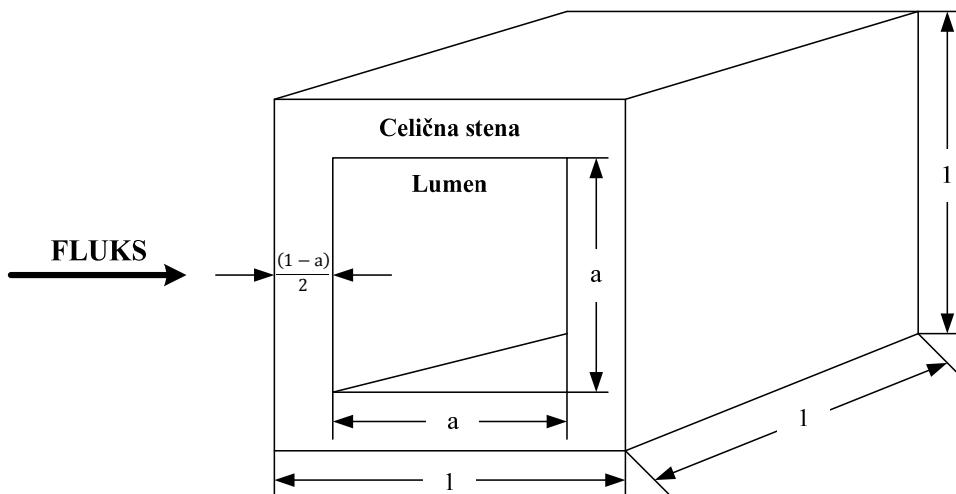
Difuzijski koeficient vodne pare ( $D_V$ ) je približno za tri do štiri magnitude višji od koeficiente difuzije vezane vodne ( $D_{BT}$ ), zaradi dosti višje vsebnosti vlage v celičnih stenah. Difuzijski koeficient parne difuzije v nasprotju s koeficientom vezane vodne difuzije z naraščajočo vlažnostjo pada. 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 hitreje pri višjih vlažnostih. Ta fenomen lahko razložimo z nelinearnim spremenjanjem kvocienta – razmerja  $\frac{\partial u}{\partial \varphi}$ , ki sledi poteku sorpcijske izoterme. Koeficient difuzije vodne pare v lumnih temperaturno narašča zaradi naraščanja parnega tlaka. Rast koeficiente difuzije vodne pare v lumnih v odvisnosti od povečevanja temperature povzroča naraščanje parcialnega tlaka.

#### 2.1.4.4 Difuzija vode v lesu v prečni smeri

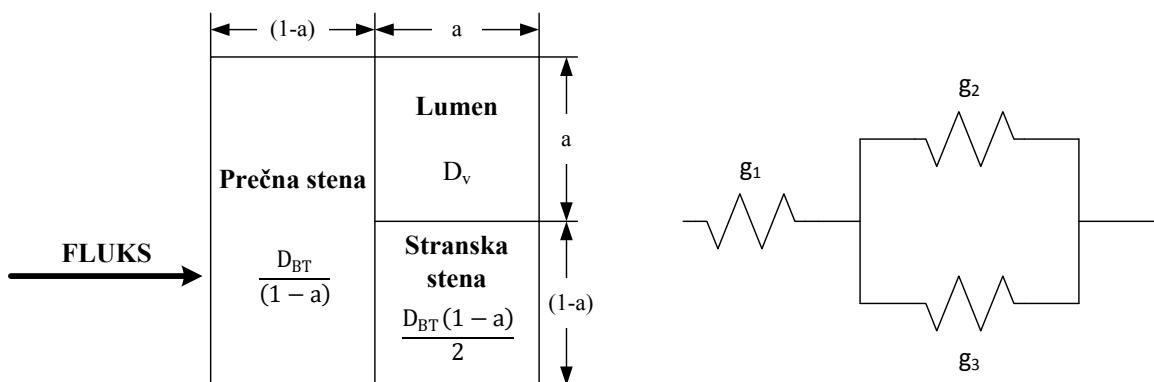
Zaradi velikih sprememb difuzijskega koeficienta vodne pare v lumnih ( $D_V$ ) in difuzijskega koeficienta vezane vode v celični steni ( $D_{BT}$ ), v povezavi s spremembami temperature in vlažnosti, je potrebno ta dva dejavnika upoštevati pri določanju difuzijskega koeficienta lesa v prečni smeri ( $D_T$ ). V območju vlažnosti nasičenja celičnih sten je razmerje med ( $D_V$ ) in ( $D_{BT}$ ) približno 10, pri lesni vlažnosti 15% približno 100 in blizu absolutno suhega stanja kar 2000. S pomočjo geometričnega modela lesne celice (Slika 8) lahko postavimo model prečne masne prevodnosti lesa (Slika 9) iz katerega je razvidno, da tvorita stranska stena in lumen paralelno prevodno pot. Ob tem je prevodnost stranske stene, zanemarljivo majhna v primerjavi s prevodnostjo lumna. Prečno prevodnost lahko zapišemo na naslednji način:

$$\frac{1}{g_T} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} \quad \dots(13)$$

$g_T$	prečna prevodnost lesa	Type equation here.
$g_1$	prevodnost prečnih sten	Type equation here.
$g_2$	prevodnost lumna	Type equation here.



Slika 8 Geometrijski model olesenele celice (Spremenjeno po: Siau, 1984)



Slika 9 Model prečne masne prevodnosti sestavljen iz delnih prevodnosti:  $g_1 = \frac{D_{BT}}{(1-a)}$ ,  $g_2 = D_V$ ,  $g_3 = \frac{D_{BT}(1-a)}{a}$  (Spremenjeno po: Siau, 1984).

Iz enačbe izrazimo  $g_T$ , in dobimo

$$g_T = \frac{g_1 \cdot g_2}{g_1 + g_2} \quad \dots(14)$$

Oba difuzijska koeficienta ( $D_V$ ) in ( $D_{BT}$ ) sta izražena s koncentracijo vode v celični steni, kar dosežemo z razmerjem  $\frac{\partial C_W}{\partial C}$ , ki pomeni recipročno vrednost deleža celičnih sten v lesu.

$$\frac{\partial C_W}{\partial C} = \frac{1}{V_W} = \frac{1}{1 - V_a} = \frac{1}{1 - a^2} \quad \dots(15)$$

Prevodnost lahko izrazimo z difuzijskimi koeficienti na naslednji način:

$g_T = D_T$ ,  $g_1 = \frac{D_{BT}}{(1-a)^2(1-a)}$ ,  $g_2 = \frac{D_V}{(1-a^2)}$ . Ko te izraze vstavimo v prejšnjo enačbo dobimo:

$$D_T = \frac{1}{(1 - a^2)} \cdot \frac{D_{BT} D_V}{[D_{BT} + D_V (1 - a)]} \quad \dots(16)$$

$D_T$  difuzijski koeficient vezane vode v prečni smeri les  $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

Pri lesnih vlažnostih pod 15% postane prevodnost v celičnih lumnih ( $g_2$ ) izredno visoka v primerjavi z majhno prevodnostjo prečnih celičnih sten ( $g_1$ ). Zato pri nižjih lesnih vlažnostih prevodnost v celičnih lumnih ( $g_2$ ) zanemarimo, kar v končnem rezultatu pomeni napako nekaj odstotkov.

$$D_T = \frac{D_{BT}}{(1 - a^2)(1 - a)} \quad \dots(17)$$
$$u < 15\%$$

Osnova enačb (en. 16 in 17) temelji na pretoku vode skozi celično steno, kjer na prevodnost vpliva celotna debelina celične stene. Pri sušenju lesa je mogoče priti do višjih koeficientov kot so jih izračunali iz enačb (en. 16 in 17) (Stamm in Nelson, 1961), Comstock, 1963, Choong, 1969, Avramidis in Siau, 1987). Ti izračuni so namreč narejeni na osnovi adsorpcijskih podatkov pri relativno nizki hitrosti zraka.

Crank (1956) je ugotovil, da bi bile vrednosti dobljene v procesu desorpcije in adsorpcije enake, če se difuzijski koeficient ne bi spremenjal z vlažnostjo oz. koncentracijo. Difuzijski koeficient s koncentracijo vode v lesu narašča, zato so časi uravnovešanja bistveno kraši v procesu adsorpcije kot v procesu desorpcije. Zato je pričakovano difuzijski koeficient merjen v procesu adsorpcije višji od difuzijskega koeficiente merjenega v procesu desorpcije. Comstock (1963) pa je pri višjih vlažnostih ugotovil ravno nasprotno. Razlago je našel z relaksacijskim mehanizmom, ki se mora zgoditi med adsorpcijo in z zmanjševanjem ravnovesne vlažnosti, ki je posledica površinskih tlačnih napetosti.

### 2.1.5 Molekularni tok vode pri nestacionarnih pogojih

Za transport pri nestacionarnih pogojih je značilno, da sta tok (fluks) in koncentracijski gradient spremenljiva v času in prostoru. Pri stacionarnem transportu sta namreč ti dve komponenti konstantni. Navlaževanje in sušenje lesa zato opisujemo le s transportnimi enačbami pri nestacionarnih pogojih.

### 2.1.5.1 Drugi Fickov zakon

Drugi Fickov zakon opisuje transport pri nestacionarnih pogojih in je izpeljan iz prvega Fickovega zakona. Pri tem ne upošteva, da koeficient difuzije z vlažnostjo hitro narašča, ampak je konstanten.

$$\left( \frac{\partial C}{\partial t} \right) = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad \dots(18)$$

T	Čas	[s]
C	koncentracija vode	$\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
X	Dolžina	[m]

Hitrost toka vode lahko tako ob predpostavki, da je koeficient konstanten zapišemo na naslednji način (Siau, 1995):

$$\left( \frac{\partial m}{\partial t} \right) = \overline{K_u} A \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \Delta x \quad \dots(19)$$

$\left( \frac{\partial m}{\partial t} \right)$	tok vode	$\left[ \frac{kg}{s} \right]$
A	površina vzorca, pravokotna na tok vode	[m <sup>2</sup> ]
X	dolžina v smeri toka	[m]
U	vlažnost	[%]
$K_u$	povprečna difuzijska prevodnost vezane vode	$\left[ \frac{kg}{m s \%} \right]$

Hitrost prehoda vode skozi vzorec lahko izračunamo tudi preko produkta povprečne nominalne gostote, gostote vode, površine vzorca in hitrosti spremjanja vlažnosti.

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\bar{R}_u \cdot A \cdot \rho_0}{100} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad \dots(20)$$

$\bar{R}_u$	nominalna gostota lesa pri povprečni lesni vlažnosti	$\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
$\rho_0$	normalna gostota vode, $1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

Po izenačitvi enačb 19 in 20 dobimo transporta vode izraženo s povprečno nominalno gostoto, normalno gostoto vode in povprečno prevodnostjo vezane vodne difuzije:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{100 \bar{K}_u}{\bar{R}_u} \frac{\partial^2 u^2}{\partial x^2} \quad \dots(21)$$

Enačbi 22 in 21 sta identični saj velja:

$\bar{D}$	povprečni difuzijski koeficient	$\left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$
$\bar{R}_u$	nominalna gostota lesa pri povprečni lesni vlažnosti	$\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

Analitične rešitve difuzijskih diferencialnih enačb s konstantnimi koeficienti je natančneje obdelal Crank (1956). Rešitve temeljijo na sledečih predpostavkah robnih pogojev in zahtevah:

1. Koeficienti so konstantni,
2. Temperatura ( $T$ ), tlak ( $p$ ) in vlažnost ( $u$ ) imajo začetne vrednosti enake po celotnem preseku vzorca,
3. Zunanje površine vzorca v trenutku vzpostavijo ravnovesje s temperaturo, vlažnostjo in tlakom okolice,
4. Prehod toplote, plina ali vlage je simetričen po celotnem vzorcu.

Rešitve difuzijskih diferencialnih enačb, ki temeljijo na teh predpostavkah so zadovoljive le na primeru toplove. V primeru prenosa vode ali plina je približna rešitev zadovoljiva le v primeru majhnih goničnih potencialov, zato je diferencialno enačbo bolje zapisati v končni obliki. Pri transportu vode lahko koeficiente določimo tudi z uporabo povprečne vlažnosti, oziroma v primeru prehoda plina aritmetično sredino začetnega in končnega povprečja tlakov. Reševanje problemov nestacionarnih stanj se bistveno poenostavi z vpeljavo enačb brezdimenzijskih oblik. V enačbo 22 tako vpeljemo brezdimenzijski spremenljivki  $E$  (brezdimenzijski potencial) in  $\tau$  (brezdimenzijski čas). Brezdimenzijski potencial predstavlja potencial v poljubni dani točki znotraj vzorca in v poljubnem danem času in je definiran:

$$E = \frac{T - T_z}{T_K - T_z} = \frac{P^2 - P_z^2}{P_K^2 - P_z^2} = \frac{u - u_z}{u_K - u_z} \quad \dots(23)$$

$E$	brezdimenzijska temperatura, vlažnost ali tlak v času $t$ na razdalji $x$ od sredine vzorca,	Type
$T, u, P^2$	vrednost spremenljivke v času $t$ na razdalji $x$ ,	Type
$T_z, u_z, P_z^2$	začetna vrednost sprem., ki je po celiem vzorcu enaka	Type
$T_K, u_K, P_K^2$	vrednost konstantne sprem. na zunanji površini, ki je ves čas konstantna	

Brezdimenzijski čas je definiran kot:

$$\tau = \frac{t \cdot D}{a^2} \quad \dots(24)$$

$\tau$	brezdimenzijski čas	Type equation here.
$t$	Čas	[s]
$D$	difuzijski koeficient	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$
$a$	$\frac{L}{2}$ ...polovica debeline	[m]

Če te zamenjave vpeljemo v splošno enačbo za nestacionarne pogoje dobimo naslednjo obliko:

$$\frac{\partial E}{\partial \tau} = D \cdot \frac{\partial^2 E^2}{\partial X^2} \quad \dots(25)$$

$X$	brezdimenzijska razdalja v vzorcu pravilnih oblik $\left(\frac{x}{a}\right)$	Type equation here.
-----	--	---------------------

Ker se lesna vlažnost pogosto podaja kot povprečna je smiselno enačbo (25) reševati s pomočjo povprečnega potenciala ( $\bar{E}$ ), ki ga izračunamo z integracijo enačbe. Povprečni potencial je tako definiran kot:

$$\bar{E} = \frac{\bar{u} - u_z}{u_k - u_z} \quad \dots(26)$$

$\bar{E}$	povprečna brezdimenzijska vlažnost v času t	Type equation here.
$\bar{u}$	povprečna vlažnost v času t	[%]
$u_z$	lesna vlažnost ob začetku eksperimenta	[%]
$u_k$	lesna vlažnost na koncu eksperimenta	[%]

### 2.1.5.2 Snovna prestopnost in koeficient snovne prestopnosti

Med sušenjem ali navlaževanjem pride do pojava snovne prestopnosti (konvekcije). Voda prehaja v ali iz površine s prestopnostjo. Sposobnost toka vode s površine označujemo s koeficientom snovne prestopnosti. Njena recipročna vrednost predstavlja difuzijski upor v sloju zraka. Snovno prestopnost definiramo kot:

$$S = h_c = \frac{J_m}{C_s - C_a} \quad \dots(27)$$

$J_m$	masni tok	$\left[ \frac{kg}{s} \right]$
$C_s$	koncentracija vode v lesu na površini	Type equation here.
$C_a$	koncentracija vode v lesu, ki je v ravovesju z okoliškim zrakom	Type equation here.
$h_c$	koeficient snovne prestopnosti	$[s^{-1}]$

Koncentracijo vode v lesu označujemo z oznako ( $C_w$ ), medtem ko se koncentracija vode v zraku označi s ( $C_z$ ). Snovno prestopnost izrazimo z več možnimi načini, kar je odvisno od uporabe različnih potencialov (Preglednica 2). Pomembne so oznake koncentracijskih baz na katerih so bili koeficienti določeni. Koncentracija vode v zraku je tako bistveno nižja od koncentracije vode v lesu v ravovesni fazi. Iz tega sledi, da je ( $h_c$ ) bistveno manjši od ( $h_v$ ). Možno pa jih je izenačiti s preoblikovanjem potencialov s pomočjo razmerja razlik koncentracij.

Preglednica 2 Koeficienti snovne prestopnosti, izraženi z različnimi potenciali (Siau, 1995)

Koeficient snovne prestopnosti, izražen z različnimi potenciali		
Koeficient	Potencial	Enota
$h_c$	koncentracija v lesu, $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$	$\left[ \frac{m}{s} \right]$
$h_v$	koncentracija v zraku, $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$	$\left[ \frac{m}{s} \right]$
$h_u$	vlažnost lesa, [%]	$\left[ \frac{kg}{m^2 s} \right]$
$h_p$	zračni tlak, [Pa]	$\left[ \frac{kg}{m^2 s Pa} \right]$

$$h_v = h_c \frac{\Delta C_{les}}{\Delta C_{zrak}} = \frac{h_c \cdot R_u \cdot \rho_w \cdot R \cdot T}{0,018 \cdot \rho_0} \cdot \frac{\Delta u}{\Delta \varphi} \quad \dots(28)$$

$$\Delta u = u_s - u_r$$

$$\Delta \varphi = \varphi_s - \varphi_a$$

Podobno izpeljavo lahko naredimo tudi s koeficientom snovne prestopnosti, ki temelji na osnovi parcialnih tlakov. To izpeljavo uporabljamo takrat, ko med seboj primerjamo podatke različnih raziskovalcev, zaradi nizke odvisnosti od temperature:

$$h_p = h_c \cdot \frac{\Delta C_{les}}{\Delta p} = \frac{h_c \cdot d_u \cdot \rho_w}{\rho_0} \cdot \frac{\Delta u}{\Delta \varphi} \quad \dots(29)$$

V zgornjih enačbah pomenijo:

$\varphi_s$	relativna zračna vlažnost v ravnovesju s površino lesa	[%]
$\varphi_a$	relativna zračna vlažnost okolice	[%]
$u_s$	vlažnost lesa na površini	[%]
$u_r$	vlažnost lesa v ravnovesju z relativno zračno vlažnostjo okolice	[%]
$h_v$	koeficient snovne prestopnosti na osnovi relativne zračne vlažnosti	$[s^{-1}]$
$h_c$	koeficient snovne prestopnosti	$[s^{-1}]$
$C_{les}$	koncentracija vode v lesu	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
$C_{zrak}$	koncentracija vode v zraku	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
$\rho_w$	gostota lesa	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
$R_u$	nominalna gostota lesa	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
$p_0$	tlak nasičenja vodne pare	[Pa]

Na koeficient snovne prestopnosti vpliva več dejavnikov kot so: viskoznost, hitrost zraka, gostota, difuzivnost skozi sloj zraka, temperaturna razlika med površino in okoliškim zrakom. Veličine v medsebojnih zvezah definirajo brezdimenzijska števila (Re) in (Sc) število. Reynoldsovo (Re) število je torej brezdimenzijska hitrost, ki razmejuje laminarni in turbulentni tok, odvisno od tega ali je konvekcija prosta ali prisiljena. Schmidovo število (Sc) označuje razmerje med viskoznostjo in difuzivnostjo. Ti dve števili sta združeni v brezdimenzijsko Sherwoodovo število (Sh), ki predstavlja brezdimenzijski koeficient snovne prestopnosti. Ko Reynoldsovo število preseže vrednost 16 000, govorimo o turbulentnem toku.

$$Re = \frac{L \cdot \bar{v}}{\nu} \quad \dots(30)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_z}$$

L	dolžina površine v stiku z zrakom	[m]
Re	Reynoldsovo število	
$\bar{v}$	povprečna hitrost zraka	$\left[ \frac{m}{s} \right]$
$\nu$	kinematična viskoznost zraka	$\left[ \frac{m^2}{s} \right]$
$\mu$	dinamična viskoznost	$\left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right]$
$\rho_z$	gostota zraka	$\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho_z D_z} \quad \dots(31)$$

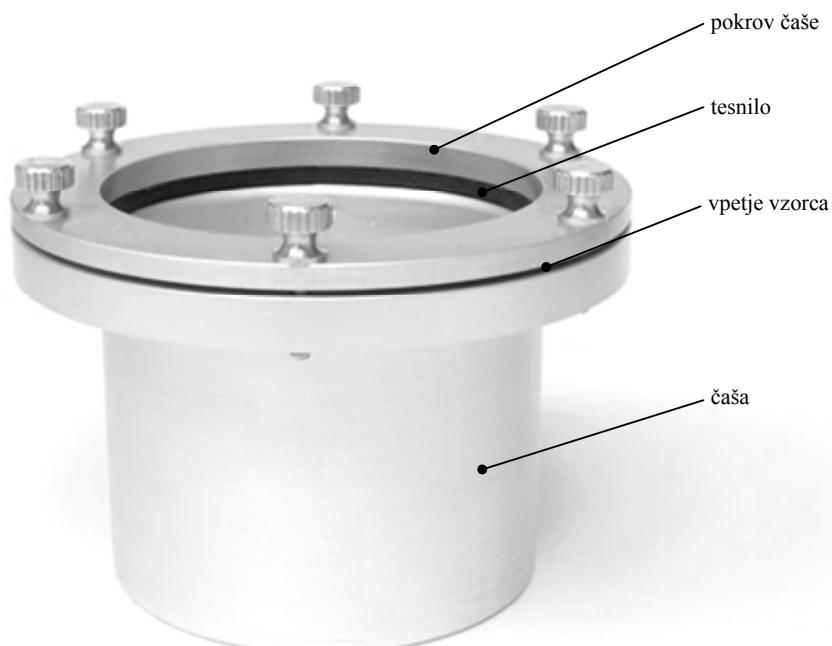
Sc	Schmidovo število	Type equation here.
$\mu$	dinamična viskoznost	$\left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right]$
$\rho_z$	gostota zraka	$\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
D <sub>z</sub>	Koeficient difuzivnosti vodne pare v zraku	$\left[ \frac{m^2}{s} \right]$

## 2.1.6 Določanje koeficienta difuzivnosti

Pri raziskovanju difuzivnosti lesnega tkiva se je že uveljavilo več metod določanja koeficientov difuzivnosti. Nekatere so se že tako uveljavile, da so postale standardizirane kot npr. stacionarna metoda čaše, druge, predvsem nestacionarne, pa zahtevajo več matematičnega znanja in tudi zahtevnejšega eksperimentalnega dela.

### 2.1.6.1 Določanje koeficientov difuzivnosti po stacionarni metodi

Standardizirana in najpogosteje uporabljana metoda za ugotavljanje koeficientov difuzivnosti s stacionarnim eksperimentom je tako imenovana »metoda čaše«. Preizkušanec standardnih dimenzij uravnovesimo na željeno začetno ravnovesno vlažnost in vpnemo v čašo s tesnili (Slika 10), v katero predhodno dodamo nekaj soli in destilirane vode za vzpostavitev novih klimatskih pogojev v čaši (najpogosteje klimatski pogoji v katerih je bil uravnovešen vzorec). Čašo z vpetim preizkušancem postavimo v kad, kjer smo prav tako predhodno s solno raztopino vzpostavili želene klimatske pogoje. Razlika v koncentraciji vodne pare v zraku med klivo v čaši in zunaj nje ter razlika v vlažnosti površin preizkušanca je razlog za difuzijo vodne pare skozenj.



Slika 10 Čaša za določitev koeficienta difuzivnosti po stacionarni metodi (DIN 53122)

Čašo s preizkušancem tehtamo v določenih časovnih intervalih do konstantne mase. Koeficient difuzivnosti izračunamo iz spremembe mase v časovnem intervalu  $(\frac{\Delta m}{\Delta t})$ , debeline vzorca (d), nominalne gostote ( $R_u$ ), razlike vlažnosti površin preizkušanca ( $\Delta u$ ) in površine preizkušanca izpostavljene prehodu vlage (A) po enačbi:

$$D = \frac{\Delta m \cdot d}{\Delta t \cdot A \cdot R_u \cdot \Delta u} \quad \dots(32)$$

D	difuzijski koeficient,	$\left[ \frac{m^2}{s} \right]$
$\Delta m$	sprememba mase,	[g]
$\Delta t$	časovni interval,	[s]
$\Delta u$	razlika lesne vlažnosti,	$\left[ \frac{kg}{kg} \right]$
d	debelina preizkušanca,	[m]
A	površina vzorca, ki je pravokotna na tok vodne pare,	$[m^2]$
$R_u$	osnovna gostota lesa pri lesni vlažnosti u	$\left[ \frac{g}{m^3} \right]$

#### 2.1.6.2 Določanje koeficientov difuzivnosti po nestacionarni metodi

Leta 1956 je Crank predstavil enačbo, iz katerih je možno izračunati potencial v času in prostoru. Podal je enačbo ob danih robnih in začetnih pogojih v obliki vrste, ki izredno hitro konvergira.

$$\bar{E} = 1 - 1,27 \cdot e^{-2,47 \cdot \tau} \cdot \cos \left[ 90^\circ \left( \frac{x}{a} \right) \right] + 0,425 \cdot e^{-22,2 \cdot \tau} \cdot \cos \left[ 270^\circ \left( \frac{x}{a} \right) \right] \quad \dots(33)$$

Pri izračunu potenciala v sredini vzorca ( $x = 0$ ), se enačba poenostavi v naslednjo obliko:

$$\bar{E} = 1 - 1,27 \cdot e^{-2,47 \cdot \tau} + 0,425 \cdot e^{-22,2 \cdot \tau} \quad \dots(34)$$

Če je  $\tau > 0.2$ , je dovolj, da uporabimo v enačbah (33 in 34) le prvi člen konvergirajoče vrste. V primeru vrednosti  $0.07 < \tau < 0.2$ , oba člena vrste pomembno vplivata na rezultat in s tem na brezdimenzijsko masno spremembo ( $\bar{E}$ ).

Brezdimenzijsko povprečno vrednost ( $\bar{E}$ ) pri  $\tau > 0.2$  izračunamo z integracijo enačb po Cranku (1956):

$$\bar{E} = 1 - 0,811 \cdot e^{-2,47 \cdot \tau} \quad \dots(35)$$

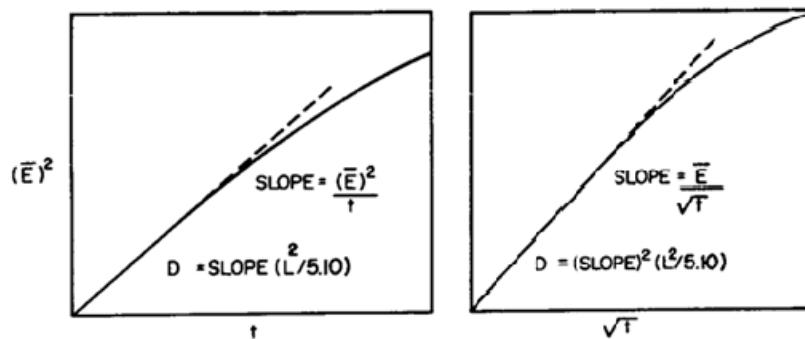
Povprečna brezdimenzijska sprememba mase ( $\bar{E}$ ) za kratke čase  $\tau < 0.3$  izračunamo po naslednji enačbi:

$$\bar{E} = 1,13\sqrt{\tau} \quad \dots(36)$$

Iz enačbe (36) lahko izrazimo difuzijski koeficient kot:

$$D = \frac{(\bar{E})^2 L^2}{5,1 \cdot t} \quad \dots(37)$$

Difuzijski koeficient je možno izraziti s pomočjo premice, tangente na krivuljo povprečne spremembe mase ( $\bar{E}$ ) v začetnem delu eksperimenta (Slika 11).



Slika 11 Določitev difuzijskega koeficiente po nestacionarni metodi v primeru obojestranskega navlaževanja (Siau, 1995, str. 154)

Krivulji imata v začetku običajno manjši naklon. V literaturi sta za ta odklon pogosto navedena dva razloga, in sicer površinske konvekcijske izgube in pojav površinskih napetosti.

Enačba 37 za izračun difuzijskega koeficiente po nestacionarni metodi velja v primeru obojestranske adsorpcije / desorpcije. Pri določanju difuzijskega koeficiente z enostransko adsorpcijo / desorpcijo se enačba preoblikuje v:

$$D = \frac{(\bar{E})^2 L^2}{1,273 \cdot t} \quad \dots(38)$$

Newmanova enačba iz leta 1931, ki jo je objavil Skaar leta 1954 povezuje brezdimenzijsko spremembo mase ( $\bar{E}$ ) z brezdimenzijskim časom ( $\tau$ ) pri različnih vrednostih Biotovega števila ( $H_a$  ali  $\frac{s \cdot a}{D}$ ).

Newmanova enačba temelji na predpostavkah, da:

1. so difuzijski koeficienti konstantni
2. je masni tok vode iz površine vzorca v okolico enak masnemu toku vode iz notranjosti vzorca na površino
3. je začetna koncentracija vode konstantna skozi celoten presek vzorca.

Prvi del Newmanove enačbe definira linearno odvisnost med ( $\bar{E}$ ) in ( $\tau$ ). Krivulja neskončnega Biotovega števila seka abscisno os pri vrednosti  $\bar{E} = 0,5$  in ordinatno os pri vrednosti  $\tau = 0,2$ , ki jo lahko imenujemo tudi polovična vrednost brezdimenzijskega časa ( $\tau_{0,5}$ ), ki ustreza polovičnemu odzivu  $\bar{E}$ . Linearnost vseh krivulj pri vrednosti  $\bar{E} = 0,5$  omogoča izpeljavo linearne enačbe med polovičnim časom in vrednostjo Biotovega števila kot:

$$\tau_{0,5} = 0,2 \cdot \frac{0,7 \cdot D}{S \cdot a} \quad \dots(39)$$

$\tau_{0,5}$  polovična vrednost brezdimenzijskega časa Type equation here.

D difuzijski koeficient (notranji upor)  $\left[ \frac{m^2}{s} \right]$

S koeficient snovne prestopnosti (zunanji upor)  $\left[ \frac{m}{s} \right]$

$a = \frac{L}{2}$  polovična debelina [m]

Difuzijski koeficient, kjer zanemarimo površinski upor, izračunamo iz polovičnega časa  $t_{0,5}$ .

$$D_a = 0,2 \cdot \frac{a^2}{t_{0,5}} \quad \dots(40)$$

$D_a$  difuzijski koeficient pri  $\bar{E} = 0,5$  in  $\tau = 0,2$   $\left[ \frac{m^2}{s} \right]$

Iz definicije brezdimenzijskega časa in enačb (39 in 40) in z deljenjem vseh členov z  $0,2D$  izpeljemo enačbo, ki predstavlja celoten difuzijski upor.

$$\frac{1}{D_a} = \frac{1}{D} + \frac{3,5}{S \cdot a} \quad \dots(41)$$

$\frac{1}{D_a}$  celotni difuzijski upor  $\left[ \frac{s}{m^2} \right]$

$\frac{1}{D}$  notranji upor  $\left[ \frac{s}{m^2} \right]$

$\frac{3,5}{S \cdot a}$  zunanji upor  $\left[ \frac{s}{m^2} \right]$

## 2.2 LASTNOSTI TOPOTNO OBDELANEGA LESA

Začetki raziskav topotne modifikacije lesa segajo v sredino prejšnjega stoletja, največji napredek pa je bil narejen v zadnjih 30 letih. Topotna modifikacija je segrevanje lesa pri določeni temperaturi in zmanjšanem kisiku (Militz, 2002). Pri tem se lesu spremeni struktura in kemijska sestava.

### 2.2.1 Kemične spremembe topotno obdelanega lesa

Kemične spremembe pri topotno obdelanem lesu so v prvi vrsti posledica hidrolize polioz v celični steni pod vplivom povišane temperature. Lesni polimeri, kot so celuloza, hemiceluloza in lignin se delno zamrežijo, zmanjša se njihovo število hidroksilnih (OH) skupin in pojavijo se nezaželena cepljenja polimernih verig, kar je bilo potrjeno v več raziskavah (Homan in sod., 2000; Rapp in Sailer, 2001; Fengel in Wegener, 2003; Hill, 2006; Windeisen in sod., 2007; Yildiz in sod., 2006; Esteves in sod., 2007).

Najhitreje se začne razpad hemiceluloz, ki so najmanj obstojna komponenta olesenele celične stene. Pri topotni razgradnji hemiceluloz nastajajo acetilne skupine, ko so nestabilne in pripeljejo do nastanka etanojske kisline (Hill, 2006). Weiland in Guyonnet (1997) sta ugotovila, da močno razgradnjo hemiceluloz povzroča temperatura topotne obdelave med 200°C in 260 °C. Znižan pH in visoke temperature delujejo kot katalizator in pospešujejo hidrolizo polisaharidov in lignina, kar vodi do dodatnega sproščanja kislin in aldehydov in posledično dodatnega znižanja pH vrednosti (Tjeerdsma in sod., 1998; Podgorski in sod., 2000; Hill, 2006). Topotna stabilnost hemiceluloz je višja v primeru manjšega števila acetilnih skupin. Iglavci so tako termično stabilnejši v primerjavi z listavci, saj vsebujejo manjši delež hemiceluloz in acetilnih skupin (Hill, 2006). Sorazmerno s stopnjo modifikacije se povečuje tudi vnetljivost topotno obdelanega lesa. (Patzelt in sod., 2002)

Razpad toplotno stabilnejše celuloze se zaradi njene kristalinične zgradbe začne pri višjih temperaturah in poteka počasneje v primerjavi z hemicelulozo. Kristalinični deli celuloznih molekul razpadajo pri temperaturi med 300 °C in 340 °C (Fengel in Wegener, 2003). Pri segrevanju celuloze nad 170 °C se izločata ogljikov monoksid (CO) in ogljikov dioksid (CO<sub>2</sub>) (Esteves in Pereira, 2009). Fengel in Wegener (2003) navajata, da je stopnja razkroja celuloze ob prisotnosti vode nižja. Pri depolimerizaciji celuloze najpogosteje nastane levoglukozan, ki se najhitreje tvori pri temperaturah višjih od 300 °C. Razgradnja levoglukozana zmanjšuje povezavo kristaliničnih področij celuloze in s tem še dodatno znižuje število prostih -OH skupin (Esteves in Pereira, 2009).

### 2.2.2 Izguba mase toplotno obdelanega lesa

Ena izmed najbolj opaznih lastnosti toplotno obdelanega in predelanega lesa je izguba mase (Hill, 2006). Pogosto se jo uporablja za določitev stopnje toplotne predelave. Z naraščajočo temperaturo, ki ima večji vpliv od trajanja postopka, se povečuje izguba mase (Welzbacher in sod., 2007). Še posebej je izguba mase izrazita pri temperaturi predelave nad 200°C, ko prihaja do intenzivnejšega izparevanja ekstraktivov in razkroja nekaterih komponent lesa (Hakkou in sod., 2005). Hill (2006) navaja, da je pri enakih pogojih toplotne obdelave lesa izguba mase pri iglavcih nižja kot pri listavcih.

Kot negativna posledica toplotne predelave lesa je izpostavljen poslabšanje določenih mehanskih lastnosti (Yildiz in sod., 2006; Windeisen, 2008). Kot navajajo Wideisen s sodelavci (2008) ter Winandy in Rowel (2005) se znižata modul elastičnosti in upogibna trdnost kar povezujejo z znižanjem vsebnosti celuloze, lignina in ksiloze. Zmanjša se tlačna trdnost vzporedno z vlakni in poveča trdota po Brinellu (Esteves in Pereira, 2009). Ringers (2007) navaja zmanjšanje trdnosti lesa med 5% in 50%. Poveča se tudi krhkost lesa (Poncsák, 2007). To lahko povežemo s cepitvijo dolgih molekul hemiceluloz in amorfne dela celuloze ter hkratnim naraščanjem stopnje kristaliničnosti celuloznih molekul (Hakko in sod., 2005; Poncsák in sod., 2007). Posledično je uporaba toplotno obdelanega lesa v bolj obremenjenih konstrukcijah omejena (Sailer in sod., 2000).

### **2.2.3 Barva in vonj toplotno obdelanega lesa**

Zaradi postopka toplotne obdelave se spremeni barva lesa, ki postaja temnejše rjave barve z naraščanjem stopnje modifikacije (Rapp in Sailer, 2001; Mayes in Oksanen, 2003). Kljub temnejšemu odtenku pa površina modificiranega lesa ni odporna proti fotodegradaciji (Mayes in Oksanen, 2003). Pojavi se tudi vonj po dimu, ki sčasoma izgine (Rapp, 2001). Navaja, pa se tudi vonj po karameli zaradi izparevanja furfurala (Raggers, 2007).

### **2.2.4 Fizikalne lastnosti toplotno obdelanega lesa**

OH skupine so najbolj reaktivne skupine v lesu in mesta na katera se veže voda v postopku navlaževanja (adsorpcije). Zmanjšanje števila prostih dostopnih -OH skupin v lesu povzroči manjšo interakcijo lesa z vodo v primerjavi z nemodificiranim lesom (Homan in sod., 2000; Esteves in Pereira, 2009), posledično se zmanjšajo dimenzijske spremembe lesa (Kamdem in sod., 2002; Boonstra in sod., 2006; Rapp in sod., 2008), znižajo se higroskopnost, ravnovesna vlažnost lesa in sorpcijska histereza (Homan in sod., 2000; Gorišek in sod., 2004; Hill, 2006; Metsa-Kortolainen, 2006; Majka, Weres in Olek, 2010; Esteves in Pereira, 2009; Gorišek in Straže, 2011) in izboljša se odpornost proti glivam in lesnim škodljivcem (Kamdem in sod., 2002; Hill, 2006; Boonstra in sod., 2007).

Moren in Shelstedt (1984) sta prva poročala o popolni reverzibilnosti padca higroskopnosti med toplotno obdelavo lesa, po namakanju toplotno obdelanih vzorcev iz borove beljave v vodi do napojitvene vlažnosti. Obataya in sod. (2000) podobno poročajo o dvigu higroskopnosti lesa Japonske ciprese skoraj do inicialne vrednosti, če se les navlaži do visoke vlažnosti z uravnovešanjem na visoki relativni zračni vlažnosti, pri parjenju ali kuhanju. Podobno je bilo ugotovljeno tudi na primeru breze (Sehlstedt-inPersson, 2008). Rousset in sod. (2004) navajajo, da toplotna obdelava zmanjša difuzijski tok vezane vode za 40 % do 60 % in ne vpliva na permeabilnost lesnega tkiva. Zmanjša se tudi difuzijski tok vodne pare (Sayar in Tarmian, 2012)

## 2.2.5 Postopki toplotne obdelave

V Evropi se je razvilo pet širše uporabljenih postopkov termične modifikacije: *Thermowood* – Finska, *Retification* – Francija, *Oil Heat Treatment (OHT)* – Nemčija in *Plato* – Nizozemska, ki se med seboj razlikujejo v številu korakov, deležu kisika ali drugih plinov v atmosferi med postopkom modifikacij, temperaturi in vlažnosti lesa pred modifikacijo.

ThermoWood je najpogosteje uporabljan (90 % vsega modificiranega lesa) postopek modifikacije lesa v Evropi. Patentiral ga je Viitaniemi s sodelavci leta 1997. Pri tem postopku se lahko uporabi svež ali že sušen les. Svež les se v začetnem postopku najprej posuši pri visokih temperaturah. Postopek je primeren za modifikacijo listavcev in iglavcev, vendar je potrebna prilagoditev parametrov posamezni lesni vrsti (Mayes in Oksanen, 2003). Temelji na segrevanju lesa pri temperaturah od 180 °C do 240 °C in uporabi vodne pare. Sestavlja ga tri faze: 1.faza – do 48 h segrevanja na temperaturo od 100 °C do 150 °C s pomočjo toplote in vodne pare, 2. faza – segrevanje na temperaturo od 180 °C do 240 °C in vzdrževanje temperature 2-4 h, odvisno od želene stopnje modifikacije. Temu sledi ohlajanje in kondicioniranje (3. faza), v tej fazi je potrebno z ustreznimi parametri preprečiti nastanek razpok. Ko se les ohladi na 80-90 °C sledi navlaževanje na 4-7% vlažnost. Parametri postopka se nastavljajo glede na izbrano drevesno vrsto, njeno začetno vlažnost in želeno stopnjo modifikacije (Jämsä in Viitaniemi, 2001; Syrjänen in Oy, 2001; Mayes in Oksanen, 2003).

Plato postopek sta razvila Militz in Tjeerdsma leta 2001. S proizvodnjo je začelo podjetje Plato BV na Nizozemskem leta 2006. Poteka v petih stopnjah (The Plato technology, 2006). V prvi fazi se les najprej posuši na približno 10% vlažnosti v klasičnih sušilnicah. V drugi fazi hidrotermične obdelave se les segreje na 150-190 °C pri povišanem tlaku in vodni pari. Med to fazo razпадajo hemiceluloze in lignin. Celuloza ostane nedotaknjena, kar je bistveno za ohranitev mehanskih lastnosti. Ta faza traja štiri do pet ur. V tretji fazi se les ponovno posuši v klasičnih sušilnicah na 10% vlažnost, kar traja od 3 do 5 dni. V četrti fazi, ki jo imenujejo utrjevanje, les ponovno segrejejo na 150-190 °C, vendar tokrat v suhih razmerah in atmosferskem tlaku. Trajanje te faze je odvisno od debeline lesa in sicer od 14 h do 16 h. V zadnji peti fazi se les uravnoveša na želeno vlažnost (dva do tri dni).

Pri »Retification« postopku se les najprej posuši pri temperaturi med 160°C in 180°C na približno 12 % vlažnosti, nato se poviša temperatura. Ena izmed posebnosti tega postopka je uporaba temperature, ki ustreza temperaturi steklastega prehoda za določeno lesno vrsto, kar pomeni temperature do 240 °C. Druga posebnost je uporaba dušikove atmosfere med modifikacijo, s katero zagotavljajo manj kot 2 % kisika. Les se po modifikaciji ohladi z razprševanjem vode. Stopnjo modifikacije se uravnava z najvišjo temperaturo, trajanjem izpostavitve najvišji temperaturi in trajanje celotnega postopka modifikacije (Vernois, 2000; Militz, 2002; Retiwood-The Process, 2008).

Postopek termične obdelave lesa z vročimi olji se je izkazal za najučinkovitejšega, saj segreto olje toploto prenaša najbolj enakomerno in v procesu modifikacije popolnoma prepreči dostop kisika z lesom. Les se segreje v oljni kopeli na okrog 220 °C in temperaturo vzdržujejo konstantno 2-4h. Uporabljajo se različna olja (iz oljne repice, laneno, sončnično). Olje se po končani modifikaciji vakuumsko odstrani iz lesa (Militz, 2002; Hormann in Jorissen, 2004).

V Sloveniji je Rep s sodelavci (2004) razvil način toplotne modifikacije lesa v vakuumu. Uporablja se predhodno posušen les. V komori za toplotno obdelavo se vzpostavi podtlak z manj kot 0,1 bar. Les se v komori segreje do temperature med 170 °C in 210 °C, ki jo vzdržujemo od 4h do 6h. Izločene pline in hlapne snovi se nato izsesa iz komore in komoro počasi ohlaja.

### 3 MATERIAL IN METODE

Za analizo difuzovnosti smo uporabili naraven in toplotno obdelan les bukve (*Fagus sylvatica* L.), ki je najpogosteje zastopan na področju Slovenije in dve različni metodi določitve koeficientov v nestacionarnih pogojih.

#### 3.1 MATERIAL

Toplotno obdelan les bukovine uporabljen v tej raziskavi je bil obdelan s standardnim enodnevnim industrijskim postopkom segrevanja lesa z uporabo nasičene vodne pare; predsušenju (6-8 %) je sledilo segrevanja ( $T=235\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t=8\text{h}$ ), postopek pa se je končal s kondicioniranjem in ohlajevanjem.

##### 3.1.1 Priprava preizkušancev za eksperiment določitve koeficiente difuzivnosti v nestacionarnih pogojih

Orientirane preizkušance brez rastnih anomalij ( $n=7$ ), širine 20 mm, dolžine 100 mm in štirih različnih debelin (5, 10, 15, in 20 mm) smo izdelali iz naravnega (neobdelanega) in toplotno obdelanega lesa (Slika 12). Po zatesnitvi petih ploskev s paro neprepustno epoksidno smolo smo preizkušance uravnovesili na  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  in  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  pri relativni zračni vlažnosti 33 %.



Slika 12 Preizkušance iz naravnega in toplotno obdelanega lesa za določitev koeficiente difuzivnosti z ne-stacionarno metodo.

### 3.1.2 Priprava preizkušancev za določitev vlažnostnega gradiента in koeficiente difuzivnosti z metodo končnih razlik

Iz naravne in topotno obdelane bukovine smo izdelali preizkušance ( $n=2$ ) debeline in širine 20 mm ter dolžine 350 mm za določitev vlažnostnega gradiента (Slika 13). Pet ploskev smo zatesnili z epoksidno smolo in jih nato uravnovesili na 20 °C, 40 °C in 60 °C pri relativni zračni vlažnosti 33 %.



Slika 13 Preizkušance iz naravnega in topotno obdelanega lesa za določitev vlažnostnega gradiента in koeficiente difuzivnosti z metodo končnih razlik.

### 3.2 METODE

#### 3.2.1 Določitev koeficiente difuzivnosti z ne-stacionarno metodo v postopku adsorpcije

Preizkušance uravnovešene na nižji relativni zračni vlažnosti smo stehtali na tisočinko grama natančno. Po tehtanju smo preizkušance na vseh treh nivojih temperature uravnovesili na relativni zračni vlažnosti 75%. Preizkušance smo v postopku adsorpcije tehtali v postopoma daljših časovnih intervalih. Izpostavitev je trajala do doseženega ravnovesja. Koeficient difuzivnosti smo določili s tradicionalno ne-stacionarno metodo delne spremembe povprečne lesne vlažnosti in Newmanovo enačbo za ločitev notranjega in zunanjega snovnega upora (Choong in Skaar, 1972):

$$\frac{t_{0,5} \cdot D}{L^2} = 0,2 + \frac{0,7}{H \cdot L} \quad \dots(42)$$
$$H = \frac{S}{D}$$

Pri velikih debelinah postane zunanji upor zanemarljiv in je pravi difuzijski koeficient ( $D$ ) ekvivalenten navideznemu difuzijskemu koeficientu  $D_a$  (Avramidis in Siau, 1987)

$$\frac{t_{0,5} \cdot D_a}{L^2} = 0,2 \quad \dots(43)$$

Za izračun celotnega upora ( $D_a$  – koeficient difuzivnosti brez upoštevanja zunanjega upora), iz katerega smo kasneje določili difuzijski koeficient ( $D$ ), smo uporabili izmerjene spremembe mas izpostavljenih preizkušancev v času ( $t$ ). Grafično smo določili odvisnost brezdimenzijske spremembe mase ( $E$ ) v odvisnosti od korena iz časa ( $\sqrt{t}$ ). Koeficient premice pridobljene z linearno aproksimacijo krivulje povprečnega potenciala na intervalu  $\bar{E} < 0,5$  ob predpostavki, da je brezdimezijski čas  $\tau = 0,2$ , pri vrednosti  $\bar{E} = 0,5$  z uporabo enačbe (številka) določa celoten upor ( $D_a$ ).

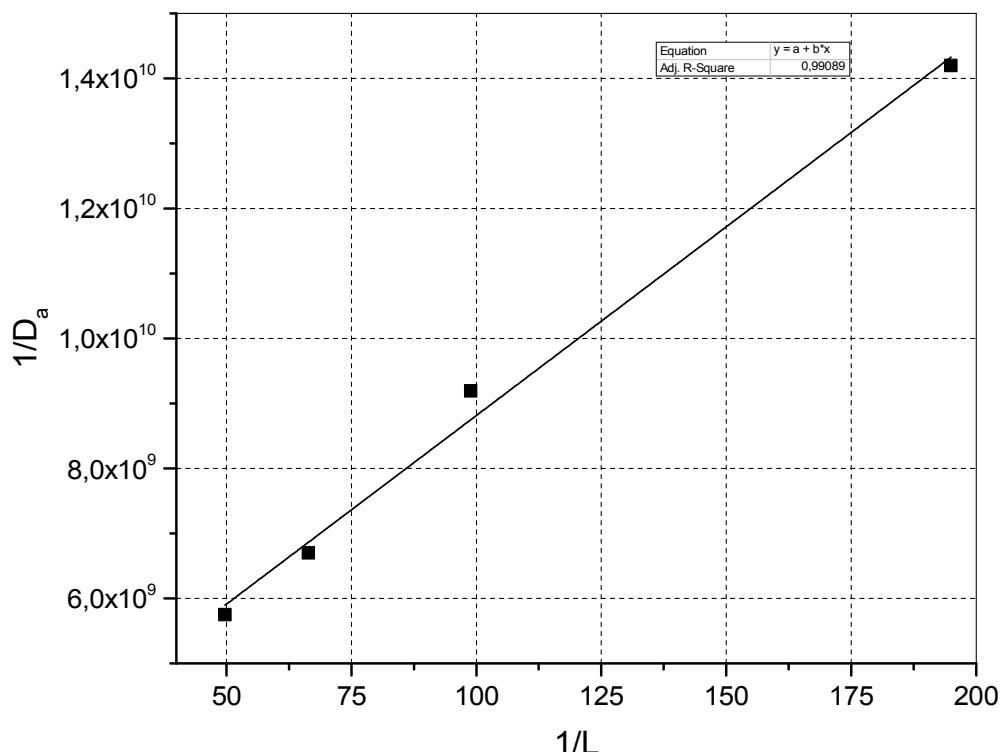
$$D_a = \frac{(L^2 \cdot k^2)}{1,273} \quad \dots(44)$$

V enačbo (44) smo vstavili enačbo (43) in dobili:

$$\frac{1}{D_a} = \frac{1}{D} + \frac{3,5}{S \cdot L} \quad \dots(45)$$

$\frac{1}{D_a}$	celoten difuzijski upor	Type equation here.
$\frac{1}{D}$	notranji difuzijski upor	Type equation here.
$\frac{1}{S \cdot L}$	upor snovne prestopnosti	Type equation here.

V nadaljevanju smo z linearno aproksimacijo odvisnosti  $\frac{1}{D_a}$  v odvisnosti od  $\frac{1}{L}$  izrazili premico z naklonom  $\frac{1}{D}$  in začetno vrednostjo  $\frac{3,5}{S}$  (Slika 14). Z naklona in odseka premice smo nato izračunali koeficient difuzije (D) in koeficient snovne prestopnosti (S).



Slika 14 Linearna aproksimacija odvisnosti  $1/D_a$  od  $1/L$ .

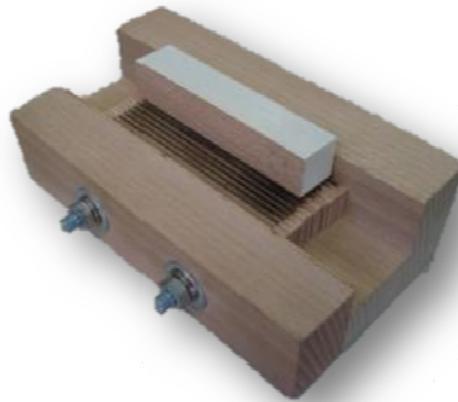
### 3.2.2 Določitev vlažnostnega gradienta

Lesene palice za spremeljanje razvoja vlažnostnega polja smo uravnovesili na nižji relativni zračni vlažnosti ( $\varphi = 33\%$ ), na treh temperaturnih nivojih ( $20^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$ ). Meritve smo pričeli takoj po prestavitevi palic na višjo relativno zračno vlažnost ( ). V postopno daljših časovnih intervalih smo iz palice izžagali preizkušanec dolžine 2 cm, predhodno smo odčelili 1 cm palice, da smo zmanjšalo vpliv vzdolžne difuzije na rezultate. Vlažnostni profil smo določali destruktivno, s cepljenjem preizkušancev na 7 enakih lamel (Slika 15). Vlažnosti posameznih lamel smo določali po standardni gravimetrični metodi (SIST EN 13183-1), s tehtanjem lamel v vlažnem in absolutno suhem stanju (en. 46). Preizkušance smo izžagovali do uravnovešenosti preostanka palice na višji vlažnosti.

—

...(46)

$m_1$  masa preizkušanca v vlažnem stanju [g]  
 $m_0$  masa preizkušanca v absolutno suhem stanju [g]



Slika 15 Cepljenje preizkušanca na 7 enakih lamel.

### 3.2.3 Določitev difuzijskega koeficienta z metodo končnih razlik

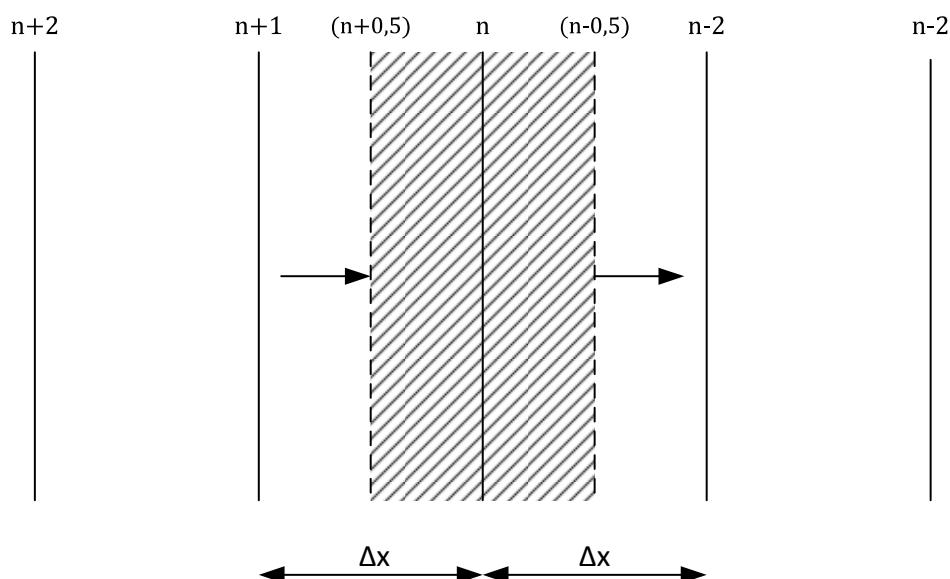
Rezultate časovne in debelinske razporeditve vlažnosti smo dodatno matematično analizirali z uporabo metode končnih razlik, ki je numerična tehnika za iskanje približnih rešitev parcialnih diferencialnih enačb in tako določili koeficient difuzivnosti.

Izhajali smo iz 1. Fickovega zakona in enačbe difuzije v ravni steni:

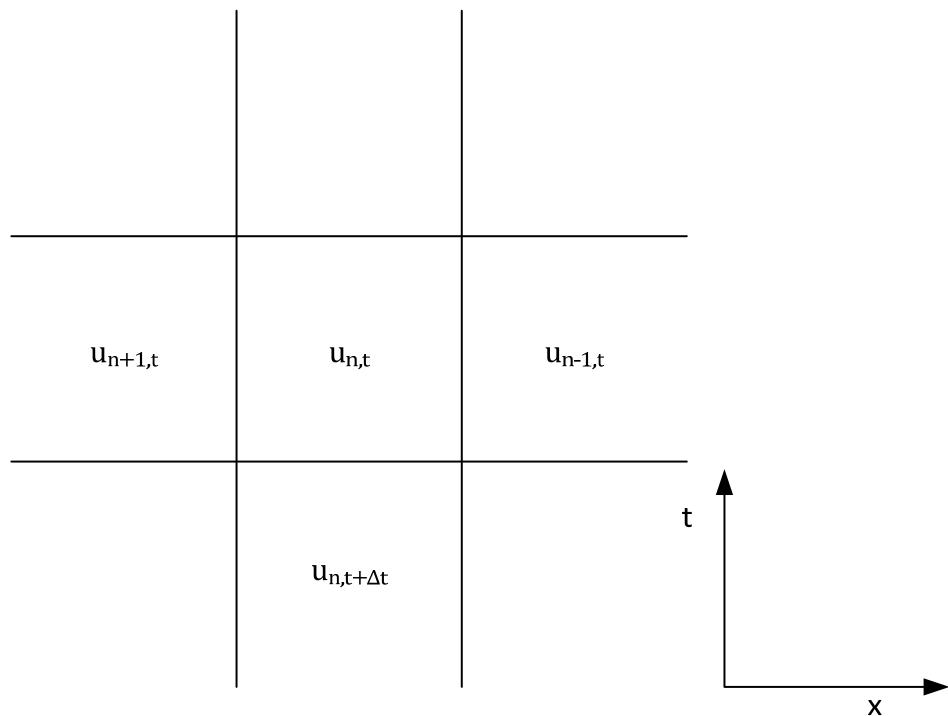
$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \dots(47)$$

C	koncentracija	$\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
t	čas	[s]
x	razdalja	[m]
D	koeficient difuzivnosti	$\left[ \frac{m^2}{s} \right]$

Masna bilanca na mestu n med ravninama  $(n + \frac{1}{2})$  in  $(n - \frac{1}{2})$  v notranjosti ravne plošče s površino A, se izraža s količino snovi ki prehaja skozi v časovnem intervalu  $\Delta t$  (Sliki 16 in 17).



Slika 16 Model enodimenzionalnega prenosa snovi v ravni plošči



Slika 17 Časovno dimenzijski diagram spremembe lesne vlažnosti.

$$A \left[ -D \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{n+\frac{1}{2}} + D \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{n-\frac{1}{2}} \right] \Delta t = A \cdot \Delta t (C_{n,t+\Delta t} - C_{n,t}) \quad \dots(48)$$

Iz naklona premice z linearno aproksimacijo izrazimo:

$$- \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{n+\frac{1}{2}} = \frac{C_{n+1,t} - C_{n,t}}{\Delta x} \quad \dots(49)$$

$$- \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{n-\frac{1}{2}} = \frac{C_{n,t} - C_{n-1,t}}{\Delta x} \quad \dots(50)$$

Koncentracija na mestu  $C_n$  izraža povprečno koncentracijo lamele med ravninama  $\left(n + \frac{1}{2}\right)$  in  $\left(n - \frac{1}{2}\right)$ .

Produkt masne bilance je:

$$D \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot (C_{n-1,t} - 2C_{n,t} + C_{n+1,t}) = \Delta x \cdot (C_{n,t+\Delta t} - C_{n,t}) \quad \dots(51)$$

Iz enačbe (en. 51) izrazimo difuzijski koeficient:

$$D = \frac{(\Delta x)^2}{\Delta t} \cdot \frac{C_{n,t+\Delta t} - C_{n,t}}{C_{n-1,t} - 2C_{n,t} + C_{n+1,t}} \quad \dots(52)$$

Med koncentracijo in lesno vlažnostjo velja linearne zveza ( $C = \varphi \cdot u$ ), zato lahko zapišemo:

$$D_{u_{n,t}} = \frac{(\Delta x)^2}{\Delta t} \cdot \frac{u_{n,t+\Delta t} - u_{n,t}}{u_{n-1,t} - 2u_{n,t} + u_{n+1,t}} \quad \dots(53)$$

Rezultati slonijo na predpostavki, da so razdalje x in časovni intervali  $\Delta t$  dovolj majhni, da je difuzijski koeficient konstanten in določen pri celotnem  $u_{n,t}$ .

## 4 REZULTATI IN RAZPRAVA

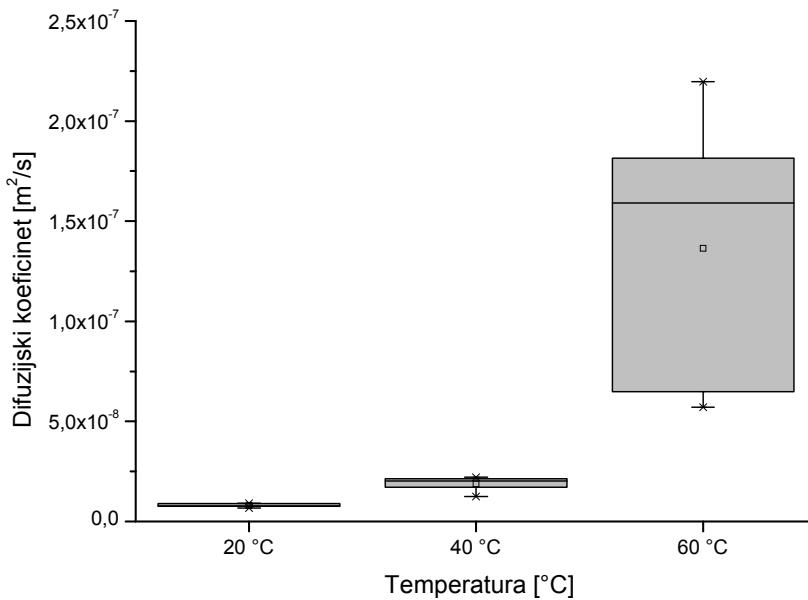
### 4.1 KOEFICIENTI DIFUZIVNOSTI LESA DOLOČENI Z NE-STACIONARNO METODO

Koeficienti difuzivnosti toplotno obdelanega lesa so bili na vseh treh temperaturnih nivojih v povprečju nižji kot pri netretiranem lesu (Preglednica 2). Pričakovano se je pri neobdelanem in pri obdelanem lesu z višanjem temperature difuzivnost povečevala. Povprečna vrednost koeficientov difuzivnosti je pri preizkušancih naravne bukovine pri temperaturi  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $D_{c20}$ ) znaša  $0,80 \cdot 10^{-8} \frac{m^2}{s}$ . Povprečna vrednost koeficientov difuzivnosti naravne bukovine je z naraščanjem temperature pričakovano narasla; od  $1,87 \cdot 10^{-8} \frac{m^2}{s}$  pri temperaturi  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $D_{c40}$ ) do  $13,6 \cdot 10^{-8} \frac{m^2}{s}$  pri temperaturi  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $D_{c60}$ ) (Slika 18). Variabilnost koeficientov difuzivnosti je bila večja pri višjih temperaturah.

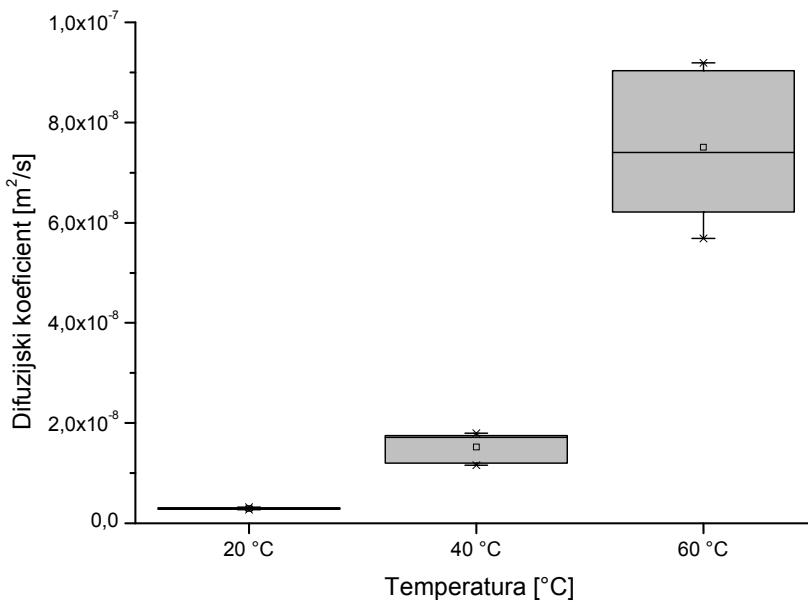
Preglednica 3 Povprečni koeficienti difuzivnosti za toplotno obdelano in naravno bukovino, določeni s klasično ne-stacionarno metodo v postopku adsorpcije (CV – koeficient variabilnosti).

	Koeficient difuzivnosti $\left[\frac{m^2}{s}\right]$		
Temperature $[^{\circ}\text{C}]$	20	40	60
Neobdelan les	$0,8 \times 10^{-8}$	$1,87 \times 10^{-8}$	$13,6 \times 10^{-8}$
CV [%]	12%	21%	53%
Toplotno obdelan les	$0,3 \times 10^{-8}$	$1,52 \times 10^{-8}$	$7,51 \times 10^{-8}$
CV [%]	8%	21%	21%

Koeficient difuzivnosti toplotno obdelanih vzorcev pri temperaturi  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $D_{HT20}$ ) je znašal  $0,30 \cdot 10^{-8} \frac{m^2}{s}$ , kar pomeni pribl. 63 % manjšo vrednost od koeficiente naravne bukovine, pri temperaturi  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $D_{HT40}$ ) je bila povprečna vrednost  $1,73 \cdot 10^{-8} \frac{m^2}{s}$  ( $\sim 18\%$  znižanje koeficiente) in pri temperaturi  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $D_{HT60}$ )  $7,51 \cdot 10^{-8} \frac{m^2}{s}$  ( $\sim 45\%$  znižanje koeficiente difuzivnosti) (Slika 19).

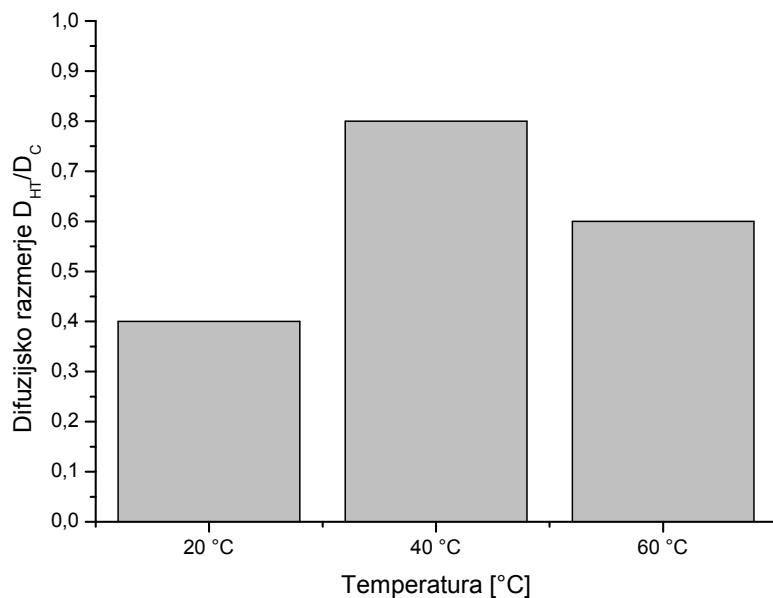


Slika 18 Koeficient difuzivnosti naravne bukovine pri temperaturah 20 °C, 40 °C in 60 °C.



Slika 19 Koeficienti difuzivnosti toplotno obdelane bukovine pri temperaturah 20 °C, 40 °C in 60 °C.

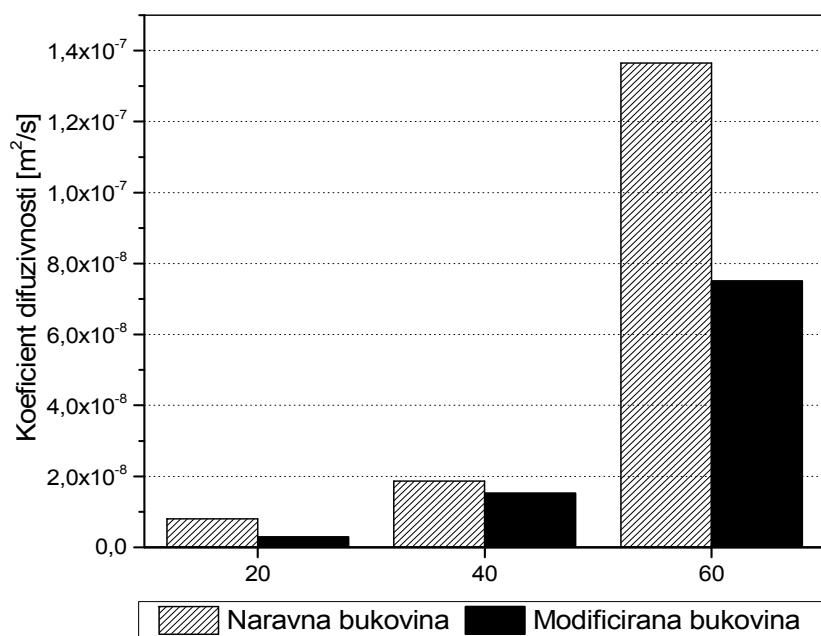
Največja razlika koeficientov difuzivnosti med tretiranimi in kontrolnimi preizkušanci je bila pri najnižji temperaturi eksperimenta (Slika 20). Pri višjih temperaturah so bile razlike manjše, vendar nekoliko večje pri temperaturi 40 °C kot pri temperaturi 60 °C.



Slika 20 Difuzijsko razmerje  $D_{HT}/D_c$  pri temperaturi 20 °C, 40 °C in 60 °C.

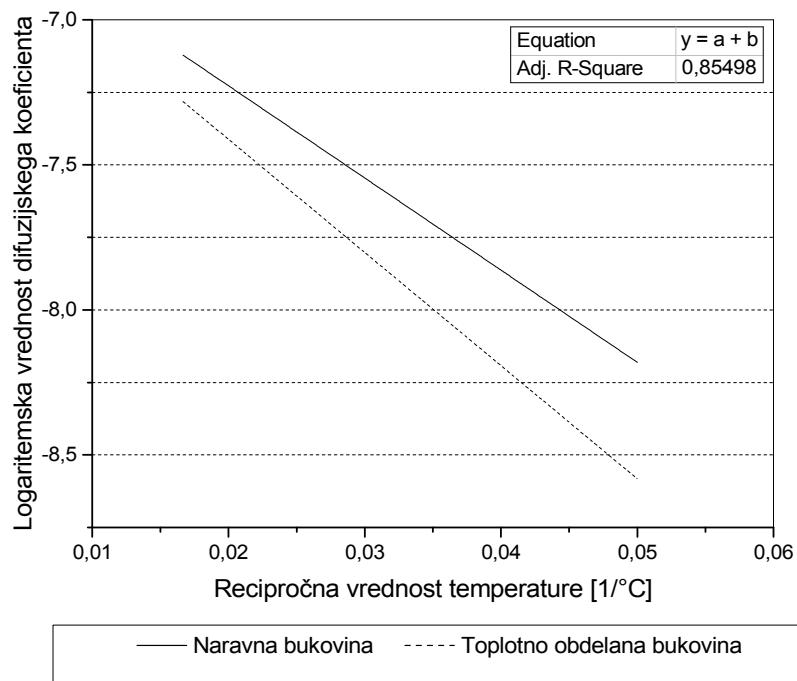
Pri temperaturi 20 °C je bilo razmerje med koeficientom difuzije toplotno obdelanega in naravnega lesa ( $D_{HT20}/D_{C20}$ ) približno 0,4; pri temperaturi 40 °C se je razmerje najbolj približalo ( $D_{HT40}/D_{C40}$  je približno 0,8), pri najvišji temperaturi (60 °C) je bilo razmerje ( $D_{HT60}/D_{C60}$ ) približno 0,6.

V skladu s podatki iz literature koeficient difuzivnosti raste z naraščanjem temperature (Staam, 1964, Siau, 1984, Skaar, 1988, Peralta in Lee, 1995). Koeficient difuzivnosti naravne bukovine je tako pri temperaturi 60 °C približno 17-krat višji kot pri 20 °C in približno 7-krat višji kot pri temperaturi 40 °C. Rast difuzijskega koeficiente z naraščanjem temperature je bila potrjena tudi pri toplotno obdelanih vzorcih;  $D_{HT60}$  je približno 25-krat višji od  $D_{HT20}$  in približno 5-krat višji od  $D_{HT40}$  (Slika 21).



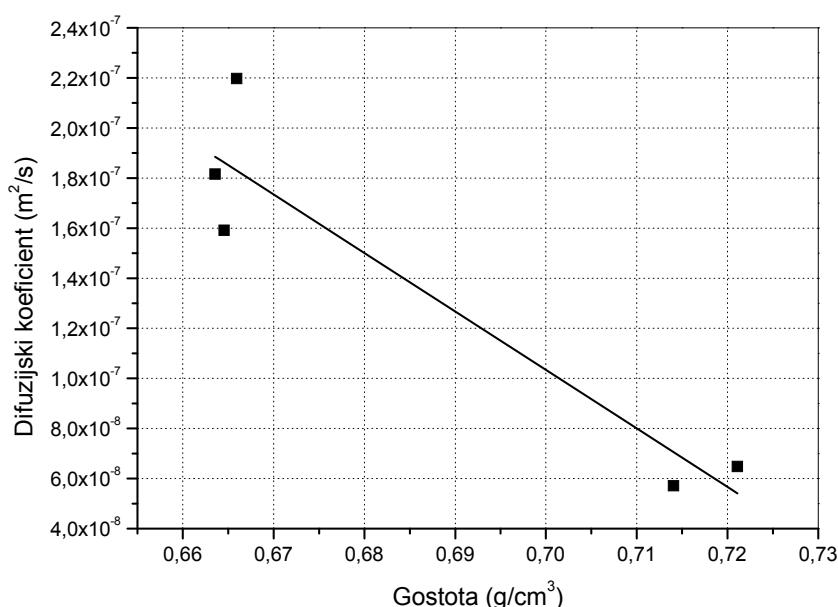
Slika 21 Difuzijski koeficienti neobdelane in toplotno obdelane bukovine pri temperaturah  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  in  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Logaritemska zveza med difuzivnostjo in recipročno vrednostjo temperature nakazuje skladnost rezultatov z Arrheniusovim zakonom (Slika 22), ki pravi, da se difuzijski tok vezane vode v lesu s povišano temperaturo povečuje eksponentno (Peralta in Lee, 1995).

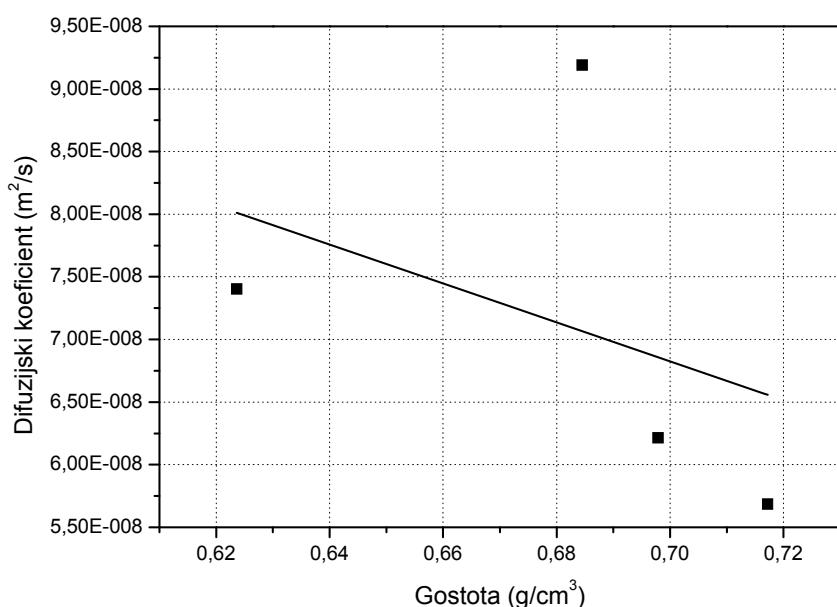


Slika 22 Linearna zveza logaritemske vrednosti povprečnega difuzijskega koeficiente in recipročne vrednosti absolutne temperature.

V skladu z literaturo (Siau, 1988), koeficienti difuzivnosti padajo s povečevanjem gostote lesa. Korelacija je bila najbolj jasna pri temperaturi 60 °C za naravno bukovino (Slika 23) in pri temperaturi 40 °C za toplotno obdelano bukovino (Slika 24). Preostale skupine preizkušancev so imele zelo homogeno gostoto, zato značilne korelacije med gostoto in koeficientom difuzije nismo mogli potrditi. Sklepamo, da padec gostote med postopkom toplotne obdelave v manjši meri vpliva na znižanje koeficiente difuzije, napram drugim anatomskeim in kemičnim spremembam.



Slika 23 Odvisnost difuzijskega koeficiente ( $D_{C60}$ ) od gostote pri temperaturi 60 °C za naravno bukovino.



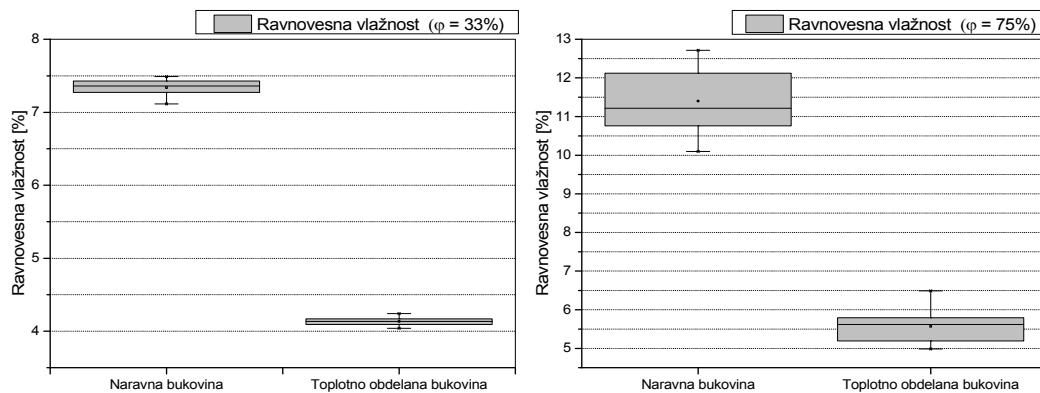
Slika 24 Odvisnost difuzijskega koeficiente ( $DHT40$ ) od gostote pri temperaturi 40 °C za toplotno obdelano bukovino.

## 4.2 RAVNOVESNE VLAŽNOSTI IN VLAŽNOSTNI PROFIL NARAVNE IN TOPOTNO OBDELANE BUKOVINE

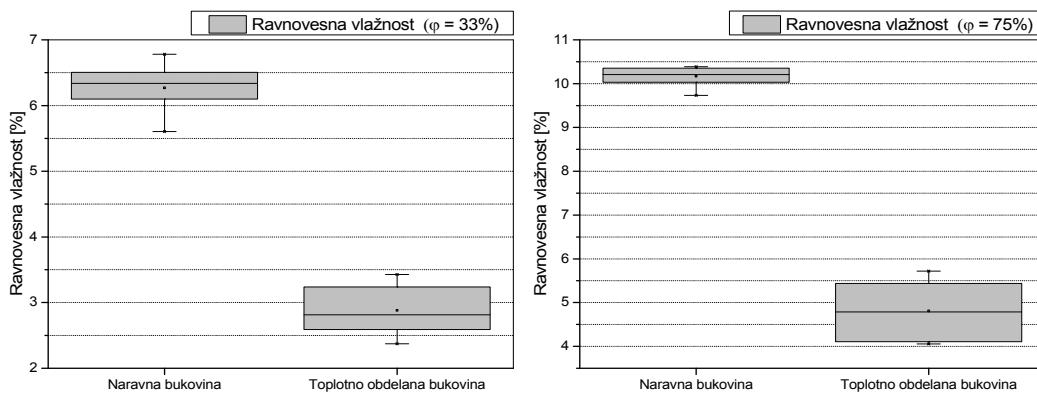
Ravovesna vlažnost naravnega lesa je bila višja v primerjavi z ravovesno vlažnostjo topotno obdelanega lesa pri vseh klimatskih pogojih (Preglednica 4, Slika 25, Slika 26, Slika 27). Ravovesna vlažnost naravnega in tretiranega lesa pada z naraščanjem temperature.

Preglednica 4 Ravovesne vlažnosti neobdelane in topotno obdelane bukovine, določene med postopkom adsorpcije pri temperaturah 20 °C, 40 °C in 60 °C (CV je koeficient variabilnosti).

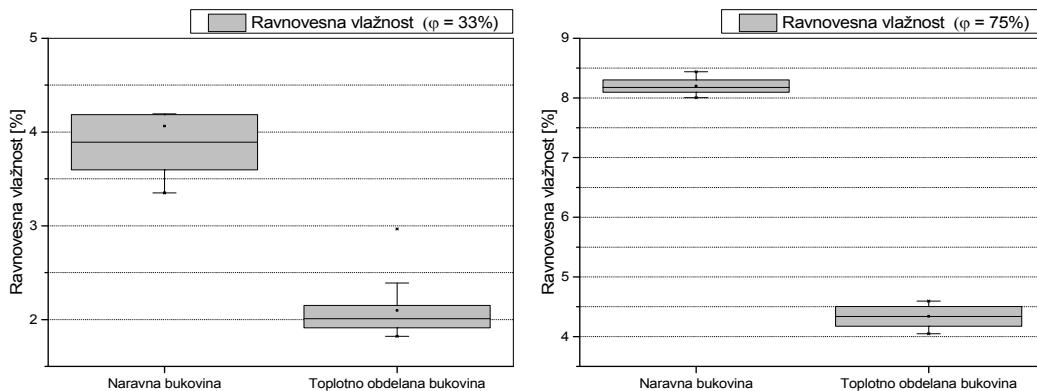
	u <sub>r</sub> ( $\varphi = 33\%$ )			u <sub>r</sub> ( $\varphi = 75\%$ )		
Temperature [°C]	20	40	60	20	40	60
Neobdelan les	7,5	6,4	3,7	11,4	10,1	8,4
CV [%]	1,7	5,8	11,6	7,1	3,1	11,2
Topotno obdelan les	4,2	3,2	2,1	5,6	4,9	4,5
CV [%]	2,9	15,8	15,0	7,5	16,5	7,5



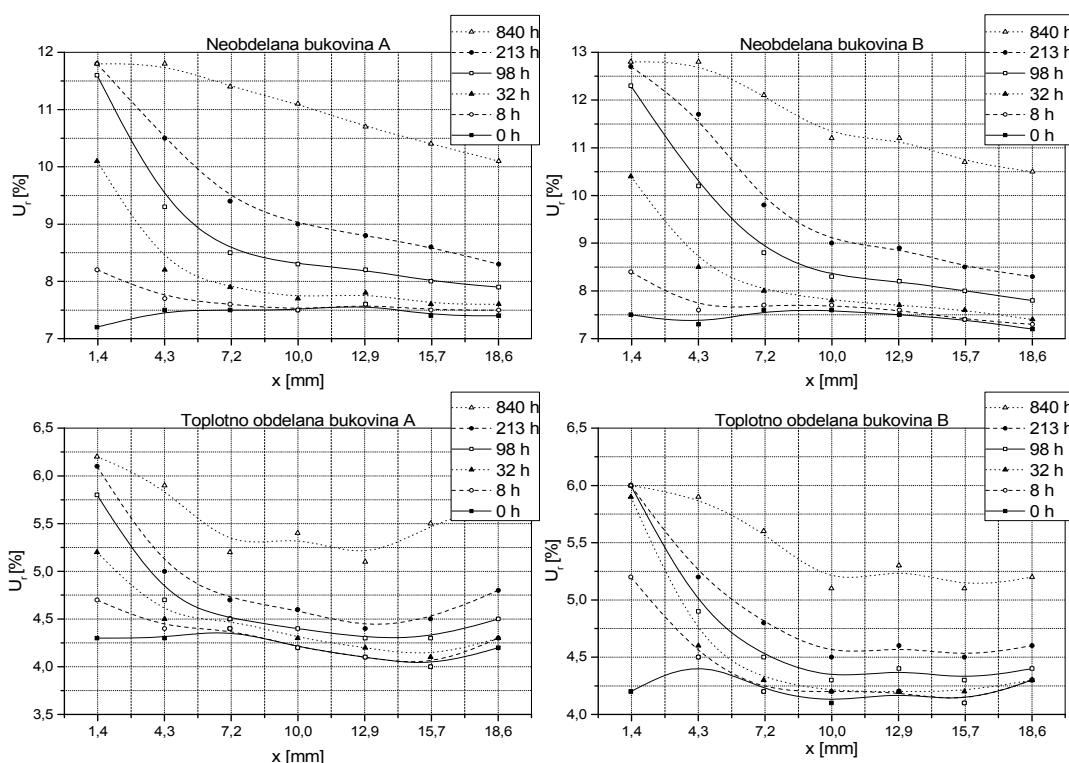
Slika 25 Ravovesne vlažnosti naravnega in topotno obdelanega lesa pri 20 °C pri relativni zračni vlažnosti 33 % (levo) in 75 % (desno).



Slika 26 Ravnoesne vlažnosti topotno obdelanega in naravnega lesa pri 40 °C pri relativni zračni vlažnosti 33 % (levo) in 75 % (desno).

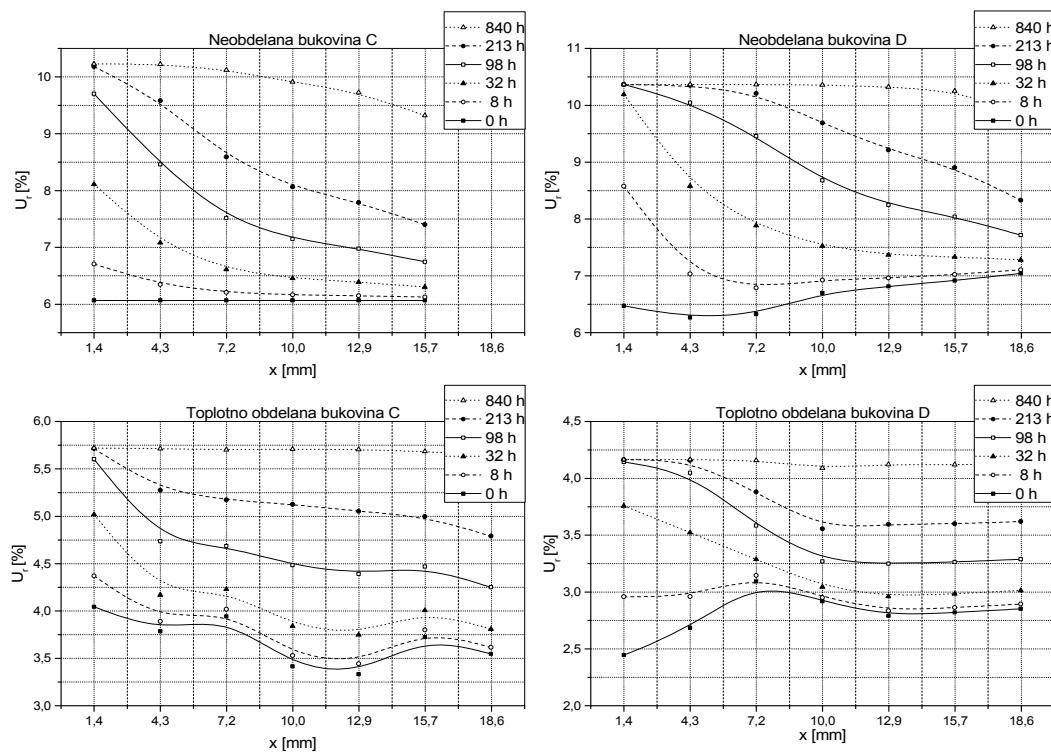


Slika 27 Ravnoesne vlažnosti topotno obdelanega in naravnega lesa pri 40 °C pri relativni zračni vlažnosti 33 % (levo) in 75 % (desno).

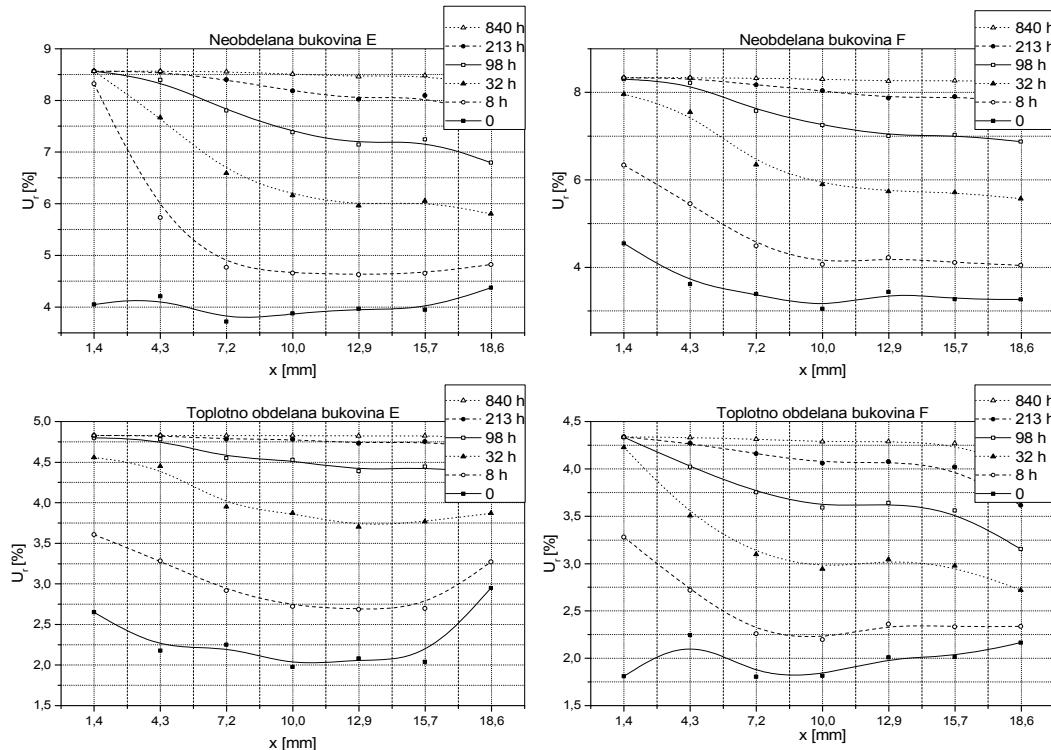


Slika 28 Vlažnostni profili naravnih in toplotno obdelanih preizkušancev med enostransko adsorpcijo pri  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  za preizkušance iz elementa A in elementa B.

Pri eksperimentu, ki je potekal pri temperaturi  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  nobeden od preizkušancev v 840 urah ni dosegel ravnovesne vlažnosti skozi celotno debelino (Slika 28). Preizkušanci toplotno obdelane bukovine so se počasneje odzvali na spremenjene klimatske pogoje, kar pripisujemo znižani higroskopnosti in počasnejši difuziji vezane vode pri nižjih vlažnostih toplotno obdelane bukovine. Iz vlažnostnega profila toplotno obdelanih preizkušancev je razvidno, da uravnovešanje na nižji ravnovesni vlažnosti pred eksperimentom ni bilo uspešno, saj preizkušanci niso dosegli ravnovesne vlažnosti po celotnem prerezu. Slednje še dodatno potrjuje daljše čase, ki so potrebni za dosego ravnovesnega stanja toplotno obdelanih vzorcev. Na Slikah 28, 29 in 30 so prikazani vlažnostni profili preizkušancev izpostavljenih enostranski adsorpciji pri konstantni relativni zračni vlažnosti 75% na dveh temperaturah;  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  in  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Hitrost odziva na spremembo klimatskih pogojev se povečuje z dvigom temperature, kot posledica povišane kinetike pri višjih temperaturah. Tudi pri višji temperaturi se toplotno obdelan les uravnoveša počasneje od neobdelanega.



Slika 29 Vlažnostni profili naravnih in toplotno obdelanih preizkušancev med adsorpcijo pri 40 °C za preizkušance iz elementa C in elementa D.



Slika 30 Vlažnostni profili naravnih in toplotno obdelanih preizkušancev med adsorpcijo pri 60 °C za preizkušance iz elementa E in elementa F.

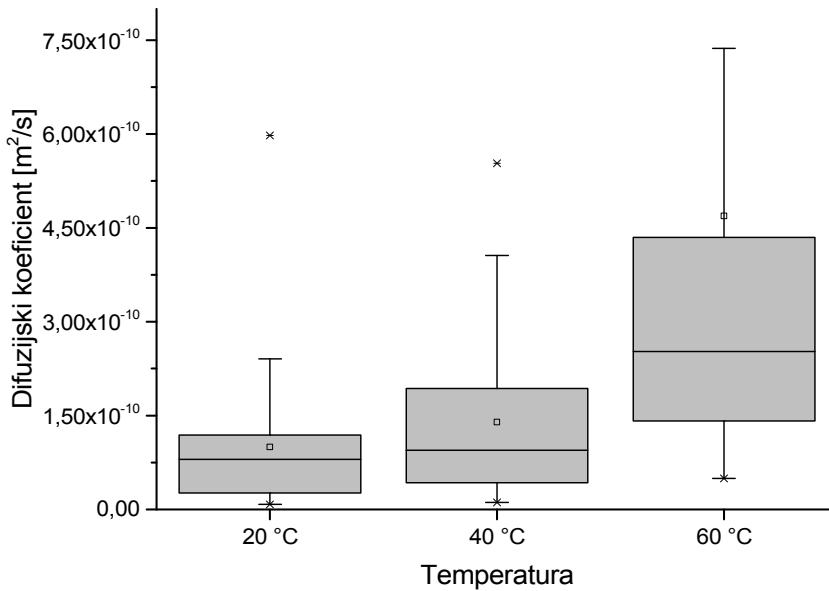
#### 4.3 DIFUZIJSKI KOEFICIENTI DOLOČENI Z METODO KONČNIH RAZLIK

Preizkušancem iz toplotno obdelanega in naravnega lesa bukve v postopku adsorpcije smo difuzijske koeficiente določili tudi z uporabo metode končnih razlik (en. 53). Difuzijski koeficienti toplotno obdelanega ( $D_{HT}$ ) in naravnega lesa ( $D_C$ ) pridobljeni z metodo končnih razlik rastejo v korelaciji z naraščajočo temperaturo (Preglednica 5). Tudi s to metodo je bilo ugotovljeno znižanje difuzijskega koeficienta s toplotno obdelavo lesa pri vseh klimatskih pogojih. Obe navedbi se ujemata z rezultati pridobljenimi s klasično nestacionarno metodo določitve difuzijskih koeficientov in literaturo.

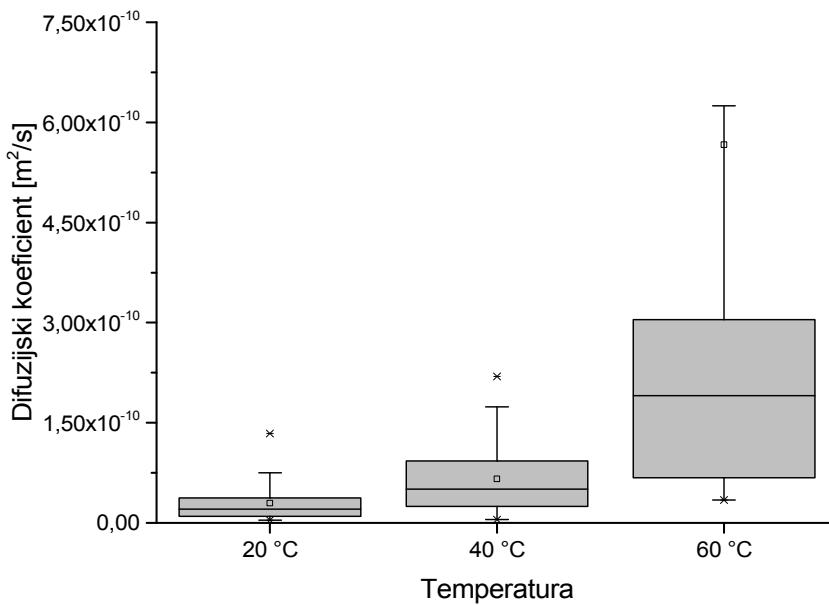
Preglednica 5 Povprečni koeficienti difuzivnosti za toplotno obdelano in neobdelano bukovino, določeni s metodo končnih razlik v postopku adsorpcije.

	Difuzijski koeficienti $\left[\frac{m^2}{s}\right]$		
Temperatura [°C]	20	40	60
Naraven les	$0,99 \times 10^{-10}$	$2,13E \times 10^{-10}$	$4,87 \times 10^{-10}$
CV [%]	106,69%	163%	128%
Toplotno obdelan les	$0,27 \times 10^{-10}$	$1,79 \times 10^{-10}$	$3,62 \times 10^{-10}$
CV [%]	94%	15,8	291%

Povprečna vrednost koeficientov difuzivnosti toplotno obdelanega lesa pri temperaturi 20 °C ( $D_{HT20}$ ) je  $0,27 \cdot 10^{-10} \frac{m^2}{s}$ , kar pomeni, v primerjavi s povprečnim difuzijskim koeficientom naravnega lesa pri 20 °C ( $D_{C20}$ ), ki znaša  $0,99 \cdot 10^{-10} \frac{m^2}{s}$ , približno 73 % znižanje. Pri temperaturi 40 °C smo ugotovili približno 19 % nižji vrednosti koeficienta difuzivnosti toplotno obdelanega lesa v primerjavi z difuzijskim koeficientom naravnega lesa, medtem ko je pri temperaturi 60 °C koeficient difuzivnosti toplotno obdelanega lesa nižji od koeficiente difuzivnosti naravnega lesa za približno 26 %.



Slika 31 Koeficienti difuzivnosti naravne bukovine pri temperaturi 20 °C, 40 °C in 60 °C.

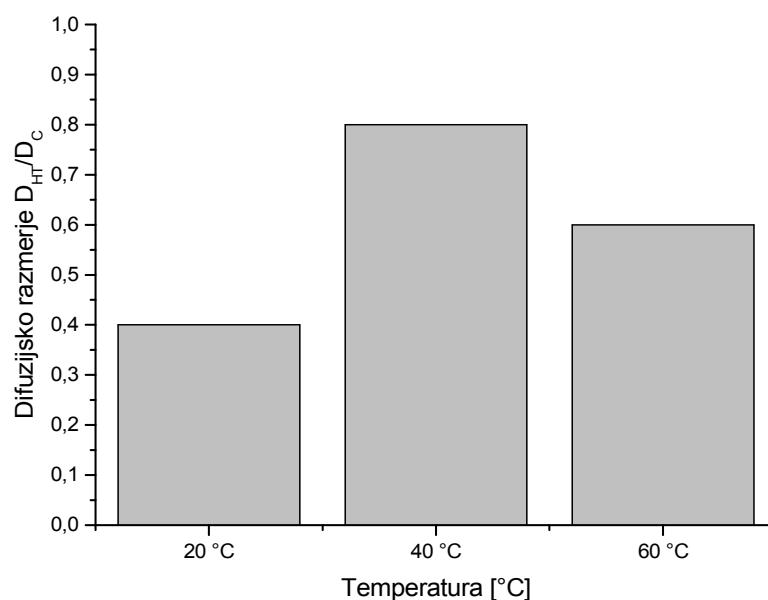


Slika 32 Koeficienti difuzivnosti toplotno obdelane bukovine pri temperaturi 20 °C, 40 °C in 60 °C.

Iz vrednosti difuzijskih razmerij toplotno predelane in neobdelane bukovine ( $D_{HT}/D_C$ ) (Preglednica 6, Slika 33) ugotavljamo, da je največji vpliv toplotne obdelave na difuzivnost pri temperaturi 20 °C in najmanjši vpliv pri temperaturi 40 °C. Kar se ujema z vrednostmi iz nestacionarne metode.

Preglednica 6 Difuzijska razmerja med toplotno predelano in naravno bukovino  $D_{HT}$  in  $D_C$  pri temperaturi 20 °C, 40 °C in 60 °C.

Temperatura [°C]	20	40	60
Difuzijsko razmerje [ $D_H/D_C$ ]	~0,3	~0,8	~0,7



Slika 33 Difuzijsko razmerje  $D_{HT}/D_C$  pri temperaturi 20 °C, 40 °C in 60 °C.

Vrednosti koeficientov difuzivnosti izračunanih z metodo končnih razlik so v primerjavi z ne-stacionarno metodo nižje. Relativne vrednosti znižanja koeficiente difuzivnosti pri postopku toplotne obdelave in difuzijska razmerja so približno enaka. Kar v določeni meri potrujuje pravilnost rezultatov. Obe metodi potrujjeta rast koeficiente difuzivnosti z naraščanjem temperature v skladu z Arrheniusovim zakonom in padec koeficiente difuzivnosti z naraščanjem gostote.

## 5 SKLEPI

Bukovini se med postopkom toplotne obdelave zniža ravnovesna vlažnost lesa in koeficient difuzivnosti. Nižji koeficient difuzivnosti tretiranih v primerjavi s kontrolnimi vzorci smo potrdili z obema uporabljenima metodama določitve.

Absolutne vrednosti koeficientov difuzivnosti določenih s klasično nestacionarno metodo so bile višje od vrednosti izračunanih z metodo končnih razlik. Relativne vrednosti sprememb koeficiente difuzivnosti med postopkom toplotne obdelave so bile približno enake pri obeh uporabljenih metodah.

Potrdili smo padec ravnovesnih vlažnosti z naraščanjem temperature tako za naraven kot tretiran les in rast koeficiente difuzivnosti z naraščanjem temperature. Ugotovili smo počasnejše naraščanje koeficiente difuzivnosti z naraščanjem temperature za toplotno obdelan les v primerjavi z naravnim.

Nižjo difuzivnost toplotno obdelanega lesa pripisujemo manjši higroskopnosti, najverjetneje zaradi razgradnje velikega deleža hemiceluloz. Na nižjo difuzivnost toplotno obdelanega lesa verjetno vpliva tudi njegova nižja ravnovesna vlažnost v primerjavi z naravnim lesom. Manjši, ampak ne zanemarljiv vpliv na nižjo difuzivnost tretiranega lesa imajo tudi spremembe v anatomske zgradbi lesa, kot so mikro razpoke in deformacije.

Nižja gostota toplotno obdelanega lesa ima pozitiven, ampak očitno v tem primeru postranski vpliv na difuzivnost.

Toplotno obdelan les bukovine se zaradi nižje higroskopnosti, difuzivnosti in ravnovesne vlažnosti počasneje in v manjši meri odziva na klimatske spremembe okolja, zato je primernejši za uporabo na prostem ali v prostorih z nihajočimi klimatskimi razmerami.

## 6 POVZETEK

Topotna obdelava lesa je obetaven tehnološki proces za izboljšanje tako dimenzijske stabilnosti, odpornosti proti biološkim in okoljskim dejavnikom kot tudi njegove trajnosti. Topotna obdelava lesa spremeni celično strukturo in kemično zgradbo lesa, zmanjša gostoto lesa in ošibi večino mehanskih lastnosti. Topotno obdelan les ima velik potencial za uporabo na prostem, kjer je izpostavljen nenehno spreminjačim se klimatskim pogojem in posledično konstantnemu navlaževanju in sušenju.

Uporabljena topotno obdelana bukovina (*Fagus sylvatica* L.) je bila pripravljena s standardnim 1-dnevnim postopkom segrevanja z nenasičeno vodno paro, sestavljenim iz 4 faz: predsušenje, segrevanje, kondicioniranje in hlajenje. Preizkušanci so bili orientirani, brez rastnih anomalij ( $n = 7$ ) iz neobdelanega in topotno obdelanega lesa, dimenzij 20 mm x 100 mm (širina x dolžina), različnih debelin (5, 10, 15 in 20 mm). Dodatno smo izdelali preizkušance ( $n=2$ ) dimenzij 20 mm x 20 mm x 350 mm za določitev vlažnostnega gradianta in določitev koeficiente difuzivnosti z metodo končnih razlik. Pet stranskih ploskev vzorcev smo zatesnili z epoksi smolo in jih uravnovesili pri 20 °C, 40 °C in 60 °C in 33 % relativni zračni vlagi.

Preizkušance za določitev vlažnostnega gradianta smo razslojili na 3 mm debele rezine in tehtali v kratkih časovnih intervalih, s čimer smo jim gravimetrično določili gradiant vlažnosti.

Naravni in topotno obdelani bukovini (*Fagus sylvatica* L.) smo v postopku adsorpcije (iz uravnovešenega stanja pri  $\phi_1 = 33\%$  z navlaževanjem na  $\phi_2 = 75\%$ ) določili difuzijski koeficient s standardno ne-stacionarno metodo z uporabo delne spremembe povprečne lesne vlažnosti in Newman-ove enačbe za ločitev notranjega in zunanjega upora pri treh različnih temperaturah (20 °C, 40 °C in 60 °C). Difuzivnost je bila dodatno numerično analizirana z metodo končnih razlik.

Difuzivnost topotno obdelanega lesa je nižja pri vseh klimatskih pogojih in obeh metodah določitve difuzijskega koeficiente. Koeficient difuzivnosti topotno obdelanega lesa bukovine določen s standardno ne-stacionarno metodo je bil v povprečju približno 40 %

nižji od koeficienta difuzivnosti naravnega lesa. Izračunano difuzijsko razmerje ( $D_{HT}/D_C$ ) je tako v povprečju vseh temperatur približno 0,6 ( $D_{HT20}/D_{C20}=0,4$ ;  $D_{HT40}/D_{C40}=0,8$ ;  $D_{HT60}/D_{C60} = 0,6$ ).

Tudi metoda končnih razlik potrjuje vpliv toplotne obdelave na difuzijo vlage. Vrednosti difuzijskih koeficientov so bile nižje. Povprečno difuzijsko razmerje, pa se popolnoma ujemata in je približno 0,6 ( $D_{HT20}/D_{C20}=0,3$ ;  $D_{HT40}/D_{C40}=0,8$ ;  $D_{HT60}/D_{C60} = 0,7$ ).

Ravnovesna vlažnost toplotno obdelane bukovine je bila v primerjavi z ravnovesno vlažnostjo naravne bukovine nižja pri vseh klimatskih pogojih na začetku in na koncu eksperimenta .

Na nižjo difuzivnost toplotno obdelanega lesa vplivajo spremembe v anatomske in kemični zgradbi. Največji pomen pripisujemo znižani higroskopnosti zaradi razgradnje velikega deleža hemiceluloz. Manjšo difuzivnost pripisujemo tudi nižjim vlažnostim toplotno obdelanega lesa.

## LITERATURA

- Avramidis S., Siau J.F. 1987. Experiments in nonisothermal diffusion of moisture in wood. Part 3. Wood science and technology, 21: 239-334
- Boonstra M.J., Rijssdijk J.F., Sander C., Kegel E., Tjeerdsma B., Militz H., van Acker J., Stevens M. 2006. Microstructural and physical aspects of heat treated. Ciencia tecnología. Maderas, 8, 3: 193-208
- Choong E.T., Skaar C. 1969. Separating internal and external resistance to moisture removal in wood drying. Wood Science, 1: 200-202
- Choong E.T., Skaar C. 1972. Diffusivity and surface emissivity in wood drying. Wood Fibre, 4: 80-86
- 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. 1963. Moisture diffusion coefficient in wood as calculated from adsorption, desorption and steady-state data. Forest Product Journal, 13: 97-103
- Crank J. 1956. Mathematics of diffusion. Oxford, Clarendon: 347 str.
- DIN 53122 2001 Prüfung von Kunststoff-Folien, Elastomerfolien, Papier, Pappe und anderen Flächengebilden - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Teil 1: Gravimetrisches Verfahren
- Dushman S. 1962. Scientific foundation of vacuum technique. New York, Wiley: 806 str.
- Esteves B., Velez Marques A., Domingos I., Pereira H. 2007. Heat-induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. Wood Science and Technology, 42: 369-384
- Esteves B., Pereira H. 2009. Heat treatment of wood. Bioresources, 4,1: 370-404
- Fengel D., Wegener G. 2003. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Remagen: Verlag Kessel: 613 str.
- Gorišek Ž., Geršak M., Velušček V., Čop T., Mrak C. 1994. Sušenje lesa. Ljubljana, Zveza društev inženirjev in tehnikov lesarstva Slovenije: Lesarska založba: 235 str.
- Gorišek Ž. 2009. Les: Zgradba in lastnosti: njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178 str.
- Gorišek Ž., Straže A., Jene R. 2004. Vpliv toplotne obdelave na sorpcijske lastnosti lesa. Les, 56, 5: 140-147

- Gorišek Ž., Straže A. 2011. Comparative studies of sorption isotherms and swelling behaviour of heat treatment and untreated hardwoods. V: NAVI, Parviz (ur.), ROTH, Andreas (ur.). Mechano-chemical transformations of wood during THM processing : COST Action FP0904 workshop : February, 16-18, 2011, Biel, Switzerland : book of abstracts. Biel: Berne University of Applied Sciences: 155-156
- Hakkou M., Petrisans M., Zoulalian A., Gerardin P. 2005. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. Polymer Degradation and Stability, 89: 1-5
- Hill C. A. S. 2006. Wood Modification. Chemical, thermal and other processes. Bangor, John Wiley & Sons: 238 str.
- Homan W., Tjeerdsma B., Beckers E., Jorissen A. 2000. Structural and other properties of modified wood. V: World Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, British Columbia, Canada.
- Jämsä S., Viitaniemi P. 2001. Heat treatmet of wood-betterdurability without chemicals.V: Proceedings of SpecialSeminar held in Antibes, France, 9 Februar 2001, Review on heat treatments of wood. Rapp A.O.: 21-27
- Kamdem D.P., Pizzi A., Jermannaud A. 2002. Durability of Heat-Treated Wood. International Research Group on Wood Preservation, Document no. IRG/WP 99-40145: 15
- Kollmann F., Cote W. 1968. Principles of Wood Science and Technology. I. Solid Wood. Berlin, Springer Verlag.: 592 str.
- Majka J., Weres J., Olek W. 2010. Alteration of wood hygroscopic properties after thermal modification. Wood structure and properties. 117-121
- Mayes D., Oksanen O. 2003. ThermoWood handbook. Helsinki. Finnish Thermowood Association, 66
- Metsa-Kortolainen S. 2006. Thermally modified timber as durable wood for exterior applications, VTT-technical research centre of Finland, <http://www.forestprod.org/woodprotection06metsa-kortelainen.pdf> (12.4.2014)
- Militz H. 2002. Thermal treatment of wood: European processes and their background. IRG/WP 02-40241. 33rd Annual Meeting.12–17 May 2002
- Patzelt M., Stingl R., Teischinger A. 2002. Thermische Modifikation von Holz und deren Einfluß auf ausgewählte Holzeigenschaften. V: Teischinger A, Stingl R (eds) Lignovisionen Band 3: Modifiziertes Holz: Eigenschaften und Märkte. Schriftenreihe des Instituts für Holzforschung und des Verband Holzwirte Österreichs, Boku Vienna: 101-147

- Peralta P.N., Lee A.W.C. 1995 Unsteady-state diffusion of moisture in giant timber bamboo (*Phyllostachys Bambusoides* Sieb and Zucc). Wood and fiber science, 27-4: 421-427
- 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: Ciencia Technologia, 4,1: 50-68
- Podgorski L., Chevet B., Onic L., Merlin A. 2000. Modification of wood wettability by plasma and corona treatments. International Journal of Adhesion & Adhesives, 20: 103-111
- Poncsák S., Q. Shi S., Kocaebe D., Miller G. 2007. Effect of thermal treatment of wood lumbars on their adhesive bond strength and durability. Journal of Adhesion Science & Technology, 21, 8: 745-754
- Raggers J. 2007. Process / Durabilitiy, Larenstein, Velp, Nederland.  
<http://www.ivalsa.cnr.it/euris/english/4/4.pdf> (15.2.2014)
- Rapp A.O., Sailer M. 2001. Heat treatment in Germany. V: Proceedings of Seminar “Production and development of heat treated wood in Europe”, Helsinki, Stockholm, Oslo.
- Rapp A.O. 2001. Review on heat treatments of wood. V: Proceedings of the special seminar of COST Action E22, Antibes, France
- Rep G., Humar M., Pohleven F. 2004. Characteristic of thermally modified wood in vacuum. IRG/WP 04-40287: 8 str.
- Retiwood-The Process, 2008. Retitech, France.  
<http://www.retiwood.com/en/processes.html> (16.4.2014)
- Sailer M., Rapp A.O., Westin M. 2000. Innovative Holzvergütung – neue Einsatzbereiche für Holz. V: Proceedings of the Dreiländer-Holztagung, Luzern, Switzerland.
- Sayar M., Tarmian A. 2012. Modification of water vapor diffusion in poplar wood (*Populus nigra* L.) by steaming at high temperatures.
- Stamm A. J. 1964. Wood and Cellulose Science. New York, The Roland Press C.:549 str.
- Stamm A. J. 1959. Bound-water diffusion into wood in the fiber direction. Forest Products journal, 9: 27-32
- Siau J.F. 1995. Wood: Influence of Moisture on Physical Properties. Department of Wood and Science and Forest Products. Virginia. 227 str.
- Siau J.F. 1984. Transport Processes in Wood. Berlin, Springer: 279 str.
- Skaar C. 1988. Wood-Water Relations. Berlin, Springer: 283 str.

- Skaar C., Babiak M. 1982. A model for bound-water transport in wood. *Wood Science and Technology*, 16: 123-138
- Syrjänen T., Oy K. 2001. Heat treatment of wood in Finland. V: *Proceedings of Seminar "Production and development of heat treated wood in Europe"*, Helsinki, Stockholm, Oslo.
- Vernois M. 2000. Heat treatment of wood in France –state of the art, Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, France. [http://www.bfah.de/inst4/43/pdf/heat\\_fra.pdf](http://www.bfah.de/inst4/43/pdf/heat_fra.pdf) (1.7.2008)
- SIST EN 13183-1. 2002. Round and sawn timber – Method of measurement of moisture content – Part 1: Method for determining moisture content of a piece of sawn timber (Oven dry method)
- Tjeerdsma B.F., Boonstra B.F., Militz H. 1998. Thermal modification of non-durable wood species. 2. Improved wood properties of thermally treated wood. International Research Group on Wood Preservation, Document no. IRG/WP 98-40124.
- Yildiz S., Gezer E.D., Yildiz U.C. 2006. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. *Building and Environment*, 41: 1762-1766
- Welzbacher C. R., Brischke C., Rapp A.O. 2007. Influence of treatment temperature and duration on selected biological, mechanical, physical and optical properties of thermally modified timber. *Wood Mater Sci Eng.*, 2:66-76
- Weildand J.J., Guyonnet R. 1997. Retifizirtes Holz. Dreiländer Holztagung, Graz
- Windeisen E., Strobel C., Wegener G. 2007. Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood. *Wood Science and Technology*, 41: 523-536
- Windeisen E., Bächle H. Zimmer B., Wegener G. 2008. Relations between chemical changes and mechanical properties of thermally treated wood. *Holzforschung*, 63: 773-778
- Winandy J.E., Rowel M.R. 2005. Chemistry of wood strength. V: *Wood Chemistry and Wood Chemosites*. Ed. Rowell, M.R. Taylor & Francis, Boca Raton, FL. : 303-347
- Zimmermann M.H. 1983. *Xylem Structure and the Ascent of Sap*. Berlin, Springer: 143 str.

**ZAHVALA**