

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Miha KOGOVŠEK

**SUŠILNE KARAKTERISTIKE BELJAVE, JEDROVINE
IN MOKRINE PRI JELOVINI**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2007

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Miha KOGOVŠEK

**SUŠILNE KARAKTERISTIKE BELJAVE, JEDROVINE IN MOKRINE
PRI JELOVINI**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**DRYING CHARACTERISTICS OF SAPWOOD, HEARTWOOD AND
WET WOOD IN SILVER FIR**

GRADUATION THESIS
University studies

Ljubljana, 2007

Diplomsko delo je zaključek Univerzitetnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za tehnologijo lesa Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, kjer je potekala priprava vzorcev lesa in samo merjenje. Les jelovine je bil pripeljan iz snežniških gozdov.

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

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Miha Kogovšek

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- ŠD Dn
- DK UDK 630*812.23
- KG sušenje lesa/permeabilnost/difuzivnost/beljave/jedrovina/mokro srce/jelka (*Abies alba* Mill.)
- AV KOGOVIŠEK, Miha
- SA GORIŠEK, Željko (mentor)/OVEN, Primož (recenzent)
- KZ SI – 1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
- ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
- LI 2007
- IN SUŠILNE KARAKTERISTIKE BELJAVE, JEDROVINE IN MOKRINE PRI JELOVINI
- TD Diplomsko delo (univerzitetni študij)
- OP IX, 57 str., 5 pregl., 23 sl., 19 vir.
- IJ sl
- Jl sl/en
- AI Razlike v sušilnih lastnostih beljave in jedrovine lahko ob neprimernem vodenju sušilnega postopka vplivajo na zmanjšano kakovost osušenega lesa. Pri jelovini težave še dodatno povečuje mokro srce. Primerjavo sušilnih lastnosti beljave, jedrovine in mokrega srca lesa smo izvedli z merjenjem permeabilnosti in difuzivnosti. Permeabilnost beljave je bila v vseh 3 anatomskih smereh pričakovano najvišja, medtem ko razlike med jedrovino in mokrim srcem niso bile statistično značilne. Slabšo permeabilnost jedrovine pripisujemo aspiraciji pikenj, saj se je po tretiranju vzorcev z alkoholom zaradi deaspiracije njihova permeabilnost povečala. Tudi difuzijski koeficient je bil pri beljavnih vzorcih večji od tistih pri jedrovini, kar je tudi posledica jedrovinskih procesov. Ugotovili smo tudi zmanjševanje difuzivnosti z naraščajočo gostoto; permeabilnost pa od gostote ni odvisna.

KEY WORDS DOCUMENTATION

- DN Dn
- DC UDC 630*812.23
- CX wood drying/permeability/diffusion/sapwood/heartwood/wet wood/silver fir
(*Abies alba* Mill.)
- AU KOGOVSĚEK, Miha
- AA GORIŠEK, Źeljko (supervisor)/OVEN, PrimoŹ (reviewer)
- PP SI – 1000 Ljubljana, RoŹna dolina, c. VIII/34
- PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science
and Technology
- PY 2007
- TI DRYING CHARACTERISTICS OF SAPWOOD, HEARTWOOD AND WET
WOOD IN SILVER FIR
- DT Graduation Thesis (University studies)
- NO IX, 57 p., 5 tab., 23 fig., 19 ref.
- LA sl
- AL sl/en
- AB Differences in drying characteristics of sapwood and heartwood can, in case of an
inappropriately conducted drying procedure, result in a lower quality of dried
wood. The procedure gets even more complex with a silver fir because of its wet
heart. A comparative study of drying characteristics of sapwood, heartwood and
wet wood has been conducted by means of measuring their permeability and
diffusion. As expected, sapwood permeability was the highest in all 3 anatomical
directions, whereas the differences between heartwood and wet heart were
statistically insignificant. A lower permeability of heartwood was due to pit
aspiration, since after the samples have been treated with alcohol, because of
deaspiration, their permeability increased. The diffusion coefficient in sapwood
samples was higher than in heartwood ones, which was also a result of heartwood
processes. A correlation between a decreasing diffusion and increasing density
has been established. On the other hand, permeability does not depend on density.

KAZALO VSEBINE

	str.
Ključna dokumentacijska informacija (KDI)	III
Key words documentation (KWD)	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic	VII
Kazalo slik	VIII
Kazalo prilog	X
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 HIPOTEZE	1
1.3 CILJI	2
2 SPLOŠNI DEL	3
2.1 KARAKTERISTIKE BELJAVE, JEDROVINE IN MOKRINE	3
2.1.1 Beljava	3
2.1.2 Jedrovina	3
2.1.3 Mokrina	5
2.2 VODA V LESU	7
2.3 PERMEABILNOST LESA	7
2.4 DIFUZIVNOST LESA	13
2.4.1 Difuzijsko gibanje vode v lesu	13
2.4.2 Določanje difuzivnosti pri stacionarnih pogojih	13
2.4.3 Določanje difuzivnosti pri nestacionarnih pogojih	15
2.4.3.1 Analitične rešitve nestacionarne difuzije	16
2.4.3.2 Vpliv vlažnosti in temperature na difuzijske koeficiente	19
2.4.3.3 Koeficient snovne prestopnosti (S)	20
Nestacionarna metoda določanja difuzijskih koeficientov in koeficientov snovne prestopnosti	21

3	MATERIALI IN METODA	25
3.1	MATERIAL	25
3.1.1	Vrsta lesa	25
3.1.2	Izbira vzorcev	25
3.2	METODA	28
3.2.1	Metoda določanja permeabilnosti	28
3.2.2	Merjenje difuzivnosti	31
4	REZULTATI	36
4.1	PERMEABILNOST BELJAVE, JEDROVINE IN MOKRINE	36
4.1.2	Permeabilnost predhodno prepojenih vzorcev z alkoholom	41
4.2	DIFUZIVNOST BELJAVE, JEDROVINE IN MOKRINE	43
4.2.1	Določanje difuzivnosti	43
4.2.2	Koeficient snovne prestopnosti (S)	45
5	RAZPRAVA	46
6	SKLEPI	52
7	POVZETEK	54
8	VIRI	56
	ZAHVALA	
	PRILOGE	

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 4.1: Permeabilnost beljave, jedrovine in mokrine v longitudinalni smeri.	36
Preglednica 4.2: Permeabilnost beljave, jedrovine in mokrine v radialni smeri smeri.	37
Preglednica 4.3: Permeabilnost beljave, jedrovine in mokrine v tangencialni smeri.	38
Preglednica 4.4: Primerjava permeabilnosti beljavnih (B) in jedrovinskih (J) vzorcev, predhodno prepojenih z alkoholom (vzorci A) z vzporednimi vzorci, ki niso bili alkoholno tretirani (vzorci K).	41
Preglednica 4.5: Povprečni difuzijski koeficient D in povprečni koeficient snovne prestopnosti S z minimalnimi in maksimalnimi vrednosti za beljavo in jedrovino – osnovno statistiko.	44

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Grafična rešitev Newmanove enačbe, odvisnost brezdimenzijskega potenciala \bar{E} z brezdimenzijskim časom τ pri različnih vrednostih Biotovega števila.	22
Slika 3.1: Vzorci beljave, jedrovine in mokrine jelovine, pripravljene za merjenje plinske permeabilnosti.	26
Slika 3.2: Vzorci beljave in jedrovine jelovine, pripravljene za merjenje difuzivnosti pri nestacionarnih pogojih.	27
Slika 3.3: Nekoliko modificirana Petti-jeva naprava za merjenje plinske permeabilnosti lesa.	29
Slika 3.4: Vzorci, pripravljene za tehtanje.	32
Slika 3.5: Merjenje difuzivnosti pri nestacionarnih pogojih.	33
Slika 3.6: Krivulja uravnovešanja beljavnega in jedrovinskega vzorca. Vzorec 1/1 B1 in 1/1 J1, debelina 10mm.	34
Slika 3.7: Razmerje debeline vzorca in navideznega difuzijskega koeficienta v odvisnosti od debeline vzorca	35
Slika 4.1: Permeabilnost beljave, jedrovine in mokrine v longitudinalni smeri.	37
Slika 4.2: Permeabilnost beljave, jedrovine in mokrine v radialni smeri.	38
Slika 4.3: Permeabilnost beljave, jedrovine in mokrine v tangencialni smeri.	39

Slika 4.4: Primerjava permeabilnosti v longitudinalni, radialni in tangencialni smeri po kategorijah lesa.	40
Slika 4.5: Primerjava permeabilnosti v longitudinalni smeri med vzporednimi vzorci tretiranih (vzorci A) in netretiranih vzorcev z alkoholom (vzorci K).	42
Slika 4.6: Krivulja uravnovešanja vzorca in določanja D in S.	43
Slika 4.7: Povprečni difuzijski koeficient D pri beljavi in jedrovini.	44
Slika 4.8: Povprečni koeficient snovne prestopnosti S pri beljavi in jedrovini.	45
Slika 5.1: Prikaz porazdelitve izračunanih koeficientov plinske permeabilnosti v longitudinalni smeri. Primerjava med beljavo, jedrovino in mokrino.	47
Slika 5.2: Prikaz porazdelitve izračunanih koeficientov plinske permeabilnosti v radialni smeri. Primerjava med beljavo, jedrovino in mokrino.	48
Slika 5.3: Prikaz porazdelitve izračunanih koeficientov plinske permeabilnosti v tangencialni smeri. Primerjava med beljavo, jedrovino in mokrino.	48
Slika 5.4: Prikaz porazdelitve izračunanih difuzijskih koeficientov vzorcev za merjenje difuzivnosti pri nestacionarnih pogojih. Primerjava beljave in jedrovine.	50
Slika 5.5: Prikaz porazdelitve difuzijskih koeficientov, dobljenih iz polovičnih časov vzorcev za merjenje difuzivnosti pri nestacionarnih pogojih. Primerjava med beljavo in jedrovino.	50
Slika 5.6: Prikaz porazdelitve gostote vzorcev za merjenje difuzivnosti pri nestacionarnih pogojih. Primerjava med beljavo in jedrovino.	51

KAZALO PRILOG

- Priloga 1: Gostota (ρ) in permeabilnost (kg) v longitudinalni (L), radialni (R) in tangencialni (T) smeri za vzorce beljave (B), jedrovine (J) in mokrine (M).
- Priloga 2: Sprememba mase beljavnih vzorcev različnih debelin pri merjenju difuzivnosti.
- Priloga 3: Parametra linearne regresije (k, n) in izračun difuzijskega koeficienta (D) in koeficienta snovne prestopnosti (S) za beljavo (B) in jedrovino (J).
- Priloga 4: Izračun smernega koeficienta (k), difuzijskega koeficienta (D) in navideznega difuzijskega koeficienta beljavnih vzorcev (Def) s polovičnim uravnovesnim časom ($t_{1/2}$), pri različnih debelinah vzorcev (L) iz beljave jelovine.
- Priloga 5: Izračun smernega koeficienta (k), difuzijskega koeficienta (D) in navideznega difuzijskega koeficienta beljavnih vzorcev (Def) s polovičnim uravnovesnim časom ($t_{1/2}$), pri različnih debelinah vzorcev (L) iz jedrovine jelovine.
- Priloga 6: Navidezni difuzijski koeficient (Def) in razmerjem med debelino (L) in navideznim difuzijskim koeficientom ter realni difuzijski koeficient (D) in koeficient snovne prestopnosti (S) za beljavo in jedrovino jelovine.

1 UVOD

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Sušenje lesa je pomemben postopek predelave lesa, ki zahteva veliko znanja in izkušenj. Brez dobrega poznavanja lesa, lahko nastanejo velike napake sušenja, ki se odražajo v slabi kakovosti posušenega lesa. Da bi bilo sušenje čim bolj ekonomično, material pa ostal v čim boljšem stanju, moramo poznati njegove sušilne karakteristike, ki jim moramo prirediti optimalne pogoje. Sušilne karakteristike lesa, določene s permeabilnostjo in difuzivnostjo, se razlikujejo med drevesnimi vrstami, različne pa so tudi v okviru iste drevesne vrste in samega drevesa. Permeabilnost in difuzivnost se razlikujeta predvsem v beljavi in jedrovini, negativen učinek pa imajo ostali terciarni pojavi, ki se pojavljajo pri nekaterih drevesnih vrstah.

Pri jelovini ima negativni učinek na sušenje pogosto prisotno mokro srce. Sušenje jelovine je zato še toliko zahtevnejše, ker moramo paziti na mokro srce, ki je ob nepravilnem sušenju pogosto vzrok za velike deformacije posušenega lesa. Mokro srce ima veliko višjo vlažnost od normalne jedrovine, od nje pa se loči tudi fiziološko, kar slabša sušilne karakteristike tega tkiva.

1.2 HIPOTEZE

Na optimalni kakovostni izkoristek tudi pri slabšem materialu lahko vplivamo z ustrezno definiranimi procesnimi parametri, ki jih določamo glede na sušilne karakteristike sušečega se lesa. Predpostavljamo, da so te še posebno odstopajoče pri jedrovini z mokrim srcem. Zato bomo z dobrim poznavanjem različnih kategorij lesa in njegovega odziva med sušenjem dosegli optimalne rezultate.

1.3 CILJI

Permeabilnost in difuzivnost sta med najrelevantnejšimi lastnostmi lesa za ocenjevanje sušilnih karakteristik, zato smo eksperimentalno delo usmerili ravno na proučevanje permeabilnosti in difuzivnosti vzorcev iz beljave, jedrovine in mokrega srca. Medtem, ko je za pretok vode v živem drevesu pomembna vzdolžna permeabilnost, pa je za sušenje žaganega lesa pomembnejša prevodnost lesa v radialni in tangencialni smeri. Zaradi medsebojnih primerjav in korelacij smo se odločili za določanje prevodnosti v vseh treh smereh.

Permeabilnost je močno odvisna tudi od fiziološkega stanja tkiva. Pomembno vlogo ima pri tem aspiracija obokanih pikenj. Ker naj bi obdelava z alkoholom povzročila deaspiracijo in s tem tudi povečanje permeabilnosti, smo primerjalno želeli ovrednotiti tudi permeabilnost na vzporednih z alkoholom tretiranih vzorcih.

Na difuzivnost močno vplivajo tudi jedrovinske snovi, ki se v procesu ojedritve inkrustirajo v celične stene, zato smo njihov učinek želeli ovrednotiti s primerjavo difuzivnosti beljave in jedrovine.

Za vrednotenje sušilnih karakteristik pod točko nasičenja celičnih sten smo se odločili z nestacionarno metodo določanja difuzijskih koeficientov in koeficientov snovne prestopnosti za beljavo in jedrovino.

2 SPLOŠNI DEL

2.1 KARAKTERISTIKE BELJAVE, JEDROVINE IN MOKRINE

2.1.1 Beljava

Po definiciji IAWA (International Association of Wood Anatomists) (Torelli, 1990) je beljava periferni del debla ali veje s še živimi parenhimskimi celicami, ki vsebujejo rezervne snovi, npr. škrob. Beljava vsebuje žive parenhimske celice, rezervno hrano in ima visoko vlažnost. Beljava prevaja vodo z minerali, vzdržuje procese metabolizma in shranjuje hrano. Prevajanje vode poteka po vaskularnem tkivu, to je traheidah pri iglavcih in trahejah ter deloma vlaknih pri listavcih. Celice, ki prevajajo vodo so mrtve, metabolizem in skladiščenje hrane pa poteka v živih celicah trakovnega in aksialnega parenhima.

2.1.2 Jedrovina

Vsa drevesa imajo beljavo (Torelli, 1990), ojedritev pa je starostni pojav, povezan s staranjem in programiranim odmiranjem parenhimskih celic. Ojedritev ali vsaj njeni zametki, slejkoprej nastopijo pri večini lesnih vrst, pri nekaterih že v prvih desetletjih življenja, pri drugih pa se beljava ne pretvori v jedrovino niti po 100 in več letih. Prvo skupino drevesnih vrst prištevamo k tistim, ki vsebujejo pravo jedrovino, pri ostalih pa se pogosto pojavi diskoloriran les. Ojedritev je genetsko programiran proces, čas nastanka diskoloriranega lesa pa ni genetsko voden, pač pa je močno odvisen od dejavnikov okolja.

Ojedritev je torej starostni pojav. Za drevesa je značilno odstranjevanje starejših, manj vitalnih tkiv in celic, najsi bodo to listi, veje, zunanje plasti skorje ali parenhimske celice v lesu. Žive celice beljave v smeri od kambija proti strženu oz. jedrovini se fiziološko starajo in doživljajo številne spremembe. Te procese je mogoče opaziti kot spremembe celičnih jeder in organelov. Za jedra vitalnih celic na periferiji je značilna vitka eliptična oblika, ki

v smeri proti strženu postaja vse bolj okrogla. Jedra v prehodni coni izginejo. V isti smeri upada tudi respiracijska aktivnost. Običajne biokemijske poti presnove se preokrenejo in nastajati začnejo predhodniki jedrovinskih snovi – ekstraktivov. Kopičenje jedrovinskih snovi v lumnih celic še dodatno slabi njihovo vitalnost in končno vodi k njihovem postopnem odmrtju. Ekstraktivi se začno kopičiti že v živih celicah v prehodni coni. Iz parenhimskih celic, kjer nastanejo, difundirajo v sosednje tkivo in se odložijo v lumne in celične stene trahej, vlaken in traheid (Torelli, 1990).

Opisani procesi so najintenzivnejši v notranjih plasteh beljave, ki imajo značilnosti prehodne cone. To je navadno nekaj branik široka cona v notranjem delu beljave in še ni obarvana. Poleg spremenjenega metabolizma živih celic je zanjo značilna tudi otiljenost trahej in naraščajoča količina ekstraktivov. Zaradi razlik v vlažnosti jo je neposredno po poseku drevesa v ugodnih razmerah mogoče prepoznati kot svetel pas med beljavo in jedrovino. Včasih ojedritveni procesi potekajo postopno, tako da ni mogoče vizualno, makroskopsko razmejiti beljave in jedrovine (Torelli, 1990).

Jedrovina predstavlja notranje plasti lesa v rastočem drevesu, kjer so parenhimske celice odmrle, rezervne snovi, ki so jih le-te vsebovale, npr. škrob pa so se odstranile ali spremenile v jedrovinske snovi. Pri nas so jedrovine večinoma obarvane in tedaj jih lahko imenujemo črnjava. Jedrovina je lahko tudi neobarvana, tako kot pri smreki in jelki. Barvno razlikovanje beljave in jedrovine tako ni vedno mogoče (Torelli, 1990).

Celične stene v jedrovini so prepojene z ekstraktivi, oz. jedrovinskimi snovmi, ki so praviloma toksični nizkomolekularni polifenoli inkrustirani v celičnih stenah. Ker se inkrustirajo (vgradijo) v celično steno, prispevajo k povečani dimenzijski stabilnosti lesa ter praviloma k njegovi večji biološki odpornosti. Poleg navedenih prednosti, ojedritev včasih potencira nevarnost kolapsa in tudi znatno upočasnjuje sušenje. V primerjavi z beljavo ima jedrovina v živem drevesu nižjo vlažnost in nižjo vsebnost mineralov (Torelli, 1990).

2.1.3 Mokrina

Jelka ima, podobno kot smreka, neobarvano, zelo suho jedrovino ($u = 30-40\%$) in zelo vlažno beljavo (u do 200%), zato ju takoj po poseku zlahka razlikujemo. Po sušenju razlike skoraj povsem izginejo. V procesu transformacije beljave v jedrovino nizkomolekularne jedrovinske snovi penetrirajo v celično steno in tako zmanjšujejo prostor za higroskopsko (vezano) vodo. Posledica je nižja ravnovesna vlažnost in točka nasičenja celičnih sten jedrovine v primerjavi z beljavo.

Z jelovim mokrim srcem (mokrino) označujemo diskolorirano mokrino pravilne oblike, obdane s suho cono na lokaciji neobarvane jedrovine in mokrino, ki se iz jedrovine jezikasto širi v beljavo (patološka mokrina). Normalno mokro srce je večinoma povezano z mrtvimi vejami, medtem, ko je izvor patološkega srca v koreninah, odkoder se širi navzgor po deblu. Je spremenljive barve in se pojavlja tudi v majhnih žepih v beljavi (Torelli, 2005).

Po mnenju nekaterih avtorjev (Jeremić, 1995), naj bi bile mokrine posebna oblika diskoloriranega lesa in jih povezujejo s poškodbami. Pri naših drevesnih vrstah se mokrine najpogosteje pojavljajo pri jelki, kjer je ta navadno omejena na osrednji del in se imenuje mokro srce in pri topolu, kjer se navadno pojavljajo nepravilno razporejeni mokri žepi.

Povišana vlažnost mokrega srca naj bi bila posledica bakterijske okužbe, vendar ni povsem jasno ali je okužba vzrok nastanka mokrega srca ali le njena posledica. Ward in Zeikus 1980 ter Schink in Ward 1984 (cit. po Torelli 2005) so raziskovali vlogo in aktivnosti bakterij pri nastanku mokrega srca. Bakterije lahko prodre v drevo skozi poškodovane korenine, deblo ali krošnjo. V sprva suho jedrovino, ki vsebuje nekaj kisika, se naselijo najprej aerobne bakterije (*Pseudomonas*), kasneje semiaerobne (*Erwinia*, *Enterobacter*) in slednjič anaerobne (*Clostridium*, *Corynebacterium*, *Methanobacterium*).

Ishii in Fukazawa 1987 (cit. po Torelli 2005) iz analize organskih snovi v ekspresatu beljave in mokrega srca sahalinske jelke (*Abies sahalinensis*) sklepata, da bakterijska aktivnost vsaj v začetni fazi ni glavni vzrok za nastanek mokrega srca.

Pri patološkem mokrem srcu so najverjetneje udeležene tudi štorovka (*Armillarea sp.*) in zlasti rdeča trohnoba (*Heterobasidion sp.*). Infekcija poteka prek debelejših korenin, ki so zlasti pri jelki pogosto povezane s koreninami sosednjih dreves (koreninska fuzija).

Neugledna sivorjava obarvanost mokrega srca je rezultat oksidacije fenolnih snovi, ki nastajajo pri bakterijskem razkroju. Značilen neprijeten vonj (zlasti patološkega) mokrega srca je prav tako posledica delovanja bakterij oz. nastajanje maslene, mlečne, propionske in očetne kisline (in metana).

Coutts in Risbeth 1977 (cit. po Torelli 2005) menita, da je transport vode iz beljave v mokrino posledica dokazane razlike v ozmotskem tlaku med beljavo in mokrino, v kateri se kopičijo metaboliti. Opazovala sta tudi, da mokrina nastaja najhitreje pri drevesih z bujno rastjo in v času intenzivnega metabolizma. Raziskave potrjujejo, da mokro srce ni bilo prisotno ali je bilo le šibko razvito pri drevesih v zadnji fazi propadanja z izrazito prirastno depresijo in manjkajočimi branikami na bazi drevesa (Torelli, 2005).

K staranju drevja (Torelli, 2005) prispevajo številni vzroki, med katerimi je tudi pojav odlomljenih vej. Jelka dosega praviloma visoke starosti in velike dimenzije, zato so simptomi staranja močno izraženi in vplivajo na kvaliteto lesa. Mokro srce lahko štejememo med starostne fenomene.

Danes v Sloveniji opažamo, da ima večina jelk mokro srce, ki je najbolj izrazito v spodnjem delu debla. Les mokrine je lahko manj permeabilen in je bolj nagnjen h kolapsu. Mokro srce je eden od razlogov, da je jelovina danes manj cenjena kot smrekovina.

2.2 VODA V LESU

Voda je sestavni del živega drevesa, ki mu omogoča normalno delovanje in je osnovna in bistvena sestavina. Tudi po poseku drevesa, voda ostaja v lesu in se iz njega počasi izloča. Vpliv vode v lesu na njegovo delovanje in obnašanje je veliko. Večina fizikalnih lastnosti lesa je povezanih z vodo v lesu. Poznamo dve različni obliki vode v lesu:

- prosto in
- vezano vodo.

Prosta voda se nahaja v celičnih lumnih, vezana voda pa je adsorbirana na higroskopične celične stene. Zaradi svoje kemične zgradbe in velike notranje površine celičnih sten je les higroskopen, kar pomeni, da oddaja ali sprejema vodo. Prosta voda se pomika zaradi kapilarne tenzije, ki se vzpostavi med tekočino in plinom. Da se vzpostavi masni tok proste ali kapilarne vode iz notranjosti na površino lesa, morata biti izpolnjena dva pogoja: v prosti vodi morajo biti zračni mehurčki, ki so večji od por v pikenjskih membranah in obstajati mora sklenjena povezava od celice do celice, to je, les mora biti permeabilen.

Pod točko nasičenja celičnih sten (TNCS) obstaja v lesu le vezana ali higroskopska voda. Ta vzpostavlja vlažnostno ravnovesje s klimo, v kateri se les nahaja. Voda pod TNCS se giblje po principu difuzije.

2.3 PERMEABILNOST LESA

Les je heterokapilaren sistem, pri čemer predstavljajo kapilarni sistem celični lumni in pikenje, oziroma odprtine v pikenjskih membranah. Za učinkovit transport proste vode morata biti izpolnjena dva pogoja: les mora biti permeabilen in v prosti vodi morajo biti prisotni zračni mehurčki, ki so večji od por v pikenjskih membranah. Vedeti moramo, da les ki je porozen še ni tudi prevoden ali permeabilen.

Med permeabilnostjo in poroznostjo ni stroge korelacije. Lahko je lesno tkivo zelo porozno, ni pa permeabilno, saj na permeabilnost lahko vpliva več dejavnikov. Zato je

permeabilnost lesa zelo variabilna lastnost. Permeabilnost se razlikuje v različnih smereh lesa pa tudi med lesnimi vrstami, nanjo pa lahko vpliva še vrsto dejavnikov. V vzdolžni smeri je permeabilnost največja.

Dejavniki poroznosti so:

- anatomska zgradba lesa različnih drevesnih vrst,
- fiziološko stanje lesnega tkiva,
- delež ranega in kasnega lesa in
- lega lesa v drevesnem deblu.

Pomemben dejavnik soudeležen v interakciji voda-les je tudi kapilarnost. Težnjo tekočine, da se dvigne po kapilari imenujemo kapilarnost in je posledica površinske napetosti tekočine in radija kapilare. Velik vpliv na površinsko napetost ima temperatura, saj se s povečevanjem slednje, površinske napetosti znižujejo. Predstavljajmo si, kaj se zgodi s stekleno kapilaro, če jo postavimo v vodo ali katero drugo tekočino, kjer površinske napetosti povzročijo dvig tekočine po kapilari. Ob premikanju tekočine po kapilari se v sredini kapilare ustvari menisk, pod katerim je tlak nižji od atmosferskega za $2\gamma/r$, pri čemer je r - radij meniska, γ -površinska napetost. Tlak zunaj kapilare je enak atmosferskemu tlaku (P), znotraj pa ($P-2\gamma/r$). Višji, zunanji tlak prisili tekočino, da se premika po kapilari, dokler ni doseženo hidrostaticno ravnovesje.

Na dvig tekočine po kapilari vpliva premer kapilar in površinska napetost tekočine.

Transport kapljev in skozi porozne snovi lahko poteka na več načinov. Poznamo:

- laminarni ali viskozni tok,
- turbolentni tok,
- nelinearni tok in
- molekularni tok (Siau, 1995).

Laminarni tok opazamo v ozkih kapilarah. Vzrok je veliko razmerje površine kapilare glede na njen volumen, kar omogoča veliko viskozno silo. Struktura lesa z veliko majhnimi kapilarami je vzrok, da imamo v lesu pogosto opravka z laminarnim tokom kapljev, redko pa je kot posledica večjih hitrosti medija prisoten turbolentni način pretoka. Pri prehodih med velikimi in majhnimi kapilarami (pri lesu npr. med trahejami in piknjami oz. njihovimi odprtini) se pri majhnih hitrostih pogosto pojavlja tudi nelinearni tok in je posledica izgube kinetične energije. Ob laminarnem toku se lahko zaradi prisotnega statičnega tlačnega oz. koncentracijskega gradienta vzpostavi tudi difuzijski, molekularni tok. Pri lesu je zlasti pomemben pri pretokih plinov, kjer se lahko povprečna razdalja med molekulami plina približa povprečnemu polmeru kapilar.

Viskozni ali laminarni tok poteka torej v kapilarah pri relativno nizkih hitrostih. Turbulentni tok se pojavi takrat, ko se pretok močno poveča in nastanejo vrtinci, ki motijo gladek enakomeren tok. Nelinearni tok nastopi zaradi padca kinetične energije ob vstopu v krajšo kapilarno. Molekularna (Knudsen-ova) difuzija je posledica interakcij med molekulami plina in steno kapilare (Siau, 1995).

Skozi heterogeno, anizotropno, porozno in kapilarno strukturo, kot je les, je tok kapljev pogosto kombinacija navedenih načinov. Razmejitev načina transporta kapljevine lahko eksperimentalno določimo z brezdimenzijskim Reynolds-ovim številom (Re):

$$\text{Re} = \frac{2 \cdot \rho \cdot Q}{\pi \cdot \eta \cdot r} = \frac{d \cdot v \cdot \rho}{\eta} \quad \dots(1)$$

ρ ...gostota kapljevine [kg/m³]

Q ...pretok kapljevine [m³/s]

r ...polmer kapilare [m]

d ...premer kapilare [m]

v ...povprečna linearna hitrost [m/s]

η ...viskoznost kapljevine [Pa/s]

Eksperimentalne ugotovitve kažejo, da se prve motnje v toku pojavljajo pri vrednostih Reynoldsovega števila nad 2000. Pri višjih vrednostih se tako pojavi tubolentni tok, kjer se pretok kapljevine ne zmanjšuje več linearno s povečevanjem tlačnega gradienta, ampak počasneje.

Najpomembnejšo sekundarno spremembo v lesu, to je ojedritev, spremlja odlaganje nizkomolekularnih jedrovinskih snovi v celično steno, lumne in na pikenjsko membrano (margo) ter aspiracija obokanih pikenj pri iglavcih. Tudi pri listavcih sekundarne spremembe lesa (otiljenje – vraščanje parenhimskih celic v izpraznjene lumne trahej, odlaganje jedrovinskih snovi) blokirajo transportne poti in močno zmanjšajo permeabilnost lesa. Nadalje je mogoče variabilnost permeabilnosti pri drevesnih vrstah, ki so bolj nagnjena k otiljenju, pojasnjevati bodisi z različnimi premeri in številom pikenj med trahejami, s tilami ter velikostjo in številom mikropor v tilah (Bao in sod., 1999 cit. po Merela 2002).

Na variabilnost vzdolžne permeabilnosti vpliva tudi število in premeri trahej. Radialni masni tok pri listavcih poteka pretežno po trakovih, medtem, ko je tangencialni tok bolj kompleksen. Tangencialni tok je v največji meri odvisen od prisotnosti pikenj, ki povezujejo traheje, vlakna in aksialni parenhim. Zelo pomembne so intervaskularne piknje med trahejami. Presenetljivo je, da obstaja dobra korelacija med radialno in tangencialno permeabilnostjo, kar posredno dokazuje slabšo permeabilnost trakov pri listavcih. Z nekaterimi postopki, kot so denimo parjenje, ekstrahiranje, kemijska obdelava, sublimacijsko sušenje v vakuumu, itd., lahko permeabilnost lesnega tkiva tudi povečamo (Bao in sod., 1999 cit. po Merela 2002).

Prevodnost lesa v stacionarnem stanju opisuje Darcey-ev zakon, ki temelji na enakomernem pretoku tekočine skozi les oz. konstantni permeabilnosti (Siau, 1984).

prevodnost = pretok / tlačni gradient

...(2)

Zakon je veljaven za idealiziran model poroznega materiala pri stacionarnih pogojih in ga lahko zapišemo v obliki (Siau, 1995):

$$\frac{Q}{A} = k \frac{\Delta P}{\Delta l}, \text{ pri čemer je:} \quad \dots(3)$$

Q...volumski tok [m³/s],

A...površina, pravokotna na tok [m²],

k...koeficient permeabilnosti [m³/m Pa s],

ΔP...tlačna razlika [Pa],

Δl...razdalja [m].

Pri zapisu enačbe za pretok plinov moramo upoštevati stisljivost plina kot vzrok za stalne spremembe tlačnega gradienta in volumskega pretoka tako, da lahko koeficient plinske permeabilnosti (k_g) izrazimo kot:

$$k_g = - \frac{Q}{A} \times \frac{1}{\frac{dP}{dl}} \quad \dots(4)$$

V volumskem toku lahko izotermno ekspanzijo idealnega plina, povzročeno s padcem tlaka izračunamo iz splošne plinske enačbe ($PV = nRT \Rightarrow V = (nRT)/P$). Tako lahko enačbo (4) preoblikujemo v:

$$k_g P dP = - \frac{nRT}{tA} dl, \text{ jo integriramo:} \quad \dots(5)$$

$$k_g \int_{P_1}^{P_2} P dP = - \frac{nRT}{tA} \int_l^0 dl, \text{ ter po integriranju dobimo:}$$

$$k_g = \frac{2nRTl}{tA(P_2 - P_1)(P_2 + P_1)} \quad \dots(6)$$

Ker je $\frac{P_1 + P_2}{2} = \bar{P}$ povprečni tlak in $P_2 - P_1 = \Delta P$ tlačna razlika, lahko zapišemo Darcyjev zakon za pline:

$$k_g = \frac{QlP}{A\Delta P\bar{P}} \quad \dots(7)$$

k_g ...koeficient plinske permeabilnosti [$\text{m}^3/\text{m Pa s}$],

Q ...volumski tok plina [m^3/s],

l ...dolžina vzorca [m],

P ...tlak, pri katerem je merjen volumski tok [Pa],

A ...površina, skozi katero prehaja tok plina [m^2],

\bar{P} ...povprečni tlak [Pa].

Če padec tlaka na merilcu volumskega toka zanemarimo, na vstopni strani vzorca predpostavimo zunanji oz. normalni zračni tlak ($P_1 = P_{zun} = P_{norm.} = 1,013 \text{ bar}$), na izstopni strani pa upoštevamo tlačno razliko ($P_2 = P_{zun} - \Delta P$), lahko pri navedenih pogojih Darcyjev zakon za pline končno zapišemo:

$$k_g = \frac{2QP_{zun}}{A\Delta P(2P_{zun} - \Delta P)} \quad \dots(8)$$

2.4 DIFUZIVNOST LESA

2.4.1 Difuzijsko gibanje vode v lesu

Vešana voda lahko v lesu prehaja na različne načine. Poznamo:

- prehod vezane vode skozi celično steno,
- prehod vezane vode skozi celično steno in skozi lumen celice z difuzijo pare in
- prehod vezane vode z difuzijo pare skozi lumne in preko pikenjskih povezav iz lumna v lumen sosednje celice.

Najpogostejša oblika prenosa vezane vode v lesu je difuzija skozi celične stene in lumne. Nekatere molekule vode pa ne prehajajo po celični steni, ampak pridejo do celičnega lumna, se odcepijo od celične stene in se kot para prenesejo preko lumna na drugo stran celične stene. Sledi zopet prenos kot difuzija vode po celični steni itd.

Lahko pa vezana voda v celoti prehaja kot difuzija pare skozi celične lumne in piknje v celični steni. Delež parnega difuzijskega toka skozi piknje povečamo z razliko tlaka (vakuumsko sušenje) in z razliko temperatur, sicer je ta prehod skozi piknje v obliki pare zanemarljiv (Stamm, 1959, cit. po Siau, 1995).

2.4.2 Določanje difuzivnosti pri stacionarnih pogojih

Difuzivnost lahko definiramo kot molekularni snovni tok, ki se pojavi zaradi koncentracijskega gradienta difuzijske substance. Gibanje vode v lesu pri stacionarnih pogojih lahko opišemo s prvim Fikovim zakonom. Splošna oblika je:

difuzivnost = fluks/gradient.

$$D = \frac{m/t \cdot A}{\Delta C/x} \quad \dots(9)$$

D.....difuzijski koeficient [m^2/s],

m/t.....masni tok [kg/s],

A.....površina vzorca, ki je pravokotna na tok vodne pare [m^2],

x..... dolžina v smeri toka [m],

ΔC ... razlika koncentracij [kg/m^3].

Razliko koncentracij ponavadi izračunamo iz razlik vlažnosti vzorca, saj je to dosti bolj prikladno, ko delamo z lesom.

$$\Delta C = \frac{R_u \cdot \Delta u}{100} \quad \dots(10)$$

ΔCrazlika koncentracij [kg/m^3],

R_uosnovna gostota [kg/m^3],

Δurazlika lesne vlažnosti [%].

Gradient koncentracije (ΔC) ali vlažnostni gradient (Δu) lahko izrazimo tudi z gradienti, ki temeljijo na potencialih:

- parcialnega parnega tlaka (p),
- kemijskem (μ) ali vodnem potencialu (ψ) ali
- potencialu proste energije (G) (Siau, 1995).

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

2.4.3 Določanje difuzivnosti pri nestacionarnih pogojih

Za nestacionarni transport je značilno, da sta fluks in gradient variabilna v prostoru in času, medtem ko sta pri stacionarnem transportu obe komponenti konstantni. Drugi Fikov zakon opisuje transport pri nestacionarnih pogojih. Tu upoštevamo, da so koeficienti konstantni. Hitrost transportiranja vode lahko zapišemo na sledeči način (Siau, 1995):

$$\left(\frac{\partial m}{\partial t}\right) = \overline{K_u} \cdot A \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right) \cdot \Delta x \quad \dots(11)$$

$\left(\frac{\partial m}{\partial t}\right)$ hitrost gibanja vode, [kg/s]

m.....masa transportirane vode, [kg]

u.....vlažnost [%]

$\overline{K_u}$ povprečna prevodnost za difuzijo vezane vode, [kg/ms%]

Hitrost prehoda vode skozi vzorec lahko izračunamo tudi preko produkta povprečne osnovne gostote, gostote vode, volumna vzorca in stopnjo spremembe vlažnosti, izražene v decimalni obliki:

$$\left(\frac{\partial m}{\partial t}\right) = \frac{R_u \rho_w A \Delta x}{100} \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right) \quad \dots(12)$$

R_upovprečna nominalna gostota, [kg/m³]

ρ_wgostota vode,

$A \Delta x$volumen vzorca [m³],

$R_u \rho_w / 100$...masa vode, ki je potrebna, da se vlažnost 1m³ lesa poveča za 1%, [kg/m³%].

2.4.3.1 Analitične rešitve nestacionarne difuzije

Analitične rešitve enačbe nestacionarnega stanja je natančno opisal Crank, 1956 (cit. po Siau, 1995) z začetnimi robnimi pogoji in zahtevki (ter veljajo analogno za prenos toplote ali snovi):

- koeficienti so konstantni;
- začetne vrednosti temperature (T), lesne vlažnosti (u), tlaka (P) so konstantne skozi celotni vzorec;
- zunanje površine vzorcev takoj izpostavijo ravnovesno stanje z okoliško temperaturo, vlažnostjo ali tlakom okolice;
- prehod toplote, vode ali plina je simetričen po celotnem vzorcu.

Potrebno je poudariti, da so predpostavke približno točne le v primeru, ko so koeficienti vsaj približno konstantni.

Vendar so tudi v primeru majhnih potencialov rešitve dokaj zadovoljive. Za primer transporta vode koeficiente določimo iz povprečne vlažnosti,

$$\bar{u} = u_1 + 2/3 \cdot (u_2 - u_1) \quad \dots(13)$$

\bar{u}povprečna vlažnost, za izračun difuzijskega koeficienta [%],

u_1nižja ravnovesna vlažnost [%],

u_2višja ravnovesna vlažnost [%].

Za tok plina velja enostavna aritmetična sredina začetnega in končnega povprečja tlakov.

Rešitve problemov nestacionarne difuzije se poenostavijo, če enačbo prevedemo v brezdimenzijsko obliko z vrednostmi med 0 in 1 oz. med 0 in ∞ . Brezdimenzijski potencial (E) definiramo z veličino, ki omogoča difuzijski tok (npr. koncentracija, vlažnost, temperatura, tlak (en. 14)). »E« je časovno in krajevno odvisna spremenljivka.

$$E = \frac{T - T_z}{T_k - T_z} = \frac{P^2 - P_z^2}{P_k^2 - P_z^2} = \frac{u - u_z}{u_k - u_z} \quad \dots(14)$$

E.....brezdimenzijska temperatura, vlažnost ali tlak v času t na neki razdalji x od sredine vzorca,

T, u in P^2 vrednost spremenljivke v času t na razdalji x,

T_z , U_z in P_zzačetna vrednost spremenljivke, ki je po celem vzorcu enaka,

T_k , u_k in P_k končna vrednost konstantne spremenljivke na zunanji površini, ki je skozi ves čas konstantna

Vpeljemo še brezdimenzijski čas (τ).

$$\tau = \frac{t \cdot D}{a^2} \quad \dots(15)$$

t.....čas [s],

D...difuzijski koeficient [m^2/s],

a = L/2...polovica debeline [m].

Enačbo izraženo z brezdimenzijskimi spremenljivkami zapišemo:

$$\left(\frac{\partial E}{\partial \tau} \right) = \left(\frac{\partial^2 E}{\partial X^2} \right) \quad \dots(16)$$

X...brezdimenzijska razdalja v vzorcu pravih oblik = x/a.

Zelo pogosta je zahteva po izračunu povprečnih vrednosti, kot za primer vlažnost lesa, kjer je skoraj vedno izražena kot srednja vrednost. Eno od možnih rešitev za izračun povprečnega potenciala \bar{E} lahko dosežemo z integriranjem enačbe za izračun E. Pogosto povprečni potencial definiramo kot:

$$\bar{E} = \frac{\bar{u} - u_z}{u_k - u_z} \quad \dots(17)$$

\bar{E}povprečna brezdimenzijska vlažnost v času t,

\bar{u}povprečna vlažnost v času t.

\bar{E} je premosorazmeren spremembi vlažnosti. Splošno brezdimenzijsko nestacionarno enačbo s povprečnim potencialom \bar{E} zapišemo kot:

$$\left(\frac{\partial \bar{E}}{\partial \tau}\right) = \left(\frac{\partial^2 \bar{E}^2}{\partial X^2}\right) \quad \dots(18)$$

Crank 1956, (cit. po Siau, 1995) je predstavil enačbo ob danih robnih in začetnih pogojih v obliki vrste, ki izredno hitro konvergira, zato v praksi uporabimo le nekaj prvih členov.

Enačba je izpeljava iz enačbe (16).

$$E = 1.0 - 1.27 \exp(-2.47\tau) \cos[90^\circ(x/a)] + 0.425 \exp(-22.2\tau) \cos[270^\circ(x/a)], \quad \dots(19)$$

za $\tau \geq 0.07$

Kadar računamo potencial v sredini vzorca, se enačba poenostavi v obliko:

$$E = 1.0 - 1.27 \exp(-2.47\tau) + 0.425 \exp(-22.2\tau) \quad \dots(20)$$

Če je τ večji od 0.2, je dovolj, da vzamemo le prva dva člena vrste. Če imamo vmesne vrednosti $0.07 < x/a < 0.2$ velja, da na rezultat pomembno vplivata oba člena vrste.

Brezdimenzijski povprečni potencial (\bar{E}) izračunamo z integriranjem enačbe Cranka (en. 18):

$$\bar{E} = 1.0 - 0.811 \exp(-2.47\tau) \quad \dots(21)$$

Za krajše čase $\tau < 0.3$:

$$\bar{E} = 1.13\tau^{0.5} \quad \dots(22)$$

Enačbo (22) lahko uredimo v obliko, ki je bolj prikladna za izračun difuzijskih koeficientov po nestacionarni metodi:

$$D = \frac{(\bar{E})^2 \cdot L^2}{5.10 \cdot t} \quad \dots(23)$$

Zelo natančne rezultate lahko pričakujemo, če se pri uravnovešenih vzorcih, ki imajo zaščitene robove, vlažnost zmanjšuje ali povečuje v dokaj ozkem območju in v kratkem časovnem intervalu. Zato naj bo τ manjši od 0.3, kakor zahteva enačba oz. ekvivalentno ($\bar{E} = 0.61$).

2.4.3.2 Vpliv vlažnosti in temperature na difuzijske koeficiente

Med vlažnostjo in povprečnim difuzijskim koeficientom obstaja stroga odvisnost. To odvisnost si razlagamo s silami, ki nastopijo med vodo in sorpcijskimi mesti v lesu. Pri nizki vlažnosti so vodne molekule direktno vezane na sorpcijska mesta. Z navlaževanjem se molekule vse bolj oddaljujejo od sorpcijskih mest. Aktivacijska energija se z naraščajočo vlažnostjo zmanjšuje, zato je preskok pri prehodu iz višje na nižjo koncentracijo lažji. Pri višjih vlažnostih imajo celične stene odprto strukturo in je zato adsorpcija lažja kot pri nižjih vlažnostih, ko so mikrofibrile tesno druga ob drugi (Zupan, 1997).

Difuzijski koeficienti naraščajo s temperaturo. To si razlagamo z aktivacijsko energijo, ki je potrebna za premagovanje sorpcijskih mest. Z naraščanjem temperature večji delež vodnih molekul dobi dovolj kinetične energije, da premaga potencialno energijo, ki vlada med vodnimi molekulami in sorpcijskimi mesti (Zupan, 1997).

2.4.3.3 Koeficient snovne prestopnosti (S)

Pri sušenju in navlaževanju lesa prehaja voda na ali s površine s prestopnostjo. Prehod označujemo s koeficientom snovne prestopnosti. Recipročna vrednost predstavlja difuzijski upor v filmu zraka.

Snovno prestopnost S definiramo kot (Siau, 1995):

$$S = \frac{J_m}{C_s - C_a} \quad \dots(24)$$

S.....koeficient snovne prestopnosti, [m_w/s]

J_mmasni tok, [kg/m_w^2s]

C_skoncentracija lesne vlažnosti na površini, [kg/m_w^3]

C_akoncentracija vode v lesu, ki je v ravnovesju z okoliškim zrakom, [kg/m_w^3]

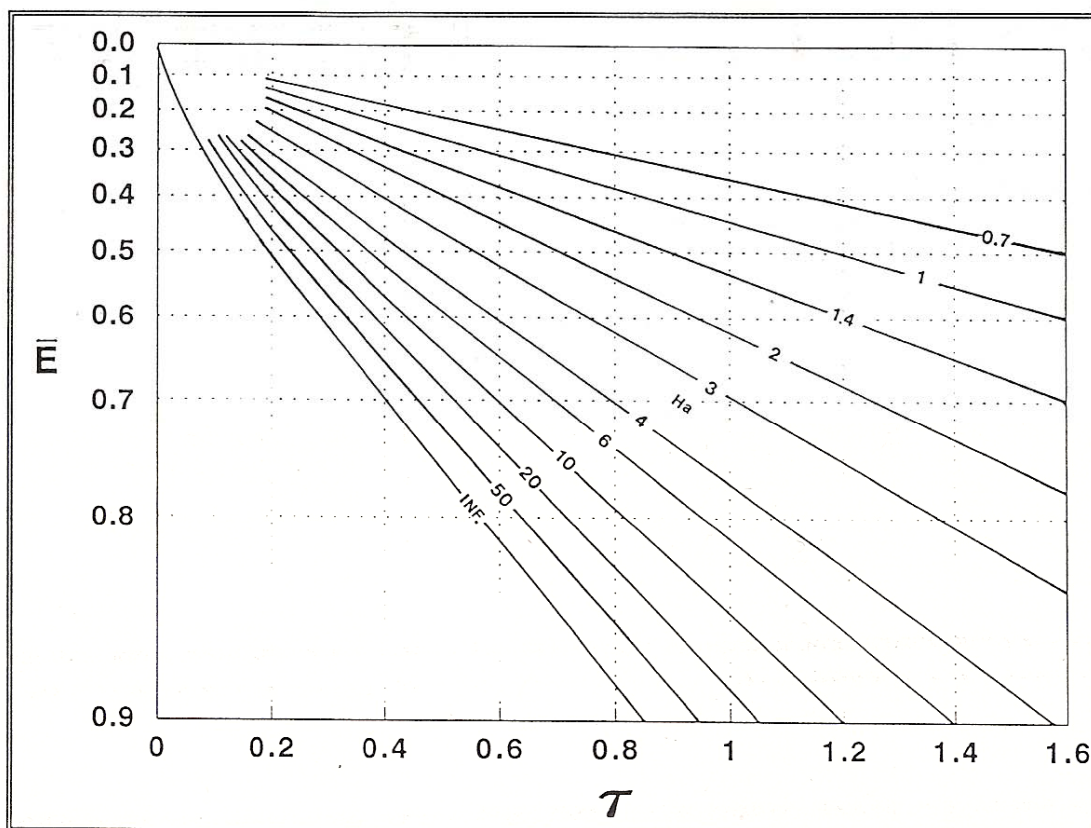
Koeficient snovne prestopnosti je odvisen od več dejavnikov: hitrosti zraka, viskoznosti, gostote, difuzivnosti skozi film zraka in temperaturnih razlik med površino in okoliškim zrakom. Te lastnosti so zajete v brezdimenzijski obliki kot na primer Reynoldsovo (Re) (en. 1) in Schmidovo (Sc) število. Schmidovo število (Sc) označuje razmerje med viskoznostjo in difuzivnostjo. Ti dve števili sta združeni v empirično brezdimenzijsko število, Sherwoodovo število (Sh), ki predstavlja brezdimenzijski koeficient snovne prestopnosti, Biotovo število (Bi) pa predstavlja razmerje med prevodnostjo in prestopnostjo (Zupan, 1997).

2.4.3.4 Nestacionarna metoda določanja difuzijskih koeficientov in koeficientov snovne prestopnosti

V predhodnem poglavju smo prikazali linearno odvisnost med \bar{E} in $\tau_{0.5}$, ki smo jo preoblikovali v enačbo za izračunavanje povprečnih difuzijskih koeficientov (D) iz naklona premice. Pri Fikovi difuziji je ta odvisnost linearna od začetka pa do dveh tretjin vrednosti nasičenja. Če je prisotna površinska upornost, ima začetni del krivulje manjši naklon kot linearni del v nadaljevanju (Zupan, 1997).

Skaar (1954), je predstavil Newmanovo enačbo, ki opisuje odvisnost med brezdimenzijskim potencialom \bar{E} in brezdimenzijskim časom za različne vrednosti Biotovega števila (Ha ali Sa/D). V tem primeru je enačba osnovana na naslednjih predpostavkah:

- difuzijski koeficienti so konstantni,
- tok vode, ki zapušča površino vzorca in prehaja v okolico je enak toku vode, ki prihaja iz notranjosti na površino in
- začetna koncentracija je konstantna po celotnem preseku vzorca.



Slika 2.1: Grafična rešitev Newmanove enačbe: odvisnost brezdimenzijskega potenciala \bar{E} z brezdimenzijskim časom τ pri različnih vrednostih Biotovega števila (Skaar 1954 cit. po Siau 1995).

Prvi del Newmanove enačbe predstavlja linearno odvisnost med \bar{E} in τ . Neskončne vrednosti za $Ha=Sa/D$ grejo skozi $\bar{E} = 0.5$ in $\tau = 0.2$. Vrednost 0.2 imenujemo polovični čas ali $\tau_{0.5}$, ki ustreza polovični spremembi \bar{E} . Pri vrednosti $\bar{E} = 0.5$ so že vse krivulje linearne, kar omogoča izpeljavo linearne enačbe med polovičnim brezdimenzijskim časom in vrednostjo Biotovega števila (Ha) na način:

$$\tau_{0.5} = 0.2 + 0.7D/Sa \quad \dots(25)$$

$\tau_{0.5}$brezdimenzijski polovični čas

0.2.....brezdimenzijski polovični čas brez konvekcijskih izgub

D.....difuzijski upor, [m²/s]

a.....polovica debeline, [m]

S.....koeficient snovne prestopnosti, [m/s]

Difuzijski koeficient, pri katerem spregledamo površinski upor, lahko izračunamo iz realnega polovičnega časa t:

$$D^a = 0.2a^2/t_{0.5} \quad \dots(26)$$

D^a.....difuzijski koeficient pri $\bar{E} = 0.5$ in $\tau = 0.2$, kar ustreza polovičnemu času t.

Z zamenjavo enačbo in z deljenjem celotnega izraza z 0.2 D dobimo:

$$\frac{1}{D^a} = \frac{1}{D} + \frac{3.5}{Sa} \quad \dots(27)$$

1/D^a.....celotni difuzijski upor

1/D.....notranji upor

3.5/Sa.....zunanji upor zaradi prestopnosti vode

Če predpostavimo, da je $1/D = 3.5/Sa$, potem sta notranji in zunanji upor enaka. Če a predstavlja debelino enostransko izpostavljene površine vzorca, potem je pod to debelino zunanji upor večji od notranjega. Matematični zapis je:

$$a = 7D/S = 7/H \quad \dots(28)$$

a.....predstavlja debelino vzorca, pod katero je zunanji upor večji od notranjega, [m]

H.....razmerje med difuzijskim uporom in koeficientom snovne prestopnosti, [m⁻¹]

Razmerje med zunanjim in celotnim uporom lahko zapišemo kot:

$$F_{er} = \frac{0.7}{0.2Sa/D + 0.7} \quad \dots(29)$$

F_{er}razmerje zunanjega upora proti vsoti notranjega in zunanjega upora.

Kot pomoč pri določevanju koeficienta difuzivnosti (D) in snovne prestopnosti (S) pri merjenju dveh ali več vzorcev različnih debelin lahko enačbo zapišemo tudi drugače:

$$\frac{a}{D^a} = \frac{a}{D} + \frac{3.5}{S} \quad \dots(30)$$

Odvisnost a/D^a od a za dve ali več debelin naj bi bila premica s smernim koeficientom $1/D$ in presečiščem na ordinatni osi $3.5/S$. To nam omogoča, da določimo koeficient difuzivnosti (D) in snovne prestopnosti (S) iz regresijske krivulje.

Pogoj, da lahko delamo primerjave med eksperimentalnimi podatki, je potrebno nujno poznati temperaturo, osnovno gostoto lesa, hitrost zraka, dolžino v smeri zračnega toka (L) in tudi sorpcijske podatke. Velikokrat se zgodi, da so rezultati objavljeni brez vseh naštetih nujno potrebnih podatkov za kasnejše primerjave. Zato je dosti bolj prikladno, da ob delu z lesom uporabimo relativno vrednost koeficienta snovne prestopnosti (F_{er}), kot določa enačba 29.

3 MATERIALI IN METODA

3.1 MATERIAL

3.1.1 Vrsta lesa

Primerjavo sušilnih karakteristik jelovine različnih kategorij smo preverjali na jelovini iz snežniških gozdov. Naključno smo izbrali tri drevesa, s predpostavko, da je v deblu prisotna tudi mokrina. Iz sveže posekanega lesa smo na različnih lokacijah po radiju in višini drevesa vzeli vzorce, ki so nam služili pri določanju sušilnih krivulj in meritvah permeabilnosti ter difuzivnosti različnih kategorij jelovine.

3.1.2 Izbira vzorcev

Iz posekane jelovine, smo na različnih višinah debla odvzeli hlodiče, iz katerih smo pozneje odvzeli vzorce za meritve. Vzorce smo vzeli iz beljavnega in jedrovinskega dela debla, kjer je bilo mogoče pa smo vzeli tudi mokrino.

Za merjenje permeabilnosti smo vzorce obdelali tako, da smo lahko meritve opravili z napravo za merjenje plinske permeabilnosti. Najprej smo vzorce grobo pripravili in jih orientirali v vseh treh anatomskih smereh: vzdolžni, radialni in tangencialni smeri. Pozneje smo vzorce previdno sušili in uravnovešali pri standardnih klimatskih pogojih ($T=20^{\circ}\text{C}$; $\phi=65\%$). Nato smo obdelali vzorce na končne dimenzije (sl. 3.1). Dimenzije vzorcev so bile:

14,5mm × 14,5mm × 10mm (R × T × L) (za merjenje vzdolžne permeabilnosti)

14,5mm × 14,5mm × 5mm (T × L × R) (za merjenje radialne permeabilnosti)

14,5mm × 14,5mm × 5mm (R × L × T) (za merjenje tangencialne permeabilnosti)

Vsak vzorec smo označili in do merjenja uravnovešali pri standardnih klimatskih pogojih. Oznake na vzorcih so nam povedali bistvene podatke:

- številka drevesa (1-prvo drevo, 2-drugo drevo, in 3-tretje drevo)

- višina – kolut (2-prva višina, 6- druga višina)
- kategorija lesa (B-beljava, J-jedrovina, M- mokrina)



Slika 3.1: Vzorci beljave, jedrovine in mokrine jelovine pripravljene za merjenje plinske permeabilnosti.

Štiri vzporedne vzorce smo predhodno prepojili z alkoholom, jih posušili in tako kot ostale vzorce pripravili za merjenje permeabilnosti.

Dimenzije vzorcev za merjenje nestacionarne difuzije smo z nadmerami najprej klimatizirali, šele nato pa oblikovali v končne dimenzije (sl. 3.2). Dimenzije vzorcev, ki smo jih vzeli iz kolotov so bile približno: $l = 500\text{mm}$, $\text{š} = 55\text{mm}$, $d = 55\text{mm}$. Vzorci so

imeli visoko vlažnost, zato smo jih letvičili in za nekaj tednov izpostavili sušenju na prostem. Ko je vlažnost tako beljavnih, kot jedrovinskih vzorcev padla na 25% in se zaradi slabih klimatskih pogojev na prostem ni več spreminjala, smo dali vzorce v posebno komoro in jih izpostavili klimi z relativno zračno vlažnostjo 75%, ki smo jo uravnavali z nasičeno raztopino NaCl. Nastali vlažnostni gradient smo izravnali z rahlim navlaževanjem površine tako, da smo vzorce izpostavili relativni zračni vlažnosti 86%, ki smo jo dosegli nad nasičeno raztopino ZnSO₄. Ko pa so bili vzorci uravnovešeni, smo iz vsakega vzorca izdelali štiri manjše vzorčke. Dolžina in širina vzorčkov sta bili enaki: $l = 100\text{mm}$, $b = 40\text{mm}$. Debeline vzorčkov pa so bile različne: $d_1 = 10\text{mm}$, $d_2 = 20\text{mm}$, $d_3 = 30\text{mm}$, $d_4 = 40\text{mm}$. Uravnovešene vzorce smo stehali na 0.001g natančno in izmerili dimenzije v radialni (R), tangencialni (T) in longitudinalni (L) smeri na 0,01mm natančno, ter jim tako določili gostoto.



Slika 3.2: Vzorci beljave in jedrovine jelovine, pripravljene za merjenje difuzivnosti pri nestacionarnih pogojih.

3.2 METODA

3.2.1 Metoda določanja permeabilnosti

Po uravnovešenosti pri standardnih pogojih ($T=20^{\circ}\text{C}$, $\phi = 65\%$), je sledilo merjenje dimenzij vzorcev, natančno na 0,01mm. Nato smo vzorce še tehtali na 0,0001 g natančno. Ti podatki so nam pozneje pomagali pri izračunu gostote vzorcev. Vzorce smo po stranskih ploskvah premazali s premazom, ki ne prepušča zrak.

Za merjenje plinske permeabilnosti smo uporabili nekoliko modificirano Pettijevo napravo, ki so jo izdelali sodelavci Katedre za tehnologijo lesa (sl. 3.3). Metoda, ki jo imamo na razpolago, je primerna za merjenje plinske permeabilnosti, ki pa ni enaka permeabilnosti tekočin. Pri pravilni pripravi vzorcev je vzdolžna plinska permeabilnost primeren pokazatelj permeabilnostnih lastnosti svežega lesa v drevesu. Z merjenjem plinske permeabilnosti se izognemo problemu zračne embolije, ki se pojavi pri merjenju tekočinske permeabilnosti (Comstock, 1963). Meritve omogočajo primerjavo vrednosti za različne vzorce lesa (npr. beljava – reakcijska cona) ali lesa v različnih ksilotomskih smereh. Aparaturo za merjenje plinske permeabilnosti sestavlja posebna merilna celica oz. cilindar (1), ki omogoča hitro menjavanje in popolno tesnjenje vzorcev različnih dolžin, živosrebrni manometer (2), balastna posoda (3) in vakuumska črpalka (4). Za merjenje večjih pretokov zraka (nad 1 l/h; npr. v aksialni smeri) uporabljamo rotameter, to je merilec volumskega pretoka zraka. V primerih, ko so pretoki zraka pod 1 l/h (praviloma v prečnih anatomskih smereh), pa uporabljamo umerjene kapilare (5).



Slika 3.3: Nekoliko modificirana Petti-jeva naprava za merjenje plinske permeabilnosti lesa (laboratorij za sušenje lesa pri Katedri za tehnologijo lesa): 1) merilna celica oz. cilinder, 2) živosrebni manometer, 3) balastna posoda, 4) vakuumska črpalka, 5) umerjena kapilara

Vzorec vstavimo v napravo tako, da je pri dani tlačni razliki (ΔP) omogočen pretok zraka skozi dolžino vzorca (L) samo po površini vzorca (A). Za merjenje pretoka smo za vzdolžne vzorce uporabili rotameter, za radialne in tangencialne vzorce pa kapilaro oz. kalibrirno cevko premera 1 mm in beležili čas pretoka (Δt), ki ga je kapljica alkohola potrebovala za pot (l) 20 cm skozi cevko. Koeficient plinske permeabilnosti smo izračunali po enačbi:

$$k_g = \frac{2 \cdot Q \cdot L \cdot P_{zum}}{A \cdot \Delta P \cdot (2P_{zum} - \Delta P)} \quad \left[\frac{m^3}{mPas} \right] \quad \dots(31)$$

k_g ...koeficient plinske permeabilnosti [$m^3/m Pa s$],

Q...volumski tok plina [m^3/s],

L...dolžina vzorca [m],

P_{zun} ...zunanji zračni tlak [Pa],

A...površina pretoka [m^2],

ΔP ...razlika tlakov [Pa].

Pri merjenju s kapilaro smo pretok zraka (Q) izračunali po enačbi:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{l \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{\Delta t} \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad \dots(32)$$

Q...volumski tok plina [m^3/s],

ΔV ...sprememba volumna [m^3],

Δt ...časovna enota [s].

3.2.2 Merjenje difuzivnosti

Za določanje difuzijskega koeficienta smo uporabili nestacionarno metodo uravnovešanja vzorcev v procesu desorpcije. Ker smo merili difuzivnost le v radialni smeri, smo robove vzorcev premazali s premazom (Stipol), ki ne prepušča vlage. Nepremazana je ostala le ena tangencialna ploskev vzorca, saj smo določali difuzivnost le v eni smeri vzorca (enostransko sušenje).

Predhodno izmerjene in uravnovešene vzorce nad nasičeno raztopino $ZnSO_4$ ($\varphi = 88\%$) smo dali v zatesnjeno kad in vzorce prepihovali s konstantno hitrostjo zraka 0,4 m/s nad nasičeno raztopino magnezijevega klorida ($MgCl_2$), pri konstantni temperaturi (sl. 3.5). Vzorci so bili v kadi enakomerno porazdeljeni na posebnih lesenih podstavkih, tako da je bila omogočena dobra cirkulacija zraka med vzorci. Vzorce smo tehtali na 0.001g natančno v določenih časovnih intervalih (sl. 3.4). Časovni intervali so bili vedno daljši: 1h, 2h, 4h, 8h, 16h, 24h, itd. Vzorce smo sušili in tehtali do ravnovesnega stanja.



Slika 3.4: Vzorci, pripravljene za tehtanje.

Iz izmerjenih mas smo določili brezdimenzijsko maso (E):

$$E = 1 - \{ m(t) - m_k \} / \{ m_z - m_k \} \quad \dots(34)$$

E brezdimenzijska masa [/],

m(t).....trenutna masa [g],

m_z.....masa ob začetku uravnovešanja [g],

m_k.....masa uravnovešenega vzorca [g].



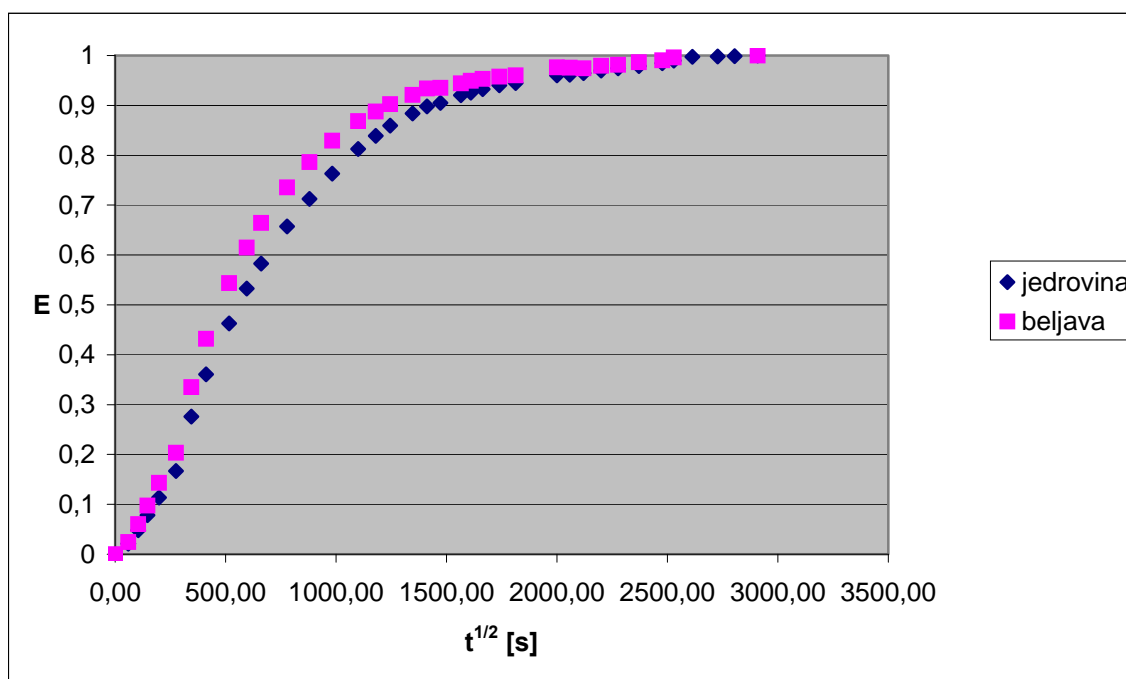
Slika 3.5: Merjenje difuzivnosti pri nestacionarnih pogojih: vzorci v zatesnjeni komori s prisilnim gibanjem atmosfere (0,4 m/s) nad nasičeno raztopino magnezijevega klorida (MgCl), pri konstantni temperaturi.

Iz linearnega dela odvisnosti brezdimenzijske mase (E) od kvadratnega korena časa \sqrt{t} (sl.3.6) smo določili smerni koeficient premice, ki smo ga uporabili za izračun navideznega difuzijskega koeficienta Def .

$$Def = 0.785 \cdot a^2 \cdot k^2 \quad \dots(35)$$

k.....smerni koeficient linearne premice $E(\sqrt{t})$.

a.....debeline vzorca.



Slika 3.6: Krivulja uravnovešanja beljavnega in jedrovinskega vzorca. Vzorec 1/1 B1 in 1/1 J1, debelina 10mm.

Difuzijski koeficient smo izračunali tudi iz polovičnih uravnovesnih časov ($t_{0,5}$), ki povedo, kdaj brezdimenzijska masa E doseže vrednost 0,5.

$$D^a = 0.2a^2/t_{0,5} \quad \dots(36)$$

D^a difuzijski koeficient pri $\bar{E} = 0.5$ in $\tau = 0.2$, kar ustreza polovičnemu času t .

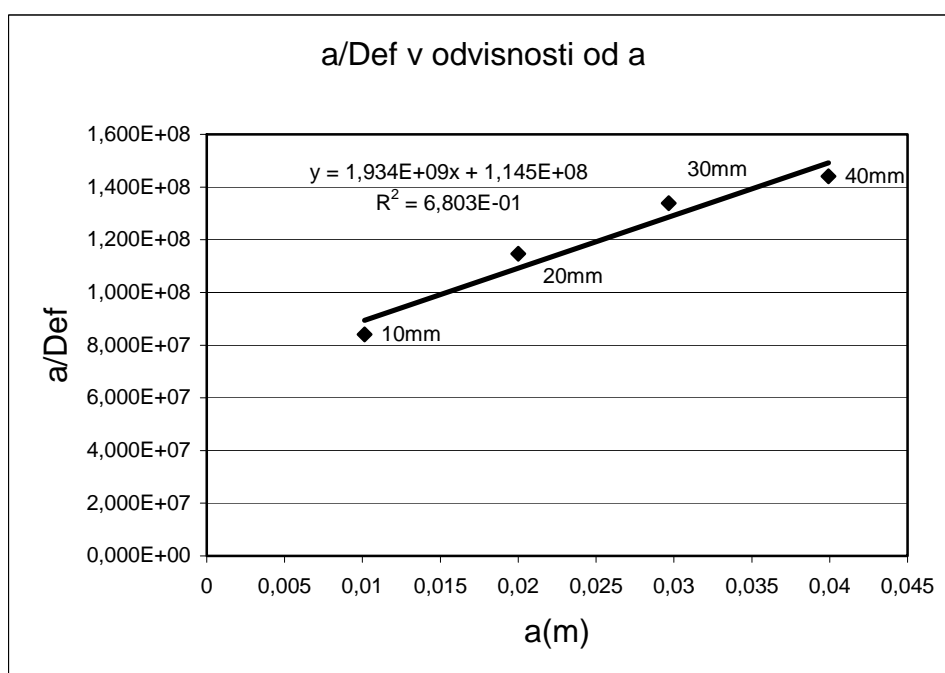
Posebno pri tanjših vzorcih ne smemo zanemariti tudi snovne prestopnosti. Iz linearne zveze med navideznim difuzijskim koeficientom Def in razmerjem med debelino a in navideznim difuzijskim koeficientom (sl. 3.7) smo določili še realni difuzijski koeficient D in koeficient snovne prestopnosti S . Iz naklona smo izračunali realni difuzijski koeficient (D) iz presečišča premice na ordinatni osi pa koeficient snovne prestopnosti (S).

$$\frac{1}{D^a} = \frac{1}{D} + \frac{3.5}{Sa} \quad \dots(37)$$

$1/D^a$celotni difuzijski upor

$1/D$notranji upor

$3.5/Sa$zunanji upor zaradi prestopnosti vode



Slika 3.7: Razmerje debeline vzorca in navideznega difuzijskega koeficienta v odvisnosti od debeline vzorca. Premica grafa nam da smerni koeficient, iz katerega lahko izračunamo difuzijski koeficient, iz oddaljenosti premice od abscisne osi pa lahko izračunamo koeficient snovne prestopnosti.

4 REZULTATI

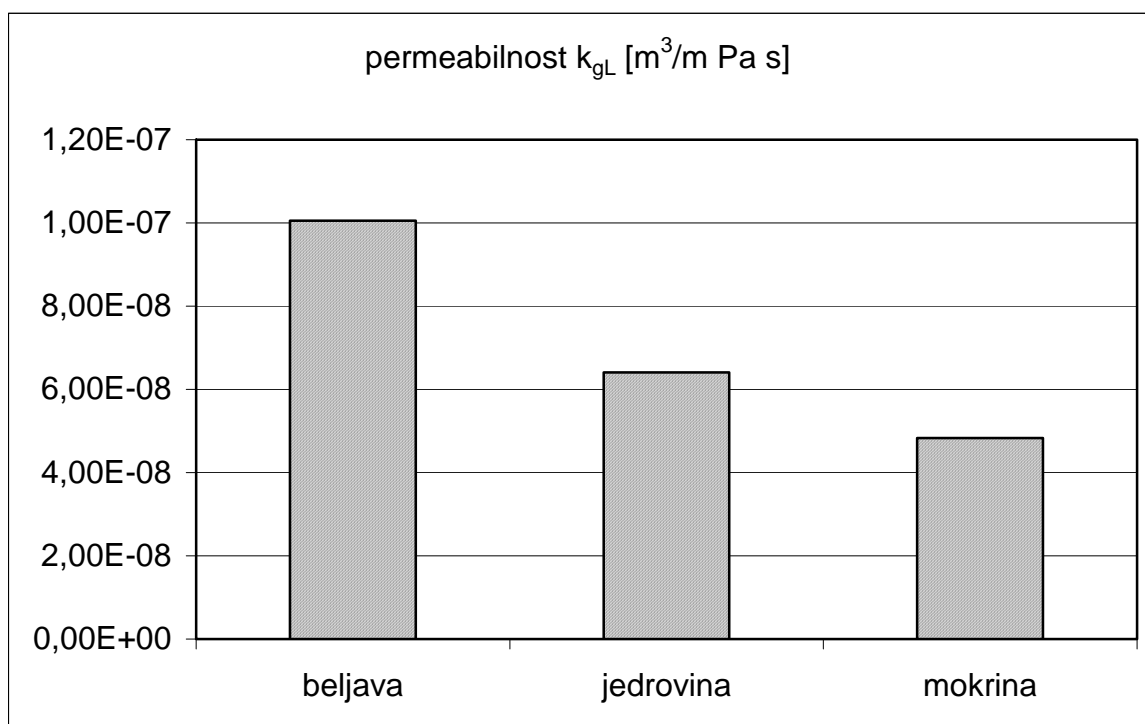
4.1 PERMEABILNOST BELJAVE, JEDROVINE IN MOKRINE

Izmerjeni koeficienti plinske permeabilnosti so v vseh treh anatomskih smereh primerljivi s podatki iz literature (Siau, 1995). Rezultati so pokazali, da je permeabilnost beljave precej večja od permeabilnosti jedrovine in mokrine. Najmanjšo permeabilnost smo izmerili pri mokrini, pri kateri je bila 2,1 krat manjša od permeabilnosti beljave. Največja je permeabilnost v longitudinalni smeri (pregl. 4.1, sl. 4.1). Znatno manjša permeabilnost je v tangencialni smeri (pregl. 4.3, sl. 4.3). Pričakovano najmanjša vrednost koeficienta plinske permeabilnosti se izraža v radialni smeri merjenja (pregl. 4.2, sl. 4.2).

Preglednica 4.1: Permeabilnost beljave, jedrovine in mokrine jelovine v longitudinalni smeri.

	beljava	jedrovina	mokrina
n	10	11	4
k_{gL} povp. [$m^3/m Pa s \cdot 10^{-8}$]	10,1	6,4	4,83
k_{gL} min [$m^3/m Pa s \cdot 10^{-8}$]	1,36	0,79	1,67
k_{gL} maks [$m^3/m Pa s \cdot 10^{-8}$]	34,3	17,5	11
k_{gL} st. odklon [$m^3/m Pa s \cdot 10^{-8}$]	12,4	5,36	3,72

Permeabilnost v longitudinalni smeri se med beljavo, jedrovino in mokrino razlikuje. Razmerje med posameznimi kategorijami lesa je: beljava : jedrovina : mokrina = 2 : 1,3 : 1 (sl. 4.1).

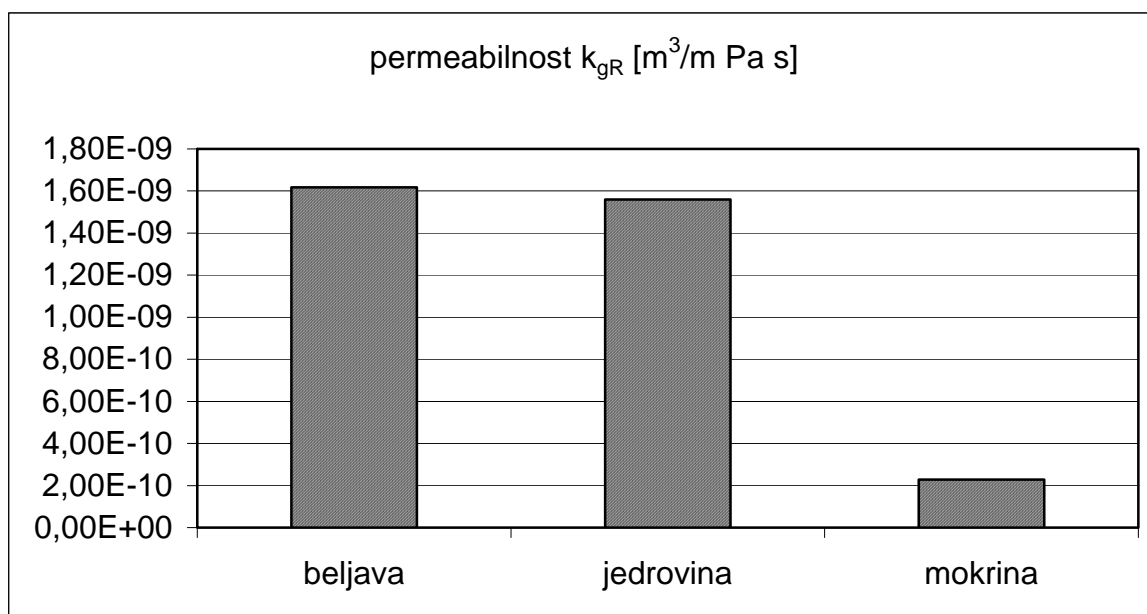


Slika 4.1: Permeabilnost beljave, jedrovine in mokrine jelovine v longitudinalni smeri.

Tudi v radialni smeri smo največjo permeabilnost izmerili pri beljavi, manjša je bila pri jedrovini, 7 krat manjša permeabilnost od beljave pa je bila pri mokrini. Razmerje permeabilnosti med beljavo, jedrovino in mokrino je: 7 : 6,7 : 1 (sl. 4.2).

Preglednica 4.2: Permeabilnost beljave, jedrovine in mokrine jelovine v radialni smeri smeri.

	beljava	jedrovina	mokrina
n	10	11	4
k_{gR} povp. [m³/m Pa s·10⁻¹⁰]	16,2	15,6	2,3
k _{gR} min [m ³ /m Pa s·10 ⁻¹⁰]	9,32	0,98	1,29
k _{gR} maks [m ³ /m Pa s·10 ⁻¹⁰]	32,1	86,4	3,8
k _{gR} st. odklon [m ³ /m Pa s·10 ⁻¹⁰]	6,97	26,3	1,03

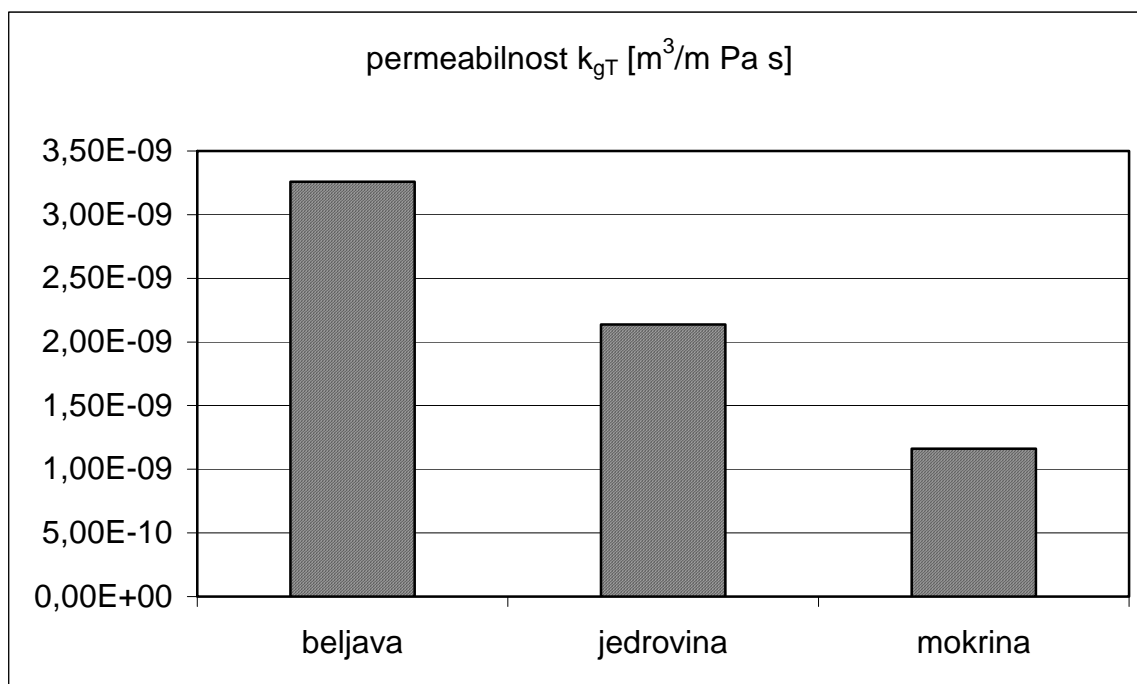


Slika 4.2: Permeabilnost beljave, jedrovine in mokrine jelovine v radialni smeri.

V tangencialni smeri je razmerje permeabilnosti med beljavo, jedrovino in mokrino sledeče: 2,8 : 1,8 : 1 (sl. 4.3). Tu so razlike permeabilnosti med posameznimi conami v deblu manjše, kot v radialni smeri.

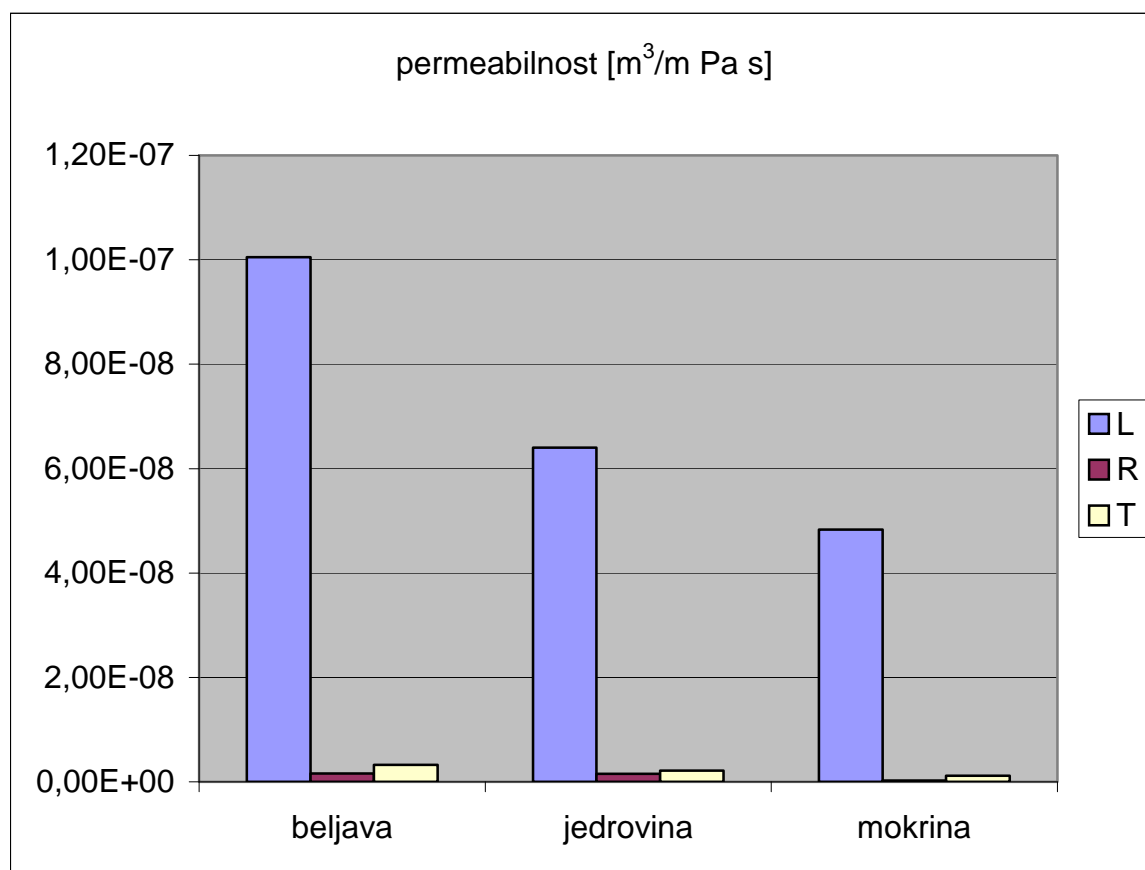
Preglednica 4.3: Permeabilnost beljave, jedrovine in mokrine jelovine v tangencialni smeri.

	beljava	jedrovina	mokrina
n	10	11	4
k_{gT} povp. [$m^3/m Pa s \cdot 10^{-10}$]	32,6	21,4	11,6
k_{gT} min [$m^3/m Pa s \cdot 10^{-10}$]	6,95	2	4,45
k_{gT} maks [$m^3/m Pa s \cdot 10^{-10}$]	104	71,7	15,7
k_{gT} st. odklon [$m^3/m Pa s \cdot 10^{-10}$]	35,3	20,5	4,3



Slika 4.3: Permeabilnost beljave, jedrovine in mokrine jelovine v tangencialni smeri.

V vseh kategorijah lesa so se pokazale tudi razlike med posameznimi smermi merjenja. Razmerje med longitudinalno, tangencialno in radialno smerjo je pri beljavi: 62,3 : 2 : 1 (sl. 4.4). Pri jedrovini je to razmerje sledeče: 41 : 1,4 : 1 (sl. 4.4). Največje razlike vrednosti med posameznimi smermi pa so se pokazale pri mokrini. Razmerje je tukaj 210 : 5 : 1 (sl. 4.4).



Slika 4.4: Primerjava permeabilnosti v longitudinalni, radialni in tangencialni smeri po kategorijah lesa jelke.

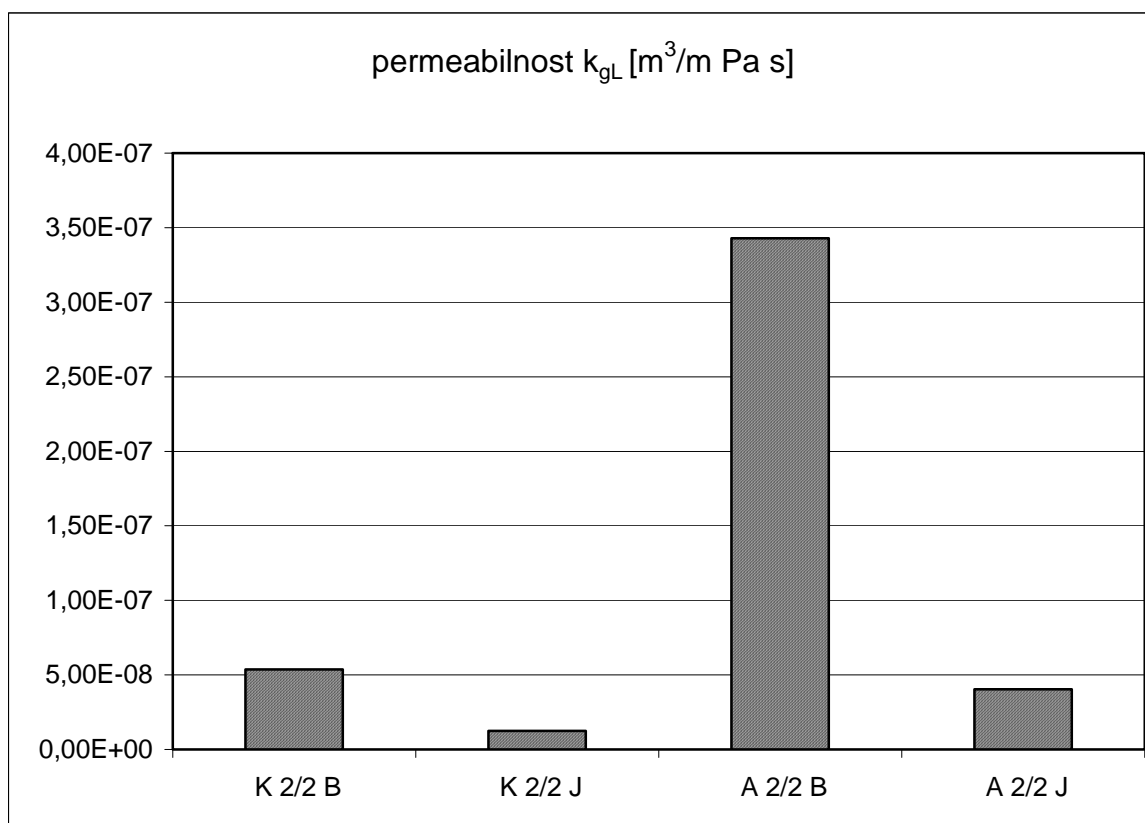
4.1.2 Permeabilnost predhodno prepojenih vzorcev z alkoholom

Vzorci tretirani z alkoholom so bili bolj permeabilni kot vzorci, ki niso bili tretirani z alkoholom (pregl. 4.4, sl. 4.5). Pri beljavi je v longitudinalni smeri permeabilnost kar 6 do 10 krat večja pri vzorcih, ki so bili predhodno tretirani z alkoholom. Tudi v radialni in tangencialni smeri je pri teh vzorcih permeabilnost mnogo večja (pregl. 4.4).

Preglednica 4.4: Primerjava permeabilnosti beljavnih (B) in jedrovinskih (J) vzorcev, predhodno prepojenih z alkoholom (vzorci A) z vzorednimi vzorci, ki niso bili alkoholno tretirani (vzorci K).

PERMEABILNOST [10^{-9} m ³ /m Pa s]			
vzorec	kgL	kgR	kgT
K 2/2 B	53,7	1,41	1,33
K 2/2 J	12,5	0,128	0,263
A 2/2 B	343	2,61	10,4
A 2/2 J	40,3	0,30	1,67

Tudi tu je večja permeabilnost beljave od jedrovine. Razlika med permeabilnostjo beljave in jedrovine je pri vzorcih, ki so bili predhodno tretirani z alkoholom, še večja. Razlika je približno od 8 do 10 krat v vseh treh anatomskih smereh (pregl. 4.4, sl. 4.5).

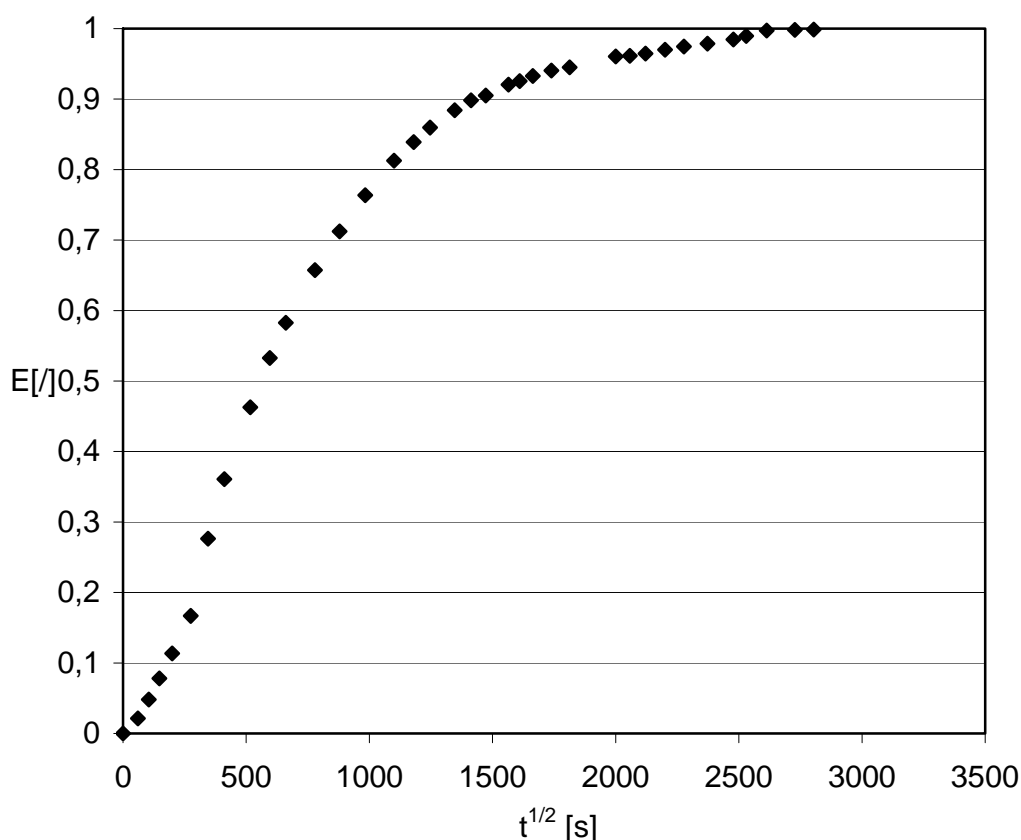


Slika 4.5: Primerjava permeabilnosti jelovine v longitudinalni smeri med vzporednimi vzorci tretiranih (vzorci A) in netretiranih vzorcev z alkoholom (vzorci K) pri beljavi (B) in jedrovini (J).

4.2 DIFUZIVNOST BELJAVE, JEDROVINE IN MOKRINE

4.2.1 Določanje difuzivnosti

Tudi rezultati merjenja difuzivnosti se razlikujejo v posameznih conah debla. Omeniti moramo, da smo difuzivnost jelovine merili le v radialni smeri, saj je najpogostejši tok pri sušenju prav v tej smeri. Pri beljavi se izkazujejo višji difuzijski koeficienti kot pri jedrovini (pregl. 4.4, sl. 4.6). Merili smo tudi koeficiente snovne prestopnosti. Ti so v povprečju večji od difuzijskih koeficientov (pregl. 4.4, sl. 4.7). Tudi koeficienti snovne prestopnosti so večji pri beljavi (sl. 4.7).

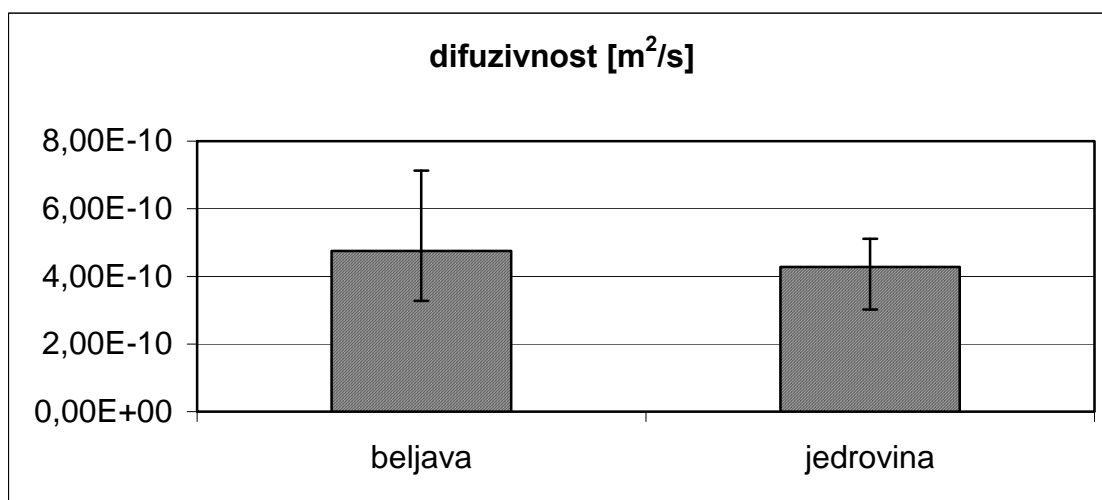


Slika 4.6: Krivulja uravnovešanja vzorca jelovine in določanja D in S. Vzorec 1/1 B1, debelina 10mm.

Preglednica 4.5: Povprečni difuzijski koeficient D in povprečni koeficient snovne prestopnosti S z minimalnimi in maksimalnimi vrednostmi za beljavo in jedrovino jelovine – osnovno statistiko.

	beljava	beljava	jedrovina	jedrovina
	D [$\text{m}^2/\text{s}\cdot 10^{-10}$]	S [$\text{m}/\text{s}\cdot 10^{-8}$]	D [$\text{m}^2/\text{s}\cdot 10^{-10}$]	S [$\text{m}/\text{s}\cdot 10^{-8}$]
n	14	14	13	13
povprečje	4,75	5,52	4,28	4,91
minimum	3,28	3,06	3,02	3,08
maksimum	7,13	9,21	5,11	8,59
st. odklon	0,97	1,94	0,65	1,95
CV [%]	20,50	35,10	15,40	39,70

Povprečne vrednosti difuzijskih koeficientov beljave so malo večje od vrednosti jedrovine in sicer znaša razmerje med beljavo in jedrovino: 1,1 : 1 (pregl. 4.4).

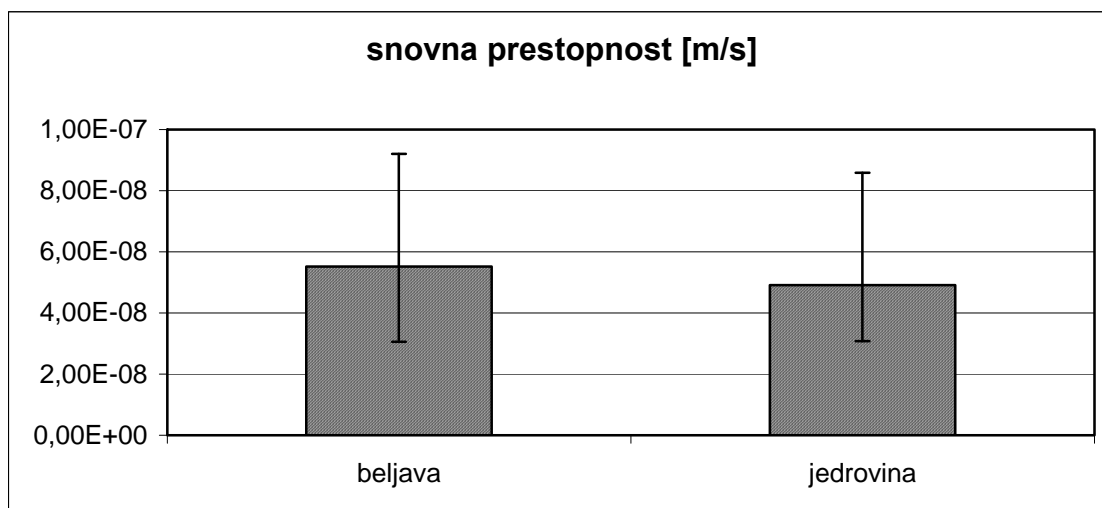


Slika 4.7: Povprečni difuzijski koeficient D pri beljavi in jedrovini jelovine.

4.2.2 Koeficient snovne prestopnosti (S)

Poleg določanja difuzijskih koeficientov, smo izračunali tudi koeficiente snovne prestopnosti. Uporaba nestacionarne metode merjenja difuzijskih koeficientov ima prednost v tem, da omogoča določitev realnih difuzijskih koeficientov (D) in koeficientov snovne prestopnosti (S), ki nam pokažejo upor pri prehodu vode s površine lesa v okolico. V povprečju smo dobili nižje snovne koeficiente pri jedrovini kot pri beljavi.

Koeficienti snovne prestopnosti so v tesni povezavi z difuzijskim koeficientom, vendar predstavljajo bistveno manjši upor. Snovna prestopnost je pomembnejša pri majhnih debelinah. Njihova pomembnost narašča s padanjem debeline vzorcev. Zunanji upor lahko tako postane pomembnejši od notranjega upora. To pa postane pomembno pri sušenju tanjših lesov npr. furnirjev. Debelino lesa, kjer postane notranji upor manjši od zunanjega težko določimo, saj je odvisna od več dejavnikov. Pomembna dejavnika, ki na to vplivata sta hitrost zraka in vlažnost lesa. Pri nižji vlažnosti lesa in višji hitrosti zraka je potrebna manjša debelina lesa, da postane notranji upor manjši od zunanjega.



Slika 4.8: Povprečni koeficient snovne prestopnosti S pri beljavi in jedrovini jelovine.

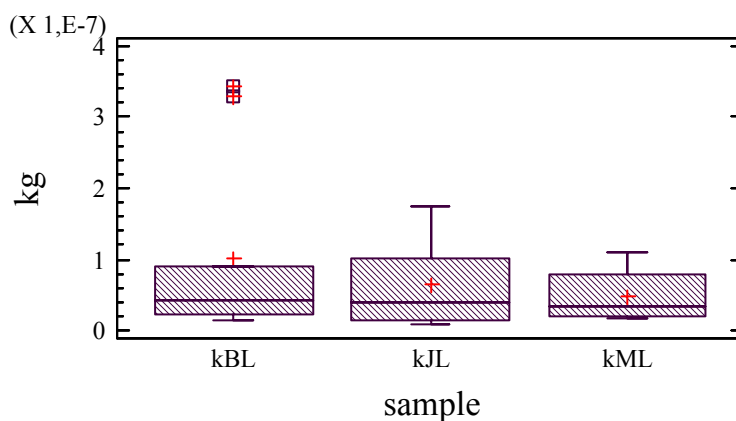
5 RAZPRAVA

Sušilne karakteristike jelovine se razlikujejo med posameznimi conami v deblu. Pri jelovini je poleg beljave in jedrovine prisotna še mokrina. Plinska permeabilnost in difuzivnost sta najboljša pokazatelja sušilnih karakteristik lesa, zato smo z njima poskušali opredeliti sušilne karakteristike jelovine.

Permeabilnost lesa je močno odvisna od fiziološkega stanja tkiva, pomembno vlogo ima pri tem aspiracija obokanih pikenj. Vzdolžna permeabilnost, ki je pomembna za pretok vode v živem drevesu, je bila največja. V radialni in tangencialni smeri je bila permeabilnost približno 30 – 40 krat manjša. Razlog, da je permeabilnost največja v longitudinalni smeri lahko pripisujemo vzdolžnemu transportu snovi skozi traheide, kjer so transportne poti najboljše povezane in najmanj ovirane. V longitudinalni smeri so razlike plinske permeabilnosti med beljavo, jedrovino in mokrino statistično značilne (sl. 5.1). Razmerje med longitudinalno, tangencialno in radialno smerjo je pri beljavi: 62,3 : 2 : 1, pri jedrovini pa je to razmerje: 41 : 1,4 : 1. Največje razlike vrednosti med posameznimi smermi pa so se pokazale pri mokrini. Razmerje je tukaj 210 : 5 : 1.

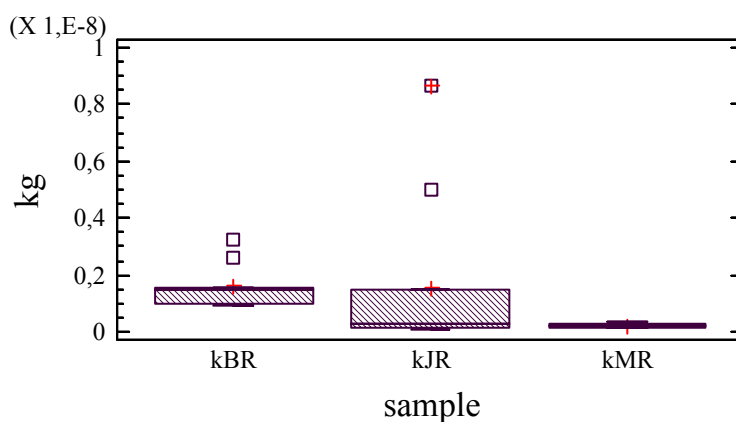
Tu prihaja do velikih odstopanj med največjo in najmanjšo vrednostjo. Največja permeabilnost je tu v beljavnem delu, sledi jedrovina in mokrina. Pri merjenju plinske permeabilnosti smo dobili pričakovane rezultate: največja je permeabilnost beljave, sledi permeabilnost jedrovine, najmanjša pa je permeabilnost mokrine (sl. 4.4). Razlog za to je, da v beljavi še ni ojedritvenih procesov. Predvidevamo, da so tu transportne poti proste in dokaj malo ovirane, medtem ko je pri jedrovini že prisotno odlaganje jedrovinskih snovi in aspiracije obokanih pikenj. Najslabša prevodnost je pri mokrini. Tu gre za dodatno navlažitev lesa, govorimo o sekundarni spremembi. Prisotne so aspirirane piknje, ki ovirajo tok proste vode. Če gre pri mokrini za dodatno navlažitev, ki naj bi bila bakterijskega vzroka, lahko predpostavljamo, da gre tudi tu za podobne ovire permeabilnosti kot pri jedrovini. Vendar pa sklepamo, da bi prisotne bakterije lahko poškodovale torus in bi se permeabilnost povečala. V našem primeru pa gre za manjšo permeabilnost mokrine. Razlog za to je lahko, da v mokrini še niso bile prisotne bakterije. Najbrž so bili to predeli

lesa, kjer se je mokrina še razvijala. Kljub temu, da še ni vsebovala bakterij, so na lesu ostali vidni sledovi začetnega nastanka mokrine.



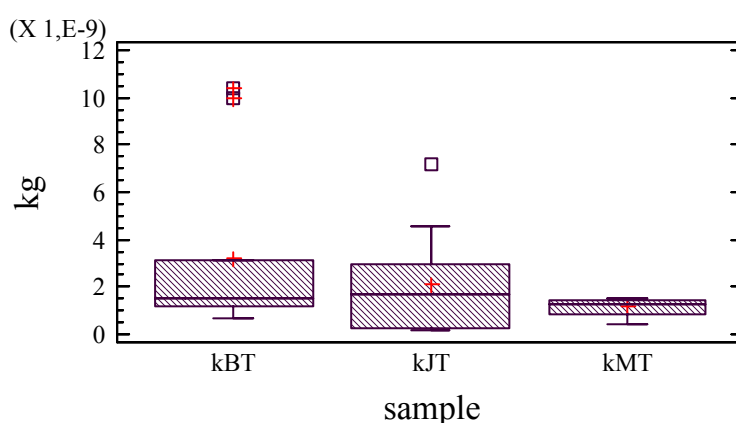
Slika 5.1: Prikaz porazdelitve izračunanih koeficientov plinske permeabilnosti v longitudinalni smeri jelovine. Primerjava med beljavo, jedrovino in mokrino.

Razlike plinske permeabilnosti v radialni smeri niso statistično značilne med jedrovino in mokrino (sl. 5.2), tu predvsem odstopa mokrina. Permeabilnost v radialni smeri povečujejo radialno potekajoči trakovi, ki vplivajo tudi na variabilnost permeabilnosti v tej smeri. Močno odstopa mokrina, ki ima najmanjšo permeabilnost. Pri mokrini je zelo majhna variabilnost permeabilnosti, to si lahko pojasnimo s tem, da so tu piknje že aspirirane in prihaja do manjših razlik v prevodnosti radialnih trakov. Beljava ima največjo variabilnost permeabilnosti. To lahko pripisujemo fiziologiji lesnega tkiva.



Slika 5.2: Prikaz porazdelitve izračunanih koeficientov plinske permeabilnosti v radialni smeri jelovine. Primerjava med beljavo, jedrovino in mokrino.

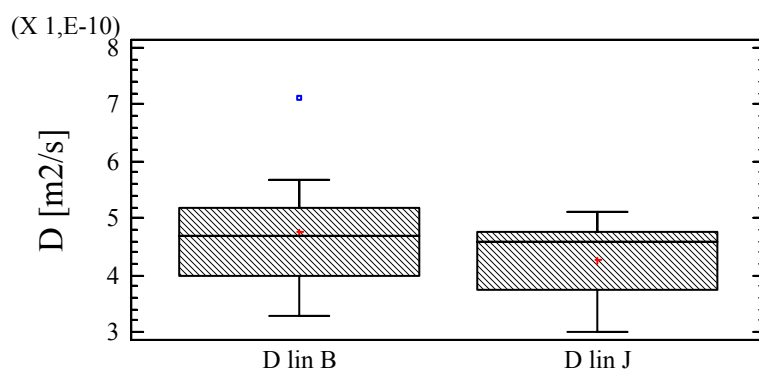
V tangencialni smeri so razlike plinske permeabilnosti v beljavi, jedrovini in mokrini velike (sl. 5.3). Variabilnost vrednosti je najmanjše pri mokrini, največja odstopanja pa se kažejo pri beljavnih vzorcih. Tangencialna permeabilnost je odvisna od stanja pikenj v radialnih stenah celic, kjer je njihova gostota največja. Variabilnost permeabilnosti v tangencialni smeri je tako najbolj odvisna od permeabilnosti teh pikenj.



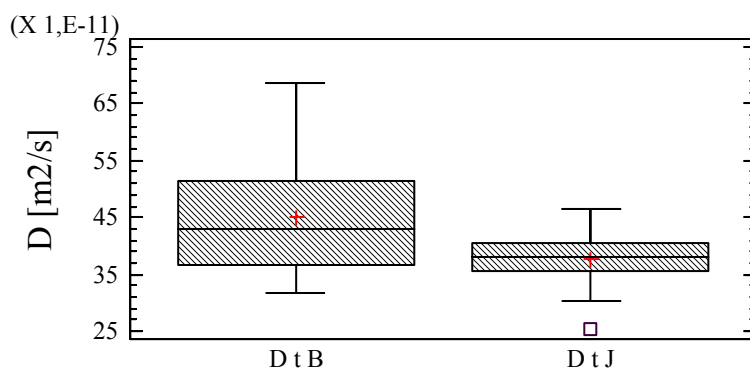
Slika 5.3: Prikaz porazdelitve izračunanih koeficientov plinske permeabilnosti v tangencialni smeri jelovine. Primerjava med beljavo, jedrovino in mokrino.

Največja permeabilnost se je izkazala pri vzorcih, ki so bili predhodno tretirani z alkoholom, saj so ti vzorci kazali višje koeficiente plinske permeabilnosti (v longitudinalni smeri $343 \text{ m}^3/\text{m Pa s}\cdot 10^{-9}$). Razlog je lahko ta, da smo s tem preprečili aspiracijo obokanih pikenj v času sušenja, saj smo s tem vodo v lesu nadomestili s tekočino, ki ima manjšo površinsko napetost in lahko prepreči, da bi prišlo do aspiracije pikenj v času sušenja lesa. S tem smo najbolj vplivali na beljavo, kjer je manjši delež apiriranih pikenj, do aspiracije pikenj pa bi lahko prišlo v času sušenja. Po drugi strani pa deluje alkohol kot topilo in je lahko prišlo do razgradnje torusa, ki vsebuje pektin. Z deaspiracijo obokanih pikenj se je tako lahko povečala permeabilnost lesa.

Tok vezane vode ima upor v samem materialu (difuzijski koeficient) in pri odstranjevanju s površine – prestopnosti (koeficient snovne prestopnosti). Z nestacionarno metodo določevanja difuzivnosti lesa smo določili te koeficiente. Difuzijski koeficienti beljave ($4,75 \text{ m}^2/\text{s}\cdot 10^{-10}$) so večinoma višji od jedrovine ($4,28 \text{ m}^2/\text{s}\cdot 10^{-10}$). Vzrokov za to je več, pomembni so ojedritveni procesi, ki jih pri jelovini spremlja odlaganje ekstraktivnih snovi v celične stene in na (ob) celične stene. V jedrovini so prisotne jedrovinske snovi, ki so inkrustirane v celične stene. Te nizkomolekularne snovi zmanjšujejo difuzivnost, saj otežujejo prehod vezane vode skozi celično steno. V našem primeru smo merili difuzivnost v radialni smeri, saj je tak način prehoda vezane vode pogosteje prisoten pri sušenju lesa. Razlog za razliko difuzivnosti med beljavo in jedrovino niso le ojedritveni procesi, ampak tudi različna anatomska sestava lesa. Na difuzijo vode v celični steni vplivajo tudi: gostota, vlažnost, usmerjenost vlaken, smer toka.



Slika 5.4: Prikaz porazdelitve izračunanih difuzijskih koeficientov vzorcev jelovine za merjenje difuzivnosti pri nestacionarnih pogojih. Primerjava med beljavo in jedrovino.

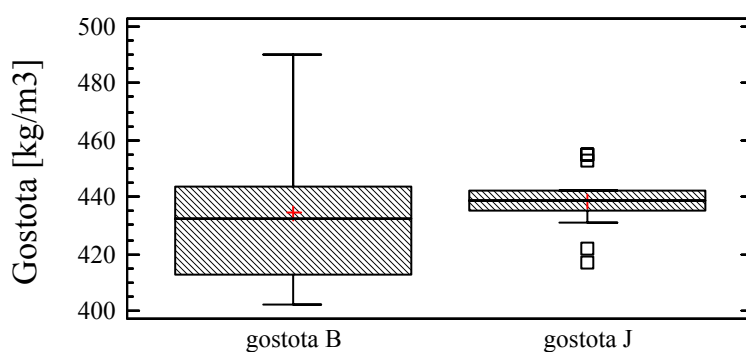


Slika 5.5: Prikaz porazdelitve difuzijskih koeficientov, dobljenih iz polovičnih časov vzorcev jelovine za merjenje difuzivnosti pri nestacionarnih pogojih. Primerjava med beljavo in jedrovino.

Povprečen koeficient snovne prestopnosti je pri beljavi $5,52 \text{ m/s} \cdot 10^{-8}$, pri jedrovini pa $4,91 \text{ m/s} \cdot 10^{-8}$. Ta koeficient je večji od difuzijskega, kar pomeni, da nima večjega vpliva kot difuzijski upor pri sušenju lesa. Izraziteje bi prišel do pomena pri tanjših debelinah vzorcev.

Gostota lesa je eden od dejavnikov, ki pomembno vpliva na sušilne karakteristike lesa. Pri merjenju plinske permeabilnosti in difuzivnosti, smo vzorcem določili tudi gostoto in ugotavljali njen učinek na sušilne karakteristike. Gostote teh vzorcev se med seboj

bistveno ne razlikujejo. Nekoliko večjo gostoto smo izmerili pri jedrovini, vendar razlike statistično niso signifikantne. Razlog, da je gostota jedrovinskih vzorcev nekoliko večja, je lahko ta, da so v jedrovini potekali ojedritveni procesi, ki zvišujejo gostoto lesa. Tu so predvsem pomembne jedrovinske snovi, ki so praviloma toksični nizkomolekularni polifenoli in se inkrustirajo v celične stene, s tem pa povečajo gostoto lesa. Vpliv gostote na difuzivnost jelovine ne moremo dobro oceniti, saj so razlike gostot vzorcev premajhne. Poleg tega gre za veliko variabilnost gostot, saj so imeli nekateri vzorci beljave višjo gostoto kot jedrovinski vzorci.



Slika 5.6: Prikaz porazdelitve gostote vzorcev jelovine za merjenje difuzivnosti pri nestacionarnih pogojih. Primerjava med beljavo in jedrovino.

6 SKLEPI

Najboljša pokazatelj sušilnih karakteristik lesa sta plinska permeabilnost in difuzivnost lesa. Sušilne karakteristike jelovine se razlikujejo med posameznimi conami v deblu. V deblu jelovine je prisotna beljava, jedrovina in mokrina.

Za pretok vode v živem drevesu je pomembna vzdolžna permeabilnost, ki je bila največja. Permeabilnost je močno odvisna od fizioliškega stanja tkiva, pomembni vlogo pri tem ima aspiracija obokanih pikenj. Kar približno 30–40 krat manjša permeabilnost je bila v radialni in tangencialni smeri. Razmerje med longitudinalno, tangencialno in radialno smerjo je pri beljavi: 62,3 : 2 : 1, pri jedrovini pa je to razmerje: 41 : 1,4 : 1. Največje razlike vrednosti med posameznimi smermi pa so se pokazale pri mokrini. Razmerje je tukaj 210 : 5 : 1.

Beljava se je izkazala za najbolj permeabilno. Precej slabše lastnosti ima jedrovina, saj je zaradi večjega števila aspiriranih obokanih pikenj manj permeabilna. Rezultati so pokazali, da je permeabilnost beljave precej večja od permeabilnosti jedrovine in mokrine. Najmanjšo permeabilnost smo izmerili pri mokrini, pri kateri je bila v longitudinalni smeri 2,1 krat manjša od permeabilnosti beljave. V radialni smeri je bila permeabilnost pri mokrini 7 krat manjša kot pri beljavi, v tangencialni smeri pa približno 3 krat manjša.

Vzorci beljave in jedrovine, ki so bili predhodno prepojeni z alkoholom, kažejo višje koeficiente plinske permeabilnosti, kot ostali vzorci. Vzrok naj bi bil deaspiracija obokanih pikenj. Pri beljavi je v longitudinalni smeri permeabilnost kar 6 do 10 krat večja pri vzorcih, ki so bili predhodno tretirani z alkoholom (pri tretiranih vzorcih $343 \text{ m}^3/\text{m Pa s}$ 10^{-9} , pri netretiranih $53 \text{ m}^3/\text{m Pa s}$ 10^{-9}). Prav tako je tudi v radialni in tangencialni smeri pri teh vzorcih permeabilnost mnogo večja. Predhodno tretirani vzorci z alkoholom imajo tudi večjo permeabilnost beljave od jedrovine, razlika med beljavo in jedrovino pa je še večja kot pri navadnih vzorcih.

Tok vezane vode ima upor v samem materialu (difuzijski koeficient) in pri odstranjevanju s površine (koeficient snovne prestopnosti), zato smo z nestacionarno metodo določili vsakega posebej. Povprečni difuzijski koeficienti so bili pri beljavi $4,75 \text{ m}^2/\text{s} \cdot 10^{-10}$, koeficienti snovne prestopnosti pa $5,52 \text{ m/s} \cdot 10^{-8}$. Pri toku vezane vode iz materiala koeficient snovne prestopnosti ni imel večjega vpliva, prišel pa bi do izraza pri tanjših vzorcih.

Ocenili smo, da na difuzivnost močno vplivajo jedrovinske snovi, ki se v procesu ojedritve inkrustirajo v celične stene. Beljava se je izkazala za bolj difuzivno kot jedrovina, saj so v jedrovini že prisotne jedrovinske snovi, ki zmanjšujejo difuzivnost lesa.

7 POVZETEK

Poskušali smo ugotoviti sušilne karakteristike jelovine in jih ustrezno predstaviti. Jelovina povzroča veliko težav pri sušenju, kvaliteta posušenega lesa je slaba. Z ugotavljanjem permeabilnosti in difuzivnosti jelovine smo poskušali primerjati sušilne karakteristike med beljavo, jedrovino in mokrino jelovine. Permeabilnost in difuzivnost lesa sta dobra pokazatelja sušilnih karakteristik. Na permeabilnost močno vplivajo ojedritveni procesi, kjer poteka tudi aspiracija obokanih pikenj. Difuzijski upor sestavlja upor prenosa vode iz notranjosti lesa na površino (difuzijski koeficient) in iz površine v okolico (koeficient snovne prestopnosti). Slednji postane pomemben šele pri nizki hitrosti kroženja atmosfere in pri majhnih debelinah. Največji vpliv na difuzivnost imajo gostota lesa, ojedritveni procesi, pomembne pa so tudi različne strukturne, anatomske in kemične posebnosti posameznih lesnih vrst. Inkrustracija nizkomolekularnih snovi v procesu ojedritve delujejo kot difuzijska bariera.

Uporabili smo dve metodi: merjenje plinske permeabilnosti in določanje difuzijskega koeficienta z nestacionarno metodo. Pri merjenju plinske permeabilnosti smo nekaj vzorcev predhodno prepojili z alkoholom.

Za merjenje plinske permeabilnosti jelovine smo uporabili nekoliko modificirano Pettijevo napravo. Merili smo v različnih smereh: longitudinalni, tangencialni in radialni smeri. Pri merjenju difuzijskih koeficientov, smo vzorce predhodno klimatizirali. Vzorce smo premazali, tako da je pri merjenju difuzijskih koeficientov potekalo le enostransko navlaževanje.

Beljava je imela največjo permeabilnost. To je povsem pričakovan rezultat, saj v beljavi še ne potekajo ojedritveni procesi. Slabša permeabilnost se je izkazala pri jedrovini, mokrina pa je bila najmanj permeabilna. Glede na anatomsko smer se je za najbolj permeabilno izkazala longitudinalna smer. Razlog za to so gotovo anatomske elementi, predvsem vzdolžno potekajoče traheide. Vzorci, ki so bili predhodno tretirani z alkoholom so bili

bolj permeabilni. Vzrok za to je manjša aspiracija pikenj v procesu sušenja lesa, saj ima alkohol manjšo površinsko napetost.

Po pričakovanju je bila večja difuzivnost beljavnega dela debla, razlog za slabšo difuzivnost jedrovine je nekoliko višja gostota in vsebnost jedrovinskih snovi.

Rezultati so pokazali, da ima najboljše sušilne karakteristike beljava, nekoliko slabše jedrovina, najslabše pa se je za sušenje izkazala mokrina. Rezultati ustrezajo našim pričakovanjem in so dober odgovor na anatomsko sestavo in posebnosti lesa jelovine.

8 VIRI

- Bao F., Lu J., Avramidis S. 1999. On The Permeability of Main Wood Species in China, *Holzforschung*, 53: 350-354
- Comstock G.L. 1963. Moisture diffusion coefficients 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.
- Coutts M.P., Risbeth J. 1977. The formation of wetwood in Grand fir. *Eur.J.For. Path*, 7: 13-22
- Ishii T., Fukazawa K. 1987. Sap constituents and pit closures connected with water penetration in the wetwood of *Abies sachalinensis* Masters. *Research Bulletins of the College Experiment Forests Hokkaido University* 44: 1277-1305
- Jeremić D. 1995. Comparative analysis of wetwood, heartwood and sapwood properties in balsam fir. BscFE. Beograd, University of Belgrade: 111 str.
- Merela M. 2002. Zgradba in radialna plinska permeabilnost reakcijskih con pri bukvi. Univerzitetna diplomska naloga. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 51 str.
- Schink B., Ward J.C. 1984. Microaerobic and anaerobic bacterial activities invollved in formation of wetwood and discoloured wood. *IAWA Bulletin n.s.* 5,2: 105-109
- Siau J.F. 1984. *Transport processes in wood*. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, Springer – Verlag: 245 str.
- Siau J.F. 1995. *Wood: Influence of moisture on physical properties*. Blackburg, Department of Wood Science and Forest Products Virginia Polytechnic Institute and State University: 227 str.

Skaar C. 1954. Analysis of methods for determining the coefficient of moisture diffusion in wood. *Forest Products Journal*, 4: 403-410

Stamm A.J. 1959. Bound – Water diffusion into wood in the fiber direction. *Forest Products Journal*, 9: 27 – 32

Torelli N. 1990. Les in skorja. Slovar strokovnih izrazov. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 70 str.

Torelli N. 2005. Mokro srce pri jelki. *Les*, 57, 1-2: 4-9

Zupan G. 1997. Primerjava difuzivnosti beljave in jedrovine pri nekaterih domačih drevesnih vrstah. Visokošolska diplomska naloga. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 38 str.

Ward, J.C., Zeikus J.G. 1980. Bacteriological, chemical and physical properties of wetwood in living trees. Natural variations of wood properties. *Mitt. Der Bundesforschungsanstalt für Forst-und holzwirtschaft Kamburg*, 131: 133-165

PRILOGE

Priloga 1: Gostota (ρ) in permeabilnost (kg) v longitudinalni (L), radialni (R) in tangencialni (T) smeri za vzorce beljave (B), jedrovine (J) in mokrine (M).

Vzorec	ρ_{uL} [kg/m ³]	ρ_{uR} [kg/m ³]	ρ_{uT} [kg/m ³]	kgL	kgR	kgT
1/2 B	447,0	419,4	452,2	7,67E-08	9,32E-10	1,70E-09
2/2 B	411,2	412,1	424,2	5,37E-08	1,41E-09	1,33E-09
2/2 B''	388,4	379,3	397,4	3,07E-08	9,93E-10	6,95E-10
A 2/2 B	416,3	415,6	419,6	3,43E-07	2,61E-09	1,04E-08
A 2/2 B''	385,9	371,0	386,5	3,30E-07	3,21E-09	9,98E-09
2/6 B	413,9	417,8	414,0	2,31E-08	1,57E-09	1,66E-09
3/2 B	457,3	460,4	456,2	9,11E-08	1,34E-09	3,15E-09
3/2 B''	406,9	413,4	410,6	2,65E-08	1,01E-09	1,15E-09
3/6 B	476,2	476,1	486,1	1,36E-08	1,54E-09	1,29E-09
3/6 B''	467,2	456,1	475,0	1,62E-08	1,56E-09	1,19E-09
kgL maks	3,430E-07	kgR maks	3,205E-09	kgT maks	1,043E-08	
kgL min	1,356E-08	kgRmin	9,320E-10	kgT min	6,945E-10	
povp. L	1,005E-07	povp. R	1,617E-09	povp. T	3,258E-09	
varianca L	1,453E-14	varianca R	4,855E-19	varianca T	1,245E-17	
st. odklon L	1,236E-07	st. odklon R	6,968E-10	st. odklon T	3,529E-09	

Vzorec	ρ_{uL} [kg/m ³]	ρ_{uR} [kg/m ³]	ρ_{uT} [kg/m ³]	kgL	kgR	kgT
1/2 J	481,4	475,0	485,8	1,75E-07	1,51E-09	7,17E-09
1/2 J''	409,7	430,4	413,9	1,44E-07	5,01E-09	4,58E-09
2/2 J	403,5	399,2	409,1	1,25E-08	1,28E-10	2,63E-10
2/2 J''	380,0	373,4	385,0	8,54E-08	8,64E-09	2,94E-09
A 2/2 J	396,9	408,1	420,4	4,03E-08	3,07E-10	1,67E-09
A 2/2 J''	420,6	402,9	429,3	2,70E-08	4,11E-10	5,42E-10
2/6 J	441,5	459,2	439,3	7,91E-09	9,84E-11	2,55E-10
3/2 J	404,2	420,7	404,5	1,42E-08	1,25E-10	2,00E-10
3/2 J''	414,5	406,8	424,2	6,06E-08	1,60E-10	1,96E-09
3/6 J	434,8	457,0	466,8	1,02E-07	5,74E-10	1,42E-09
3/6 J''	433,6	442,3	446,8	3,58E-08	2,01E-10	2,52E-09
kgL maks	1,747E-07	kgR maks	8,639E-09	kgT maks	7,173E-09	
kgL min	7,906E-09	kgRmin	9,837E-11	kgT min	1,995E-10	
povp. L	6,404E-08	povp. R	1,560E-09	povp. T	2,137E-09	
varianca L	2,874E-15	varianca R	6,901E-18	varianca T	4,201E-18	
st. odklon L	5,361E-08	st. odklon R	2,627E-09	st. odklon T	2,050E-09	

Vzorec	ρ_{uL} [kg/m ³]	ρ_{uR} [kg/m ³]	ρ_{uT} [kg/m ³]	kgL	kgR	kgT
1/2 M	479,4	484,9	482,0	1,10E-07	1,42E-10	1,28E-09
2/6 M	440,7	465,2	448,2	1,67E-08	3,84E-10	4,45E-10
3/6 M	478,7	494,8	509,8	4,54E-08	1,29E-10	1,57E-09
3/6 M''	497,0	516,8	475,3	2,12E-08	2,60E-10	1,35E-09
kgL maks	1,100E-07	kgR maks	3,835E-10	kgT maks	1,567E-09	
kgL min	1,674E-08	kgRmin	1,289E-10	kgT min	4,445E-10	
povp. L	4,834E-08	povp. R	2,286E-10	povp. T	1,162E-09	
varianca L	1,386E-15	varianca R	1,062E-20	varianca T	1,825E-19	
st. odklon L	3,723E-08	st. odklon R	1,030E-10	st. odklon T	4,272E-10	

Priloga 2: Sprememba mase beljavnih vzorcev različnih debelin pri merjenju difuzivnosti.

		masa [g]				
	čas [h]	0	1	3	6	11
1/1 B1	10mm	21,93	21,897	21,855	21,808	21,753
	20mm	40,94	40,902	40,853	40,797	40,721
	30mm	61,09	61,065	61,033	60,993	60,94
	40mm	81,06	81,028	80,988	80,93	80,86
1/1 B2	10mm	20,42	20,396	20,353	20,299	20,239
	20mm	40,61	40,568	40,521	40,468	40,395
	30mm	60,09	60,054	60,017	59,975	59,921
	40mm	76,84	76,802	76,765	76,714	76,655
1/2 B1	10mm	18,62	18,575	18,528	18,476	18,42
	20mm	37,33	37,261	37,212	37,156	37,091
	30mm	57,82	57,773	57,735	57,692	57,64
	40mm	76,87	76,827	76,787	76,743	76,688
1/2 B2	10mm	19,32	19,274	19,231	19,179	19,12
	20mm	38,99	38,932	38,887	38,831	38,767
	30mm	56,2	56,152	56,117	56,073	56,025
	40mm	72,51	72,412	72,372	72,326	72,268

Priloga 3: Parametra linearne regresije (k,n) in izračun difuzijskega koeficienta (D) in koeficienta snovne prestopnosti (S) za beljavo (B) in jedrovino (J).

	k	n	D [m ² /s]	S [m/s]
$y = 1,934E+09x + 1,145E+08$ * (B)	1,934E+09	1,145E+08	5,17E-10	3,06E-08
$y = 2,380E+09x + 7,159E+07$ (J)	2,380E+09	7,159E+07	4,20E-10	4,89E-08
$y = 2,143E+09x + 9,530E+07$ (B)	2,143E+09	9,530E+07	4,67E-10	3,67E-08
$y = 2,102E+09x + 1,110E+08$ * (J)	2,102E+09	1,110E+08	4,76E-10	3,15E-08
$y = 3,051E+09x + 5,870E+07$ * (B)	3,051E+09	5,870E+07	3,28E-10	5,96E-08
$y = 2,745E+09x + 7,420E+07$ * (J)	2,745E+09	7,420E+07	3,64E-10	4,72E-08
$y = 1,767E+09x + 9,382E+07$ * (B)	1,767E+09	9,382E+07	5,66E-10	3,73E-08
$y = 2,069E+09x + 8,661E+07$ (J)	2,069E+09	8,661E+07	4,83E-10	4,04E-08
$y = 2,007E+09x + 6,913E+07$ (B)	2,007E+09	6,913E+07	4,98E-10	5,06E-08
$y = 2,138E+09x + 9,431E+07$ * (J)	2,138E+09	9,431E+07	4,68E-10	3,71E-08
$y = 2,283E+09x + 6,442E+07$ (B)	2,283E+09	6,442E+07	4,38E-10	5,43E-08
$y = 2,104E+09x + 9,859E+07$ * (J)	2,104E+09	9,859E+07	4,75E-10	3,55E-08
$y = 1,828E+09x + 6,450E+07$ * (B)	1,828E+09	6,450E+07	5,47E-10	5,43E-08
$y = 1,957E+09x + 1,137E+08$ * (J)	1,957E+09	1,137E+08	5,11E-10	3,08E-08
$y = 2,812E+09x + 5,416E+07$ (B)	2,812E+09	5,416E+07	3,56E-10	6,46E-08
$y = 2,140E+09x + 1,055E+08$ (J)	2,140E+09	1,055E+08	4,67E-10	3,32E-08
$y = 2,017E+09x + 6,786E+07$ (B)	2,017E+09	6,786E+07	4,96E-10	5,16E-08
$y = 3,312E+09x + 4,243E+07$ (J)	3,312E+09	4,243E+07	3,02E-10	8,25E-08
$y = 2,510E+09x + 3,802E+07$ (B)	2,510E+09	3,802E+07	3,98E-10	9,21E-08
$y = 2,677E+09x + 4,076E+07$ (J)	2,677E+09	4,076E+07	3,74E-10	8,59E-08
$y = 2,543E+09x + 4,572E+07$ * (B)	2,543E+09	4,572E+07	3,93E-10	7,66E-08
$y = 2,290E+09x + 5,467E+07$ (J)	2,290E+09	5,467E+07	4,37E-10	6,40E-08

Priloga 4: Izračun smernega koeficienta (k), difuzijskega koeficienta (D) in navideznega difuzijskega koeficienta beljavnih vzorcev (Def) s polovičnim uravnovesnim časom ($t_{1/2}$), pri različnih debelinah vzorcev (L) iz beljave jelovine.

	L (m)	k [l]	D [m ² /s]	Def [m ² /s]	gostota (kg/m ³)	t (1/2) [s]
1/1 B1	0,01019	9,908E-04	8,08E-08	8,002E-11	506,41	313332
	0,02001	6,479E-04	2,04E-07	1,319E-10	477,36	736694
	0,02977	4,674E-04	3,25E-07	1,520E-10	488,40	1377047
	0,03966	4,272E-04	5,28E-07	2,253E-10	486,67	1605374
1/1 B2	0,01016	1,045E-03	8,47E-08	8,849E-11	471,12	282360
	0,01993	6,926E-04	2,16E-07	1,496E-10	475,31	659135,11
	0,02995	4,914E-04	3,46E-07	1,700E-10	475,99	1234565,5
	0,03952	4,350E-04	5,34E-07	2,320E-10	460,69	1561165,4
1/2 B1	0,01032	1,208E-03	1,01E-07	1,220E-10	419,86	199134,78
	0,02008	7,479E-04	2,37E-07	1,770E-10	436,18	538929,19
	0,03006	4,849E-04	3,44E-07	1,668E-10	454,82	1167962,4
	0,04003	4,416E-04	5,56E-07	2,453E-10	452,87	1434070,1
1/2 B2	0,0102	1,155E-03	9,44E-08	1,090E-10	444,15	228634,39
	0,02008	6,728E-04	2,13E-07	1,433E-10	454,68	665089,16
	0,02996	4,862E-04	3,43E-07	1,666E-10	443,44	1197821,9
	0,03978	4,811E-04	5,98E-07	2,875E-10	429,18	1234241,6

Priloga 5: Izračun smernega koeficienta (k), difuzijskega koeficienta (D) in navideznega difuzijskega koeficienta beljavnih vzorcev (Def) s polovičnim uravnovesnim časom ($t_{1/2}$), pri različnih debelinah vzorcev (L) iz jedrovine jelovine.

	L (m)	k [J]	D [m ² /s]	Def [m ² /s]	gostota (kg/m ³)	(1/2) [s]
1/1 J1	0,00997	1,189E-03	9,28E-08	1,103E-10	446,44	228492
	0,02001	7,146E-04	2,25E-07	1,605E-10	437,46	601731
	0,0299	5,388E-04	3,78E-07	2,037E-10	431,60	1059046
	0,0397	4,457E-04	5,52E-07	2,458E-10	438,25	1472723
1/1 J2	0,01018	1,008E-03	8,21E-08	8,266E-11	455,73	261000
	0,02011	6,486E-04	2,06E-07	1,336E-10	440,47	670912
	0,02971	4,562E-04	3,16E-07	1,442E-10	472,83	1359783
	0,03974	4,293E-04	5,33E-07	2,285E-10	451,96	1573880
1/2 J1	0,01033	1,163E-03	9,75E-08	1,133E-10	457,07	234825
	0,02007	6,902E-04	2,18E-07	1,506E-10	463,85	641973
	0,02976	4,857E-04	3,38E-07	1,640E-10	440,98	1203464
	0,03988	4,392E-04	5,49E-07	2,408E-10	458,35	1550308
1/2 J2	0,01013	1,124E-03	9,06E-08	1,018E-10	470,07	260400
	0,02009	6,839E-04	2,17E-07	1,482E-10	449,41	652730
	0,02996	5,188E-04	3,66E-07	1,897E-10	440,40	1116503
	0,03981	4,469E-04	5,56E-07	2,485E-10	452,16	1512122
2/1 J1	0,01021	1,107E-03	9,07E-08	1,003E-10	432,24	244183
	0,01985	6,441E-04	1,99E-07	1,283E-10	452,31	701460
	0,0299	5,082E-04	3,57E-07	1,813E-10	423,21	1126034
	0,03974	4,356E-04	5,4E-07	2,352E-10	433,15	1514093
2/1 J2	0,01011	1,067E-03	8,57E-08	9,135E-11	441,47	253813
	0,02008	6,745E-04	2,14E-07	1,440E-10	440,23	661115
	0,02979	4,729E-04	3,3E-07	1,558E-10	454,72	1312931
	0,03984	4,428E-04	5,52E-07	2,443E-10	429,98	1520594

Priloga 6: Navidezni difuzijski koeficient (Def) in razmerjem med debelino (L) in navideznim difuzijskim koeficientom ter realni difuzijski koeficient (D) in koeficient snovne prestopnosti (S) za beljavo in jedrovino jelovine.

beljava	jedrovina	beljava	jedrovina
L (m)	L (m)	L/Def B [m ² /s]	L/Def J [m ² /s]
0,01019	0,00997	1,5688E+08	1,1693E+08
0,02001	0,02001	1,8784E+08	1,5343E+08
0,02977	0,0299	2,3600E+08	1,8071E+08
0,03966	0,0397	2,0652E+08	1,8927E+08
0,01016	0,01018	1,4179E+08	1,3081E+08
0,01993	0,02011	1,6874E+08	1,7021E+08
0,02995	0,02971	2,1031E+08	2,3351E+08
0,03952	0,03974	2,0155E+08	2,0206E+08
0,01032	0,01033	9,8449E+07	1,1598E+08
0,02008	0,02007	1,3693E+08	1,6320E+08
0,03006	0,02976	1,9824E+08	2,0632E+08
0,04003	0,03988	1,8278E+08	1,9834E+08
0,0102	0,01013	1,1436E+08	1,3115E+08
0,02008	0,02009	1,6899E+08	1,6577E+08
0,02996	0,02996	2,0398E+08	1,9013E+08
0,03978	0,03981	1,5830E+08	1,9379E+08
0,01013	0,01021	9,8087E+07	1,2202E+08
0,02001	0,01985	1,3327E+08	1,8030E+08
0,02966	0,0299	1,5765E+08	1,9214E+08
0,03992	0,03974	1,7174E+08	1,9439E+08
0,0106	0,01011	1,0242E+08	1,2809E+08
0,01994	0,02008	1,3689E+08	1,6798E+08
0,0299	0,02979	1,5228E+08	2,2486E+08
0,03998	0,03984	1,5330E+08	1,9473E+08
0,01016	0,01019	7,9694E+07	1,2929E+08
0,02011	0,02002	1,2159E+08	1,7564E+08

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju dr. Željku Gorišku za pomoč in strokovno vodenje pri pisanju diplomske naloge.

Iskrena hvala mag. Alešu Stražetu za pomoč pri eksperimentalnem delu diplomske naloge, za prijaznost in nesebično pomoč pri iskanju informacij.

Hvala lektorici mag. Nadi Kuzmin in ge. Apoloniji Klančar Kobal.

Posebno se zahvaljujem vsem domačim, ki so mi v času študija in pisanja diplomske naloge stali ob strani.