

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA

Aleš STRAŽE

**VPLIV NOTRANJEGA IN ZUNANJEGA SNOVNEGA
UPORA NA KINETIKO KONVEKCIJSKEGA
SUŠENJA LESA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Ljubljana, 2010

POPRAVKI:

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA

Aleš STRAŽE

**VPLIV NOTRANJEGA IN ZUNANJEGA SNOVNEGA UPORA NA
KINETIKO KONVEKCIJSKEGA SUŠENJA LESA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

**IMPACT OF INTERNAL AND EXTERNAL MASS TRANSFER
RESISTANCE ON KINETICS OF CONVECTIVE WOOD DRYING**

DOCTORAL DISSERTATION

Ljubljana, 2010

Doktorsko delo je zaključek Podiplomskega študija bioloških in biotehniških znanosti s področja lesarstva. Eksperimentalno delo je bilo opravljeno na Biotehniški fakulteti, v Laboratoriju za tehnologije sušenja lesa in v Laboratoriju za anatomijo lesa Katedre za tehnologijo lesa.

Na podlagi Statuta Univerze v Ljubljani ter po sklepu Senata Biotehniške fakultete in sklepa 19. Seje Komisije za doktorski študij z dne 26.3.2009 ter z odločbo dekana z dne 3.4.2009 je bilo potrjeno, da kandidat izpolnjuje pogoje za izdelavo in zagovor doktorskega dela s področja lesarstva. Za mentorja je bil imenovan izr. prof. dr. Željko Gorišek, za somentorja pa je bil imenovan izr. prof. dr. Bojan Bučar.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: prof. dr. dr. h. c. Niko TORELLI
Gozdarski Inštitut Slovenije

Član: izr. prof. dr. Željko GORIŠEK
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Član: izr. prof. dr. Bojan BUČAR
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Član: izr. prof. dr. Stjepan PERVAN
Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet

Datum zagovora: 12. 3. 2010

Delo je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Aleš STRAŽE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dd
DK	UDK 630*847.2
KG	les/bukovina/sušenje/transport vode/snovni upor/kinetika sušenja/adaptivno sušenje
AV	STRAŽE, Aleš, univ. dipl. inž. les., mag.
SA	GORIŠEK, Željko (mentor)/BUČAR, Bojan (somentor)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Podiplomski študij bioloških in biotehniških znanosti, področje lesarstva
LI	2010
IN	VPLIV NOTRANJEGA IN ZUNANJEGA SNOVNEGA UPORA NA KINETIKO KONVEKCIJSKEGA SUŠENJA LESA
TD	Doktorska disertacija
OP	XV, 114 str., 6 pregl., 65 sl., 10 pril., 117 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Kinetika konvekcijskega sušenja bukovega lesa (<i>Fagus sylvatica</i> L.) je bila raziskana pri stacionarnem postopku sušenja ter v adaptivnih sušilnih pogojih. Uporabili smo radialno orientirane preizkušance, debeline od 6 mm do 24 mm, s tračno žagano in s skobljano sušilno površino. Stacionarno konvekcijsko sušenje lesa smo izvedli v laboratorijskem sušilnem kanalu pri konstantni temperaturi in relativni zračni vlažnosti ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\phi = 85\%$), z variiranjem hitrosti zraka (v) od 0,6 m/s do 7,6 m/s. Med sušenjem smo v zaporednih časovnih intervalih gravimetrično določali povprečno lesno vlažnost (u), vlažnostni gradient ($\Delta u/\Delta x$) in masni tok vode v okolico. V drugem delu raziskave se je kinetika konvekcijskega sušenja lesa uravnavala s trenutno doseženim masnim tokom vode z iterativnim prilagajanjem sušilnega potenciala (ΔT , $\Delta \phi$, Δv) v zaprto-zančnem računalniškem algoritmu. Sušilna hitrost se je splošno povečevala s hitrostjo gibanja zraka ob površini lesa ter zmanjševala z večanjem debeline preizkušancev. Pri majhnih hitrostih zraka ($v \leq 2,5\text{ m/s}$) ter manjših debelinah preizkušancev ($d \leq 12\text{ mm}$) je bila sušilna hitrost pri izločanju proste vode pri preizkušancih s skobljano površino, večja kot pri vzporednih, z žagano površino, kar je posledica razlik v snovni prestopnosti. Povečanje začetne sušilne hitrosti ($v > 2,5\text{ m/s}$) je pri preizkušancih večjih debelin ($\geq 18\text{ mm}$) povzročilo neposredno sušenje s padajočo sušilno hitrostjo, ob prevladujočem notranjem snovnem uporu. Adaptivno sušenje je bilo v splošnem hitreje v primerjavi s konvekcijskim sušenjem pri konstantnih sušilnih pogojih. Pri visoki lesni vlažnosti in izločanju proste vode smo optimalni sušilni potencial dosegli z iterativnim prilagajanjem zračne vlažnosti in hitrosti zraka. Pri sušenju pod točko nasičenja lesnih vlaken in naraščanju notranjega snovnega upora dosežemo optimalni sušilni potencial s kombinacijo zračne vlažnosti in temperature sušenja.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN	Dd
DC	UDC 630*847.2
CX	wood/beechwood/drying/moisture transport/mass transfer resistance/drying kinetics/adaptive drying
AU	STRAŽE, Aleš
AA	GORIŠEK, Željko (supervisor)/BUČAR, Bojan (co-supervisor)
PP	SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
PB	University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Postgraduate study of Biological and Biotechnical Sciences, field: Wood Science
PY	2010
TI	IMPACT OF INTERNAL AND EXTERNAL MASS TRANSFER RESISTANCE ON KINETICS OF CONVECTIVE WOOD DRYING
DT	Doctoral Dissertation
NO	XV, 114 p., 6 tab., 65 fig., 10 ann., 117 ref.
LA	sl
AL	sl/en
AB	Drying kinetics of convective drying of beechwood (<i>Fagus sylvatica</i> L.) was researched at common stationary drying and at adaptive kiln drying process. We used radially oriented specimens of thickness from 6 mm to 24 mm, having sawn and planed drying surface. Firstly, a series of convective drying processes were carried out in the laboratory tunnel drier at constant drying conditions of 30 °C, at relative humidity (ϕ) of 85%, varying air velocity (v) from 0.6 m/s to 7.6 m/s. During the drying, moisture content (u) and water mass flow were gravimetrically determined at successive time intervals. In the second part of the research, the real water mass flow and the iteratively adaptive drying potential (T , ϕ and v) were used at the computer controlled convective drying. Drying rate generally increased with the air velocity and decreased with the increasing thickness of wood. Low air velocities ($v \leq 2.5$ m/s) caused also initially higher drying rate at specimens with planed surface comparing to sawn one, due to differences of the surface mass transfer coefficient. Increasing of the air velocity ($v > 2.5$ m/s) caused irreversible reduction of initial water mass flow and transition to the period of falling drying rate, where the internal water mass resistance predominates. Too high initial drying rate, especially at greater material thicknesses (≥ 18 mm) caused high initial moisture content gradient ($\Delta u/\Delta x$) and significantly prolonged the drying process in continuation. Adaptive drying was generally faster in comparison to convective drying at constant climatic conditions. In the first drying period, at the removal of free water, the optimized drying potential was reached with the iterative variation of the air humidity and the air velocity. Combination of the air humidity and the temperature was successful to optimize the drying potential at the moisture content below fibre saturation, where higher internal mass transfer resistance existed.

KAZALO VSEBINE

	str.
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK.....	IX
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI.....	XIV
1 UVOD	1
1.1 CILJI IN RAZISKOVALNE HIPOTEZE.....	3
2 PREGLED OBJAV	4
2.1 MEHANIZEM GIBANJA VODE V LESU.....	4
2.1.1 Enofazno gibanje tekočin skozi porozno lesno strukturo	4
2.1.2 Kapilarni tlak	5
2.1.3 Večfazno gibanje tekočin v lesu	8
2.1.3.1 Makroskopski fizikalni modeli gibanja tekočin skozi porozno lesno strukturo	8
2.1.3.2 Več-komponentni modeli gibanja tekočin v lesu.....	14
2.1.4 Vpliv specifičnih lastnosti lesa na prevajanje vode	17
2.1.4.1 Določanje permeabilnosti s pomočjo geometrijskih modelov lesa	20
2.1.5 Perkolacijski modeli gibanja tekočin v lesu.....	20
2.1.6 Difuzijsko gibanje vode v lesu.....	23
2.2 IZHLEPEVANJE VODE S POVRŠIN LESA.....	24
2.2.1 Zunanji snovni upor pri izhlapevanju vode z nasičeno vlažnih površin lesa .	24
2.2.1.1 Pojav suhega površinskega sloja	26
2.2.2 Zunanji snovni upor pri sušenju lesa kot difuzijskem procesu	29
2.2.2.1 Nastanek površinske difuzijske bariere	32
2.3 OPTIMIRANJE KINETIKE KONVEKCIJSKEGA SUŠENJA LESA	32
2.3.1 Postopki predpriprave lesa za konvekcijsko komorsko sušenje	32
2.3.2 Tehnike izboljšanja konvekcijskega sušenja lesa	34
3 MATERIAL IN METODE	38
3.1 IZBOR IN PRIPRAVA MATERIALA.....	38
3.1.1 Priprava preizkušancev za stacionarne sušilne eksperimente	39
3.1.2 Priprava preizkušancev za konvekcijsko sušenje v adaptivnih pogojih.....	40
3.2 KONVEKCIJSKO SUŠENJE LESA PRI STACIONARNIH SUŠILNIH POGOJIH.....	41
3.2.1 Sušilna oprema in eksperimentalna zasnova	41
3.2.2 Pogoji in potek eksperimentiranja pri stacionarnih pogojih.....	42
3.2.2.1 Spremljanje kinetike sušenja v stacionarnih pogojih	43

3.2.2.2	Vrednotenje izločanja proste vode iz lesa pri sušenju s stacionarnimi pogoji z rešitvijo enačbe prvega reda	44
3.2.2.3	Analiza masnega toka vode pri sušenju lesa s stacionarnimi sušilnimi pogoji	46
3.2.2.4	Določanje vlažnostnega gradienta.....	47
3.3	KONVEKCIJSKO SUŠENJE LESA PRI ADAPTIVNIH POGOJIH	48
3.3.1	Sušilna oprema in eksperimentalna zasnova	48
3.3.2	Algoritem vodenja sušilnega procesa.....	49
3.3.2.1	Značilnost, zagon in delovanje programa »Adaptivno sušenje«	49
3.4	VREDNOTENJE LASTNOSTI POVRŠIN LESA	53
4	REZULTATI	54
4.1	KONVEKCIJSKO SUŠENJE LESA PRI STACIONARNIH SUŠILNIH POGOJIH.....	54
4.1.1	Kinetika sušenja bukovine, debeline 6 mm, v odvisnosti od hitrosti gibanja zraka	55
4.1.2	Kinetika sušenja bukovine, debeline 12 mm, v odvisnosti od hitrosti gibanja zraka	61
4.1.3	Kinetika sušenja bukovine, debeline 18 mm, v odvisnosti od hitrosti gibanja zraka	67
4.1.4	Kinetika sušenja bukovine, debeline 24 mm, v odvisnosti od hitrosti gibanja zraka	73
4.1.5	Odvisnost masnega toka vode od pogojev konvekcijskega sušenja lesa	78
4.1.5.1	Simulacija masnega toka in poteka sušenja bukovine različnih debelin z variiranjem hitrosti zraka	80
4.1.6	Lastnosti površine in pod-površinskega sloja preizkušancev za sušenje lesa	82
4.2	KONVEKCIJSKO SUŠENJE BUKOVINE PRI ADAPTIVNIH SUŠILNIH POGOJIH.....	84
4.2.1	Adaptivno konvekcijsko sušenje bukovine, debeline 12 mm	84
4.2.1.1	Kinetika adaptivnega sušenja bukovine, debeline 12 mm, z 2-parametričnim sušilnim potencialom.....	84
4.2.1.2	Kinetika adaptivnega sušenja bukovine, debeline 12 mm, s 3-parametričnim sušilnim potencialom.....	86
4.2.2	Adaptivno konvekcijsko sušenje bukovine, debeline 24 mm	88
4.2.2.1	Kinetika adaptivnega sušenja bukovine, debeline 24 mm, z 1-parametričnim sušilnim potencialom.....	88
5	RAZPRAVA	90
5.1	KINETIKA KONVEKCIJSKEGA SUŠENJA LESA PRI STACIONARNIH SUŠILNIH POGOJIH	90
5.2	KINETIKA KONVEKCIJSKEGA SUŠENJA LESA PRI ADAPTIVNIH POGOJIH.....	96
6	SKLEPI.....	98
7	POVZETEK (SUMMARY)	100

7.1	POVZETEK.....	100
7.2	SUMMARY.....	102
8	VIRI	105
	ZAHVALA	
	PRILOGE	

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1	Eksperimentalni pogoji v stacionarnih sušilnih eksperimentih pri štirih debelinah preizkušancev: 6, 12, 18 in 24 mm.43
Preglednica 2	Vrednosti koeficientov v modelu masnega toka vode (Enačba 44) (R^2 - determinacijski koeficient, a - začetni masni tok, u_k - prevoj funkcije, k - hitrost pojemanja masnega toka, b - velikost pojemka masnega toka v prevojni točki (u_k), u_T - vlažnost prehoda iz faze konstantne v fazo padajoče sušilne hitrosti) v odvisnosti od hitrosti zraka nad površino lesa (v) pri sušenju bukovih preizkušancev, debeline 6 mm (d_1), s skobljano- (S) in z žagano površino (Ž).....56
Preglednica 3	Vrednosti koeficientov v modelu masnega toka vode (Enačba 44) (R^2 - determinacijski koeficient, a - začetni masni tok, u_k - prevoj funkcije, k - hitrost pojemanja masnega toka, b - velikost pojemka masnega toka v prevojni točki (u_k), u_T - vlažnost prehoda iz faze konstantne v fazo padajoče sušilne hitrosti) v odvisnosti od hitrosti zraka nad površino lesa (v) pri sušenju bukovih preizkušancev, debeline 12 mm (d_2), s skobljano- (S) in z žagano površino (Ž).....63
Preglednica 4	Vrednosti koeficientov v modelu masnega toka vode (Enačba 44) (R^2 - determinacijski koeficient, a - začetni masni tok, u_k - prevoj funkcije, k - hitrost pojemanja masnega toka, b - velikost pojemka masnega toka v prevojni točki (u_k), u_T - vlažnost prehoda iz faze konstantne v fazo padajoče sušilne hitrosti) v odvisnosti od hitrosti zraka nad površino lesa (v) pri sušenju bukovih preizkušancev, debeline 18 mm (d_3), s skobljano- (S) in z žagano površino (Ž).....69
Preglednica 5	Vrednosti koeficientov v modelu masnega toka vode (Enačba 44) (R^2 - determinacijski koeficient, a - začetni masni tok, u_k - prevoj funkcije, k - hitrost pojemanja masnega toka, b - velikost pojemka masnega toka v prevojni točki (u_k), u_T - vlažnost prehoda iz faze konstantne v fazo padajoče sušilne hitrosti) v odvisnosti od hitrosti zraka nad površino lesa (v) pri sušenju bukovih preizkušancev, debeline 24 mm (d_4), s skobljano- (S) in z žagano površino (Ž).....75
Preglednica 6	Izračunane vrednosti koeficientov v modelu masnega toka vode (Enačba 44, Enačba 48) pri različnih hitrostih gibanja zraka nad površino lesa (v) za simulacijo konvekcijskega sušenja bukovine, debeline 16 mm, pri konstantnih sušilnih pogojih ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\phi = 85\%$).81

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1	Odvisnost kapilarnega tlaka v ranem (...) in kasnem lesu (—) od stopnje nasičenosti por pri bukovini (Perre, 1997).....8
Slika 2	Odvisnost efektivne prevodnosti za vodo v tangencialni smeri (K_T) od lesne vlažnosti (u) pri topolovini (Cloutier in Fortin, 1993).....11
Slika 3	Vpliv temperature (T) na efektivno prevodnost za vodo v tangencialni smeri (K_T) lesa topola (Cloutier in Fortin, 1993).12
Slika 4	Odvisnost relativne permeabilnosti v vzdolžni (—) in prečni smeri (...) od stopnje nasičenosti por pri bukovini (Perre in sod., 1993).....14
Slika 5	Odvisnost časa sušenja pri izločanju proste vode od specifične permeabilnosti borovine (Plumb in sod., 1985).17
Slika 6	Odvisnost plinske permeabilnosti bukovine (<i>Fagus sylvatica</i> L.) v longitudinalni smeri od dolžine preizkušanca (Perre in Karimi, 2002)...18
Slika 7	Vpliv dolžine preizkušanca (L) na delež aktivnih por v vzdolžni smeri bukovine (Perre, 2000).....19
Slika 8	Povezave med prevodnimi elementi v perkolacijskem modelu: a - vse vezi, b - povezane vezi, c - aktivne vezi (Perre in Karimi, 2002).21
Slika 9	Simulacija vlažnostnega profila pri sušenju beljave borovine s pomočjo perkolacijskega modela (mreža: $30 \times 30 \times 98$ elementov ($R \times T \times L$)) (Salin, 2006a).22
Slika 10	Teoretični temperaturni in vlažnostni profil na stiku vlažne površine lesa z okoliškim zrakom (Salin, 2007).....27
Slika 11	Odvisnost debeline suhega površinskega sloja v odvisnosti od lesne vlažnosti (Salin, 2002).28
Slika 12	Porazdelitev koncentracije sladkorjev tik pod površino lesa bora sušenega z dvema sušilnima hitrostma (Kreber in sod., 1998).29
Slika 13	Odvisnost časa sušenja od razmerja površinske snovne emisivnosti in difuzivnosti lesa (Simpson, 1993).31
Slika 14	Zmanjšanje površinske sušilne napetosti pri sušenju lesa evkalipta (<i>Eucalyptus</i> sp.) z zaščitnim pol-prepustnim premazom (Schaffner in Doe, 1984).....34
Slika 15	Vpliv specifičnih lastnosti lesa na kinetiko sušenja pri borovini (<i>Pinus radiata</i> D. Don.): levo - beljava, desno - kompresijski les (Davis, 2004).35

Slika 16	Ciklično nihanje masnega toka vode pri sušenju borovine z reverzibilnim kroženjem ventilatorjev (▲ prevodna beljava, ● prehodna cona) (Wiberg, 2001).	36
Slika 17	Vpliv oscilirajočih klimatskih pogojev na kinetiko sušenja bukovine (B1 – referenca, B2 – hitro osciliranje klime, B3 – počasno osciliranje klime) (Welling in sod., 2003).	37
Slika 18	Izdelava tangencialnih desk (2.) iz sveže beljave bukovine in primarno razžagovanje obdelovancev (3.).	38
Slika 19	Izdelava radialno orientiranih lamel in serij preizkušancev iz bukovine za stacionarne sušilne eksperimente.	39
Slika 20	Serije preizkušancev, različnih debelin ($d_1 = 6$ mm, $d_2 = 12$ mm, $d_3 = 18$ mm, $d_4 = 24$ mm), za stacionarne konvekcijske sušilne eksperimente.	40
Slika 21	Priprava preizkušanca v postopku konvekcijskega sušenja lesa v adaptivnih pogojih.	41
Slika 22	Konvekcijski sušilni kanal TLS-01 (zg. levo) s PLC krmilnikom (sp. levo) in z eksperimentalno komoro (sp. desno).	42
Slika 23	Časovni odziv sistema prvega reda na hipno nespremenljivo zunanjo motnjo.	45
Slika 24	Analiza masnega toka vode: a – začetni masni tok vode, k – hitrost pojetanja masnega toka vode s padanjem povprečne lesne vlažnosti, u_k – prevoj funkcije, u_T – vlažnost ireverzibilnega prehoda v fazo padajoče sušilne hitrosti.	47
Slika 25	Gravimetrično določanje vlažnostnega profila v preizkušancih s cepljenjem na lamele ($\Delta x = 3$ mm).	47
Slika 26	Oprema za adaptivno sušenje lesa: 1 - PLC krmilnik (DPC-420), 2 - PC s programsko opremo LabVIEW 8.0, 3 - usmerjevalnik zračnega toka, 4 - tehtnica (Exacta 300 EB), 5 - sonda za merjenje hitrosti zraka (Testo 435-4), 6 - obešalo z nosilcem za preizkušanec.	48
Slika 27	Del pogovornega okna algoritma »Adaptivno sušenje« za vnos izhodiščnih vrednosti o preizkušancu in želenih pogojih sušenja.	50
Slika 28	Blokovni diagram algoritma adaptivnega sušenja v LabView 8.0 (1 – osnovne nastavitve, 2 – masni tok vode, 3 – sušilni potencial, 4 – nastavitve sušilnega potenciala).	52
Slika 29	Blokovni diagram sušilnega potenciala v algoritmu adaptivnega sušenja.	53

Slika 30	Začetna vlažnost pri tračno žaganih in skobljanih preizkušancih bukovine.....	54
Slika 31	Nominalna gostota (R_u) v svežem stanju pri tračno žaganih in skobljanih bukovih preizkušancih.	54
Slika 32	Konvekcijsko sušenje bukovine, debeline 6 mm (d_1), z žagano- (levo) ter s skobljano površino (desno) v odvisnosti od hitrosti gibanja zraka ($v_1 = 0,6$ m/s, $v_2 = 1,1$ m/s, $v_3 = 2,5$ m/s, $v_4 = 4,5$ m/s, $v_5 = 7,6$ m/s).	55
Slika 33	Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine z žagano površino, debeline 6 mm (d_1), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih gibanja zraka (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5).	57
Slika 34	Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine s skobljano površino, debeline 6 mm (d_1), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih gibanja zraka (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5).	58
Slika 35	Odvisnost časovne konstante (τ) od hitrosti zraka (v) ob površini bukovih preizkušancev, debeline 6 mm (d_1), z žagano- (●) in s skobljano površino (○).	60
Slika 36	Odvisnost vlažnosti v prevoju modela masnega toka vode (u_k) od hitrosti zraka (v) ob površini preizkušancev bukovine, debeline 6 mm (d_1), z žagano- (●) in s skobljano površino (○).	60
Slika 37	Konvekcijsko sušenje bukovine, debeline 12 mm (d_2), z žagano- (levo) ter s skobljano površino (desno) v odvisnosti od hitrosti gibanja zraka ($v_1 = 0,6$ m/s, $v_2 = 1,1$ m/s, $v_3 = 2,5$ m/s, $v_4 = 4,5$ m/s, $v_5 = 7,6$ m/s).	61
Slika 38	Odvisnost časovne konstante (τ) od hitrosti zraka (v) ob površini bukovih preizkušancev, debeline 12 mm (d_2), z žagano- (●) in s skobljano površino (○).	62
Slika 39	Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine z žagano površino, debeline 12 mm (d_2), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih gibanja zraka (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5).	64
Slika 40	Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine s skobljano površino, debeline 12 mm (d_2), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih gibanja zraka (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5).	65
Slika 41	Odvisnost vlažnosti v prevoju modela masnega toka vode (u_k) od hitrosti zraka (v) ob površini preizkušancev bukovine, debeline 12 mm (d_2), z žagano- (●) in s skobljano površino (○).	66

Slika 42	Konvekcijsko sušenje bukovine, debeline 18 mm (d_3), z žagano- (levo) ter s skobljano površino (desno) v odvisnosti od hitrosti gibanja zraka ($v_1 = 0,6$ m/s, $v_2 = 1,1$ m/s, $v_3 = 2,5$ m/s, $v_4 = 4,5$ m/s, $v_5 = 7,6$ m/s).67
Slika 43	Odvisnost časovne konstante (τ) od hitrosti zraka (v) ob površini bukovih preizkušancev, debeline 18 mm (d_3), z žagano- (●) in s skobljano površino (○).68
Slika 44	Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine z žagano površino, debeline 18 mm (d_3), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih gibanja zraka (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5).70
Slika 45	Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine s skobljano površino, debeline 18 mm (d_3), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih gibanja zraka (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5).71
Slika 46	Odvisnost vlažnosti v prevoju modela masnega toka vode (u_k) od hitrosti zraka (v) ob površini preizkušancev bukovine, debeline 18 mm (d_3), z žagano- (●) in s skobljano površino (○).72
Slika 47	Konvekcijsko sušenje bukovine, debeline 24 mm (d_4), z žagano- (levo) ter s skobljano površino (desno) v odvisnosti od hitrosti gibanja zraka ($v_1 = 0,6$ m/s, $v_2 = 1,1$ m/s, $v_3 = 2,5$ m/s, $v_4 = 4,5$ m/s, $v_5 = 7,6$ m/s).73
Slika 48	Odvisnost časovne konstante (τ) od hitrosti zraka (v) ob površini bukovih preizkušancev, debeline 18 mm (d_4), z žagano- (●) in s skobljano površino (○).74
Slika 49	Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine z žagano površino, debeline 24 mm (d_4), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih gibanja zraka (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5).76
Slika 50	Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine s skobljano površino, debeline 24 mm (d_4), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih gibanja zraka (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5).77
Slika 51	Odvisnost vlažnosti v prevoju modela masnega toka vode (u_k) od hitrosti zraka (v) ob površini preizkušancev bukovine, debeline 24 mm (d_4), z žagano- (●) in s skobljano površino (○).78
Slika 52	Odvisnost začetnega masnega toka vode (a) od hitrosti zraka (v) nad površino bukovih preizkušancev, debelin 6 mm, 12 mm, 18 mm in 24 mm78
Slika 53	Odvisnost pojemanja masnega toka vode (k) od začetnega masnega toka (a).79

Slika 54	Vpliv začetnega masnega toka vode (a) na vlažnost lesa v prevoju modela (u_k).	79
Slika 55	Simulacija masnega toka vode (levo) in konvekcijskega sušenja bukovine različnih debelin (desno) pri konstantnih sušilnih pogojih ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\phi = 85\%$, $v = 1,5\text{ m/s}$).....	81
Slika 56	Simulacija masnega toka vode (levo) in konvekcijskega sušenja bukovine, debeline 16 mm (desno), pri variiranju hitrosti gibanja zraka ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\phi = 85\%$, $v = 0,5\text{ do }7,5\text{ m/s}$).	82
Slika 57	Površina svežih bukovih preizkušancev po tračnem razžagovanju (levo) in debelinskem skobljanju (desno) (R-L ravnina, merilo = $100\text{ }\mu\text{m}$).	82
Slika 58	Prečni prerez bukovine z žagano površino (Ž) s profilom površine (zg. rob) ter strukturo pod-površinskega sloja.	83
Slika 59	Kinetika sušenja bukovine, debeline 12 mm, ter doseženi pogoji sušenja pri adaptivnem sušenju z 2-parametričnim sušilnim potencialom.	85
Slika 60	Vlažnostni profil po debelini bukovine ($d = 12\text{ mm}$) na koncu adaptivnega sušilnega postopka z 2-parametričnim sušilnim potencialom.	85
Slika 61	Kinetika sušenja bukovine, debeline 12 mm, ter doseženi pogoji sušenja pri adaptivnem sušenju s 3-parametričnim sušilnim potencialom.	87
Slika 62	Vlažnostni profil po debelini bukovine ($d = 12\text{ mm}$) na koncu adaptivnega sušilnega postopka s 3-parametričnim sušilnim potencialom.	87
Slika 63	Kinetika sušenja bukovine, debeline 24 mm, ter doseženi pogoji sušenja pri adaptivnem sušenju z 2-parametričnim sušilnim potencialom.	88
Slika 64	Vlažnostni profil po debelini bukovine ($d = 24\text{ mm}$) na koncu adaptivnega sušilnega postopka z 1-parametričnim sušilnim potencialom.	89
Slika 65	Porazdelitev vlažnosti pri bukovih preizkušancih z žagano površino, debeline 6 mm (levo) in 24 mm (desno), sušenih z različnimi hitrostmi zraka (v_1 - 1. vrsta, v_2 - 2. vrsta, v_3 - 3. vrsta, v_4 - 4. vrsta, v_5 - 5. vrsta).	94

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

A	površina, prečni prerez [m^2],
a	začetni masni tok pri teoretično konstantni sušilni hitrosti [$\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$],
b	velikost pojemka masnega toka vode v prevojni točki (u_k)
C	koncentracija [kg m^{-3}],
C_s	transportni koeficient [Pa],
C_u	vlažnostna kapaciteta [],
c	koncentracija pare [kg m^{-3}],
c_p	toplotna kapaciteta [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$],
c_{pz}	toplotna kapaciteta vlažnega zraka [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$],
D	difuzijski koeficient [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$],
d	debelina [m],
E_b	aktivacijska energija [J mol^{-1}],
G	stacionaren odziv sistema [g],
$\bar{G}$	Gibbs-ova prosta energija vode v določenem stanju [J kg^{-1}],
$\bar{G}_0$	Gibbs-ova prosta energija v referenčnem stanju [J kg^{-1}],
h_{izp}	izparilna entalpija vode [J kg^{-1}],
h_m	koeficient snovne prestopnosti [m s^{-1}],
h_t	koeficient toplotne prestopnosti [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$],
k_p	koeficient permeabilnosti [$\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{Pa}^{-1} \text{s}^{-1}$],
k_r	relativna permeabilnost [],
K	specifična permeabilnost [$\text{m}^3 \text{m}^{-1}$],
k	hitrost pojemanja masnega toka s padanjem povprečne lesne vlažnosti [1/%],
K_{ef}	efektivna prevodnost [$\text{kg}^2 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{J}^{-1}$],
$\Delta l, l$	dolžina, razdalja [m],
M	brezdimenzijska vlažnost lesa [],
M_v	molska masa vode [g mol^{-1}],
m_0	masa lesa v absolutno suhem stanju [g],
m_{vode}	masa vode [g],
$\dot{m}$	snovni, masni tok [kg s^{-1}],
ΔP	tlačna razlika [Pa],
p_c	kapilarni tlak [Pa],
p_{vp}	dejanski parni tlak nad ukrivljeno stično površino [Pa],
p_{vp}^0	nasičen tlak vodne pare [Pa],
$\dot{Q}_V$	volumski tok [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$],
$\dot{Q}_T$	toplotni tok [W],
$\dot{q}_T$	toplotni pretok [W m^{-2}],
R	splošna plinska konstanta [$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$],
R_c	celotni snovni upor [s],
R_u	nominalna gostota lesa [kg m^{-3}],

r	polmer [m],
S	preizkušanec s skobljano površino,
S_p	stopnja nasičenosti por [],
s	koeficient snovne emisivnosti [m s^{-1}],
σ	površinska napetost [J m^{-2} ; N m^{-1}],
T	temperatura [K],
T_i	temperatura lesa v ravnini izhlapevanja [K],
t	čas [s],
t_{uT}	čas prehoda v sušenje z značilno padajočo sušilno hitrostjo [s],
u	vlažnost lesa [%],
u_D	tranzicijska vlažnost [%], pri kateri preide algoritem adaptivnega sušenja v t.i. difuzijski način delovanja,
u_i	vlažnost lesa v ravnini izhlapevanja [%],
u_k	povprečna vlažnost lesa v prevoju modela masnega toka vode [%],
u_{maks}	napojitvena vlažnost lesa [%],
u_p	vlažnost lesa na površini [%],
u_r	ravnovesna vlažnost lesa [%],
u_T	teoretična vlažnost prehoda v fazo značilno padajoče sušilne hitrosti [%],
u_t	vlažnost lesa v času t [%],
u_z	začetna vlažnost [%],
u_{TNCS}	vlažnost nasičenja celičnih sten [%],
V_{PV}	prostornina proste vode [m^3],
V_{por}	prostornina por [m^3],
y_s	vlažnost nasičenja [kg kg^{-1}],
$\checkmark$	preizkušanec z žagano površino.
α	stični kot [°],
δ	faktor zavitosti [],
ε	poroznost lesa [],
$\Phi(t)$	prehoden odziv sistema [],
φ	relativna zračna vlažnost [%],
φ_p	relativna zračna vlažnost zraka ob stiku s površino lesa [%],
φ_r	relativna zračna vlažnost zraka pri ravnovesnih pogojih [%],
θ	brezdimenzijska temperatura [],
λ	toplotna prevodnost [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$],
μ	dinamična viskoznost [Pa s],
v_s	nasičena koncentracija vodne pare v zraku [kg m^{-3}]
ρ_l	gostota vode v kapljevinasti fazi [kg m^{-3}],
ρ_z	gostota vlažnega zraka [kg m^{-3}],
τ	časovna konstanta [s]
Ψ	vodni potencial [J kg^{-1}].

1 UVOD

Les, kot naraven, anizotropen, porozen kompozit, vsebuje ob poseku dreves takšno količino vode, ki ne zagotavlja uporabne biološke odpornosti, dimenzijske stabilnosti in fizikalno-mehanskih lastnosti, potrebnih za končne lesne izdelke. Pri številnih izdelkih iz masivnega ali dezintegriranega lesa se navedene neustrezne lastnosti izboljšujejo s sušenjem lesa, največkrat prisotnim kot prva faza lesno-obdelovalnega tehnološkega procesa.

Sušenje lesa je zaradi specifične strukture ter anatomskih in kemičnih lastnosti posameznih lesnih vrst zahteven postopek. Osnovna naloga sušenja je osušiti les do lesne vlažnosti, ki je primerna za nadaljnjo predelavo ali uporabo, v slednjem primeru do ravnovesne vlažnosti mesta vgraditve. Možnosti, t.j. tehnoloških rešitev sušilnih postopkov, za doseg končnega cilja je več, v trenutni lesarski praksi pa se zaradi enostavnosti tehnologije in mogočega učinkovitega obvladovanja procesa največkrat uporablja konvekcijsko, šaržno sušenje, ponekod tudi v kombinaciji s sušenjem na prostem. Ustrezen nadzor takšnega sušilnega postopka mora omogočati spremljanje določenih lastnosti in s tem kakovosti lesa, ki mora med sušenjem ostati na primernem nivoju, sam proces pa mora biti dovolj hiter, da so doseženi minimalni stroški in s tem ustrezna ekonomičnost.

Konvekcijsko sušenje lesa se pogosto obravnava parcialno in se primarno deli na dve glavni fazi, na izločanje proste vode in na izločanje vezane vode. Izločanje proste vode teoretično predstavlja prvo fazo sušenja. Za njo je značilno, da je temperatura površin sušičih elementov ponavadi nižja od temperature gibajočega okoliškega zraka, vsaj na samem začetku procesa. V tem primeru je, vse dokler je voda prisotna v celičnih lumnih, vzpostavljeno termodinamsko ravnovesje, kjer izparevanje vode s površine lesa le to tudi ohlaja. Celotni upor proti snovnemu toku vode s površine v okolico v tej fazi predstavlja mirujoči film zraka nad sušečo površino.

Teoretično se sušenje lesa nadaljuje z difuzijskim odstranjevanjem vezane vode, ki se nahaja v celičnih stenah, in poteka zaradi vzpostavljenega koncentracijskega gradienta, tako preko celične strukture, kot tudi skozi celične lumne. To je območje padajoče sušilne hitrosti, ki je posledica naraščajočega upora proti prenosu snovi v lesu. Pri manj prevodnih lesnih vrstah se površina relativno hitro suši pod vlažnost nasičenja celičnih sten (u_{TNCS}), vlažnost površine pa se približuje ravnovesni vlažnosti. V tem primeru se voda iz notranjosti lesa, kjer je vlažnost še nad u_{TNCS} , preko osušene površine transportira zgolj kot difuzijski tok vezane vode (Wiberg in Moren, 1999; Rosenkilde in Glover, 2002). V praksi so prehodi med obema fazama sušenja zabrisani.

Pri sušenju lesa se mnogokrat večji poudarek namenja izločanju vode iz lesa pod točko nasičenja celičnih sten, t.j. transportu vezane vode. Osnovni razlog je v bistveno

počasnejšem transportu vezane vode, kot pa je samo izločanje proste vode, s čimer so lahko ob optimizaciji tega dela sušenja neposredni časovni in ekonomski prihranki višji. Hkrati se z nižanjem lesne vlažnosti pod točko nasičenja lesnih vlaken pričnejo drastično spreminjati fizikalne, mehanske in kemične lastnosti lesa, na katere lahko delno vplivamo tudi s samim sušilnim postopkom ter s tem spremljamo in nadzorujemo tudi kakovost lesa. Navkljub sodobnim možnostim vodenja procesov pa se pri sušenju še vedno srečujemo z velikimi vlažnostnimi in napetostnimi gradienti v lesu (Hanhijärvi in sod., 2003), ki lahko povzročijo trajne mehanske deformacije, v obliki površinskih in notranjih razpok ter nezaželene geometrijske spremembe sortimentov (Kowalski in Rybicki, 2007). Velike težave pogosto predstavlja sušenje manj prevodnih lesnih vrst in sortimentov večjih debelin. Pri teh je problematična tako dolgotrajnost postopkov sušenja, kot tudi kakovost posušenega lesa, zlasti zaradi vgrajenih sušilnih napetosti in distribucije lesne vlažnosti (Hunter, 2002; Pang, 2002). Med težje sušeče lesove spadajo tudi številne t.i. svetle lesne vrste listavcev, kjer dolgotrajnost sušenja lahko privede tudi do razvoja oksidativno obarvanih snovi (Gorišek, 1995; Straže in Gorišek, 2001; Straže in sod., 2003; Luostarinen in Möttönen, 2004; Koch, 2008). Pri slednjih je dobro znan pojav temno obarvane sredice debelejših sortimentov, ki je posledica prepočasnega izločanja proste vode in daljšega zadrževanja vlažnosti v območju nasičenja celičnih sten (Gorišek in sod., 2000).

Ker si transporta proste in vezane vode pri sušenju lesa časovno in lokacijsko sledita, je njuna vzročno – posledična povezanost očitna. Vzdrževanje previsoke sušilne hitrosti na začetku konvekcijskega sušenja pogosto prezgodaj povzroči nastanek difuzijske bariere tik pod površino sušečega lesa (Hukka in Oksanen, 1999; Tremblay in sod., 2000; Remond in sod., 2005). V teh primerih se namreč z ujetostjo proste vode v notranjosti sortimentov, ki se mora v nadaljevanju sušenja izločiti difuzijsko, časi sušenja bistveno podaljšajo, večji pa so tudi vlažnostni in napetostni gradienti (Hunter, 2002). Pri sušenju lesa nad vlažnostjo nasičenja celičnih sten je torej mogoče doseči velik masni tok vode v materialu in učinkovito izparevanje le te s površin, ki pa mora upoštevati fizikalne lastnosti in omejitve sušečega lesa (Perre, 2004). To zahteva dobro poznavanje efektivne prevodnosti lesnega tkiva in aktivnih povezav za transport proste in vezane vode (Perre in Karimi, 2002). Na izločanje vode iz lesa, predvsem pri vlažnostih nad točko nasičenja lesnih vlaken imajo značilen vpliv tudi nastale strukturne spremembe površinskih slojev kot tudi morfološke značilnosti realnih površin lesa (Salin, 2008a). Nenazadnje, raziskave potrjujejo tudi značilen vpliv morfologije površin lesa na lastnosti gibanja zraka tik ob njih, kar spreminja snovno in toplotno prestopnost (Rosen, 1978; Cai in Avramidis, 1993; Siau in Avramidis, 1996) ter posredno vpliva na kinetiko sušenja lesa.

1.1 CILJI IN RAZISKOVALNE HIPOTEZE

Navedeni problemi konvekcijskega sušenja lesa terjajo celovit pristop in poglobljeno študijo kinetike sušilnega postopka. Namen dela je spremljati potek konvekcijskega sušenja bukovega lesa (*Fagus sylvatica* L.) z variiranjem sušilnih pogojev, primerljivih s pogoji v sušilni praksi. Z vzpostavljanjem različnih začetnih sušilnih pogojev, s hkratnim variiranjem debeline sortimentov ter lastnosti sušilnih površin, želimo preveriti učinke teh pogojev na doseženo začetno sušilno hitrost. Učinke vzpostavljenega začetnega stanja v sušilnem postopku bomo proučili z analizo kinetike sušenja v nadaljevanju, tudi pri sušenju pod točko nasičena celičnih sten.

Vzporedni cilj dela je izdelava sušilnega programa z adaptivnim prilagajanjem pogojev sušenja dejanskim sušilnim sposobnostim lesa. Pri adaptivnem sušilnem postopku želimo hkrati preveriti, ali fleksibilni sušilni potencial ugodno vpliva na kinetiko sušenja lesa.

Glede na zastavljene cilje dela smo postavili naslednje hipoteze:

- Previsoka sušilna hitrost pri izločanju proste vode povzroči hitro izsuševanje površinskega sloja lesa s čimer bistveno pospešuje naraščanje notranjega materialnega snovnega upora ter s tem značilno vpliva na kinetiko celotnega postopka, tudi pri vlažnostih lesa pod nasičenjem celičnih sten.
- Lastnosti površine lesa so odvisne od načina priprave materiala in obdelovalnega postopka, pri izločanju proste vode pa vplivajo na izparevanje vode s površine lesa ter s tem na doseženo sušilno hitrost.
- Prilagajanje sušilnega potenciala trenutnemu masnemu toku vode iz sušičnega lesa v okolico optimira kinetiko sušilnega postopka ter omogoča prilagoditev transporta toka vode inherentnim sposobnostim preizkušanca.

2 PREGLED OBJAV

2.1 MEHANIZEM GIBANJA VODE V LESU

Gibanje vode v lesu obstaja najprej v stoječih drevesih, na lokaciji prevodne beljave. Pri iglavcih in difuzno poroznih listavcih ima prevodno funkcijo več prirastnih plasti – branik, znotraj katerih obstaja tudi pomemben transport v prečnih smereh. Višje razviti listavci, z venčasto razporejenimi porami, imajo največkrat prevodni le eno ali dve zadnji braniki, tik ob kambiju, kjer pa je transport zelo učinkovit. Skozi evolucijo lesnatih rastlin so se razvili tudi mehanizmi za preprečevanje kavitacije prevodnih kapilar, ki se lahko pojavi ob vodnem stresu v sušnih obdobjih, pri zmrzali, kot tudi pri mehanskih poškodovanjih dreves, skorje ali lesnega tkiva. V teh primerih imajo pomembno funkcijo piknje pri iglavcih in nižje razvitih listavcih, nastanek til pri listavcih ter možne sekundarne spremembe v živih parenhimskih celicah pri večini lesnih vrst (Zimmermann, 1983).

Količina vsebovane proste vode v lesu je različna. V veliki meri je maksimalna vsebnost proste vode odvisna od gostote lesa, ki preko deleža celičnih sten in praznih prostorov, posredno določa največjo možno lesno vlažnost ob poseku drevesa, t.j. napojitveno vlažnost (u_{maks}). Svež les, pred sušenjem, le redko doseže napojitveno vlažnost, največkrat se ji le približa na lokaciji prevodne beljave. Na količino proste vode v svežem lesu bistveno vpliva tudi fiziološko stanje tkiva in učinek delovanja t.i. sekundarnih procesov v živem drevesu, kot so proces ojedritve, odziv lesnega tkiva na mehanske poškodbe, procesi diskoloracij, idr.

V stoječih, živih drevesih, poteka aksialni vlek proste vode skozi zapleten sistem kapilar proti krošnji dreves. Ta transport nastane z izhlapevanjem vode z listnih površin, zaradi površinske napetosti kapljevinaste vode in nastajanja meniskov v listnih režah, ki povzročijo nižanje tlaka v kapilarah, s tem pa dviganje vodnih stolpcev. Pri teh pogojih ni možen obstoj zračnih mehurčkov oz. plinska faza, sam proces pa je idealen primer enofaznega – kapljevinskega toka v porozni strukturi (Zimmermann, 1983; Perre, 2007).

2.1.1 Enofazno gibanje tekočin skozi porozno lesno strukturo

Gibanje kapljevin ali plinov skozi porozne strukture, ki je posledica tlačnega gradienta, definira Darcy-ev zakon (1856). Masni tok se pojavi pod učinkom statičnega ali kapilarnega tlačnega gradienta in se odvija skozi povezano porozno strukturo lesa. Mera za prehod tekočin skozi porozno snov pod vplivom tlačnega gradienta je permeabilnost, volumski tok pa je proporcionalen tlačnemu gradientu (Siau, 1995):

$$\frac{\dot{Q}_V}{A} = k_p \frac{\Delta P}{\Delta l} \quad \dots(1)$$

$\dot{Q}_V$	volumski tok [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$],
A	površina, pravokotna na tok [m^2],
k_p	koeficient permeabilnosti [$\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{Pa}^{-1} \text{s}^{-1}$],
ΔP	tlačna razlika [Pa],
Δl	dolžina [m].

Z vpeljavo dinamične viskoznosti (μ [Pa s]) lahko določimo tudi specifično permeabilnost (K [$\text{m}^3 \text{m}^{-1}$]). Specifična permeabilnost tako predstavlja dejansko prepustnost porozne snovi za gibanje tekočin, odvisno od morfologije por in neodvisno od eksperimentalnih pogojev.

$$K = k_p \times \mu \quad \dots(2)$$

2.1.2 Kapilarni tlak

Pri sušenju, v fazi izločanja proste vode, imamo v lesu večinoma prisotno gibanje snovi v dveh agregatnih stanjih – plinastem in kapljevinskem. Pri tem je zelo pomembna mejna površina med obema fazama, kjer zaradi lokalno večjih kohezijskih sil v kapljevini prihaja do površinske napetosti (σ). Sistemi težijo k minimalni mejni površini. Natezne napetosti na mejni površini povzročajo njeno ukrivljanje in tlačno razliko, ki jo na mejni površini definiramo z Young - Laplace – ovim zakonom:

$$\Delta P = \sigma \left[\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right] \quad \dots(3)$$

ΔP	razlika tlakov med tekočinama [Pa],
σ	površinska napetost [J m^{-2} ; N m^{-1}] in
r_1, r_2	polmera ukrivljene mejne površine v dveh, ortogonalnih koordinatnih smereh [m].

V porozni snovi lahko površinsko napetost določimo med interakcijo vseh faz v sistemu – trdne, kapljevinaste in plinske, pri čemer med njimi vselej obstaja značilni stični kot ($0 < \alpha < 180^\circ$). Kapljevina ima sposobnost omočenja trdne snovi, kadar je stični kot med njima manjši od 90° , pri večjem stičnem kotu pa med njima delujejo odbojne sile. Obstaja tudi spontano širjenje kapljevine po površini trdne snovi, kadar je stični kot med njima enak 0° . Merjenje stičnega kota je zahtevno, izvedljivo z različnimi metodami, pri čemer pa se dobljene vrednosti zelo razlikujejo, kar je posledica uporabljenih metod, morfoloških lastnosti površin kot tudi možnih kemijskih reakcij med fazami v stiku. Hkrati se velikost stičnega kota spreminja tudi glede na smer procesa – navzemanje oz. praznjenje, bolj znano kot pojav histereze stičnega kota (Dullien, 1992). Pri valjastih, idealnih kapilarah

lahko s poznavanjem polmera (r) in stičnega kota (α) tlačno razliko na mejni ploskvi kapljevine poenostavljeno zapišemo kot:

$$\Delta P = \frac{2\sigma \cos \alpha}{r} \quad \dots(4)$$

Nastanek meniskov v kapljevinski fazi, npr. prosti vodi v lesu, pa v stični plinski fazi povzroča tudi manjšanje delnega parcialnega tlaka te kapljevine, t.j. vodne pare v zraku. Zmanjšanje parcialnega tlaka se izračuna s pomočjo Gibbs-ove proste energije, kjer lahko za vodno paro v zraku zapišemo:

$$\ln \left[\frac{p_{vp}}{p_{vp}^0} \right] = -\sigma \left[\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right] \frac{M_v}{\rho_l RT} \quad \dots(5)$$

p_{vp}	dejanski parni tlak nad ukrivljeno stično površino [Pa],
p_{vp}^0	nasičen tlak vodne pare [Pa],
σ	površinska napetost [J m^{-2} ; N m^{-1}] in
r_1, r_2	polmera ukrivljene mejne površine v dveh, ortogonalnih koordinatnih smereh [m],
M_v	molska masa vode [g mol^{-1}],
ρ_l	gostota vode v kapljevinski fazi [kg m^{-3}],
R	splošna plinska konstanta [$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$] in
T	temperatura [K].

Značilno, pomembno zmanjšanje parcialnega parnega tlaka vodne pare ($\Delta p > 1\%$), zaradi prisotne kapilarne tenzije, se pojavi pri kapilarah s polmerom manj kot $0,1 \mu\text{m}$, pri kapilarah s polmerom pod $0,01 \mu\text{m}$, pa se parcialni tlak zmanjša že za več kot 10% (Cloutier in Fortin, 1991; Siau, 1995). Učinek je dobro poznan pri uravnovešanju lesa v zgornjem območju higroskopsnosti, kjer se povišana ravnovesna vlažnost pojasnjuje z verjetno kondenzacijo vodne pare, zlasti v mikrokapilarah celičnih sten, medceličnih prostorih ter v koničnih zaključkih celičnih lumnov (Skaar, 1988).

V vlažnem lesu, razen pri doseženi napojitveni vlažnosti, je v porozni strukturi vselej prisotno veliko število meniskov, t.j. ukrivljenih mejnih stičnih površin. Makroskopsko lahko povprečni kapilarni tlak v takem poroznem lesnem tkivu definiramo s povprečnim efektivnim premerom por, kjer se ti meniski nahajajo. Ker se kapilarna tenzija povečuje z manjšanjem premerov kapilar, se tudi povprečni efektivni premer por z nižanjem vsebnosti proste vode v lesu zmanjšuje. To odvisnost kapilarnega tlaka od vsebnosti vlage so pri lesu raziskovali zlasti z živosrebrno porozimetrijo, s postopkom centrifugiranja preizkušancev ter s postopki navzema kapljev (Trenard, 1980; Spolek in Plumb, 1981; Cloutier in Fortin, 1991). Dobljene vrednosti kapilarnega tlaka precej variirajo, kar je posledica razlik v anatomskih lastnostih, ali prisotnosti morebitnih fizioloških ter sekundarnih sprememb v

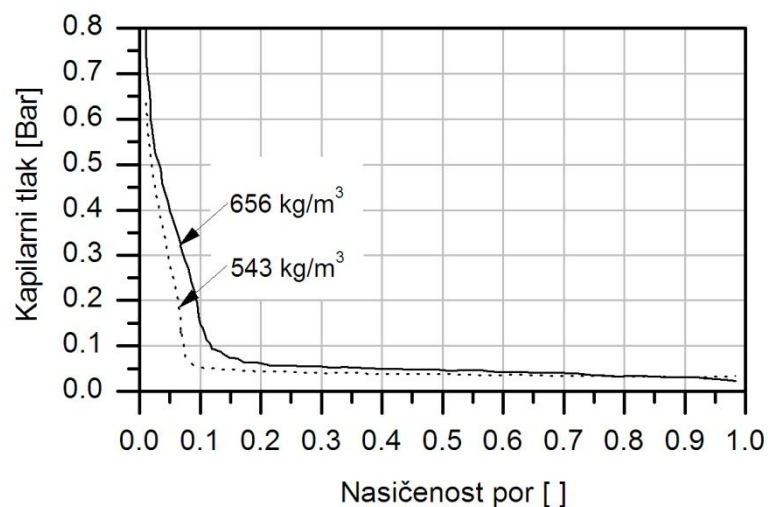
lesnem tkivu. Pri uporabi živosrebrnih porozimetrov pa pri večjih dimenzijah preizkušancev povečanje tlačnega gradienta hkrati še dodatno povzročajo transportni upori na lokaciji medceličnih povezav – pikenj in pikenjskih polj (Trenard, 1980).

Poznavanje porazdelitve kapilar in velikosti poroznosti v lesnem tkivu tako omogoča tudi izračun kapilarnega tlaka glede na lokacijo, npr. znotraj letne prirastne plasti. To so izvedli z določanjem poroznosti s pomočjo klasičnih mikroskopskih tehnik in analize slike (Perre, 1997; Perre in Turner, 2001), ali pa z uporabo enostavnih geometrijskih modelov, narejenih za vrednotenje permeabilnosti lesa iglavcev (Comstock, 1970). V splošnem je kapilarni tlak višji v gostejšem lesu. Hkrati so raziskave potrdile tudi postopno povečevanje kapilarnega tlaka z manjšanjem stopnje nasičenja por, ki je najizrazitejše pri gostejšem kasnem lesu, tako pri iglavcih in listavcih (Spolek in Plumb, 1981). Stopnjo nasičenosti por (S_p) so pri tem definirali kot razmerje med prostornino kapilarne vode in por v lesu:

$$S_p = \frac{V_{PV}}{V_{por}} = \frac{u - u_{TNCS}}{u_{maks} - u_{TNCS}} \quad \dots(6)$$

- V_{PV} prostornina kapilarne, proste vode [m^3],
- V_{por} prostornina por [m^3],
- u vlažnost lesa [%],
- u_{TNCS} vlažnost nasičenja celičnih sten [%] in
- u_{maks} napojitvena vlažnost lesa [%].

Pri bukovini (*Fagus sylvatica* L.) so ugotovili, da se meniski kapilarne vode v lesu pri stopnji nasičenosti por pod 0,2 pomaknejo iz vaskularnega sistema trahej proti lokacijam vlaknastih traheid in parenhimskih celic. Z nadaljnjim nižanjem stopnje nasičenosti, pod vrednosti 0,2 prihaja do bistvenega povečevanja kapilarnega tlaka (Perre, 1997) (Slika 1). Pri stopnji nasičenja por 0,2, pri povprečni gostoti bukovine (690 kg m^{-3}) in pri povprečnem prostorninskem skrčku lesa 17,5% je izračunana vlažnost lesa približno 40%. Omeniti velja, da nekatere študije sušenja lesa ugotavljajo ireverzibilno zmanjšanje sušilne hitrosti že nad vlažnostjo nasičenja celičnih sten, kar je lahko tudi v povezavi z bistvenim povečevanjem kapilarnega tlaka pri nadaljnjem sušenju lesa. Pri nekaterih raziskavah kinetike sušenja lesa smreke, bora in breze, ocenjujejo vlažnost prehoda iz kapilarnega v t.i. difuzijski režim sušenja že pri vlažnosti lesa okrog 60% (Pang in sod., 1994; Wiberg in Moren, 1999). To vlažnost v teh primerih interpretirajo kot vlažnost ireverzibilnega nasičenja, na katero pa imajo poleg anatomskih lastnosti lesa velik vpliv predvsem pogoji sušilnega procesa.



Slika 1 Odvisnost kapilarnega tlaka v ranem (...) in kasnem lesu (—) od stopnje nasičenosti por pri bukovini (Perre, 1997).

Figure 1 Influence of pore saturation on capillary pressure at earlywood (...) and latewood (—) of European beech (Perre, 1997).

2.1.3 Večfazno gibanje tekočin v lesu

Izločanje vode iz vlažne lesne strukture je, gledano iz makroskopskega vidika, proces pri katerem se v materialu večinoma giblje voda, ki hkrati obstaja v kapljevinski in plinski fazi. Za opisovanje tega procesa je bilo uporabljenih več pristopov, ki jih splošno lahko razdelimo v dve skupini: a) Makroskopski modeli, ki temeljijo na potencialu določene fizikalne spremenljivke; in b) Več – komponentni modeli. V splošnem so modeli iz prve skupine enostavnejši, saj za potencial uporabljajo le eno fizikalno spremenljivko, posledično pa zahtevajo manjše število podatkov o materialnih lastnostih. Modeli iz druge skupine so kompleksnejši, uporabljajo pristop na t.i. mikro nivoju, nudijo pa detajlnejši vpogled v transportni proces.

2.1.3.1 Makroskopski fizikalni modeli gibanja tekočin skozi porozno lesno strukturo

Modeli sušenja, ki temeljijo na določenem potencialu uporabljajo za izhodišče Luikove enačbe za prenos toplote in snovi (Luikov, 1966) in t.i. vlažnostni potencial (Thomas in sod., 1980; Irrudayaraj in sod., 1990). Pri tem se za vlažnostni potencial uporablja voda, ki je v lesni strukturi lahko v obliki kapljevinske - proste vode, kot vezana voda ter kot vodna para. Pri klasičnih sušilnih tehnikah se hkrati pogosto predpostavlja, da v lesu ne obstaja tlačni gradient, pri čemer je gibanje vode v materialu potem le posledica vzpostavljenega vlažnostnega in temperaturnega gradienta. Pri tem se v modelih uporabljata dva koeficienta proporcionalnosti: koeficient prevodnosti vode ter koeficient prevodnosti zaradi temperaturnega gradienta. Ta koeficienta sta najpogosteje odvisna od koncentracije vlage v lesu ter od njegove temperature.

Med modeli sušenja lesa, ki so uporabni na celotnem vlažnostnem območju lesa, t.j. od maksimalne lesne vlažnosti do absolutno suhega stanja, izstopa zlasti model na osnovi vodnega potenciala (ψ) (Fortin, 1979; Cloutier in Fortin, 1991; Cloutier in Fortin, 1993). Vodni potencial pri tem določa energijsko stanje vode v lesu:

$$\psi = \bar{G} - \bar{G}_0 \quad \dots(7)$$

$\bar{G}$ Gibbs-ova prosta energija vode v določenem stanju [J kg^{-1}] ter
 $\bar{G}_0$ Gibbs-ova prosta energija v referenčnem stanju [J kg^{-1}].

Običajno se za referenčno stanje ($\bar{G}_0 = 0$) privzame stanje tekoče vode pri normalnem atmosferskem tlaku ($P_{\text{NORM}} = 101,325 \text{ kPa}$), pri temperaturi, ki je enaka temperaturi lesa. Vodni potencial se pri tem izraža v količini energije na enoto mase [J kg^{-1}], ko pa ga pomnožimo z gostoto vode, pa je enak energiji na enoto prostornine in privzame enoto tlaka [Pa]. Vodni potencial v lesu lahko zapišemo kot vsoto posamičnih komponent:

$$\psi = \psi_m + \psi_o + \psi_p + \psi_g + \psi_{e.s.} + \dots \quad \dots(8)$$

ψ_m matrični potencial, t.j. vsota kapilarnih in sorptivnih sil,
 ψ_o osmotski potencial, kot posledica raztopljenih snovi v vodi,
 ψ_p tlačni potencial v materialu,
 ψ_g gravitacijski potencial ter
 $\psi_{e.s.}$ potencial vsote drugih, zunanjih sil.

Matematični model gibanja vode v lesu v nenasičenem stanju se tako splošno zapiše na osnovi ohranitve mase:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q} = 0 \quad \dots(9)$$

C koncentracija vode v lesu [kg m^{-3}],
 $\vec{q}$ vektor snovnega toka vode v lesu (prosta voda + vezana voda + vodna para) [$\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] in
 t čas [s].

Ob predpostavki, da je delovanje lesa zanemarljivo majhno, se koncentracija vode v lesu (C) pogosto definira s pomočjo nominalne gostote lesa (R_u) in lesne vlažnosti (u [%]):

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

Dodatno se, vsaj pri nizko- in normalno-temperaturnem sušenju, predpostavlja zanemarljivo majhen temperaturni gradient, s čimer se lahko celotni snovni tok vode (q [kg s^{-1}]) zapiše s pomočjo gradienta vodnega potenciala:

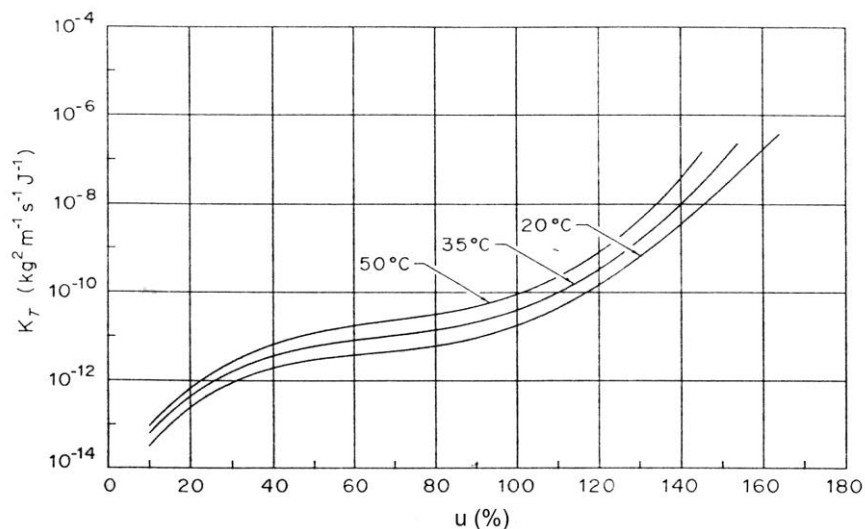
$$\vec{q} = -K_{ef}(u, T) \cdot \vec{\nabla}\psi \quad \dots(11)$$

V modelu je proporcionalni koeficient ($K_{ef}(u, T)$ [$\text{kg}^2 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ J}^{-1}$]) tenzor efektivne prevodnosti za vodo, ki je funkcija vlažnosti (u) in temperature lesa (T). Nadalje se predpostavlja, da so prosta voda, vezana voda in vodna para med sušenjem lesa v termodinamskem ravnovesju (Edlefsen in Anderson, 1943), s čimer vodni potencial (ψ) postane potencial vseh faz vode v materialu (Cloutier in Fortin, 1991). Z vpeljavo enačb 10 in 11 v enačbo 9, lahko za enoosno izotermno gibanje vode v lesu zapišemo zvezo:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{R_u} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{ef}(u, T) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \right] = 0 \quad \dots(12)$$

Model uporablja t.i. makroskopski pristop, kjer se les obravnava kot kontinuum, za spremenljivke pa se predpostavlja, da so zvezne funkcije prostora in časa. Tako je model na osnovi vodnega potenciala veljaven le ob dovolj veliki prostornini snovi, kjer lahko les obravnavamo kot nespremenljivo, homogeno strukturo.

Koeficient efektivne prevodnosti za vodo se pri sušenju pogosto določa s pomočjo časovno zaporednih koncentracijskih profilov vlage v lesu, pri čemer se v proučevani ravnini v materialu zahteva tudi poznavanje masnega toka. Raziskave kažejo, da je efektivna prevodnost za vodo (K_{ef}) odvisna tako od lesne vlažnosti, kot tudi od temperature preizkušancev. Pri sušenju topolovine (*Populus tremuloides* Michx.) so ugotovili eksponentno naraščanje efektivne prevodnosti za vodo z naraščanjem lesne vlažnosti v radialni in tangencialni smeri (Cloutier in Fortin, 1993). Hitro zmanjševanje efektivne prevodnosti z nižanjem vlažnosti lesa tik pod napojitveno vlažnostjo se pripisuje hitremu praznjenju kapilar z velikimi premeri, s čimer se povečuje verjetnost prekinitve kontinuiranega kapilarnega toka. Pri nižjih vlažnostih, pod točko nasičenja celičnih sten, so vodne molekule vezane na proste hidroksilne skupine v amorfnih področjih poliozno – celuloznih verig. S tem je zmanjšana njihova mobilnost, posledično pa je pri enakem vodnem potencialu prisotna nižja efektivna prevodnost (Slika 2).



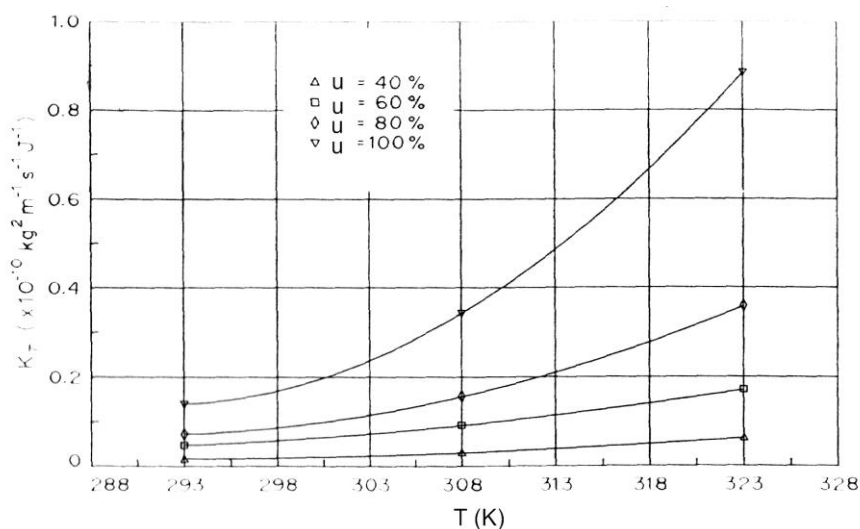
Slika 2 Odvisnost efektivne prevodnosti za vodo v tangencialni smeri (K_T) od lesne vlažnosti (u) pri topolovini (Cloutier in Fortin, 1993).

Figure 2 Influence of the wood moisture content (u) on the water effective conductivity (K_T) of poplar wood in tangential direction (Cloutier in Fortin, 1993).

Cloutier in Fortin (1993) sta najprej potrdila tudi večjo efektivno prevodnost za vodo v radialni smeri glede na tangencialno smer, še zlasti pri vlažnostih v območju proste vode. To sta pripisala dobri prevodnosti radialnih parenhimskih trakov ter potencialno večjemu deležu kapljevinskega toka v tej smeri. S ponovnim preverjanjem pa so te ugotovitve ovrgli (Cloutier in sod., 1995), saj so pri tangencialno orientiranih preizkušancih ugotovili tudi bistveno odstopanje doseženih vlažnosti lesa od ravnovesnih vrednosti. Primerjava efektivne prevodnosti za vodo pri topolovini v odvisnosti od temperature sušenja pokaže na njeno bistveno povečanje, celo do 2,5 krat, pri dvigu temperature iz 20 °C na 50 °C (Cloutier in Fortin, 1993). Del povečanja efektivne prevodnosti z dviganjem temperature pripisujejo nižanju viskoznosti vode, ki pa se pri teh pogojih v temperaturnem intervalu 30 K zmanjša le za 45%. Preostali del spremembe ostaja nepojasnen. Pri tem velja omeniti tudi raziskave tekočinske permeabilnosti skozi porozno celično strukturo lesa, kjer so denimo pri dvigu temperature z 10 °C na 55 °C zasledili 1,1-kratno povečanje permeabilnosti (Stamm, 1959; Choong, 1965). Efektivno prevodnost za vodo v odvisnosti od temperature, pri konstantni vlažnosti lesa, je mogoče zapisati s pomočjo eksponentnega modela:

$$[K_{ef(x)}]_M = C'_0 \cdot \exp(C'_1/T) \quad \dots(13)$$

C'_0, C'_1 konstanti [$\text{kg}^2 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{J}^{-1}$] in
 T temperatura [K].



Slika 3 Vpliv temperature (T) na efektivno prevodnost za vodo v tangencialni smeri (K_T) lesa topola (Cloutier in Fortin, 1993).

Figure 3 Influence of temperature (T) on effective water conductivity in tangential direction (K_T) of poplar wood (Cloutier in Fortin, 1993).

Model (Enačba 13) ima podobno obliko kot zveza med difuzivnostjo vezane vode, pri konstantni lesni vlažnosti, in temperaturo preizkušanja, ki jo lahko zapišemo s pomočjo Arrhenius-ovega zakona (Tesoro in sod., 1972; Tesoro in sod., 1974):

$$[D]_M = C_0 \cdot \exp(-E_b/R \cdot T) \quad \dots(14)$$

$[D]_M$ difuzijski koeficient [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$],

C_0 konstanta [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$],

E_b aktivacijska energija za vezano vodo v celični steni [J mol^{-1}],

R splošna plinska konstanta [$= 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$] in

T temperatura [K].

S pomočjo izravnave eksperimentalnih podatkov z eksponentnim modelom (Enačba 13) so z določitvijo konstante v modelu (C'_1) ovrednotili tudi aktivacijsko energijo (E_b), potrebno za premagovanje vodikovih vezi na sorpcijskih mestih, pri izločanju vezane vode. Vrednosti izračunane aktivacijske energije so bile primerljive z rezultati sorodnih raziskav (Perre in sod., 1993), in so variirale med 33439 in 45279 J mol^{-1} .

Efektivno prevodnost za vodo so določevali tudi z merjenjem permeabilnosti v stacionarnih pogojih, s pomočjo razširjene oblike Darcy-evega zakona (Choong in

Kimbley, 1971; Choong in sod., 1974; Tesoro in sod., 1974). Ta predpostavlja, da je hitrost toka posamezne faze v tekočini poracionalna tlačnemu gradientu te faze:

$$v = -\frac{K}{\mu} \nabla(P) \quad \dots(15)$$

v povprečna hitrost kapljevine [m s^{-1}],
 K specifična permeabilnost [m^2],
 μ dinamična viskoznost kapljevine [Pa s] in
 $\nabla(P)$ tlačni gradient [Pa m^{-1}].

Na tej osnovi je mogoče tok tekočine razdeliti na posamični fazi, t.j. plinsko in kapljevino, uvede pa se fenomenološki koeficient, t.i. relativna permeabilnost k_r (Perre in sod., 1993). Relativna permeabilnost pri tem definira odvisnost specifične permeabilnosti od stopnje nasičenosti por v lesu (S), in jo lahko zapišemo za obe prisotni fazi:

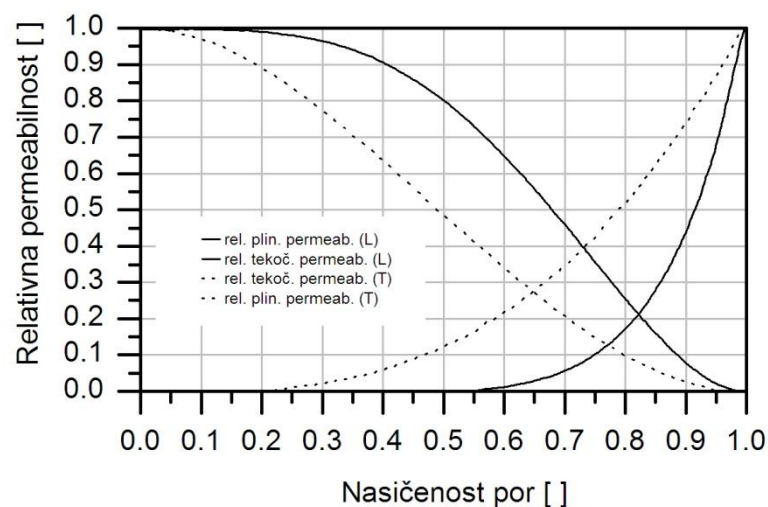
$$\text{kapljevina (l): } v_l = -\frac{K \cdot k_{rl}(S)}{\mu_l} \nabla(P_l) \quad \dots(16)$$

$$\text{plin (g): } v_g = -\frac{K \cdot k_{rg}(S)}{\mu_g} \nabla(P_g) \quad \dots(17)$$

Pri tem vsota tlakov v kapljevini (P_l) in plinu (P_g) predstavlja celotni, kapilarni tlak v porozni strukturi, odvisen od stopnje nasičenosti por:

$$P_c(S) = P_l + P_g \quad \dots(18)$$

V enačbah 16 in 17 predstavlja produkt specifične permeabilnosti (K) in relativne permeabilnosti (k_r) efektivno prevodnost ($K_{ef}(u, T)$). Tudi pri stacionarnem določanju tekočinske permeabilnosti lesa, so rezultati pokazali manjšanje izmerjene permeabilnosti, t.j. efektivne prevodnosti (K_{ef}), z nižanjem stopnje zasičenosti por (S_p). Pri tem so za potrebe simulacije sušenja lesa izdelali tudi empirični model, ki na tej osnovi predvideva dejansko variiranje relativne permeabilnosti posameznih faz v sistemu. Rezultati kažejo, da se relativna tekočinska permeabilnost (k_{rl}) eksponentno zmanjšuje z nižanjem stopnje nasičenosti por, hitreje pri gibanju kapljevine v vzdolžni smeri lesa. Obraten trend, t.j. eksponentno naraščanje, je potrjeno pri relativni permeabilnosti plinske faze (k_{rg}) (Comstock, 1970) (Slika 4).



Slika 4 Odvisnost relativne permeabilnosti v vzdolžni (—) in prečni smeri (...) od stopnje nasičenosti por pri bukovini (Perre in sod., 1993).

Figure 4 Influence of pore saturation on the relative permeability in axial (—) and transverse direction (...) of beechwood (Perre in sod., 1993).

2.1.3.2 Več-komponentni modeli gibanja tekočin v lesu

Več – komponentni pristop prav tako temelji na zakonih ohranitve snovi in energije, ki pa se uporabljajo na mikro nivoju in so zapisani za vsako fazo oz. komponento v sistemu posebej (Stamm, 1960b). Masna bilanca je v tem primeru zapisana za tekočo vodo, za vodno paro, kot tudi za mešanico vodne pare in zraka. Enako velja za energijsko bilanco, kjer se učinki posameznih faz seštevajo v celoto. Na mikro nivoju, v t.i. reprezentativnem kontrolnem volumnu, se nato definirane interakcije med posameznimi fazami povprečijo. Na ta način se določi niz makroskopskih transportnih enačb, v katerih so definirani tokovi posameznih komponent s pomočjo različnih transportnih koeficientov. Pri tem se za gibanje kapljevine kot potencial največkrat predpostavlja tlačni gradient v kapljevini, t.j. vzpostavljeni kapilarni tlak, za gibanje plinov in mešanice vodne pare pa je potencial pogosto gradient totalnega tlaka. Potencial za gibanje vodne pare je običajno koncentracijski gradient, ki omogoča difuzijo te komponente v plinski mešanici, kot tudi preko celičnih sten.

Za doseganje verodostojnih rezultatov pri tovrstnem modeliranju je potrebno izdelati tudi dober materialni model. Pri lesu je bilo več t.i. geometrijskih modelov osnovne lesne zgradbe narejenih za lesove iglavcev. Pri tem gre za dimenzioniranje tipičnih celic, njihovih dimenzij, orientacije in lastnosti medsebojnih povezav. Eden bolj znanih več-komponentnih modelov uporablja geometrijski model strukture tipičnega lesa iglavcev (Comstock, 1970) ter eksperimentalno pridobljene podatke o difuzivnosti in njeni odvisnosti od lesne vlažnosti (Stamm, 1960a), o prevodnosti za prosto vodo (Spolek in

Plumb, 1981), o toplotni prevodnosti lesa (Hart, 1964) ter druge za zapis masne- in energijske bilance (Plumb in sod., 1984; Plumb in sod., 1985):

$$\frac{\varepsilon}{\Delta M} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_l}{\mu_1} C_S \frac{\partial M}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad \dots(19)$$

$$\rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho_l c_p \frac{K_l}{\mu_1} \frac{C_S}{\Delta M} \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad \dots(20)$$

Pri masni bilanci so med ključnimi materialnimi podatki v modelu še poroznost (ε) in odvisnost količine praznih prostorov od lesne vlažnosti ($\varepsilon/\Delta M$), specifična permeabilnost (K_l) in viskoznost tekočine (μ_1), kot tudi transportni koeficient (C_S), ki predpostavlja zvezo med kapilarnim tlakom (p_c) in stopnjo nasičenja por (S_p):

$$C_S = \frac{\partial p_c}{\partial S} \quad \dots(21)$$

Model predvideva zgolj gibanje kapilarne in vezane vode, ne predpostavlja pa odvisnosti transportnih koeficientov od temperature in učinka toplotnega toka na snovni tok vode v lesu. Na verodostojnost simulacije energijskega toka v lesu imata prav tako značilen vpliv transportni koeficient (C_S) (Enačba 21) skupaj s toplotno prevodnostjo lesa (λ). V obeh bilancah (Enačba 19, 20) je v izhodišču uporabljen brezdimenzijski zapis vlažnosti (M) in temperature (θ):

$$M = S(u_{max} - u_{TNCS}) + u_{TNCS} = S \cdot \Delta u + u_{TNCS} \quad \dots(22)$$

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_{\infty} - T_0} = \frac{T - T_0}{\Delta T} \quad \dots(23)$$

Ustrezni robni pogoji so nujni za verodostojno rešitev osnovnih enačb, kjer je eden od zahtevnejših določitev energijske in masne bilance v mejnem sloju, tik nad površino lesa. Po teoriji mejnega sloja se predpostavlja, da se toplota in snov prenašata na in s površine skozi tanek stacionaren, mirujoč sloj viskoznega plina tik ob njej. Pri izločanju proste vode se na površini preizkušancev vzdržuje toplotno in koncentracijsko ravnovesje. Zaradi stabilnosti numerične rešitve je v tem primeru v modelu uporabljena diferencialna formulacija:

$$\frac{d}{dt} \int_0^L M(x) dx = -\dot{m}_{konv} \quad \dots(24)$$

$$\frac{d}{dt} \int_0^L \rho c_p \theta(x) dx = \dot{q}_{konv} - h_{izp} \dot{m}_{konv} \quad \dots(25)$$

$\dot{m}_{konv}$ konvekcijski masni tok vode s površine v okolico [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$],
 $\dot{q}_{konv}$ konvekcijski toplotni tok z okolice na površino materiala [W m^{-2}],
 h_{izp} izparilna entalpija vode [J kg^{-1}] in
 L razdalja – debelina preizkušanca.

Pri teh pogojih je toplotni tok enak produktu izparilne entalpije in masnega toka vode s površine, in je posledica razlike med temperaturo zraka v okolici (ΔT) in temperaturo na vlažni površini, proporcionalni faktor pa je koeficient toplotne prestopnosti h_t [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]:

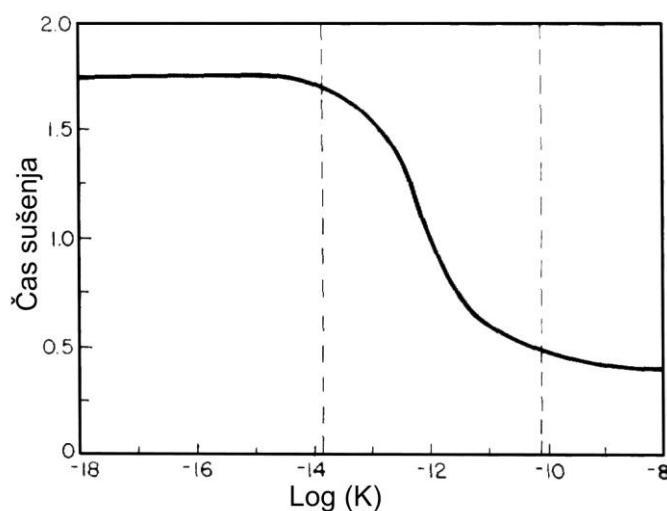
$$\dot{q}_{konv} = h_t \Delta T (1 - \theta) \quad \dots(26)$$

Koeficient toplotne prestopnosti je bil tudi v tem primeru določen eksperimentalno ter empirično koreliran s pogoji preizkušanja. V nasprotni smeri toplotnega toka teče masni tok vode z vlažne površine, pri čemer je potencial koncentracijska razlika med vlago na površini ($x = 0$) in okoliškim zrakom ($x = \infty$), proporcionalni faktor pa je koeficient snovne prestopnosti h_m :

$$\dot{m}_{konv} = h_m (p_{vp(x=0)} - p_{vp(x=\infty)}) \quad \dots(27)$$

Koncentracijo vlage v zraku se pogosto zapiše s tlakom vodne pare (p_{vp}), s pomočjo uporabe splošne plinske enačbe. Najpogosteje se koeficient snovne prestopnosti za vodno paro določa z analogijo prenosa toplote, ob predpostavki, da se vseskozi vzdržuje nasičeno vlažna površina.

V raziskavi, kjer so izvajali konvekcijsko normalno-temperaturno sušenje radialno orientiranih preizkušancev borovine (*Pinus taeda* L.) v laboratorijskem sušilniku, so hkrati s presevanjem z gama žarki določali tudi gostotni oz. vlažnostni profil (Felixx in sod., 1989; Perre in Maillet, 1989). Primerjava eksperimentalnih in simuliranih vlažnostnih profilov je pokazala visoko stopnjo koreliranosti. Sicer so bili realni vlažnostni profili manj gladki, in so imeli pri enaki stopnji zasičenosti por višjo vlažnost. To so pripisali nižji gostoti ranega lesa ter posledično večjemu deležu in prostornini por v ranem lesu. Del odstopanja realnih in simuliranih vlažnostnih profilov je mogoče pripisati tudi variabilnosti zgradbe lesa kot tudi verjetnosti gibanja vode v prečnih smereh in ne zgolj eno-dimenzijsko. Študija je potrdila tudi značilen vpliv permeabilnosti lesa na čas sušenja pri izločanju proste vode. Vpliv permeabilnosti so analizirali z variiranjem permeabilnosti v simulacijskem modelu, pri čemer so bili ostali materialni parametri konstantni. Primerjava časa sušenja do vlažnosti nasičenja celičnih sten pokaže naraščanje le tega, kadar je bila specifična permeabilnost lesnega tkiva manjša od $1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ (Slika 5). Pri tem so pri specifični permeabilnosti $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ ali manj zabeležili konstantne simulirane čase sušenja. Pri tej permeabilnosti sklepajo na prehod iz kapilarnega v difuzijski režim sušenja, kjer prevladujoč notranji, materialni upor kontrolira kinetiko izločanja vode, učinki kapilarnega toka pa so pri tem zanemarljivo majhni. Obraten pojav je zabeležen pri specifični permeabilnosti nad $1 \times 10^{-10} \text{ cm}^2$, kjer postaja notranji materialni upor zanemarljivo majhen. V tem primeru v materialu ni več prisoten značilen vlažnostni gradient, sušilna hitrost pa je v celoti določena s pogoji izhlapevanja na površini preizkušancev in z doseženo snovno prestopnostjo h_m (Enačba 27).



Slika 5 Odvisnost časa sušenja pri izločanju proste vode od specifične permeabilnosti borovine (Plumb in sod., 1985).

Figure 5 The effect of specific permeability of pinewood on the drying time (Plumb in sod., 1985).

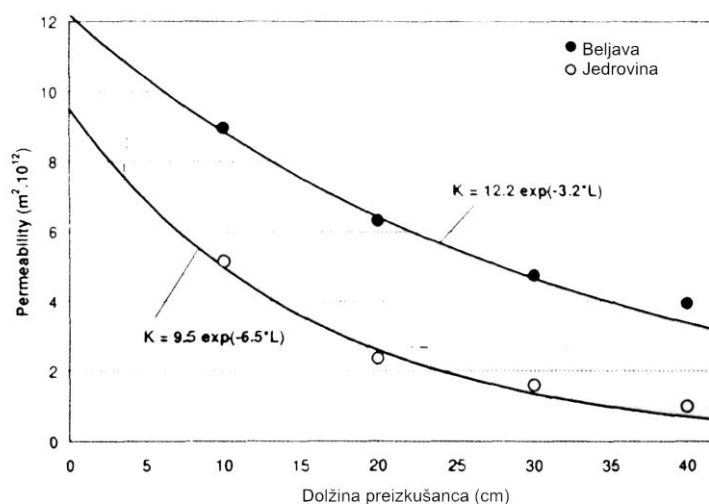
Tovrsten pristop so pri modeliranju sušenja lesa uporabili tudi številni drugi avtorji (Stanish, 1986). Uporabljeni modeli se v določenih primerih tudi razlikujejo. Tako so za gibanje vezane vode kot potencial uporabili tudi zgolj vlažnostni gradient (Choong in Kimbler, 1971; Choong in sod., 1974; Perre, 1987; Perre in Karimi, 2002), kot tudi kemijski potencial (Bramhall, 1971; Meyer, 1971; Kauman in sod., 1994; Siau, 1995).

2.1.4 Vpliv specifičnih lastnosti lesa na prevajanje vode

Raziskave permeabilnosti lesa so potrdile velike razlike kot tudi variabilnost te osnovne fizikalne lastnosti med lesnimi vrstami, v različnih anatomskih smereh, kot tudi glede na fiziološko stanje lesnega tkiva. Zaradi dovolj velikih pretokov kapljev in plinov so v raziskavah največkrat določali le permeabilnost lesa 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; Hansmann in sod., 2002). Del teh razlik je mogoče pripisati razlikam v permeabilnosti beljave in jedrovine, kjer se pri slednji kot razlog za zmanjšanje navaja pojav otiljenja in akumuliranje ekstraktivov v jedrovini listavcev, pri iglavcih pa se kot glavni razlog omenja aspiracija pikenj. Med najbolj prevodne lesne vrste uvrščamo venčasto porozne listavce, s premeri trahej tudi do 500 μm , zelo blizu pa so tudi difuzno porozne vrste, z večjim številom trahej premera do 50 μm . Splošno so lesne vrste iglavcev manj permeabilne, saj nimajo specifičnih prevodnih elementov, med prevodnimi traheidami pa majhne pikenjske povezave povzročajo velik upor proti pretoku tekočin. Tudi v prečni smeri lesa so razlike v permeabilnosti velike, s čimer značilno vplivajo na proces izločanja vode pri sušenju. Variabilnost permeabilnosti v radialni smeri se tako pogosto pojasnjuje z različno prevodnostjo radialno potekajočih trakov, tangencialna

permeabilnost pa je zelo odvisna od stanja pikenj v radialnih stenah celic, kjer je njihova gostota največja. Iz tega sledi tudi veliko razmerje med permeabilnostjo v vzdolžni in tangencialni smeri, ki znaša denimo pri iglavcih med $1 : 500$ do $1 : 80 \times 10^3$, vzdolžna permeabilnost pa je z radialno v razmerju od $1 : 15$ do $1 : 50 \times 10^3$ (Perre in Karimi, 2002).

Učinkovitost transporta proste vode v lesu, ki je pomembna v t.i. fazi konstantne sušilne hitrosti, je v veliki meri odvisna od njegove permeabilnosti, ki naj bi bila tudi inherentna ter nespremenljiva materialna lastnost. Že zgodnje raziskave permeabilnosti lesa, tako tekočinske kot tudi plinske permeabilnosti, pa so potrdile, da se permeabilnost lesa zmanjšuje z dolžino tokovne poti (Siau, 1984). Pri določanju vzdolžne plinske permeabilnosti pri bukovini (*Fagus sylvatica* L.) tako denimo ugotavljajo, da se permeabilnost več kot 2-krat hitreje zmanjšuje z dolžino transportne poti v beljavi, kot pa v jedrovini (Siau, 1984; Perre in Karimi, 2002) (Slika 6). Navaja pa se tudi obratno razmerje, kjer so denimo pri preizkušancih z nizko izhodiščno permeabilnostjo ($L = 0$) potrdili večji padec permeabilnosti z dolžino transportne razdalje, kot pa v primeru bolj permeabilnega lesa (Perre in Karimi, 2002). Rezultati kažejo, da se permeabilnost z dolžino transportne poti neenakomerno zmanjšuje, odvisnost pa se največkrat interpretira z eksponentnim matematičnim modelom (Comstock, 1967; Choong in sod., 1974; Bolton in Petty, 1978). Poleg efektivne permeabilnosti lesa (K_{ef}) v odvisnosti od dolžine preizkušanca oz. transportne razdalje, lahko iz tega modela določimo tudi dejansko t.j. teoretično permeabilnost (K), ki jo predstavlja začetna vrednost funkcije ($L = 0$).

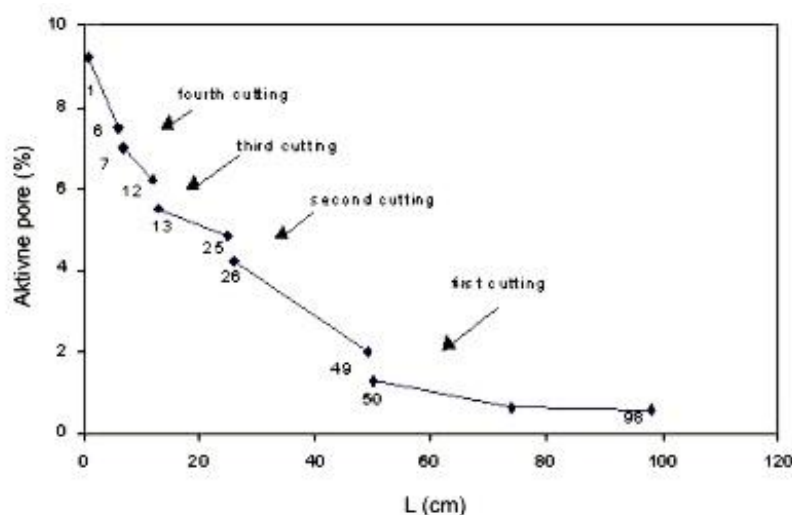


Slika 6 Odvisnost plinske permeabilnosti bukovine (*Fagus sylvatica* L.) v longitudinalni smeri od dolžine preizkušanca (Perre in Karimi, 2002).

Figure 6 Effect of sample length on longitudinal gaseous permeability of sap- and heartwood of beech (*Fagus sylvatica* L.) (Perre in Karimi, 2002).

Takšno zvezo se poskuša interpretirati s specifičnimi anatomskimi in fiziološkimi lastnostmi lesa, kot tudi z vzroki v izbrani metodologiji in načinu priprave preizkušancev. Pri proučevanju navzema vode v vzdolžni smeri bukovine so tako poleg določanja permeabilnosti za tekočine spremljali tudi način gibanja kapljevine v porozni lesni strukturi (Perre, 2000; Perre in Karimi, 2002). Pri tem so ugotovili, poleg odvisnosti od transportne razdalje, tudi odvisnost izmerjene tekočinske permeabilnosti od časa trajanja eksperimenta. Med razlogi za ta pojav se tako kot v podobnih raziskavah (Comstock, 1970), omenja predvsem možnost formiranja lokalnih zračnih mehurčkov, ki preprečujejo učinkovit kapilarni transport.

Z mikroskopsko analizo preizkušancev bukovine, ki so bili izpostavljeni penetraciji obarvane vode v kapilarni sistem, pa so tudi ugotovili, da v lesu obstaja le del kapilar, ki imajo aktivno funkcijo. Rezultati so pokazali tudi, da se število t.i. aktivnih por pri tem z oddaljenostjo od vpojne površine preizkušancev eksponentno zmanjšuje, podobno kot tudi izmerjena permeabilnost lesa (Slika 7). Dodatno, pa pri primerjavi števila aktivnih por pri kratkem ($t = 10$ min) in dolgem času navzemanja vode ($t = 300$ min) niso potrdili značilnih razlik v njihovem številu (Petty in Puritsch, 1970). Tudi pri iglavcih je s podobno tehniko navzemanja tekočin bilo potrjeno, da ima le majhen del tkiva tudi prevajalno funkcijo. V beljavi jelovine (*Abies grandis* L.) denimo sta le pri 2,8% traheid, več v kasnem lesu, potrdila sodelovanje pri prevajanju vode (Perre in Karimi, 2002). Največ teh traheid sta našla v kasnem lesu, uporabila pa sta tehniko vpivanja barve.



Slika 7 Vpliv dolžine preizkušanca (L) na delež aktivnih por v vzdolžni smeri bukovine (Perre, 2000).

Figure 7 Effect of sample length (L) on the percentage of active vessels in longitudinal direction of beechwood (Perre, 2000).

2.1.4.1 Določanje permeabilnosti s pomočjo geometrijskih modelov lesa

Za vrednotenje permeabilnosti lesa so v raziskavah izdelali tudi različne geometrijske modele in pri tem za izhodišče največkrat uporabili osnovne matematične zveze, kot so Darcy-ev in Hagen-Poiseulle-ov zakon. Pri iglavcih je najbolj znan Comstock-ov geometrijski model lesa (Perre in Karimi, 2002; Salin, 2006a; Salin, 2006b; Salin, 2008b), ki definira osnovno obliko in dimenzije celic ter gostoto, dimenzije in razporeditev pikenjskih povezav. Ta model se je izkazal za verodostojnega predvsem pri določanju razmerja med vzdolžno in prečno permeabilnostjo, manj pa pri določanju dejanske permeabilnosti lesa. Pri listavcih so boljše rezultate dosegli z enostavnimi modeli porozne strukture, ki predvidevajo vzdolžen, vzporeden potek kapilar, določenega povprečnega premera $\bar{r}$. Ob znani poroznosti lesa (ε) lahko tako njegovo specifično permeabilnost (K) izrazimo z naslednjo zvezo:

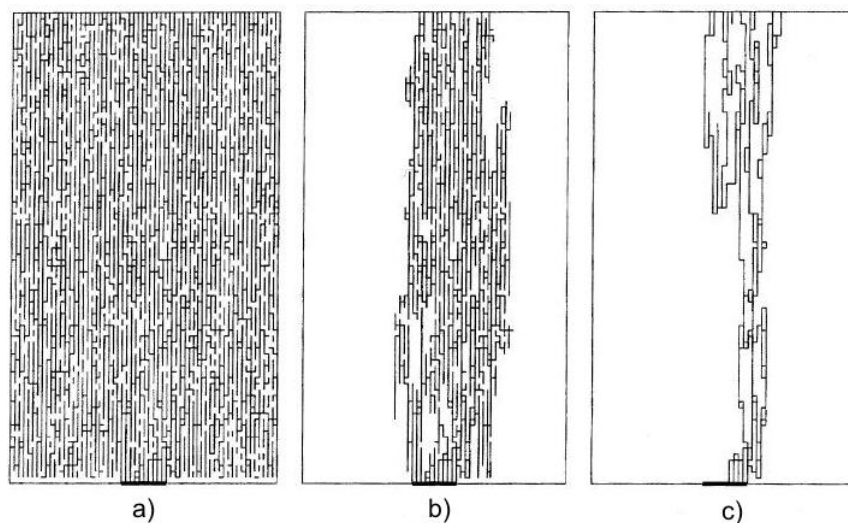
$$K = \frac{\varepsilon}{\delta} \left(\frac{\bar{r}^2}{8} \right) \quad \dots(28)$$

V modelu je t.i. faktor zavitosti (δ), ki je razmerje med kvadratom dejanske dolžine zavite kapilare (l) in kvadratom dejanske dolžine preizkušanca L . V raziskavah so s primerjavo teoretične in eksperimentalno dobljene permeabilnosti ugotovili visoko stopnjo povezanosti, pri čemer so teoretične vrednosti bile primerljive in le nekoliko višje od permeabilnosti pri nič-ti dolžini preizkušancev ($L = 0$) (Perre in Karimi, 2002; Salin, 2006a; Salin, 2006b).

2.1.5 Perkolacijski modeli gibanja tekočin v lesu

Ugotovitve raziskav o odvisnosti tekočinske permeabilnosti ter deleža aktivnih por od dolžine transportne poti so bile osnova za razvoj t.i. perkolacijskih modelov gibanja tekočin v porozni lesni strukturi. Gre za statistične modele, ki s pomočjo teorije mrež definirajo povezanost med prevodnimi elementi, t.j. porami v lesu. Pri lesu tako v splošnem govorimo o treh vrstah vezi med porami oz. celičnimi lumni: a) vse prevodne vezi, odvisne od anatomskih lastnosti lesa; b) povezane vezi in c) aktivne vezi (Slika 8).

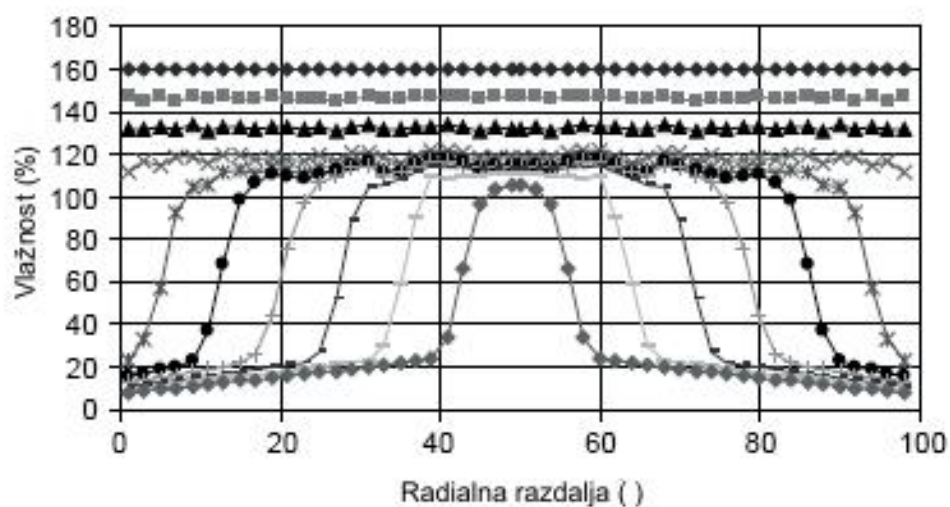
Razviti so bili 2D in 3D matematični modeli, ki na različne načine povzemajo anatomske oz. povprečne geometrijske lastnosti porozne lesne strukture (Wiberg in Moren, 1999). Modeli med drugim definirajo tudi količino vezi, osnovno razporeditev in dimenzije povezav med celičnimi lumni ter verjetnost za obstoj aktivnih vezi. Ti modeli predvidevajo sočasni kapilarni in difuzijski tok vode v porozni strukturi, ki pa sta v osnovi odvisna od hitrosti izhlapevanja vode z zunanjih površin, oz. od masnega toka vode v okolico. Z naključno porazdelitvijo različnih elementov (por, lumnov) ter vezi (npr. pikenjskih povezav) prihaja pri simulaciji sušenja v takšnih matematičnih mrežah do sporadičnega praznjenja elementov, glede na velikostni red elementov in vezi. Porazdeljevanje vlage se z metodo končnih diferenc običajno simulira z različnimi računalniškimi programi.



Slika 8 Povezave med prevodnimi elementi v perkolacijskem modelu: a - vse vezi, b - povezane vezi, c - aktivne vezi (Perre in Karimi, 2002).

Figure 8 The random networks to explain the liquid flow in wood: a) conducting bonds, b) connected bonds, c) active bonds (Perre in Karimi, 2002).

S pravilnim definiranjem geometrije porozne lesne strukture ter verjetnosti aktivnih vezi med elementi so ti modeli v več primerih verodostojno simulirali vlažnostne razmere v materialu in kinetiko sušenja lesa, večinoma pri iglavcih, kot tudi proces navlaževanja. Z uporabo perkolacijskega modela za simulacijo sušenja beljave rdečega bora (*Pinus sylvestris* L.) so tako dobili zelo primerljive vlažnostne profile z realnimi, eksperimentalnimi ugotovitvami. Pri tej zelo permeabilni lesni vrsti so namreč v dosedanjih raziskavah potrdili obstoj t.i. faze konstantne sušilne hitrosti na začetku sušenja, t.j. pri izločanju proste vode pri visokih lesnih vlažnostih. S časom sušenja, pa se je pri določenih eksperimentalnih pogojih pojavil tudi t.i. suh površinski sloj. V študijah so uporabili tako tradicionalne metode razslojevanja materiala (Rosenkilde in Glover, 2002), kot tudi neporušne tehnike, kot sta računalniška tomografija (Salin, 2002) in magnetna resonanca (Terziev, 1995; Kreber in sod., 1998). Izračunana debelina suhega površinskega sloja v teh raziskavah variira, kar je posledica eksperimentalnih pogojev, uporabljene lesne vrste in tehnike določanja. Primerjava debeline suhega površinskega sloja glede na povprečno vlažnost lesa pa kaže na postopno povečevanje debeline tega sloja z zniževanjem povprečne količine proste vode v materialu (Salin, 2006a). Enake ugotovitve navaja tudi teoretična študija sušenja beljave borovine s pomočjo perkolacijskega modela, kjer je mogoče na obstoj in razvoj suhega površinskega sloja sklepati iz simuliranih vlažnostnih profilov (Hukka, 1999; Nijdam in sod., 2000; Eriksson in sod., 2007) (Slika 9).



Slika 9 Simulacija vlažnostnega profila pri sušenju beljave borovine s pomočjo perkolacijskega modela (mreža: $30 \times 30 \times 98$ elementov (R×T×L)) (Salin, 2006a).

Figure 9 Simulation of moisture content profiles during drying of pine sapwood using percolation model and cubic network (Network: $30 \times 30 \times 98$ elements (R×T×L)) (Salin, 2006a).

2.1.6 Difuzijsko gibanje vode v lesu

Pri raziskovanju kinetike nizko- in normalno-temperaturnega sušenja lesa so se zelo pogosto uporabljali difuzijski modeli, še zlasti pri manj permeabilnih lesnih vrstah, ter pri večjih debelinah sortimentov. Ker Fick-ovi zakoni razlagajo in definirajo difuzijo vodnih molekul na osnovi koncentracijskega gradienta, so v osnovi uporabni zgolj za proučevanje gibanja vezane vode ter vodne pare pri vlažnostih lesa pod točko nasičenja celičnih sten. Zaradi enostavnosti opisa procesa in matematične rešitve so pri tovrstnem modeliranju največkrat vključevali le konstantno difuzivnost, neodvisno od lesne vlažnosti, temperature sušenja in anizotropnih strukturnih lastnosti lesnega tkiva, ter pri tem upoštevali osnovna izhodišča Fick-ovih zakonov (Luikov, 1966; Incropera in DeWitt, 1985; Rohsenow in sod., 1998). V primeru nestacionarnih pogojev se enodimenzionalni snovni tok splošno zapiše kot:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad \dots(29)$$

$$u = u_0 \text{ za } x \in (0, L), t = 0$$

Oznake:

0, L sredina in razdalja do površine preizkušanca, pri enosnem izhlapevanju vode iz lesa,

D difuzijski koeficient [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$],

u vlažnost lesa [%] in

t čas [s].

Ob predpostavki zanemarljivo majhnega zunanjega upora v primerjavi z notranjim snovnim uporom, so v številnih študijah difuzijski model uporabili tudi za proučevanje snovnega toka vode v celotnem vlažnostnem območju (Stamm, 1964; Hart in Darwin, 1971). Pri tem so pogosto izhajali iz predpostavke, da je gibanje proste vode v lesu zelo omejeno, saj ga preprečujejo veliki upori v medceličnih povezavah. Obstajajo tudi trditve, da kapilarna voda med procesom sušenja lesa ostaja v celoti ujeta v celičnih lumnih. Do njenega transporta bi naj prihajalo šele, ko vlažnost celičnih sten pade pod vlažnost nasičenja, in se voda iz lesa v nadaljevanju izloča difuzijsko, kot posledica koncentracijskega gradienta (Whitaker, 1977).

2.2 IZHLAPEVANJE VODE S POVRŠIN LESA

Raziskovanje izhlapevanja vode z lesnih površin pri konvekcijskem sušenju lesa lahko teoretično, podobno kot sam proces sušenja, razdelimo na dva dela. Del raziskav, zlasti pri permeabilnejših lesnih vrstah, večinoma iglavcih, temelji na teoriji analogije prenosa toplote in snovi, ki je uporabna pri nasičeno vlažnih lesnih površinah, pri izhlapevanju proste vode. Preostale raziskave je mogoče uvrstiti v skupino, ki celoten proces sušenja interpretira z difuzijskim modelom. V tej skupini se v osnovi ob površini izhlapevanja predvideva koncentracijski gradient, t.j. razlika koncentracije vlage med površino in okolico, ki je potencial snovnega toka vode. Obe skupini raziskav pa v interpretaciji snovnega toka vode s površine lesa predvidevata obstoj t.i. stacionarnega mejnega filma zraka tik nad lesno površino. V splošnem vse raziskave potrjujejo vpliv lastnosti mejnega filma na učinkovitost transporta vode z lesnih površin.

2.2.1 Zunanji snovni upor pri izhlapevanju vode z nasičeno vlažnih površin lesa

Proučevanje transporta proste vode in izhlapevanja z nasičeno vlažne površine lesa je osnovano na teoriji mejnega sloja, sicer pa temelji na analogiji prenosa toplote in snovi (Whitaker, 1977; Krischer in Kast, 1978). Ta teorija predpostavlja, da se toplota in snov prenašata na in s površine skozi tanek stacionaren, mirujoč sloj viskoznega plina tik ob njej. Pri izločanju proste vode se na lesni površini vzdržuje toplotno in koncentracijsko ravnovesje. Toplotni tok je enak produktu izparilne entalpije in masnega toka vode s površine, in je posledica razlike temperature zraka v okolici in temperature na vlažni površini, proporcionalni faktor pa je koeficient toplotne prestopnosti (h_t) (Enačba 26). V nasprotni smeri toplotnega toka teče masni tok vode z vlažne površine, pri čemer je potencial koncentracijska razlika med vlago na površini in okoliškim zrakom, proporcionalni faktor pa je koeficient snovne prestopnosti h_m (Enačba 27). Uporabljena analogija toplotnega in snovnega transporta služi za enostavno določanje in preračunavanje toplotne in snovne prestopnosti. Toplotni in snovni tok skozi mejno plast zraka, tik nad površino lesa, se pri tem obravnava kot difuzijski proces. S pomočjo Lewis-ove enačbe se pri tem pogosto uporablja aproksimativna zveza med koeficientom snovne- (h_m) in toplotne prestopnosti (h_t) (Salin, 2003):

$$h_m = \frac{h_t}{\rho \cdot c_p} \quad \dots(30)$$

V enačbi predstavlja $\rho \cdot c_p$ [$\text{J m}^3 \text{K}^{-1}$] prostorninsko toplotno kapaciteto vlažnega zraka v mejni plasti. Zveza je veljavna pri povsem turbulentnem toku, ki je pri sušenju lesa večinoma prisoten. Običajno se toplotna prestopnost določa eksperimentalno, dobro pa je raziskana tudi njena odvisnost od geometrije površin in načina gibanja zraka.

Številne dosedanje raziskave pri izločanju in izhlapevanju proste vode s površin lesa ugotavljajo, da je koncept analogije prenosa toplote in snovi pri sušenju lesa uporaben le v omejenem območju pri specifičnih pogojih sušenja (Perre in sod., 1993; Perre in Martin, 1994; Rosenkilde in Glover, 2002). Raziskave potrjujejo veljavnost modela zgolj v začetni fazi sušenja, v t.i. fazi konstantne sušilne hitrosti. Ta faza je največkrat zelo kratka, navajajo pa jo denimo pri sušenju nasičeno vlažnega lesa, največkrat v beljavi dobro permeabilnih lesnih vrst, pri uporabi zmernih sušilnih pogojev (Milota in Tschernitz, 1990; Tremblay in sod., 2000; Perre in Turner, 2007). V tej fazi je površinska vlažnost lesa nad vlažnostjo nasičenja lesnih vlaken ($u_p \geq u_{TNCS}$), dejanski parcialni tlak vodne pare na površini pa je enak nasičenemu ($p_{vp} = p_{vp}^0$), ki pa je odvisen od temperature. V tej fazi poteka migracija vode iz notranjosti lesa proti površini izhlapevanja s pomočjo kapilarnega vleka, z lokacij por v lesu z velikim premerom in z veliko količino vode proti manjšim poram, z manjšo vsebnostjo proste vode (Moren, 1992).

Izkazalo se je, da je pri izločanju proste vode njeno izhlapevanje s površine lesa pogosto manjše od tistega, ki ga dosežemo na ekvivalentni površini z mirujoče vodne gladine. Pri tem obstajajo dokazi, da površina lesa ni v celoti vlažna in prepojena s prosto vodo. Raziskovalci navajajo pojav lokalnih, mikro-površin, z nižjo lesno vlažnostjo, a še vedno nad vlažnostjo nasičenja lesnih vlaken ($u \geq u_{TNCS}$) (Salin, 2007). Delež teh bolj suhih mikro-površin je majhen, vendar pa zmanjšuje efektivno površino izhlapevanja, ne pa tudi površine za prenos toplote. Raziskave tudi navajajo, da je velikost suhih mikro-površin majhna v primerjavi s površino stacionarnega mejnega filma zraka nad njo, kar bi naj zanemarljivo vplivalo na snovno prestopnost (Plumb in sod., 1985). S tem prisotnost delno osušenih mikro-površin ($u \geq u_{TNCS}$) ne razloži pogostega bistveno zmanjšane koeficienta snovne prestopnosti, ki se pojavi že na samem začetku sušenja, pri čemer se upočasni izhlapevanje proste vode. Vzroki za odstopanje eksperimentalno dobljenih koeficientov snovne prestopnosti od teoretično izračunanih vrednosti so v nekaterih primerih tudi posledica eksperimentalnih predpostavk in poenostavitev. Pri večini raziskav je eden osnovnih problemov določanje točne temperature vlažne površine lesa, ne da bi pri tem s tehniko merjenja značilno vplivali na izmerjeno vrednost. Posledično, prihaja v raziskavah do težav pri določanju površinske koncentracije vlage, ki je včasih določena zgolj posredno, preko sorpcijskih lastnosti lesa.

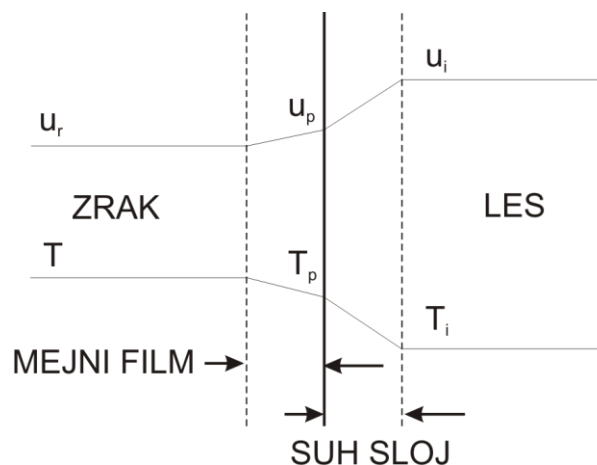
Za razjasnitev vzrokov zmanjšane izhlapevanja vode s površin lesa je potrebno tudi dobro poznavanje lastnosti realnih površin sušечеlega lesa in strukture tkiva tik pod njimi. V splošnem imajo realne površine lesa, ne glede na način mehanske obdelave, določeno stopnjo hrapavosti, ki lahko pri konvekcijskem sušenju značilno vpliva na gibanje zraka tik ob njih. Raziskave so potrdile značilen vpliv nekaterih lastnosti lesa, predvsem širine branik, usmerjenosti in geometrije lesnih vlaken ter gostote, na lastnosti novo-nastale lesne površine pri mehanski obdelavi (Aguilera in Martin, 2001). Večjo gladkost lesnih površin so, ne glede na tehnologijo obdelave, dosegli pri gostejšem lesnem tkivu, majhnem

odvzemu materiala ter pri nizkih podajalnih hitrostih (Stewart in Crist, 1982; Murmanis in sod., 1986; Westkämper in Riegel, 1993). Pri mehanski obdelavi lesa so ponekod zaznali tudi precejšnje strukturne pod-površinske spremembe lesa. Te navajajo pri slabši tlačni trdnosti materiala, npr. pri redkejših lesovih, pri slabem ostrenju rezil ali pa pri tehnikah, kjer obstaja večja normalna komponenta rezalne sile, kot je denimo brušenje (Stewart in Crist, 1982; Murmanis in sod., 1986). V nekaterih primerih so z mikroskopskimi tehnikami zaznali porušitve pod-površinskih nizov tanko-stenih celičnih tkiv, celic ranega lesa in parenhima, ter vtiskanje debelo-stenih tkiv na mesta tanko-stenih lesnih vlaken. Lastnosti površine in pod-površinskega sloja so pri sušenju lesa proučevali tudi z lasersko svetlobo. Pri borovini so denimo ugotovili pojav mikrorazpok, velikosti do 0,1 mm, ki se pojavijo praktično neposredno po mehanski obdelavi svežega lesa. Število mikrorazpok je naraščalo s časom sušenja, hitreje pri povišani temperaturi in ostrejših klimatskih pogojih (Hanhijärvi in sod., 2003).

Odstopanje teoretično dosegljivega snovnega toka proste vode od eksperimentalno dobljenih vrednosti na realni lesni površini se je v študijah pogosto reševalo z uvedbo t.i. korekcijskih faktorjev. Le ti so največkrat, z definiranjem odvisnosti koeficienta snovne prestopnosti od lesne vlažnosti omogočili rabo tega parametra na širokem vlažnostnem območju (Hukka, 1999; Hukka in Oksanen, 1999; Tremblay in sod., 2000; Salin, 2002; Remond in sod., 2005).

2.2.1.1 Pojav suhega površinskega sloja

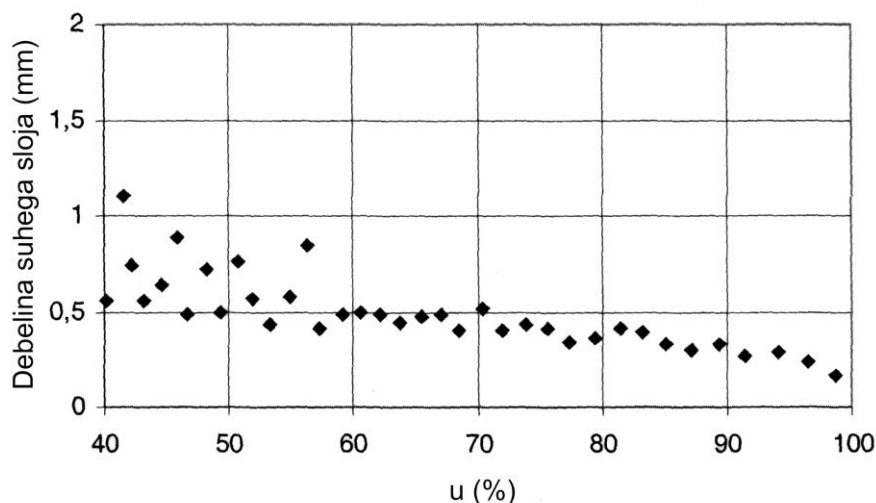
Za razlago in pojasnitev zmanjšane izhlapevanja proste vode v 1. fazi sušenja lesa se je posledično razvil koncept t.i. suhega površinskega sloja (angl. »dry shell concept«) Gre za model, ki pri izhlapevanju proste vode predpostavlja na površini lesa vlažnost, ki je nižja od vlažnosti nasičenja lesnih vlaken ($u_p < u_{TNCs}$), pri čemer je tudi koncentracija vodne pare v zraku ob stiku s to površino nižja od nasičenja ($u_r < u_p < u_{TNCs}$). Obraten trend je predpostavljen pri temperaturi zraka v stiku s površino izhlapevanja. Ta naj bi bila nižja od okoliške ($T_p < T$), vendar višja od temperature adiabatskega nasičenja ($T_p > T_i$), ki je teoretično dosežena pri izhlapevanju vode z mirujoče vodne gladine (Salin, 2007) (Slika 10).



Slika 10 Teoretični temperaturni in vlažnostni profil na stiku vlažne površine lesa z okoliškim zrakom (Salin, 2007).

Figure 10 Theoretical temperature and humidity profiles across the air-wood interface (Salin, 2007).

Pri izločanju proste vode iz lesa so v nekaterih primerih raziskave potrdile prisotnost suhega površinskega sloja ali pa vsaj izrazito razliko med vlažnostjo površine in vlažnostjo globlje v notranjosti sortimentov. V študijah so uporabili tako tradicionalne metode razslojevanja materiala, kot tudi neporušne tehnike, kot sta računalniška tomografija in magnetna resonanca (Wiberg in Moren, 1999; Wiberg in sod., 2000; Rosenkilde in Glover, 2002). Izračunana debelina suhega površinskega sloja v teh raziskavah variira, kar je posledica eksperimentalnih pogojev, uporabljene lesne vrste in tehnike določanja. Primerjava debeline suhega površinskega sloja glede na povprečno vlažnost lesa pa kaže na postopno povečevanje debeline tega sloja z zniževanjem povprečne količine proste vode v materialu (Salin, 2002). Teoretično izračunano debelino suhega sloja pri borovini v odvisnosti od vlažnosti predstavlja slika 11.



Slika 11 Odvisnost debeline suhega površinskega sloja v odvisnosti od lesne vlažnosti (Salin, 2002).

Figure 11 Calculated dry shell thickness as a function of moisture content (Salin, 2002).

Z modelom suhega površinskega sloja, zlasti z vidika njegovega nastajanja in širjenja ob padanju lesne vlažnosti, je možno v precejšnji meri interpretirati tudi spreminjanje koeficienta snovne prestopnosti z vlažnostjo lesa. Ob poznavanju difuzivnosti v nastalem suhem površinskem sloju in znani debelini le tega lahko definiramo dejanski koeficient snovne prestopnosti (h'_m):

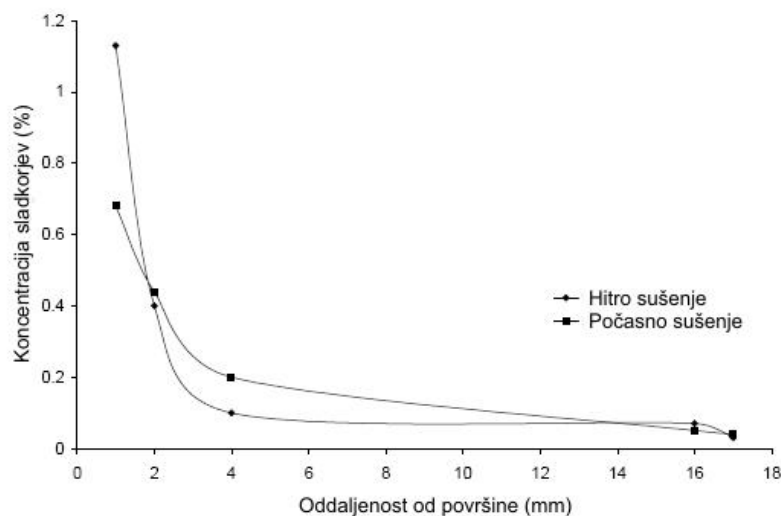
$$h'_m = \frac{h_m}{1 + \frac{D}{d}} \quad \dots(31)$$

h_m koeficient snovne prestopnosti pri nasičeno vlažni površini lesa [m s^{-1}],

D povprečni difuzijski koeficient v suhem površinskem sloju [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] in

d debelina suhega površinskega sloja [m].

Prisotnost suhega površinskega sloja pri izločanju proste vode iz lesa mnogi potrjujejo in povezujejo tudi s pojavom obarvanj ter s profilom diskoloracij po prerezu elementov. Znano je denimo rjavo obarvanje tankih 0,5 do 2 mm debelih zunanjih plasti sortimentov pri sušenju borovine (*Pinus radiata* D. Don.), ki se pojavi tik pod površino (Kreber in sod., 1998; Kreber in sod., 1999). Raziskovalci nastanek obarvanja na tem mestu razlagajo s kopičenjem prekursorjev barvnih komponent, ki migrirajo s prosto vodo iz notranjosti sortimentov. Ti prekursorji domnevno v ravnini izparevanja proste vode oksidirajo in s tem povzročajo pod-površinske barvne spremembe (Slika 12). Enak pojav so odkrili tudi pri sušenju rdečega bora (Terziev in sod., 1993).



Slika 12 Porazdelitev koncentracije sladkorjev tik pod površino lesa bora sušenega z dvema sušilnima hitrostma (Kreber in sod., 1998).

Figure 12 Distribution of sugars close to the wood surface, dried at two drying rates (Kreber in sod., 1998).

2.2.2 Zunanji snovni upor pri sušenju lesa kot difuzijskem procesu

Že v osnovnih raziskavah difuzivnosti lesnega tkiva so potrdili vpliv lastnosti površin lesa in termodinamskih pogojev ob površinah na transport vode iz lesa. V pogojih naravne konvekcije in pri majhnih hitrostih gibanja zraka ob površini so prav tako, kot pri izhlapevanju proste vode z nasičeno vlažnih površin, ugotovili prisotnost stacionarnega mejnega sloja nad površino lesa. Ta sloj ločuje površino materiala od okoliškega zraka. Pojavila se je delitev celotne upornosti proti difuziji vode na notranji snovni upor, določen z dejanskim difuzijskim koeficientom, ter na zunanji snovni upor. Obratno vrednost zunanjega snovnega upora so pri raziskavah difuzivnosti definirali kot koeficient snovne emisivnosti (Rosen, 1978; Siau in Avramidis, 1996). Koeficient snovne emisivnosti s , podobno kot koeficient snovne prestopnosti h_m določa hitrost izhlapevanja vode s površine lesa ($x = L$) v mejni sloj zraka nad njo:

$$-D \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=L} = s(u_p - u_r) \quad \dots(32)$$

Oznake:

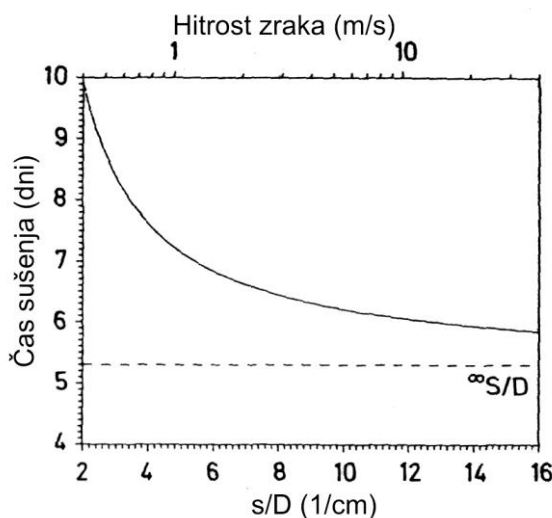
- s koeficient snovne emisivnosti [m s^{-1}],
 u_p, u_r vlažnost lesa na površini in ravnovesna vlažnost, definirana z okoliško klimo.

Ta koncept je nastal zaradi enostavnosti določanja robnih pogojev v difuzijski enačbi (Newman, 1931), nima pa dobre fizikalne osnove, saj opisuje zgolj gibanje vodne pare v smeri ravnovesne vlažnosti v okoliškem zraku. V tem modelu je eden osnovnih problemov določanje površinske in ravnovesne vlažnosti (u_r), ki sta odvisni od temperature, kot tudi od higroskopskih lastnosti lesa. Pri sušenju lesa se namreč temperatura površine večinoma spreminja (Salin, 2007). Pri vlažnosti lesa nad točko nasičenja celičnih sten je temperatura površine pogosto blizu temperature mokrega termometra, kar je zelo odvisno od pogojev na površini ter od velikosti notranjega snovnega upora. Pri sušenju lesa pod vlažnostjo nasičenja lesnih vlaken pa se temperatura površine lesa približuje temperaturi suhega termometra, oz. običajni temperaturi okoliškega zraka. Hkrati iz definicije sledi, da ima na izhlapevanje vode s površine lesa velik vpliv tudi notranji snovni upor, odvisen od difuzivnosti, ki denimo določa tudi vlažnostni gradient tik ob površini izhlapevanja. Poleg tega, pa so v študijah potrdili tudi odvisnost koeficienta snovne emisivnosti od lastnosti zračnega toka nad površino lesa. V splošnem rezultati kažejo, da koeficient snovne emisivnosti ni niti lastnost lesa niti lastnost zraka v stiku s površino. Tako posledično izračunane vrednosti snovne emisivnosti, določene v postopkih sušenja ali uravnovešanja lesa, izkazujejo tudi veliko variabilnost, celo v razmerju 1 : 500.000 (Söderström in Salin, 1993). Del razlogov za takšna nihanja lahko v nekaterih študijah pripišemo tudi neupoštevanju vpliva morfologije površin in sorpcijskih lastnosti na vlažnost površine (Faust in Rice, 1986).

Študije v splošnem potrjujejo povečevanje izhlapevanja vode z lesnih površin in s tem tudi naraščanje koeficienta snovne emisivnosti z dviganjem hitrosti gibanja zraka čez lesno površino. Pri tem so hkrati zabeležili tudi tanjšanje t.i. stacionarnega mejnega filma zraka nad površino lesa (Rosen, 1978; Welty in sod., 1984). Pri sušenju orehovine (*Juglans nigra* L.) v higroskopskem območju so denimo ugotovili logaritemsko odvisnost razmerja notranjega in zunanjega snovnega upora (S/D) od hitrosti zraka (v) ob površini lesa (Rosen, 1978):

$$\frac{S}{D} = 4,66 + 3,12 \cdot \ln(v) \quad \dots(33)$$

Tudi študija sušenja hrastovine (*Quercus rubra* L.) je v higroskopskem območju, pri konstantni temperaturi in variiranju hitrosti zraka ter relativne zračne vlažnosti, potrdila značilen učinek razmerja snovnih uporov na čas sušenja. V tem primeru se je čas sušenja eksponentno povečeval pri nižanju razmerja snovne emisivnosti in difuzivnosti lesa (Simpson, 1993) (Slika 13). Na snovno emisivnost je vplival tudi način gibanja zraka čez površino preizkušancev, kjer se je denimo snovna emisivnost pri turbulentnem zračnem toku še dodatno povečala zaradi vrtinčenja zraka v mejnem sloju (Avramidis in Siau, 1987; Cai in Avramidis, 1993). Zaznan je bil tudi pozitiven vpliv temperature in relativne zračne vlažnosti oz. naraščanja parcialnega tlaka vodne pare na koeficient snovne emisivnosti (Söderström in Salin, 1993).



Slika 13 Odvisnost časa sušenja od razmerja površinske snovne emisivnosti in difuzivnosti lesa (Simpson, 1993).

Figure 13 Relationship between drying time and ratio of surface emission coefficient to diffusion coefficient (Simpson, 1993).

V primeru poznavanja higroskopsnih lastnosti lesa lahko s pomočjo znanega snovnega toka vode na površini lesa zapišemo tudi zvezo med koeficientom snovne emisivnosti (s) in snovne prestopnosti (h_m):

$$s(u_p - u_r) = h_m \frac{v_s}{R_u} (\varphi_p - \varphi_r), \quad \dots(34)$$

od koder lahko izrazimo koeficient snovne emisivnosti v obliki:

$$s = h_m \frac{v_s (\varphi_p - \varphi_r)}{R_u (u_p - u_r)} = h_t \frac{y_s (\varphi_p - \varphi_r)}{c_{pz} R_u (u_p - u_r)} \quad \dots(35)$$

Oznake:

- v_s nasičena koncentracija vodne pare v zraku $v_s = y_s \rho_z$ [kg m^{-3}],
- y_s vlažnost nasičenja [kg kg^{-1}],
- ρ_z gostota vlažnega zraka [kg m^{-3}],
- φ_p, φ_r relativna zračna vlažnost zraka ob stiku s površino lesa in v ravnovesju z okolico,
- c_{pz} toplotna kapaciteta vlažnega zraka [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$] in
- R_u nominalna gostota lesa [kg m^{-3}].

2.2.2.1 Nastanek površinske difuzijske bariere

Sušenje gostejših ter manj permeabilnih lesnih vrst z ostrimi režimi sušenja pogosto povzroča velik vlažnostni gradient po prerezu sortimentov, ki je hkrati tudi posledica velikega notranjega snovnega upora. V teh primerih se pri visoki povprečni vlažnosti sortimenta, nad vlažnostjo nasičenja celičnih sten, zunanji sloj hitro suši, kar narekujejo pogoji sušenja v stiku s površino lesa. Tik pod površino lesa se pri tem pojavi velika sušilna hitrost, ki pa se zaradi notranjega snovnega upora globlje v materialu bistveno zmanjša. Pri takšnem sušenju, ko se vlažnost površine znižuje pod točko nasičenja celičnih sten prihaja tudi do krčenja lesnega tkiva (Hunter, 2002). Le to je, v primeru ujete proste vode v notranjosti sortimentov, zadržano, s čimer se po debelini sortimentov ustvarja tudi znatno napetostno polje. Posledica takšnega sušenja so dobro znane površinske razpoke in zaskorjenje, v ekstremnih primerih pa pride zaradi velike kapilarne tenzije tudi do kolapsa porozne lesne strukture (Hart in Darwin, 1971). Nadaljevanje ostrega sušenja povzroča nadaljnje širjenje osušenega površinskega sloja v notranjost lesa. S tem se poleg povečevanja sušilnih napetosti povečuje tudi učinek t.i. difuzijske bariere, saj mora prosta voda iz notranjosti skozi ta sloj lesa proti površini sortimenta preiti izključno difuzijsko. Tako upočasnen tok proste vode iz notranjosti sortimentov, podaljšuje sušenje. Pri svetlih lesnih vrstah je kot posledica takšnega sušenja tudi dobro poznano neenakomerno obarvanje lesa, ki se razvije zaradi počasnega sušenja notranjosti sortimentov, kjer obstajajo idealni pogoji za razvoj oksidativno obarvanih komponent. Takšne barvne spremembe so dobro raziskane pri bukovini (Gorišek in sod., 2000). Podoben pojav so zasledili tudi pri sušenju jesenovine (*Fraxinus excelsior* L.) s povišano temperaturo, ki pa se je pri zelo počasnem sušenju odražalo tudi z inverznim barvnim profilom po prerezu sortimentov (Straže in Gorišek, 2001; Straže in sod., 2003).

2.3 OPTIMIRANJE KINETIKE KONVEKCIJSKEGA SUŠENJA LESA

Pri optimiranju konvekcijskega sušenja lesa se v splošnem ne osredotočamo zgolj na tehnološke rešitve samega sušilnega procesa. Izkazalo se je, da lahko izboljšamo postopek sušenja tudi z ukrepi pred samim izvajanjem procesa. V prvi vrsti gre tako za organizacijske ukrepe kot tudi za razne dodatne tehnološke rešitve.

2.3.1 Postopki predpriprave lesa za konvekcijsko komorsko sušenje

V splošnem je znano, da priprava sortimentov, kot tudi zložajev za sušenje lesa značilno vpliva na izvajanje procesa konvekcijskega sušenja. Sama priprava zložajev, z vidika geometrije, razporejanja elementov kot tudi letvičenja je v osnovi dobro raziskana. Pri reševanju specifičnih sušilnih problemov, pa so v študijah preizkušali razne dodatne tehnološke rešitve.

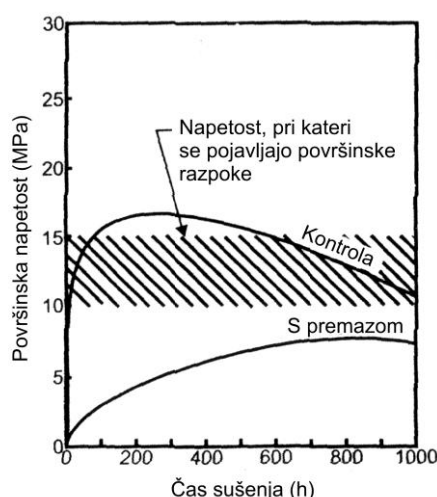
Poleg osnovnega razvrščanja lesa po lesnih vrstah in debelinah sortimentov se je pri izboljšanju kinetike sušenja obneslo še boljše razvrščanje. Največkrat se pri tem v primeru strojnega razvrščanja kot kriterij uporablja osnovna gostota lesa, s čimer se les pred sušenjem posredno razvrsti tudi po začetni vlažnosti (Zhang in sod., 1996). Podobno je tudi ločevanje žaganic z lokacij beljave in jedrovine, ki se poleg razlik v gostoti razlikujejo še v permeabilnosti, kemijskih kot tudi fizikalnih lastnostih. V praksi so najdaljši časi sušenja potrebni večinoma pri žaganicah iz beljave, ki običajno vsebujejo tudi največje količine vode. Če takšne žagance sušimo skupaj s tistimi iz jedrovine, se mora proces sušenja zaradi ohranitve ustrezne kakovosti prilagoditi najnižji dopustni sušilni hitrosti. Ta je pri žaganicah iz jedrovine, zaradi običajno nižje začetne vlažnosti, že v izhodišču manjša (Pang, 2005).

Problem površinskih razpok, kot posledice prehitrega sušenja površine in prevladujočega notranjega snovnega upora, so poleg prilagajanja klimatskih pogojev in režimov sušenja v sušilnih komorah reševali tudi z dodatno zaščito površin. Pri sušenju tangencialno orientiranih hrastovih žaganic (*Quercus falcata* L.), so tako problem površinskih razpok, največ na lokacijah parenhimskih trakov, reševali z dodatno mehansko zaščito žaganic (Hart in Gilmore, 1985). Pri tem so takoj po razžagovanju 36 mm debele žagance zlagali v zložaj, z oblogami iz 6 mm debelih vezanih plošč iz lesa duglazije. Pri sušenju površinsko zaščitene desk so nato lahko uporabljali ostrejši režim sušenja, saj je voda iz lesa v celoti izhajala preko dodatnih oblog. V takšnem postopku je vlažnost na površini žaganic višja kot sicer, zmanjša pa se tudi vlažnostni gradient po debelini sortimentov. V splošnem so s tem postopkom skrajšali čas sušenja, povečali kakovostni izkoristek, zmanjšala pa se je kapaciteta sušilne komore.

V raziskavah izboljšanja kinetike sušenja lesa so proučevali tudi vpliv dodatne obdelave žaganih površin. Tako so pri sušenju hrastovine in češnjevega lesa uvedli dodatno skobljanje žaganic do globine 1,5 mm, s čimer so odstranili neravnosti na površinah, kot posledice žaganja (McMillen in Baltes, 1972). Pri uporabi enakega standardnega režima sušenja se je sušenje tako obdelanega lesa skrajšalo za 29% pri hrastovini, ter za 12% pri češnjevem lesu. Del skrajšanja procesa je potrebno pripisati zgolj manjši debelini novih sortimentov, preostanek pa je posledica bolj gladkih površin ter boljšega izhlapevanja vode v okolico, domnevno tudi zaradi izboljšanja kinematskih razmer zraka v neposrednem stiku s površino lesa. V študiji so splošno potrdili za 10% višjo hitrost zraka skozi zložaje pri isti vrtilni hitrosti ventilatorjev.

Površinske razpoke se pogosto pojavljajo tudi v začetni fazi sušenja lesa evkaliptov (*Eucalyptus regnans* L., *E. delegatensis* L., *E. obliqua* L.). Ker je daljše vzdrževanje visoke zračne vlažnosti v komori neekonomično, predvsem zaradi bistvenega podaljšanja procesa, so za preprečevanje prevelikega izsuševanja površine pri teh lesnih vrstah uporabili tehniko premazovanja (Schaffner in Doe, 1984). Pri tem so z brizganjem nanašali

delno-prepustne PVC ter PVA premaze, s čimer so zmanjšali morebiten velik vlažnostni gradient na površini lesa, vlažnost površine pa so obdržali v bližini nasičenja lesnih vlaken. S tem postopkom so sicer delno zmanjšali sušilno hitrost, rezultati pa so bili boljši, kot pa v primeru uporabe povišane zračne vlažnosti v sušilni komori. Pri določanju sušilnih napetosti na površini žaganic so pri tem potrdili nižje vrednosti kot v primeru kontrolnih preizkušancev, s čimer so se izognili nastajanju površinskih razpok (Slika 14).



Slika 14 Zmanjšanje površinske sušilne napetosti pri sušenju lesa evkalipta (*Eucalyptus* sp.) z zaščitnim pol-prepustnim premazom (Schaffner in Doe, 1984).

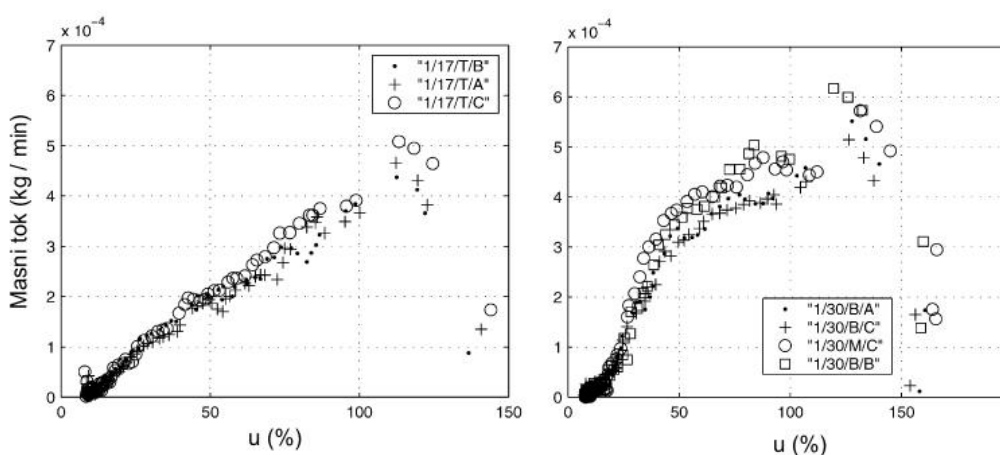
Figure 14 Surface drying stresses in boards of Tasmanian oak (*Eucalyptus* sp.) with- and without surface treatment (Schaffner in Doe, 1984).

2.3.2 Tehnike izboljšanja konvekcijskega sušenja lesa

Večinoma, procesi nizko- in srednje temperaturnega konvekcijskega sušenja lesa potekajo na osnovi spremljanja vlažnosti lesa ter prilagajanju klimatskih pogojev v skladu s postavljenim režimom sušenja. Pri vodenju teh procesov se pojavljajo predvsem težave z določanjem vlažnosti lesa na celotnem vlažnostnem območju, težave z vzdrževanjem homogenih klimatskih pogojev znotraj sušilnih komor ter enakomernega gibanja zraka. Kombinacija netočnih meritev, nihanja osnovnih parametrov sušenja skupaj z variabilnostjo lesa v sušilni komori pogosto med postopkom sušenja povzročajo napačno vodenje procesa.

Pri sušenju lesa se še vedno pojavljajo težave z določanjem lesne vlažnosti, večinoma pri vlažnostih nad točko nasičenja celičnih sten. Trenutno so v rabi posredne metode, električno uporovno in dielektrično merjenje, ki je v tem območju še vedno nezanesljivo. Dodaten problem je lahko tudi velika variabilnost začetne vlažnosti lesa, ki ob morebitni

različni orientaciji elementov povzroča znatne razlike v sušilni hitrosti. V nekaterih raziskavah so tako lesno vlažnost med sušenjem določali kar neposredno, z metodo tehtanja (Zeleniuc in Ene, 1996; Moren in Sehstedt, 1999; Davis, 2004; Milota, 2008). S tem so izboljšali zanesljivost meritev, vzporedno pa so spremljali tudi tok vode, ki se izloča z lesnih površin. Pri podrobni raziskavi sušenja različnih sortimentov borovine (*Pinus radiata* D. Don.) so pri tem uporabljali kar robotski sistem za tehtanje preizkušancev v sušilni komori (Davis, 2004). V študiji so denimo ugotovili bistvene razlike v doseženih snovnih tokovih pri preizkušancih iz beljave ter tistih, ki so vsebovali določen delež kompresijskega lesa (Slika 15). Posledično predlagajo prilagoditev režima sušenja sušilnim karakteristikam lesa.

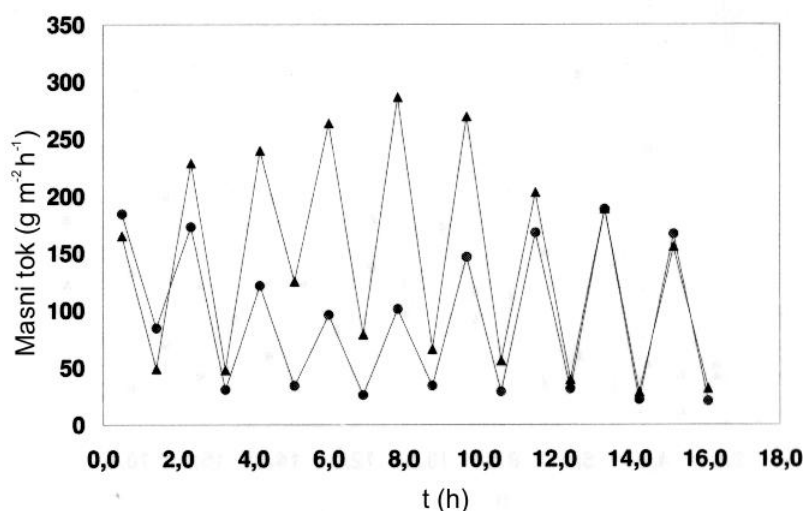


Slika 15 Vpliv specifičnih lastnosti lesa na kinetiko sušenja pri borovini (*Pinus radiata* D. Don.): levo - beljava, desno - kompresijski les (Davis, 2004).

Figure 15 Influence of specific pinewood properties (*Pinus radiata* D. Don.) on drying kinetics: sapwood (left), compression wood (right) (Davis, 2004).

V praksi konvekcijskega komorskega sušenja je dobro poznana metoda reverzibilnega kroženja ventilatorjev in se prvenstveno uporablja za izenačevanje pogojev sušenja v velikih komorah. Razlog je v različnih pogojih sušenja, ki se pojavijo pri širokih komorah, kjer je lahko vzporedno zloženih tudi 5 ali več zložajev. V tem primeru ima les na vstopni strani zraka v zložaj ostrejša pogoja sušenja, kot pa les, ki je postavljen na izstopni strani. Izkazalo pa se je, da ima reverziranje kroženja ventilatorjev tudi pozitiven učinek na kinetiko sušenja lesa (Pang in Haslett, 1995; Nijdam in Keey, 1996; Wiberg, 2001). Pri sušenju borovine (*Pinus sylvestris* L.) in smrekovine (*Picea abies* Karst.) so tako v začetni fazi sušenja potrdili ciklično spreminjanje masnega toka s spreminjanjem smeri ventilatorjev (Wiberg, 2001). Masni tok je bil velik pri vzpostavljeni nizki zračni vlažnosti ($T = 61\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\phi = 74\%$) in obratno nizek v vlažnejšem delu cikla ($T = 56\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\phi = 94\%$), v katerem pa ni prihajalo do dodatnega navlaževanja preizkušancev. Pri tem so potrdili tudi razlike v sušilni hitrosti med preizkušanci iz prevodne beljave v primerjavi z preizkušanci,

bližje jedrovini (Slika 16). Proučevani lesni vrsti pa sta se na ciklične spremembe tudi časovno specifično odzivali, kjer so pri bolj permeabilni borovini zaznali praktično takojšen odziv masnega toka na spremembo zunanjih klimatskih pogojev. Zdi pa se, da je uporabljen 1-urni interval nihanja zunanjih klimatskih pogojev za sušenje smrekovine prekratek, saj so ugotovili značilno zamujanje odziva sušilne hitrosti glede na vzpostavljeno klimo. Za smrekovino tako raziskovalci predlagajo, da se reverziranje izvaja zgolj vsake 4 h sušilnega procesa.



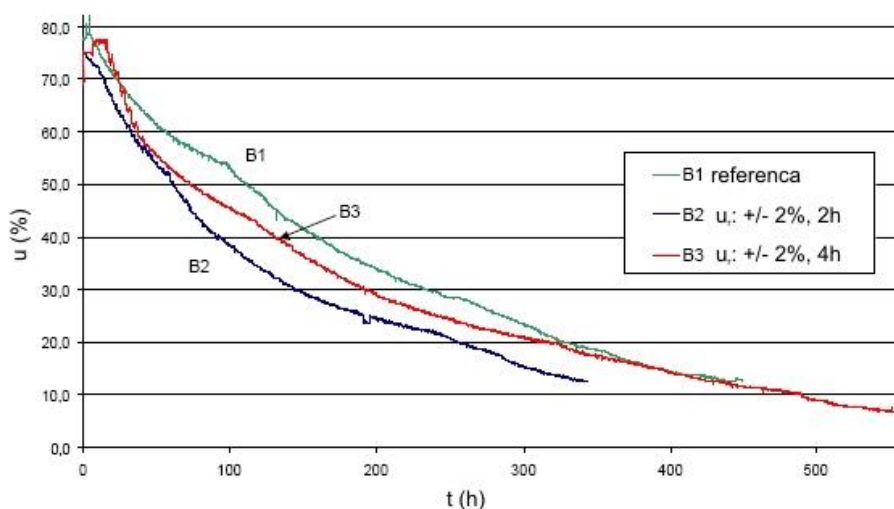
Slika 16 Ciklično nihanje masnega toka vode pri sušenju borovine z reverzibilnim kroženjem ventilatorjev (▲prevodna beljava, ● prehodna cona) (Wiberg, 2001).

Figure 16 Cyclic changes of drying rate for pine during drying with airflow reversals (▲ sapwood, ● transition wood) (Wiberg, 2001).

V omenjeni raziskavi (Wiberg, 2001) pa so med procesom sušenja z računalniško tomografijo neporušno določevali še gostoto preizkušancev po celotnem prerezu. Iz dobljenih podatkov so določili tudi debelino suhega površinskega sloja, ki je nastal med sušenjem obeh lesnih vrst. V splošnem ugotavljajo (80% preizkušancev), da se debelina suhega površinskega sloja tanjša med sušenjem v vlažnejšem ciklu, ter obratno debeli, pri sušenju v ostrejšem delu cikla. Variiranje debeline suhega sloja je bilo v območju od 0,5 do 2,0 mm, z blagim trendom naraščanja povprečne debeline s časom sušenja. Večje variiranje je bilo potrjeno pri smrekovini, kar v študiji pripisujejo manjši permeabilnosti te lesne vrste.

Vpliv cikličnega spreminjanja klimatskih pogojev na hitrost in kakovost sušenja bukovine (*Fagus sylvatica* L.) in borovine (*Pinus sylvestris* L.) pri konvekcijskem komorskem sušenju se je proučevalo tudi v pol-industrijskih pogojih (Welling in sod., 2003). V klasični sušilni komori z delno izmenjavo zraka so pri tem uporabljali standardne režime sušenja in oscilirali vlažnost zraka. Ta tehnika je prav tako omogočila skrajšanje sušenja, zlasti pri

izločanju proste vode. V raziskavi ugotavljajo, da se učinki povečujejo bolj z višanjem frekvence nihanja klimatskih pogojev, kot pa z amplitudo nihanja, oba parametra pa sta odvisna predvsem od sušilnih karakteristik lesne vrste in debeline sortimenta. Pri uporabi kratkega intervala spreminjanja klime se je znatno zmanjšal tudi vlažnostni gradient (Slika 17).



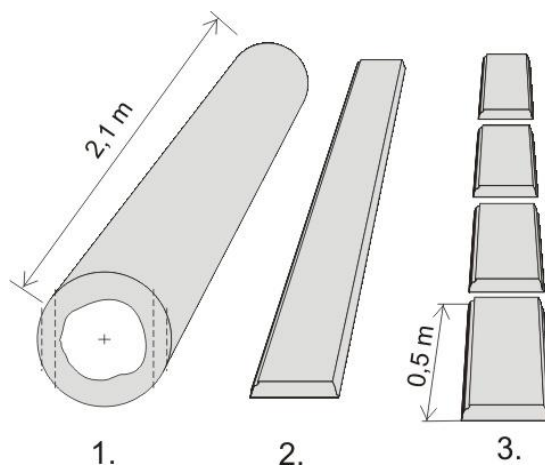
Slika 17 Vpliv oscilirajočih klimatskih pogojev na kinetiko sušenja bukovine (B1 – referenca, B2 – hitro osciliranje klime, B3 – počasno osciliranje klime) (Welling in sod., 2003).

Figure 17 Drying kinetics of beechwood at cyclic changes of climatic conditions (B1-control, B2-fast changes, B3-slow changes) (Welling in sod., 2003).

3 MATERIAL IN METODE

3.1 IZBOR IN PRIPRAVA MATERIALA

V vseh sušilnih eksperimentih smo proučevali kinetiko sušenja lesa evropske bukve (*Fagus sylvatica* L.). V ta namen smo na skladišču sveže hlodovine izbrali 3 hlode, dolžine 2,1 m. Hlodi so bili iz zimske sečnje, povprečnega premera 45 cm, brez vizualno zaznanega rdečega srca. Na tračnem žagalnem stroju smo iz dveh strani hlodov v smeri od skorje proti strženu, iz prevodnega dela beljave izžagali po eno tangencialno orientirano desko, debeline 32 mm. Deske so bile v nadaljevanju vzdolžno krojene na zaporedne obdelovance dolžine 0,5 m. Temu je sledila zaščita obdelovancev s parotesno PVC folijo in postopno zamrzovanje ($-10\text{ }^{\circ}\text{C/h}$) v zamrzovalni skrinji do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Slika 18).

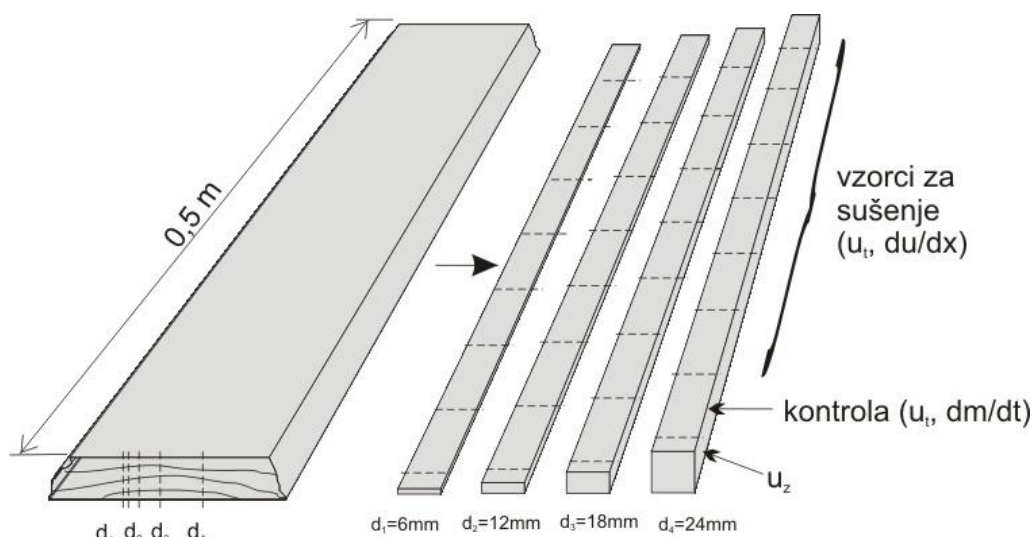


Slika 18 Izdelava tangencialnih desk (2.) iz sveže beljave bukovine in primarno razžaganje obdelovancev (3.).

Figure 18 Sawing of tangentially oriented boards from sapwood of beech (2.) and basic sampling scheme (3.).

Pred sušilnimi eksperimenti je sledilo najprej postopno odtajanje ($+10\text{ }^{\circ}\text{C/h}$) obdelovancev do sobne temperature ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Obdelovanci so bili nato na skobeljnem stroju poravnani, ter debelinsko poskobljani do debeline 25 mm.

Iz srednjega dela polovice obdelovancev so se nato s tračnim žagalnim strojem vzporedno izžagale lamele nazivnih debelin 6, 12, 18 in 24 mm (Slika 19). Druga polovica obdelovancev je bila namenjena za izdelavo lamel s skobljano površino. V tem primeru so bile lamele prvotno izžagane na krožnem žagalnem stroju, z debelinsko nadmero 1 mm, v debelinah 7, 13, 19 in 25 mm. Ta serija lamel se je nato na sušilni površini še dodatno poskobljala, z 1 mm odvzemom, na enake debeline (6 do 24 mm), kot pri prvi skupini.



Slika 19 Izdelava radialno orientiranih lamel in serij preizkušancev iz bukovine za stacionarne sušilne eksperimente.

Figure 19 Sawing pattern for series of radially oriented specimens of beechwood of different thicknesses for drying experiments at constant climatic conditions.

3.1.1 Priprava preizkušancev za stacionarne sušilne eksperimente

Iz posamične lamele so bili pred sušenjem v svežem stanju odžagani 25 mm dolgi preizkušanci, namenjeni za določitev začetne vlažnosti (u_z). Uporabili smo standardno gravimetrično metodo (EN 13183-1), s sušenjem preizkušancev do absolutno suhega stanja v laboratorijskem sušilniku pri 103 ± 2 °C. Začetno vlažnost lesa smo določili po enačbi:

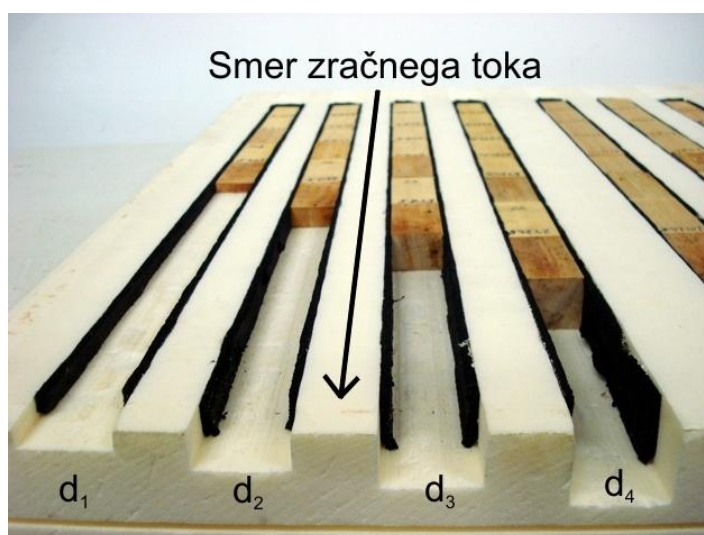
$$u_z = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 = \frac{m_{vode}}{m_0} \times 100 \quad \dots(36)$$

m_1 masa preizkušanca v vlažnem stanju [g],
 m_0 masa preizkušanca v absolutno suhem stanju [g] in
 m_{vode} masa vsebovane vode [g].

Preostanek lamel smo vzdolžno razžagali na 8 zaporednih radialno orientiranih preizkušancev, enotne dolžine 50 mm. Na ta način smo pridobili 4 serije preizkušancev za sušenje lesa z osnovnimi dimenzijami:

1. serija: $R \times T (d_1) \times L = 25 \times 6 \times 50$ mm
2. serija: $R \times T (d_2) \times L = 25 \times 12 \times 50$ mm
3. serija: $R \times T (d_3) \times L = 25 \times 18 \times 50$ mm
4. serija: $R \times T (d_4) \times L = 25 \times 24 \times 50$ mm

Preizkušancem smo izmerili začetne dimenzije s kljunastim merilom z natančnostjo 0,01 mm ter začetno maso, z natančnostjo 0,001 g. Posamične serije preizkušancev smo nato vstavili v nosilne, lahke izolativne plošče iz penjenega polistirena. V ploščah smo za posamične serije preizkušancev izdelali brazde globin od 6 do 24 mm, širine 25 mm. Bočne in čelne stene brazd so bile oblepljene s 3 mm debelim tesnilom iz penjene gume. Tesnila so bila namenjena za preprečevanje izhlapevanja vode z bočnih površin. Prožnost tesnil je omogočala stik z bočno površino preizkušancev skozi celoten proces sušenja, tudi pri vlažnostih pod točko nasičenja celičnih sten, kjer je prišlo do postopnega krčenja lesa. V eksperimentih je bil zračni tok usmerjen vzdolž serij obdelovancev, vzdolžno s smerjo lesnih vlaken (Slika 20), pri čemer je bila sušenju izpostavljena zgolj ena površina. V eksperimentih smo predpostavili enodimenzijsko, enostransko sušenje lesa.



Slika 20 Serije preizkušancev, različnih debelin ($d_1 = 6$ mm, $d_2 = 12$ mm, $d_3 = 18$ mm, $d_4 = 24$ mm), za stacionarne konvekcijske sušilne eksperimente.

Figure 20 Series of specimens of beechwood with various thicknesses ($d_1 = 6$ mm, $d_2 = 12$ mm, $d_3 = 18$ mm, $d_4 = 24$ mm) for convectional drying at constant drying conditions.

3.1.2 Priprava preizkušancev za konvekcijsko sušenje v adaptivnih pogojih

Postopek izdelave preizkušancev za sušenje v adaptivnem sušilnem procesu je bil v osnovi identičen postopku pri preizkušancih za stacionarne sušilne eksperimente. V tem primeru so bili iz lamel prav tako izžagani preizkušanci za določitev začetne vlažnosti (SIST EN 13183-1) (Enačba 36). Preostanek lamele pa je bil pri tem vzdolžno razžagan na 4 zaporedne radialno orientirane preizkušance za postopke adaptivnega sušenja lesa, ki so bili dolgi 100 mm. V procesu adaptivnega sušenja smo proučevali zgolj preizkušance z žagano površino, dveh debelin, t.j. 12 in 24 mm:

1. serija: $R \times T (d_2) \times L = 25 \times 12 \times 100 \text{ mm}$
2. serija: $R \times T (d_4) \times L = 25 \times 24 \times 100 \text{ mm}$

Preizkušancem smo izmerili začetne dimenzije s kljunastim merilom z natančnostjo 0,01 mm ter začetno maso, z natančnostjo 0,001 g. Pri adaptivnem sušenju so se preizkušanci posamično vstavljali v izoliran nosilni podstavek. Izvedba nosilnega podstavka s tesnjenjem je bila enaka kot pri izolativnih nosilnih ploščah (gl. Pogl. 3.1.1). V eksperimentih adaptivnega sušenja je bil zračni tok prav tako usmerjen vzdolž preizkušancev, vzporedno s smerjo lesnih vlaken (Slika 21). Skozi celoten proces adaptivnega sušenja je bil nosilni podstavek s preizkušancem obešen na natančno laboratorijsko tehtnico ($\Delta m = 0,001 \text{ g}$), ki je bila vključena v merilni del regulacijskega sistema.



Slika 21 Priprava preizkušanca v postopku konvekcijskega sušenja lesa v adaptivnih pogojih.

Figure 21 Holder with drying specimen for drying at adaptive conventional drying conditions.

3.2 KONVEKCIJSKO SUŠENJE LESA PRI STACIONARNIH SUŠILNIH POGOJIH

3.2.1 Sušilna oprema in eksperimentalna zasnova

Stacionarne sušilne eksperimente smo izvajali v laboratorijskem sušilnem kanalu TLS-01. Krmiljenje procesa sušenja smo izvajali preko programabilnega logičnega krmilnika DPC-420, ki nadzoruje delovanje toplotne črpalke, grelca, parnega vlažilnika in ventilatorja v zaprtem krožnem sistemu. Sistem krmiljenja omogoča natančnost vzdrževanja temperature na $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, reguliranje relativne zračne vlažnosti na 1% , ter reguliranje hitrosti do $0,1 \text{ m/s}$. V eksperimentalno komoro sušilnega kanala, s prečnim prerezom $0,2 \text{ m}^2$ (višina $\times$ širina: $0,4 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$) in dolžino $0,7 \text{ m}$, smo namestili nosilne izolativne plošče s serijami preizkušancev za izvajanje stacionarnih sušilnih eksperimentov (Slika 22).

Pozicioniranje nosilnih izolativnih plošč je potekalo na osnovi meritev osnovnega profila hitrosti zraka v eksperimentalni komori. Pri tem smo najprej določili hitrostno polje v prazni eksperimentalni komori. V ta namen smo uporabljali digitalni prenosni anemometer Testo-435/4 s sondo z žarilno nitko, ki omogoča določanje hitrosti zraka na 0,01 m/s natančno. Sledilo je določanje potrebnih prečnih prerezov ter razmikov med posameznimi ploščami ter postavljanje le teh v eksperimentalno komoro. Po pozicioniranju smo izvedli 9-točkovno merjenje hitrosti gibanja zraka po površini nosilnih plošč, na oddaljenosti 5 mm od površine (Slika 22).



Slika 22 Konvekcijski sušilni kanal TLS-01 (zg. levo) s PLC krmilnikom (sp. levo) in z eksperimentalno komoro (sp. desno).

Figure 22 Conventional drying tunnel TLS-01 (top-left) with PLC controller (bottom-left) and experimental chamber (bottom-right).

3.2.2 Pogoji in potek eksperimentiranja pri stacionarnih pogojih

V stacionarnih sušilnih eksperimentih smo proučevali kinetiko sušenja pri konstantni temperaturi sušenja 30 °C ter pri relativni zračni vlažnosti 85%. Ti pogoji so bili vzdrževani skozi celoten sušilni proces. Z uporabo dveh nazivnih sušilnih hitrosti v prostem delu sušilnega kanala, t.j. 1,5 m/s in 4,8 m/s, pa smo v eksperimentalni komori dosegli različne hitrosti gibanja zraka nad sušilno površino posamičnih serij preizkušancev v razponu od 0,6 do 7,6 m/s. Z upoštevanjem 4 debelin preizkušancev ter 5 hitrosti gibanja zraka smo skupno vzpostavili 20 različnih pogojev sušenja (Preglednica 1).

Preglednica 1 Eksperimentalni pogoji v stacionarnih sušilnih eksperimentih pri štirih debelinah preizkušancev: 6, 12, 18 in 24 mm.

Table 1 Convictional drying at constant drying conditions of beechwood specimens with various thicknesses: 6, 12, 18 and 24 mm.

	T = 30 °C, φ = 85%
v ₁ [m/s]	0,6
v ₂ [m/s]	1,2
v ₃ [m/s]	2,5
v ₄ [m/s]	4,5
v ₅ [m/s]	7,6

3.2.2.1 Spremljanje kinetike sušenja v stacionarnih pogojih

Potek sušenja smo spremljali s pomočjo intervalnega tehtanja kontrolnega preizkušanca v posamezni seriji na laboratorijski tehtnici (Exacta 300 EB). Na osnovi predhodno določene začetne vlažnosti (u_z) posamične serije preizkušancev (Enačba 36), smo trenutno vlažnost (u_t) posamične serije preizkušancev določali po enačbi:

$$u_t = \frac{m_t}{m_z}(u_z + 100) - 100 \quad \dots(37)$$

Oznake:

m_t masa kontrolnega preizkušanca posamične serije v času t [g],

m_z začetna masa kontrolnega preizkušanca [g].

Masni tok vode ($\dot{m}$), ki se izloča s površine izhlapevanja (A) v okoliški zrak, smo določali na osnovi razlike mas kontrolnega preizkušanca med posameznimi tehtanji:

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot \frac{1}{A} = \frac{m_i - m_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \cdot \frac{1}{A} \quad \dots(38)$$

Oznake:

m_i, t_i masa kontrolnega preizkušanca v času t_i [g],

m_{i-1}, t_{i-1} masa kontrolnega preizkušanca v času t_{i-1} [g].

3.2.2.2 Vrednotenje izločanja proste vode iz lesa pri sušenju s stacionarnimi pogoji z rešitvijo enačbe prvega reda

Izločanje proste vode iz lesa s konvekcijskim sušenjem pri konstantnih klimatskih pogojih lahko proučujemo tudi z odzivom sistema na hipno, konstantno zunanjo motnjo. Pri tem je karakterističen prehod sistema v novo stacionarno stanje, ki ga lahko opišemo kot sistem 1. reda z diferencialno enačbo (Bučar, 2009b):

$$\tau \frac{dm}{dt} + m = G\Phi(t) \quad \dots(39)$$

Oznake:

- t čas [s],
- τ časovna konstanta [s],
- m masa [g],
- G stacionaren odziv sistema [g] in
- $\Phi(t)$ prehoden odziv sistema [].

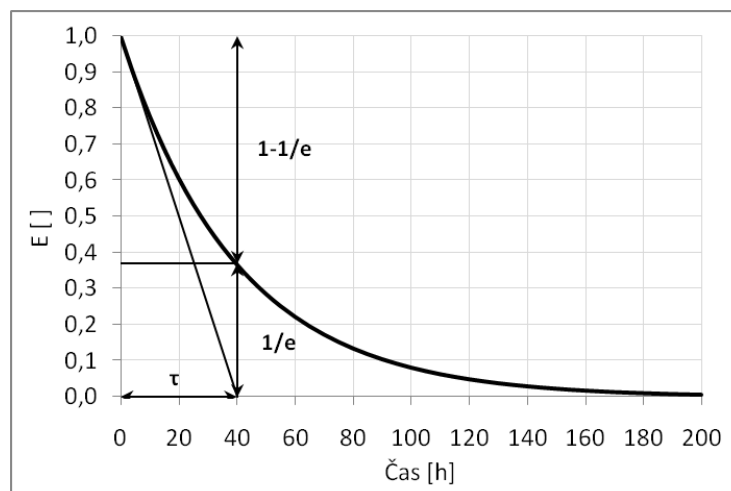
V zgornji enačbi maso sistema (m), t.j. preizkušanca, nadomestimo z njegovo vlažnostjo (u). Pri tem uvedemo začetno vlažnost preizkušanca (u_z), vlažnost preizkušanca v določenem času (u_t) ter končno, t.j. ravnovesno vlažnost (u_r), ekvivalentno stacionarnemu odzivu (G), doseženo po dovolj dolgem času uravnovešanja. Za primer hipne obremenitve v času $t = 0$, z začetnim pogojem $u = u_z$, lahko rešitev (Enačba 39) zapišemo v obliki:

$$u_t = u_r + (u_z - u_r) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \dots(40)$$

Izraz (Enačba 40) lahko preoblikujemo, tako da dobimo odvisnost povprečne brezdimenzijske spremembe vlažnosti lesa (E) od časa sušenja (t):

$$\frac{u_t - u_r}{u_z - u_r} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \dots(41)$$

Ko je izpolnjen pogoj $t = \tau$, bo spremenljivka u_t dosegla 63,2% hipne obremenitve G. Čas povečevanja odziva imenujemo čas, ki je potreben za doseg 90% hipne obremenitve, ter je dosežen pri $2,3 \times \tau$. Za končni odziv predpostavimo da je običajno dosežen po $5 \times \tau$, oz. $1 - e^{-5} = 0,993$ (Slika 23).



Slika 23 Časovni odziv sistema prvega reda na hipno nespremenljivo zunanjo motnjo.

Figure 23 Time response of First Order System (FOS).

V primeru sušenja lesa iz svežega stanja pri stacionarnih sušilnih pogojih je pričakovati, da τ ni konstanta, ker se permeabilnost ter efektivna prevodnost lesa z lesno vlažnostjo spreminjata (Cloutier in Fortin, 1991; Cloutier in Fortin, 1993), prav tako pa so potrdili tudi odvisnost kapilarnega tlaka od stopnje nasičenja por (Trenard, 1980; Spolek in Plumb, 1981). Hkrati lahko pričakujemo, da se časovna konstanta sistema spremeni, ko preidemo v difuzijski način izločanja vode iz lesa. Prehod v difuzijski način izločanja lesne vlažnosti je mogoč že pri povprečni vlažnosti lesa bistveno nad vlažnostjo nasičenja celičnih sten, še posebej pri manj permeabilnih lesnih vrstah (Pang in sod., 1994; Wiberg in Moren, 1999). Tako smo za proučevanje izločanja proste vode z modelom 1. reda uporabili le začetni vlažnostni interval, do dosežene 70% povprečne vlažnosti lesa. S spremljanjem lesne vlažnosti preizkušancev smo z logaritmiranjem izraza (Enačba 41) računali časovne konstante z enačbo:

$$\tau = -\frac{t}{\ln\left(\frac{u_t - u_r}{u_z - u_r}\right)} \quad \dots(42)$$

Časovna konstanta (τ) predstavlja celotni sušilni upor (R_c) sestavljen iz prestopnega upora na površini preizkušancev ter notranjega snovnega upora. Zunanji prestopni upor lahko zapišemo z recipročno vrednostjo snovne prestopnosti ($1/h_m$), notranji snovni upor pa je odvisen od permeabilnosti lesa (k_p). Velikost snovnega toka, lesna vlažnost in vlažnostni gradient vplivajo na notranjo in zunanjo snovno upornost, kar onemogoča enostavno razstavljanje celotnega sušilnega upora na ti dve komponenti. Tako lahko časovno

konstanto sistema zapišemo le kot produkt celotnega sušilnega upora (R_c) ter povprečne vlažnostne kapacitete preizkušanca (C_u):

$$\tau = R_c \cdot C_u \quad \dots(43)$$

3.2.2.3 Analiza masnega toka vode pri sušenju lesa s stacionarnimi sušilnimi pogoji

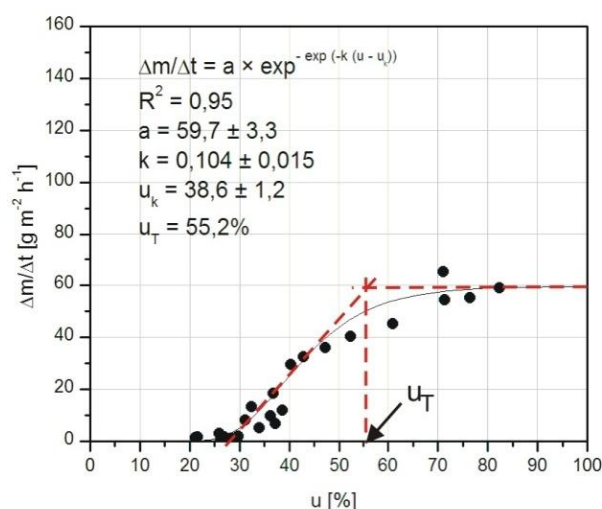
Potek sušenja preizkušancev 4 debelin pri konstantnih klimatskih pogojih smo ob variiranju hitrosti gibanja zraka proučevali tudi glede na dosežen masni tok vode. Pri tem smo predvidevali, da na začetku sušenja, pri dovolj blagih pogojih, obstaja faza konstantne sušilne hitrosti, kot so to potrdile nekatere druge raziskave, pri sušenju svežega, dovolj permeabilnega lesa (Milota in Tschernitz, 1990; Moren in Sehstedt, 1999; Wiberg in Moren, 1999; Tremblay in sod., 2000; Perre in Turner, 2007). S pričetkom zniževanja vlažnosti lesa smo enako kot pri analizi kinetike sušenja z modelom 1. reda (Poglavje 3.2.2.2) predvideli postopno zmanjševanje masnega toka, kar je mogoče pripisati zmanjševanju efektivne prevodnosti lesa (Cloutier in Fortin, 1991; Cloutier in Fortin, 1993) ter povečevanju kapilarnega tlaka (Trenard, 1980; Spolek in Plumb, 1981). Med več različnimi analitičnimi modeli, ki opisujejo pričakovano sigmoidno obliko odvisnosti masnega toka od časa sušenja ali od vlažnosti lesa, kar sledi iz odvoda odziva sistema 1. reda na hipno nespremenljivo zunanjo motno (Enačba 40), smo s testi potrdili najboljše ujemanje eksperimentalnih podatkov z asimetrično Gompertz-ovo funkcijo:

$$\frac{\dot{m}}{A} = a \cdot e^{-e^{-k(u-u_k)}} \quad \dots(44)$$

Oznake:

- a asimptota funkcije oz. začetni masni tok pri teoretično konstantni sušilni hitrosti [$\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$],
- k hitrost pojemanja masnega toka s padanjem povprečne lesne vlažnosti [1/%] in
- u_k povprečna vlažnost lesa v prevoju funkcije [%].

Prvi odvod funkcije po povprečni vlažnosti lesa ($b = a \cdot k/e$) v prevojni točki (u_k) smo uporabili za določitev enačbe tangente skozi prevojno točko (u_k), ter določitev pojemka masnega toka (b) v tej točki (u_k). Z določitvijo presečišča tangente skozi prevojno točko (u_k) in asimptote (a), pa smo določili teoretično vlažnost prehoda (u_T) oz. tranzicije procesa v fazo padajoče sušilne hitrosti. Pri tej teoretični povprečni vlažnosti lesa pride do značilnega zmanjšanja masnega toka na zgolj 84% začetne vrednosti ($a(u_T) = 0,84 \times a$). Sklepali smo, da sušenje lesa pod to vlažnost ireverzibilno preide v območje padajoče sušilne hitrosti, kjer je v celoti odvisno od notranjega snovnega upora (Slika 24). Celotno obdelavo podatkov smo izvedli s programsko opremo OriginPro 8.0.

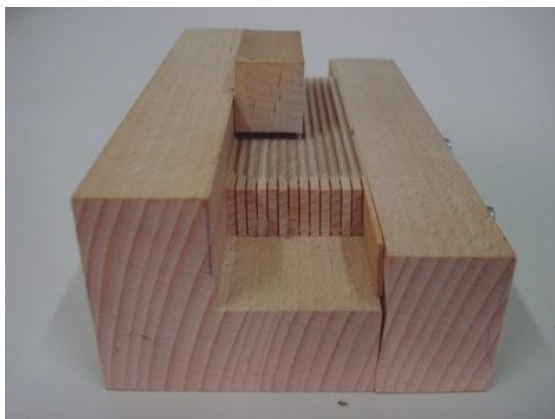


Slika 24 Analiza masnega toka vode: a – začetni masni tok vode, k – hitrost pojemanja masnega toka vode s padanjem povprečne lesne vlažnosti, u_k – prevoj funkcije, u_T – vlažnost ireverzibilnega prehoda v fazo padajoče sušilne hitrosti.

Figure 24 Water mass flow analysis: a - initial water mass flow, k - rate of water mass flow decrease, u_k – inflection point, i.e. maximum rate of change of mass flow, u_T - transition moisture content.

3.2.2.4 Določanje vlažnostnega gradienta

Za vlažnostni gradient smo uporabili preostale zaporedne preizkušance v posamezni seriji ($n = 7$). Za interval določanja vlažnostnega gradienta smo uporabili 10% padanje povprečne lesne vlažnosti, ki smo jo spremljali s kontrolnim preizkušancem (Enačba 37). Vlažnostni profil smo določali destruktivno, s cepljenjem preizkušancev v lamele, na 3 mm intervalu (Slika 25). Določanje vlažnosti posameznih lamel je potekalo po standardni, gravimetrični metodi (SIST EN 13183-1), s tehtanjem lamel v vlažnem in absolutno suhem stanju (Enačba 36).



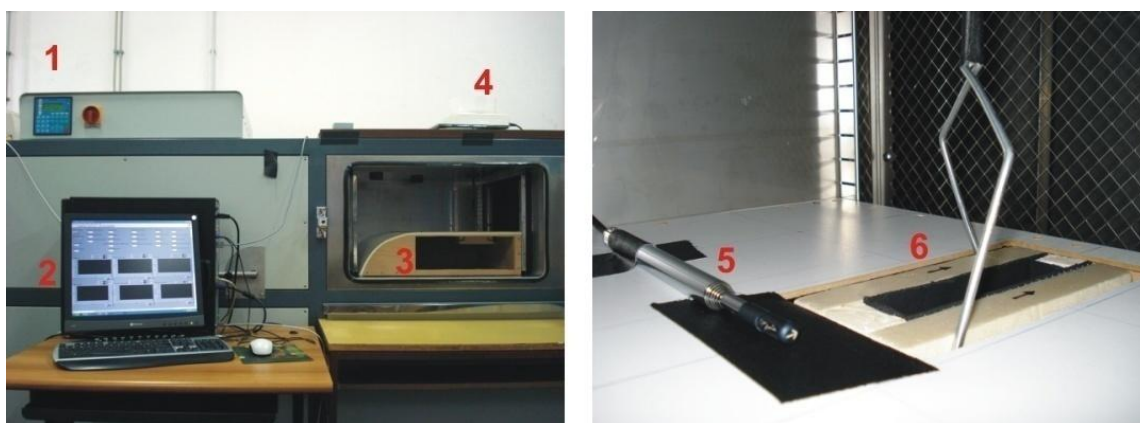
Slika 25 Gravimetrično določanje vlažnostnega profila v preizkušancih s cepljenjem na lamele ($\Delta x = 3$ mm).

Figure 25 Gravimetrical determination of moisture content distribution at beechwood samples by cleaving ($\Delta x = 3$ mm).

3.3 KONVEKCIJSKO SUŠENJE LESA PRI ADAPTIVNIH POGOJIH

3.3.1 Sušilna oprema in eksperimentalna zasnova

Eksperimente adaptivnega sušenja lesa smo prav tako izvajali v laboratorijskem sušilnem kanalu TLS-01. V tem primeru smo v eksperimentalno komoro postavili usmerjevalnik gibanja zraka, v katerega smo na začetku postopka namestili obešalo z nosilnim podstavkom in preizkušancem za sušenje. Obešalo z nosilcem preizkušanca smo pri tem prosto vpeli na laboratorijsko tehtnico (Exacta 300 EB), zgornjo ravnino preizkušanca pa smo s pomočjo nivelirnega vijaka izravnali z ravnino usmerjevalnika. Na lokaciji preizkušanca, t.j. 20 mm pred preizkušancem ter 0,5 mm nad površino, smo z digitalnim anemometrom Testo-435/4 s sondo z žarilno nitko, določali hitrost zraka na 0,01 m/s (Slika 26). Tako kot pri stacionarnih sušilnih eksperimentih smo tudi v tej eksperimentalni zasnovi predpostavili enodimenzijsko enostransko sušenje lesa.



Slika 26 Oprema za adaptivno sušenje lesa: 1 - PLC krmilnik (DPC-420), 2 - PC s programsko opremo LabVIEW 8.0, 3 - usmerjevalnik zračnega toka, 4 - tehtnica (Exacta 300 EB), 5 - sonda za merjenje hitrosti zraka (Testo 435-4), 6 - obešalo z nosilcem za preizkušaneec.

Figure 26 Equipment for the adaptive drying of wood: 1-PLC controller (DPC-420), 2 – PC with LabVIEW 8.0 software, 3 – air flow liner, 4 – electronic balance (Exacta 300 EB), 5 – anemometer probe (Testo 435-4), 6 – holder of drying sample.

Preko osebnega računalnika smo s programsko opremo LabVIEW 8.0®, proizvajalca National Instruments Ltd., s serijsko povezavo komunicirali s PLC krmilnikom DPC-420 in z laboratorijsko tehtnico Exacta 300 EB.

3.3.2 Algoritem vodenja sušilnega procesa

Algoritem za sušenje lesa pri adaptivnih procesnih pogojih smo razvili na osnovi ideje o prilagajanju hitrosti sušenja lesa dejanski sposobnosti materiala za izločanje vode (Bučar, 2009a). Avtor navaja, da lahko s sušilnimi pogoji neposredno učinkujemo le na zunanji snovni upor, posredno pa vplivamo tudi na sušilni potencial ter na notranji snovni upor v samem sušečem materialu. Pri sušenju lesa večinoma prevladuje notranji snovni upor, le ta pa je odvisen od lesne vrste, strukture materiala, orientacije tkiv ter tudi fiziološkega stanja. Med procesom sušenja se običajno notranji snovni upor še povečuje s padanjem lesne vlažnosti ali s povečevanjem sušilne hitrosti ter posledičnega vlažnostnega gradienta. V splošnem predstavlja sušenje pri adaptivnih pogojih diskretno povečevanje sušilnega potenciala, ko pri tem narašča tako masni tok izločene vode s sušeče površine lesa, kot tudi v notranjosti preizkušanca. Obratno, se v primeru negativnega odziva lesa na diskretno povečanje sušilnega potenciala zahteva manjšanje sušilnega potenciala. V iteracijah tako sledi poizkušanje ponovnega dvigovanja sušilnega potenciala, oz. pojemanje v primeru negativnega odziva materiala. V takšnem zaprto-zančnem sistemu so tako nastavljeni sušilni pogoji vsake prihodnje iteracije odvisni od rezultata, t.j. doseženega masnega toka vode, v predhodni iteraciji. Pričakovati je, da takšno prilagajanje pogojev sušenja povzroča tudi kratkotrajno nihanje sušilne hitrosti, ki pa bi naj bila integralno gledano velika, ter glede na celotni sušilni upor tudi optimalna.

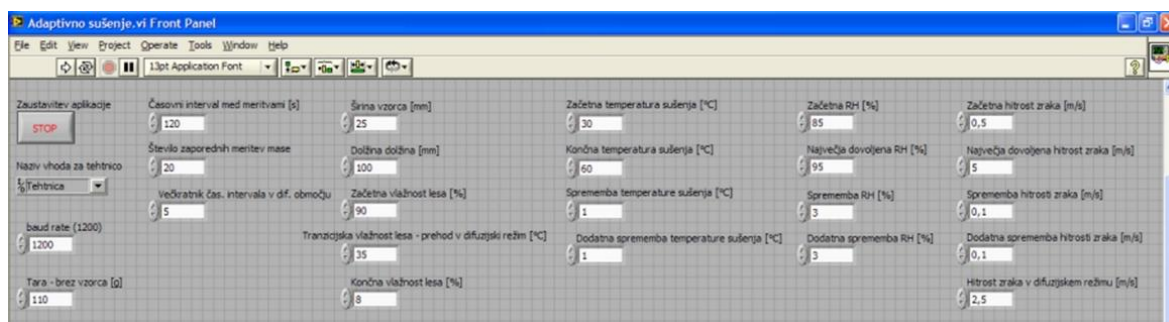
3.3.2.1 Značilnost, zagon in delovanje programa »Adaptivno sušenje«

Algoritem za adaptivno vodenje sušilnega procesa smo izdelali v grafičnem programskem okolju LabVIEW 8.0® (Slika 28). Program »Adaptivno sušenje« se v splošnem deli na 2 dela:

1. sklop: Komunikacijski del

Ta del je namenjen komunikaciji uporabnika s programsko opremo. V pogovornem oknu se zahteva vnos osnovnih podatkov o preizkušancu lesa, kot so začetna (u_z), zelena končna vlažnost (u_k) in tranzicijska vlažnost (u_D), t.j. vlažnost pri kateri algoritem preide v delovanje po difuzijskem režimu. Vnesti je potrebno tudi širino in dolžino preizkušanca. Pri sušilnih parametrih mora uporabnik definirati še začetno temperaturo sušenja T_z , največjo dovoljeno končno temperaturo sušenja T_{maks} , ter najmanjši interval temperaturne spremembe ΔT . Podobne nastavitve so potrebne prav tako za relativno zračno vlažnost (ϕ_z – začetna, ϕ_{maks} – najvišja dovoljena ter $\Delta \phi$ – najmanjši interval spremembe relativne zračne vlažnosti) kot tudi hitrost gibanja zraka (v_z – začetna, v_{maks} – najvišja dovoljena ter Δv – najmanjši interval hitrosti gibanja zraka ob obdelovancu) (Slika 27).

V tem sklopu se hkrati preko serijske komunikacije s PLC krmilnikom ter tehtnico pridobivajo tudi podatki o nastavljenih vrednostih (temperature T_n , relativne zračne vlažnosti ϕ_n in hitrosti zraka v_n) ter dejanskih vrednostih spremenljivk (temperature T_d , relativne zračne vlažnosti ϕ_d , hitrosti zraka v_d in mase preizkušanca $m_{\text{preizkušanca}}$).



Slika 27 Del pogovornega okna algoritma »Adaptivno sušenje« za vnos izhodiščnih vrednosti o preizkušancu in želenih pogojih sušenja.

Figure 27 Communication interface of adaptive drying software.

2. sklop: Odločitveni del

Odločitveni del temelji na spremljanju mase preizkušanca lesa s časom sušenja, ki se pridobiva v 1. sklopu. V tem delu se s pomočjo časovnega spremljanja mase preizkušanca izračunava dejanski masni tok vode s površine lesa ($\dot{m}_{vode}$), kot tudi sprememba masnega toka po času ($\frac{d}{dt}(\dot{m}_{vode})$; smt). Zajem navedenih spremenljivk v določenem časovnem intervalu je vključen v odločanje o sušilnem potencialu. Potrebni pogoji za povečanje sušilnega potenciala (sp) (Slika 29):

a) Pri večjem trenutnem masnem toku vode ($\dot{m}_{i+1}$) od predhodnega ($\dot{m}_i$):

$$\dot{m}_{i+1} > \dot{m}_i \wedge smt_{i+1} > smt_i; smt_{i+1}, smt_i > 0$$

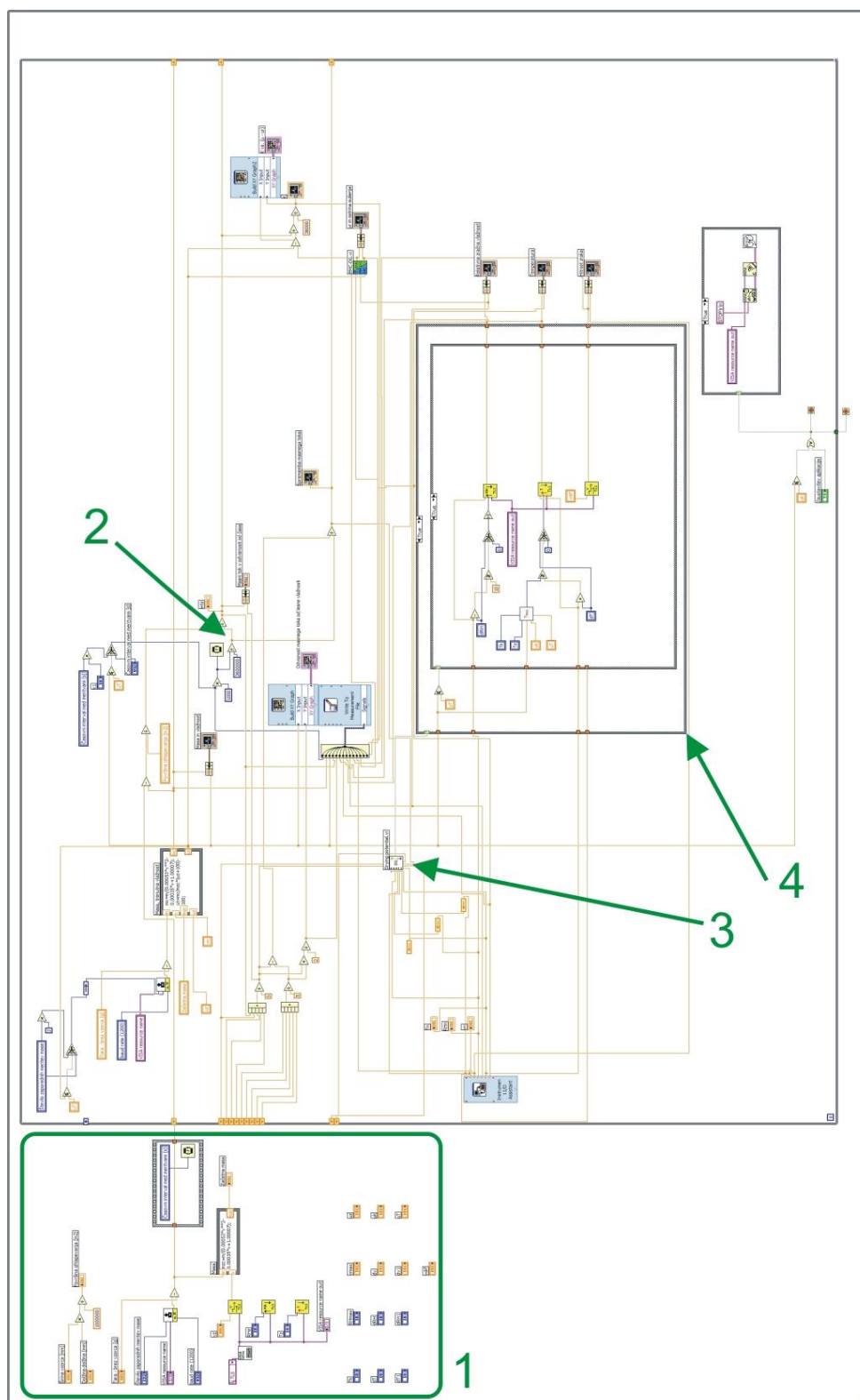
$$\dot{m}_{i+1} > \dot{m}_i \wedge smt_{i+1} < smt_i \wedge smt_{i+2} - smt_{i+1} < smt_{i+1} - smt_i; smt_{i+1}, smt_i > 0$$

b) Pri manjšem ali enakem trenutnem masnem toku vode ($\dot{m}_{i+1}$) od predhodnega ($\dot{m}_i$):

$$\dot{m}_{i+1} \leq \dot{m}_i; \dot{m}_{i+1}, \dot{m}_i < 0$$

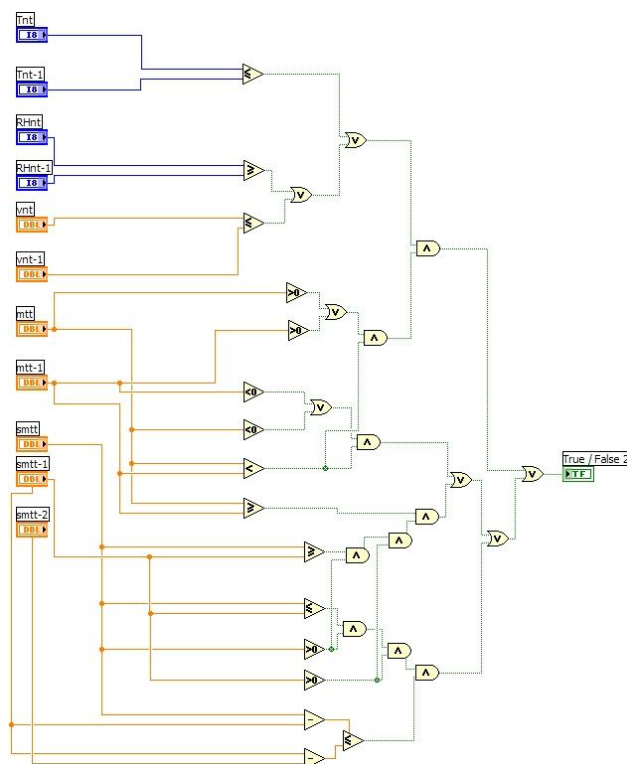
$$\dot{m}_{i+1} \leq \dot{m}_i \wedge sp_{i+1} < sp_i; \dot{m}_{i+1}, \dot{m}_i > 0$$

Sušilni potencial je pri konvekcijskem sušenju lesa v splošnem določen s temperaturo sušenja (T), relativno zračno vlažnostjo (ϕ) (ali ekvivalentno drugo spremenljivko – psihrometrsko razliko ali pa z ravnovesno vlažnostjo lesa) ter s hitrostjo gibanja zraka (v) ob površini lesa. V raziskavi in v algoritmu smo ločili sušilni potencial pri visokih lesnih vlažnostih za izločanje proste vode ($u > u_{\text{TNCs}}$) od tistega za sušenje lesa pod točko nasičenja lesnih vlaken (u_{TNCs}), prehod pa se je izvedel pri postavljeni tranzicijski vlažnosti (u_D ; 1. sklop). Tako smo v prvem delu sušenja za potencial uporabili relativno zračno vlažnost in hitrost gibanja zraka, pri sušenju pod u_D pa smo uporabili relativno zračno vlažnost in temperaturo sušenja. Velikost spremembe sušilnega potenciala v posameznem časovnem intervalu je bila odvisna od nastavljenih vrednosti za najmanjšo spremembo relativne zračne vlažnosti ($\Delta\phi$), hitrosti zraka (Δv) in temperature sušenja (ΔT) (1. sklop).



Slika 28 Blokovni diagram algoritma adaptivnega sušenja v LabView 8.0 (1 – osnovne nastavitve, 2 – masni tok vode, 3 – sušilni potencial, 4 – nastavitve sušilnega potenciala).

Figure 28 Block diagram of the algorithm of the adaptive drying in LabView 8.0 (1 – initial settings, 2 – water mass flow, 3 – drying gradient, 4 – drying gradient settings).



Slika 29 Blokovni diagram sušilnega potenciala v algoritmu adaptivnega sušenja.

Figure 29 Block diagram of the drying potential, used in the algorithm of the adaptive drying.

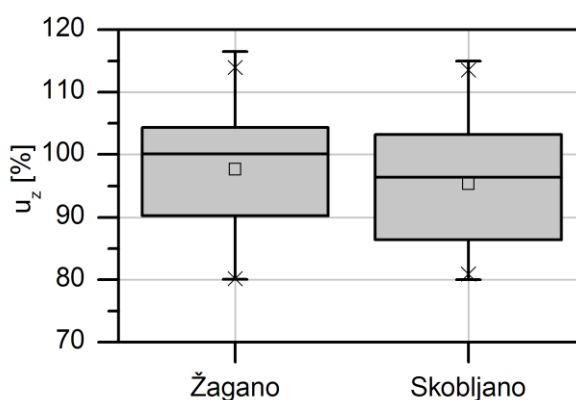
3.4 VREDNOTENJE LASTNOSTI POVRŠIN LESA

Poleg osnovne vizualne ocene površin preizkušancev za sušenje lesa smo le te proučevali tudi z mikroskopskimi tehnikami. Površine preizkušancev za sušenje lesa smo kvalitativno proučili z uporabo stereo – reflektivne mikroskopije, pod različnimi povečavami. Strukturne lastnosti lesnega tkiva na celičnem nivoju in morebitne spremembe smo preverili tudi z osnovnimi tehnikami svetlobne preseвне mikroskopije. Uporabljali smo standardne metode priprave preparatov ter tehnike barvanja. Dodatno smo pri mikroskopiranju uporabili osnovne tehnike analize 2D mikroskopske slike. Pri kvalitativni mikroskopski analizi smo se osredotočili zgolj na lesno tkivo na površini preizkušancev ter tik pod njo, na ozek segment t.i. pod-površinskega sloja preizkušancev za sušenje.

4 REZULTATI

4.1 KONVEKCIJSKO SUŠENJE LESA PRI STACIONARNIH SUŠILNIH POGOJIH

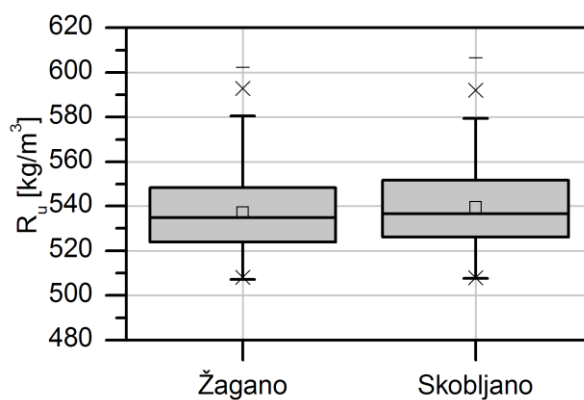
Začetna vlažnost preizkušancev v sušilnih eksperimentih je pri tračno žaganih preizkušancih znašala povprečno 97,7%, pri skobljanih pa 95,3%. Hkrati je bila dosežena tudi nizka variabilnost začetne vlažnosti, s koeficientom variacije med 9,0% in 9,7%, variacijski razmik pa je znašal 26% ($u_{\min} = 80,1\%$, $u_{\max} = 116,5\%$) (Slika 30).



Slika 30 Začetna vlažnost pri tračno žaganih in skobljanih preizkušancih bukovine.

Figure 30 Initial moisture content at sawn and planed beechwood specimens.

Neznačilne so bile tudi razlike v gostoti preizkušancev iz obeh proučevanih skupin. Nominalna gostota (R_u) tračno žaganih preizkušancev v svežem stanju je znašala 537 kg/m³, pri skobljanih preizkušancih pa 540 kg/m³. Pri nominalni gostoti je bila pričakovano variabilnost manjša, zgolj med 3,3% in 3,4%. Nominalna gostota je sicer v celotni populaciji variirala med 507 kg/m³ in 607 kg/m³ (Slika 31).

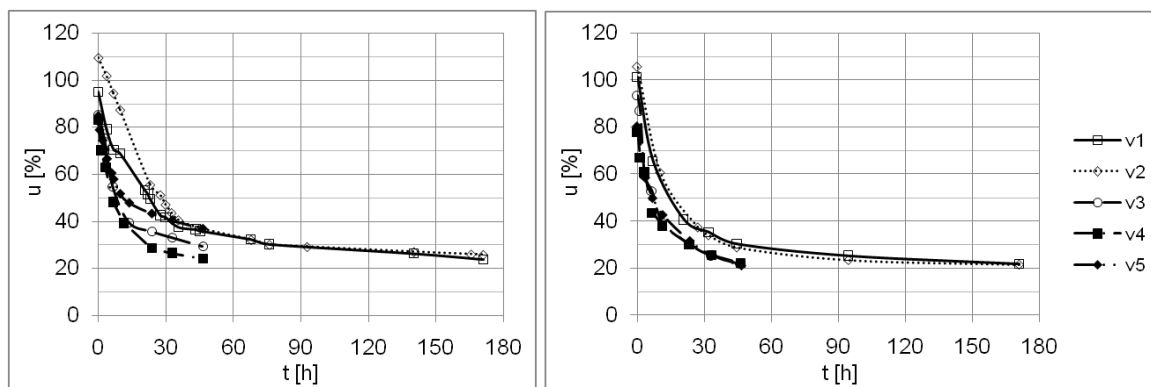


Slika 31 Nominalna gostota (R_u) v svežem stanju pri tračno žaganih in skobljanih bukovih preizkušancih.

Figure 31 Specific density (R_u) of sawn and planed beechwood specimens.

4.1.1 Kinetika sušenja bukovine, debeline 6 mm, v odvisnosti od hitrosti gibanja zraka

Sušenje serije preizkušancev, debeline 6 mm (d_1), z žagano (Ž) ali skobljano površino (S), je v splošnem potekalo najhitreje, primerjalno z debelejšimi preizkušanci (d_2 , d_3 , d_4). S povečevanjem hitrosti gibanja zraka čez površino preizkušancev se je pri obeh skupinah (S, Ž) sušenje pospeševalo, učinek pa je s padanjem vlažnosti lesa slabel, hitreje pri večjih hitrostih zraka. Pri preizkušancih z žagano površino (Ž), smo do hitrosti zraka 2,5 m/s na začetku sušenja ($u > 60\%$) ugotovili kratkotrajno fazo skorajda nespremenljive sušilne hitrosti. Pri tem se je sušilna hitrost z dviganjem hitrosti zraka od 0,6 do 2,5 m/s povečala od 2,3 %/h na 3,8 %/h. Pri višji hitrosti zraka, t.j. 4,5 m/s in 7,6 m/s, se je sušilna hitrost na začetku sušenja še nadalje povečala na 5,4 %/h oz. 5,8 %/h, vendar pa se je s padanjem lesne vlažnosti pričela tudi hitro zmanjševati (Priloga A.1-A.5, Priloga B.1-B.5, Slika 32).



Slika 32 Konvekcijsko sušenje bukovine, debeline 6 mm (d_1), z žagano- (levo) ter s skobljano površino (desno) v odvisnosti od hitrosti gibanja zraka ($v_1 = 0,6$ m/s, $v_2 = 1,1$ m/s, $v_3 = 2,5$ m/s, $v_4 = 4,5$ m/s, $v_5 = 7,6$ m/s).

Figure 32 Dependency of conventional drying kinetics of beechwood, thickness of 6 mm (d_1), with sawn- (left) and planed surface (right) on the air velocity ($v_1 = 0,6$ m/s, $v_2 = 1,1$ m/s, $v_3 = 2,5$ m/s, $v_4 = 4,5$ m/s, $v_5 = 7,6$ m/s).

Podoben učinek hitrosti gibanja zraka čez površino lesa smo zaznali tudi pri preizkušancih s skobljano površino (S) (Slika 32). Pri tej skupini se je kratkotrajna faza skorajda nespremenljive sušilne hitrosti, na začetku sušilnega procesa, pojavila zgolj pri sušenju s hitrostjo zraka 0,6 m/s in 1,1 m/s. Dosežena sušilna hitrost je znašala 2,5 %/h oz. 2,9 %/h. Pri višjih hitrostih zraka (v_3 , v_4 , v_5), se je sicer začetna sušilna hitrost še nadalje povečevala na 3,8 %/h, 5,6 %/h ter 6,0 %/h, s padanjem lesne vlažnosti pa je prišlo do njenega hitrega zniževanja. Sušenje preizkušancev s skobljano površino je v primerjavi s preizkušanci z žagano površino do dosežene 40% povprečne lesne vlažnosti potekalo nekoliko hitreje, vendar le pri hitrostih zraka do 2,5 m/s (v_3). Pri višjih hitrostih zraka ($v_4 = 4,5$ m/s in $v_5 = 7,6$ m/s) pa pozitiven učinek gibanja zraka na sušilno hitrost ni bil več zaznan.

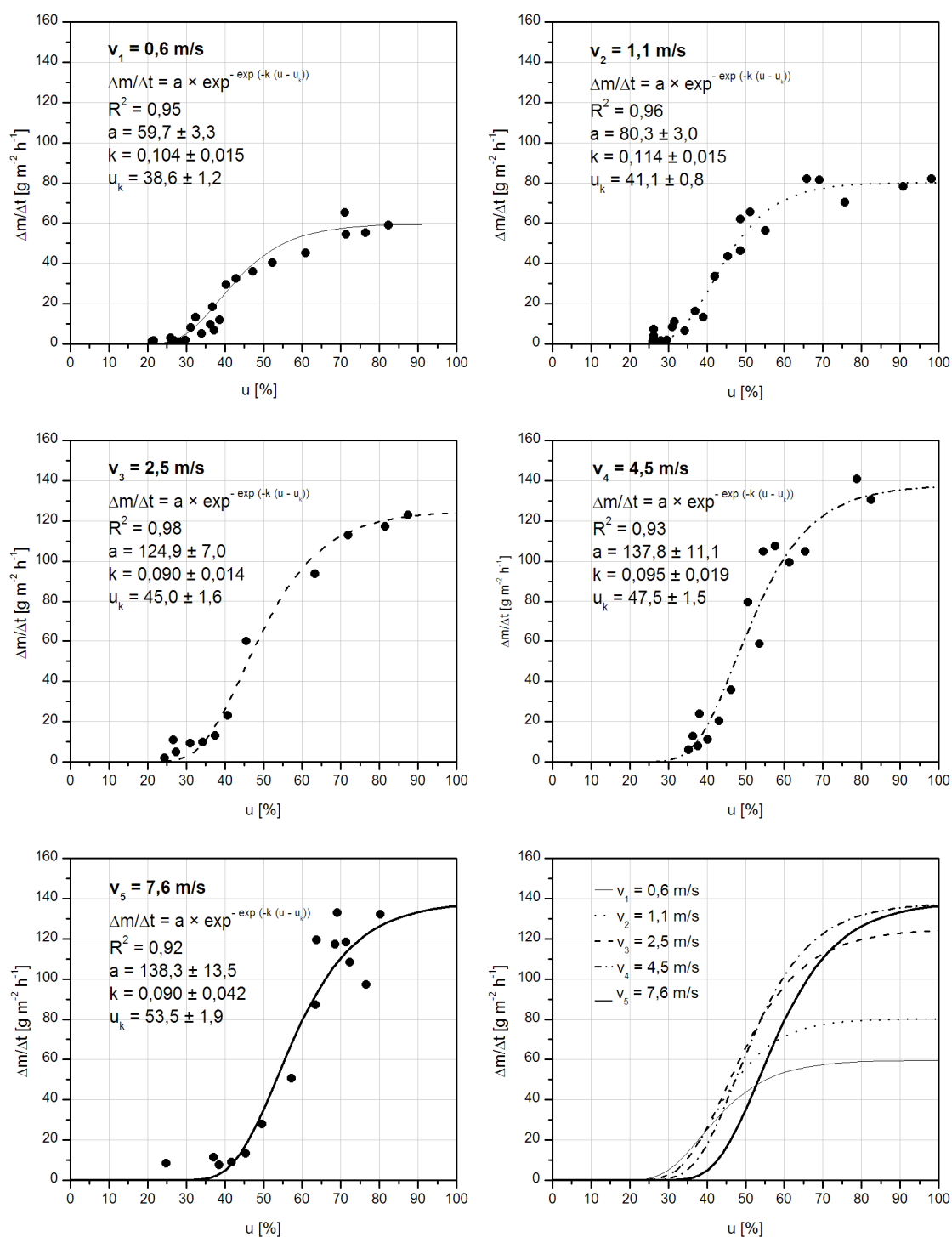
Začetni masni tok vode (a) s površine obeh skupin preizkušancev (S, Ž) prav tako izkazuje pozitivno odvisnost od hitrosti zraka nad površino preizkušancev (Preglednica 2, Slika 33, Slika 34). Pri tem smo zaznali bistveno povečanje začetnega masnega toka pri nižjih hitrostih zraka, do 2,5 m/s (v_3), ko se je masni tok vode več kot podvojil. Nadaljnje povečevanje hitrosti zraka ima precej manjši učinek, ter prispeva še največ 20% povečanja masnega toka v primeru žaganih preizkušancev, pri skobljanih preizkušancih pa zanemarljivo malo. Primerjava doseženih začetnih masnih tokov vode (a) pri preizkušancih z žagano in s skobljano površino prav tako potrjuje nekoliko hitrejše sušenje skobljanih preizkušancev do hitrosti zraka 2,5 m/s (v_3), pri višjih hitrostih zraka pa ne. Hitrost gibanja zraka pa je imela preko vzpostavljenega začetnega masnega toka (a) vpliv tudi na njegovo pojemanje odvisno od zmanjšanja lesne vlažnosti (k). Iz oblike krivulj masnega toka, pri katerih je njihov naklon odvisen od koeficienta (k) v modelu sklepamo (Preglednica 2), da je pojemanje masnega toka z zniževanjem povprečne lesne vlažnosti (u) hitrejše pri nizki začetni hitrosti sušenja. Obratno je bil takšen pojemek manjši, ko smo uporabili višjo hitrost zraka ob površini preizkušancev ter s tem dosegli večji, vendar kratkotrajni začetni masni tok.

Preglednica 2 Vrednosti koeficientov v modelu masnega toka vode (Enačba 44) (R^2 - determinacijski koeficient, a - začetni masni tok, u_k - prevoj funkcije, k - hitrost pojemanja masnega toka, b - velikost pojemka masnega toka v prevojni točki (u_k), u_T - vlažnost prehoda iz faze konstantne v fazo padajoče sušilne hitrosti) v odvisnosti od hitrosti zraka nad površino lesa (v) pri sušenju bukovih preizkušancev, debeline 6 mm (d_1), s skobljano- (S) in z žagano površino (Ž).

Table 2 Dependency of the coefficients in the model of water mass flow (Equation 44) (R^2 –coefficient of determination, a – initial water mass flow, u_k – model inflection point, k - rate of water mass flow decrease, b – water mass flow decrease at the inflection point (u_k), u_T - transition wood moisture content) on the air velocity (v) at conventional drying of beehwood, thickness of 6 mm (d_1), with sawn- (left) and planed surface (right).

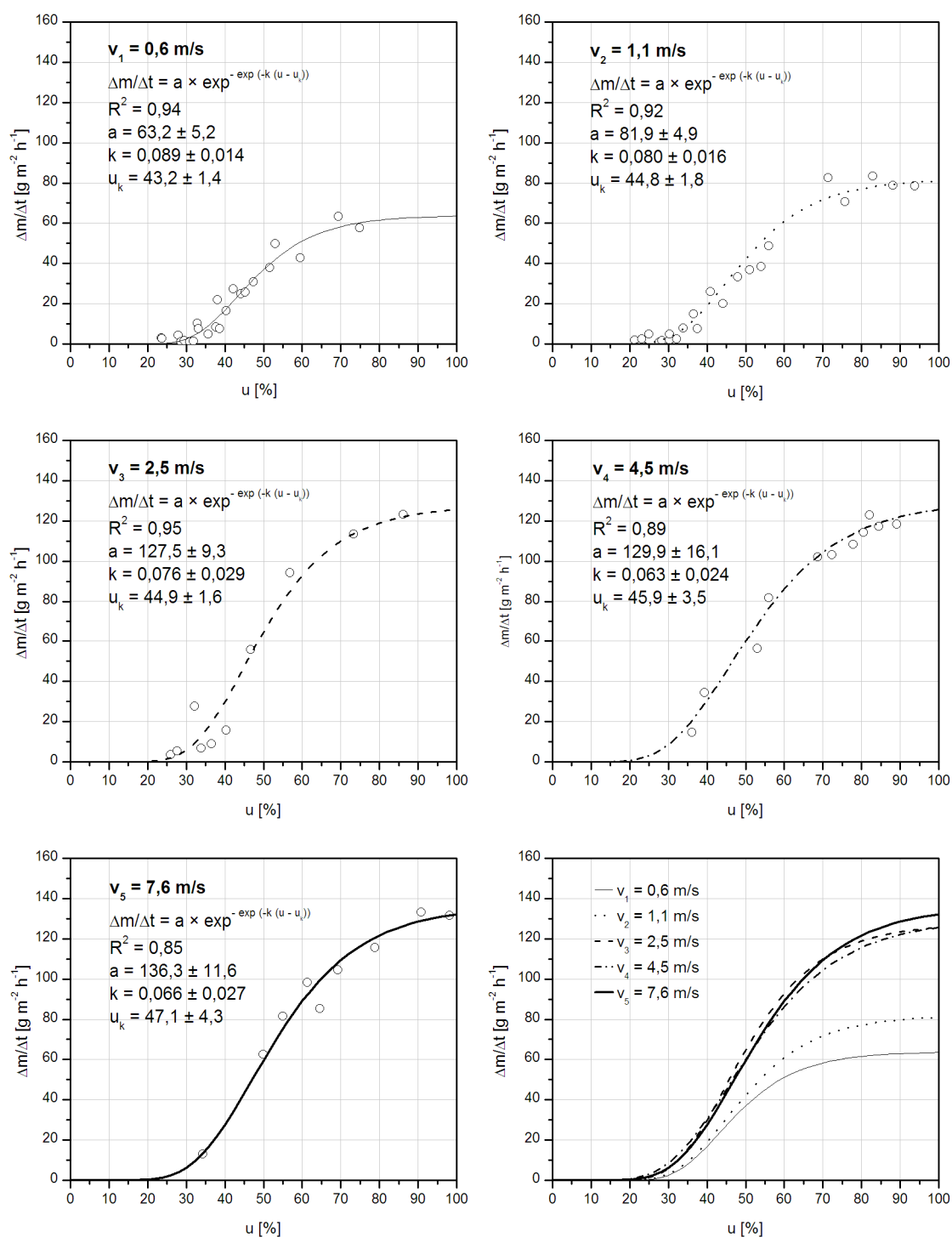
$d_1 = 6 \text{ mm}$	ŽAGANO					SKOBLJANO				
$v \text{ [m s}^{-1}\text{]}$	0,6	1,1	2,5	4,5	7,6	0,6	1,1	2,5	4,5	7,6
$R^2 \text{ []}$	0,95	0,97	0,98	0,93	0,92	0,94	0,93	0,95	0,69	0,80
$a \text{ [g m}^{-2} \text{ h}^{-1}\text{]}$	59,7	80,3	124,9	137,8	138,3	63,9	81,9	127,5	129,9	136,3
$u_k \text{ [%]}$	38,6	41,1	45,0	47,5	53,5	43,2	44,8	44,9	45,9	47,1
$k \text{ [1/%]}$	0,104	0,114	0,090	0,095	0,090	0,089	0,080	0,076	0,063	0,066
$b \text{ [g m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ %}^{-1}\text{]}$	2,3	3,4	4,1	4,8	4,6	2,1	2,4	3,5	3,0	3,3
$u_T \text{ [%]}$	55,2	56,2	64,1	65,6	72,7	62,6	66,2	67,7	73,1	73,0

Doseženi začetni masni tok vode posledično vpliva tudi na vrednost v prevoju modela (b) ter na vlažnost lesa v tej točki (u_k) (Preglednica 2). Tako primerjava pojemkov masnega toka vode v prevojni točki (u_k) pokaže, da je pojemek (b) večji pri višji hitrosti zraka na površini pri obeh serijah preizkušancev.



Slika 33 Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine z žagano površino, debeline 6 mm (d_1), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih gibanja zraka (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5).

Figure 33 Dependency of water mass flow on average wood moisture content at conventional kiln drying of sawn beechwood, thickness of 6 mm (d_1), at various air velocities (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5).

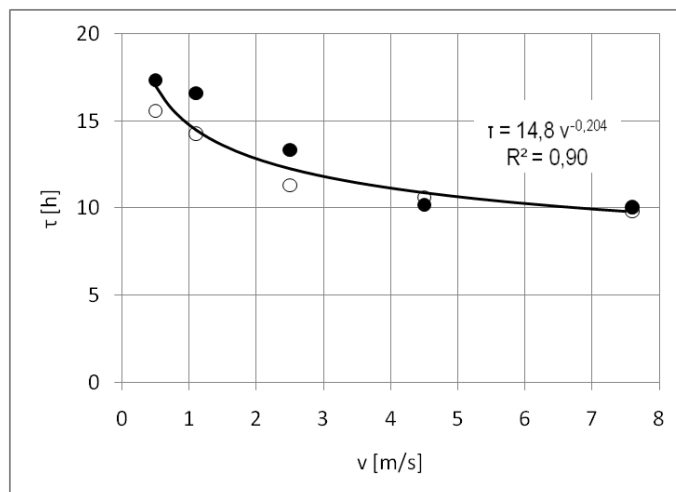


Slika 34 Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine s skobljano površino, debeline 6 mm (d_1), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih gibanja zraka (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5).

Figure 34 Dependency of water mass flow on average wood moisture content at conventional kiln drying of planed beechwood, thickness of 6 mm (d_1), at various air velocities (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5).

Rezultati kažejo, da velikost začetnega masnega toka bistveno vpliva na kinetiko sušenja v nadaljevanju sušilnega postopka. Pri primerjavi ireverzibilnih prehodov iz začetne, dokaj nespremenljive, sušilne hitrosti v fazo izrazito padajoče sušilne hitrosti ugotavljamo pozitivno odvisnost vlažnosti prehoda (u_T) od začetnega masnega toka (Preglednica 2). Najnižjo vlažnost prehoda, pri povprečni vlažnosti lesa pod 60%, smo dosegli pri preizkušancih z žagano površino pri sušenju s hitrostmi zraka 0,6 m/s (v_1) in 1,1 m/s (v_2). Sušenje lesa z višjimi hitrostmi zraka (v_3 , v_4 , v_5) je povzročilo zgodnejše prehajanje sušilnega postopka v fazo signifikantno padajoče sušilne hitrosti. Pri najvišji hitrosti zraka (7,6 m/s) se je ta prehod pri obeh serijah preizkušancev (S, Ž) zgodil že pri povprečni vlažnosti lesa nad 70%. Pri hitrostih zraka do 4,5 m/s pa ugotavljamo tudi višjo vlažnost prehoda (u_T) pri preizkušancih s skobljano površino, v primerjavi s preizkušanci z žagano površino. V tem primeru je najverjetneje že pri izločanju proste vode iz lesa prišlo do zaostajanja masnega toka vode v lesu v primerjavi s povišanim masnim tokom vode s površine preizkušancev v okolico. Ta razlika je bila večja pri preizkušancih s skobljano površino, kar je posledično povzročilo večji vlažnostni gradient v lesu (Priloga B.5). Pričakovati je, da je nastali večji vlažnostni gradient in s tem nastali večji notranji snovni upor, pri preizkušancih s skobljano površino povzročil tudi zgodnejše pojevanje masnega toka, glede na povprečno lesno vlažnost. Slednje se odraža v višji vlažnosti prehoda pri skobljanih preizkušancih, ko smo uporabili nižjo hitrost zraka.

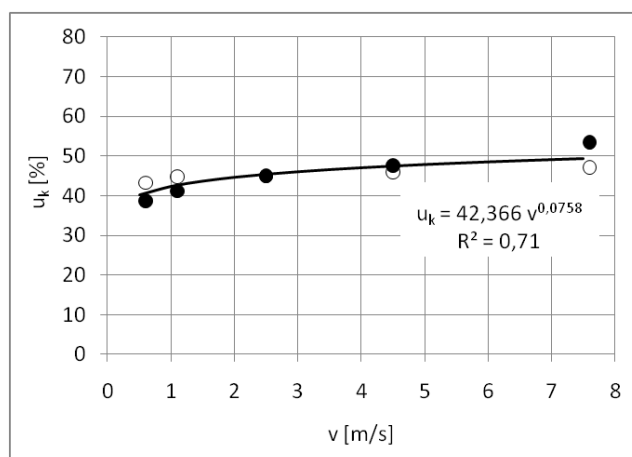
Zgornje ugotovitve potrjuje tudi analiza celotnega sušilnega upora v začetni fazi sušenja obeh skupin preizkušancev, ki smo ga določili s časovno konstanto modela 1. reda (Enačba 42). Splošno pri obeh serijah preizkušancev ugotavljamo eksponentno pojevanje časovne konstante (τ) s povečevanjem hitrosti gibanja zraka, ki pri hitrosti zraka 4,5 m/s doseže praktično konstantno, najnižjo vrednost (Slika 35). Tako se izkaže, da je pri vseh proučevanih preizkušancih, debeline 6 mm, pri hitrosti zraka 4,5 m/s ali več, že od samega začetka sušenja prevladujoč notranji snovni upor ($\tau = 9,8$ h do 10,6 h). Le ta je pri visoki lesni vlažnosti odvisen od permeabilnosti lesnega tkiva. Z nižanjem hitrosti zraka ($v \leq 4,5$ m/s) se na začetku sušenja lesa celotni sušilni upor potenčno povečuje, ter je največji pri 0,6 m/s hitrosti zraka. Pri nizkih hitrostih zraka ($v \leq 2,5$ m/s) ugotavljamo, da na celotni sušilni upor pri visoki vlažnosti lesa značilno vpliva snovna prestopnost na površini preizkušancev. Slednja pada z nižanjem hitrosti zraka, masni tok vode v notranjosti preizkušancev pa lahko sledi tistemu s površine v okolico. Hkrati je pri hitrostih zraka do 2,5 m/s zaznati tudi razlike v celotnem sušilnem uporu med preizkušanci s skobljano (S) in žagano površino (Ž). Večji celotni sušilni upor v tem območju hitrosti zraka najdemo pri preizkušancih z žagano površino ($\Delta\tau \approx 2$ h). Sklepamo lahko na nižjo snovno prestopnost (h_m) ob žagani površini preizkušancev.



Slika 35 Odvisnost časovne konstante (τ) od hitrosti zraka (v) ob površini bukovih preizkušancev, debeline 6 mm (d_1), z žagano- (●) in s skobljano površino (○).

Figure 35 Dependency of time constant (τ) on the air velocity (v), at conventional drying of beechwood, thickness of 6 mm (d_1), with sawn- (●) and planed surface (○).

Začetni masni tok (a) pa je značilno vplival tudi na vlažnost v prevoju modela masnega toka vode (u_k), pod katero poteka zgolj difuzijski transport vode iz lesa. Ta prehod je pri najnižji hitrosti zraka ($v_1 = 0,6$ m/s) dosežen blizu vlažnosti nasičenja celičnih sten (u_{TNCS}) (Slika 36). Z dviganjem hitrosti zraka ob površini preizkušancev pa prav tako pride do zgodnejšega ireverzibilnega prehoda v zgolj difuzijski transport vode iz lesa. Difuzijski način sušenja se pri hitrosti zraka 4,5 m/s ali več doseže že med 45,9% in 53,5% povprečno lesno vlažnostjo.



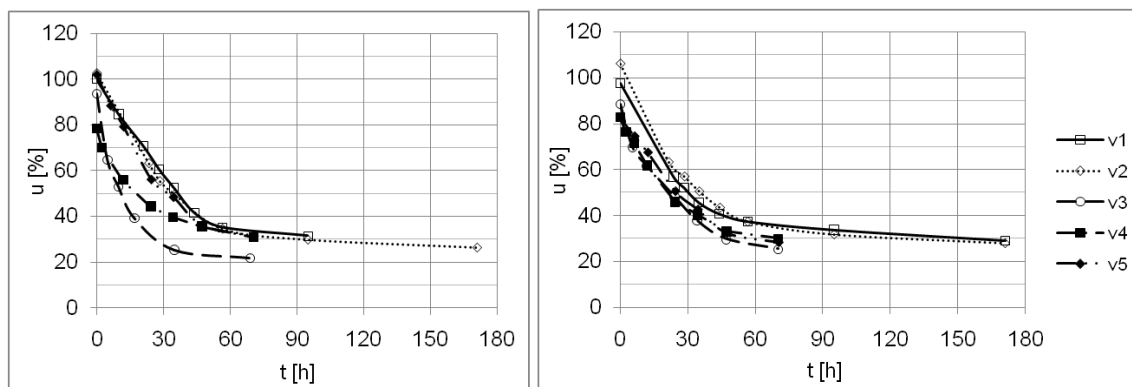
Slika 36 Odvisnost vlažnosti v prevoju modela masnega toka vode (u_k) od hitrosti zraka (v) ob površini preizkušancev bukovine, debeline 6 mm (d_1), z žagano- (●) in s skobljano površino (○).

Figure 36 Dependency of moisture content at model inflection point (u_k) on the air velocity (v) at conventional drying of beechwood, thickness of 6 mm (d_1), with sawn- (●) and planed surface (○).

4.1.2 Kinetika sušenja bukovine, debeline 12 mm, v odvisnosti od hitrosti gibanja zraka

V primerjavi s sušenjem preizkušancev bukovine, debeline 6 mm (d_1), je v splošnem sušenje preizkušancev, debeline 12 mm (d_2), potekalo počasneje, za doseganje končne vlažnosti pa so bili potrebni daljši časi. Tudi pri tej debelini lesa je povečevanje hitrosti gibanja zraka ob površini preizkušancev pozitivno vplivalo na sušilno hitrost, vendar manj kot pri tanjših preizkušancih (d_1) (Slika 37). Začetna sušilna hitrost se je splošno z dvigom hitrosti gibanja zraka ob površini preizkušancev iz 0,6 m/s (v_1) na 7,6 m/s (v_5) povečala relativno za 60%. Primerjalno, je pri tanjših preizkušancih (d_1) takšen dvig hitrosti zraka povzročil kar podvojitev začetne sušilne hitrosti.

Pri tej debelini preizkušancev (d_2) nismo zaznali značilnih razlik v začetni sušilni hitrosti med preizkušanci z žagano ($\check{Z}$) in skobljano površino (S). Odziv začetne sušilne hitrosti glede na spremembo hitrosti gibanja zraka ob površini je bil podoben pri obeh proučevanih serijah. Pri 0,6 m/s in 1,1 m/s hitrosti zraka ob površini preizkušancev je začetna sušilna hitrost znašala med 1,3 %/h do 1,4 %/h. Povečanje hitrosti zraka ob površini preizkušancev lesa na 2,5 m/s, 4,5 m/s ter 7,6 m/s je povzročilo nekoliko večji dvig začetne sušilne hitrosti, na vrednosti 2,2 m/s, 2,3 m/s ter 2,5 m/s (Priloga A.1-A.5, Priloga B.1-B.5, Slika 37).

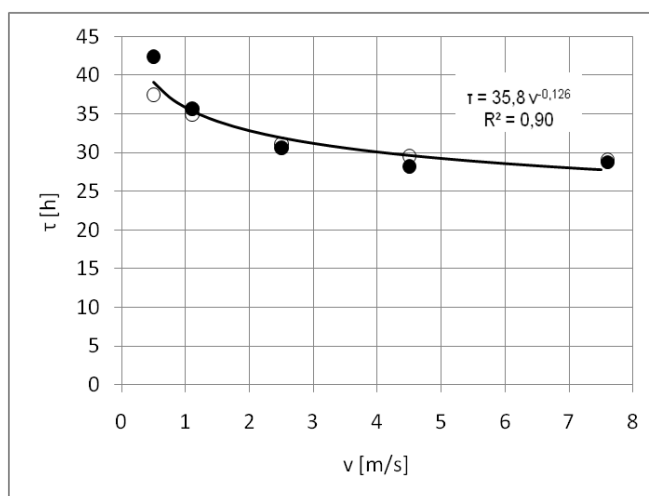


Slika 37 Konvekcijsko sušenje bukovine, debeline 12 mm (d_2), z žagano- (levo) ter s skobljano površino (desno) v odvisnosti od hitrosti gibanja zraka ($v_1 = 0,6$ m/s, $v_2 = 1,1$ m/s, $v_3 = 2,5$ m/s, $v_4 = 4,5$ m/s, $v_5 = 7,6$ m/s).

Figure 37 Dependency of conventional drying kinetics of beechwood, thickness of 12 mm (d_2), with sawn- (left) and planed surface (right) on the air velocity ($v_1 = 0,6$ m/s, $v_2 = 1,1$ m/s, $v_3 = 2,5$ m/s, $v_4 = 4,5$ m/s, $v_5 = 7,6$ m/s).

Splošno počasnejše sušenje preizkušancev debeline 12 mm (d_2), primerjalno s tanjšimi preizkušanci (d_1) (Poglavje 4.1.1), potrjuje tudi analiza celotnega sušilnega upora na začetku procesa. Časovna konstanta ter s tem celotni sušilni upor je pri teh preizkušancih (d_2) več kot 2,5-krat večja v primerjavi s tanjšimi preizkušanci (d_1), in prav tako

eksponentno pojema s povečevanjem hitrosti gibanja zraka (Slika 38). Pri hitrosti zraka do 1,1 m/s ima nižja snovna prestopnost še učinek na celotni sušilni upor, ki je posledično višji. Zgolj pri najnižji hitrosti zraka ($v_1 = 0,6$ m/s) hkrati še zaznamo učinek lastnosti površine na snovno prestopnost, ki je bila višja pri skobljanih preizkušancih, kot pa pri preizkušancih z žagano površino ($\tau(\check{Z}) = 42,4$ h; $\tau(S) = 37,5$ h). Z dvigom hitrosti gibanja zraka na 2,5 m/s in več, pa že v začetku sušenja notranji snovni upor prevladuje, ter v celoti obvladuje masni tok vode s površine preizkušancev v okolico ($\tau = 28,2$ h do 31,1 h). Pri teh hitrostih ($v \geq 2,5$ m/s) ni več razlik med skupinama preizkušancev (S, $\check{Z}$), celotni snovni upor pa se tudi s povečevanjem hitrosti zraka več ne spreminja.



Slika 38 Odvisnost časovne konstante (τ) od hitrosti zraka (v) ob površini bukovih preizkušancev, debeline 12 mm (d_2), z žagano- (●) in s skobljano površino (○).

Figure 38 Dependency of time constant (τ) on the air velocity (v), at conventional drying of beechwood, thickness of 12 mm (d_2), with sawn- (●) and planed surface (○).

Tudi analiza masnega toka vode s površin preizkušancev (d_2) v okolico razkrije podobnosti s serijo tanjših preizkušancev (d_1). Izkaže se, da je dosežen začetni masni tok vode s površine debelejših preizkušancev primerljiv s serijo tanjših preizkušancev (d_1), praktično na celotnem intervalu variiranja hitrosti zraka (Preglednica 3, Slika 39, Slika 40). Pri hitrosti zraka 0,6 m/s in 1,1 m/s smo na začetku sušenja dosegli masni tok med 70 g/m²h in 80 g/m²h. Bistveno povečanje masnega toka se je tudi pri tej seriji pojavilo s hitrostjo zraka 2,5 m/s (140 g/m²h do 147,5 g/m²h). Nadaljnje povečevanje sušilne hitrosti na 4,5 m/s ter 7,6 m/s pa je k povečanju začetnega masnega toka prispevalo le še zanemarljivo malo, kjer smo dosegli vrednosti masnega toka med 162 g/m²h in 167 g/m²h. Slednja ugotovitev se sklada z rezultati analize celotnega sušilnega upora, saj pri višjih hitrostih zraka sušenje poteka ob prevladujočem notranjem snovnem uporu (Slika 38).

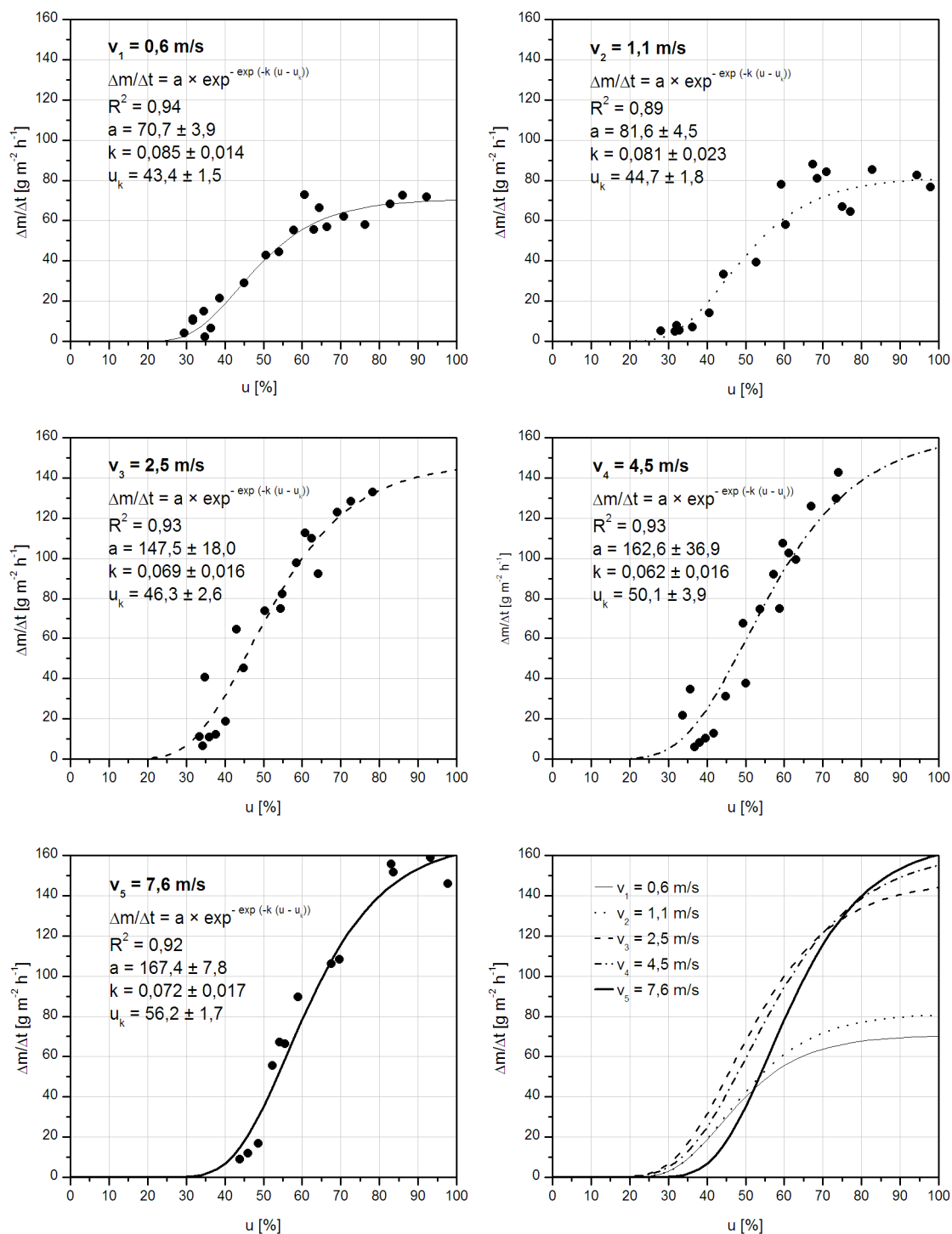
Preglednica 3 Vrednosti koeficientov v modelu masnega toka vode (Enačba 44) (R^2 - determinacijski koeficient, a - začetni masni tok, u_k - prevoj funkcije, k - hitrost pojemanja masnega toka, b - velikost pojemka masnega toka v prevojni točki (u_k), u_T - vlažnost prehoda iz faze konstantne v fazo padajoče sušilne hitrosti) v odvisnosti od hitrosti zraka nad površino lesa (v) pri sušenju bukovih preizkušancev, debeline 12 mm (d_2), s skobljano- (S) in z žagano površino (Ž).

Table 3 Dependency of the coefficients in the model of water mass flow (Equation 44) (R^2 –coefficient of determination, a – initial water mass flow, u_k – model inflection point, k - rate of water mass flow decrease, b – water mass flow decrease at the inflection point (u_k), u_T - transition wood moisture content) on the air velocity (v) at conventional drying of beehwood, thickness of 12 mm (d_2), with sawn- (left) and planed surface (right).

$d_2 = 12 \text{ mm}$	ŽAGANO					SKOBLJANO				
$v [\text{m s}^{-1}]$	0,6	1,1	2,5	4,5	7,6	0,6	1,1	2,5	4,5	7,6
$R^2 []$	0,94	0,93	0,93	0,93	0,92	0,97	0,93	0,95	0,89	0,59
$a [\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}]$	70,7	81,6	147,5	162,6	167,4	71,5	81,8	140,2	151,2	161,8
$u_k [\%]$	43,4	44,7	46,3	50,1	56,2	44,6	45,9	47,8	48,4	49,2
$k [1/\%]$	0,085	0,081	0,069	0,062	0,072	0,076	0,073	0,062	0,054	0,054
$b [\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1} \%^{-1}]$	2,2	2,4	3,8	3,7	4,4	2,0	2,2	3,2	3,0	3,2
$u_T [\%]$	63,6	65,9	71,1	77,7	80,2	67,1	69,3	75,7	80,3	81,1

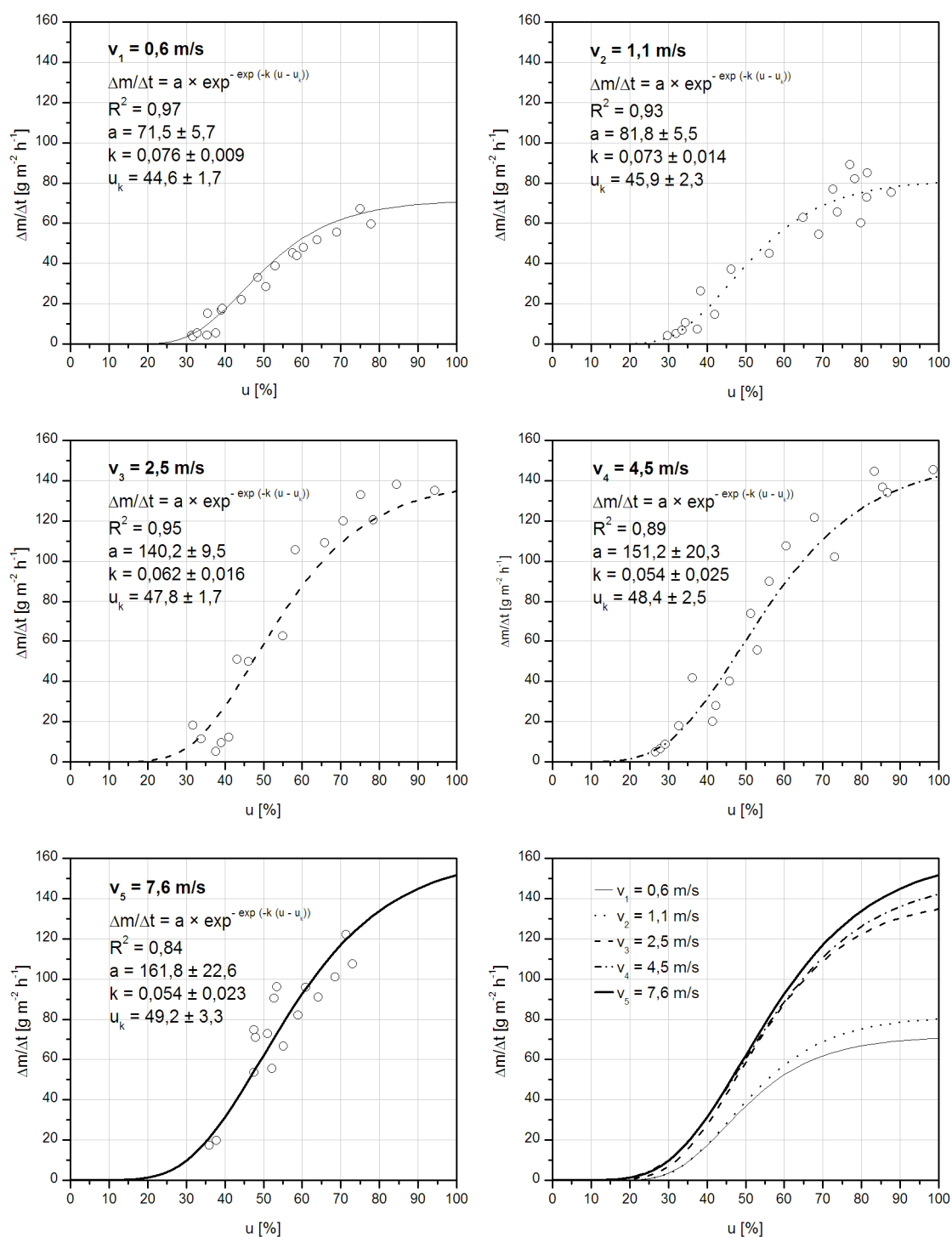
Pojemanje masnega toka vode z zniževanjem povprečne vlažnosti lesa (k) je tudi pri tej seriji preizkušancev (d_2) hitrejšje pri uporabi nizke hitrosti zraka ob površini preizkušancev, ki v 1. fazi sušenja povzroči tudi manjši začetni masni tok. Vrednost koeficienta (k) pri višjih hitrostih gibanja zraka pri obeh serijah preizkušancev (S, Ž) postopoma pada. Dodatno pa primerjava vrednosti koeficienta (k) s tanjšimi preizkušanci (d_1) (Preglednica 2) pokaže na značilno zmanjšanje vrednosti koeficienta pri debelejših preizkušancih (d_2) (Preglednica 3), ne glede na uporabljeno hitrost gibanja zraka ob površini lesa. Ta razlika se izkazuje v postopnejšem zmanjševanju sušilne hitrosti pri debelejših preizkušancih glede na njihovo povprečno vlažnost, že vse od samega začetka sušilnega postopka.

Teoretična vlažnost prehoda v fazo signifikantno padajoče sušilne hitrosti (u_T) je pri tej debelini preizkušancev (d_2) v povprečju absolutno za 8% višje, kot pri tanjših preizkušancih (d_1) (Preglednica 3). Pri tej seriji (d_2) je višja hitrost gibanja zraka ob površini preizkušancev prav tako povzročala zgodnejše pojemanje začetnega masnega toka vode glede na povprečno vlažnost lesa. Najkasnejši prehod v fazo signifikantno padajoče sušilne hitrosti, glede na povprečno vlažnost lesa, se je tako pojavil pri žaganih preizkušancih lesa, pri hitrosti zraka 0,6 m/s, in sicer pri 64% povprečni vlažnosti. Sušenje z višjo hitrostjo zraka (7,6 m/s) pa je pri obeh serijah preizkušancev (S, Ž) takšen prehod povzročilo že pri povprečni vlažnosti lesa nad 80%.



Slika 39 Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine z žagano površino, debeline 12 mm (d_2), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih gibanja zraka (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5).

Figure 39 Dependency of water mass flow on average wood moisture content at conventional kiln drying of sawn beechwood, thickness of 12 mm (d_2), at various air velocities (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5).

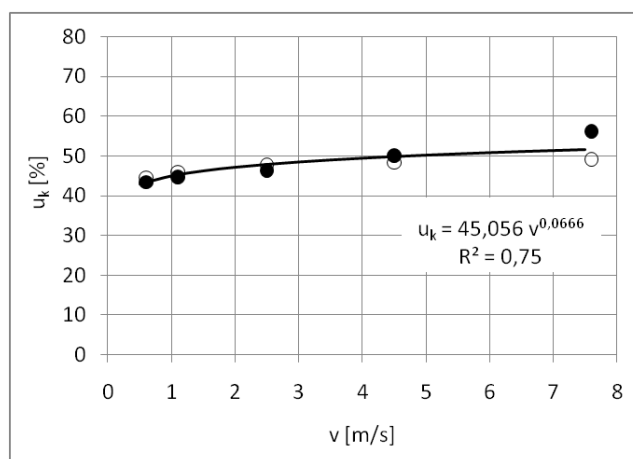


Slika 40 Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine s skobljano površino, debeline 12 mm (d_2), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih gibanja zraka (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5).

Figure 40 Dependency of water mass flow on average wood moisture content at conventional kiln drying of planed beechwood, thickness of 12 mm (d_2), at various air velocities (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5).

Tudi pri tej debelini lesa (d_2) ugotavljamo pri hitrostih zraka do 4,5 m/s (v_4) nekoliko višjo vlažnost prehoda v fazo značilno padajoče sušilne hitrosti pri preizkušancih s skobljano površino (S), kot pa pri žaganih (Ž). Ta razlika vlažnosti prehoda v fazo ireverzibilno padajoče sušilne hitrosti pa je v primerjavi s tanjšimi preizkušanci (d_1) manjša pri vseh hitrostih zraka (Preglednica 2) in je statistično neznačilna. Glede na ugotovljen prevladujoč prestopni snovni upor na začetku sušenja lesa z najnižjo hitrostjo zraka ($v_1 = 0,6$ m/s) obstaja možnost kratkotrajno nespremenljivega masnega toka le v ozkem vlažnostnem intervalu na začetku sušenja lesa, pri najnižji hitrosti zraka (v_1). Le pri teh pogojih (v_1) je tako moč pričakovati tudi kratkotrajno fazo sušenja z dokaj konstantno sušilno hitrostjo, ki lahko zaradi nižje snovne prestopnosti pri preizkušancih z žagano površino (Slika 38) traja do nižje povprečne vlažnosti lesa. Pri višjih hitrostih zraka nad površino preizkušancev debeline 12 mm ($v \geq 2,5$ m/s), pa nespremenljive sušilne hitrosti na začetku sušenja žaganih in skobljanih preizkušancev več ne moremo zaznati (Slika 38, Slika 39, Slika 40).

Hitrost gibanja zraka ob površini preizkušancev, pa podobno kot na teoretično vlažnost prehoda v fazo značilno padajoče sušilne hitrosti (u_T) vpliva tudi na vlažnost v prevojni točki modela masnega toka (u_k) (Preglednica 3, Slika 41). Le ta prav tako narašča s povečevanjem hitrosti gibanja zraka ob površini preizkušancev, hitreje pri nižji hitrosti zraka ($v \leq 2,5$ m/s). Pri tem so razlike med preizkušanci z žagano (Ž) in skobljano površino (S) zanemarljivo majhne. Povprečna vlažnost lesa (u_k) je pri vseh hitrostih zraka ob površini preizkušancev visoka, med 43,4% in 56,2%, torej vselej na vlažnostjo nasičenja celičnih sten.



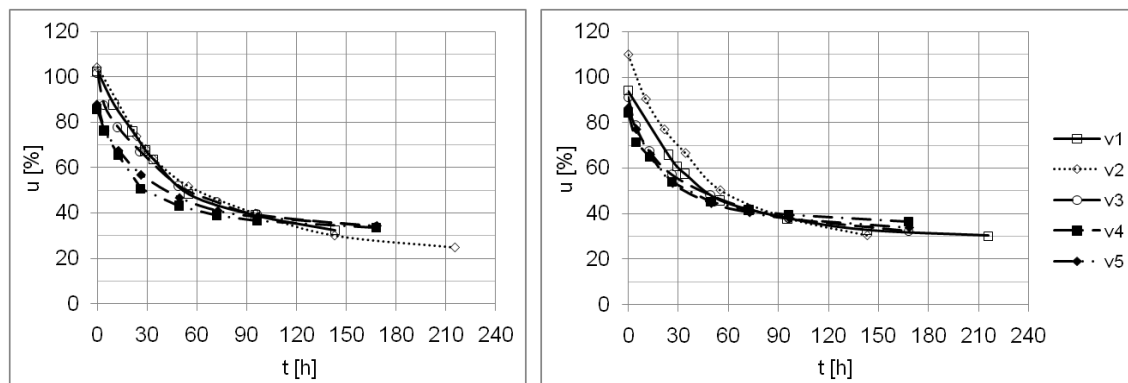
Slika 41 Odvisnost vlažnosti v prevoju modela masnega toka vode (u_k) od hitrosti zraka (v) ob površini preizkušancev bukovine, debeline 12 mm (d_2), z žagano- (●) in s skobljano površino (○).

Figure 41 Dependency of moisture content at model inflection point (u_k) on the air velocity (v) at conventional drying of beechwood, thickness of 12 mm (d_2), with sawn- (●) and planed surface (○).

4.1.3 Kinetika sušenja bukovine, debeline 18 mm, v odvisnosti od hitrosti gibanja zraka

Pri preizkušancih lesa, debeline 18 mm (d_3), smo dosegli primerjalno s tanjšimi (d_1 , d_2) bistveno počasnejše sušenje. V splošnem smo za sušenje teh preizkušancev do 40% povprečne vlažnosti potrebovali med 90 h in 100 h sušenja, kar je skoraj 2-krat več, kot pri debelini 12 mm, ter približno 3-kratno podaljšanje časa, glede na sušenje preizkušancev, debeline 6 mm (Slika 42, Priloga A.1-A.5, Priloga B.1-B.5).

Že začetna sušilna hitrost pri sušenju teh preizkušancev (d_3) je bila nižja, v primerjavi s hitrostjo, doseženo pri enaki hitrosti gibanja zraka ob površini preizkušancev debelin 6 mm in 12 mm. Pri tem nismo potrdili razlik v sušilni hitrosti preizkušancev z žagano- ($\check{Z}$) ali s skobljano površino (S) (Slika 42). Začetna sušilna hitrost pri hitrosti zraka 0,6 m/s (v_1) in 1,1 m/s (v_2) je variirala med 1,1 %/h in 1,4 %/h. Pri povečanju hitrosti gibanja zraka na 2,5 m/s (v_3) se je začetna sušilna hitrost povečala na 1,7 %/h. Nadaljnje povečanje hitrosti zraka na 4,5 m/s (v_4) ter 7,6 m/s (v_5) je prispevalo k povečanju začetne sušilne hitrosti, na 2,0 %/h, oziroma na 2,2 %/h. V primerjavi z manjšimi debelinami lesa (d_1 , d_2) ugotovimo, da ima povečevanje hitrosti gibanja zraka pri teh preizkušancih (d_3) manjši učinek na njihovo začetno sušilno hitrost.

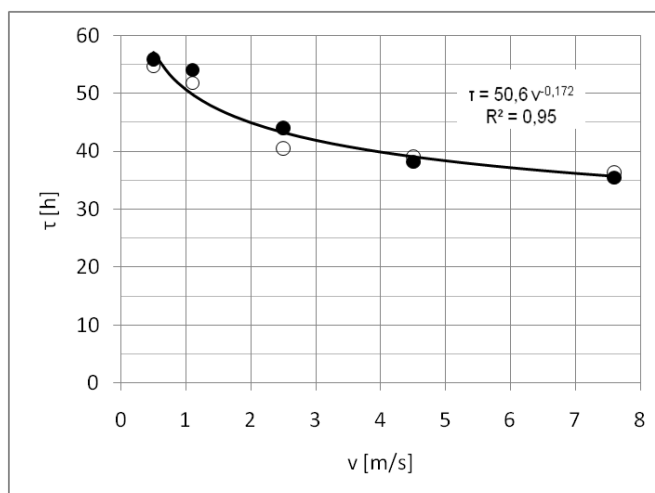


Slika 42 Konvekcijsko sušenje bukovine, debeline 18 mm (d_3), z žagano- (levo) ter s skobljano površino (desno) v odvisnosti od hitrosti gibanja zraka ($v_1 = 0,6$ m/s, $v_2 = 1,1$ m/s, $v_3 = 2,5$ m/s, $v_4 = 4,5$ m/s, $v_5 = 7,6$ m/s).

Figure 42 Dependency of conventional drying kinetics of beechwood, thickness of 18 mm (d_3), with sawn- (left) and planed surface (right) on the air velocity ($v_1 = 0,6$ m/s, $v_2 = 1,1$ m/s, $v_3 = 2,5$ m/s, $v_4 = 4,5$ m/s, $v_5 = 7,6$ m/s).

Počasnejše sušenje preizkušancev debeline 18 mm (d_3), primerjalno s tanjšimi preizkušanci (d_1 , d_2) potrjuje tudi analiza začetnega celotnega sušilnega upora po modelu 1. reda. Pri tej debelini preizkušancev (d_3) je časovna konstanta večja, kot pri tanjših preizkušancih (d_1 , d_2) (Slika 35, Slika 38, Slika 43). Najmanjšo časovno konstanto smo pri tej debelini sicer dosegli pri hitrostih zraka nad 2,5 m/s ($\tau = 36,4$ h do 44,1 h), brez značilnih razlik med preizkušanci s skobljano (S) ali z žagano površino ($\check{Z}$), kjer nadaljnje povečevanje hitrosti

gibanja zraka zanemarljivo malo znižuje časovno konstanto. To nakazuje, da je pri hitrosti zraka 2,5 m/s že začetna hitrost sušenja v celoti odvisna od notranjega snovnega upora. Večji prestopni snovni upor obstaja pri hitrostih zraka do 1,1 m/s ($\tau = 51,8$ h do 55,9 h), a brez značilnih razlik med preizkušanci s skobljano ali z žagano površino.



Slika 43 Odvisnost časovne konstante (τ) od hitrosti zraka (v) ob površini bukovih preizkušancev, debeline 18 mm (d_3), z žagano- (●) in s skobljano površino (○).

Figure 43 Dependency of time constant (τ) on the air velocity (v), at conventional drying of beechwood, thickness of 12 mm (d_3), with sawn- (●) and planed surface (○).

Pri tej debelini lesa (d_3) lahko iz oblike sušilnih krivulj tudi sklepamo, da ima začetna sušilna hitrost kratkotrajni učinek na potek sušenja, ki v nadaljevanju sušenja učinkuje celo negativno. Ta negativni učinek se pri višjih hitrostih zraka ($v \geq 2,5$ m/s) pokaže pri povprečni vlažnosti lesa pod 45%. V primerjavi s preizkušanci (d_3), ki so bili sušeni pri nizkih hitrostih zraka (v_1, v_2), je sušilna hitrost pri hitrosti zraka nad 2,5 m/s v nadaljevanju procesa ($u < 45\%$) manjša kot pri preizkušancih, ki so bili sušeni z nizkimi hitrostmi zraka (Slika 42).

S primerjavo doseženega začetnega masnega toka pri preizkušancih debeline 18 mm s tanjšimi (d_1, d_2) ne ugotovimo bistvenih razlik (Preglednica 4). Pri nizkih hitrostih zraka (v_1, v_2) smo pri obeh serijah preizkušancev (S, Ž) na začetku sušenja dosegli masni tok v povprečju 100 g/m²h. Ta je sicer značilno višji, kot pri sušenju tanjših preizkušancev (Preglednica 2, Preglednica 3). Del tega povišanja lahko pripišemo tudi eksperimentalni napaki določanja začetnega masnega toka pri tanjših preizkušancih (d_1, d_2). Ugotavljamo, da je pri hitrejšem sušenju tanjših sortimentov potrebno uvesti krajši interval določanja masnega toka, ki bi omogočal točnejše meritve. Rezultati nakazujejo, da je bil interval določanja masnega toka pri tanjših preizkušancih predolg, s čimer smo zaradi hitrega

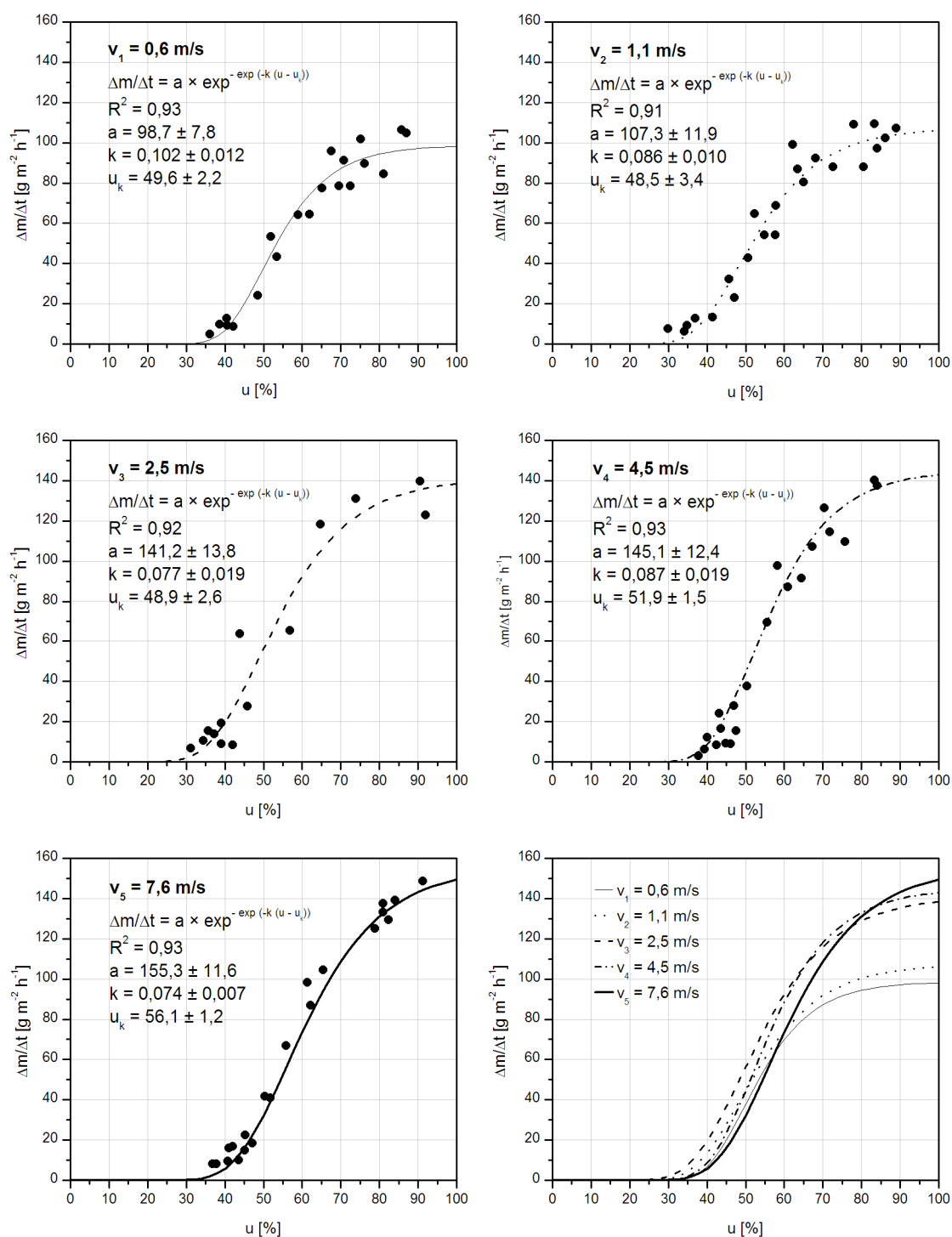
zmanjševanja sušilne hitrosti tudi določili nižji masni tok vode s površine lesa v okolico od dejansko doseženega (Preglednica 4, Slika 44, Slika 45).

Preglednica 4 Vrednosti koeficientov v modelu masnega toka vode (Enačba 44) (R^2 - determinacijski koeficient, a - začetni masni tok, u_k - prevoj funkcije, k - hitrost pojemanja masnega toka, b - velikost pojema masnega toka v prevojni točki (u_k), u_T - vlažnost prehoda iz faze konstantne v fazo padajoče sušilne hitrosti) v odvisnosti od hitrosti zraka nad površino lesa (v) pri sušenju bukovih preizkušancev, debeline 18 mm (d_3), s skobljano- (S) in z žagano površino (Ž).

Table 4 Dependency of the coefficients in the model of water mass flow (Equation 44) (R^2 –coefficient of determination, a – initial water mass flow, u_k – model inflection point, k - rate of water mass flow decrease, b – water mass flow decrease at the inflection point (u_k), u_T - transition wood moisture content) on the air velocity (v) at conventional drying of beehwood, thickness of 18 mm (d_3), with sawn- (left) and planed surface (right).

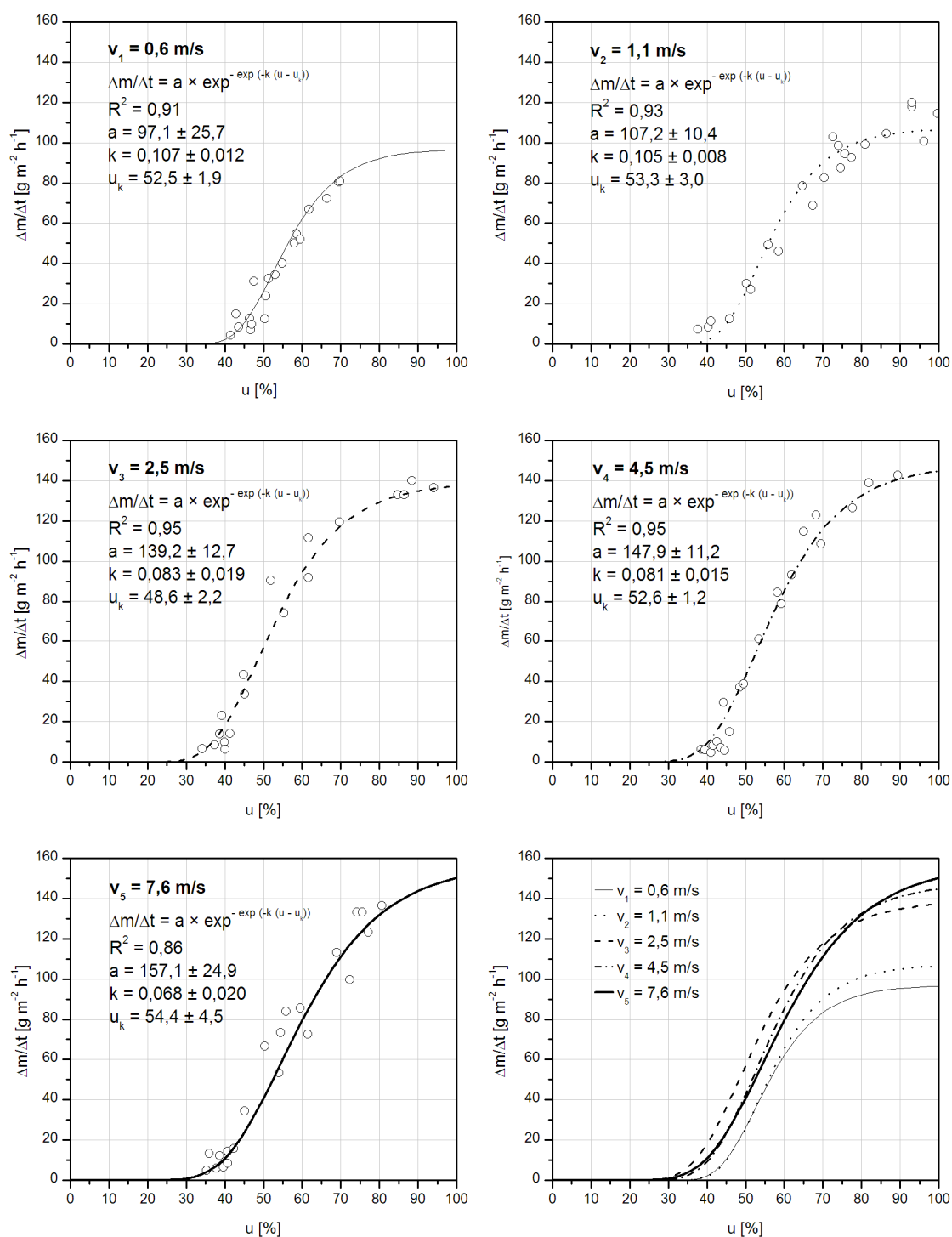
$d_3 = 18 \text{ mm}$	ŽAGANO					SKOBLJANO				
$v [\text{m s}^{-1}]$	0,6	1,1	2,5	4,5	7,6	0,6	1,1	2,5	4,5	7,6
$R^2 []$	0,94	0,91	0,92	0,94	0,99	0,92	0,94	0,93	0,97	0,93
$a [\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}]$	98,7	107,3	141,2	145,1	155,3	97,1	107,2	139,2	147,9	157,1
$u_k [\%]$	49,6	48,5	48,9	51,9	56,1	52,5	53,3	48,6	52,6	54,4
$k [1/\%]$	0,102	0,086	0,077	0,087	0,074	0,107	0,105	0,083	0,081	0,068
$b [\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ \%}^{-1}]$	3,7	3,4	4,0	4,6	4,2	3,8	4,1	4,3	4,4	4,0
$u_T [\%]$	66,5	68,5	71,3	71,7	79,4	68,6	69,7	69,3	73,8	79,5

Z dvigom hitrosti zraka ob površini preizkušancev na 2,5 m/s se je začetni masni tok pri obeh skupinah preizkušancev (S, Ž) povečal na povprečno 140 g/m²h. Nadaljnje povečevanje sušilne hitrosti na 4,5 m/s ter 7,6 m/s pa je tudi pri tej debelini lesa zanemarljivo malo prispevalo k povečanju začetnega masnega toka. Dosežene vrednosti (145 g/m²h do 157 g/m²h) so primerljive z začetnim masnim tokom pri sušenju preizkušancev manjših debelin. Glede na potrjen prevladujoč notranji snovni upor pri visokih hitrostih zraka (Slika 43), so te vrednosti pričakovane, ter najvišje možne z vidika notranjih prevodnih sposobnosti lesa. Pojemanje masnega toka vode s padanjem povprečne vlažnosti lesa (k) je bilo najhitrejšje pri uporabi nizke hitrosti zraka, manjšalo pa se je z vzpostavljanjem višjega začetnega masnega toka, pri uporabi višje hitrosti zraka. Vrednosti dobljenih koeficientov v modelu (k) so primerljive s tistimi pri 12 mm debelini preizkušancev, ter so manjše kot pri najtanjši debelini preizkušancev (d_1).



Slika 44 Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine z žagano površino, debeline 18 mm (d_3), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih gibanja zraka (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5).

Figure 44 Dependency of water mass flow on average wood moisture content at conventional kiln drying of sawn beechwood, thickness of 18 mm (d_3), at various air velocities (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5).

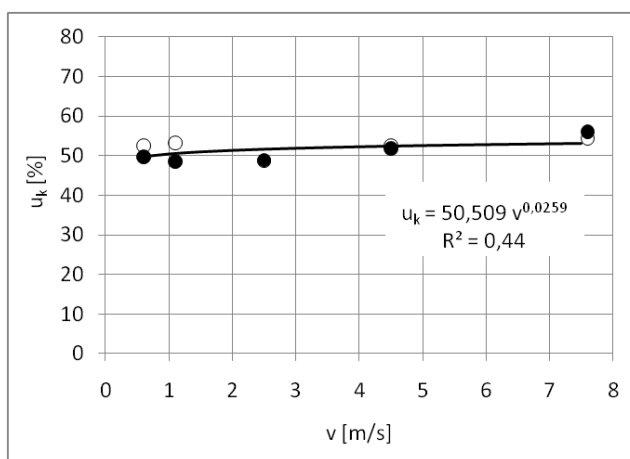


Slika 45 Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine s skobljano površino, debeline 18 mm (d_3), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih gibanja zraka (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5).

Figure 45 Dependency of water mass flow on average wood moisture content at conventional kiln drying of planed beechwood, thickness of 18 mm (d_3), at various air velocities (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5).

Postopno zmanjševanje sušilne hitrosti od samega začetka sušenja preizkušancev, debeline 18 mm, dodatno potrjuje teoretično določena vlažnost prehoda v fazo padajoče sušilne hitrosti (u_T) (Preglednica 4, Slika 46). Le ta je primerljiva z izračunano pri debelini preizkušancev 12 mm (d_2), ter s povečevanjem hitrosti gibanja zraka (0,6 m/s do 7,6 m/s) postopno naraste od 66,5 % do 79,5%. Pri tej debelini preizkušancev (d_3) se teoretična vlažnost prehoda sušenja v fazo padajoče sušilne hitrosti ne razlikuje med preizkušanci s skobljano (S) ali z žagano površino (Ž). To hkrati z obliko krivulj masnega toka v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti (Slika 44, Slika 45) ter glede na vrednosti časovne konstante (Slika 43) potrjuje, da na samem začetku sušilnega procesa več ne dosežemo faze konstante sušilne hitrosti.

Pri tej debelini preizkušancev (d_3) je torej že na samem začetku procesa notranji snovni upor prevladujoč, in je podoben pri obeh skupinah preizkušancev (S, Ž), s tem pa neodvisen od lastnosti njihovih površin. Pri teh pogojih je v preizkušancih že pri visoki povprečni vlažnosti nastal značilen vlažnostni gradient, z vlažnostjo površinskega sloja lesa blizu vlažnosti nasičenja celičnih sten, ali celo pod njo (Priloga A.1-A.5, Priloga B.1-B.5). Posledično je prevoj v modelu masnega toka bil dosežen pri višji povprečni vlažnosti lesa ($u_k = 48,5\%$ do $56,1\%$), z večanjem hitrosti gibanja zraka (v) pa je le počasi naraščal (Preglednica 4, Slika 46). Izkaže se, da se mora v tem primeru velik del proste vode, ki ostane ujeta v notranjosti preizkušancev, v nadaljevanju sušenja izločiti difuzijsko.

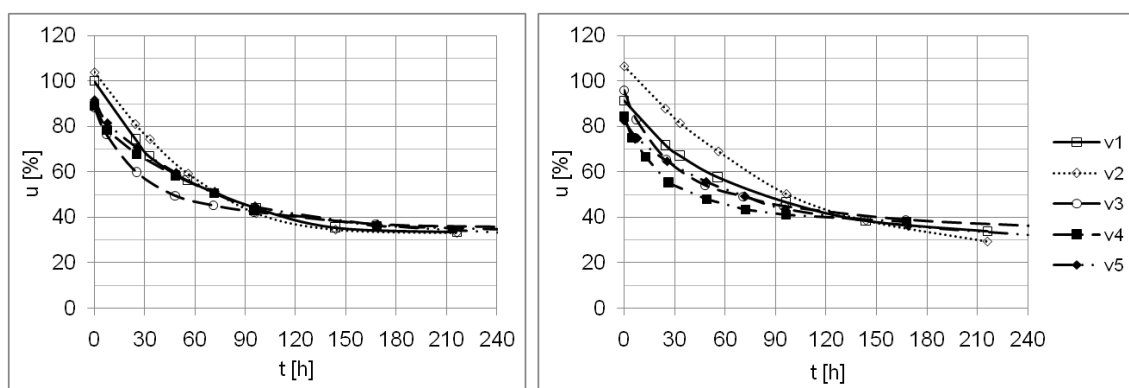


Slika 46 Odvisnost vlažnosti v prevoju modela masnega toka vode (u_k) od hitrosti zraka (v) ob površini preizkušancev bukovine, debeline 18 mm (d_3), z žagano- (●) in s skobljano površino (○).

Figure 46 Dependency of moisture content at model inflection point (u_k) on the air velocity (v) at conventional drying of beechwood, thickness of 18 mm (d_3), with sawn- (●) and planed surface (○).

4.1.4 Kinetika sušenja bukovine, debeline 24 mm, v odvisnosti od hitrosti gibanja zraka

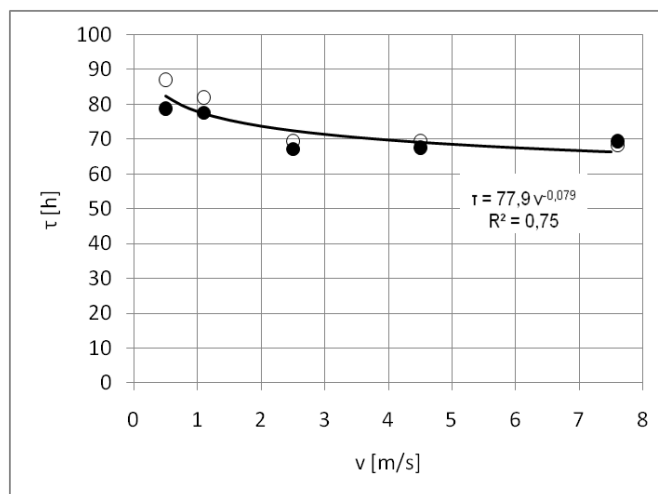
Za sušenje preizkušancev, debeline 24 mm (d_4), do 40% povprečne lesne vlažnosti smo potrebovali med 110 h in 150 h. Pri tej debelini smo v primerjavi s tanjšimi preizkušanci (d_1 , d_2 , d_3) dosegli najnižjo začetno sušilno hitrost, neodvisno od lastnosti površine preizkušancev (S, Ž). Sušilna hitrost pri hitrosti zraka 0,6 m/s in 1,1 m/s je bila podobna kot pri preizkušancih debeline 18 mm, in je variirala med 0,9 %/h in 1,1 %/h. Pri povečanju hitrosti gibanja zraka na 2,5 m/s se je začetna sušilna hitrost povečala na povprečnih 1,3 %/h. Nadaljnje povečevanje hitrosti zraka (v_4 , v_5) pa je zanemarljivo malo povečalo začetno sušilno hitrost, ki je znašala največ 1,4 %/h. Učinek povečevanja hitrosti zraka ob površini preizkušancev na začetno sušilno hitrost je pri tej debelini preizkušancev najmanjši (Priloga A.1-A.5, Priloga B.1-B.5, Slika 47).



Slika 47 Konvekcijsko sušenje bukovine, debeline 24 mm (d_4), z žagano- (levo) ter s skobljano površino (desno) v odvisnosti od hitrosti gibanja zraka ($v_1 = 0,6$ m/s, $v_2 = 1,1$ m/s, $v_3 = 2,5$ m/s, $v_4 = 4,5$ m/s, $v_5 = 7,6$ m/s).

Figure 47 Dependency of conventional drying kinetics of beechwood, thickness of 24 mm (d_4), with sawn- (left) and planed surface (right) on the air velocity ($v_1 = 0,6$ m/s, $v_2 = 1,1$ m/s, $v_3 = 2,5$ m/s, $v_4 = 4,5$ m/s, $v_5 = 7,6$ m/s).

Zgornje ugotovitve potrjuje tudi analiza kinetike na začetku sušenja z modelom 1. reda. Izračunane časovne konstante so pri tej debelini preizkušancev (d_4) v splošnem največje, hkrati pa se najmanj spreminjajo ob variiranju hitrosti gibanja zraka (Slika 48). Pri hitrostih zraka do 1,1 m/s se giblje časovna konstanta med 77,5 h in 87,0 h, pri hitrosti zraka 2,5 m/s ali več pa med 67,1 h in 69,4 h. Pri tej debelini preizkušancev so razlike glede na vrsto površine (S, Ž) neznatne. Pri hitrostih zraka do 1,1 m/s smo v nasprotju s pričakovanji zaznali celo nekoliko višjo časovno konstanto pri preizkušancih s skobljano površino (S), na kar pa lahko vpliva tudi inherentna variabilnost sposobnosti lesa za prevajanje vode.



Slika 48 Odvisnost časovne konstante (τ) od hitrosti zraka (v) ob površini bukovih preizkušancev, debeline 18 mm (d_4), z žagano- (●) in s skobljano površino (○).

Figure 48 Dependency of time constant (τ) on the air velocity (v), at conventional drying of beechwood, thickness of 12 mm (d_4), with sawn- (●) and planed surface (○).

Povečana začetna sušilna hitrost, dosežena pri višjih hitrostih zraka (v_3 , v_4 , v_5) nad površino preizkušancev je imela tudi pri tej debelini (d_4) kratkotrajni učinek na potek sušenja, ter je negativno vplivala na kinetiko procesa v nadaljevanju. Pri najvišjih hitrostih gibanja zraka (4,5 m/s in 7,6 m/s) se je posledično sušilna hitrost že pri povprečni vlažnosti okrog 60% zmanjšala, če jo primerjamo s sušilno hitrostjo pri hitrosti zraka 0,6 m/s in 1,1 m/s (Slika 47).

Dosežen masni tok vode na celotnem vlažnostnem območju lesa je pri preizkušancih, debeline v 24 mm zelo podoben tistemu pri preizkušancih debeline 18 mm (Preglednica 5, Slika 49, Slika 50). Pri hitrosti zraka 0,6 m/s in 1,1 m/s smo pri obeh skupinah preizkušancev (S, Ž) na začetku sušenja dosegli masni tok med 86 g/m²h in 102 g/m²h. Z dvigom hitrosti zraka na površini preizkušancev na 2,5 m/s se je začetni masni tok povečal na 117 g/m²h (Ž), oz. do 136 g/m²h (S). Z nadaljnjim povečevanjem hitrosti gibanja zraka (4,5 m/s, 7,6 m/s) smo dosegli začetni masni tok med 148 g/m²h in 157 g/m²h.

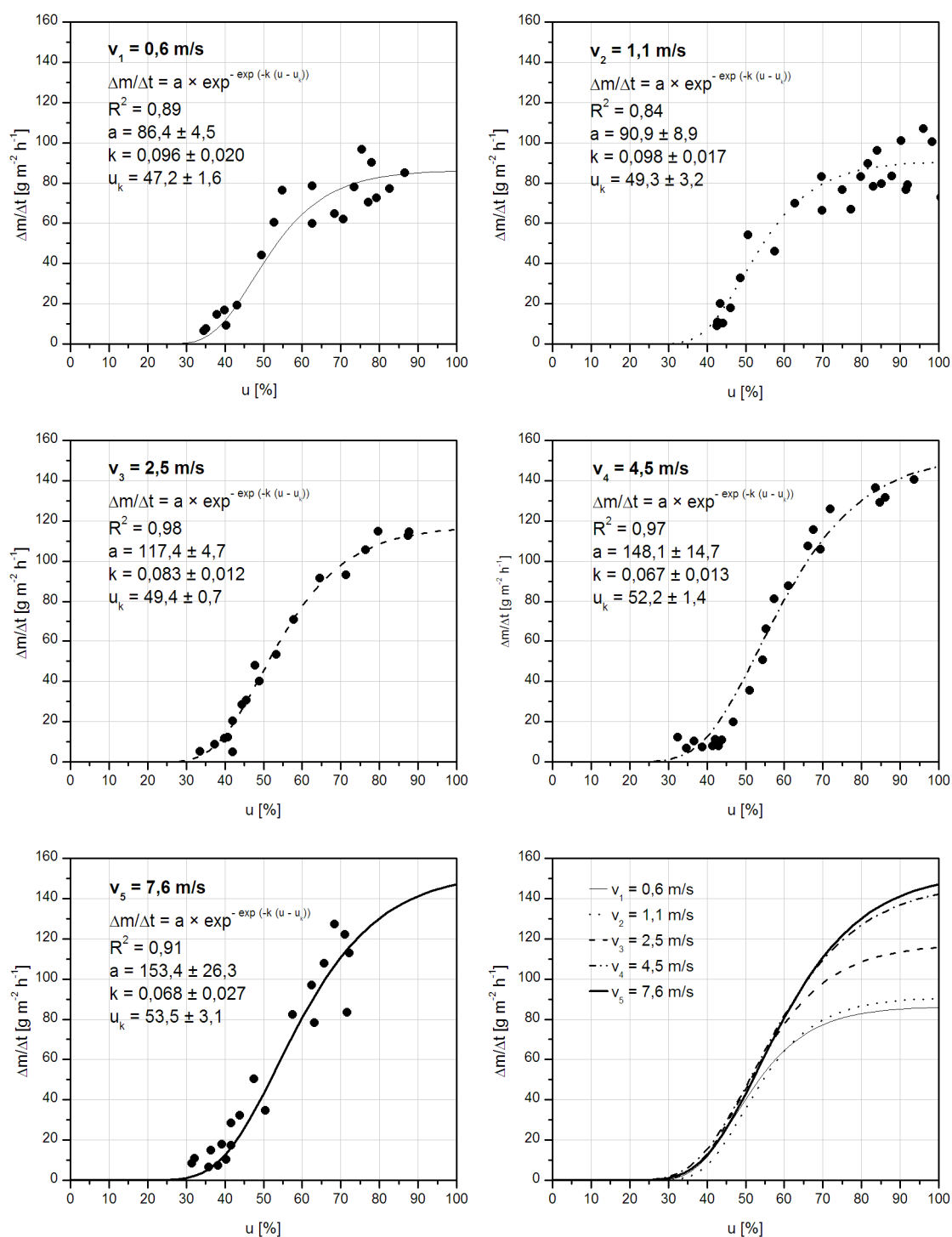
Način pojemanja masnega toka s padanjem lesne vlažnosti je bil primerljiv s preizkušanci debeline 18 mm. Postopno zmanjševanje sušilne hitrosti od samega začetka sušenja je potrjeno tudi s teoretično določeno vlažnostjo prehoda v fazo padajoče sušilne hitrosti (Preglednica 5, Slika 51). Le ta je primerljiva z vrednostmi pri debelinah preizkušancev 12 mm (d_2) in 18 mm (d_3), ter je s povečevanjem hitrosti gibanja zraka (0,6 m/s do 7,6 m/s) postopno narasla od 66,1 % do 78,3%. Pri tej največji debelini preizkušancev se teoretična vlažnost prehoda sušenja v fazo padajoče sušilne hitrosti (u_T) prav tako ne razlikuje med preizkušanci s skobljano (S) ali z žagano površino (Ž).

Preglednica 5 Vrednosti koeficientov v modelu masnega toka vode (Enačba 44) (R^2 - determinacijski koeficient, a - začetni masni tok, u_k - prevoj funkcije, k - hitrost pojemanja masnega toka, b - velikost pojemka masnega toka v prevojni točki (u_k), u_T - vlažnost prehoda iz faze konstantne v fazo padajoče sušilne hitrosti) v odvisnosti od hitrosti zraka nad površino lesa (v) pri sušenju bukovih preizkušancev, debeline 24 mm (d_4), s skobljano- (S) in z žagano površino (Ž).

Table 5 Dependency of the coefficients in the model of water mass flow (Equation 44) (R^2 –coefficient of determination, a – initial water mass flow, u_k – model inflection point, k - rate of water mass flow decrease, b – water mass flow decrease at the inflection point (u_k), u_T - transition wood moisture content) on the air velocity (v) at conventional drying of beehwood, thickness of 24 mm (d_4), with sawn- (left) and planed surface (right).

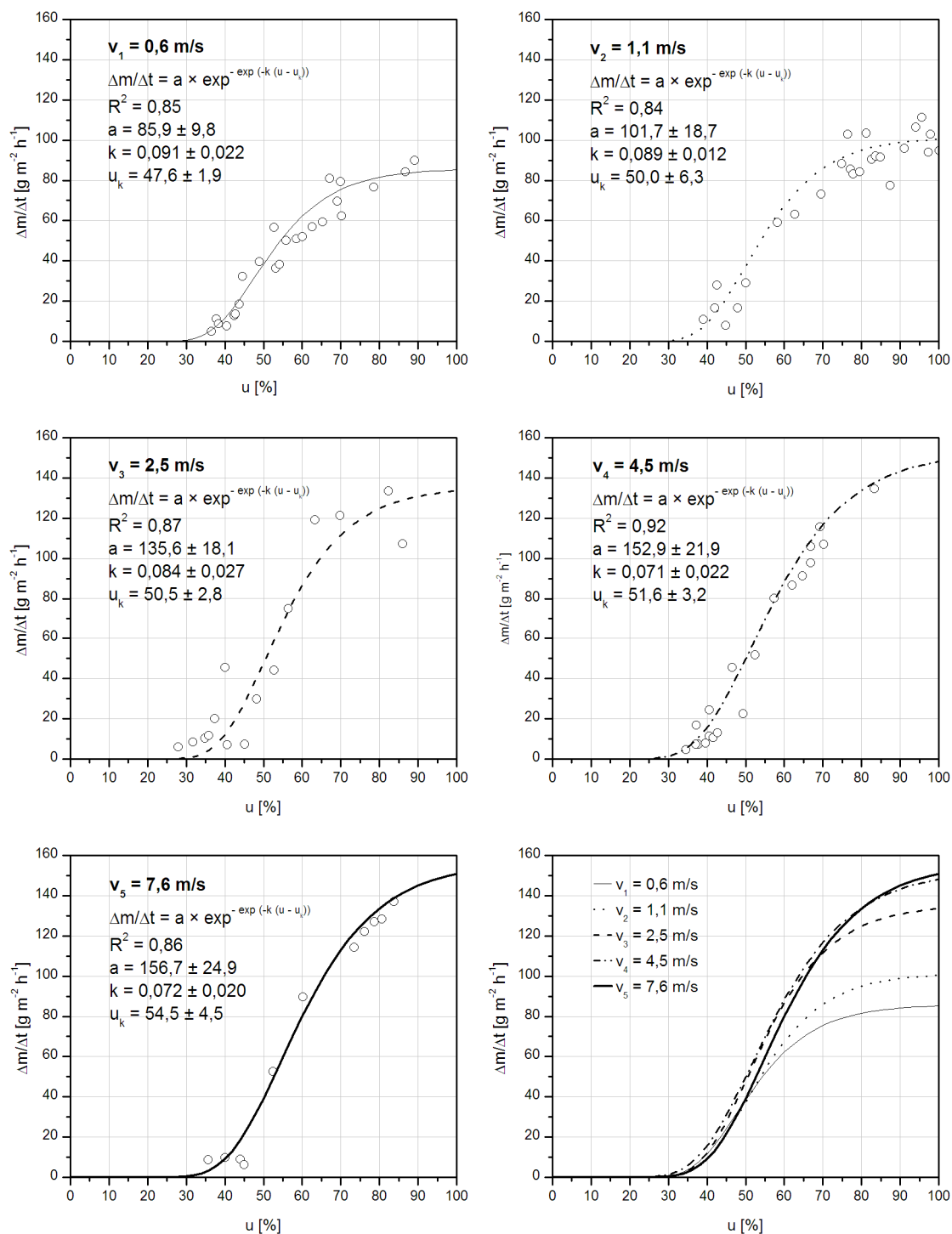
$d_4 = 24 \text{ mm}$	ŽAGANO					SKOBLJANO				
$v [\text{m s}^{-1}]$	0,6	1,1	2,5	4,5	7,6	0,6	1,1	2,5	4,5	7,6
$R^2 []$	0,90	0,84	0,98	0,97	0,91	0,86	0,85	0,88	0,92	0,99
$a [\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}]$	86,4	90,9	117,4	148,1	153,4	85,9	101,7	135,6	152,9	156,7
$u_k [\%]$	47,2	49,3	49,4	52,2	53,5	47,6	50,0	50,5	51,6	54,5
$k [1/\%]$	0,096	0,098	0,083	0,067	0,068	0,091	0,089	0,084	0,071	0,072
$b [\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1} \%^{-1}]$	3,0	3,3	3,6	3,7	3,9	2,9	3,3	4,2	4,0	4,2
$u_T [\%]$	65,1	66,9	70,2	77,7	78,6	66,5	69,3	70,9	75,9	78,3

Podobno, kot pri debelini preizkušancev (d_3), je tudi pri preizkušancih debeline 24 mm (d_4) že na samem začetku procesa notranji snovni upor prevladujoč, na katerega pa lastnosti površin posameznih skupin preizkušancev (S, Ž) nimajo vpliva. Prav tako je potrjen obstoj značilnega vlažnostnega gradienta že pri visoki povprečni vlažnosti lesa (Priloga A.1-A.5, Priloga B.1-B.5), kjer je v površinskem sloju prišlo tudi zgodaj do osušitve pod vlažnost nasičenja lesnih vlaken. Prevoj v modelu masnega toka je tudi v tem primeru dosežen že pri visoki povprečni vlažnosti lesa ($u_k = 47,2\%$ do $54,5\%$), višji pri sušenju z večjo hitrostjo gibanja zraka (v) (Preglednica 5, Slika 51). Pričakovati je, da poteka sušenje lesa pod to povprečno vlažnostjo preizkušancev v celoti difuzijsko.



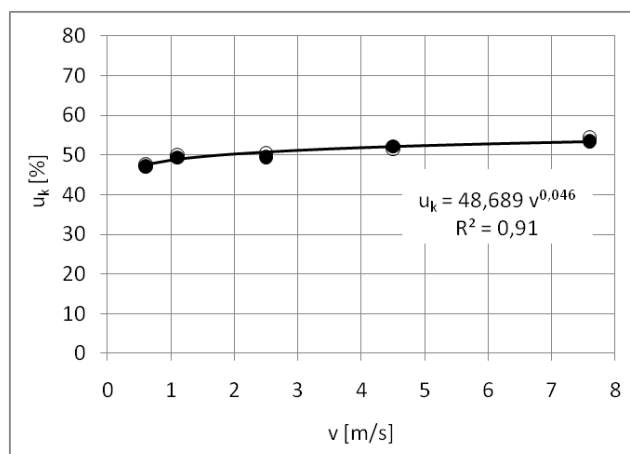
Slika 49 Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine z žagano površino, debeline 24 mm (d_4), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih gibanja zraka (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5).

Figure 49 Dependency of water mass flow on average wood moisture content at conventional kiln drying of sawn beechwood, thickness of 24 mm (d_4), at various air velocities (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5).



Slika 50 Masni tok vode pri konvekcijskem sušenju bukovine s skobljano površino, debeline 24 mm (d_4), v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa pri različnih hitrostih gibanja zraka (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5).

Figure 50 Dependency of water mass flow on average wood moisture content at conventional kiln drying of planed beechwood, thickness of 24 mm (d_4), at various air velocities (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5).

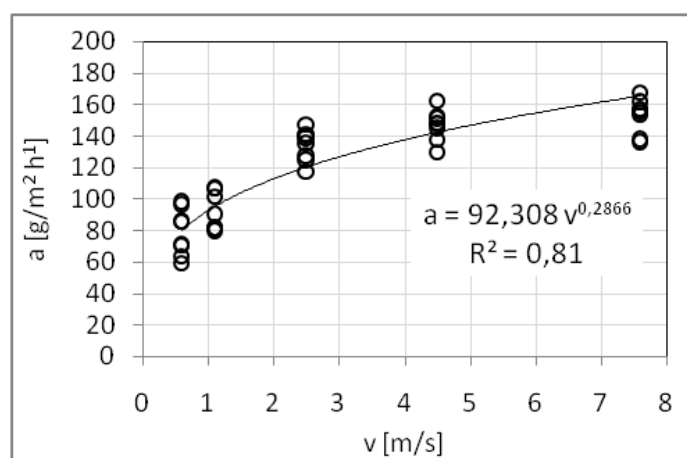


Slika 51 Odvisnost vlažnosti v prevoju modela masnega toka vode (u_k) od hitrosti zraka (v) ob površini preizkušancev bukovine, debeline 24 mm (d_4), z žagano- (●) in s skobljano površino (○).

Figure 51 Dependency of moisture content at model inflection point (u_k) on the air velocity (v) at conventional drying of beechwood, thickness of 24 mm (d_4), with sawn- (●) and planed surface (○).

4.1.5 Odvisnost masnega toka vode od pogojev konvekcijskega sušenja lesa

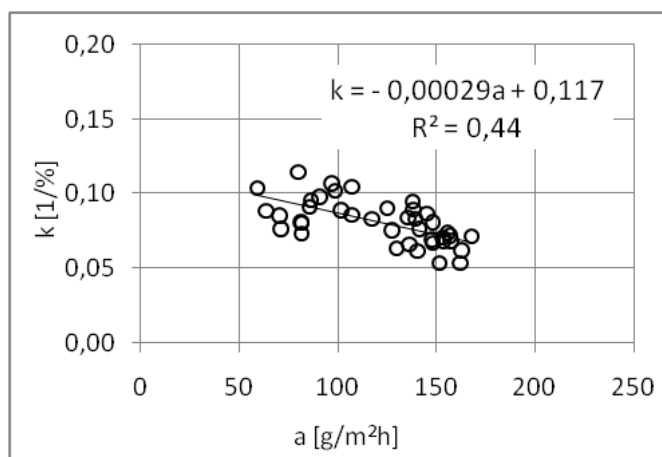
Analiza masnega toka vode pri konvekcijskem sušenju vseh debelin preizkušancev bukovine (d_1 , d_2 , d_3 , d_4) s konstantnimi pogoji kaže na podobnost odziva masnega toka vode s površine preizkušancev v okolico, glede na uporabljeno hitrost zraka (Preglednica 2, 3, 4 in 5). Pri tem ugotavljamo primerljive vrednosti začetnega masnega toka vode pri vseh proučevanih debelinah preizkušancev, kot tudi podoben učinek povečevanja hitrosti gibanja zraka na začetni masni tok. Splošno ima povečevanje hitrosti zraka največji vpliv na začetni masni tok vode pri nizkih hitrostih zraka (0,5 m/s do 2,5 m/s), pri višji hitrosti zraka pa se ta vpliv zmanjšuje (Slika 52). Podoben trend smo zasledili tudi pri proučevanju časovnih konstant preizkušancev vseh debelin (Slika 35, Slika 38, Slika 43, Slika 48).



Slika 52 Odvisnost začetnega masnega toka vode (a) od hitrosti zraka (v) nad površino bukovih preizkušancev, debelin 6 mm, 12 mm, 18 mm in 24 mm.

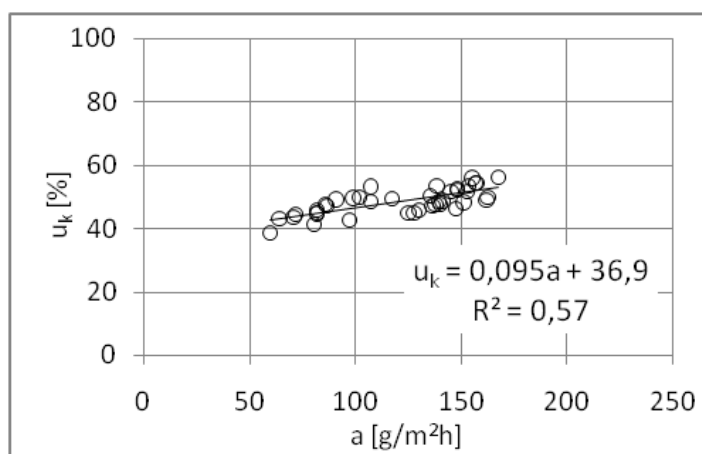
Figure 52 Dependency of initial water mass flow (a) on drying air velocity (v) at conventional drying of beechwood, thickness of 6 mm, 12 mm, 18 mm and 24 mm.

Pri proučevanju masnega toka vode smo pri vseh preizkušancih (d_1 , d_2 , d_3 in d_4), ne glede na lastnosti površine ($\check{Z}$, S), potrdili vpliv začetnega masnega toka (a) na hitrost njegovega pojemanja (k) s padanjem povprečne lesne vlažnosti (u). Nekoliko višje vrednosti pojema so bile sicer dosežene pri najtanjših preizkušancih (6 mm), manjše pa pri večjih debelinah preizkušancev. Navkljub prisotni variabilnosti se izkaže, da obstaja negativna linearna korelacija med pojemkom masnega toka (k) in začetnim masnim tokom (a) (Slika 53, $R^2 = 0,44$). Podobno kot začetni masni tok učinkuje na vlažnost prehoda v režim padajoče sušilne hitrosti (u_T), vpliva tudi na vlažnost lesa v prevoju modela (u_k), kjer imamo največjo spremembo masnega toka glede na padec povprečne lesne vlažnosti (b). Izkaže se, da je tudi vlažnost lesa v prevoju (u_k) pozitivno korelirana z velikostjo začetnega masnega toka (a) (Slika 54, $R^2 = 0,57$).



Slika 53 Odvisnost pojemanja masnega toka vode (k) od začetnega masnega toka (a).

Figure 53 Dependency of rate of decrease of water mass flow (k) on its initial value (a).



Slika 54 Vpliv začetnega masnega toka vode (a) na vlažnost lesa v prevoju modela (u_k).

Figure 54 Dependency of the inflection point (u_k) in the model of water mass flow on its initial value (a).

Dobljene zveze lahko uporabimo v osnovnem modelu odvisnosti masnega toka vode od povprečne lesne vlažnosti preizkušancev (Enačba 44) za določitev koeficientov v modelu (a , k , u_k):

$$a = 92,308v^{0,2866} \quad \dots(45)$$

$$k = -0,00029a + 0,117 \quad \dots(46)$$

$$u_k = 0,095a + 36,9 \quad \dots(47)$$

Z vpeljavo enačb 45, 46, in 47 v enačbo osnovnega modela (Enačba 44) pridemo do odvisnosti masnega toka od povprečne lesne vlažnosti (u) ter od hitrosti zraka ob površini preizkušancev (v), ne glede na njihovo debelino:

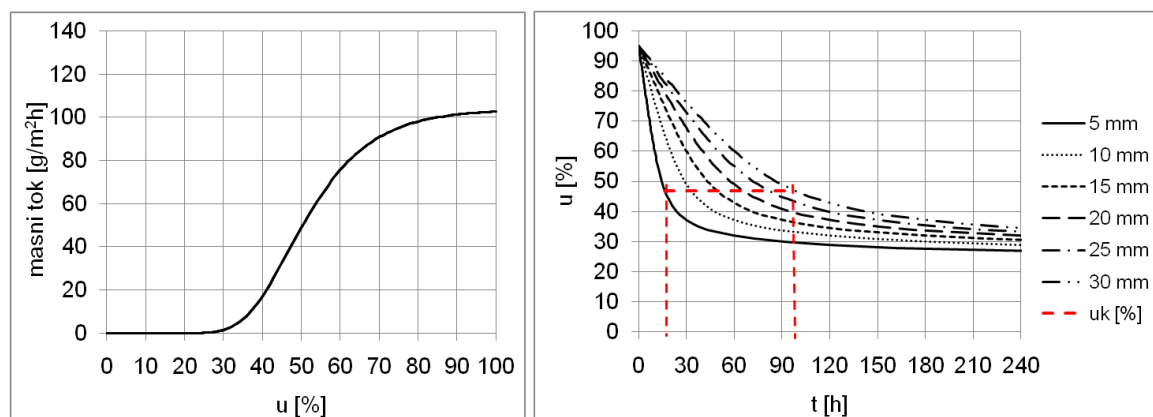
$$\frac{\dot{m}}{A} = 92,3 \cdot v^{0,29} \cdot e^{-e^{\left(0,285v^{0,57} - u \left(0,027v^{0,29} + 0,117\right) + 4,32\right)}} \quad \dots(48)$$

4.1.5.1 Simulacija masnega toka in poteka sušenja bukovine različnih debelin z variiranjem hitrosti zraka

S poznavanjem začetne vlažnosti (u_z) in mase lesa ter z uporabo enačbe 43 lahko izračunamo sušilno hitrost ($\Delta u/\Delta t$) v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa (u). Z integracijo sušilne hitrosti po vlažnosti lesa od začetne (u_z) do končne vlažnosti lesa (u_k) pa določimo teoretičen potek sušenja katerekoli debeline sortimentov bukovine, pri pogojih sušenja, kot so bili uporabljeni v eksperimentih.

Slika 55 prikazuje simulirano konvekcijsko sušenje preizkušancev iz bukovine, povprečne nominalne gostote ($R_u = 540 \text{ kg/m}^3$), z začetno vlažnostjo 95%, pri variiranju debeline od 5 mm do 30 mm. Sušenje smo izvedli pri konstantnih sušilnih pogojih, s temperaturo 30 °C, pri relativni zračni vlažnosti 85% ter pri hitrosti zraka 1,5 m/s. Dosežen masni tok vode je neodvisen od debeline preizkušancev ($a = 103,7 \text{ g/m}^2\text{h}$, $k = 0,087$, $u_k = 46,7\%$). Vpliv debeline in posledično začetne mase pa privede do razlik v sušilni hitrosti, ki je pričakovano najmanjša pri največji debelini lesa (30 mm) ter s časom sušenja pada. Lesna vlažnost, pri kateri preidemo v sušenje z značilno padajočo sušilno hitrostjo (u_T) je pri vseh debelinah enaka in znaša 66,5%. Tudi povprečna vlažnost lesa, t.j. vlažnost v prevoju modela masnega toka ($u_k = 46,7\%$), pod katero se voda iz lesa v celoti izloča difuzijsko, ni odvisna od debeline preizkušancev. Najhitreje je ta vlažnost lesa dosežena pri debelini lesa 5 mm ($t_{uT} = 16,3 \text{ h}$), pri debelini 30 mm pa je to stanje doseženo po 97,9 urah sušenja.

Z variiranjem hitrosti gibanja zraka (v), kot so pokazali eksperimenti stacionarnega konvekcijskega sušenja bukovine različnih debelin (6 mm do 24 mm), vplivamo tudi na masni tok vode. Pri simuliranju sušenja bukovine, debeline 16 mm ($R_u = 540 \text{ kg/m}^3$, $u_z = 95\%$), s konstantnimi sušilnimi pogoji ($T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $\phi = 85\%$) ugotavljamo ob variiranju hitrosti zraka pozitiven vpliv le te na začetno sušilno hitrost (Preglednica 6, Slika 56). Pri povečevanju začetne sušilne hitrosti preidemo v procesu sušenja v fazo značilno padajoče sušilne hitrosti pri višji povprečni vlažnosti lesa (u_T), enako velja tudi za prehod v zgolj difuzijski način sušenja (u_k). Zgolj difuzijski izločanje vode iz lesa se pri hitrosti zraka 7,5 m/s dogodi že pri 52,5% povprečni vlažnosti lesa, po 31,3 urah sušenja. Pri najnižji uporabljeni hitrosti zraka ($v = 0,5 \text{ m/s}$) je možna kombinacija kapilarnega in difuzijskega toka vode iz lesa v daljšem časovnem intervalu ($t_{uk} = 74,2 \text{ h}$), do nižje povprečne vlažnosti lesa ($u_k = 44,1\%$).



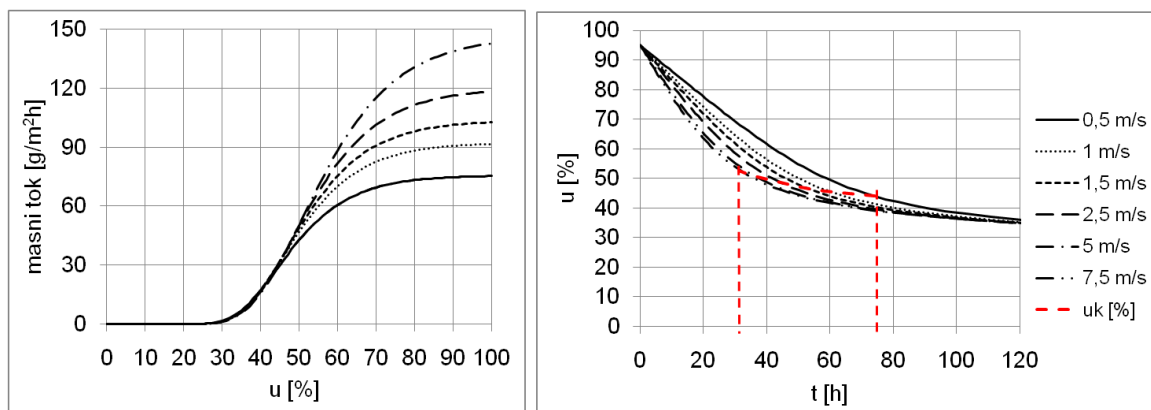
Slika 55 Simulacija masnega toka vode (levo) in konvekcijskega sušenja bukovine različnih debelin (desno) pri konstantnih sušilnih pogojih ($T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $\phi = 85\%$, $v = 1,5 \text{ m/s}$).

Figure 55 Water mass flow simulation (left) and predicted drying curves of beechwood (right) of various thicknesses ($T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{RH} = 85\%$, $v = 1.5 \text{ m/s}$).

Preglednica 6 Izračunane vrednosti koeficientov v modelu masnega toka vode (Enačba 44, Enačba 48) pri različnih hitrostih gibanja zraka nad površino lesa (v) za simulacijo konvekcijskega sušenja bukovine, debeline 16 mm, pri konstantnih sušilnih pogojih ($T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $\phi = 85\%$).

Table 6 Calculated coefficients in the model of water mass flow (Equation 44, Equation 48) at various drying air velocities (v) for simulation of conventional drying of beechwood, thickness of 16 mm.

$v [\text{m s}^{-1}]$	0,5	1	1,5	2,5	5	7,5
$a [\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}]$	75,7	92,3	103,7	120,0	146,4	164,4
$u_k [\%]$	44,1	45,7	46,7	48,3	50,8	52,5
$k [1/\%]$	0,095	0,090	0,087	0,082	0,075	0,069
$b [\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1} \%^{-1}]$	2,6	3,1	3,3	3,6	4,0	4,2
$u_T [\%]$	62,2	64,7	66,5	69,2	73,9	77,3

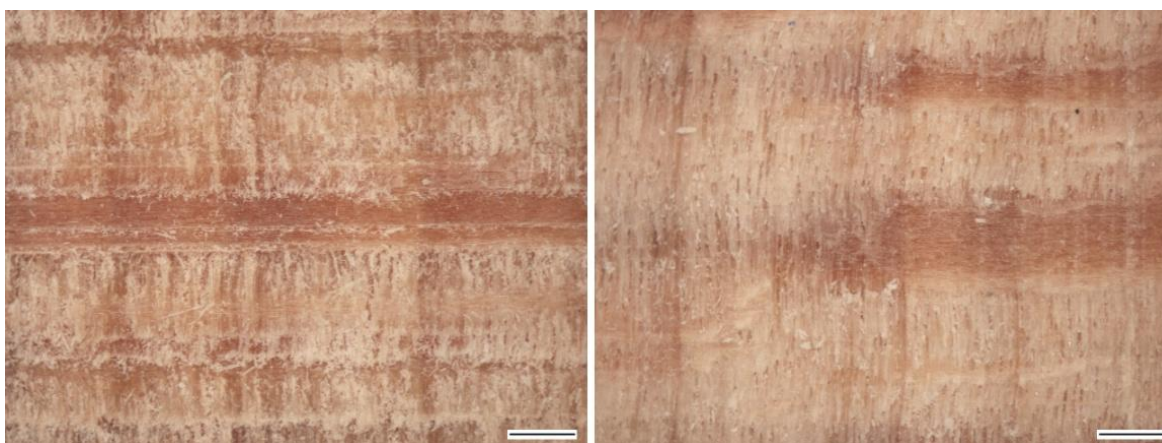


Slika 56 Simulacija masnega toka vode (levo) in konvekcijskega sušenja bukovine, debeline 16 mm (desno), pri variiranju hitrosti gibanja zraka ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\phi = 85\%$, $v = 0,5$ do $7,5$ m/s).

Figure 56 Water mass flow simulation (left) and predicted drying curves of beechwood, thickness of 16 mm (right), at various air velocities ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 85\%$, $v = 0.5$ to 7.5 m/s).

4.1.6 Lastnosti površine in pod-površinskega sloja preizkušancev za sušenje lesa

Značilnosti površine preizkušancev iz bukovine so odvisne tako od anatomskih in strukturnih lastnosti lesa kot tudi od načina mehanske obdelave. Kvalitativna stereo-mikroskopska primerjava površin je odkrila razlike v lastnostih površin preizkušancev z žagano- (Ž) in s skobljano površino (S). Pri standardnem razžagovanju preizkušancev bukovine s tračnim žagalnim strojem je na radialni površini sveže bukovine moč opaziti lesna vlakna, ki izstopajo od osnovne, temnejše površine lesa (Slika 57). Izstopajoče tkivo je splošno longitudinalno usmerjeno, lokalno pa se pojavlja tudi v večjih skupkih. Na mestih radialnih parenhimskih trakov izstopajočih lesnih struktur večinoma ne zasledimo. Videti je, da so mesta radialnih parenhimskih trakov čistejša, ter predstavljajo zanemarljivo malo spremenjeno osnovno strukturo lesa. Prečno na lesna vlakna opazimo tudi vidne sledi odrezovanja žagnih zob, kjer je manj izstopajočih lesnih vlaken, kar je verjetno posledica neposrednega ločevanja lesnega tkiva na teh mestih.



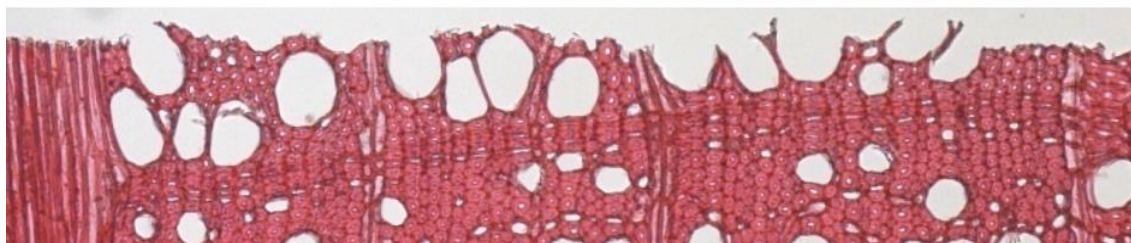
Slika 57 Površina svežih bukovih preizkušancev po tračnem razžagovanju (levo) in debelinskem skobljanju (desno) (R-L ravnina, merilo = $100\text{ }\mu\text{m}$).

Figure 57 Surface characteristics of beechwood specimens in green state after sawing (left) or planing (right) mechanical treatment (R-L plane, dash = $100\text{ }\mu\text{m}$).

Na površini skobljanih preizkušancev iz bukovine v svežem stanju prav tako zaznamo izstopajoča lesna vlakna (svetlejša tkiva), ki pa ima večjo urejenost ter boljšo vzdolžno usmerjenost, kot je to v primeru tračno žagane bukovine (Slika 57). Tudi pri skobljani površini je na mestih radialnih parenhimskih trakov izstopajočega tkiva bistveno manj, se pa prav tako pojavlja. V splošnem je na površini skobljanih preizkušancev izstopajočega lesnega tkiva manj, površina je bolj urejena, verjetno bolj gladka, kjer je bolj vidna osnovna struktura lesa.

Prečni prerez tkiva, tik pod površino preizkušancev z žagano- (Ž) ali s skobljano površino (S) ne odkrije značilnih sprememb osnovne strukture lesa. Izkaže se, da v splošnem prihaja pri mehanski obdelavi obeh skupin preizkušancev do razdvajanja lesnega tkiva na lokaciji srednjih lamel (Slika 58). V primeru večjih trahej se razslojijo tudi celične stene, kar velja tudi za parenhimske celice v radialnih trakovih, ki so večinoma pravokotno usmerjene glede na ravnino odrezovanja. Izstopajočega tkiva pri analizi mikroskopskih rezin, opazovanih s transmissijsko tehniko, nismo uspeli zaznati. Vzrok temu pripisujemo pripravi mikroskopskih preparatov ter relativno majhni debelini rezin ($\leq 20 \mu\text{m}$). Pričakovati je, da je izstopajoče tkivo, odkrito pri stereomikroskopiji, med pripravo mikroskopskih preparatov najverjetneje izgubilo stik z matično lesno strukturo, s čimer ga nismo uspeli ohraniti v preparatih za opazovanje.

POVRŠINA ZA SUŠENJE



Slika 58 Prečni prerez bukovine z žagano površino (Ž) s profilom površine (zg. rob) ter strukturo pod-površinskega sloja.

Figure 58 Cross section of beechwood sawn surface profile (Ž) (above) and subsurface characteristics.

4.2 KONVEKCIJSKO SUŠENJE BUKOVINE PRI ADAPTIVNIH SUŠILNIH POGOJIH

4.2.1 Adaptivno konvekcijsko sušenje bukovine, debeline 12 mm

4.2.1.1 Kinetika adaptivnega sušenja bukovine, debeline 12 mm, z 2-parametričnim sušilnim potencialom

Sušilni eksperiment smo izvedli pri konstantni temperaturi sušenja. Na začetku procesa smo pri preizkušancih zaščitene s parotesno PVC folijo izvedli fazo postopnega segrevanja ($\Delta T = +10 \text{ }^{\circ}\text{C/h}$), z začetno hitrostjo zraka $0,5 \text{ m/s}$. Sledila je odstranitev PVC zaščite ter nastavitev začetnih sušilnih pogojev:

$$T_z = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\varphi_z = 85\%$$

$$v_z = 0,5 \text{ m/s}$$

Sušilni postopek smo spremljali in vodili v 2 minutnem časovnem intervalu (Δt). Na celotnem vlažnostnem intervalu smo sušilni potencial uravnavali z relativno zračno vlažnostjo (φ) ter s hitrostjo gibanja zraka na površini lesa (v), ob naslednjih nastavitvah:

$$\varphi_{\text{maks}} = 95\%; \Delta\varphi_1 = 3\%; \Delta\varphi_2 = 2 \times \Delta\varphi_1 = 6\%$$

$$v_{\text{maks}} = 2,5 \text{ m/s}, \Delta v_1 = 0,1 \text{ m/s}; \Delta v_2 = 2 \times \Delta v_1 = 0,2 \text{ m/s}$$

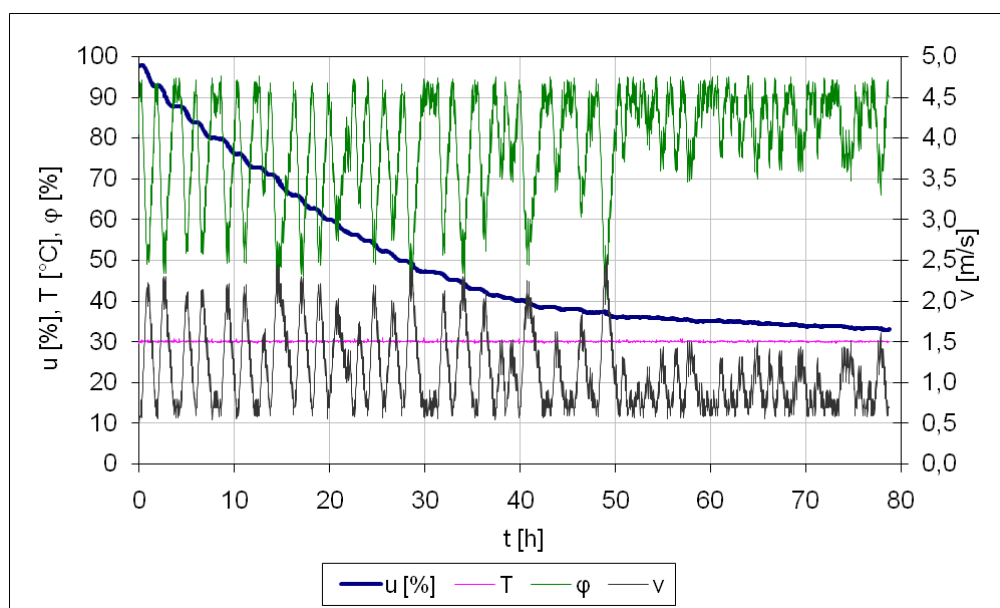
Oznake:

$\Delta\varphi_1, \Delta v_1$ interval spremembe relativne zračne vlažnosti ter hitrosti zraka pri povečevanju sušilnega potenciala,

$\Delta\varphi_2, \Delta v_2$ interval spremembe relativne zračne vlažnosti ter hitrosti zraka pri manjšanju sušilnega potenciala.

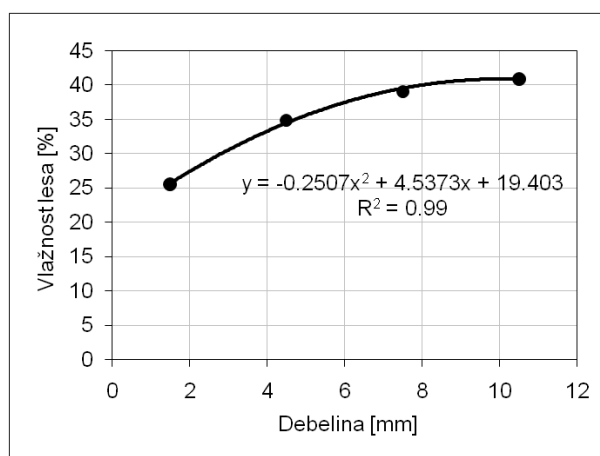
Na začetku sušenja smo dosegli visoko sušilno hitrost, $2,3 \text{ } \%/h$. Le ta se je s padanjem vlažnosti v nadaljevanju sušenja, vse do 65% povprečne lesne vlažnosti, spreminjala zanemarljivo malo. Pri nižji vlažnosti lesa se pojavi manjšanje sušilne hitrosti, ki pa je zelo postopno vse do 38% povprečne vlažnosti lesa. Temu sledi sušenje z nižjo, ter konstantno sušilno hitrostjo (Slika 59). Adaptivni sušilni potencial je bil dosežen z osciliranjem relativne zračne vlažnosti in hitrosti gibanja zraka. Zaznali smo oscilacijo zračne vlažnosti med 95% in 45% , ter spreminjanje hitrosti zraka med $0,6 \text{ m/s}$ in $2,4 \text{ m/s}$. Posledično zaznamo valovitost sušilne krivulje ter tudi lokalno kratkotrajno povišanje lesne vlažnosti med procesom sušenja, ko posledico navlaževanja površine lesa.

Na koncu eksperimenta smo dosegli $34,7\%$ povprečno vlažnost lesa. Povprečni vlažnostni gradient na koncu sušenja je znašal $17 \text{ } \%/cm$, in se je postopno manjšal z oddaljenostjo od površine lesa ($\Delta u/\Delta x_{\text{povr.}} = 31 \text{ } \%/cm$; $\Delta u/\Delta x_{\text{sred.}} = 6 \text{ } \%/cm$) (Slika 60).



Slika 59 Kinetika sušenja bukovine, debeline 12 mm, ter doseženi pogoji sušenja pri adaptivnem sušenju z 2-parametričnim sušilnim potencialom.

Figure 59 Kinetics of beechwood drying, thickness of 12 mm, and experimental conditions at adaptive drying conditions using 2-parametric drying potential.



Slika 60 Vlažnostni profil po debelini bukovine ($d = 12$ mm) na koncu adaptivnega sušilnega postopka z 2-parametričnim sušilnim potencialom.

Figure 60 Moisture content distribution at the cross section of beechwood ($d = 12$ mm) at the end of adaptive drying procedure using 2-parametric drying potential.

4.2.1.2 Kinetika adaptivnega sušenja bukovine, debeline 12 mm, s 3-parametričnim sušilnim potencialom

Začetna priprava preizkušancev kot tudi začetni sušilni pogoji so bili enaki kot v poglavju 4.2.1.1. Sušilni postopek smo prav tako spremljali in vodili v 2 minutnem časovnem intervalu (Δt), sušilni potencial pa smo uravnavali z relativno zračno vlažnostjo (ϕ), s hitrostjo gibanja zraka na površini lesa (v) ter s temperaturo sušenja (T) z naslednjimi nastavitvami:

$$\phi_{\text{maks}} = 95\%; \Delta\phi_1 = 3\%; \Delta\phi_2 = 2 \times \Delta\phi_1 = 6\%$$

$$v_{\text{maks}} = 2,5 \text{ m/s}, \Delta v_1 = 0,1 \text{ m/s}; \Delta v_2 = 2 \times \Delta v_1 = 0,2 \text{ m/s}$$

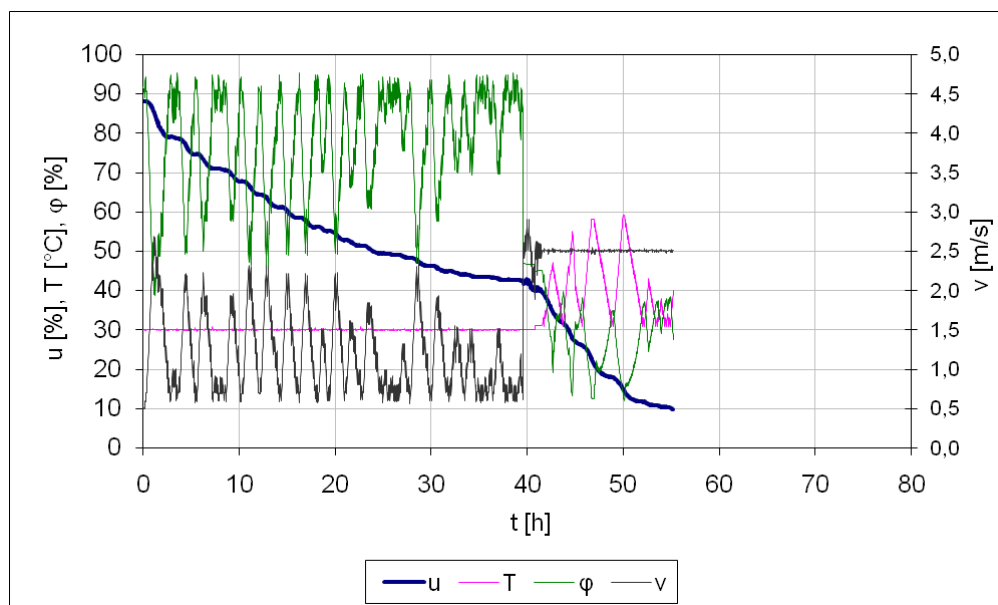
$$T_{\text{maks}} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}, \Delta T_1 = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}; \Delta T_2 = 2 \times \Delta T_1 = 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$u_D = 42\%$$

Oznake:

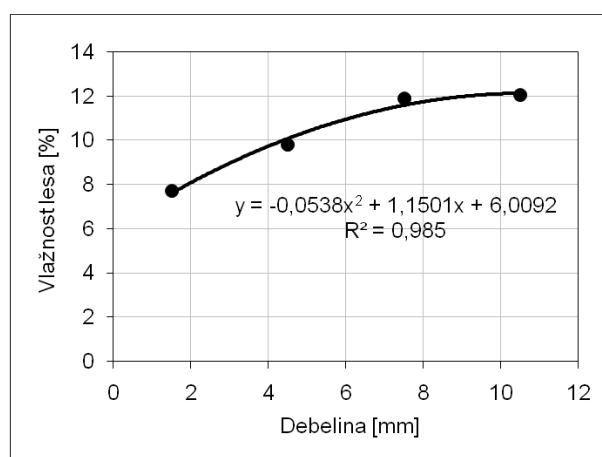
- | | |
|--|---|
| $\Delta\phi_1, \Delta v_1, \Delta T_1$ | interval spremembe relativne zračne vlažnosti, hitrosti zraka ter temperature pri povečevanju s sušilnega potenciala, |
| $\Delta\phi_2, \Delta v_2, \Delta T_2$ | interval spremembe relativne zračne vlažnosti, hitrosti zraka ter temperature pri manjšanju sušilnega potenciala in |
| u_D | vlažnost lesa, kjer algoritem preide v delovanje po difuzijskem režimu in se v sušilnem potencialu parameter hitrost zraka (v) nadomesti s temperaturo (T). |

Pri sušenju s sušilnim potencialom z relativno zračno vlažnostjo in hitrostjo gibanja zraka, t.j. 1. delu procesa, se kinetika bistveno ne razlikuje glede na predhodni sušilni postopek (Poglavje 4.2.1.1, Slika 59, Slika 61). Pri 42% povprečni vlažnosti lesa pa smo z uvedbo temperature v sušilni potencial, ob vzpostavitvi konstante hitrosti zraka (2,5 m/s), sušenje ponovno pospešili (Slika 61). Enakomerno sušenje je potekalo do 15% povprečne lesne vlažnosti, ter se upočasnilo v nadaljevanju do dosežene 10,4% končne vlažnosti lesa. Na koncu postopka smo dosegli 4,8 %/cm povprečni vlažnostni gradient, večji blizu površine lesa ($\Delta u/\Delta x_{\text{povr.}} = 7 \text{ \%/cm}$) kot pa v notranjosti ($\Delta u/\Delta x_{\text{sred.}} = 0,5 \text{ \%/cm}$) (Slika 62). Izkaže se, da lahko učinkovit adaptivni sušilni potencial dosežemo tudi v higroskopskem vlažnostnem območju lesa, v tem primeru s kombinacijo temperature sušenja in relativne zračne vlažnosti.



Slika 61 Kinetika sušenja bukovine, debeline 12 mm, ter doseženi pogoji sušenja pri adaptivnem sušenju s 3-parametričnim sušilnim potencialom.

Figure 61 Kinetics of beechwood drying, thickness of 12 mm, and experimental conditions at adaptive drying conditions using 3-parametric drying potential.



Slika 62 Vlažnostni profil po debelini bukovine ($d = 12$ mm) na koncu adaptivnega sušilnega postopka s 3-parametričnim sušilnim potencialom.

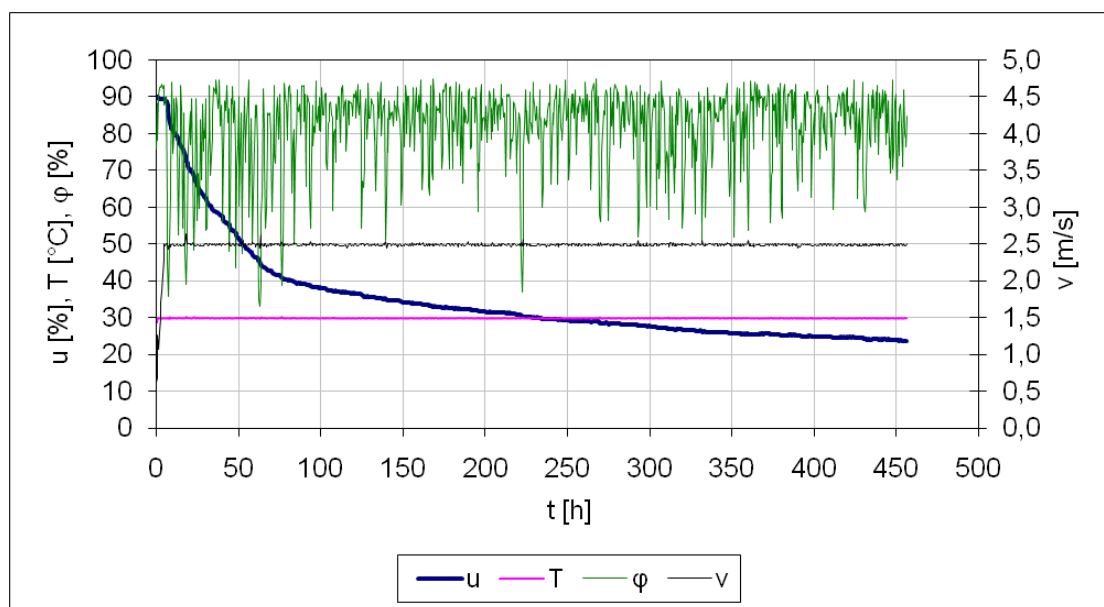
Figure 62 Moisture content distribution at the cross section of beechwood ($d = 12$ mm) at the end of adaptive drying procedure using 3-parametric drying potential.

4.2.2 Adaptivno konvekcijsko sušenje bukovine, debeline 24 mm

4.2.2.1 Kinetika adaptivnega sušenja bukovine, debeline 24 mm, z 1-parametričnim sušilnim potencialom

Začetna priprava preizkušancev ter začetni sušilni pogoji so bili pri tem eksperimentu enaki kot v poglavju 4.2.1.1. Sušilni potencial smo v tem primeru uravnavali zgolj z relativno zračno vlažnostjo, pri čemer smo uporabili konstanto hitrost gibanja zraka 2,5 m/s.

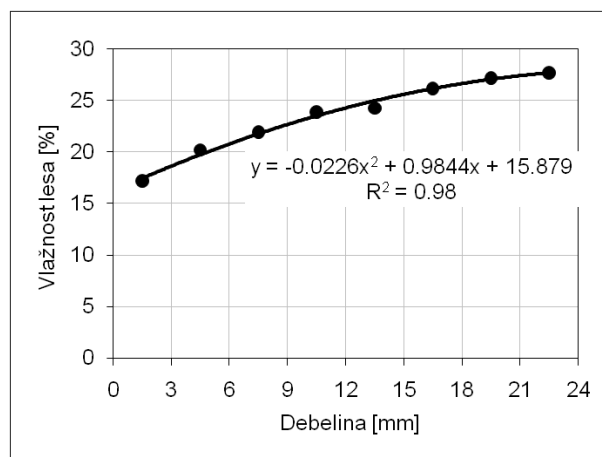
Kinetiko tega postopka lahko v splošnem razdelimo na dve področji, z bistveno različnima sušilnima hitrostma (Slika 63). V 1. delu sušilnega postopka smo dosegli visoko povprečno sušilno hitrost, ki je bila prisotna vse do 45% povprečne vlažnosti lesa. Z nadaljnjim padanjem povprečne lesne vlažnosti se je sušilna hitrost pričela postopno zmanjševati. V 1. delu sušenja je tako povprečna sušilna hitrost znašala 0,77 %/h, pri povprečni lesni vlažnosti med 40% in 15% pa je bila 0,05 %. Ugotavljamo, da lahko učinkovit adaptivni sušilni potencial pri visoki lesni vlažnosti ($u > u_{TNCS}$) dosežemo že zgolj s prilagajanjem relativne zračne vlažnosti. Pri tem je potrebno preostale vplivne parametre sušilnega potenciala, v tem primeru temperaturo in hitrost zraka, vnaprej ustrezno določiti. Velikost teh parametrov lahko predhodno eksperimentalno določimo, z omogočenim variiranjem (Poglavje 4.2.1.1, Poglavje 4.2.1.2).



Slika 63 Kinetika sušenja bukovine, debeline 24 mm, ter doseženi pogoji sušenja pri adaptivnem sušenju z 2-parametričnim sušilnim potencialom.

Figure 63 Kinetics of beechwood drying, thickness of 24 mm, and experimental conditions at adaptive drying conditions using 2-parametric drying potential.

Na koncu eksperimenta smo dosegli 23,6% povprečno vlažnost lesa. Povprečni končni vlažnostni gradient je znašal 5 %/cm. Največji je bil tik pod površino ($\Delta u / \Delta x_{\text{povr.}} = 10$ %/cm), proti sredini preizkušanca pa se je postopoma zmanjševal do 2,2 %/cm (Slika 64).



Slika 64 Vlažnostni profil po debelini bukovine (d = 24 mm) na koncu adaptivnega sušilnega postopka z 1-parametričnim sušilnim potencialom.

Figure 64 Moisture content distribution at the cross section of beechwood (d = 24 mm) at the end of adaptive drying procedure using 1-parametric drying potential.

5 RAZPRAVA

5.1 KINETIKA KONVEKCIJSKEGA SUŠENJA LESA PRI STACIONARNIH SUŠILNIH POGOJIH

Pri sušenju lesa z stacionarnimi sušilnimi pogoji, kjer smo variirali zgolj hitrost gibanja zraka, smo v začetni fazi sušenja zaznali pozitiven učinek hitrosti zraka (v) na masni tok vode s površine lesa. Ta učinek je bil pri vseh debelinah preizkušancev večji pri nizkih hitrostih zraka ($v \leq 2,5$ m/s), pri višji hitrosti zraka pa se je učinek zmanjševal (Slika 52). Podoben vpliv hitrosti zraka najdemo v rezultatih raziskav toplotne in snovne prestopnosti pri sušenju lesa, ki neposredno vpliva na toplotni in masni tok. Söderström (1987) denimo pri simulacijah sušenja smrekovine zapiše odvisnost toplotne prestopnosti od hitrosti zraka s primerljivo empirično zvezo ($h_T = 8 \times v^{0,67}$). V splošno znani Sieder – Tate enačbi, se poleg drugih spremenljivk učinek hitrosti gibanja zraka na koeficient toplotne prestopnosti prav tako zapiše s potenčno zvezo, s potenco 0,8 (Pang, 1996; Ananias in sod., 2008). Pojemajoče povečevanje toplotne in snovne prestopnosti z naraščanjem hitrosti zraka pripisujejo spreminjanju lastnosti stacionarnega mejnega filma zraka v stiku s površino lesa ter strukturnim posebnostim lesnih površin. Kot glavni dejavnik se pri tem navajajo morfološke lastnosti lesnih površin, kot je vertikalni profil površine ter stopnja hrapavosti, kot tudi lokalne porušitve podpovršinske strukture, ki so posledica mehanske obdelave (Salin, 2008a).

Pri raziskovanju kinetike sušenja lesa pri stacionarnih pogojih smo prav tako potrdili odvisnost začetnega masnega toka vode s površine preizkušancev bukovine (a) od hitrosti gibanja zraka (v). Prilagojen potenčni model pa ima značilno nižji koeficient ($a = 92,3 \times v^{0,29}$; $R^2 = 0,81$; Slika 52), kot pa to navajajo študije toplotne in snovne prestopnosti. Tako dosežen masni tok pri višjih hitrostih zraka odstopa od rezultatov študij snovne prestopnosti, in je manjši od pričakovanega (Pang, 1996). Bistveno manjši masni tok vode s površine pri sušenju lesa od teoretično predpostavljenega so določili tudi v več sorodnih študijah (Hukka, 1999; Tremblay in sod., 2000). Pri tem navajajo, da je pri sušenju lesa faza konstantne sušilne hitrosti pogosto zelo kratka, ali pa izostane, navkljub visoki začetni vlažnosti lesa. Na takšen sklep napeljujejo tudi rezultati te raziskave, vsekakor pri sušenju s stacionarnimi pogoji s hitrostjo zraka več kot 2,5 m/s. Z analizo kinetike sušenja lesa na začetku sušilnega postopka po modelu 1. reda smo namreč pri debelinah preizkušancev 12 mm ali več (d_2 , d_3 , d_4) ugotovili praktično nespremenljive vrednosti časovne konstante (τ), navkljub povečevanju hitrosti zraka od 2,5 m/s do 7,6 m/s (Slika 38, Slika 43, Slika 48). To nas napeljuje k sklepu, da je pri teh pogojih kinetika sušenja izključno odvisna od notranjega snovnega upora, na katerega pa hitrost gibanja zraka nima neposrednega vpliva. Z nižanjem hitrosti gibanja zraka pod 2,5 m/s v vseh primerih časovna konstanta potenčno narašča, kar dokazuje povečan vpliv površinskega snovnega upora ($1/h_m$) na vrednost celotnega sušilnega upora (R_c). Največji vpliv hitrosti gibanja zraka (v) na celotni sušilni

upor (R_c) smo dosegli pri najtanjših preizkušancih (d_1), kjer časovna konstanta značilno pada vse do 4,5 m/s hitrosti gibanja zraka. Pri najtanjših preizkušancih se celotni sušilni upor na začetku sušenja od najmanjše ($v_1 = 0,6$ m/s) do največje hitrosti zraka ($v_5 = 7,6$ m/s) relativno zmanjša na 57,6% začetne vrednosti (Slika 35). Z naraščanjem debeline preizkušancev se ta učinek zmanjšuje, kjer se celotni sušilni upor relativno zmanjša na 62,8% (d_2 ; Slika 38), 71,3% (d_3 ; Slika 43) in 80,7% (d_4 ; Slika 48). Tako ugotovimo, da ima površinska snovna prestopnost (h_m) značilen vpliv na kinetiko sušenja pri najtanjših preizkušancih, z večanjem debeline preizkušancev pa je njen učinek bistveno manjši.

Pri nizkih hitrostih zraka (do 2,5 m/s), ter pri najtanjših preizkušancih (d_1) smo zaznali tudi razlike v časovnih konstantah, glede na lastnosti površine ($\Delta\tau \approx 2$; Slika 35). Podobno razliko zasledimo tudi pri hitrosti zraka 0,6 m/s, pri preizkušancih debeline 12 mm ($\Delta\tau \approx 4,5$; Slika 38). Večji celotni sušilni upor (R_c) pri teh hitrostih zraka najdemo pri preizkušancih z žagano površino. Pri preizkušancih z žagano površino ($\check{Z}$), primerjalno s preizkušanci s skobljano površino (S), sklepamo na nižjo snovno prestopnost (h_m). Razlika snovne prestopnosti, dosežena na začetku sušenja, pri izločanju proste vode iz lesa, se v nadaljevanju sušilnega procesa izkaže za nepomembno. V nadaljevanju sušilnega procesa, kot je pokazala analiza kinetike masnega toka vode teh preizkušancev, pride pri obeh skupinah (S, $\check{Z}$) do značilnega ireverzibilnega zmanjševanja sušilne hitrosti, kot posledica naraščanja notranjega snovnega upora (Slika 33, Slika 34, Slika 39, Slika 40).

Deloma lahko dosežen manjši masni tok vode s površine lesa v okolico pojasnimo z ugotovitvami mikroskopske analize površin preizkušancev bukovine z žagano- ($\check{Z}$) in s skobljano površino (S). Pri obeh skupinah preizkušancev smo s stereomikroskopijo na površini lesa odkrili lesna vlakna, ki izstopajo od osnovne, naravne strukture lesa (Slika 57). Ta posamična lesna vlakna in skupki tvorijo tanek volnat površinski sloj, ki se lokalno stika z osnovno naravno strukturo lesa, ponekod pa jo zgolj prekriva, brez fizičnega stika. Takšen sloj lesnih vlaken lahko značilno vpliva na stacionarni mejni film zraka nad površino lesa (Rosen, 1978; Cai in Avramidis, 1993; Siau in Avramidis, 1996). Predpostavimo lahko, da se z vključitvijo površinsko izstopajočih lesnih vlaken poveča debelina stacionarnega mejnega filma zraka nad površino lesa, s tem pa se poveča tudi upor proti snovni prestopnosti. Po drugi strani, lahko lokalna prisotnost izstopajočega lesnega tkiva povzroči v začetni fazi sušenja tudi pomik ravnine izhlapevanja kapilarne vode v notranjost lesa. To navajajo nekatere študije kinetike sušenja drugih lesnih vrst (Salin, 1996; Hukka in Oksanen, 1999; Tremblay in sod., 2000; Remond in sod., 2005). Dodaten možen pomik ravnine izhlapevanja proste vode v notranjost lesa pa predstavlja tudi profil površine osnovne strukture lesa, brez izstopajočih lesnih vlaken (Slika 58). Razvidno je, da obstaja značilna vertikalna porazdelitev profila površine osnovne strukture lesa, z variacijskim razmikom več 100 μm .

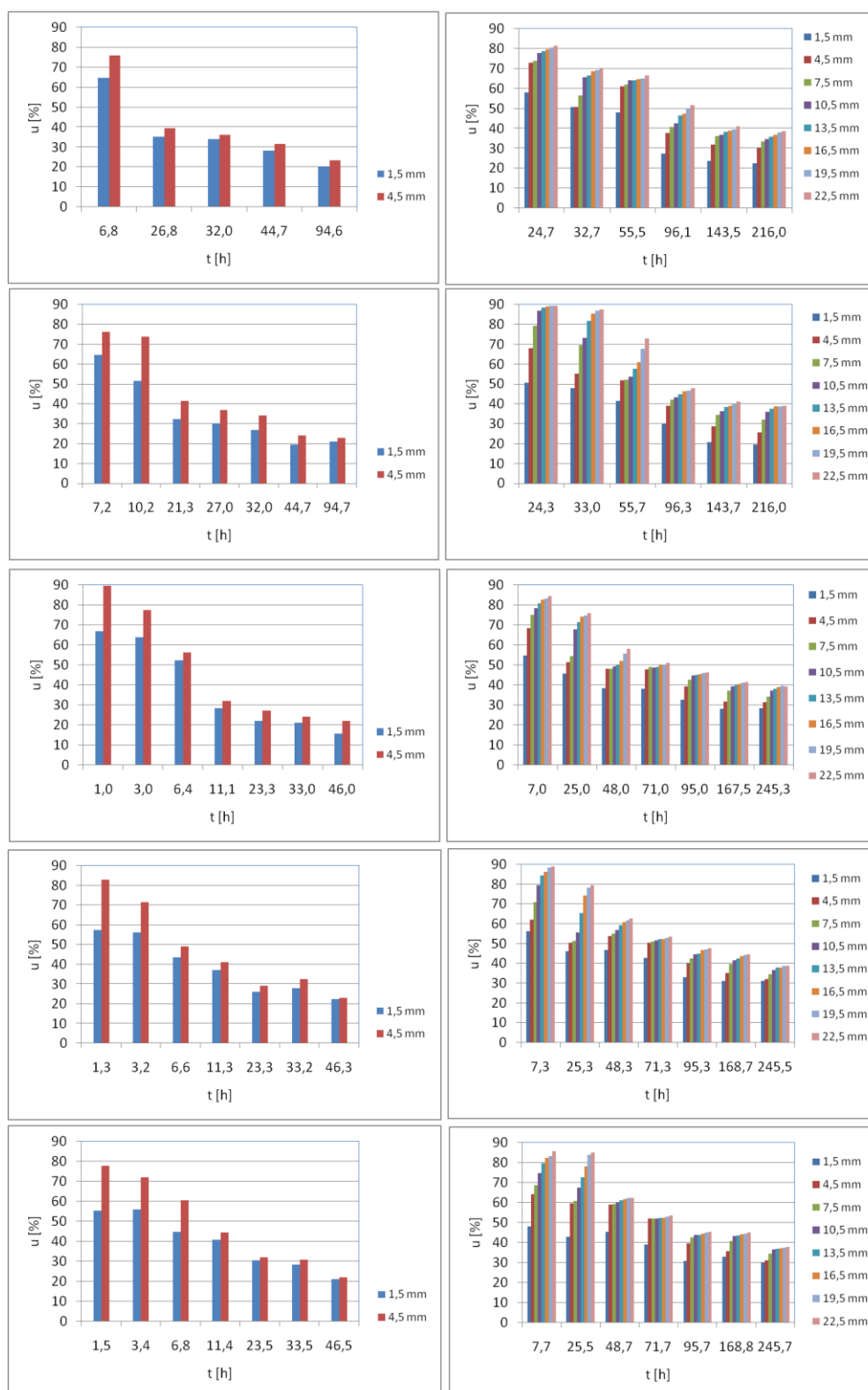
V nekaterih raziskavah kinetike sušenja lesa razlagajo zmanjšanje masnega toka s površine tudi z možnimi spremembami mikrostrukture lesnih vlaken v pod-površinskem sloju (Salin, 2008a). Vpliv mehanskih poškodb tkiva pri pripravi preizkušancev ter posledičnih fizioloških sprememb, aspiracije pikenj in otiljenje, so potrdili tudi pri določanju permeabilnosti lesa, ki je bila posledično nižja od teoretične (Bramhall, 1971; Choong in Kimbler, 1971; Choong in sod., 1974; Siau, 1995; Perre, 2004). V tej raziskavi smo morebitne strukturne spremembe v podpovršinskem sloju lesa dodatno proučevali s polarizirano svetlobo (Slika 58), pri čemer pa lokalnih porušitev celičnih sten nismo zaznali.

Več izstopajočih in neurejenih lesnih vlaken smo zasledili na površini preizkušancev z žagano površino (Ž), kot pa pri tistih s skobljano površino (S). Pri preizkušancih z žagano površino smo pri najmanjši debelini ($d_1 = 6$ mm), potrdili tudi nekoliko nižji začetni masni tok vode s površine lesa (Preglednica 2, Slika 33, Slika 34), kar pa pri debelejših preizkušancih ne ugotavljamo. Sklepamo lahko, da intenzivnejši in bolj izstopajoč vlaknast sloj značilno zmanjša masni tok vode pri preizkušancih z žagano površino. Pri tem je mogoče tudi domnevati, da je pomik ravnine izhlapevanja proste vode v notranjost lesne strukture večji pri preizkušancih z žagano površino v primerjavi s skobljanimi. Vzporedno pa lahko zaradi manjše prekritosti površine skobljanih preizkušancev z izstopajočimi lesnimi vlakni domnevamo tudi o večji efektivni površini izhlapevanja proste vode pri teh preizkušancih. Moren (1992) pri sušenju borovine prav tako navaja pojav lokalnih, mikro-površin, z nižjo lesno vlažnostjo, a še vedno nad vlažnostjo nasičenja lesnih vlaken ($u \geq u_{TNCs}$), ki zmanjšujejo efektivno površino izhlapevanja, ne pa tudi površine za prenos toplote. Takšne mikro-površine je potrebno pripisati tudi specifičnim lastnostim lesa, t.j. osnovni anatomske strukture lesa s prevodnimi elementi ter njihovi orientaciji.

Analiza porazdelitve vlažnosti po prerezu preizkušancev pri sušenju s stacionarnimi pogoji omogoča dodatno razlago glede doseženega začetnega masnega toka vode s površine lesa in kinetike sušenja v nadaljevanju (Priloga A.1-A.5, Priloga B.1-B.5, Slika 65). Pri najtanjših preizkušancih bukovine ($d_1 = 6$ mm) je bila na začetku sušenja s hitrostjo zraka do 2,5 m/s, dosežena vlažnost površinskega sloja lesa ($u_{1,5mm}$) vselej nad 60%. Višja hitrost zraka (4,5 m/s in 7,6 m/s) pa je že na začetku sušenja lesa povzročila večji padec vlažnosti površinskega sloja. Takšna porazdelitev vlažnosti nakazuje, da je bil na začetku sušenja pri nizkih hitrostih zraka (do 2,5 m/s) snovni upor podoben, kar smo potrdili tudi z določitvijo celotnega sušilnega upora (Slika 35). Glede na visoko vlažnost površinskega sloja lesa v začetni fazi sušenja, lahko pri tem tudi domnevamo, da je bila vlažnost površine lesa še vedno nad točko nasičenja lesnih vlaken. Pri tem je bil skupni sušilni upor (R_c) v celoti odvisen od snovne prestopnosti na površini lesa (h_m) ter od lastnosti mejnega filma zraka, na katere smo vplivali s hitrostjo gibanja zraka. Z določanjem površinske vlažnosti ali temperature preizkušancev med postopkom sušenja bi lahko ugotovitve dodatno podkrepili, ter s tem tudi preverili morebiten obstoj faze konstantne sušilne hitrosti na

začetku sušilnega procesa. Nekatere sorodne študije potrjujejo kratkotrajno fazo konstantne sušilne hitrosti, vendar zgolj pri sušenju svežega lesa, predvsem beljave lesnih vrst z nizko gostoto, v zmernih sušilnih pogojih (Perre in sod., 1993; Perre in Martin, 1994; Rosenkilde in Glover, 2002), ter pri sušenju lesa na prostem (Straže in Gorišek, 2007).

Pri stacionarnih pogojih sušenja z višjo hitrostjo zraka ($v > 2,5$ m/s) pa se je že na začetku sušenja, tudi že pri najtanjših preizkušancih ($d_1 = 6$ mm), površinski sloj osušil pod 60% ($u_{1,5\text{mm}}$). Tako izrazita osušitev površinskega sloja, je bila tipična tudi za vse večje debeline preizkušancev (d_2, d_3, d_4) in se je stopnjevala s hitrostjo zraka ter z debelino lesa. Pri najdebelejših preizkušancih ($d_4 = 24$ mm) pade vlažnost površinskega sloja že na začetku sušenja lesa na 47% do 58% ($u_{1,5\text{mm}}$), močneje pri višji hitrosti zraka (Slika 65). Proti notranjosti teh preizkušancev, do globine 10 mm, se vlažnost lesa na začetku sušenja strmo povečuje, na večji oddaljenosti pa ostaja konstantna, podobna začetni vlažnosti (u_z). To nakazuje, da se je pri preizkušancih te debeline ($d_4 = 24$ mm) vlažnost površine zelo približala vlažnosti nasičenja celičnih sten (u_{TNCs}), ali pa je bila od nje celo nižja. Pri nastalih pogojih je notranji snovni upor že na začetku sušenja postal prevladujoč. Dosežen začetni masni tok je v tem primeru zgolj posledica izločanja vode iz tankega površinskega sloja, nastali vlažnostni gradient v lesu pa značilno vpliva na kinetiko sušenja v nadaljevanju. Najmanjši vlažnostni gradient smo tako dosegli pri najnižji hitrosti zraka (v_1), t.j. pri najmanjšem začetnem masnem toku vode. Stopnjevanje hitrosti zraka je povzročilo tudi povečevanje začetnega vlažnostnega gradienta, kjer pa se je pri sušenju z največjo hitrostjo zraka ($v_5 = 7,6$ m/s) v lesu ustvarila tudi t.i. podpovršinska difuzijska bariera. Skozi ta osušeni zunanji sloj lesa, z vlažnostjo pod točko nasičenja celičnih sten, mora kapilarna voda iz notranjosti preizkušancev v nadaljevanju sušenja preiti izključno difuzijsko. To povzroči bistveno počasnejše nadaljnje sušenje. Pojav je splošno znan pri prehitrem sušenju gostejših in manj permeabilnih lesnih vrst, in povzroča velike notranje napetosti ter tudi kolaps lesne strukture (Hart in Darwin, 1971; Hunter, 2002).



Slika 65 Porazdelitev vlažnosti pri bukovih preizkušancih z žagano površino, debeline 6 mm (levo) in 24 mm (desno), sušenih z različnimi hitrostmi zraka (v_1 - 1. vrsta, v_2 - 2. vrsta, v_3 - 3. vrsta, v_4 - 4. vrsta, v_5 - 5. vrsta).

Figure 65 Moisture content distribution at beechwood samples with sawn surface, thickness of 6 mm (left) and 24 mm (right), dried at various air velocities: v_1 - 1st row, v_2 - 2nd row, v_3 - 3rd row, v_4 - 4th row, v_5 - 5th row).

Vzpostavljen večji začetni masni tok, kot posledica višje hitrosti zraka ali pa zaradi ugodnejših lastnosti površine, je povzročil učinkovitejše izločanje vode iz lesa. Ob stopnjevanju masnega toka vode s površine lesa v okolico je pri določeni velikosti toka, odvisno od notranjih strukturnih lastnosti in debeline sortimenta, mogoče pričakovati zaostajanje masnega toka vode v samem materialu. Posledično prihaja v lesu do vzpostavljanja večjega vlažnostnega gradienta, ki pa s tem zmanjšuje možen maksimalen notranji snovni tok vode. Nastalo vlažnostno stanje in nižanje lesne vlažnosti pa nadalje prispeva k zmanjševanju masnega toka vode, saj študije potrjujejo denimo eksponentno zmanjševanje efektivne prevodnosti (K_{ef}) s padanjem lesne vlažnosti (Cloutier in Fortin, 1993), kot tudi zmanjševanje permeabilnosti lesa z dolžino preizkušanca (Comstock, 1967; Choong in sod., 1974; Bolton in Petty, 1978; Siau, 1984; Perre in Karimi, 2002). Kot vzrok za ta pojav se omenja verjetnost hitrega praznjenja kapilar z velikimi premeri (Cloutier in Fortin, 1993), navajajo pa se tudi dokazi o manjšanju števila aktivnih povezav z dolžino preizkušanca, kot tudi s časom eksperimentiranja (Perre, 2000). Z omenjenimi ugotovitvami je mogoče tudi pojasniti zgodnejše pojemanje sušilne hitrosti, t.j. pri višji povprečni vlažnosti lesa, če smo sušili z višjo hitrostjo zraka ter s tem na začetku sušenja dosegli povečan masni tok, ali pa smo sušili debelejšje preizkušance. Pri tanjših preizkušancih (d_1 , d_2), in manjših hitrostih zraka ($v \leq 4,5$ m/s), to dokazuje teoretično izračunana vlažnost prehoda (u_T) v fazo značilno padajoče sušilne hitrosti, ki je pozitivno korelirana z doseženim začetnim masnim tokom (a) (Preglednica 2, Preglednica 3, Preglednica 4, Preglednica 5). Tudi pri debelejših preizkušancih (d_3 , d_4) je na začetku sušilnega postopka povečevanje hitrosti gibanja zraka povzročilo zgodnejše in ireverzibilno pojemanje sušilne hitrosti. To pojemanje pa zaradi izostanka faze nespremenljive sušilne hitrosti na začetku sušilnega postopka (a) ne moremo neposredno kvantitativno ovrednotiti z vlažnostjo prehoda (u_T) v fazo značilno padajoče sušilne hitrosti.

Prevojna točka (u_k) v modelu masnega toka vode v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa (u) predstavlja lesno vlažnost, pri kateri je pojemek masnega toka vode kulminiral (b), pod to vrednostjo pa se je z nadaljnjim sušenjem lesa eksponentno zmanjševal. Oblika pojemanja masnega toka vode pod lesno vlažnostjo v prevoju modela (u_k), ter dejansko vlažnostno območje, nakazujeta na ireverzibilen prehod v difuzijski režim sušenja. Obratno, je moč domnevati, da nad vlažnostjo v prevoju modela (u_k) obstaja masni tok vode tako v obliki kapilarnega toka kot tudi v obliki toka vezane vode, zaradi nastalih koncentracijskih razlik.

Dosežena lesna vlažnost v prevoju modela masnega toka vode je bila najnižja pri počasnem sušenju ($v_1 = 0,6$ m/s) najtanjših preizkušancev (d_1) ($u_k = 38,6\%$ do $43,2\%$), ter blizu vlažnosti nasičenja celičnih sten (Preglednica 2). S povečevanjem hitrosti zraka ob površini preizkušancev je naraščala tudi vlažnost v prevoju modela, ter dosegla največjo vrednost pri hitrostih med $4,5$ m/s in $7,6$ m/s ($u_k = 47,1\%$ do $47,5\%$). Pri debelejših

preizkušancih so bile vlažnosti v prevoju modela pri vseh hitrostih gibanja zraka višje (Preglednica 3, Preglednica 4, Preglednica 5). Pri tem ($d \geq 12$ mm) je povečevanje hitrosti zraka ob preizkušancih manj prispevalo k povečevanju te vlažnosti, kot pa pri najtanjših preizkušancih (d_1). Izkazuje se, da se pri preizkušancih, debelin 12 do 24 mm, izvede prehod v difuzijski režim sušenja že pri visokih lesnih vlažnostih, bistveno nad vlažnostjo nasičenja celičnih sten ($u_k \gg u_{TNCS}$). Velik del proste vode, običajno prisotne v notranjosti oz. sredici elementov, se mora v tem primeru iz lesa izločiti po difuzijski poti. Glede na bistveno zmanjšano sušilno hitrost pri difuzijskem načinu transporta vode iz lesa je očitno smiselna prilagoditev kinetike izločanja proste vode tako, da je vlažnost prehoda v difuzijski režim sušenja čim nižje.

5.2 KINETIKA KONVEKCIJSKEGA SUŠENJA LESA PRI ADAPTIVNIH POGOJIH

Pri sušenju preizkušancev iz bukovine, različnih dimenzij in lastnosti površine, smo ob variiranju stacionarnih sušilnih pogojev potrdili različen odziv materiala glede na vzpostavljene sušilne pogoje. Ta odziv se je hkrati tudi spreminjal tekom trajanja sušilnega postopka in je bil odvisen tudi od vzpostavljenega vlažnostnega stanja v materialu. Pričakovati je tudi različen odziv glede na začetno vlažnostno stanje lesa ter strukturne razlike preizkušancev. Na osnovi teh ugotovitev lahko sklepamo, da je za doseganje optimalne kinetike konvekcijskega sušenja lesa potrebno sproti adaptiranje sušilnih pogojev.

V eksperimentih adaptivnega konvekcijskega sušenja se je izkazalo, da je možno učinkovit sušilni potencial definirati zgolj s kontinuiranim spremljanjem masnega toka vode s površine lesa. Princip adaptivnega sušenja tako v izhodišču zahteva definiranje ustreznih začetnih in robnih pogojev ter način spreminjanja parametrov sušilnega potenciala. Po zagonu takšnega postopka se nato parametri sušilnega potenciala v definiranem časovnem intervalu iterativno spreminjajo in so odvisni od rezultata, t.j. doseženega masnega toka vode v predhodni iteraciji. Tako je potek sušenja odvisen od postavljenih začetnih in robnih pogojev, načina spreminjanja parametrov sušilnega potenciala ter lastnosti preizkušanca za sušenje. Posledično je kinetika vsakega adaptivnega sušilnega postopka specifična.

V izvedenih adaptivnih sušilnih postopkih smo z linearnim spreminjanjem parametrov sušilnega potenciala ($\Delta\phi$, Δv , ΔT) v kratkem časovnem intervalu ($\Delta t = 2$ min) učinkovito prilagajali sušilni potencial doseženemu masnemu toku vode. Izkazalo se je tudi, da je mogoče učinkovit adaptivni sušilni potencial doseči že zgolj z variiranjem enega izmed vplivnih parametrov. V tem primeru morata preostala subjektivno določena parametra biti izkustveno določena, ter v mejah realnih vrednosti, da se ohrani stabilnost delovanja sistema.

Primerjava individualnih odzivov preizkušancev pri adaptivnem konvekcijskem sušenju z odzivom paralelnih preizkušancev pri stacionarnih sušilnih pogojih je potrdila dobro kinetiko sušilnega postopka. Konvekcijski adaptivni sušilni postopki so bili primerjalno krajši, glede na najhitrejša postopka pri stacionarnih pogojih. Pri povprečni vlažnosti preizkušancev nad točko nasičenja celičnih sten ($u > u_{TNCS}$) je bila v vseh primerih sušilna hitrost velika, ter se je malo spreminjala s padanjem lesne vlažnosti. Pri takšnem poteku je tudi v preizkušancih pričakovati primeren vlažnostni profil, brez prekomernega vlažnostnega gradienta. To dodatno dokazuje tudi realizirano oscilirajoče nihanje klimatskih pogojev, ki je v kratkih časovnih intervalih povzročalo tudi navlaževanje preizkušancev, razvidno iz valovite oblike sušilne krivulje (Slika 59, Slika 61, Slika 63). Pričakovati je, da se je v teh kratkih intervalih navlaževal zgolj tanek površinski sloj preizkušancev, kar je prispevalo k zmanjševanju površinskega vlažnostnega gradienta. Pozitiven učinek kratkotrajnega navlaževanja lesa na vlažnostni profil ter celotno kinetiko sušenja so prav tako potrdili pri reverziranju ventilatorjev v širokih komorah za konvekcijsko šaržno sušenje lesa (Pang in Haslett, 1995; Nijdam in Keey, 1996; Wiberg, 2001) kot tudi pri konvekcijskem šaržnem sušenju z oscilirajočimi klimatskimi pogoji (Welling in sod., 2003).

Doseženi rezultati dokazujejo potencial konvekcijskega sušenja pri adaptivnih pogojih, saj omogoča kontinuirano prilagajanje sušilnega potenciala dejanski oz. trenutni sposobnosti lesa in preizkušanca za transport vode. Uporabnost spremljanja masnega toka vode s površine lesa v okolico se pri konvekcijskem sušenju še posebej kaže pri visoki lesni vlažnosti. V tem območju se v trenutni sušilni praksi lesna vlažnost največkrat še vedno določa elektro-uporovno, pri čemer so meritve zelo netočne (Chen in sod., 1994). Uporabna vrednost takšnih podatkov je za učinkovito vodenje sušilnega postopka zelo majhna. Te težave so prisotne predvsem pri sušenju težje sušečih lesnih vrst, zlasti listavcev z večjo gostoto, kjer se še vedno srečujemo s problemom ustrezne kakovosti posušenega lesa ter dolgotrajnosti sušilnih postopkov. Adaptivno vodenje takšnih sušilnih procesov bi lahko v prihodnje rešilo velik del te problematike.

6 SKLEPI

Rezultati raziskave so potrdili kompleksnost kinetike sušenja bukovega lesa (*Fagus sylvatica* L.), ki je odvisna od pogojev sušilnega postopka, inherentnih materialnih lastnosti ter specifičnih lastnosti preizkušancev. Kljub vsemu smo v omejenem obsegu variiranja eksperimentalnih pogojev (Poglavje 3.2.2, Poglavje 3.3.2) konvekcijskega komorskega sušenja prišli do naslednjih ugotovitev:

- Površinska snovna prestopnost (h_m) ima značilen vpliv na kinetiko enostranskega sušenja sveže bukovine ($u \gg u_{TNCs}$), vendar zgolj pri zelo majhni debelini ($d_1 = 6$ mm), vse do hitrosti gibanja zraka 4,5 m/s, z večanjem debeline lesa pa je njen učinek bistveno manjši. Pri večjih debelinah preizkušancev ($d \geq 12$ mm) snovna prestopnost značilno vpliva na transport proste vode zgolj pri nizkih hitrostih gibanja zraka (0,6 m/s, 1,1 m/s).
- Površinska snovna prestopnost (h_m) je pri visoki lesni vlažnosti ($u \gg u_{TNCs}$), pri izločanju proste vode iz lesa višja pri bukovini s skobljano površino (S), primerjalno s preizkušanci z žagano površino (Ž). Razlika snovne prestopnosti, dosežena na začetku sušenja, pri izločanju proste vode iz lesa, se v nadaljevanju sušilnega procesa izkaže za nepomembno.
- Lastnosti površine lesa, pri izločanju proste vode iz lesa pri visoki lesni vlažnosti ($u \gg u_{TNCs}$), značilno vplivajo na dosežen masni tok, ki je večji pri manj hrapavi ter pri bolj čisti lesni površini, brez izstopajočih lesnih vlaken.
- Masni tok vode, dosežen pri izločanju proste vode pri visoki vlažnosti lesa ($u \gg u_{TNCs}$), je odvisen od hitrosti gibanja zraka ob lesni površini. Le ta narašča hitreje pri nizkih hitrostih zraka (do 2,5 m/s), z nadaljnjim višanjem hitrosti zraka pa se naraščanje masnega toka upočasni. Učinek hitrosti gibanja zraka na izločanje proste vode iz lesa je relativno največji pri najmanjši debelini lesa ($d = 6$ mm), z večanjem debeline pa se manjša.
- Majhen masni tok pri izločanju proste vode iz lesa ($u \gg u_{TNCs}$), bistveno nižji kot ga dovoljuje notranji snovni upor v lesu, omogoča enakomerno sušenje ter kratkotrajno doseganje dokaj nespremenljive sušilne hitrosti ob prevladujočem zunanjem snovnem upor. Enakomerno sušenje z zelo počasi pojemajočo sušilno hitrostjo se podaljšuje z manjšanjem masnega toka vode iz lesa, v splošnem pa je daljše pri sušenju tanjših sortimentov z nizko hitrostjo zraka, pod 2,5 m/s.
- Večanje masnega toka vode pri izločanju proste vode s površine lesa ($u \gg u_{TNCs}$) preko največje možne vrednosti, ki je definirana s sposobnostjo prevajanja proste vode v lesu, povzroča ireverzibilno in značilno zmanjševanje sušilne hitrosti s časom sušenja, oz. s padanjem lesne vlažnosti. Pri tem na kinetiko sušenja značilno vpliva prevladujoč notranji snovni upor, odvisen od debeline sortimenta, in se s padanjem lesne vlažnosti povečuje.

- Bistveno preseganje masnega toka pri izločanju proste vode ($u \gg u_{\text{TNCs}}$) s površine v primerjavi z največjim možnim tokom proste vode v notranjosti sortimenta povzroča hitro izsuševanje površine lesa in podpovršinskih slojev pod vlažnost nasičenja celičnih sten. To inducira nastanek difuzijske bariere, ki že pri visoki povprečni lesni vlažnosti povzroči difuzijsko prehajanje vode preko osušenih zunanjih slojev ter ireverzibilno zmanjšanje sušilne hitrosti. Takšni pogoji bistveno vplivajo na slabšo kinetiko sušenja v nadaljevanju postopka.
- Kinetika izločanja proste vode bistveno vpliva tudi na potek sušenja v nadaljevanju, pri nižji lesni vlažnosti ($u \approx u_{\text{TNCs}}$) in pri izločanju vezane vode ($u < u_{\text{TNCs}}$). Hitrejša sušenja v območju proste vode pospeši prehod v difuzijski transport vode iz lesa.
- Difuzijsko izločanje vode iz lesa se pri sušenju iz svežega stanja prične vselej pri povprečni vlažnosti lesa nad točko nasičenja lesnih vlaken ($u > u_{\text{TNCs}}$). Prehod v difuzijski režim sušenja je zgodnejši pri večji debelini lesa ter pri višji hitrosti gibanja zraka.
- Adaptivno sušenje omogoča prilagoditev transporta toka vode iz lesa specifičnim sposobnostim preizkušanca, tako lastnostim površine kot tudi strukturnim lastnostim lesa.
- Prilagajanje sušilnega potenciala trenutnemu masnemu toku vode iz sušečega lesa v okolico optimira kinetiko sušilnega postopka.
- Adaptivni sušilni potencial pri konvekcijskem sušenju lesa dosežemo z variiranjem vseh parametrov sušilnih pogojev: s temperaturo (T), z vlažnostjo zraka (ϕ) ter s hitrostjo zraka (v) ob površini lesa.

7 POVZETEK (SUMMARY)

7.1 POVZETEK

Pri konvekcijskem sušenju lesa je trajanje sušilnega postopka kot tudi dosežena kakovost posušenega lesa značilno odvisna od sušilnih pogojev. Pri sušenju lesa, še posebej pri težje sušečih lesnih vrstah z višjo gostoto in slabšo permeabilnostjo, je potrebno že v začetku postopka sušilno hitrost prilagoditi dejanski sposobnosti lesa in preizkušanca za transport vode. Na notranjo snovno upornost lesa pa poleg strukturnih lastnosti in fizioloških posebnosti tkiv vpliva tudi vlažnostno stanje. Slednje je hkrati rezultat sušilnih pogojev ter ustvarjenega sušilnega potenciala, in med sušenjem kontinuirano učinkuje na samo kinetiko procesa.

Zaradi težav pri doseganju kratkotrajnega sušilnega postopka ob hkratni dobri kakovosti posušenega lesa smo v delu raziskovali kinetiko konvekcijskega sušenja bukovine (*Fagus sylvatica* L.). V prvem delu raziskave smo pri konstantni temperaturi sušenja ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) in relativni zračni vlažnosti ($\phi = 85\%$) variirali hitrost gibanja zraka (v) ob površini preizkušancev v razmiku od 0,6 m/s do 7,6 m/s. Uporabili smo radialno orientirane preizkušance ($R \times L = 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$), debeline od 6 mm, 12 mm, 18 mm in 24 mm (d_1, d_2, d_3, d_4), s tračno žagano ($\check{Z}$) in skobljano sušilno površino (S). Lastnosti površine preizkušancev smo proučili s stereo- in transmisijsko mikroskopijo. Med sušenjem v laboratorijskem sušilnem kanalu smo v zaporednih časovnih intervalih gravimetrično določali povprečno lesno vlažnost (u), vlažnostni gradient ($\Delta u/\Delta x$) in masni tok vode s površine lesa v okolico. Kinetiko sušenja lesa smo analizirali s pomočjo sušilnih krivulj, na začetku sušenja, t.j. pri izločanju proste vode ($u \gg u_{\text{TNCs}}$), pa tudi z analizo z modelom 1. reda. Pri tem smo računali časovne konstante modela (τ), značilne za odziv na hipno zunanjo motnjo, ki definirajo celotni sušilni upor (R_c). Masni tok vode s površine lesa v odvisnosti od povprečne lesne vlažnosti smo analizirali z Gompertz-ovo funkcijo. Pri tem smo določili začetni masni tok (a), pojemek masnega toka s padanjem povprečne lesne vlažnosti (k), vlažnost lesa, pri kateri je dosežen največji pojemek (u_k) ter vlažnost prehoda iz faze konstantne- v fazo padajoče sušilne hitrosti (u_T). V drugem delu raziskave pa smo proučevali kinetiko konvekcijskega sušenja bukovine pri adaptivnih sušilnih pogojih. V ta namen smo v grafičnem programskem okolju LabVIEW 8.0 izdelali zaprto-zančni računalniški algoritem za iterativno prilagajanje sušilnega potenciala trenutnemu masnemu toku vode s površine lesa v okolico. Za parametre sušilnega potenciala smo uporabili temperaturo sušenja (T), relativno zračno vlažnost (ϕ) in hitrost gibanja zraka (v), ter jih iterativno ($\Delta t = 2\text{ min}$) linearno spreminjali ($\Delta T, \Delta \phi, \Delta v$). Pri zmanjševanju sušilnega potenciala smo uporabili 2-kratno spremembo parametrov, pri povečevanju potenciala pa enojno. Pri sušenju nad točko nasičenja celičnih sten ($u > u_{\text{TNCs}}$) smo preverili učinek variiranja hitrosti zraka in relativne zračne vlažnosti, pri sušenju v higroskopskem območju lesa ($u < u_{\text{TNCs}}$) pa tudi vpliv temperature.

V stacionarnih eksperimentalnih pogojih smo pri visoki lesni vlažnosti ($u \gg u_{\text{TNCs}}$) potrdili značilno naraščanje masnega toka proste vode s površine lesa z naraščanjem hitrosti gibanja zraka (v). Prirastek začetnega masnega toka (a ; $u \gg u_{\text{TNCs}}$) z naraščanjem hitrosti gibanja zraka se je nelinearno povečeval, bolj pri nizkih hitrostih zraka, vse do 2,5 m/s. Višje hitrosti gibanja zraka so imele zmanjšan vpliv na začetni masni tok vode. Pri sušenju tankih preizkušancev ($d_1 = 6$ mm) z nizkimi hitrostmi zraka ($v \leq 2,5$ m/s) smo na začetku sušenja dosegli kratkotrajno fazo dokaj nespremenljive sušilne hitrosti. Pri teh pogojih smo na začetku sušenja potrdili tudi prevladujoč sušilni upor na površini preizkušancev, odvisen od snovne prestopnosti (h_m). Višja sušilna hitrost je bila dosežena pri preizkušancih s skobljano površino (S), ki pa je hkrati povzročila hitrejšo pojevanje začetnega masnega toka in prehod v fazo značilno padajoče sušilne hitrosti pri višji vlažnosti lesa (S: $u_T = 62,6\%$ do $67,7\%$; Ž: $u_T = 55,2\%$ do $64,1\%$). Manjši začetni masni tok vode s površine pri žaganih vzorcih pojasnujemo z manjšo snovno prestopnostjo v primerjavi s skobljanimi preizkušanci. Pri teh preizkušancih (Ž) smo na površini odkrili izstopajoča lesna vlakna, ki v večjem deležu prekrivajo osnovno strukturo lesa, kot pa je to pri skobljani površini (S).

Višje hitrosti zraka ($v \geq 2,5$ m/s), ter stacionarno konvekcijsko sušenje debelejših preizkušancev (d_2, d_3, d_4) je že na začetku postopka povzročilo značilno padanje masnega toka vode ter neposreden prehod v fazo ireverzibilno padajoče sušilne hitrosti. Vzrok je v zaostajanju masnega toka vode v lesu, primerjalno z masnim tokom vode na površini preizkušancev. Pri teh pogojih postaja prevladujoč notranji snovni upor, ki se s padanjem lesne vlažnosti še povečuje. Prehod v fazo značilno padajoče sušilne hitrosti smo posledično dosegli že pri višji vlažnosti lesa, v najslabšem primeru že pri 78,3% ($d_4 = 24$ mm, $v_5 = 7,6$ m/s). Potrdili smo odvisnost teoretične vlažnosti prehoda (u_T) in vlažnosti v prevoju modela masnega toka vode (u_k) od doseženega začetnega masnega toka vode s površine lesa (a). Pri sušenju najdebelejših vzorcev (d_4) pri najvišji hitrosti zraka (v_5) smo že na začetku sušenja dosegli tudi velik vlažnostni gradient. Pri tem je vlažnost površinskega sloja lesa padla pod vlažnost nasičenja lesnih vlaken ($u < u_{\text{TNCs}}$). Nastala površinska difuzijska bariera je povzročila bistveno slabše sušenje v nadaljevanju, saj se je tudi ujeta prosta voda iz notranjosti preizkušancev izločala difuzijsko.

Adaptivno sušenje bukovine je omogočilo sprotno prilagajanje ($\Delta t = 2$ min) sušilnega potenciala dejanskemu masnemu toku vode s površine lesa. Konvekcijski adaptivni sušilni postopki so bili primerjalno krajši, glede na najhitrejšo postopke pri stacionarnih pogojih. Pri povprečni vlažnosti preizkušancev nad točko nasičenja celičnih sten ($u > u_{\text{TNCs}}$) je bila v vseh primerih sušilna hitrost velika, ter se je malo spreminjala s padanjem lesne vlažnosti, v nekaterih primerih vse do 40% povprečne vlažnosti lesa. Realizirano oscilirajoče nihanje klimatskih pogojev, ki je v kratkih časovnih intervalih povzročalo tudi navlaževanje površine preizkušancev je vplivalo tudi na zmanjševanje površinskega

vlažnostnega gradienta. Hkrati se je izkazalo, da je mogoče učinkovit adaptivni sušilni potencial doseči že zgolj z variiranjem enega izmed vplivnih sušilnih parametrov (ΔT , $\Delta \phi$, Δv). V tem primeru morata preostala subjektivno določena parametra biti izkustveno določena, ter v mejah realnih vrednosti, da se ohrani stabilnost delovanja sistema. Učinkovit adaptivni sušilni potencial za optimizacijo kinetike sušenja lahko s kombinacijo temperature in zračne vlažnosti dosežemo tudi v higroskopskem vlažnostnem območju.

7.2 SUMMARY

In the case of convection drying of wood, the duration of the drying process as well as the quality of dried wood obtained significantly depend on the drying conditions. During drying, especially at wood species with higher density and lower permeability, it is necessary already in early stages to adjust the actual drying rate to the conductivity of wood for moisture transport. Moisture content (u) distribution in wood, in addition to structural and physiological properties of specific tissues, also affect its internal moisture flow resistance. The moisture content distribution is also a result of drying conditions and used drying potential, and continuously influence the kinetics of the drying process.

Due to the difficulty in achieving short drying process with a good quality of dried wood we studied the kinetics of convection drying of beech (*Fagus sylvatica* L.). In the first part of the research was at constant temperature ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) and relative air humidity ($\phi = 85\%$) varied the air velocity (v) at the surface of wood specimens with an interval of 0.6 m/s to 7.6 m/s. We used the radial-oriented specimens ($R \times L = 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$), thickness of 6 mm, 12 mm, 18 mm and 24 mm (d_1, d_2, d_3, d_4), with a band-sawn ($\check{Z}$) and planed drying surface (S). Surface properties of specimens were studied with a stereo- and transmission light microscopy. During the drying process in a laboratory drying channel were in successive intervals gravimetrically determined average wood moisture content (u), moisture content gradient ($\Delta u / \Delta x$) and the water mass flow from the surface of specimens into the air. The kinetics of drying was analysed with drying curves, as well as with the analysis of First Order System (FOS), at the beginning of the process ($u \gg u_{\text{TNCs}}$). Calculated time constants (τ) were used for determination of total drying resistance and predominating mass flow resistivity. Convection water mass flow from the surface of the wood was analyzed also as a function of average wood moisture content with the Gompertz model. In doing so, we determined the initial water mass flow (a), the decrease of the flow with a decrease in average wood moisture content (k), moisture content at the maximum decrease of water mass flow (u_k) and the moisture content of the transition from constant drying rate period to the significantly decreasing drying rate period (u_T). In the second part of the research, we studied the kinetics of convection drying of beech at adaptive drying conditions. In this case we built in a graphical programming environment LabVIEW 8.0 a closed-loop iterative algorithm to adapt the drying potential to the actual water mass flow from the surface of wood. We used 3 parameters for the drying potential,

namely temperature (T), relative air humidity (ϕ) and air velocity (v), and their iterative ($\Delta t = 2$ min) linear change (ΔT , $\Delta \phi$, ΔV). Two-fold change of parameters value was used to reduce the drying potential, and single change for its increase. We checked the effect of variation of air velocity and relative humidity at the drying above moisture content of the fibre saturation point (u_{TNCs}), as well as the impact of temperature in the hygroscopic range of wood.

Generally, at the stationary drying experiments, the significant increase in water mass flow from the surface of wood with a raise of the air velocity was present at high moisture content ($u \gg u_{TNCs}$). Increment of the initial water mass flow (a) by increasing the air velocity (v) had the non-linear rise, the more at low air velocities, up to 2.5 m/s. The surface mass resistance ($1/h_m$) was predominant resistance at this conditions ($v < 2.5$ m/s). Higher air velocity had a reduced impact on the initial water mass flow. Drying of the thinnest wood specimens ($d_1 = 6$ mm) with low air velocity ($v \leq 2.5$ m/s) enabled an initial short-term period of relatively constant drying rate. The higher drying rate was achieved in this case at specimens with planed surface (S) but also rapid decrease of water mass flow with decreasing of average moisture content. The transition moisture content to the significantly decreasing drying rate period was at 62.6% to 67.7% at planed specimens, 55.2% to 64.1% at sawn wood. Lower initial water mass flow from the surface of the sawn specimens ($\check{Z}$), comparing to planed specimens (S), can be explained by the significantly lower mass transfer coefficient of the first, determined with time constants of FOS. We found more raised wood fibres which overlap to a greater share of the underlying structure of the wood at sawn specimens ($\check{Z}$), comparing to planed beechwood (S).

Higher air velocity at drying of thicker specimens (d_2 , d_3 , d_4) at the beginning of the procedure would lead to a gradual decrease of water mass flow and a direct transition to significantly decreasing drying rate period. This is due to the lag of internal water mass flow behind convection water mass flow at the surface of specimens. The internal water mass flow resistance becomes predominant at this conditions and significantly impact on drying kinetics. The transition to the significantly decreasing drying rate period was achieved in the worst case already at moisture content of 78.3% ($d_4 = 24$ mm, $v_5 = 7.6$ m/s). We confirmed the dependence of the theoretical transition wood moisture content (u_T), and moisture content at the inflection point of the water mass flow model (u_k), on the initial water mass flow from the surface of wood (a). Additionally, a high drying gradient was present already at the beginning of the drying procedure at the thickest specimens (d_4), dried with the highest air velocity (v_5). In this case, the moisture content of the surface layer of wood fell below fibre saturation point. The resulting surface diffusion barrier caused significantly lower drying rate in the continuation of the process. Therefore, a caught free water from the interior of the specimens had to be removed by diffusion.

Adaptive drying of beech has enabled us to adapt drying potential ($\Delta t = 2$ min) to the present water mass flow from the surface of the wood. Adaptive convection drying procedures were generally shorter, comparing to the fastest processes at stationary conditions. We achieved at all adaptive drying procedures high drying rate, having small reduction to the 40% average wood moisture content. Realized oscillating climatic conditions, cause during the drying humidification of the surface of specimens. This also reduced the subsurface moisture content gradient. At the same time it has been shown that effective adaptive drying potential can be achieved using a variation of only one of available influencing parameters (ΔT , $\Delta \phi$, Δv). In this case, the remaining parameter has to be experimentally set, and within the proper limit, to maintain stability of the system. The effective adaptive drying potential, for the optimization of the drying procedure can be achieved also in hygroscopic moisture content range of wood, using a combination of the air humidity and the temperature.

8 VIRI

- Aguilera A., Martin P. 2001. Machining qualification of solid wood of *Fagus sylvatica* L. and *Picea excelsa* L.: cutting forces, power requirements and surface roughness. Holz als Roh- und Werkstoff, 59: 483-488
- Ananias R.A., Mougel E., Zoulalian A. 2008. Introducing an overall mass-transfer coefficient for prediction of drying curves at low-temperature drying rates. Wood Science and Technology, 43: 43-56
- Avramidis S., Siau J.F. 1987. An investigation of the external and internal resistance to moisture diffusion in wood. Wood Science and Technology, 21: 249-256
- Bolton A.J., Petty J.A. 1978. The relationship between axial permeability of wood to dry air and to a non polar solvent. Wood Science and Technology, 12: 111-126
- Bramhall G. 1971. The validity of Darcy's law in the axial penetration of wood. Wood Science and Technology, 5: 121-134
- Bučar B. 2009a. "Adaptivno konvekcijsko sušenje lesa". Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo (osebni vir, februar 2009)
- Bučar B. 2009b. "Izločanje proste vode iz lesa pri konstantnih sušilnih pogojih". Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo (osebni vir, oktober 2009)
- Cai L., Avramidis S. 1993. A study on the separation of diffusion and surface emission coefficients in wood. Drying Technology, 15: 1457-1473
- Chen Z., Wengert E.M., Lamb F.M. 1994. A technique to electrically measure the moisture content of wood above fiber saturation point. Forest Products Journal, 44: 57-63
- Choong E.T. 1965. Diffusion coefficients of softwoods by steady-state and theoretical methods. Forest Products Journal, 15: 21-27
- Choong E.T., Kimbler O.K. 1971. A technique of measuring water flow in woods of low permeability. Wood Science, 4: 32-36
- 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

Cloutier A., Fortin Y. 1991. Moisture content - water potential relationship of wood from saturated to dry conditions. *Wood Science and Technology*, 25: 263-280

Cloutier A., Fortin Y. 1993. A model of moisture movement in wood based on water potential and determination of the effective water conductivity. *Wood Science and Technology*, 27: 95-114

Cloutier A., Tremblay C., Fortin Y. 1995. Effect of specimen structural orientation on the moisture content - water potential relationship of wood. *Wood Science and Technology*, 29: 235-242

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

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

Davis C.P. 2004. A robotic gravimetric test system for wood drying research. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 62: 197-202

Dullien F.A.L. 1992. Porous media - Fluid transport and pore structure. London, Academic Press: 478 str.

Edlefsen N.E., Anderson A.B.C. 1943. Thermodynamics of soil moisture. *Hilgardia*, 15: 31-298

Eriksson J., Johansson H., Danvind J. 2007. A mass transport model for drying wood under isothermal conditions. *Drying Technology*, 25: 433-439

Faust T.D., Rice J.T. 1986. Characterizing the roughness of southern pine veneer surfaces. *Forest Products Journal*, 36: 75-81

Felixx S., Razafindrakoto J.C., Castera P. 1989. Modelling of hygrothermoelastic effects during timber drying. V: IUFRO International Wood Drying Symposium, Seattle, Kayihan F., Johnson J.A., Smith W.R. (ur). Seattle, 238-246

Fortin Y. 1979. Moisture content - matric potential relationship and water flow properties of wood at high moisture contents. Dokt. disertacija. Vancouver, University of British Columbia: 183 str.

Gorišek Ž. 1995. Problematika obarvanja lesa v procesu sušenja. *Les*, 47: 228-230

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

Hanhijärvi A., Wahl P., Räsänen J., Silbennoinen R. 2003. Observation of Development of Microcracks on Wood Surface Caused by Drying Stresses. *Holzforschung*, 57: 561-565

Hansmann C., Gindl W., Wimmer R., Teischinger A. 2002. Permeability of wood. *Wood Research*, 47: 1-16

Hart C.A. 1964. Theoretical effect of gross anatomy upon conductivity of wood. *Forest Products Journal*, 14: 25-32

Hart C.A., Darwin W.M. 1971. The slow drying rate of white oak. *Wood Science*, 4: 46-54

Hart C.A., Gilmore R.C. 1985. An air-drying technique to control surface checking in refractory hardwoods. *Forest Products Journal*, 35: 43-50

Hukka A. 1999. The Effective Diffusion Coefficient and Mass Transfer Coefficient of Nordic Softwoods as Calculated from Direct Drying Experiments. *Holzforschung*, 53: 534-540

Hukka A., Oksanen O. 1999. Convective mass transfer coefficient at wooden surface in jet drying of veneer. *Holzforschung*, 53: 204-208

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

Incropera F.P., DeWitt D.P. 1985. Fundamentals of heat and mass transfer. New York, John Wiley & Sons: 776 str.

Irrudayaraj J., Haghighi K., Stroshine R.L. 1990. Nonlinear finite element analysis of coupled heat and mass transfer problems with an application to timber drying. *Drying Technology*, 8: 731-749

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

Koch G. 2008. Discolouration of wood in the living tree and during processing. V: End user's needs for wood material products, Delft, 29-30 okt. 2008. Gard W.F., Kuilen J.W.G. (ur). Delft, Delft University of Technology: 11-18

- Kowalski S.J., Rybicki A. 2007. Residual stresses in dried bodies. *Drying Technology*, 25: 629-637
- Kreber B., Fernandez M., Mc Donald A.G. 1998. Migration of kiln brown stain precursors during drying of radiata pine sapwood. *Holzforschung*, 52: 441-446
- Kreber B., Haslett A.N., McDonald A.G. 1999. Kiln brown stain in radiata pine: A short review on cause and methods for prevention. *Forest Products Journal*, 49: 66-70
- Krischer O., Kast W. 1978. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin, Springer: 494 str.
- Luikov A.V. 1966. Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous bodies. Oxford, Pergamon Press: 623 str.
- Luostarinen K., Möttönen V. 2004. Effects of log storage and drying on birch (*Betula pendula*) wood proanthocyanidin concentration and discoloration. *Journal of Wood Science*, 50: 151-156
- McMillen J.M., Baltes R.C. 1972. New kiln schedule for presurfaced oak lumber. *Forest Products Journal*, 22: 19-26
- Meyer R.W. 1971. Influence of pit aspiration on earlywood permeability of Douglas fir. *Wood and Fiber*, 2: 328-339
- Milota M.R. 2008. Drying rate correlation for Douglas-fir lumber. *Forest Products Journal*, 58: 37-40
- Milota M.R., Tschernitz J.L. 1990. Correlation of loblolly pine drying rates at high temperature. *Wood and Fiber*, 22: 298-313
- Moren T.J. 1992. Infrared tomography in the analysis of moisture flux from drying wooden surfaces. *Drying Technology*, 10: 1219-1230
- Moren T.J., Sehstedt P.M. 1999. Heat and mass transfer during sapwood drying above FSP: consequences for kiln drying. V: 6th IUFRO International Wood Drying Conference, Stellenbosch, 25-28 jan. 1999. Vermaas H., Steinmann D. (ur). Stellenbosch, Stellenbosch University: 205-211

Murmanis L., River B.H., Stewart H.A. 1986. Surface and subsurface characteristics related to abrasive-planing conditions. *Wood and Fiber Science*, 18: 107-117

Newman A.B. 1931. The drying of porous solids: diffusion calculations. *Transactions of the AIChE*, 27: 203-220

Nijdam J.J., Keey R.B. 1996. Influence of local variations of air velocity and flow direction reversals on the drying of stacked timber boards in kilns. *Chemical Engineering Research & Design*, 74: 882-892

Nijdam J.J., Langrish T.A.G., Keey R.B. 2000. A high temperature drying model for softwood timber. *Chemical Engineering Science*, 55: 3585–3598

Pang S. 1996. External heat and mass transfer coefficients for kiln drying timber. *Drying Technology*, 14: 859-871

Pang S. 2002. Investigation of effects of wood variability and rheological properties on lumber drying: application of mathematical models. *Chemical Engineering Journal*, 86: 103-110

Pang S. 2005. Development, validation and practical application of mathematical models for wood drying. V: 9th IUFRO Wood Drying Conference, Nanjing, 21-26 avg. 2005. Lianbai G. (ur). Nanjing,

Pang S., Haslett A.N. 1995. The application of mathematical models to the commercial high-temperature drying of softwood lumber. *Drying Technology*, 31: 1635-1674

Pang S., Langrish T.A.G., Keey R.B. 1994. Moisture movement in softwood at elevated temperatures. *Drying Technology*, 12: 1897-1914

Perre P. 1987. Measurements of softwoods permeability to air: Importance upon the drying model. *Heat and Mass Transfer*, 14: 519-529

Perre P. 1997. Image analysis, homogenization, numerical simulation and experiment as complementary tools to enlighten the relationship between wood anatomy and drying behavior. *Drying Technology*, 15: 2211-2238

Perre P. 2000. Fundamental aspects of fluid migration in beech. V: 2nd COST E15 Workshop on "Quality drying of hardwood", Sopron, 11-12 sep. 2000. Tamásy-Bánó M. (ur). Sopron, Faculty of Wood Science, University of Western Hungary: 1-12

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

Perre P. 2007. Fluid migration in wood. V: *Fundamentals of wood drying*. Perre P. (ur). Nancy, A.R.B.O.LOR.: 125-156 str.

Perre P., Karimi A. 2002. Fluid migration in two species of beech (*Fagus sylvatica* and *Fagus orientalis*): a percolation model able to account for macroscopic measurements and anatomical observations. *MADERAS: Cince & Technologia*, 4: 50-68

Perre P., Maillet D. 1989. Drying of softwoods: The interest of a two-dimensional model to simulate anisotropy or to predict degrade. V: *IUFRO International Wood Drying Symposium*, Seattle, Kayihan F., Johnsson J.A., Smith W.R. (ur). Seattle, 226-237

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

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

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

Perre P., Turner I. 2007. Coupled heat and mass transfer. V: *Fundamentals of wood drying*. Perre P. (ur). Nancy, A.R.B.O.LOR.: 203-241 str.

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

Plumb O.A., Brown C.A., Olmstead B.A. 1984. Experimental measurements of heat and mass transfer during convective drying of southern pine. *Wood Science and Technology*, 18: 187-204

Plumb O.A., Spolek G.A., Olmstead B.A. 1985. Heat and mass transfer in wood drying drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 28: 1669-1678

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

Rohsenow W.M., Hartnett J.P., Cho H.H. 1998. *Handbook of heat transfer*. McGraw-Hill Co.: 1344 str.

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

Rosenkilde A., Glover P. 2002. High Resolution Measurement of the Surface Layer Moisture Content during Drying of Wood using a Novel Magnetic Resonance Imaging Technique. *Holzforschung*, 56: 312-317

Salin J.G. 1996. Mass transfer from wooden surfaces. V: *International Drying Symposium*, Krakow, 2 avg. 1996. Mujumdar A.S. (ur). Krakow, Faculty of Wood Technology: 711-718

Salin J.G. 2002. Theoretical analysis of mass transfer from wooden surfaces. V: *13th International Drying Symposium*, Beijing, 27-30 avg. 2002. Mujumdar (ur). Beijing, 1826-1834

Salin J.G. 2003. External Heat and Mass Transfer - Some Remarks. V: *8th International IUFRO wood drying conference*, Brasov, 24-29 avg. 2003. Ispas M. (ur). Brasov, Editura Univeritatii Transilvania: 343-348

Salin J.G. 2006a. Modelling of the behaviour of free water in sapwood during drying. Part I. A new percolation approach. *Wood Material Science and Engineering*, 1: 4-11

Salin J.G. 2006b. Modelling of the behaviour of free water in sapwood during drying. Part II. Some simulation results. *Wood Material Science and Engineering*, 1: 45-51

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

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

Salin J.G. 2008b. Drying of liquid water in wood as influenced by the capillary fiber network. *Drying Technology*, 26: 560-567

Schaffner R.D., Doe P.E. 1984. Surface check reduction in eucalypt timbers using semi-permeable coatings. V: 21st Forest Products Research Conference, Canterbury, Keey R.B. (ur). Canterbury, University of Canterbury: 7-11

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

Siau J.F. 1995. Wood: Influence of moisture on physical properties. Blacksburg, Department of Wood Science and Forest Products. Virginia Polytechnic Institute and State University: 227 str.

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

Simpson W.T. 1993. Determination and use of moisture diffusion coefficient to characterize drying of northern red oak (*Quercus rubra*). *Wood Science and Technology*, 27: 409-420

Skaar C. 1988. Wood - water relations. Berlin, Springer-Verlag: 283 str.

Söderström O. 1987. Computer simulations of a pregressive kiln with longitudinal air circulation. *Forest Products Journal*, 37: 25-30

Söderström O., Salin J.G. 1993. On determination of surface emission factors in wood drying. *Holzforschung*, 47: 391-397

Spolek G.A., Plumb O.A. 1981. Capillary pressure in softwood. *Wood Science and Technology*, 15: 189-199

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

Stamm A.J. 1960a. Bound-water diffusion into wood in across-the-fiber direction. *Forest Products Journal*, 10: 644-648

Stamm A.J. 1960b. Combined bound-water and water-vapour diffusion into sitka spruce. *Forest Products Journal*, 10: 644-648

- Stamm A.J. 1964. Wood and cellulose science. New York, Ronald Press: 549 str.
- Stanish M.A. 1986. The roles of bound water chemical potential and gas phase diffusion in moisture transport through wood. Wood Science and Technology, 20: 53-70
- Stewart H.A., Crist J.B. 1982. SEM examination of subsurface damage of wood after abrasive and knife planing. Wood Science, 14: 106-109
- Straže A., Gorišek Ž. 2001. Influence of drying parameters on discolouration in ash-wood (*Fraxinus excelsior* L.). V: ICWSF 2001, Ljubljana, 5-7 sep. 2001. Bučar B. (ur). Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology: 273-280
- Straže A., Gorišek Ž. 2007. CAE analiza in optimizacija porabe energije pri sušenju žaganega lesa z uvedbo predsušenja na prostem. Les, 59: 142-148
- Straže A., Oven P., Zupančič M., Gorišek Ž. 2003. Colour changes of ash-wood (*Fraxinus excelsior* L.) during conventional drying. V: 8th International IUFRO wood drying conference, Brasov, 24-29 avg. 2003. Ispas M. (ur). Brasov, Editura Univeritatii Transilvania: 465-469
- Terziev N. 1995. Migration of low molecular weight sugars and nitrogeaneous compounds in *Pinus sylvestris* during kiln drying and air drying. Holzforschung, 49: 565-574
- Terziev N., Boutelje J., Soderstrom O. 1993. The influence of drying schedules on redistribution of low molecular sugars in *Pinus sylvestris* L. Holzforschung, 47: 3-8
- Tesoro F.O., Chong E.T., Kimbler O.K. 1974. Relative permeability and the gross pore structure of wood. Wood and Fiber, 6: 226-236
- Tesoro F.O., Kimbler O.K., Chong E.T. 1972. Determination of the relative permeability of wood to oil and water. Wood Science, 5: 21-26
- Thomas H.R., Lewis R.W., Morgan K. 1980. An application of the finite element method to the drying of timber. Wood and Fiber, 11: 237-243
- Tremblay C., Cloutier A., Fortin Y. 2000. Experimental determination of the convective heat and mass transfer coefficients for wood drying. Wood Science and Technology, 34: 253-276

Trenard Y. 1980. Comparison and interpretation of mercury porosimeter curves obtained on some wood species. *Holzforschung*, 34: 139-146

Welling J., Riehl T., Kruse K., Rose B. 2003. Verbesserte Schnittholztrocknung im Frischluft-/Ablufttrockenr durch Wechselklima. Hamburg, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg: 87 str.

Welty R.J., Wicks E.C., Wilson R.E. 1984. Fundamentals of momentum, heat and mass transfer. New York, John Wiley & Sons: 786 str.

Westkämper E., Riegel A. 1993. Qualitätskriterien für feingehobelte Holzoberflächen. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 51: 27-30

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

Wiberg P. 2001. X-ray CT-scanning of wood during drying. Dokt. disertacija. Lulea, Lulea University of Technology: 142 str.

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

Wiberg P., Sehlstedt S.M.B., Moren T.J. 2000. Heat and mass transfer during sapwood drying above fiber saturation point. *Drying Technology*, 18: 1647-1664

Zeleniuc O., Ene N. 1996. Gravimetric system to determine the moisture content of wood during drying process. V: *5th IUFRO International Wood Drying Conference*, Quebec, 13-17 avg. 1996. Cloutier A., Fortin Y., Gosselin R. (ur). Quebec, 213-220

Zhang Y.C., Oliveira L., Avramidis S. 1996. Drying characteristics of hem-fir squares as affected by species and basic density presorting. *Forest Products Journal*, 46: 44-50

Zimmermann M.H. 1983. Xylem structure and ascent of sap. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, Springer-Verlag: 143 str.

ZAHVALA

Izr. prof. dr. Željko Gorišek, hvala za mentorstvo, podporo in pomoč. Zahvaljujem se za vzpodbude, razumevanje ter optimizem ob pedagoškem in raziskovalnem sodelovanju.

Somentorju izr. prof. dr. Bojanu Bučarju se zahvaljujem za ideje, konstruktivno kritiko, strokovno pomoč in raziskovalni entuziazem. Hvala za jasno znanstveno misel.

Prof. dr. dr. hc. Nikolaju Torelliju, ki me je vzpodbujal na raziskovalni in pedagoški poti, se zahvaljujem za stalno podporo. Zahvaljujem se za pregled doktorske naloge ter opombe, ki so izboljšale kakovost dela.

Zahvaljujem se izr. prof. dr. Stjepanu Pervanu za recenzijo doktorske naloge in koristne pripombe. Hvala za vso podporo in vzpodbude na raziskovalni poti ter sodelovanje.

Sodelavcem Katedre za tehnologijo lesa hvala za vso pomoč. Hvala vodji, prof. dr. Katarini Čufar za podporo. Zahvaljujem se Martinu Zupančiču, univ. dipl. inž. les. za strokovno pomoč pri mikroskopiranju. Hvala Luki Kržetu, dipl. inž. les. za strokovno pomoč in tehnične rešitve pri sušilnih eksperimentih.

Hvala sodelavcem Oddelka za lesarstvo, za prijetno vsakodnevno druženje ter vso podporo.

Hvala mojim zvestim prijateljem, ki z malenkostmi vselej polepšajo dan. Zahvaljujem se za podporo sorodnikom in moji razširjeni družini. Predvsem hvala staršema Neži in Francu.

Moji najdražji, Katja, Matija, Jurij in Zala, hvala vam za vse podarjene urice, in da ste verjeli! Z vsemi vašimi vzpodbudami je bila pot do tega izdelka mnogo lažja!

PRILOGE

Priloga A.1 Povprečne vlažnosti in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx) z žagano površino ($\check{Z}$), sušenih pri stacionarnih pogojih s hitrostjo zraka $v_1 = 0,6 \text{ m/s}$ (Δx – srednja razdalja od površine [mm]).

$d_1 = 6 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	6,8	26,8	32,0	44,7	94,6		
1,5	39,8	35,3	34,1	28,1	20,3		
4,5	75,9	39,4	36,2	31,6	23,5		
$u_p [\%]$	57,9	37,3	35,1	29,9	21,9		

$d_2 = 12 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	9,8	21,0	28,0	34,7	43,7	56,4	94,8
1,5	45,9	50,3	48,1	47,1	23,2	23,6	25,1
4,5	87,0	64,0	55,3	53,5	36,7	27,8	31,9
7,5	94,9	71,5	58,9	55,0	41,5	38,7	35,4
10,5	94,6	78,4	64,8	58,1	42,4	40,6	36,3
$u_p [\%]$	80,6	66,1	56,8	53,4	36,0	32,7	32,2

$d_3 = 18 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	10,0	21,2	29,0	33,8	55,0	95,2	143,0
1,5	53,4	52,0	48,1	45,2	37,4	25,5	27,9
4,5	75,6	63,7	62,8	54,9	48,4	38,1	31,9
7,5	84,3	73,7	75,7	63,1	49,3	39,5	34,3
10,5	88,6	81,2	88,5	71,2	50,2	40,9	35,0
13,5	91,4	87,6	92,0	80,0	50,5	41,1	34,7
16,5	92,3	88,7	95,5	88,8	50,8	41,3	36,0
$u_p [\%]$	80,9	74,5	77,1	67,2	47,8	37,7	33,3

$d_4 = 24 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	24,7	32,7	55,5	96,1	143,5	216,0	
1,5	53,1	41,9	47,9	27,4	21,9	22,5	
4,5	78,1	50,7	66,2	37,8	31,9	30,3	
7,5	79,0	59,7	66,6	40,7	36,1	33,4	
10,5	79,9	68,8	67,0	42,4	36,8	34,8	
13,5	80,4	71,8	67,4	46,4	38,2	35,9	
16,5	80,8	74,7	67,7	47,3	39,0	36,7	
19,5	81,2	74,9	67,7	50,2	39,6	38,1	
22,5	81,5	75,0	67,6	51,7	41,0	38,6	
$u_p [\%]$	76,8	64,7	64,8	43,0	35,6	33,8	

Priloga A.2 Povprečne vlažnosti in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx) z žagano površino ($\check{Z}$), sušenih pri stacionarnih pogojih s hitrostjo zraka $v_2 = 1,1 \text{ m/s}$ (Δx – srednja razdalja od površine [mm]).

$d_1 = 6 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	7,2	10,2	21,3	27,0	32,0	44,7	94,7
1,5	54,7	31,4	32,4	30,3	26,7	19,7	21,2
4,5	76,2	74,0	41,4	37,0	34,2	24,1	22,7
$u_p [\%]$	65,5	52,7	36,9	33,6	30,5	21,9	21,9

$d_2 = 12 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	23,4	28,3	35,0	44,1	56,5	94,9	
1,5	49,1	45,2	40,2	28,4	26,5	22,3	
4,5	55,6	52,0	49,9	35,5	35,4	28,9	
7,5	62,2	56,0	50,5	39,0	37,7	33,3	
10,5	72,8	59,7	51,9	41,4	38,6	34,8	
$u_p [\%]$	59,9	53,2	48,1	36,1	34,6	29,8	

$d_3 = 18 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	23,8	29,3	34,1	55,1	95,4	143,2	
1,5	47,5	41,3	45,0	47,8	35,4	18,8	
4,5	60,1	55,7	53,3	51,4	37,9	26,9	
7,5	72,4	68,3	57,9	51,6	39,6	31,1	
10,5	80,4	72,9	61,6	51,9	41,0	33,2	
13,5	85,9	79,8	74,5	52,3	41,6	35,1	
16,5	88,1	84,9	82,0	52,8	42,1	35,9	
$u_p [\%]$	72,4	67,2	62,4	51,3	39,6	30,2	

$d_4 = 24 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	24,3	33,0	55,7	96,3	143,7	216,0	
1,5	35,7	40,8	35,5	30,0	20,7	19,6	
4,5	68,2	55,1	51,7	39,0	28,5	25,7	
7,5	79,2	69,5	52,3	42,0	34,3	32,1	
10,5	86,9	73,2	53,7	43,3	36,4	35,9	
13,5	88,4	81,8	57,8	44,7	38,5	37,7	
16,5	89,2	85,4	61,1	46,3	38,9	38,8	
19,5	89,3	86,8	75,8	46,7	40,4	38,8	
22,5	89,4	87,5	83,0	47,8	41,3	39,1	
$u_p [\%]$	78,3	72,5	58,9	42,5	34,9	33,5	

Priloga A.3 Povprečne vlažnosti in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx) z žagano površino ($\check{Z}$), sušenih pri stacionarnih pogojih s hitrostjo zraka $v_3 = 2,5 \text{ m/s}$ (Δx – srednja razdalja od površine [mm]).

d₁ = 6 mm							
Δx [mm] \ t [h]	1,0	3,0	6,4	11,1	23,3	33,0	46,0
1,5	83,9	73,9	52,5	28,6	22,3	28,2	15,6
4,5	87,6	77,5	56,3	32,0	27,4	31,3	22,2
u_p [%]	85,7	75,7	54,4	30,3	24,8	29,8	18,9

d₂ = 12 mm							
Δx [mm] \ t [h]	2,0	5,2	11,5	24,0	34,0	47,0	70,0
1,5	48,3	71,5	53,3	43,3	32,0	22,4	30,0
4,5	62,0	72,5	59,6	48,0	39,6	33,1	36,8
7,5	74,4	80,5	62,8	48,8	42,3	36,0	39,0
10,5	78,0	81,6	68,0	49,4	42,6	37,0	39,9
u_p [%]	65,7	76,5	60,9	47,4	39,1	32,1	36,4

d₃ = 18 mm							
Δx [mm] \ t [h]	4,0	12,3	26,0	49,0	72,0	96,0	167,8
1,5	62,3	55,7	43,3	38,9	36,2	31,4	30,7
4,5	76,3	60,0	54,7	46,5	43,4	38,7	37,6
7,5	83,6	69,2	57,5	47,9	46,5	40,0	39,8
10,5	89,1	87,4	60,7	48,9	47,0	41,2	41,2
13,5	91,0	92,1	67,4	49,5	48,3	42,6	41,8
16,5	93,5	91,2	86,1	49,6	48,5	42,7	42,3
u_p [%]	82,6	76,0	61,6	46,9	45,0	39,5	38,9

d₄ = 24 mm							
Δx [mm] \ t [h]	7,0	25,0	48,0	71,0	95,0	167,5	245,3
1,5	54,9	43,7	33,3	41,3	32,8	28,1	28,6
4,5	68,4	51,4	48,1	48,0	39,5	32,0	31,5
7,5	75,3	54,6	48,3	49,0	42,9	37,3	34,2
10,5	78,4	67,7	49,3	48,9	44,8	39,3	37,3
13,5	80,9	71,6	50,2	49,1	45,0	40,0	38,3
16,5	82,8	74,2	52,1	50,1	45,4	40,5	39,1
19,5	83,4	75,0	55,7	50,3	46,0	41,1	39,6
22,5	84,4	76,0	60,2	51,2	46,3	41,6	39,4
u_p [%]	76,1	64,3	49,7	48,5	42,8	37,5	36,0

Priloga A.4 Povprečne vlažnosti in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx) z žagano površino ($\check{Z}$), sušenih pri stacionarnih pogojih s hitrostjo zraka $v_4 = 4,5 \text{ m/s}$ (Δx – srednja razdalja od površine [mm]).

$d_1 = 6 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	1,3	3,2	6,6	11,3	23,3	33,2	46,3
1,5	77,5	66,1	43,7	37,2	26,1	27,8	22,3
4,5	82,8	71,7	49,2	41,2	29,1	32,5	23,1
$u_p [\%]$	80,2	68,9	46,5	39,2	27,6	30,2	22,7

$d_2 = 12 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	2,3	6,0	11,8	24,2	34,3	47,3	70,3
1,5	62,9	60,0	48,1	39,8	32,7	23,6	29,5
4,5	71,2	65,2	56,3	45,4	40,0	33,5	36,8
7,5	71,2	70,7	58,3	45,9	42,8	35,6	38,0
10,5	73,0	72,7	59,0	46,8	43,5	36,6	38,8
$u_p [\%]$	69,6	67,1	55,4	44,5	39,8	32,3	35,8

$d_3 = 18 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	4,3	12,7	26,3	49,3	72,3	96,3	168,2
1,5	62,6	52,8	36,4	34,5	34,6	27,9	32,5
4,5	69,3	57,7	51,4	42,1	41,6	35,2	33,8
7,5	70,8	61,8	52,8	45,7	43,3	37,8	38,9
10,5	72,9	68,9	52,9	45,8	45,5	39,2	41,7
13,5	74,5	73,6	52,9	46,6	46,8	40,6	43,1
16,5	75,7	73,7	53,0	47,2	47,4	41,6	43,2
$u_p [\%]$	71,0	64,8	49,9	43,7	43,2	37,0	38,9

$d_4 = 24 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	7,3	25,3	48,3	71,3	95,3	168,7	245,5
1,5	61,2	46,3	48,8	42,8	33,0	31,1	31,3
4,5	62,2	50,5	56,9	50,6	40,1	35,2	32,0
7,5	70,9	51,4	57,0	51,3	42,6	39,8	34,5
10,5	79,7	55,8	59,0	51,6	44,6	41,5	36,6
13,5	84,5	65,6	59,4	52,3	45,1	42,4	38,1
16,5	86,2	74,3	60,8	52,2	46,8	43,7	38,0
19,5	88,4	78,3	61,7	53,0	47,3	44,5	38,9
22,5	89,2	79,7	62,8	53,5	47,6	44,6	38,9
$u_p [\%]$	77,8	62,7	58,3	50,9	43,4	40,3	36,0

Priloga A.5 Povprečne vlažnosti in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx) z žagano površino ($\check{Z}$), sušenih pri stacionarnih pogojih s hitrostjo zraka $v_5 = 7,6 \text{ m/s}$ (Δx – srednja razdalja od površine [mm]).

$d_1 = 6 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	1,5	3,4	6,8	11,4	23,5	33,5	46,5
1,5	55,5	58,0	44,8	40,9	30,7	28,4	21,2
4,5	75,0	65,2	60,7	44,7	32,2	30,8	22,0
$u_p [\%]$	65,3	61,6	52,8	42,8	31,5	29,6	21,6

$d_2 = 12 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	2,5	6,2	12,1	24,5	34,5	47,5	70,5
1,5	65,3	52,8	51,0	45,5	41,6	29,0	32,5
4,5	85,8	79,7	60,0	52,1	51,0	37,3	38,2
7,5	101,8	91,8	86,6	56,1	52,8	40,7	38,5
10,5	103,5	100,3	92,8	70,9	54,3	41,9	39,4
$u_p [\%]$	89,1	81,1	72,6	56,1	49,9	37,2	37,1

$d_3 = 18 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	4,6	12,9	26,5	49,7	72,7	96,7	168,3
1,5	62,6	46,8	42,5	40,7	34,4	30,5	30,4
4,5	70,3	57,4	54,7	47,2	41,5	37,3	34,5
7,5	75,2	59,5	56,0	47,7	44,7	39,0	38,8
10,5	78,6	68,1	56,2	48,2	47,9	40,2	40,0
13,5	78,9	74,1	57,1	49,1	48,3	41,4	40,4
16,5	79,7	76,7	59,4	49,6	48,9	41,5	40,7
$u_p [\%]$	74,2	63,8	54,3	47,1	44,3	38,3	37,4

$d_4 = 24 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	7,7	25,5	48,7	71,7	95,7	168,8	245,7
1,5	63,3	38,0	50,3	44,0	30,8	33,1	29,9
4,5	64,2	59,7	59,2	52,0	39,6	35,7	31,2
7,5	68,9	60,9	59,3	52,1	42,8	40,8	34,5
10,5	75,0	67,6	60,4	52,2	43,8	43,4	36,6
13,5	79,7	72,6	61,3	52,5	43,9	43,7	36,9
16,5	82,4	78,1	61,9	52,4	44,4	44,1	37,3
19,5	83,4	83,9	62,4	53,1	45,1	44,7	37,7
22,5	85,8	85,0	62,4	53,7	45,6	45,2	37,8
$u_p [\%]$	75,3	68,2	59,6	51,5	42,0	41,3	35,2

Priloga B.1 Povprečne vlažnosti in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx) s skobljano površino (S), sušenih pri stacionarnih pogojih s hitrostjo zraka $v_1 = 0,6 \text{ m/s}$ (Δx – srednja razdalja od površine [mm]).

$d_1 = 6 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	7,0	20,8	32,0	44,7	94,6		
1,5	38,7	37,8	34,9	29,7	24,1		
4,5	77,9	45,9	35,9	31,1	26,5		
$u_p [\%]$	58,3	41,9	35,4	30,4	25,3		

$d_2 = 12 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	23,6	28,2	34,8	43,9	56,5	94,9	
1,5	45,8	43,6	41,6	34,7	32,2	26,8	
4,5	56,6	53,1	47,0	39,1	37,5	34,4	
7,5	56,8	54,4	48,4	42,2	39,2	36,3	
10,5	61,4	54,9	48,8	42,9	40,5	37,2	
$u_p [\%]$	55,1	51,5	46,5	39,7	37,3	33,7	

$d_3 = 18 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	24,0	29,2	33,9	55,0	95,3	143,0	
1,5	45,8	40,8	41,0	37,1	30,3	31,5	
4,5	64,5	56,7	53,3	44,9	38,1	38,1	
7,5	69,2	65,8	59,1	46,2	39,6	41,2	
10,5	74,1	72,0	61,9	47,1	41,8	43,2	
13,5	78,7	74,1	66,3	47,9	42,6	42,8	
16,5	82,0	76,9	69,2	48,5	43,8	42,4	
$u_p [\%]$	69,1	64,4	58,5	45,3	39,4	39,9	

$d_4 = 24 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	24,6	32,9	55,6	96,2	143,6	216,0	
1,5	40,5	39,0	35,1	32,2	25,8	23,9	
4,5	60,4	59,0	50,9	39,4	34,9	31,8	
7,5	78,2	67,4	52,1	42,6	37,7	36,8	
10,5	80,8	74,7	53,3	48,3	38,5	38,4	
13,5	83,2	76,5	58,4	54,2	40,0	39,2	
16,5	85,0	79,8	61,4	54,9	41,3	39,5	
19,5	85,2	81,3	68,2	55,7	44,8	39,8	
22,5	85,5	78,7	71,9	56,7	45,7	40,0	
$u_p [\%]$	74,8	69,5	56,4	48,0	38,6	36,2	

Priloga B.2 Povprečne vlažnosti in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx) s skobljano površino (S), sušenih pri stacionarnih pogojih s hitrostjo zraka $v_2 = 1,1 \text{ m/s}$ (Δx – srednja razdalja od površine [mm]).

$d_1 = 6 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	10,3	27,2	32,0	44,7	94,7		
1,5	35,5	33,5	35,0	24,7	23,7		
4,5	73,9	39,9	36,7	25,8	26,9		
$u_p [\%]$	54,7	36,7	35,9	25,2	25,3		

$d_2 = 12 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	21,5	28,5	35,1	44,3	56,6	95,0	
1,5	43,2	44,1	42,2	34,0	29,2	23,0	
4,5	54,0	51,0	52,2	39,7	37,9	31,8	
7,5	59,7	56,5	53,0	42,1	40,2	35,7	
10,5	64,5	59,9	53,4	42,7	41,6	36,1	
$u_p [\%]$	55,3	52,9	50,2	39,6	37,2	31,7	

$d_3 = 18 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	10,5	21,7	29,4	34,2	55,2	95,5	143,3
1,5	53,1	49,7	48,8	47,2	34,2	28,2	18,3
4,5	77,7	58,3	56,7	54,4	49,6	38,3	27,3
7,5	88,0	72,6	69,2	65,3	51,9	40,1	32,0
10,5	90,8	87,0	85,5	74,8	53,1	41,7	33,5
13,5	90,6	89,6	87,3	78,5	54,6	42,5	35,8
16,5	85,1	90,1	88,5	79,0	55,8	43,6	35,8
$u_p [\%]$	80,8	74,5	72,7	66,5	49,9	39,1	30,5

$d_4 = 24 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	24,4	33,2	56,0	96,4	143,7	216,0	
1,5	54,7	51,0	46,8	39,3	23,0	19,5	
4,5	65,8	57,5	56,4	44,4	34,5	26,8	
7,5	88,4	68,8	60,7	45,6	39,0	34,7	
10,5	95,5	79,0	62,6	46,8	39,6	36,0	
13,5	97,3	86,1	80,2	47,1	43,3	38,7	
16,5	98,8	94,1	91,8	49,0	43,8	39,3	
19,5	99,8	97,8	93,6	51,3	44,2	40,2	
22,5	101,6	100,9	95,2	51,4	45,8	40,9	
$u_p [\%]$	87,8	79,4	73,4	46,8	39,1	34,5	

Priloga B.3 Povprečne vlažnosti in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx) s skobljano površino (S), sušenih pri stacionarnih pogojih s hitrostjo zraka $v_3 = 2,5 \text{ m/s}$ (Δx – srednja razdalja od površine [mm]).

$d_1 = 6 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	1,2	3,2	6,5	11,3	23,3	33,0	46,0
1,5	93,6	63,9	49,0	32,0	23,4	28,7	21,0
4,5	98,0	67,3	54,1	40,6	27,1	31,7	22,5
$u_p [\%]$	95,8	65,6	51,6	36,3	25,2	30,2	21,7

$d_2 = 12 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	2,1	5,3	11,7	24,0	34,0	47,0	70,0
1,5	54,0	53,6	54,2	46,2	33,2	24,6	30,9
4,5	73,8	71,1	55,5	48,7	38,2	31,4	34,5
7,5	81,0	74,0	63,0	49,5	40,0	32,4	35,1
10,5	83,1	76,1	69,8	50,6	41,2	33,1	36,7
$u_p [\%]$	73,0	68,7	60,6	48,8	38,1	30,4	34,3

$d_3 = 18 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	4,2	12,5	26,0	49,0	72,0	96,0	167,8
1,5	48,7	54,6	44,3	41,9	35,0	29,0	31,3
4,5	60,5	60,3	51,6	49,4	42,1	34,9	36,3
7,5	69,3	67,1	54,1	49,7	43,8	37,6	38,6
10,5	81,2	72,7	56,1	49,9	43,8	37,3	40,1
13,5	81,5	79,4	62,1	49,7	44,3	39,4	40,0
16,5	82,7	80,5	65,6	50,3	44,7	40,4	41,3
$u_p [\%]$	70,6	69,1	55,7	48,5	42,3	36,4	37,9

$d_4 = 24 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	7,2	25,0	48,0	71,0	95,0	167,5	245,3
1,5	53,0	46,4	40,4	43,0	35,3	27,6	27,2
4,5	61,5	52,0	50,9	51,6	43,0	35,2	31,2
7,5	68,6	53,8	52,2	51,8	46,2	38,8	35,3
10,5	74,6	51,4	53,2	51,9	46,9	40,7	37,4
13,5	78,1	66,2	53,8	53,7	46,9	41,9	39,3
16,5	79,7	82,1	54,5	53,3	47,5	43,0	39,7
19,5	81,8	85,4	55,4	54,0	47,6	43,7	40,2
22,5	88,3	86,0	57,5	54,1	47,9	43,6	40,5
$u_p [\%]$	73,2	65,4	52,2	51,7	45,2	39,3	36,3

Priloga B.4 Povprečne vlažnosti in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx) s skobljano površino (S), sušenih pri stacionarnih pogojih s hitrostjo zraka $v_4 = 4,5 \text{ m/s}$ (Δx – srednja razdalja od površine [mm]).

$d_1 = 6 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	1,3	3,3	6,7	11,4	23,3	33,2	46,3
1,5	66,0	60,7	33,0	35,0	25,3	27,3	20,1
4,5	68,6	63,7	46,7	41,1	31,7	32,7	24,4
$u_p [\%]$	67,3	62,2	39,9	38,0	28,5	30,0	22,2

$d_2 = 12 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	2,4	6,2	11,9	24,2	34,3	47,3	70,3
1,5	57,2	58,2	50,2	40,8	34,4	26,4	30,5
4,5	77,0	70,1	61,6	46,2	41,8	34,4	34,9
7,5	83,5	79,4	66,9	46,9	42,9	36,4	35,2
10,5	85,5	81,5	68,0	47,5	43,5	37,1	36,6
$u_p [\%]$	75,8	72,3	61,7	45,4	40,7	33,6	34,3

$d_3 = 18 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	4,4	12,8	26,3	49,3	72,3	96,3	168,2
1,5	57,8	47,0	37,2	37,0	34,8	30,6	32,9
4,5	65,5	56,1	54,7	45,6	41,9	37,7	37,3
7,5	73,1	58,4	55,4	47,1	43,6	39,2	42,1
10,5	76,7	65,6	55,9	47,2	46,6	40,9	43,3
13,5	78,3	76,3	56,8	48,2	47,1	42,1	43,3
16,5	78,6	77,3	57,3	48,9	47,7	42,7	43,9
$u_p [\%]$	71,7	63,5	52,9	45,7	43,6	38,9	40,5

$d_4 = 24 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	7,5	25,3	48,3	71,3	95,3	168,7	245,5
1,5	58,8	49,4	43,4	36,6	32,9	33,6	29,7
4,5	59,4	63,6	54,4	45,4	38,9	35,1	30,8
7,5	62,4	65,4	55,5	47,8	41,7	39,5	35,8
10,5	69,3	67,0	56,1	49,0	44,2	42,5	38,7
13,5	77,1	70,6	56,2	50,5	46,4	43,9	40,6
16,5	82,3	74,5	58,8	51,2	47,0	43,8	41,5
19,5	84,8	80,3	59,7	51,9	48,3	44,9	42,0
22,5	84,7	84,1	59,9	52,3	49,1	44,7	42,3
$u_p [\%]$	72,3	69,4	55,5	48,1	43,6	41,0	37,7

Priloga B.5 Povprečne vlažnosti in vlažnostni profil po debelini preizkušancev (Δx) s skobljano površino (S), sušenih pri stacionarnih pogojih s hitrostjo zraka $v_5 = 7,6 \text{ m/s}$ (Δx – srednja razdalja od površine [mm]).

$d_1 = 6 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	1,6	3,7	6,9	11,4	23,5	33,5	46,5
1,5	59,3	56,2	45,2	41,7	32,2	30,5	19,9
4,5	65,6	59,2	52,1	43,5	37,0	32,5	22,2
$u_p [\%]$	62,5	57,7	48,6	42,6	34,6	31,5	21,1

$d_2 = 12 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	2,6	6,3	12,2	24,5	34,5	47,5	70,5
1,5	55,6	54,1	53,9	45,7	38,1	28,6	29,8
4,5	77,3	67,8	62,4	50,8	45,1	33,4	34,0
7,5	78,1	72,1	70,6	52,0	45,5	35,9	34,4
10,5	80,2	72,5	72,1	52,7	45,8	36,5	35,2
$u_p [\%]$	72,8	66,6	64,7	50,3	43,6	33,6	33,3

$d_3 = 18 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	4,7	13,1	26,5	49,7	72,7	96,7	168,3
1,5	54,5	46,8	41,8	37,1	35,1	29,9	30,9
4,5	66,8	54,0	53,7	45,0	42,0	37,1	32,9
7,5	75,1	62,4	54,6	45,9	43,8	39,2	36,8
10,5	81,5	71,4	54,7	46,9	46,1	40,2	36,4
13,5	83,6	76,5	55,2	47,2	47,2	40,9	36,6
16,5	86,2	77,7	55,7	47,7	47,7	41,1	37,3
$u_p [\%]$	74,6	64,8	52,6	45,0	43,6	38,1	35,1

$d_4 = 24 \text{ mm}$							
$\Delta x [\text{mm}] \setminus t [\text{h}]$	7,7	25,5	48,7	71,7	95,7	168,8	245,7
1,5	51,0	41,3	46,6	43,6	32,1	29,3	26,5
4,5	65,1	57,2	56,0	48,6	37,1	32,6	28,4
7,5	68,9	59,6	56,0	49,7	39,5	37,4	30,4
10,5	73,1	60,3	57,2	49,8	42,0	40,0	33,4
13,5	75,4	66,9	57,5	49,9	43,4	41,6	34,0
16,5	75,7	71,4	57,7	50,6	44,3	43,3	34,4
19,5	76,3	74,3	57,8	52,2	45,5	43,4	34,8
22,5	77,2	75,9	58,0	52,9	46,5	45,3	35,8
$u_p [\%]$	70,4	63,4	55,8	49,7	41,3	39,1	32,2