

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Simon TOMAZIN

**USTREZNOST KONDENZACIJSKEGA SUŠENJA LESA V MANJŠIH
LESNIH OBRATIH**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**SUITABILITY OF DEHUMIDIFYING DRYING FOR SMALLER
JOINER WORKSHOPS**

GRADUATION THESIS
University studies

Ljubljana, 2012

Diplomsko delo je zaključek univerzitetnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na katedri za tehnologijo lesa na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

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

Mentor: prof. dr. Željko Gorišek

Recenzent: doc. dr. Aleš Straže

Komisija za oceno in zagovor:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Simon Tomazin

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dn
DK	UDK 630*847
KG	les/kakovost/kondenzacijsko sušenje/učinkovitost
AV	TOMAZIN, Simon
SA	GORIŠEK, Željko (mentor)/STRAŽE, Aleš (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2012
IN	USTREZNOST KONDENZACIJSKEGA SUŠENJA LESA V MANJŠIH LESNIH OBRATIH
TD	Diplomsko delo (Univerzitetni študij)
OP	IX, 49 str., 7 pregl., 38 sl., 17 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Za ovrednotenje prilagodljivosti in ustreznosti kondenzacijskega sušenja za manjše lesne obrate smo sušili smrekovino, bukovino in hrastovino iz svežega stanja do končne vlažnosti 10 %. Primerjali smo čase in hitrosti sušenja, kakovost posušenega lesa, vlažnostne gradiente in sušilne napetosti ter porabo energije. Pri smrekovini smo na začetku sušenja zaznali vlažnostni gradient okoli 3,5 %/cm, ki se je nato še nekoliko povečal, na koncu pa padel do sprejemljive vrednosti. Začetne vlažnosti pri bukovini so bile različne med beljavo in rdečim srcem. Vlažnostni gradient je bil na začetku več kot 5 %/cm, proti koncu sušenja pa je bil minimalen. Med sušenjem so se pojavile manjše razpoke, ki pa niso vplivale na končno kakovost osušenega lesa. Začetni prerez hrastovine je pokazal homogeno razporeditev vlažnosti, vendar se je po začetku sušenja vlažnostni gradient močno povečal, kar je vodilo v notranje razpoke in satavost; po koncu sušenja pa je les ostal zaskorjen. Najkrajši čas sušenja smo dosegli pri smrekovini (333h), najdlje pa smo sušili hrastovino (2617h). Za 1m ³ sušenja smrekovine smo potrošili 533 kWh energije, za isto količino hrastovine pa kar 4481 kWh električne energije.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dn
DC UDC 630*847
CX wood/quality/dehumidifying drying/efficiency
AU TOMAZIN, Simon
AA GORIŠEK, Željko (supervisor)/STRAŽE, Aleš (co-supervisor)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2012
TI SUITABILITY OF DEHUMIDIFYING DRYING FOR SMALLER JOINER WORKSHOPS
DT Graduation thesis
NO IX, 49 p., 7 tab., 38 fig., 17 ref.
LA sl
AL sl/en
AB To evaluate the adaptability and suitability of dehumidifying drying for smaller joiner workshops spruce, beech and oak wood was dried from a fresh state to the end moisture content of 10 %. During the drying processes the times and speeds of drying, the quality of dried wood, the moisture gradients, the drying stresses and the consumption of energy were compared. Spruce wood moisture gradient of around 3.5 %/cm first increased a little, then it decreased to an acceptable value. The starting values of moisture content of beech sapwood were different from those of heartwood. The moisture gradient was more than 5 %/cm at the beginning and minimal at the end. During the process smaller cracks appeared. The oak wood showed a homogeneous distribution of moisture content, however, after the beginning of drying the moisture gradient increased vastly, which led to the interior cracks and honey-combing; so after the drying wood remained encrusted. We achieved the shortest time of drying with the spruce (333h), and the longest with the oak (2617h) wood. To dry 1 m³ of spruce wood we spent 533 kWh of energy, and for the same amount of oak wood as much as 4481 kWh of electrical energy was needed.

KAZALO VSEBINE

str.

Ključna Informacijska Dokumentacija (KID).....	III
Key Words Information (KWI).....	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic.....	VII
Kazalo slik.....	VIII
1 UVOD	1
1.1 PROBLEM.....	1
1.2 HIPOTEZE	1
1.3 CILJI NALOGE	2
2 SPLOŠNI DEL	3
2.1 ZNAČILNOSTI KONDENZACIJSKEGA SUŠENJA	3
2.2 KONDENZACIJSKI AGREGAT.....	4
2.3 PREDNOSTI IN POMANJKLJIVOSTI KONDENZACIJSKEGA SUŠENJA	6
3 MATERIAL IN METODE	7
3.1 MATERIAL	7
3.2 METODE	8
3.2.1 Določanje vlažnosti lesa	8
3.2.2 Kakovost sušenja	10
3.2.3 Vrednotenje sušilnih napetosti	11
3.2.4 Spremljanje porabe energije	12
4 REZULTATI.....	13
4.1 ANALIZA KINETIKE SUŠENJA LESA	13
4.1.1 Kinetika sušenja smrekovine.....	13
4.1.2 Kinetika sušenja bukovine.....	16
4.1.3 Kinetika sušenja hrastovine.....	18
4.2 KAKOVOST SUŠENJA.....	20
4.2.1 Končna vlažnost in vlažnostni gradient.....	20
4.2.1.1 Končna vlažnost in vlažnostni gradient pri smrekovini	20
4.2.1.2 Končna vlažnost in vlažnostni gradient pri bukovini	22
4.2.1.3 Končna vlažnost in vlažnostni gradient pri hrastovini	25
4.2.2 Sušilne napetosti	28
4.2.2.1 Sušilne napetosti pri smrekovini	28
4.2.2.2 Sušilne napetosti pri bukovini	29
4.2.2.3 Sušilne napetosti pri hrastovini	31
4.3 PORABA ENERGIJE	33
4.3.1 Poraba energije pri sušenju smrekovine	33
4.3.2 Poraba energije pri sušenju bukovine	34
4.3.3 Poraba energije pri sušenju hrastovine	36

5	RAZPRAVA.....	39
5.1	ČAS SUŠENJA	39
5.2	KAKOVOST SUŠENJA	41
5.2.1	Končna vlažnost.....	41
5.2.2	Vlažnostni gradient in profil.....	42
5.2.3	Sušilne napetosti	43
5.3	PORABA ENERGIJE	44
6	SKLEPI	46
7	POVZETEK.....	47
8	VIRI	48
	ZAHVALA	

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Povprečna začetna in končna vlažnost smrekovine, določena gravimetrično in uporovno ter osnovna statistika.	14
Preglednica 2: Uporovno in gravimetrično določena vlažnost smrekovine in hitrost sušenja odvisno od časa sušenja.....	15
Preglednica 3: Povprečna začetna in končna vlažnost bukovine, določena gravimetrično in uporovno ter osnovna statistika.....	16
Preglednica 4: Uporovno in gravimetrično določena vlažnost bukovine in hitrost sušenja odvisno od časa sušenja.	17
Preglednica 5: Povprečna začetna in končna vlažnost hrastovine, določena gravimetrično in uporovno ter osnovna statistika.	18
Preglednica 6: Uporovno in gravimetrično določena vlažnost hrastovine in hitrost sušenja odvisno od časa sušenja.	20
Preglednica 7: Primerjava končnih vlažnosti, izmerjenih z gravimetrično metodo in uporovnimi sondami.	42

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1	Shema kondenzacijske sušilne komore (Killmann and Fink, 1996) 3
Slika 2	Osnovna shema kondenzacijskega agregata (Simpson, 1991) 4
Slika 3	Termodinamske spremembe zraka pri kondenzacijskem sušenju (Gorišek, 2009). 5
Slika 4	Pogled na zložaj smrekovine v komori. 7
Slika 5	Pogled na zložaj bukovine pred zaprtjem sušilne komore (Gorišek in sod., 2009). 8
Slika 6	Skica odvzema odrezkov za vzorce..... 9
Slika 7	Prikaz izdelave odrezka za ugotavljanje vlažnostnega profila. 10
Slika 8	Prikaz prežaganega vzorca za merjenje reže (š – širina preizkušanca, d – debelina preizkušanca)..... 11
Slika 9	Pripomoček za merjenje reže (tlorisni pogled)..... 11
Slika 10	Shema izdelave vilic..... 12
Slika 11	Primerjava sušilnih krivulj smrekovine, določenih z gravimetričnimi meritvami lesne vlažnosti in z meritvami vlažnosti z uporovno metodo..... 15
Slika 12	Primerjava sušilnih krivulj bukovine, določenih z gravimetričnimi meritvami lesne vlažnosti in z meritvami vlažnosti z uporovno metodo..... 17
Slika 13	Primerjava sušilnih krivulj hrastovine, določenih z gravimetričnimi meritvami lesne vlažnosti in z meritvami vlažnosti z uporovno metodo..... 19
Slika 14	Primerjava sušenja med površino in sredico smrekovih žaganic. 21
Slika 15	Razporeditev vlažnosti po debelini smrekovih žaganic v štirih intervalih sušenja (levo zgoraj – po 3,8 dneh sušenja; desno zgoraj po 6,81 dneh sušenja; levo spodaj po 8,8 dneh sušenja in desno spodaj na koncu sušenja)..... 22
Slika 16	Primerjava sušenja med površino in sredico bukovih žaganic..... 23
Slika 17	Razporeditev vlažnosti po debelini bukovih žaganic v petih intervalih sušenja (levo zgoraj – po 7 dneh sušenja; desno zgoraj po 15,1 dneh sušenja; levo v sredini po 19 dneh sušenja; desno v sredini po 26 dneh sušenja in levo spodaj po koncu sušenja). 24
Slika 18	Primerjava sušenja med površino in sredico hrastovih žaganic. 26
Slika 19	Razporeditev vlažnosti po debelini hrastovih žaganic v petih intervalih sušenja (levo zgoraj – na začetku sušenja; desno zgoraj po 2,9 dneh sušenja; levo 2 vrsta po 15,9 dneh sušenja; desno 2 vrsta po 37,9 dneh sušenja; levo 3 vrsta po 54,8 dneh sušenja; desno 3 vrsta po 92,9 dneh sušenja in levo spodaj po koncu sušenja). 27

Slika 20	Povprečna deformacija vilic na sledilnih vzorcih smrekovine takoj po razžagovanju ($t = 0$ h) in po 2 dnevem kondicioniranju ($t = 48$ h).....	28
Slika 21	Velikost reže na sledilnih smrekovih vzorcih A/ takoj po razžagovanju (levo) in B/ po 48 urnem kondicioniranju (desno).....	29
Slika 22	Preizkušanci za določanje sušilnih napetosti pri smrekovini: zgoraj – po prežagovalni metodi in spodaj – po metodi vilic.....	29
Slika 23	Povprečna deformacija vilic na sledilnih bukovih vzorcih takoj po razžagovanju ($t = 0$ h)) in po 2 dnevem kondicioniranju ($t = 48$ h).....	30
Slika 24	Velikost reže na sledilnih bukovih vzorcih A/ takoj po razžagovanju (levo) in B/ po 48 urnem kondicioniranju (desno).....	31
Slika 25	Povprečna deformacija vilic na sledilnih hrastovih vzorcih takoj po razžagovanju ($t = 0$ h)) in po 2 dnevem kondicioniranju ($t = 48$ h).....	32
Slika 26	Velikost reže na sledilnih hrastovih vzorcih A/ takoj po razžagovanju (levo) in B/ po 48 urnem kondicioniranju (desno).....	32
Slika 27	Izguba mase zložaja lesa (M lesa), količina izločene vode iz lesa (M vode) ter poraba električne energije (E) v odvisnosti od časa sušenja smrekovine, debeline 49 mm.	33
Slika 28	Odvisnost specifične porabe energije od lesne vlažnosti pri sušenju smrekovine, debeline 49 mm.	34
Slika 29	Izguba mase zložaja lesa (M lesa), količina izločene vode iz lesa (M vode) ter poraba električne energije (E) v odvisnosti od časa sušenja bukovine, debeline 50 mm.	35
Slika 30	Odvisnost specifične porabe energije od lesne vlažnosti pri sušenju bukovine, debeline 50 mm.	36
Slika 31	Izguba mase zložaja lesa (M lesa), količina izločene vode iz lesa (M vode) ter poraba električne energije (E) v odvisnosti od časa sušenja hrastovine, debeline 50 mm.	37
Slika 32	Odvisnost specifične porabe energije od lesne vlažnosti pri sušenju hrastovine, debeline 50 mm.	38
Slika 33	Primerjava časa sušenja smrekovine, bukovine ter hrastovine.	40
Slika 34	Primerjava sušilne hitrosti med smrekovino, bukovino ter hrastovino.	41
Slika 35	Primerjava vlažnostnih gradientov med sušečimi lesnimi vrstami.	42
Slika 36	Primerjava končnih vlažnostnih profilov med sušečimi lesnimi vrstami.....	43
Slika 37	Pojav kolapsa (vzvalovana površina) in notranjih satastih razpok na sledilnih vzorcih po 39 dneh sušenja (Gorišek in sod., 2010).....	44
Slika 38	Primerjava porabe električne energije med smrekovino, bukovino in hrastovino za osušitev 1 m^3 lesa.....	45

1 UVOD

Sveže posekan les vsebuje velike količine vode, ki začne intenzivno izhajati, ko les razžagamo v različne sortimente in jih izpostavimo pogojem na prostem ali kontroliranim pogojem v sušilnih komorah.

Dandanes si ne moremo več predstavljati, da bi za izdelavo lesenih izdelkov uporabljali zračno suh les, zato uporabljamo tehnično sušenje, ki vedno bolj prevladuje. Ker pa tehnično sušenje prispeva razmeroma velik delež h kakovosti in lastni ceni izdelka, moramo tej fazi posvetiti precej več pozornosti in časa.

1.1 PROBLEM

V manjših lesnih obratih se za proizvodnjo izdelkov potrebujejo sicer manjše količine suhega lesa, vendar zelo različnih drevesnih vrst, debelin in kakovosti. Zato bi za sušenje potrebovali manjše, vendar dovolj prilagodljive tehnike. Na voljo imamo različne postopke sušenja lesa, vsi pa so energijsko potratni. Standardno je v lesno - predelovalni industriji energijski problem rešen s pridobivanjem energije iz lesnih ostankov, v manjših obratovalnicah pa pogosto ni na voljo ustreznih toplotnih postaj, ki bi proizvajale dovolj energije tudi za konvencionalne sušilne komore. Predpostavljamo, da bi lahko izbrali primernejši alternativni postopek z manjšo specifično porabo energije.

1.2 HIPOTEZE

Kondenzacijsko sušenje je postopek sušenja, ki je poznan predvsem po nizki specifični porabi energije in je zanimiv predvsem za uporabnike, ki nimajo na voljo večjih toplotnih postaj, s katerimi bi lahko nemoteno oskrbovali uporabnike s toplotno energijo. Pri tem načinu sušenja pa moramo seveda upoštevati, da se namesto toplotne energije uporablja le električna energija. Kondenzacijski način sušenja sodi med mile postopke, zato se v največji meri uporablja za sušenje svežega lesa, prilagodljivo pa je tudi za sušenje različnih vrst lesa do različnih vlažnosti.

Pričakujemo dokaj ugodne rezultate pri sušenju svežega lesa, pri sušenju gostejših listavcev (predvsem hrasta) pa pričakujemo več težav, še posebno pri doseganju nizkih ciljnih vlažnosti. Kljub temu, da ta način sušenja zahteva daljši čas sušenja, predvidevamo manjšo specifično porabo energije in zato tudi ekonomsko upravičenost vpeljevanja kondenzacijskega sušenja v manjše lesne obrate, ki nimajo svojega vira toplotne energije.

1.3 CILJI NALOGE

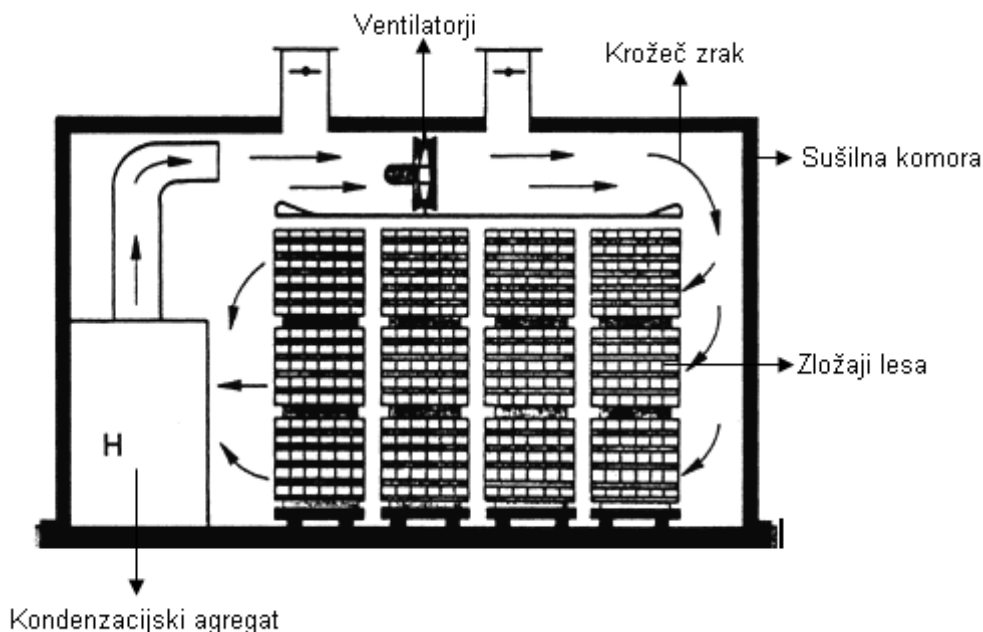
Z ovrednotenjem časa sušenja, kakovosti osušenega lesa in porabe energije želimo ugotoviti, kako so manjše kondenzacijske sušilne komore prilagodljive in uporabne za sušenje različnih lesnih vrst. Medsebojno bomo primerjali sušenje smrekovine, bukovine in hrastovine. Analizirali bomo trajanje in hitrosti sušenja v vseh fazah sušenja, kakovost bomo ocenjevali z določanjem ciljne končne vlažnosti, vlažnostnega gradienta, zaskorjenja in vizualno oceno lesa, primerjavo porabe energije pa bomo izvedli z izračunom specifične porabe ločeno za vsako fazo sušenja.

2 SPLOŠNI DEL

Dandanes ima sušenje lesa vedno večji pomen v lesni industriji, kajti les mora biti dobro osušen preden ga lahko vgradimo v različne izdelke. Sušenje lesa na prostem predstavlja potratu časa ter tudi slabo ekonomičnost, saj moramo imeti na zalogi veliko lesa, še vedno pa les ne moremo osušiti do želenih vlažnosti. Zato v praksi uporabljamo tehnično sušenje lesa s katerim v ustrezni klimi osušimo les do želenih vlažnosti. Za tehnično sušenje lesa imamo na voljo več različnih tehnoloških postopkov sušenja med katere spadajo: normalno temperaturno komorsko sušenje z delno izmenjavo zraka (konvekcijsko sušenje), kondenzacijsko sušenje, vakuumsko sušenje, visokofrekvenčno sušenje in druge kombinacije (Geršak, 2003).

2.1 ZNAČILNOSTI KONDENZACIJSKEGA SUŠENJA

Pri vseh postopkih konvekcijskega sušenja lesa za prenos toplote na površino lesa uporabljamo zrak, ki hkrati s površine sprejema vlago. Zaradi velike količine vode, ki izhaja iz lesa, je potrebno zrak razvlažiti, da mu v sušilnem procesu spet povrnemo učinkovitost. Pri konvencionalnem sušenju to storimo z delno izmenjavo zraka, značilnost kondenzacijskega sušenja pa je razvlaževanje zraka s tem, da zrak ohlajamo pod rosišče. Ime kondenzacijsko sušenje lesa izvira iz dejstva, da se pri tem načinu sušenja lesa vlaga v zraku (ki izhaja med procesom sušenja iz lesa) kondenzira na neki hladni površini. Kondenzacijsko sušenje poteka v zaprtem sistemu, to pomeni, da komorski zrak ne pride v stik z okoliškim zrakom (Slika 1).

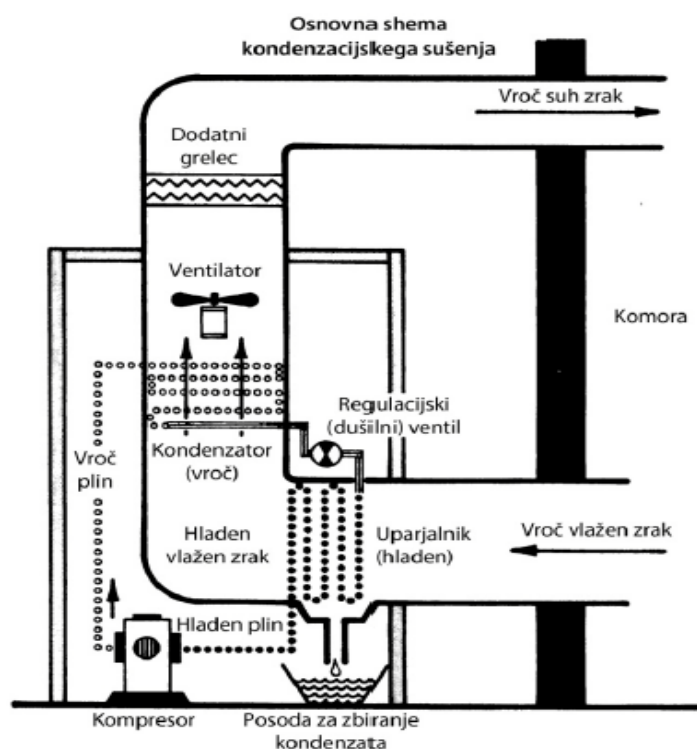


Slika 1: Shema kondenzacijske sušilne komore (Killmann and Fink, 1996)

Ta način sušenja najpogosteje poteka pri temperaturah do 45 °C, kar je ugodno za sušenje svežega lesa, za doseganje nižjih končnih vlažnosti pa se čas sušenja nesorazmerno podaljša. Z uporabo ustrežnejših hladilnih sredstev in tehnologij (IT – integrirana tehnologija) se v zadnjem obdobju dosegajo temperature tudi do 72 °C, časi sušenja pa so tako primerljivi s tistimi pri konvencionalnem sušenju (Gorišek, 2005). Ostrino sušenja v sušilni komori uravnavamo s količino zraka, ki ga vodimo preko kondenzacijskega agregata.

2.2 KONDENZACIJSKI AGREGAT

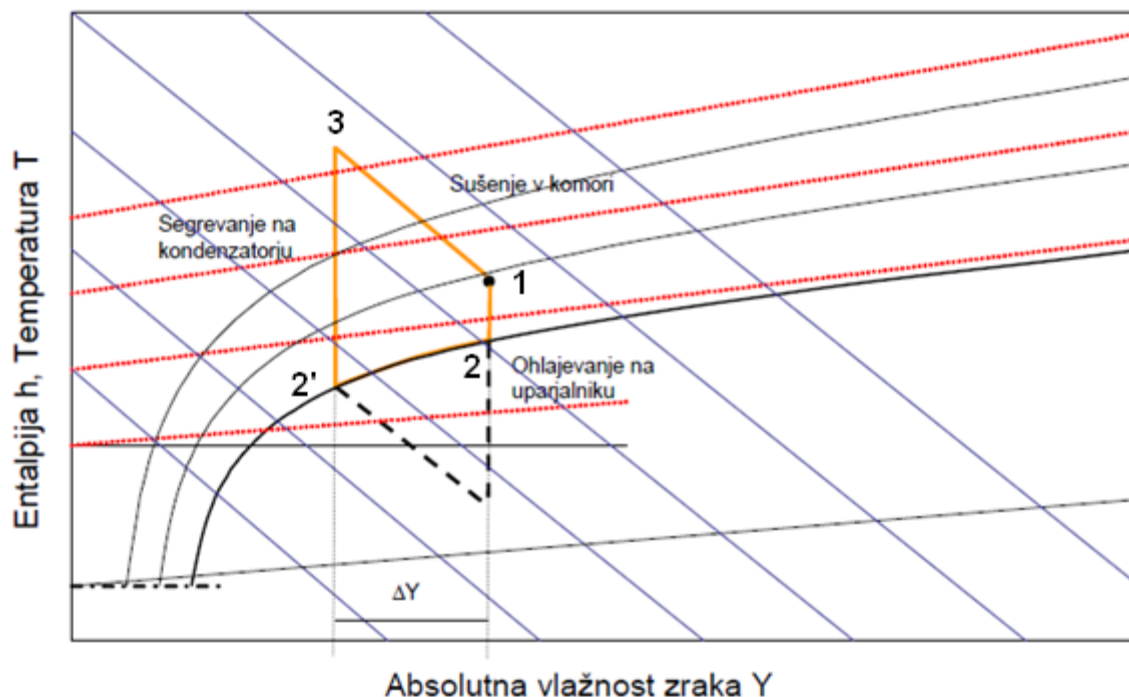
Kondenzacijski agregat ali toplotna črpalka je najpomembnejši sestavni del pri kondenzacijski sušilni komori (Slika 2). Z njim preveč vlažen zrak razvlažujemo in tako razvlaženega ponovno vračamo v komoro. Sestavlja ga kompresor, uparjalnik in kondenzator.



Slika 2: Osnovna shema kondenzacijskega agregata (Simpson, 1991)

Postopek razvlaževanja zraka poteka tako, da vroč vlažen zrak iz sušilne komore vodimo v toplotni izmenjevalnik - uparjalnik, kjer se vroč vlažen zrak ohladi na hladnih stenah uparjalnika pod temperaturo rosišča, ter odda kondenzat (vodo), katere količina je odvisna od stopnje ohladitve (razdalja 2–2' na Sliki 3). Pri tem se sprosti del senzibilne in latentne toplote, ki se porabi za segrevanje hladilnega sredstva, ki kroži v sekundarnem, notranjem delu uparjalnika. Po prehodu zraka skozi uparjalnik postane zrak zaradi ohladitve pod temperaturo rosišča nasičen (njegova relativna zračna vlažnost se približa 100 %), zato ni uporaben za nadaljevanje sušenja (točka 2' na Sliki 3). Pred vnovičnim vodenjem v sušilni

proces ga moramo zato segreti na določeno temperaturo, ki jo predpisuje ustrezen režim (točka 3 na Sliki 3). Segretega nato vodimo v komoro v kateri poteka sušenje lesa (sprejemanje vode), (prehod iz točke 3 do 1 na Sliki 3) kjer se zrak zopet navlaži (točka 1 na Sliki 3). Količina zraka, ki ga vodimo preko kondenzacijskega agregata, je odvisna od zahtevane ostrine sušenja. Tako z uravnavanjem večjega ali manjšega pretoka zraka preko kondenzacijskega agregata ponavljamo proces do konca sušenja lesa.



Slika 3: Termodinamske spremembe zraka pri kondenzacijskem sušenju (Gorišek, 2009).

Pri sprejemanju energije zraka na uparjalniku se hladilno sredstvo uparja in prehaja v kompresor, kjer ga adiabatno stisnemo in nato vodimo do kondenzatorja, kjer ekspandira. Pri tem se utekočini in odda znatno količino toplotne energije. Sproščena toplota se uporabi za segrevanje zraka, ki lahko ustrezno pripravljenega spet vodimo v sušilno komoro.

Kondenzacijski agregat deluje torej po načelu toplotne črpalke, zato želimo, da je grelno število čim večje (grelno število je razmerje med pridobljeno toplotno energijo, ki se sprosti na kondenzatorju, in vložnim delom pri adiabatnem stiskanju hladilnega sredstva na kompresorju).

V kondenzacijskem agregatu ima pomembno vlogo hladilno sredstvo, zato mora izpolnjevati posebne zahteve: pri nizkem vrelišču mora imeti čim večjo specifično in izparilno toploto; ne sme biti vnetljivo, toksično in korozivno; mora biti termično in kemično stabilno ter ekološko sprejemljivo. Prvotno uporabljeni kemično nestabilni

halogenizirani ogljikovodiki, znani tudi kot freoni (R-12 CHCl_2F_2), se zamenjujejo s stabilnejšimi (R-134 $\text{CH}_2\text{-CF}_2$), nadomešča pa se jih z amoniakom oziroma ogljikovim dioksidom (Gorišek, 2005).

2.3 PREDNOSTI IN POMANJKLJIVOSTI KONDENZACIJSKEGA SUŠENJA

Največja prednost kondenzacijskega sušenja je velika energijska učinkovitost v primerjavi z normalnim temperaturnim komorskim sušenjem (Teischinger, 1981), ki jo povečuje zaprt sistem, vendar je večina porabljene energije električne, ki je praviloma dražja od toplotne, pridobljene iz lesnih ostankov (Krajnc, 2009). Zadovoljiv je tudi nadzor nad razmerami pri sušenju ter širok razpon sušilnih pogojev. Nižje temperature sušenja zagotavljajo milejše razmere, zato se dosega boljša kakovost osušenega lesa, postopek pa je primeren za sušenje tudi debelejših sortimentov in bolj problematičnih lesnih vrst.

Največja hiba kondenzacijskega sušenja je dolgotrajno sušenje lesa pri doseganju nizkih vlažnosti, še posebno pri težko sušečih drevesnih vrstah, kot je npr. hrastovina. Ker ogrevamo sušilnico z električnimi grelci, se pri tem porablja veliko električne energije, kar pomeni izdaten strošek. Težave se lahko pojavljajo tudi pri izenačevanju ter kondicioniranju. Možna je tudi nevarnost tveganja obarvanj in bioloških okužb še posebno pri sušenju svežega lesa.

3 MATERIAL IN METODE

3.1 MATERIAL

Za analizo kinetike sušenja, kakovosti osušenega lesa in porabe energije smo uporabili les smreke (*Picea abies* L. (Karst.)), bukve (*Fagus sylvatica* L.) in hrasta (*Quercus robur* L.) pridobljenega iz lokalnega območja.

Svež žagan les smreke je bil robljen, debeline 49 mm, povprečne dolžine 400 cm. Povprečna širina žaganic je znašala 140 mm. Svež les smo naložili po celotni širini sušilnice v zložaj širine približno 170 cm do polovice višine komore. V preostanek do vrha komore smo zložili še smrekove trame prereza 160 x 160 mm in dolžine 1 m, da je imel krožeči zrak enakomeren upor po celotnem prerezu komore. Skupno smo sušili 112 plohov z volumnom 3,28 m³ in 34 tramov z volumnom 0,87 m³. Skupaj smo torej sušili 3,94 m³ svežega lesa. Sledilne kose, smo s čela premazali s Stipol® zaščitnim sredstvom (Slika 4).



Slika 4: Pogled na zložaj smrekovine v komori.

Svež žagan les bukve je bil nerobljen, debeline 50 mm, nazivne dolžine 400 cm in različnih širin (povprečno 35,7 cm). Svež les je bil naložen v dva zložaja širine 100 cm, ki sta bila vzporedno postavljena v sušilno komoro. Skupno smo sušili 80 plohov s skupnim volumnom 6,15 m³ svežega lesa (Slika 5) (Gorišek in sod., 2009).



Slika 5: Pogled na zložaj bukovine pred zaprtjem sušilne komore (Gorišek in sod., 2009)

Svež žagan les hrasta je bil nerobljen, debeline 50 mm, povprečne dolžine 272 cm ($L_{\min.} = 207$ cm; $L_{\max.} = 310$ cm). Povprečna širina žaganic je znašala 32 cm, ter je variirala med 21 cm (min.) in 41 cm (maks.). Svež les je bil naložen v dva zložaja širine 100 cm, ki sta bila vzporedno postavljena v sušilno komoro. Skupno smo sušili 79 plohov s skupnim volumnom $3,28 \text{ m}^3$ svežega lesa (Gorišek in sod., 2010).

3.2 METODE

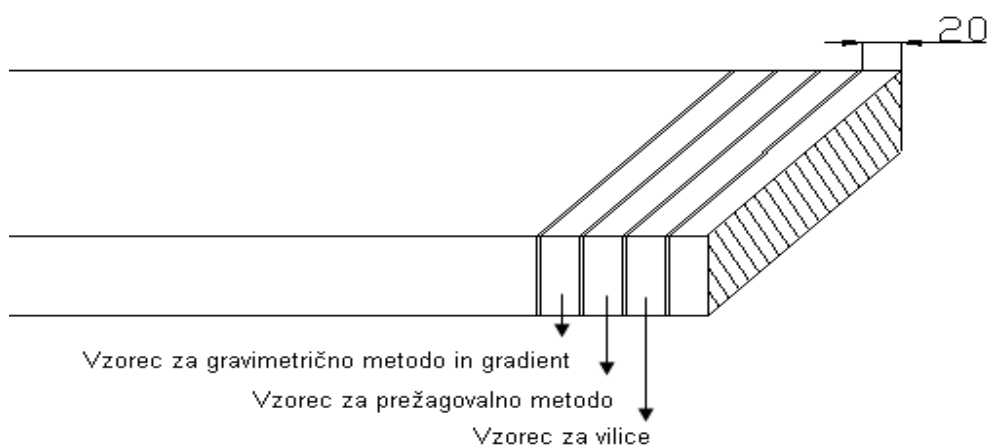
Sušenje smo izvajali v »kontejnerski« komori z nazivno kapaciteto 6 m^3 . Za vsako lesno vrsto smo uporabili standardne sušilne programe proizvajalca, tako da pred in med sušilnim procesom nismo vplivali na procesne parametre. Kontrolo kakovosti smo izvajali s kontinuiranim spremljanjem, tako da v nobeni fazi nismo vplivali na motenje izvajanja sušilnega procesa. Da bi ugotovili možnosti zagotavljanja optimalnih sušilnih pogojev, smo sušilni proces spremljali vzporedno z več neodvisnimi metodami. V celotnem sušilnem procesu smo zajemali podatke trenutne temperature in relativne zračne vlažnosti, periodično smo kontrolo postrili z natančnim in umerjenim merilnikom temperature in relativne zračne vlažnosti.

3.2.1 Določanje vlažnosti lesa

Vlažnost lesa je eden izmed osnovnih podatkov o lesu in jo v praksi ugotavljamo na več načinov. V tej nalogi smo jo določili z metodo tehtanja SIST EN 13183-1 (gravimetrična metoda) in z metodo merjenja električnih lastnosti lesa SIST EN 13183-2 (uporovna metoda). Med postopkom smo vlažnost spremljali z dvema uporovnima sondama pri sušenju smrekovine ter s štirimi uporovnimi sondami pri sušenju bukovine in hrastovine. Kontrolo in natančnost merjenja vlažnosti pa smo izvajali z gravimetrično metodo na vzporednih sledilnih vzorcih.

Gravimetrično metodo smo izvajali na začetku in na koncu vsakega postopka sušenja ter med samim procesom na sledilnih kosih. Sledilne kose smo tehtali v enakomernih časovnih intervalih ter istočasno izžagali še preizkušance za določitev povprečne vlažnosti, vlažnostnega gradienta in zaskorjenja. Po vsakem odvzemu preizkušancev smo čela sledilnih kosov premazali s Stipolom in jih vstavili na označena mesta v zložaju.

Za določitev trenutne vlažnosti smo 20 mm s čela sledilnega kosa izžagali 3 odrezke dolžine 20 mm (Slika 6). Kontrolni odrezek smo nato takoj stehtali in dobili maso vlažnega lesa m_{vl} , nato pa ga v laboratorijskem sušilniku sušili pri temperaturi $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ do sušilnično (absolutno) suhega stanja m_0 in ga nato takoj stehtali.



Slika 6: Skica odvzema odrezkov za vzorce

Vlažnost smo izračunali po formuli:

$$U \hat{=} \frac{m_{vl} - m_0}{m_0} \cdot 100\% \quad \dots(1)$$

U ... lesna vlažnost (%)

m_{vl} ... masa vlažnega odrezka (kg)

m_0 ...masa absolutno suhega odrezka (kg)

Ta postopek je natančen, če natančno tehtamo v vlažnem in suhem stanju. Slaba stran te metode je v dolgotrajnem sušenju vzorcev in izhajanju hlapnih komponent iz lesa. Poleg tega je metoda destruktivna, saj poškodujemo tudi žagan kos lesa, iz katerega izžagamo kontrolni vzorec.

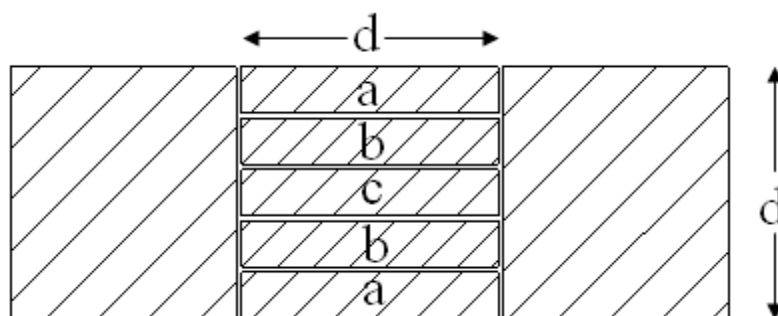
Električno merjenje vlažnosti lesa je najpogostejši način določanja lesne vlažnosti v praksi, saj nam poda rezultat takoj. Pri merjenju vlažnosti pri tej nalogi smo v ta namen uporabljali uporovni merilnik s katerim smo meritve izvedli skladno z zahtevami SIST EN 13183-2 standarda.

Električno uporovno merjenje vlažnosti temelji na tem, da logaritem specifične upornosti lesa v določenem področju pada približno linearno z naraščanjem vlažnosti lesa. Uporaba uporovnega merilnika vlažnosti lesa je zato uporabna in zanesljiva le v območju od 7 % do 25 % vlažnosti lesa oziroma do točke nasičenosti celičnih sten (Geršak, 1986). Uporabljali smo igelne elektrode, ki morajo biti zaščitene z izolativnim materialom, v les pa smo jih zabili od 1/4 do 1/3 debeline lesa, kajti na tem mestu je približno povprečna vlažnost po debelini lesa in približno odgovarja vlažnosti lesa, ki smo jo pridobili z gravimetrično metodo. Na natančnost meritve z uporovnim merilnikom lesa vplivajo še smer lesnih vlaken, gostota, temperatura ter vrsta lesa.

3.2.2 Kakovost sušenja

Kakovost sušenja lesa smo kontinuirano ocenjevali z vlažnostnim gradientom in vrednotenjem notranjih napetosti v lesu.

Vlažnostni gradient smo ugotavljali na preizkušancih širine 20 mm, ki smo jih po debelini razžagali na 5 delov (Slika 7).



- a - zunanja sloja
- b - srednja sloja
- c - notranji sloj
- d - debelina žaganice

Slika 7: Prikaz izdelave odrezka za ugotavljanje vlažnostnega profila.

Vlažnost posameznega sloja smo določali z gravimetrično metodo in izračunali vlažnostni gradient po enačbi:

$$\frac{\Delta U}{\Delta x} (\% / mm) = \frac{U_b - U_a}{D_b - D_a} \quad \dots(2)$$

U_b – vlažnost notranje lamele,

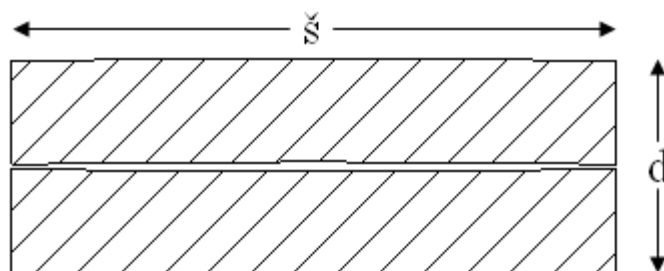
U_a – vlažnost zunanje lamele,

D_b, D_a – razdalja med središčinama zunanje in notranje lamele.

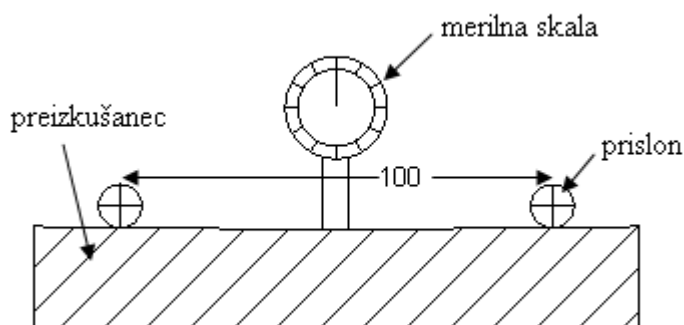
3.2.3 Vrednotenje sušilnih napetosti

Notranje napetosti med sušenjem in po sušenju smo določali na sledilnih kosih, ki so bili razvrščeni na obeh čelih zložaja. Ocenjevali smo jih z metodo prežagovanja in z vilično metodo.

Notranje napetosti smo določili s prežagovalno metodo po standardu SIST EN 14464. Na tračnem žagalnem stroju smo od čela odžagali tri vzorce debeline 20 mm in nato en preizkušanelec prepолоvili na dva enaka dela, ter ju označili (Slika 8). Vzorec smo nato s prežagano stranjo prislonili k prislonoma ($D = 10$ mm) med katerima je razdalja 100 mm. Nato smo s pomočjo mikrometra odčitali izbočenost oziroma vbočenost od ravne linije (Slika 9). Po meritvah smo vzorce shranili v plastične vrečke in jih neprodušno zaprli. Po 48 urah smo meritve ponovili.



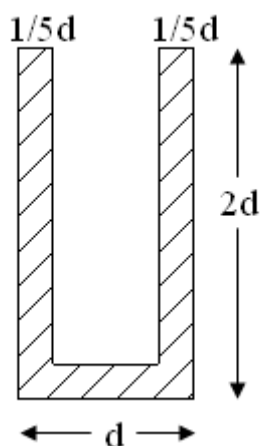
Slika 8: Prikaz prežaganega vzorca za merjenje reže (\bar{s} – širina preizkušanca, d – debelina preizkušanca).



Slika 9: Pripomoček za merjenje reže (tlorisni pogled).

Za izdelavo vilic smo vzeli enega od treh odrezkov, ki smo jih odžagali iz sledilnega kosa. Na odrezku smo nato načrtali črte in nato s tračnim žagalnim strojem izžagali vzorec v obliko vilic. Takoj po žaganju smo izmerili odklon vilic in nato vzorce shranili v plastične vrečke, ter jih neprodušno zaprli. Po 48 urah smo meritve ponovili.

d-debelina žaganice



Slika 10: Shema izdelave vilic.

3.2.4 Spremljanje porabe energije

Kondenzacijski sušilni proces smo spremljali tudi s sprotnim beleženjem porabe električne energije, ki nam je omogočal končno oceno porabe energije po posameznih fazah sušenja in v nadaljevanju odpira možnost ekonomskega vrednotenja procesa. Celotno porabo energije smo spremljali s standardnim električnim odštevalnim števcem.

4 REZULTATI

4.1 ANALIZA KINETIKE SUŠENJA LESA

Odstopanje vlažnosti lesa od želene končne vlažnosti je v postopku sušenja lesa prav gotovo ena glavnih napak. Previsoka ali prenizka vlažnost se kot napaka pokaže pri nadaljnji obdelavi, še bolj pa po vgraditvi. Odstopanja pri določanju lesne vlažnosti lahko pričakujemo tudi zaradi različnih začetnih vlažnosti, velike variabilnosti lesa ali uporabe neprimerne metode.

4.1.1 Kinetika sušenja smrekovine

Z gravimetrično metodo (SIST EN 13183-1) izmerjena začetna vlažnost smrekovine je variirala od vlažnosti 31,8 % do 90,4 %. Povprečna začetna vlažnost svežega lesa je bila 55,5 % ($n = 10$). Porazdelitev začetne vlažnosti lesa po prerezu žaganic je bila homogena, brez prisotnega vlažnostnega gradienta. Z uporovno metodo (SIST EN 13183-2), zaradi majhnega števila merilnih mest ($n = 2$), dejanske variabilnosti začetne vlažnosti lesa nismo zaznali ($u_1 = 71,3$ %; $u_2 = 77,5$ %). Izmerjena povprečna vrednost obeh sond je bila 74,4 % in je višja od gravimetrično določene vrednosti, kar pa dejansko ne vpliva na končne rezultate sušenja (Pregl. 1).

Na koncu sušenja je bila ciljna končna vlažnost 10 % nekoliko presežena ($U_{\text{povpr.}} = 8,4$ %), med elementi pa je variirala med 7,9 % in 9,0 % ($KV = 6,5$ %). Razlike v končni vlažnosti so posledica variabilnosti začetne vlažnosti, razlik v sušilnih karakteristikah lesnih tkiv, orientacije žaganih elementov in tudi neenakomernosti sušilnih pogojev v komori.

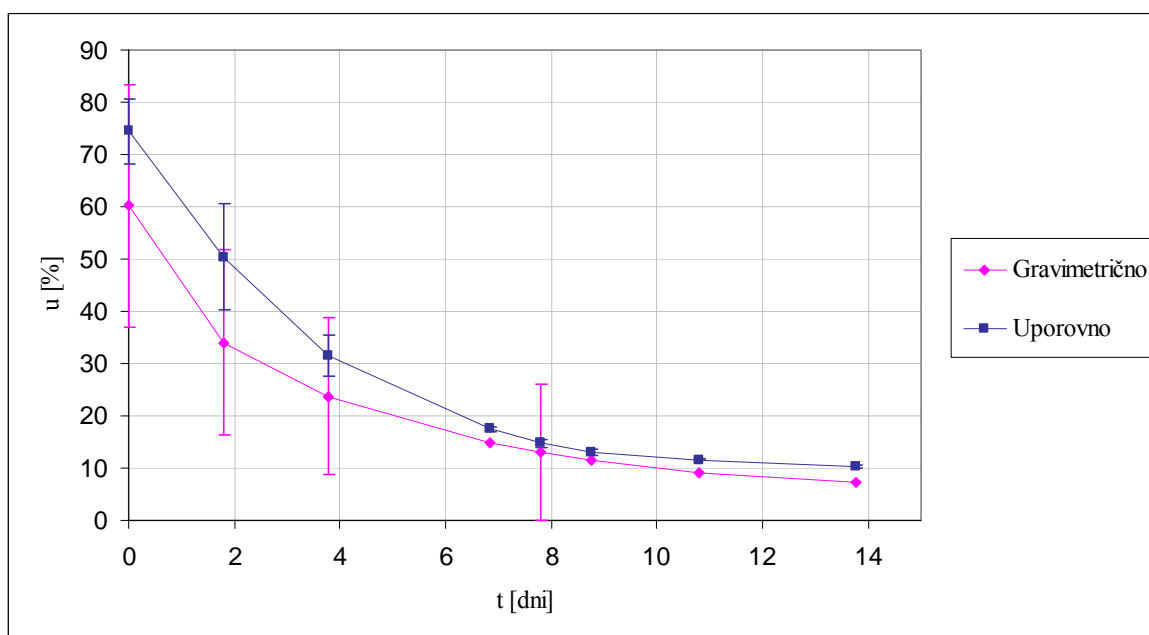
Končna vlažnost, izmerjena z uporovno metodo je bila v povprečju nekoliko višja (10,3 %), ob majhni variabilnosti (od 10,2 % do 10,4 %; $KV = 9,6$ %). Povprečna vlažnost določena z uporovnim merjenjem je od gravimetrične metode višja za 1,9 %, vendar razlika zaradi večje variabilnosti gravimetričnih meritev ($KV = 6,5$ %) statistično ni značilna.

Preglednica 1: Povprečna začetna in končna vlažnost smrekovine, določena gravimetrično in uporovno ter osnovna statistika.

	Gravimetrično (SIST EN 13183-1)		Uporovno (SIST EN 13183-2)	
	Začetna vlažnost	Končna vlažnost	Začetna vlažnost	Končna vlažnost
	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]
Povprečno	55,5	8,9	74,4	10,3
Minimalno	31,8	7,9	71,3	10,2
Maksimalno	90,4	9,0	77,5	10,4
Koef. variacije [%]	33,0	6,5	4,6	9,6

Sušilna krivulja je na začetku sušenja relativno strma (Slika 11), kar kaže na to, da se je na začetku les dokaj hitro sušil. Začetna sušilna hitrost, določena z uporovno metodo, je bila primerljiva z gravimetrično metodo, pri čemer smo s sondama izmerili višjo začetno vlažnost. Povprečna sušilna krivulja, dobljena gravimetrično, v nadaljevanju enakomerno pada, praktično do 30 % povprečne vlažnosti, ki je bila dosežena po 3 dneh sušenja. V nadaljevanju je bil sušilni postopek počasnejši, s postopnim zniževanjem sušilne hitrosti vse do dosežene končne lesne vlažnosti. Ves čas postopka, pa se je zmanjševala tudi variabilnost oziroma razlika v vlažnosti med merjenimi preizkušanci.

Povprečna sušilna krivulja, dobljena z uporovno metodo je vse do 30 % povprečne lesne vlažnosti značilno višja, kot krivulja, dobljena gravimetrično (Slika 11). Del te razlike lahko pripišemo položaju sond v žaganicah, ki so bile nameščene v sredini žaganic, ter so vselej določale maksimalno lesno vlažnost izmerjeno v sredini lesa, del pa tudi temu, da ta način merjenja ni najbolj primeren za merjenje vlažnega lesa nad točko nasičenja celičnih sten (TNCS). V nadaljevanju se krivulji postopoma zblížujeta. Pri vlažnosti lesa pod 25 %, razlike med gravimetrično in uporovno določeno povprečno lesno vlažnostjo niso več statistično značilne.



Slika 11: Primerjava sušilnih krivulj smrekovine, določenih z gravimetričnimi meritvami lesne vlažnosti in z meritvami vlažnosti z uporovno metodo.

Učinkovito sušenje je trajalo relativno dolgo, saj se je v prvi četrtini sušilnega procesa izločilo približno dve tretjini vse vode (Pregl. 2). Hitrost se je bistveno zmanjšala šele po padcu vlažnosti pod točko nasičenja celičnih sten, oziroma pod 20 % vlažnosti, ko je difuzijski upor že prevladujoč. Kljub relativno nizki temperaturi sušenja je upočasnen difuzijski tok ostal tudi ob koncu sušenja.

Preglednica 2: Uporovno in gravimetrično določena vlažnost smrekovine in hitrost sušenja odvisno od časa sušenja.

Čas sušenja [dni]	Vlažnost lesa		Hitrost sušenja	
	(Uporovno) [%]	(Gravimetrično) [%]	(Uporovno) [%/dan]	(Gravimetrično) [%/dan]
0,0	77,6	55,5		
1,8	75,3	35,7	1,3	10,9
6,9	55,1	16,0	4,0	3,9
7,8	26,4	13,6	32,0	2,7
8,9	16,0	11,6	9,8	1,9
10,9	13,3	8,7	1,4	1,4
13,9	10,9	6,2	0,8	0,8

4.1.2 Kinetika sušenja bukovine

Začetna vlažnost bukovine je variirala od vlažnosti 40,8 % do 73,3 % in je bila glede na izbrane sledilne vzorce pričakovana (radialni plohi s sušinami in rdečim srcem so imeli nižjo vlažnost, tangencialni na mestu beljave pa višjo) (Pregl. 3). Povprečna začetna vlažnost svežega lesa je bila 57,4 % (n = 10). Z uporabo uporovne metode začetnih variabilnosti vlažnosti nismo zaznali. Izmerjena vrednost na vseh merilnih mestih je bila 66 %.

Na koncu sušenja je bila dosežena končna vlažnost 8,3 %, ki pa je med elementi variirala med 6,6 % in 11,4 %. Razlike v končni vlažnosti so posledice velikih variabilnosti začetne vlažnosti, razlik v sušilnih karakteristikah lesnih tkiv, orientacije žaganih elementov in tudi neenakomernosti sušilnih pogojev v komori.

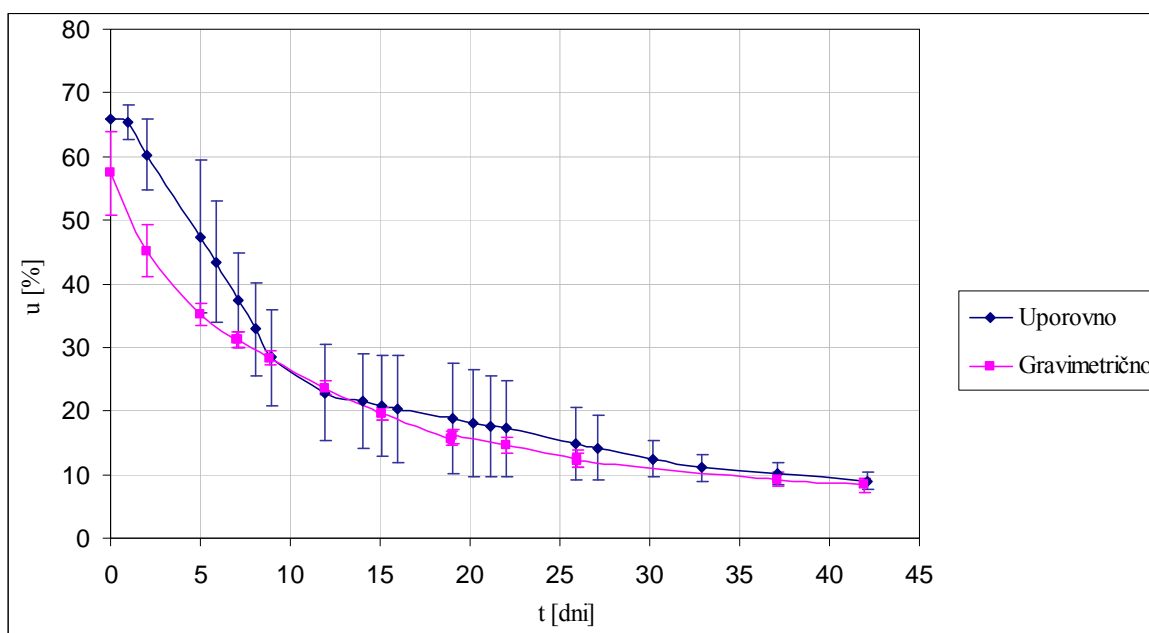
Končna vlažnost, izmerjena z uporovno metodo, je bila v povprečju nekoliko višja (9,0 %), vendar pa je bila variabilnost zelo majhna (od 8,1 % do 11,1 %). Povprečna vlažnost določena z uporovnim merjenjem je od gravimetrične metode višja za 0,7 %, vendar razlika statistično ni značilna, saj so razlike vlažnosti med posameznimi elementi večje od razlik povprečij.

Preglednica 3: Povprečna začetna in končna vlažnost bukovine, določena gravimetrično in uporovno ter osnovna statistika.

	Gravimetrično (SIST EN 13183-1)		Uporovno (SIST EN 13183-2)	
	Začetna vlažnost u [%]	Končna vlažnost u [%]	Začetna vlažnost u [%]	Končna vlažnost u [%]
Povprečno	57,4	8,3	66	9,0
Minimalno	40,8	6,6	66	8,1
Maksimalno	73,3	11,4	66	11,1
Koef. variacije [%]	21,8	23,6	0	15,4

Kinetiko sušenja smo analizirali s formiranjem sušilne krivulje. Primerjali smo obe krivulji pridobljene s podatki iz uporovnih meritev in z natančno gravimetrično določitvijo lesne vlažnosti (Slika 12). Sušilna krivulja je na začetku sušenja relativno strma, kar kaže na dokaj hiter začetek sušenja, vendar se nato naklon krivulje kar hitro zmanjša. Začetna sušilna hitrost določena z uporovno metodo, je bila primerljiva z gravimetrično metodo, vendar pa so bili odkloni med meritvami večji kot med sledilnimi vzorci. Začetne vlažnosti določene z uporovno metodo so se izenačile z vrednostmi gravimetričnih meritev pri vlažnostih pod točko nasičenja celičnih sten pri približno 27 %.

Učinkovito sušenje je trajalo relativno dolgo, saj se je v prvi petini sušilnega procesa izločilo približno dve tretjini vse vode (Pregl. 4). Hitrost se je bistveno zmanjšala šele po padcu vlažnosti znatno pod TNCS (pod 25 %), ko je difuzijski upor že prevladujoč. Kljub relativno nizki temperaturi sušenja je upočasnjen difuzijski tok ostal tudi ob koncu sušenja.



Slika 12: Primerjava sušilnih krivulj bukovine, določenih z gravimetričnimi meritvami lesne vlažnosti in z meritvami vlažnosti z uporovno metodo.

Preglednica 4: Uporovno in gravimetrično določena vlažnost bukovine in hitrost sušenja odvisno od časa sušenja.

Čas sušenja [dni]	Vlažnost lesa	Vlažnost lesa	Hitrost sušenja	Hitrost sušenja
	(Uporovno) [%]	(Gravimetrično) [%]	(Uporovno) [%/dan]	(Gravimetrično) [%/dan]
0,0	66,0	57,4		
2,0	60,3	45,2	2,8	6,1
5,0	47,4	35,2	4,3	3,3
7,1	37,4	31,2	4,8	1,9
9,0	28,4	28,3	4,7	1,5
12,0	22,9	23,6	1,8	1,6
15,1	20,9	19,6	0,6	1,3
19,0	18,8	15,7	0,5	1,0
22,0	17,2	14,5	0,5	0,4
25,9	14,8	12,5	0,6	0,5
37,1	10,1	9,2	0,4	0,3
42,1	9,0	8,3	0,2	0,2

4.1.3 Kinetika sušenja hrastovine

Začetna vlažnost je variirala od vlažnosti 67,9 % do 80,0 % (SIST EN 13183-1). Povprečna začetna vlažnost svežega lesa je bila 75,2 %, določena gravimetrično ($n = 10$). Porazdelitev začetne vlažnosti lesa po prerezu žaganic je bila homogena, brez prisotnega vlažnostnega gradienta. Zaradi uporabljene uporovne metode (SIST EN 13183-2) ter števila merilnih mest ($n = 4$), dejanske variabilnosti začetne vlažnosti lesa nismo zaznali ($u_1 = 62,9$ %; $u_2 = 70,3$ %). Izmerjena povprečna vrednost na vseh merilnih mestih je bila 67,9 % in je statistično značilno nižja od gravimetrično določene vrednosti (Pregl. 5).

Na koncu sušenja je bila dosežena ciljna končna vlažnost 7,8 %, ki pa je med elementi variirala med 6,7 % in 9,6 % (KV = 11,6 %). Razlike v končni vlažnosti so posledica variabilnosti začetne vlažnosti, razlik v sušilnih karakteristikah lesnih tkiv, orientacije žaganih elementov in tudi neenakomernosti sušilnih pogojev v komori.

Končna vlažnost, izmerjena z uporovno metodo, je bila v povprečju nekoliko višja (9,0 %), ob majhni variabilnosti (od 8,1 % do 11,1 %; KV = 1,2 %). Povprečna vlažnost določena z uporovnim merjenjem je od gravimetrične metode višja za 1,2 %, vendar razlika zaradi večje variabilnosti gravimetričnih meritev (KV = 11,6 %) statistično ni značilna.

Preglednica 5: Povprečna začetna in končna vlažnost hrastovine, določena gravimetrično in uporovno ter osnovna statistika.

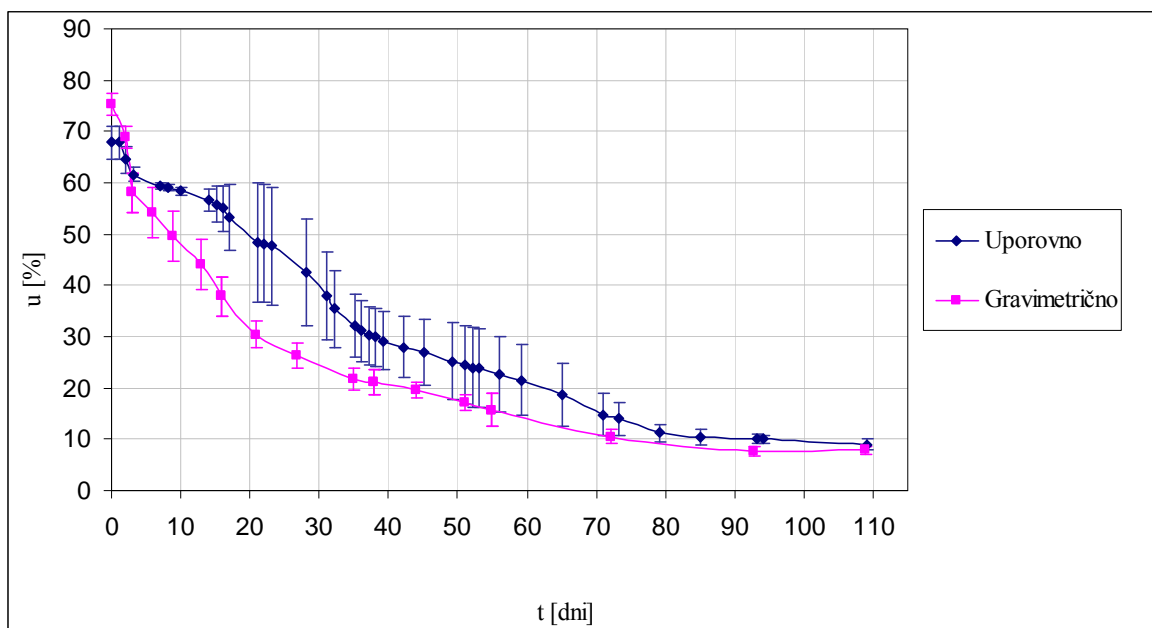
	Gravimetrično (SIST EN 13183-1)		Uporovno (SIST EN 13183-2)	
	Začetna vlažnost u [%]	Končna vlažnost u [%]	Začetna vlažnost u [%]	Končna vlažnost u [%]
Povprečno	75,2	7,8	67,9	9,0
Minimalno	67,9	6,7	62,9	7,7
Maksimalno	80,0	9,6	70,3	10,6
Koef. variacije [%]	4,8	11,6	5,0	1,2

Kinetiko sušenja smo analizirali s formiranjem sušilne krivulje, ter obe krivulji dobljeni z uporovno in gravimetrično metodo primerjali med seboj (Slika 13). Sušilna krivulja je na začetku sušenja relativno strma, kar kaže na hiter začetek sušenja, vendar se kmalu še pri visoki vlažnosti naklon krivulje zmanjša. Začetna sušilna hitrost, določena z uporovno metodo, je bila primerljiva z gravimetrično metodo, pri čemer smo z uporovno metodo izmerili nižjo začetno vlažnost. Povprečna sušilna krivulja, dobljena gravimetrično, v nadaljevanju enakomerno pada, praktično do 30 % povprečne vlažnosti, ki je bila dosežena po 20 dneh sušenja in nato še enakomerno tja do vlažnosti lesa 15 %, ki smo jo dosegli po 60 dneh sušenja. V nadaljevanju je bil sušilni postopek počasnejši, s postopnim zniževanjem sušilne hitrosti vse do dosežene končne lesne vlažnosti. Ves čas postopka, pa

se je zmanjševala tudi variabilnost oziroma razlika v vlažnosti med merjenimi preizkušanci.

Povprečna sušilna krivulja, dobljena z uporovnim merjenjem je vse do 30 % povprečne lesne vlažnosti značilno višja, kot krivulja, dobljena gravimetrično. Različen je tudi njun naklon. Del te razlike lahko pripišemo položaju sond v žaganicah, ki so bile nameščene v sredini žaganic, ter so vselej določale maksimalno lesno vlažnost izmerjeno v sredini lesa. V nadaljevanju se krivulji postopoma zbližujeta. Pri vlažnosti lesa pod 20 %, razlike med gravimetrično in uporovno določeno povprečno lesno vlažnostjo niso več statistično značilne ($p \leq 0,05$). Primerjava sušilnih krivulj po posamičnih sondah sicer pokaže, da pri visoki lesni vlažnosti ($u > u_{TNCS}$) 3 od 4 sond kažejo višje vrednosti od vrednosti povprečne sušilne krivulje. Vzroki za odklanjanje so poleg pozicije po debelini žaganic tudi v variiranju vsebnosti vode v lesu, ki je odvisna tudi od fizioloških lastnosti. S tem variira tudi lesna vlažnost po posamičnih merilnih mestih.

Učinkovito sušenje je trajalo relativno dolgo, saj se je v prvi četrtini sušilnega procesa izločilo približno dve tretjini vse vode (Pregl. 6). Hitrost se je bistveno zmanjšala šele po padcu vlažnosti pod točko nasičenja celičnih sten, ko je difuzijski upor že prevladujoč. Kljub relativno nizki temperaturi sušenja je upočasnjjen difuzijski tok ostal tudi ob koncu sušenja.



Slika 13: Primerjava sušilnih krivulj hrastovine, določenih z gravimetričnimi meritvami lesne vlažnosti in z meritvami vlažnosti z uporovno metodo.

Preglednica 6: Uporovno in gravimetrično določena vlažnost hrastovine in hitrost sušenja odvisno od časa sušenja.

Čas sušenja	Vlažnost lesa		Hitrost sušenja	
	(Uporovno)	(Gravimetrično)	(Uporovno)	(Gravimetrično)
[dni]	[%]	[%]	[%/dan]	[%/dan]
0,0	67,9	75,6		
2,1	64,5	68,8	1,6	3,2
3,1	61,7	58,0	2,8	10,8
7,1	59,4	54,2	0,6	1,0
8,2	59,0	49,7	0,3	4,1
14,1	56,5	44,1	0,4	1,0
15,2	55,8	37,8	0,7	5,7
21,2	48,4	30,4	1,2	1,2
28,0	42,6	26,2	0,8	0,6
35,2	32,1	21,7	1,5	0,6
38,0	29,9	21,1	0,8	0,2
45,1	27,0	19,5	0,4	0,2
51,1	24,4	17,2	0,4	0,4
56,1	22,7	15,6	0,4	0,3
73,2	14,0	10,6	0,5	0,3
93,2	10,1	7,6	0,2	0,2
109,0	9,0	7,8	0,1	0,0

4.2 KAKOVOST SUŠENJA

Kakovost sušenja vseh treh lesnih vrst smo ocenjevali pred sušenjem, intervalno med samim postopkom na sledilnih kosih, ter podali končno oceno osušenega lesa.

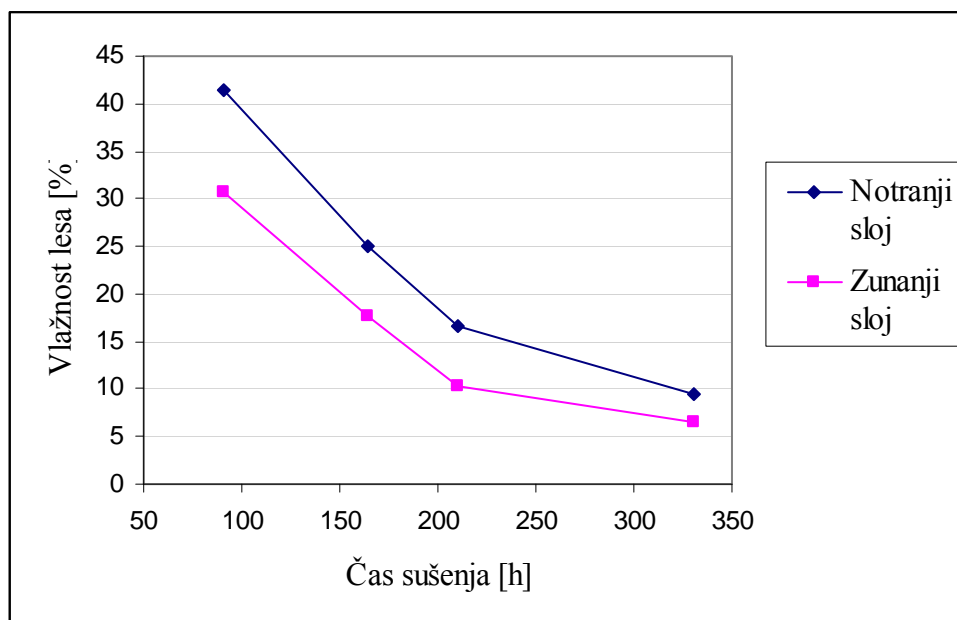
4.2.1 Končna vlažnost in vlažnostni gradient

4.2.1.1 Končna vlažnost in vlažnostni gradient pri smrekovini

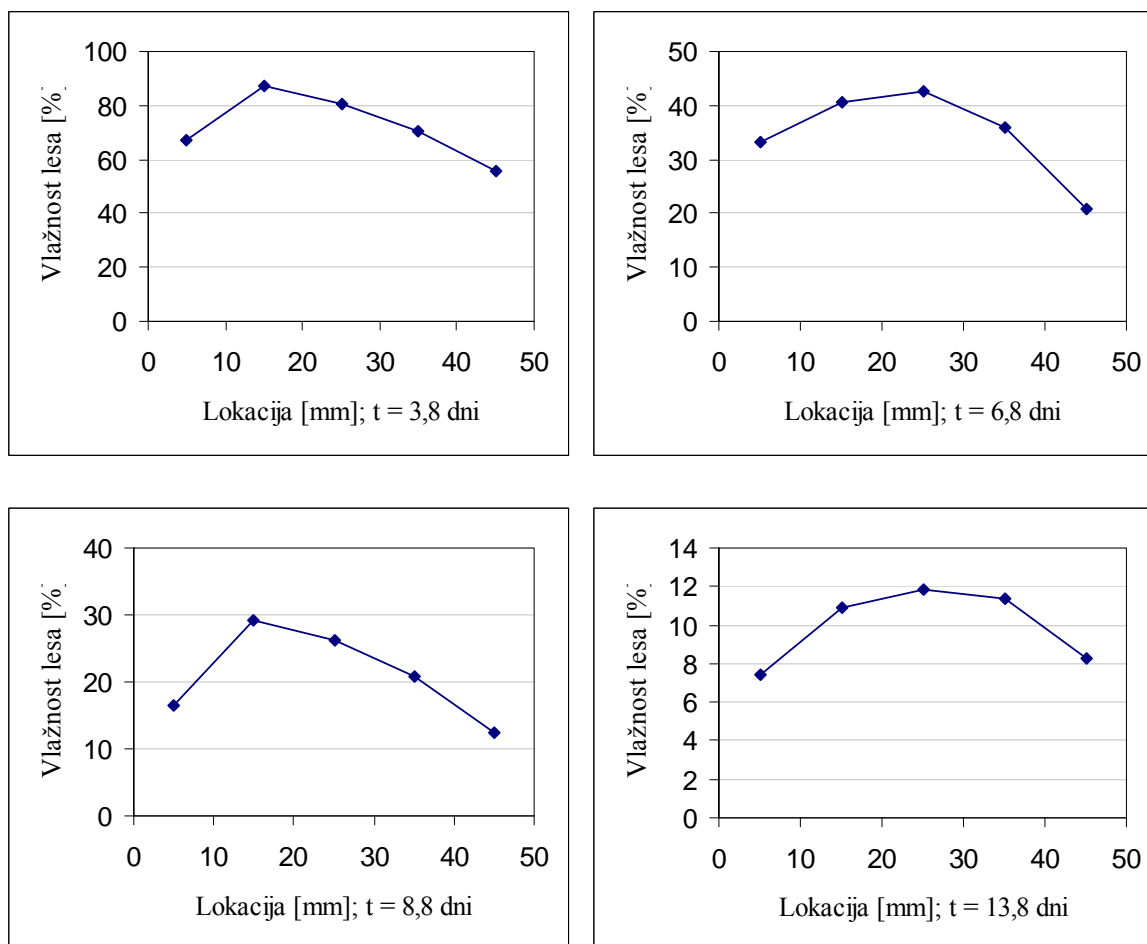
Na koncu sušilnega postopka ($t = 12$ dni) je bila dosežena povprečna vlažnost smrekovine 8,4 % (Pregl. 1), in kaže na dokaj homogeno razporeditev vlažnosti tako med posameznimi žaganicami kot tudi enakomerno porazdelitev po sušilni komori. Statistično značilnih razlik med vlažnostmi nismo zaznali po višini ali po širini komore, kar je znak enakomernosti sušenja celotne šarže. Končna vlažnost, izmerjena z uporovno metodo, je bila v povprečju nekoliko višja (10,4 %) od gravimetrično določene (8,4 %), vendar pa razlike niso statistično značilne.

Vlažnostni gradient se je že kmalu po začetku sušenja dvignil na približno 5,5 %/cm in nato enakomerno padal, kar je omogočalo enakomeren proces sušenja do precej nizkih vlažnosti. V zadnji fazi sušilnega procesa se je gradient zmanjšal in dosegel na koncu sušenja povprečne vrednosti 1,5 %/cm, kar kaže na to, da les ni enakomerno osušen po celotni debelini, zato je potrebna še faza izenačevanja in kondicioniranja. Po dolžini žaganic ni bilo zaslediti večjih razlik v gradientih.

Že kaj kmalu po začetku sušenja se je po debelini žaganic vzpostavil vlažnostni gradient, značilen za permeabilne in lažje sušče lesne vrste. Po 6 dneh se je površina osušila pod območje vlažnosti nasičenja celičnih sten. Padec lesne vlažnosti v notranjosti žaganic v primerjavi s površino je bil sorazmeren. V nadaljevanju sušenja je sredina žaganice dosegla območje vlažnosti nasičenja celičnih sten po 8 dneh sušenja, površina pa je dosegala vlažnosti med 12 in 18 %. Na koncu sušenja je bila sredina žaganic osušena malo pod 12 %, površina pa malo pod 8 % (Slika 14 in Slika 15).



Slika 14: Primerjava sušenja med površino in sredico smrekovih žaganic.



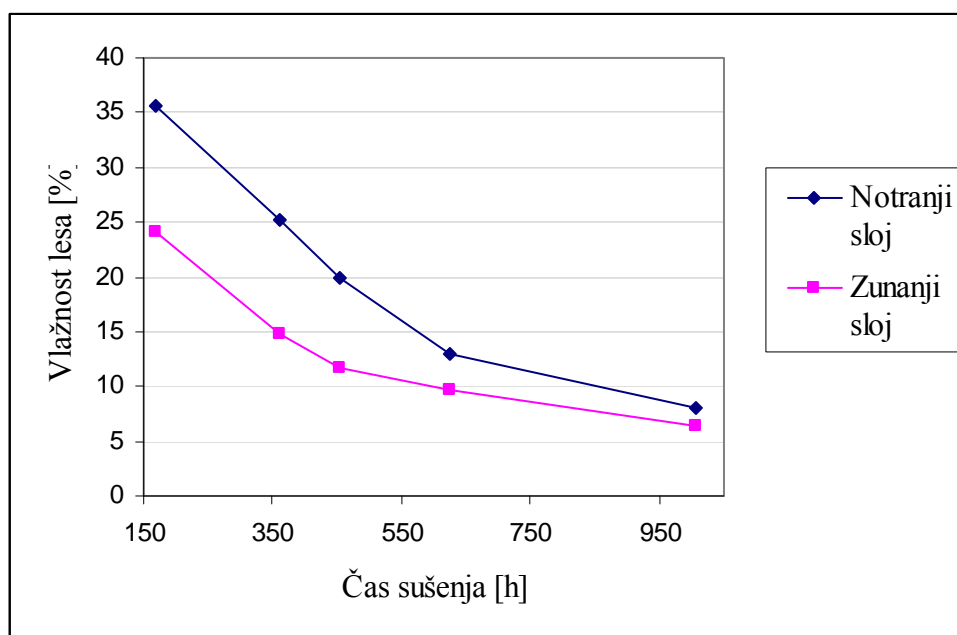
Slika 15: Razporeditev vlažnosti po debelini smrekovih žaganic v štirih intervalih sušenja (levo zgoraj – po 3,8 dne sušenja; desno zgoraj po 6,81 dne sušenja; levo spodaj po 8,8 dne sušenja in desno spodaj na koncu sušenja).

4.2.1.2 Končna vlažnost in vlažnostni gradient pri bukovini

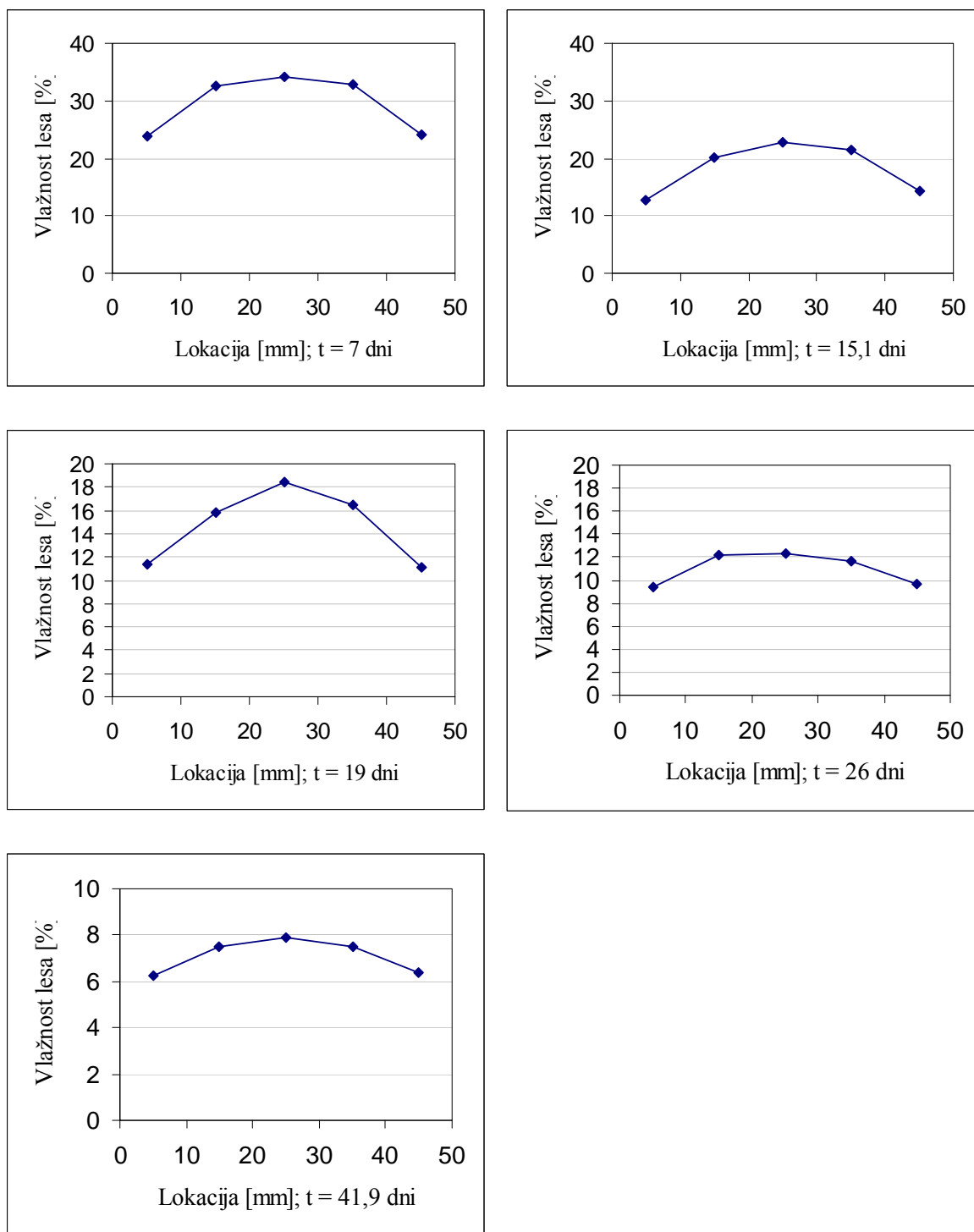
Po 42 dneh sušenja je bila povprečna končna vlažnost izmerjena z uporovno metodo (9,0 %) nekoliko višja od gravimetrično določene (8,3 %), vendar razlike niso signifikantne. Tudi primerjava vlažnosti med posameznimi sledilnimi in končnimi kontrolnimi žaganicami ne kaže na značilne razlike. Statistično značilnih razlik med vlažnostmi nismo zaznali po višini ali po širini komore, kar je znak enakomernosti sušenja celotne šarže.

Vlažnostni gradient se je že kmalu na začetku sušenja dvignil na približno 5 %/cm in zadržal vrednost do približno 15 % vlažnosti. Relativno konstantna vrednost, ki jo je v tem območju zadržal vlažnostni gradient, je omogočila enakomeren proces sušenja v širšem območju nasičenja celičnih sten. V zadnji fazi sušilnega procesa se je gradient zmanjšal in dosegel na koncu sušenja zelo sprejemljive vrednosti (0,82 %/cm), ki kažejo na enakomerno osušitev lesa po celotni debelini. Po dolžini žaganic ni bilo razlik v gradientih.

Že kmalu po začetku sušenja se je po debelini žaganic vzpostavil vlažnostni gradient, značilen za permeabilne in lažje sušeče lesne vrste, med katere spada tudi bukev. Po 7 dneh se je površina že osušila pod območje vlažnosti nasičenja celičnih sten, sredina žaganice pa je imela vlažnost krepko nad 30 %. V naslednjih 7 dneh se je sredina žaganice osušila pod območje vlažnosti nasičenja celičnih sten do 22 %, površina pa je dosegala vlažnosti med 12 in 15 %. Po 19 dneh je vlažnost celotnega prereza žaganice padla pod 20 % vlažnosti. Porazdelitev vlažnosti po celem prerezu je bila po 26 dneh sušenja že precej izenačena, na koncu sušenja, po 42 dneh pa je variirala med 6 in 8 % (Slika 16 in Slika 17).



Slika 16: Primerjava sušenja med površino in sredico bukovih žaganic.



Slika 17: Razporeditev vlažnosti po debelini bukovih žaganic v petih intervalih sušenja (levo zgoraj – po 7 dneh sušenja; desno zgoraj po 15,1 dneh sušenja; levo v sredini po 19 dneh sušenja; desno v sredini po 26 dneh sušenja in levo spodaj po koncu sušenja).

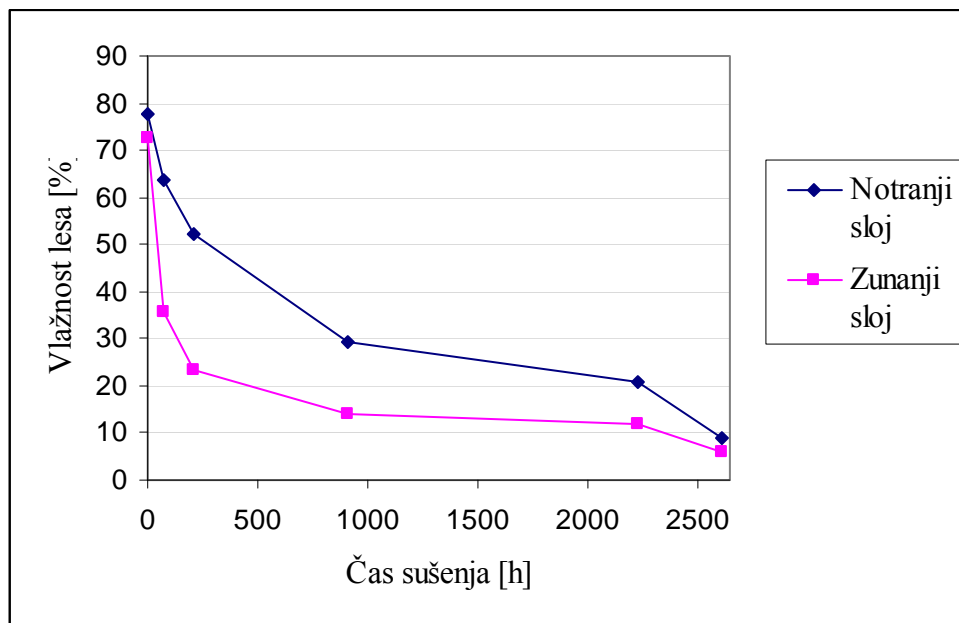
4.2.1.3 Končna vlažnost in vlažnostni gradient pri hrastovini

Hrastovina je imela na koncu sušilnega postopka ($t = 109$ dni) povprečno vlažnost 7,8 %, kar kaže na dokaj homogeno razporeditev vlažnosti tako med posameznimi žaganicami kot tudi enakomerno porazdelitev po sušilni komori. Statistično značilnih razlik med vlažnostmi nismo zaznali po višini ali po širini komore, kar je znak enakomernosti sušenja celotne šarže. Končna vlažnost, izmerjena z uporovno metodo, je bila v povprečju nekoliko višja (9,0 %) od gravimetrično določene (7,8 %), vendar pa razlike niso statistično značilne.

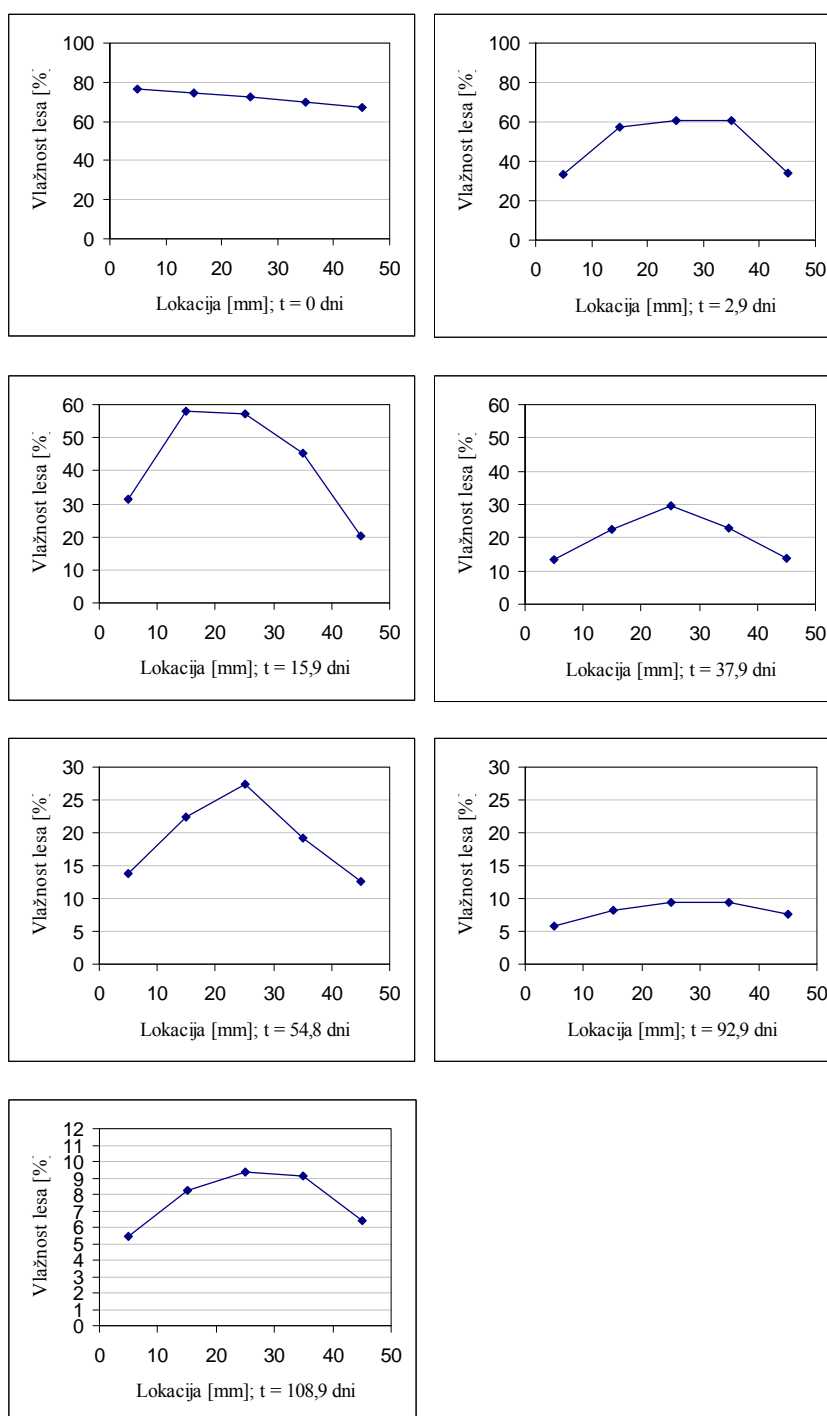
Vlažnostni gradient smo določali v sedmih intervalih sušenja ter na petih slojih po debelini lesa ($\Delta x = 10$ mm). Gradient se je že kmalu na začetku sušenja ($t = 3$ dni) dvignil na približno 13 %/cm in zadržal to ekstremno vrednost tudi po 16 dneh sušenja, ko je les imel povprečno vlažnost 37,8 %. Večji del vlažnostnega gradienta je posledica razlik med vlažnostjo površine žaganic ($x = 5$ mm) in prvega notranjega sloja ($x > 5$ mm). Ekstremno velik vlažnostni gradient se je v nadaljevanju sušenja pričel zmanjševati, predvsem zaradi sušenja sredice žaganic. Po 38 dneh, ko je tudi sredica žaganic dosegla točko nasičenja celičnih sten, se je vlažnostni gradient zmanjšal na 7,5 %/cm. V zadnji fazi sušilnega procesa se je gradient zmanjšal in dosegel na koncu sušenja zelo sprejemljive vrednosti med 1,4 in 1,7 %/cm, kar kaže na enakomerno osušitev lesa po celotni debelini. Po dolžini žaganic nismo zaznali značilnih razlik vlažnostnega gradienta.

Že kmalu po začetku sušilnega postopka se je po debelini žaganic vzpostavil vlažnostni gradient, značilen za manj permeabilne in težje sušeče lesne vrste, kot je hrast. Po 4 dneh sušenja se je površina lesa že osušila do območja vlažnosti nasičenja celičnih sten, padec lesne vlažnosti v notranjosti žaganic pa je bil zanemarljivo majhen (Slika 18). Podoben vlažnostni gradient je bil prisoten tudi po 17 dneh sušenja, ko je bila površina lesa osušena že pod točko nasičenja lesnih vlaken ($u < u_{TNCs}$), vlažnost v notranjosti pa se je gibala med 39 % in 64 %. Porazdelitev lesne vlažnosti v tem obdobju nakazuje na pojav površinske difuzijske bariere, ki je posledica prehitrega predhodnega sušenja. Posledično se mora tudi prosta voda iz notranjosti žaganic v nadaljevanju izločati difuzijsko. Delno je to stanje posledica težav z navlaževanjem in nedoseganjem klimatskih pogojev, ki so se pojavile po 8 dneh sušenja.

Porazdelitev vlažnosti po prerezu žaganic se je v nadaljevanju izboljševala (Slika 19; $t \geq 37,9$ dni), vlažnostni profil je postajal bolj paraboličen, razlike v vlažnosti po prerezu pa so se zmanjševale. Po koncu, po 109 dneh sušenja je bila sredica žaganice osušena do 9 %, površina pa na 5,5 %.



Slika 18: Primerjava sušenja med površino in sredico hrastovih žaganic.



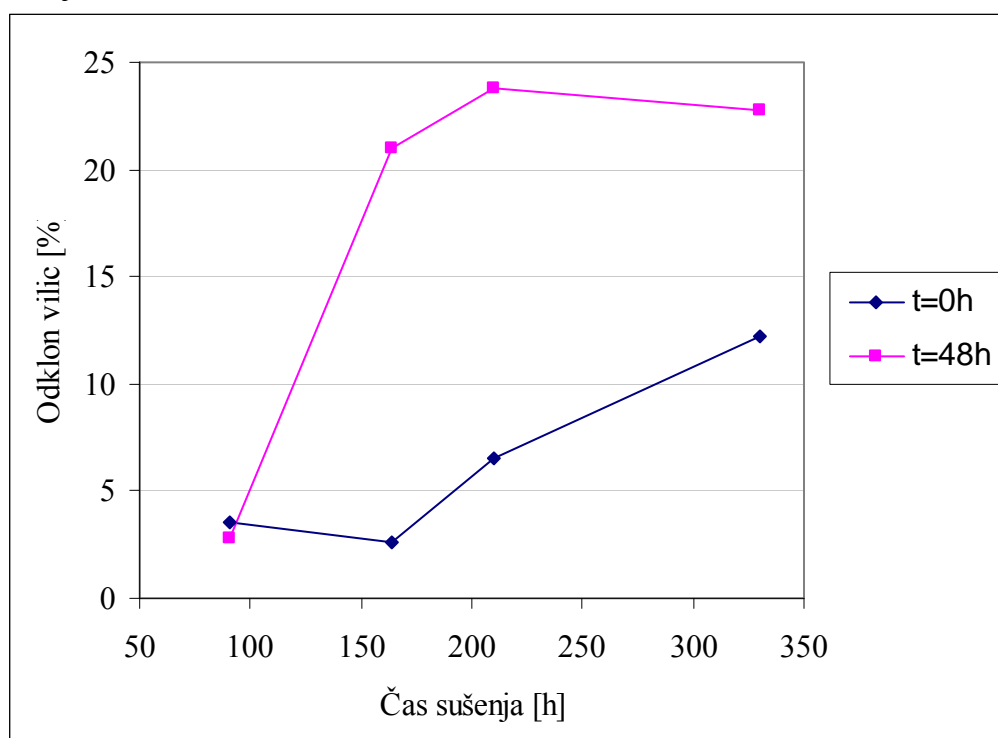
Slika 19: Razporeditev vlažnosti po debelini hrastovih žaganic v petih intervalih sušenja (levo zgoraj – na začetku sušenja; desno zgoraj po 2,9 dneh sušenja; levo 2 vrsta po 15,9 dneh sušenja; desno 2 vrsta po 37,9 dneh sušenja; levo 3 vrsta po 54,8 dneh sušenja; desno 3 vrsta po 92,9 dneh sušenja in levo spodaj po koncu sušenja).

4.2.2 Sušilne napetosti

4.2.2.1 Sušilne napetosti pri smrekovini

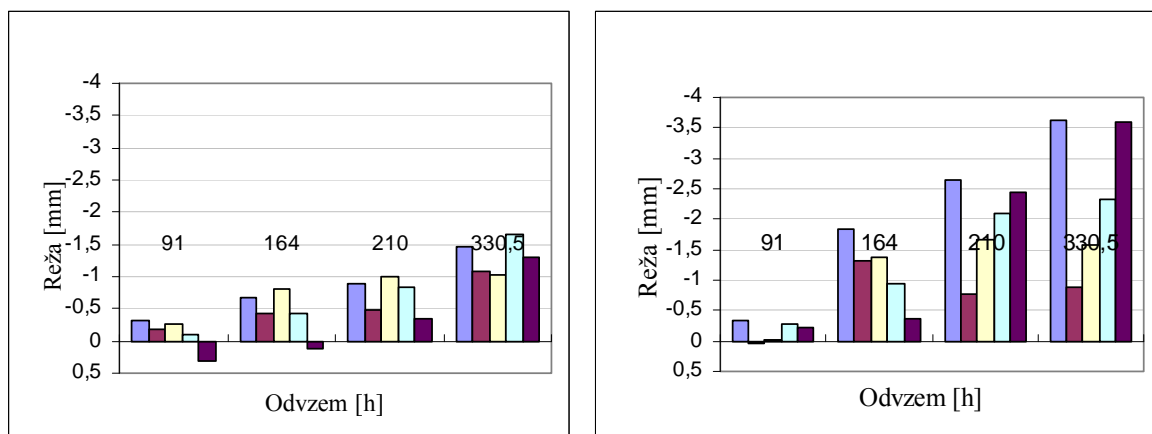
Vzporedno z naraščajočim vlažnostnim gradientom so se na začetku sušenja v lesu generirale tudi napetosti, ki smo jih zaznali z viličnim testom in s standardizirano prežagovalno metodo (SIST EN 14464). Zaradi večje debeline vzorcev oziroma žaganega lesa je vilični test bolje ocenjeval sušilne napetosti bližje površini žaganic, s prežagovalno metodo pa smo boljše ovrednotili povprečne sušilne napetosti. Pri obeh metodah je razviden tudi vpliv vlažnostnega gradienta, ki značilno vpliva na rezultate testov v začetni fazi sušenja. Po končanem sušilnem postopku zaradi manjšega vlažnostnega gradienta znatnih odstopanj med meritvijo napetosti takoj po vzorčenju in meritvijo po 48 urah nismo zaznali.

Sušilne napetosti so se po pričakovanju generirale vzporedno z nastankom vlažnostnega gradienta že na samem začetku sušilnega postopka, ko je prišlo do sušenja površine žaganic pod točko nasičenja celičnih sten (Slika 20 in Slika 22). Naraščanje napetosti je bilo največje bližje površini žaganic ter se je stopnjevalo vse do 200 ure sušenja. Do obrnitve napetostnega polja je prišlo po približno 210 urah sušenja, ko je povprečna vlažnost padla pod 15 %, povprečni gradient vlažnosti po prerezu pa je bil približno 4 %/cm. V nadaljevanju sušenja je ostalo napetostno stanje bližje površini žaganic praktično nespremenjeno.



Slika 20: Povprečna deformacija vilic na sledilnih vzorcih smrekovine takoj po razžaganju ($t = 0$ h) in po 2 dnevem kondicioniranju ($t = 48$ h).

Enak trend naraščanja je bil zabeležen tudi pri uporabi prežagovalne metode (Slika 21 in Slika 22). Največje sušilne napetosti smo tako zabeležili po 200 urah sušenja, ki so se ohranile vse do konca sušenja (meritev po 48 urah brez prisotnosti vlažnostnega gradienta).



A

B

Slika 21: Velikost reže na sledilnih smrekovih vzorcih A/ takoj po razžaganju (levo) in B/ po 48 urnem kondicioniranju (desno).



Slika 22: Preizkušanci za določanje sušilnih napetosti pri smrekovini: zgoraj – po prežagovalni metodi in spodaj – po metodi vilic.

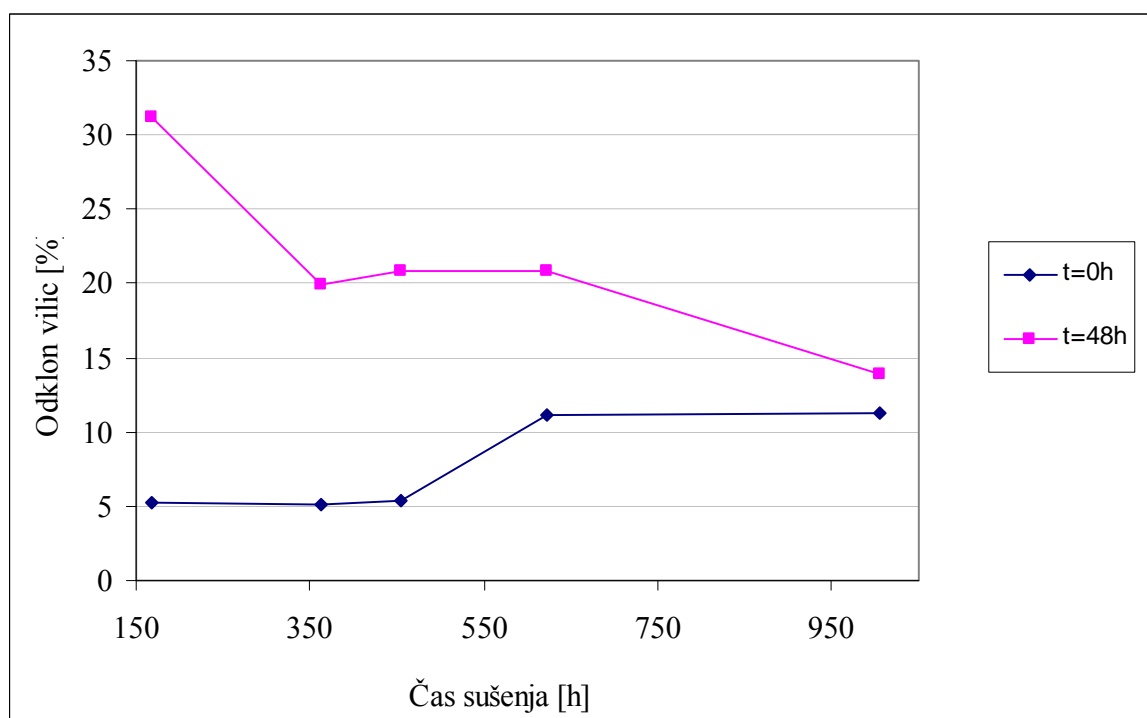
4.2.2.2 Sušilne napetosti pri bukovini

Pri prvih treh kontrolah vzorcev je imel na povečanje deformacije vilic oziroma prežaganih elementov velik vpliv tudi vlažnostni gradient, saj so bile deformacije po 48 urah opazovanja ukrivljenosti bistveno večje kot takoj po razžaganju. Po končanem sušenju

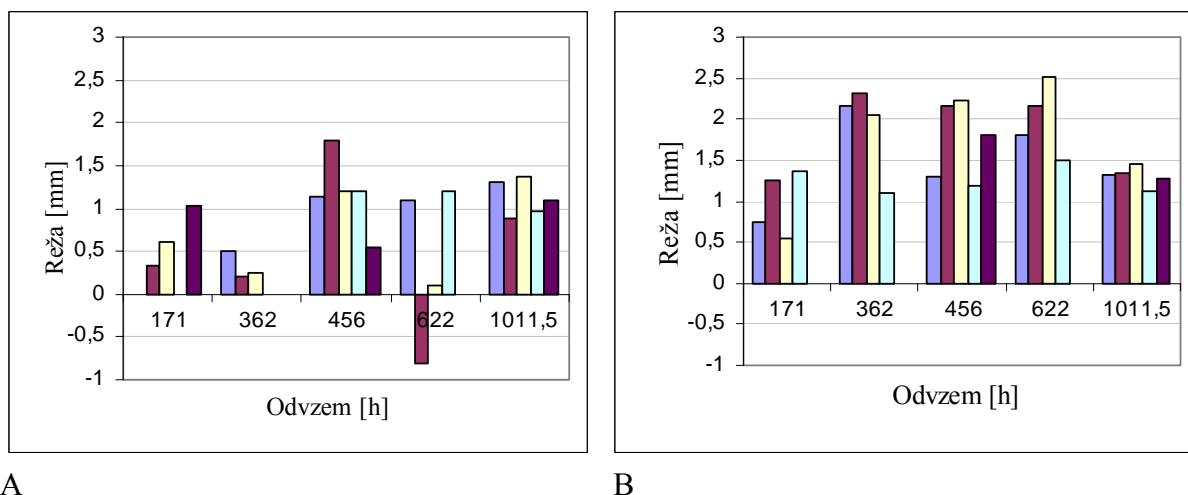
so se sušilne napetosti izenačile, zaradi manjšega vlažnostnega gradienta pa tudi ni bilo znatnih odstopanj med meritvijo napetosti takoj po vzorčenju in meritvijo po 48 urah.

Rezultati kažejo, da je bilo napetostno polje po prerezu lesa v celotnem procesu sušenja v dopustnih mejah in ni povzročilo nikakršnih posledic, ki bi lahko nastale zaradi zaskorjenja; tako nismo zasledili niti poklin na samem začetku sušenja, niti notranjih razpok ali celo sataivosti na koncu sušenja. Kljub temu, da ni bilo izvedenega postopka izenačevanja ali kondicioniranja, se kakovost lesa ni poslabšala.

Napetosti so bile pričakovano največje v prvih dneh sušenja, ko se je površina relativno hitro osušila pod točko nasičenja celičnih sten. V tem času so natezne napetosti prevladoval v relativno ozki lameli na površini. Le te pa niso bile tolikšne, da bi kazale na možnost nastanka zaskorjenja. Napetosti so bile pod mejo trdnosti lesa, tako da na površini ni prišlo do nastanka poklin. K večjemu odklonu krakov testnih vilic v prvem intervalu kontrole (31 %), je znatno prispeval tudi zelo izražen vlažnostni gradient (Slika 23). V drugi fazi sušenja je potekalo sušenje brez znatnih sprememb v napetostnem polju, kar je ob ugodnem vlažnostnem gradientu pozitivno vplivalo na transport vode iz notranjosti lesa proti površini, hkrati pa so ostajale napetosti v dovoljenih mejah brez posledic na zmanjšanje kakovosti osušenega lesa.



Slika 23: Povprečna deformacija vilic na sledilnih bukovih vzorcih takoj po razžagovanju ($t = 0$ h) in po 2 dnevem kondicioniranju ($t = 48$ h).

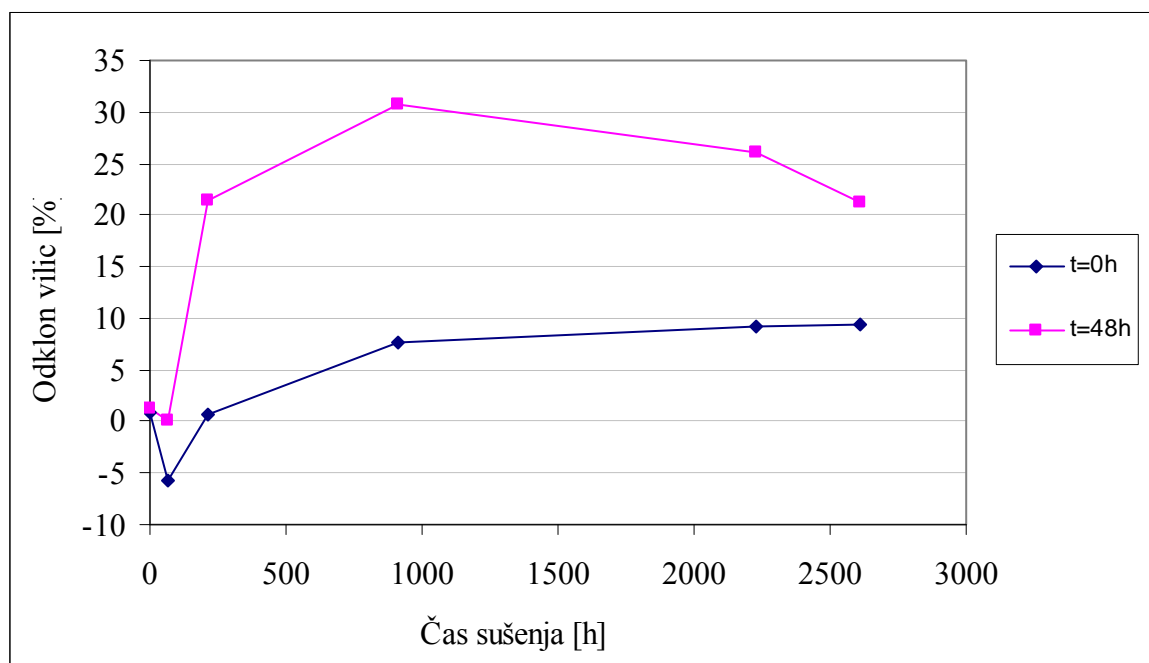


Slika 24: Velikost reže na sledilnih bukovih vzorcih A/ takoj po razžaganju (levo) in B/ po 48 urnem kondicioniranju (desno).

4.2.2.3 Sušilne napetosti pri hrastovini

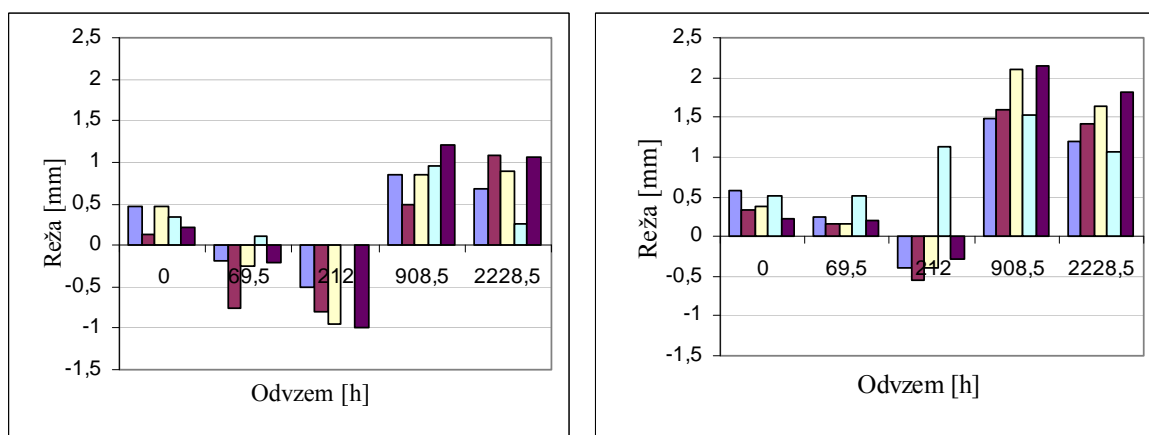
Sušilne napetosti so se po pričakovanju generirale vzporedno z nastajanjem vlažnostnega gradienta že na samem začetku sušilnega postopka, ko je prišlo do intenzivnega sušenja površine žaganic (Slika 25). Negativne vrednosti pri prvi kontroli povedo, da so bile v površinskih slojih prisotne natezne napetosti. Naraščanje napetosti je bilo največje bližje površine žaganic ter se stopnjuje vse do 900 ure sušenja. Do obrnitve napetostnega polja je prišlo po pribl. 1000 urah sušenja, ko je povprečna vlažnost padla na 20 %, povprečni gradient vlažnosti po prerezu pa je bil 7 %/cm. V nadaljevanju sušenja je ostalo napetostno stanje bližje površine žaganic praktično nespremenjeno.

Enak trend naraščanja je bil zabeležen tudi pri uporabi prežagovalne metode (slika 26). Obratno zaskorjenje smo ugotovili do 17. dneva sušenja, nato pa je prišlo do obrnitve napetostnega stanja. Največje sušilne napetosti smo tako zabeležili po 39 dneh sušenja, ki so se ohranile vse do konca sušenja, oz. so se na koncu sušenja tudi nekoliko znižale (meritev po 48 urah brez prisotnosti vlažnostnega gradienta). Posledica sušilnih napetosti, ki so najhitreje naraščale na začetku sušenja, je bil tudi pojav zaskorjenja.



Slika 25: Povprečna deformacija vilic na sledilnih hrastovih vzorcih takoj po razžaganju (t = 0 h) in po 2 dnevem kondicioniranju (t = 48 h).

Na začetku postopka so se v osušeni površini lesa ($u_{pov} < u_{TNCS}$), ki je hkrati predstavljal tudi difuzijsko bariero, generirale natezne napetosti, ki so zaradi prekoračitve prečne natezne trdnosti povzročile tudi večje število površinskih razpok in poklin. Intenzivno izhlapevanje proste vode je povzročilo v delih pod površino tudi kolaps. Posledice tega stanja so bile potrjene v nadaljevanju, ko smo pri 39. dnevu sušenja odkrili posamične notranje razpoke vzdolž parenhimskih trakov in satavost. Prisotnost satastih razpok je bila potrjena pri končni kontroli sušenja.



A

B

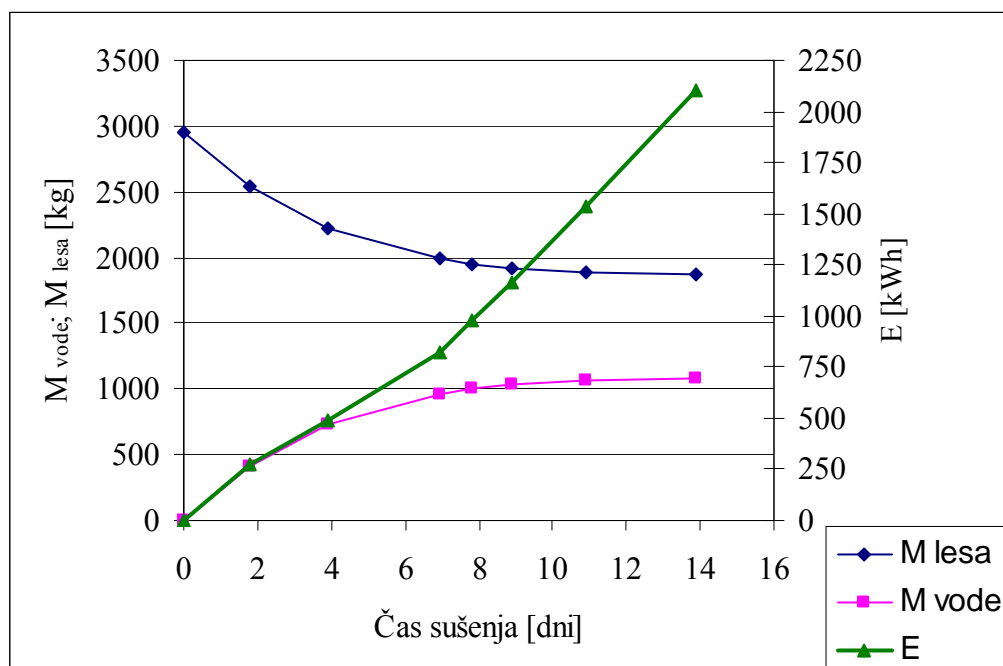
Slika 26: Velikost reže na sledilnih hrastovih vzorcih A/ takoj po razžaganju (levo) in B/ po 48 urnem kondicioniranju (desno).

4.3 PORABA ENERGIJE

Kondenzacijski način sušenja sodi med energijsko varčnejše sušilne procese, vendar se pri tem načinu sušenja porablja le električna energija.

4.3.1 Poraba energije pri sušenju smrekovine

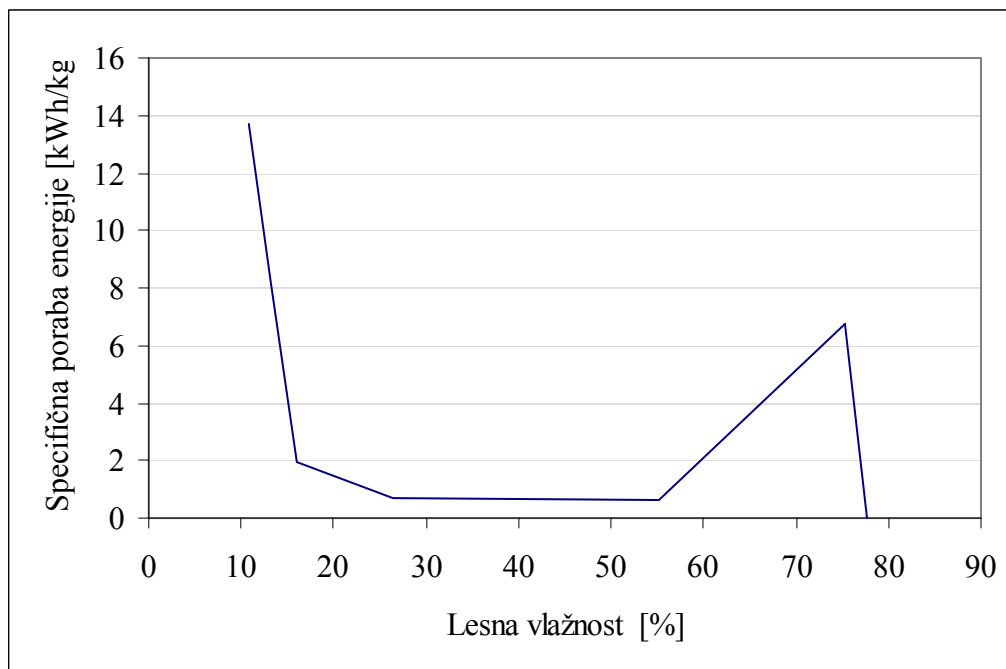
Pri sušenju smrekovine je bilo v celotnem procesu porabljeno 2101 kWh električne energije (Slika 27), kar je povprečno 6,3 kWh na uro sušenja. Pri osušitvi celotne šarže ($V_u = 3,94 \text{ m}^3$) iz povprečne začetne vlažnosti 55,5 % na končno povprečno vlažnost 8,4 % pomeni povprečno porabo 1,93 kWh za izločitev 1 kg vode iz lesa. Na začetku sušenja smo zabeležili večjo porabo energije zaradi segrevanja komore in lesa v njej, vendar, ko smo enkrat dosegli delovno temperaturo sušilnice, je poraba padla in se ustalila na nizkem nivoju.



Slika 27: Izguba mase zložaja lesa (M_{lesa}), količina izločene vode iz lesa (M_{vode}) ter poraba električne energije (E) v odvisnosti od časa sušenja smrekovine, debeline 49 mm.

Do točke nasičenja celičnih sten je bila povprečna specifična poraba energije za kilogram izločene vode iz lesa le 2,02 kWh/kg_{vode}, pri nadaljnjem sušenju pa je specifična poraba energije naraščala; pri sušenju od vlažnosti 26 % do 13 % je bila specifična poraba 3,62 kWh/kg_{vode}, pri sušenju pod 13 % pa že čez 13 kWh/kg_{vode} (Slika 28). Vzrok visoki porabi energije je tudi neustreznost delovanja naprav za navlaževanje, saj je bilo veliko vložene energije nesmotrno porabljene za izparevanje dodatno vbrizgane vode v komoro.

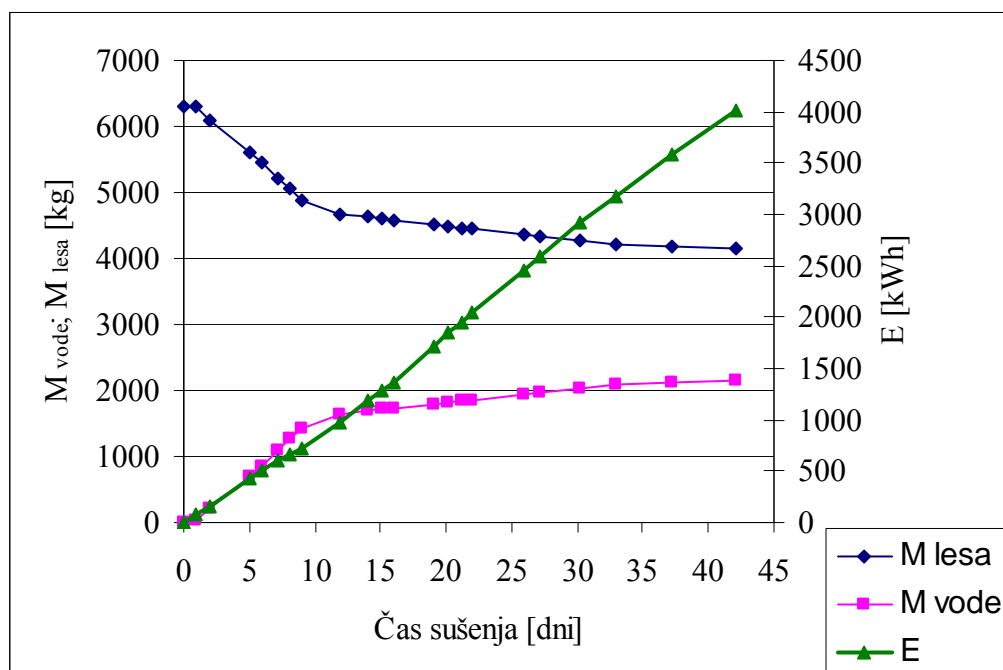
Za osušitev enega kubičnega metra smrekovine smo porabili 533,25 kWh električne energije.



Slika 28: Odvisnost specifične porabe energije od lesne vlažnosti pri sušenju smrekovine, debeline 49 mm.

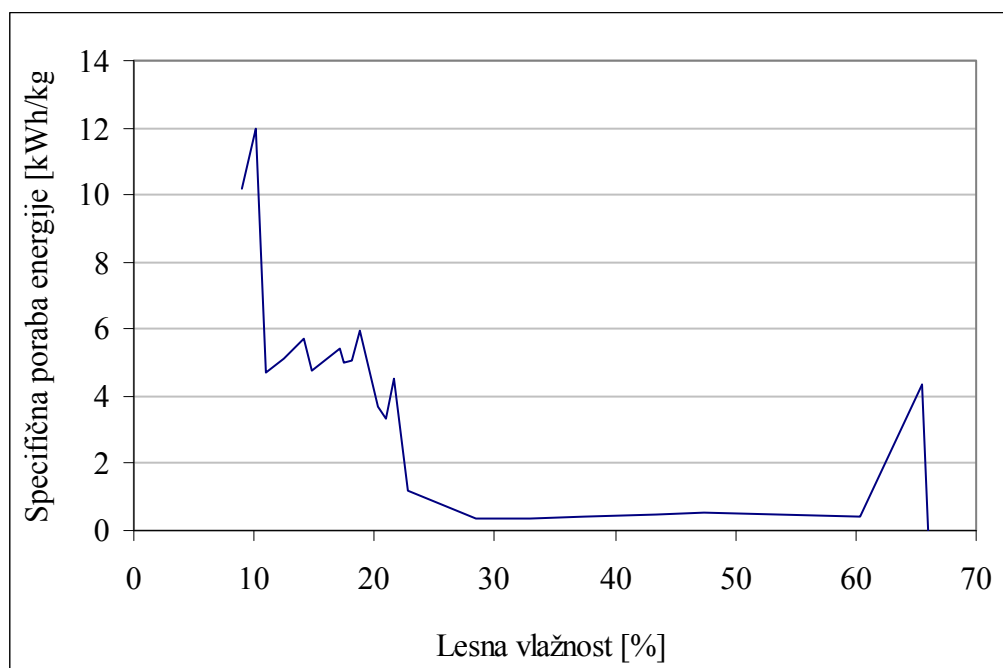
4.3.2 Poraba energije pri sušenju bukovine

Pri sušenju bukovine je bilo v celotnem procesu porabljen 4016 kWh električne energije oziroma povprečno 3,97 kWh na uro sušenja, kar pri osušitvi šarže iz začetne 57,4 % vlažnosti na končno 8,3 % pomeni porabo 2,15 kWh za izločitev 1 kg vode. Na začetku sušenja je bila specifična poraba, zaradi segrevanja in pregrevanja komore in lesa, nekoliko večja, vendar se je kmalu ustalila na razmeroma nizkem nivoju (Slika 29).



Slika 29: Izguba mase zložaja lesa (M_{lesa}), količina izločene vode iz lesa (M_{vode}) ter poraba električne energije (E) v odvisnosti od časa sušenja bukovine, debeline 50 mm.

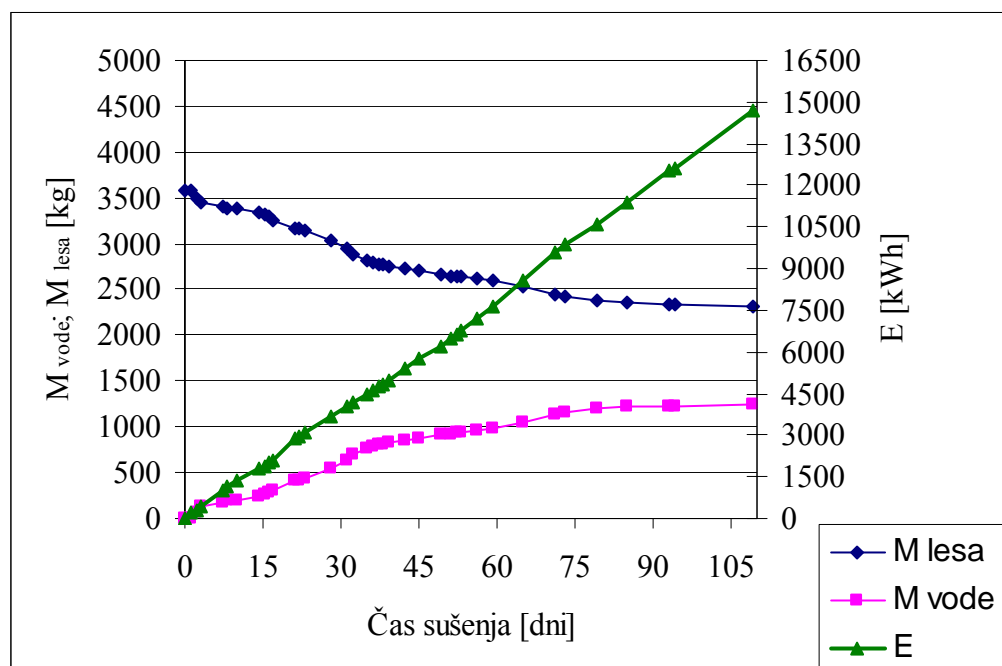
Specifična poraba je bila izjemno nizka do vlažnosti 25 %, ko ni dosegala niti 1 kWh na kg izločene vode, nato pa se je poraba začela strmo povečevati (Slika 30). Pri sušenju od 20 % pa do 10 % vlažnosti je bila poraba okoli 5 kWh/kg. V zadnji fazi je specifična poraba sicer še nekoliko narasla (do 12 kWh/kg) vendar na račun ustavljanja oziroma kondicioniranja. Na en kubični meter osušenega lesa se je porabilo 718 kWh energije.



Slika 30: Odvisnost specifične porabe energije od lesne vlažnosti pri sušenju bukovine, debeline 50 mm.

4.3.3 Poraba energije pri sušenju hrastovine

Pri sušenju hrastovine je bilo v celotnem procesu porabljeno 14688 kWh energije, kar je povprečno 5,61 kWh na uro sušenja (Slika 31). Pri osužitvi celotne šarže ($V_u = 3,38 \text{ m}^3$) iz začetne vlažnosti 75,2 % na končno 7,8 % pomeni povprečno porabo 10,37 kWh za izločitev 1 kg vode iz lesa. Nizko specifično porabo energije, nižjo od povprečne vrednosti smo dosegli vse do 22 % povprečne vlažnosti lesa.

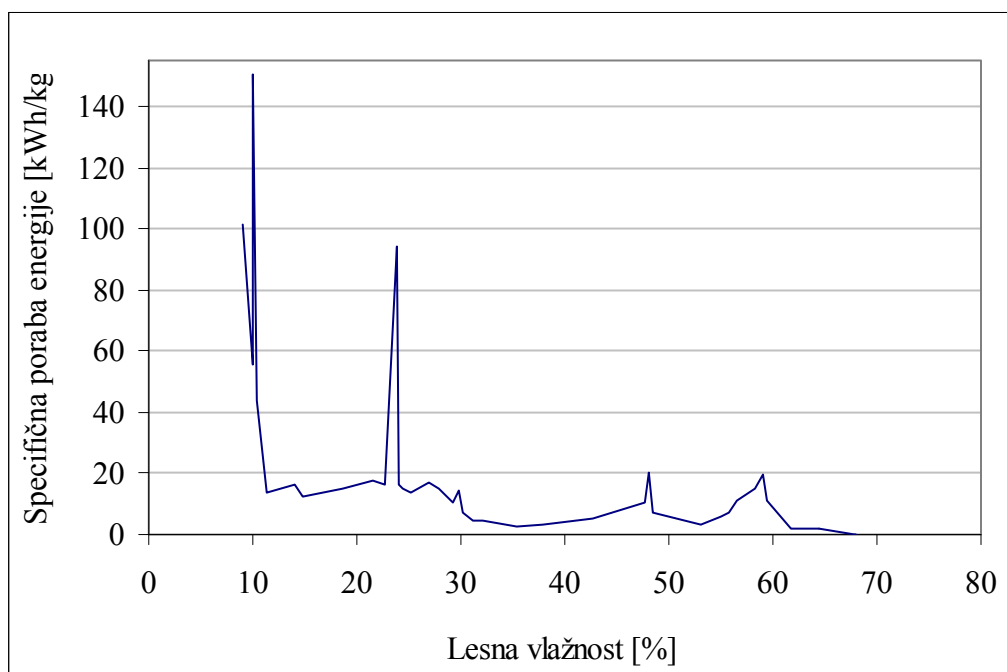


Slika 31: Izguba mase zložaja lesa (M_{lesa}), količina izločene vode iz lesa (M_{vode}) ter poraba električne energije (E) v odvisnosti od časa sušenja hrastovine, debeline 50 mm.

Do točke nasičenja celičnih sten je bila specifična poraba energije za kilogram izločene vode 3,0 kWh, pri nadaljnjem sušenju pa je specifična poraba energije izjemno hitro naraščala; pri sušenju od vlažnosti 30 % do 20 % je bila specifična poraba 11,4 kWh/kg_{vode}, od vlažnosti 20 % do 10 % že 22,8 kWh/kg_{vode} do ekstremno visokih vrednosti pri sušenju pod 10 % vlažnost lesa (> 90 kWh/kg_{vode}) (Slika 32).

Vzrok visoki porabi energije je tudi neustreznost delovanja naprav za navlaževanje, saj je bilo veliko vložene energije nesmotrno porabljene za izparevanje dodatno vbrizgane vode v komoro.

Na en kubični meter osušenega lesa smo porabili 4481 kWh energije.



Slika 32: Odvisnost specifične porabe energije od lesne vlažnosti pri sušenju hrastovine, debeline 50 mm.

5 RAZPRAVA

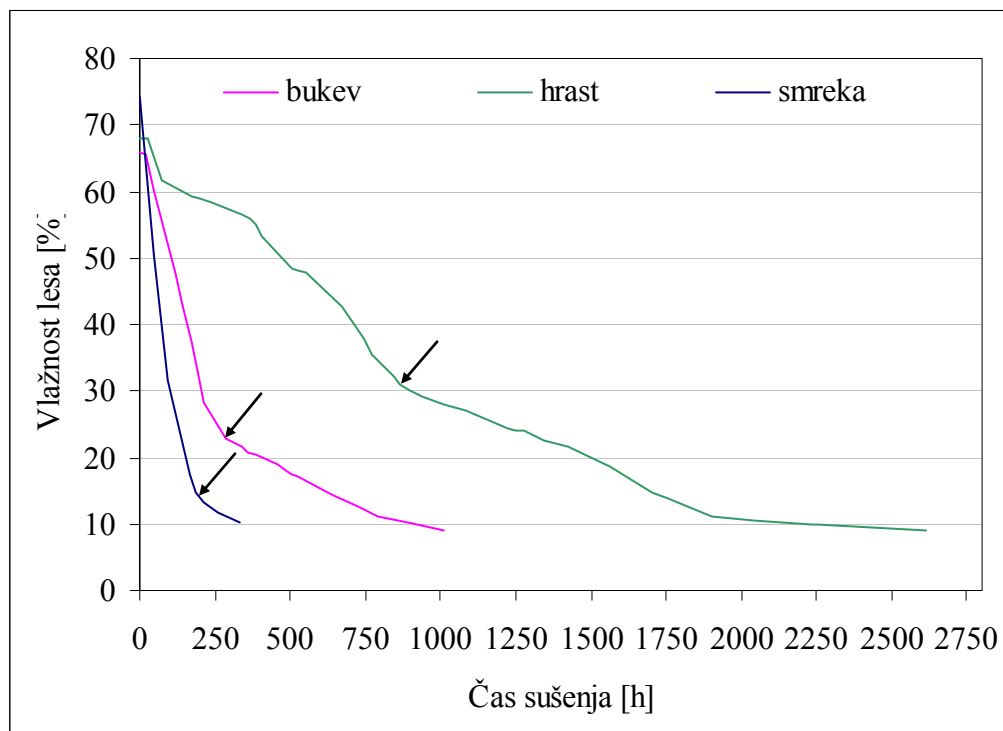
5.1 ČAS SUŠENJA

Kondenzacijski način sušenja, je način, pri katerem porabimo relativno malo energije in sodi med varčnejše sušilne procese, vendar moramo vedeti, da so pri tem načinu nizko temperaturnega sušenja časi sušenja daljši od ostalih načinov sušenja. Pri primerjavi časov med kondenzacijskim in konvencionalnim sušenjem, ti trajajo tudi do 2,5 krat dlje (Tomec, 2010).

Rezultati sušenja smrekovine, bukovine in hrastovine, so potrdili našo domnevo, da potrebujemo največ časa, da les osušimo na želeno vlažnost prav za hrastov les, kar potrjujejo tudi navedbe Goriška (1994), da kondenzacijsko sušenje trdih listavcev pri nizkih vlažnosti ni smotno.

Sušenje smrekovega lesa je trajalo 333 ur, da smo dosegli želeno končno vlažnost in je trajalo najmanj časa. Bukovino smo sušili 1011,5 ur in če primerjamo s konvencionalnim sušenjem bi iz 60 % do 8 % vlažnosti lesa potrebovali 408,7 ur (Tomec, 2010). Čas sušenja bukovine je bil v primerjavi s smrekovino daljši za 67 %. Sušenje hrastovega lesa na želeno končno vlažnost je bil dolgotrajen postopek, saj je trajal kar 2617 ur, to je 109 dni. Če ta čas sušenja primerjamo s smrekovino in bukovino, porabimo za sušenje smrekovine le 13 %, za sušenje bukovine pa 39 % tega časa.

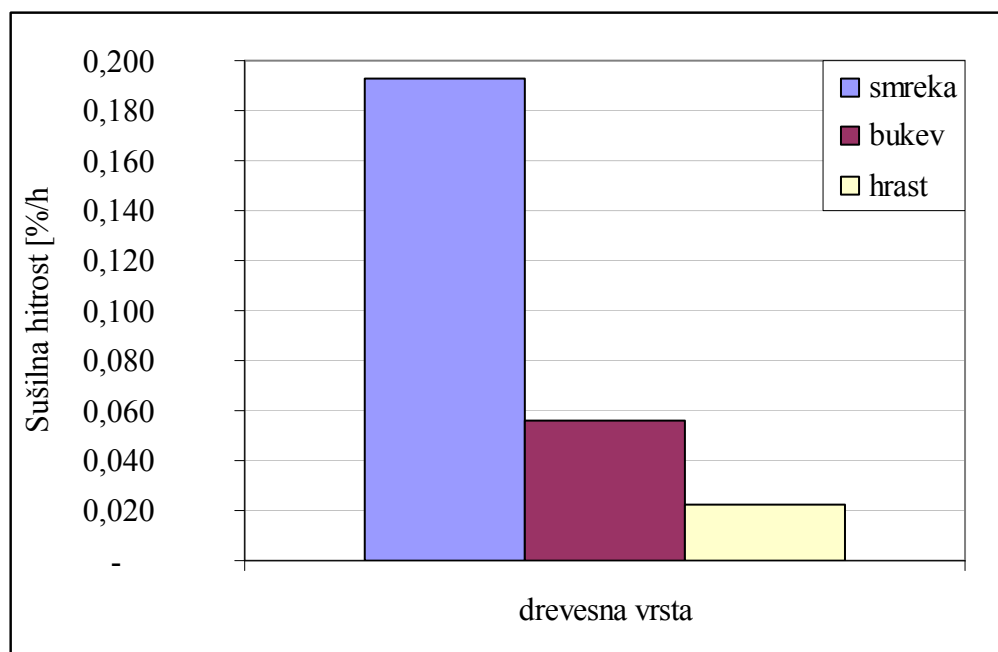
Na spodnjem grafu (Slika 33) zaznamo nekakšen prehod naklona krivulje, ki je označen s puščico, ki ga lahko razumemo kot prehod med izhajanjem proste vode in vezane vode iz lesa pri hrastovini, kar pri bukovini pomeni manj očitni prehod malo pod 30 %. Izhlapevanje proste vode je znatno hitrejše, kot je oddajanje vezane vode, ki je vezana na les z molekularnimi silami. Pri smrekovini ta prehod zaznamo pri precej nižji vlažnosti, opazimo pa še enega manj očitnega pri vlažnosti okrog 30 %, ki lahko pomeni točko prehoda.



Slika 33: Primerjava časa sušenja smrekovine, bukovine ter hrastovine.

Primerjava med časi nam pokaže, da sta smreka in bukev drevesni vrsti, ki se hitro in učinkovito sušita, hrastov les pa se zaradi svojih posebnosti težje suši in je čas sušenja neprimerno daljši od ostalih drevesnih vrst.

Sušilna hitrost je bila na začetku sušenja največja pri smrekovini, manjša pri bukovini in najmanjša pri hrastovini (Slika 34). V nadaljevanju sušenja se je sušilna hitrost pri smreki in hrastu zmanjševala, le pri buki je naraščala do točke nasičenosti celičnih sten, nato pa upadla.



Slika 34: Primerjava sušilne hitrosti med smrekovino, bukovino ter hrastovino.

Do konca sušenja je sušilna hitrost pri vseh treh drevesnih vrstah padala. Povprečna sušilna hitrost pri smrekovini je bila 0,192 %/h, pri bukovini 0,056 %/h in pri hrastovini 0,022 %/h.

5.2 KAKOVOST SUŠENJA

5.2.1 Končna vlažnost

Po končanem sušenju smo končno vlažnost izmerili z uporovnim merilnikom, in z gravimetrično metodo. Vlažnosti, določene z uporovnim merilnikom so bile nekoliko višje kot tiste, ki so bile določene z gravimetrično metodo. Pri smreki in bukvi smo dosegli končno vlažnost pri 8,3 % pri hrastu pa pri 7,8 % (Pregl. 7).

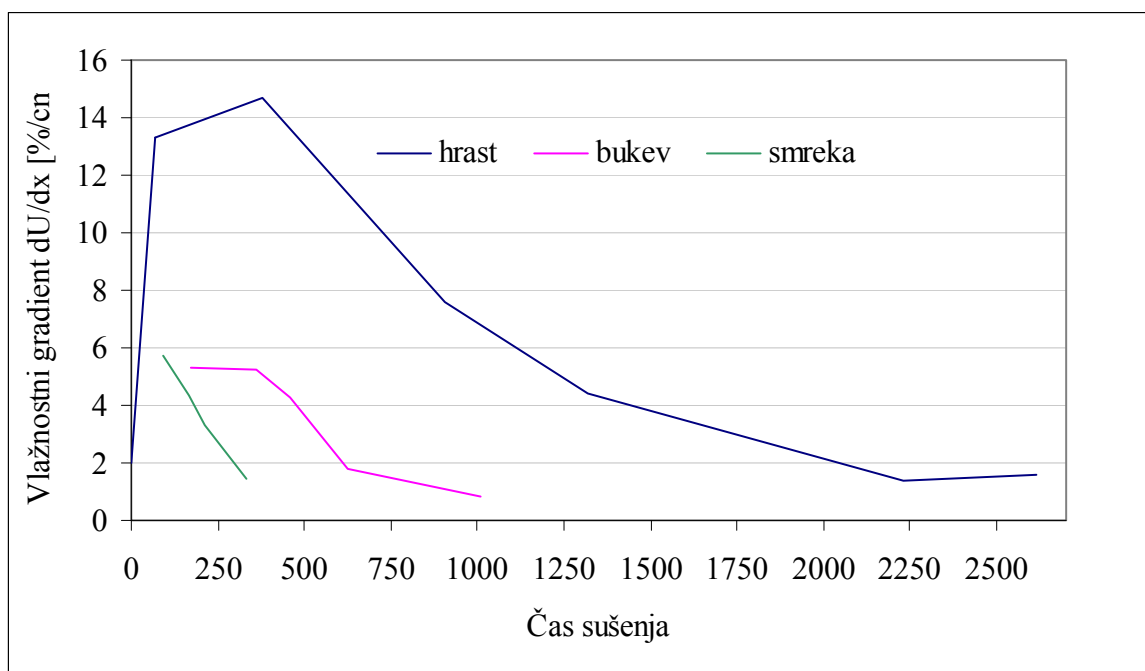
Primerjava vlažnosti med posameznimi sledilnimi in končnimi kontrolnimi žaganicami ne kaže na značilne razlike med vlažnostmi. Statistično značilnih razlik med vlažnostmi nismo zaznali niti po višini in širini komore, kar je znak enakomernosti sušenja celotnega zložaja.

Preglednica 7: Primerjava končnih vlažnosti, izmerjenih z gravimetrično metodo in uporovnimi sondami.

	Gravimetrično [%]	Uporovno [%]
smreka	8,4	10,3
bukev	8,3	9,0
hrast	7,8	9,0

5.2.2 Vlažnostni gradient in profil

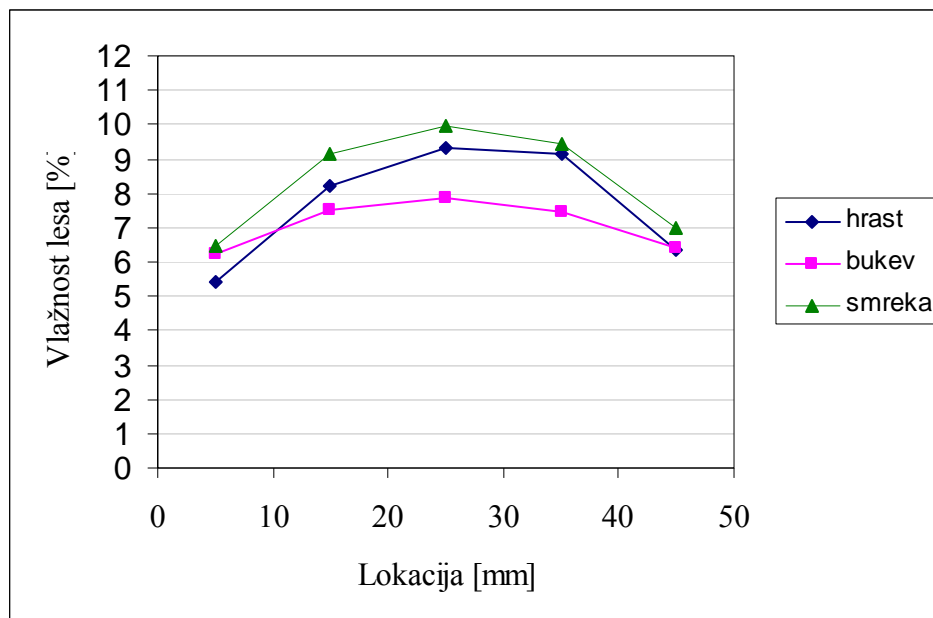
Vlažnostni gradient smo določali v več intervalih sušenja ter na petih slojih po debelini lesa ($\Delta x = 10$ mm) (Slika 35). Največji vlažnostni gradient je imel hrast in je narasel do približno 14 %/cm. Bukev in smreka sta imela zelo podobna vlažnostna gradienta in ta je znašal do 6 %/cm. Na koncu sušenja se je vlažnostni gradient ustalil pri približno 1 %/cm debeline, kar pomeni, da je les enakomerno osušen po celotni debelini žaganice.



Slika 35: Primerjava vlažnostnih gradientov med sušečimi lesnimi vrstami.

Na začetku sušenja se je pojavil vlažnostni profil, značilen za permeabilne in manj permeabilne drevesne vrste. Pri hrastu, ki je težje sušeča se drevesna vrsta, se je pojavil večji padec vlažnosti, kot pri smrekovini in bukovini, kar lahko pripisujemo tudi prehitremu sušenju zunanjih plasti. V nadaljevanju se je porazdelitev vlažnosti po prerezu

izboljševala, vlažnostni profil je postajal bolj paraboličen, razlike v vlažnosti po prerezu pa so se zmanjševale (Slika 36).



Slika 36: Primerjava končnih vlažnostnih profilov med sušečimi lesnimi vrstami.

5.2.3 Sušilne napetosti

Kljub temu, da se kondenzacijski način sušenja smatra kot postopek, pri katerem je nastanek napak manj verjetna, moramo prav tako natančno ves čas spremljati proces sušenja.

Vzporedno z naraščajočim vlažnostnim gradientom so se na začetku sušenja v lesu generirale tudi napetosti, ki smo jih zaznali z viličnim testom in s standardizirano prežagovalno metodo.

Pri smrekovini smo največje sušilne napetosti zabeležili po 200 urah sušenja, katere so se ohranile vse do konca sušenja, oz. so se na koncu sušenja tudi nekoliko znižale. Po končanem sušenju in kontroli nismo zaznali napak, ki bi se pojavile med sušenjem.

Pri bukovini rezultati kažejo, da je bilo napetostno polje po prerezu lesa v celotnem procesu sušenja v dopustnih mejah in ni povzročilo nikakršnih posledic, ki bi lahko nastale zaradi zaskorjenja; tako nismo zasledili niti poklin na samem začetku sušenja, niti notranjih razpok ali celo satavosti na koncu sušenja.

Pri hrastovini so notranje napetosti najbolj naraščale na začetku sušenja, kar je privedlo do napake zaskorjenja. Hkrati je osušena površina predstavljala difuzijsko bariero, kjer so se generirale natezne napetosti, ki so zaradi prekoračitve prečne natezne trdnosti povzročile tudi večje število površinskih razpok in poklin. V delih pod površino je zaradi prehitrega

izhlapevanja proste vode nastal tudi kolaps. Pri končni kontroli smo odkrili še satavost in notranje razpoke vzdolž parenhimskih trakov.

Pri vseh treh saržah ni bilo izvedenega postopka izenačevanja ali kondicioniranja.



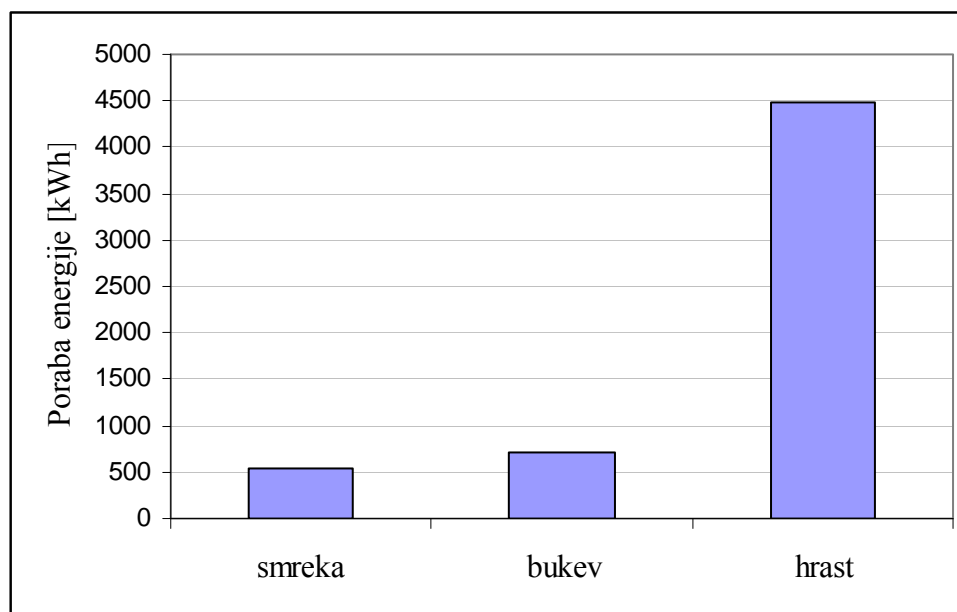
Slika 37: Pojav kolapsa (vzvalovana površina) in notranjih satastih razpok na sledilnih vzorcih po 39 dneh sušenja (Gorišek in sod., 2010).

5.3 PORABA ENERGIJE

Kondenzacijski način sušenja sodi med energijsko varčnejše sušilne procese, vendar se moramo zavedati, da je lahko cena električne energije, ki jo porablamo, lahko tudi do 3 krat višja od cene toplotne energije.

Izračunana poraba električne energije je bila višja od pričakovanj, še posebno pri hrastovini. Povprečna komercialna kondenzacijska sušilnica kot navaja Denig in sod. (2000) porabi med 500 in 750 kWh električne energije za sušenje 1000 bf ($2,36 \text{ m}^3$) lesa, kar drži za sušenje lažje sušečih lesnih vrst. Medtem Teischinger (1981) loči med specifično porabo energije pri iglavcih ($0,56 - 0,69 \text{ kWh/kg}$) in listavcih ($0,86 - 0,89 \text{ kWh/kg}$).

Za sušenje smrekovine smo porabili 2101 kWh električne energije, kar znese 533,25 kWh električne energije za osušitev 1 m^3 svežega lesa do končne vlažnosti pri povprečni specifični porabi $1,93 \text{ kWh/kg}$. Pri sušenju bukovine smo v celotnem procesu zabeležili porabo 4016 kWh električne energije. Za osušitev 1 m^3 smo potrebovali 718 kWh električne energije pri specifični porabi $2,15 \text{ kWh/kg}$. Sušenje hrastovine je bil dolgotrajen in potraten postopek sušenja. Bergman (2008) pri sušenju rdečega hrasta navaja od 4 do 6 kratno večjo vrednost porabe energije v primerjavi z ostalimi lesnimi vrstami. Pri tem procesu smo porabili 14688 kWh električne energije, kar znese 4481 kWh električne energije za osušitev 1 m^3 svežega lesa do končne vlažnosti pri specifični porabi $10,37 \text{ kWh/kg}$. Razliko med dobljenimi rezultati in podatki lahko pripišemo več dejavnikom, kot so velikost sušilnice, režim sušenja, izvedba komore in druge stvari.



Slika 38: Primerjava porabe električne energije med smrekovino, bukovino in hrastovino za osušitev 1m³ lesa.

Ugotovljamo (Slika 38), da za osušitev hrastovine potrebujemo 88 % več energije kakor za osušitev smrekovine, ali da lahko z energijo, ki jo potrebujemo za sušenje 1m³ hrastovine osušimo več kot 8 m³ smrekovine.

6 SKLEPI

Rezultate eksperimentalnega sušenja smrekovine, bukovine in hrastovine, v kondenzacijski sušilnici z nastavljenimi režimi proizvajalca sušilne komore lahko povzamemo v nekaj naslednjih sklepih:

- ◆ Pri vseh treh lesovih, ki smo jih sušili, smo dosegli ciljno končno vlažnost ter ugotovili, da smo pri vseh meritvah z gravimetrično metodo določili nižje vlažnosti, kot smo jih izmerili z uporovnim merjenjem s sondami, ki smo jih imeli skozi celoten proces sušenja zabite v žaganice.
- ◆ Ker je pri kondenzacijskem načinu sušenja v primerjavi z ostalimi načini sušenja blago, smo pri smrekovini in bukovini dosegli dobro kvaliteto osušenega lesa. Pri hrastovini, ki je težje se sušeča lesna vrsta, smo opazili zaskorjenje in še nekaj drugih napak, ki so posledica težav sistema z doseganjem ustreznih vlažnostnih pogojev, oziroma ostrine sušenja.
- ◆ Iz podatkov, ki smo jih pridobili med sušenjem treh lesnih vrst razberemo, da smo pri sušenju smrekovine in bukovine še nekako konkurenčni ostalim načinom sušenja, pri sušenju hrastovine pa smo ugotovili, da je postopek sušenja do nizkih vlažnosti dolgotrajen ter tudi ekonomsko neupravičen.
- ◆ Iz rezultatov, ki smo jih dobili lahko sklepamo, da je kondenzacijski način sušenja prilagodljiv za sušenje različnih vrst lesa, vendar je treba za posamezno drevesno vrsto prilagoditi intenzivnost sušenja.
- ◆ Uvedba kondenzacijskega načina sušenja v manjše lesne obrate je smotrna, če nimamo na voljo stalnega toplotnega vira energije in sušimo različne drevesne vrste.

7 POVZETEK

Les takoj po poseku vsebuje velike količine vode, ki jo moramo nekako spraviti iz njega. Z naravnim sušenjem les izgubi precejšnjo količino vode, vendar je še zmeraj neprimerno osušen za vgradnjo v suhe prostore.

Da lesu zagotovimo primerno vlažnost, uporabljamo tehnično sušenje, s katerim les v kontroliranih pogojih osušimo na želeno vlažnost. Eden od načinov sušenja je tudi kondenzacijsko sušenje s katerim s pomočjo kondenzacijskega agregata odvezemamo vlago iz zraka.

Danes smo priča temu, da velika podjetja zapirajo vrata in vse več je manjših lesnih obratov, ki za kakovostne izdelke potrebuje tudi kakovostno posušen les. Ker pa nekateri majhni obrati nimajo na voljo toplotnega vira energije, se poslužujejo tistih načinov sušenja, za katere imajo v bližini infrastrukturo za delovanje. Manjši obrati se prilagajajo trgu, zato morajo imeti na voljo sušilnico, ki je čim bolj prilagodljiva za sušenje različnih drevesnih vrst.

V tej nalogi smo v kondenzacijski sušilnici sušili les smrekovine, bukovine in hrastovine, ter rezultate primerjali med seboj.

Sušilni postopek smo vrednotili s časi sušenja, kakovostjo posušenega lesa, vlažnostnim gradientom, sušilnimi napetostmi ter še vse skupaj ekonomsko ovrednotili. Najkrajši čas sušenja smo dosegli pri smrekovini, ki je lažje sušeča lesna vrsta, najdlje pa smo sušili hrastovino, ki je težko sušeča lesna vrsta. Pri vseh lesnih vrstah smo dosegli končno vlažnost, ki smo jo določili z gravimetrično metodo in s uporovnimi sondami, po celotnem zložaju pa nismo zaznali značilnih razlik. Na začetku sušenja so se v lesu pojavile tudi napetosti, ki smo jih ovrednotili z viličnim testom in s prežagovalno metodo. Kondenzacijski način sušenja sodi med energijsko varčnejše sušilne procese, za obratovanje pa se uporablja le električna energija. Za 1m³ sušenja smrekovine smo potrošili 533 kWh energije, za isto količino hrastovine pa kar 4481 kWh električne energije. Na koncu lahko iz podatkov, ki smo jih pridobili sklepamo, da je ta način sušenja prilagodljiv za različne drevesne vrste. Pri času sušenja smo ostalim načinom sušenja konkurenčni le pri smrekovini, s kakovostjo pa pri vseh drevesnih vrstah.

8 VIRI

- Bergman R. D. 2008 Operation and Cost of a Small Dehumidification Dry Kiln. Research Note FPL-RN-0310. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 20 str.
- Denig J., Wengert E.M., Simpson W.T. 2000. Drying hardwood lumber. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-118. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 138 str.
- Geršak M., Čop T., Gorišek Ž., Mrak C., Velušček V. 1986. Sušenje lesa. Ljubljana, Zveza društev inženirjev in tehnikov gozdarstva in lesarstva Slovenije, Lesarska založba: 253 str.
- Geršak M., Velušček V. 2003. Sušenje lesa. Ljubljana, Zveza lesarjev Slovenije, Lesarska založba: 194 str.
- Gorišek Ž., Straže A., Krže L., Firšt U. 2010. Vrednotenje sušilnega postopka v kondenzacijski sušilni komori – poročilo o sušenju hrastovine. (neobjavljeno)
- Gorišek Ž., Straže A., Krže L., Firšt U. 2009. Vrednotenje sušilnega postopka v kondenzacijski sušilni komori – poročilo o sušenju bukovine. (neobjavljeno)
- Gorišek Ž. 2009. Zapiski predavanj pri predmetu sušenje lesa.
- Gorišek Ž., Geršak M., Velušček V., Čop T., Mrak C. 1994. Sušenje lesa. Ljubljana, Zveza društev inženirjev in tehnikov lesarstva Slovenije, Lesarska založba: 235 str.
- Gorišek Ž. 2005. Posebni postopki tehničnega sušenja 1.del. Korak, 6, 1: 16-17
- Killmann W., Fink D. 1996. Coconut Palm Stem Processing. Technical Handbook. Eschborn, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit: 203 str.
- Krajnc N. 2009. Lesna goriva. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije, Založba Silva Slovenica: 81 str.
- Simpson W.T. 1991. Dry Kiln. Operator's Manual. Madison, Wisconsin, United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 274 str.
- SIST EN 13183-1. Delež vlage v žaganem lesu – 1. del: Določevanje s sušenjem v pečici. Moisture content of a piece of sawn timber – 1. part: Determination by oven dry method. 2003

SIST EN 13183-2. Delež vlage v žaganem lesu – 2. del: Ocena z metodo električne upornosti. Moisture content of a piece of sawn timber – 2. part: Estimation by electrical resistance method. 2003

SIST EN 14464. Žagani les – Metoda za ocenjevanje zaskorjenosti. Sawn timber – Method for assessment of case – hardening. 2003

Teischinger A. 1981. Die technische Holzrocknung heute. Internationaler Holzmarkt, 72, 3: 5-6

Tomec P. 2010. Optimalno kombiniranje kondenzacijskega in konvekcijskega sušilnega postopka. Diplomski projekt. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 48 str.

ZAHVALA

Za pomoč pri izvajanju, oblikovanju in urejanju diplomske naloge se zahvaljujem vsem, ki ste mi na kakršenkoli način pomagali.

Zahvalil bi se rad svojemu mentorju prof. dr. Željku Gorišku ter recenzentu doc. dr. Alešu Stražetu, za strokovno svetovanje, potrpežljivost in pomoč pri nastajanju diplomske naloge.

Zahvaljujem se podjetju ELVIPO d.o.o. za pripravo lesa, ter Bojanu Skvarča za prevoz.

Iskrena hvala tudi staršem in ostali družini za vso podporo in finančno pomoč pri študiju, ter Barbari za spodbudo.

Hvala vsem.

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Simon TOMAZIN

**USTREZNOST KONDENZACIJSKEGA SUŠENJA
LESA V MANJŠIH LESNIH OBRATIH**

Diplomsko delo
Univerzitetni študij

Ljubljana, 2012