

UNIVERZA V LJUBLJAN
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Rok ZIDAR

**KAKOVOST IN KINETIKA SUŠENJA BUKOVINE IN
HRASTOVINE V KONDENZACIJSKIH SUŠILNIH KOMORAH**

DIPLOMSKI PROJEKT
Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja

**QUALTY AND KINETICS OF BEECH AND OAK WOOD DRYING
IN DEHUMIDIFIER DRYING CHAMBERS**

B. SC. THESIS
Professional Study Programmes

Ljubljana, 2012

Diplomski projekt je zaključek Visokošolskega strokovnega študija Tehnologije lesa in vlaknatih kompozitov – 1. stopnje. Opravljen je bil na Katedri za tehnologijo lesa, Oddelka za lesarstvo, Biotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani, kjer so bile opravljene laboratorijske analize.

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

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svojega diplomskega projekta na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je projekt, ki sem ga oddal v elektronski obliki identičen tiskani verziji.

Rok Zidar

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Dv1
DK UDK 630*847
KG sušenje lesa/kondenzacijsko sušenje/ kakovost sušenja /bukovina/hrastovina/
AV ZIDAR, Rok
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 KAKOVOST IN KINETIKA SUŠENJA BUKOVINE IN HRASTOVINE
V KONDENZACIJSKIH SUŠILNIH KOMORAH
TD Diplomski projekt (visokošolski strokovni študij – 1. stopnja)
OP VIII, 53 str., 8 pregl., 41 sl., 12 vir.
IJ sl
JI sl/en
AI Primerjali smo učinkovitost kondenzacijskega sušenja bukovine in hrastovine, debeline 50 mm. Vrednotili smo čas, hitrost postopka, kakovost osušenega lesa in porabo energije. Sušenje je bilo izvedeno v industrijski kondenzacijski sušilni komori kapacitete 6 m³ s sušilnimi programi proizvajalca. Doseganje načrtovanih klimatskih pogojev smo preverjali z vzporednim sistemom zajemanja temperature, relativne zračne vlažnosti in lesne vlažnosti. Kontrolo kakovosti smo ocenjevali vizualno, s kontinuiranim spremljanjem vlažnostnega gradienta in z merjenjem notranjih napetosti, za kar smo uporabili prežagovalno metodo. Sušenje bukovine in hrastovine je bilo v kondenzacijskih komorah časovno sprejemljivo do svežega stanja do vlažnosti 20 %, potem pa se je močno upočasnilo. Kakovost sušenja bukovine je bila zadovoljiva z izjemo notranjega obarvanja, medtem, ko se je pri hrastovini pojavil tudi večji vlažnostni gradient in potreba po dodatni fazi kondencioniranja. Energijsko je postopek sprejemljiv le pri sušenju svežega lesa, za dosuševanje do nižjih končnih vlažnosti pa priporočamo uporabo alternativnih postopkov.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dv1
DC UDC 630*847
CX wood drying/drying quality/dehumidifier drying/beechn/oak/
AU ZIDAR, Rok
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 2011
TI QUALITY AND KINETICS OF BEECH AND OAK WOOD DRYING
IN DEHUMIDIFIER DRYING CHAMBERS

DT B. Sc. Thesis (Professional Study Programmes)

NO VIII, 53 p., 8 tab., 41 fig. 12 ref.

LA sl

AL sl/en

AB We compared the efficiency of condensational drying of beech and oak wood, with thicknesses of 50 mm. We recorded the time, the speed of process, the quality of dried wood and energy requirement. The drying was performed in an industrial condensational drying chamber with a 6 m³ capacity, using the manufacturer's drying programs. The specified climate conditions were verified using a parallel system of temperature measurements, relative air moisture and wood moisture. Quality control was done visually, with continuous recording of moisture gradient and with measurements of inner tension, using the sawing method. The drying of beech and oak wood was time efficient until the fresh moisture state of 20%, after which it slowed significantly. The quality of beech wood was satisfying, with the exception of inner collaring, meanwhile, the oak wood showed a higher moisture gradient and the need for additional condensational phase. From the energy perspective, the process is acceptable only for drying fresh wood, for additional drying up to lower final moisture content we recommend using alternative methods.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE.....	V
KAZALO PREGLEDNIC	VI
KAZALO SLIK	VII
1 UVOD.....	1
1.1 HIPOTEZE	1
1.2 CILJI NALOGE.....	1
2. PREGLED LITERATURE	2
2.1. KONDENZACIJSKA SUŠILNA KOMORA.....	2
2.2. IZVEDBE KONDENZACIJSKEGA AGREGATA	3
2.3. DELOVANJE KONDENZACIJSKEGA AGREGARA.....	5
2.4. PREDNOSTI IN SLABOSTI KONDENZACIJSKEGA NAČINA SUŠENJA	6
2.5. VISOKOTENPERATURNO KONEZACIJSKO SUŠENJE.....	6
2.6. UPORABNOST.....	7
3. MATERIALI IN METODE	8
3.1. MATERIAL.....	8
3.1.1 Bukev.....	8
3.1.2 Hrast	8
3.2. METODE.....	8
3.2.1. Spremljanje vlažnosti in določanje kinetike sušenja	9
3.2.2. Spremljanje kakovosti	9
3.2.3. Poraba energije	10
4. REZULTATI IN RAZPRAVA.....	11
4.1. BUKEV	11
4.1.1. Vpliv zlaganja na učinkovitost in enakomernost sušenja	11
4.1.2. Primerjava sušilnih programov in ocena poteka procesnih parametrov.....	11
4.1.3. Analiza kinetike sušenja.....	18
4.1.4. Kakovost sušenja.....	20
4.1.5. Poraba energije	26
4.2. HRAST	27
4.2.1. Vpliv načina zlaganja na učinkovitost in enakomernost sušenja	27
4.2.2. Temperatura.....	28
4.2.3. Relativna zračna vlažnost	30
4.2.4. Analiza kinetike sušenja.....	31
4.2.5. Kakovost sušenja.....	36
5. SKLEPI.....	41
6. VIRI.....	43

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Primerjava programov sušenja za bukovino debeline 50 mm med standardnim režimom, režimom za preprečevanje obarvanja v konvencionalnih komorah in dejanskim režimom kondenzacijskega sušenja.	12
Preglednica 2: Sprememba vlažnosti med postopkom sušenja določena z merilnimi sondami in primerjalno z gravimetrično meritvijo ter izračunane hitrosti sušenja.	13
Preglednica 3: Povprečne začetne in končne vlažnosti bukovine določene gravimetrično in z uporovno metodo ter osnovna statistika.	18
Preglednica 4: Porazdelitev hitrosti zraka po višini sušilne komore na vstopu in na izstopu zraka iz zložaja.	20
Preglednica 5: Povprečne vlažnosti določene z gravimetrično metodo in merjenje s sondami ter vlažnostni gradient z odstopanji pri sušenju bukovine debeline 50 mm.	21
Preglednica 6: Razlika svetlosti in celotna barvna razlika med površino in sredico deske pri sušenju bukovine debeline 50 mm v odvisnosti od časa sušenja in povprečne vlažnosti lesa.	26
Preglednica 7: Povprečna začetna in končna vlažnost hrastovine, določena gravimetrično in z merilnimi sondami ter osnovna statistika.	32
Preglednica 8: Porazdelitev hitrosti zraka po višini sušilne komore in na izstopu zraka iz zložaja.	35

KAZALO SLIK

Slika 1: Kondenzacijska sušilnica z agregatom v komori. (Geršak in Velušček, 2003).	2
Slika 2: Kondenzacijska sušilnica z agregatom izven komore in dodatnim ventilatorjem. (Geršak in Velušček, 2003).	2
Slika 3: Shema delovanja kondenzacijskega agregata (Tomec, 2010, povzeto po Simpson, 1991)	3
Slika 4: Možne izvedbe toplotnih črpalk (Mednarodni dnevnik hlajenja, 2010)	5
Slika 5: Natančna priprava in pravilno polnjenje komore je omogočilo optimalno izkoriščanje zračnega toka za sušenje. Žaganice z obarvanimi čeli smo uporabili za sukcesivno spremljanje sušilnega procesa.11	
Slika 6: Primerjava odvisnosti hitrosti sušenja od lesne vlažnosti med kondenzacijskim (♦) in konvencionalnim (□) sušenjem	13
Slika 7: Primerjava poteka dejanske temperature z načrtovano oziroma nastavljen po sušilnem programu.	14
Slika 8: Odstopanja dejanske temperature in psihrometske razlike od načrtovanih oziroma nastavljenih na sušilnem programu. Večje prekoračitve nastavljenih temperatur so bile izmerjene 7., 8. in 9. dan sušenja.	14
Slika 9: Potek dejanskih in nastavljenih temperatur sušenja ter nihanje temperature v okolici (obkrožene so prekoračitve nastavljenih temperatur v komori 7. 8. in 9).	15
Slika 10: Odstopanja dejanske temperature od izmerjene.	15
Slika 11: Primerjava poteka dejanske relativne zračne vlažnosti z načrtovano oziroma nastavljen po sušilnem programu.	16
Slika 12: Odstopanja dejanske relativne zračne vlažnosti od izmerjene.	16
Slika 13: Primerjava sušilnih krivulj sušenja bukovine debeline 50 mm z vsemi štirimi sondami (levo) in z gravimetričnimi sledilnimi vzorci (desno)	17
Slika 14: Primerjava natančnosti merjenja vlažnosti na štirih merilnih metih (♦) z vzporedno gravimetrično metodo (□).	17
Slika 15: Primerjava sušilnih krivulj določenih z gravimetričnimi meritvami lesne vlažnosti z meritvami vlažnosti t uporovnimi merilnimi sondami.	19
Slika 16: Porazdelitev hitrosti zraka po višini sušilne komore na vstopu in na izstopu zraka iz zložaja. . 20	
Slika 17: Razporeditev vlažnosti po debelini žaganic v štirih intervalih sušenja (levo zgoraj – po 7 dneh sušenja; desno zgoraj po 11 dneh sušenja; levo spodaj po 15 dneh sušenja in desno spodaj na koncu sušenja).	22
Slika 18: Razvoj vlažnostnega gradienta v odvisnosti od časa sušenja.	22
Slika 19: Razporeditev vlažnosti po debelini žaganic na koncu sušenja.	23
Slika 20: Izmerjene velikosti reže po prežagovalni metodi na sledilnih vzorcih takoj po razžagovanju (levo) in po 48 urnem kondicioniranju (desno).	24
Slika 21: Deformacije vilic na sledilnih vzorcih takoj po razžagovanju (levo) in po 48 urnem kondicioniranju (desno).	24
Slika 22: Povprečne deformacije vilic in velikosti rež na sledilnih vzorcih takoj po razžagovanju in po 48 urnem kondicioniranju.	25
Slika 23: Sprememba svetlosti (ΔL) in celotna barvna razlika (ΔE) v odvisnosti od lesne vlažnosti (levo) in v odvisnosti od časa sušenja (desno) med sušenjem bukovine debeline 50 mm.	26
Slika 24: Specifična poraba energije v odvisnosti od časa za sušenje bukovine debeline 50 mm.	27

Slika 25: Specifična poraba energije v odvisnosti od lesne vlažnosti lesa za sušenje bukovine debelin 50 mm.	27
Slika 26: Primerjava poteka dejanske temperature z nsčrtovano oziroma nastavljeno po sušilnem programu.	28
Slika 27: Potek dejanskih in nastavljenih temperatur sušenja ter nihanje temperature v okolici (obkroženo je nedoseganje nastavljene temperature v komori med 61. in 69. dnevom sušenja).	28
Slika 28: Odstopanja dejanske temperature od izmerjene.	29
Slika 29: Odstopanje dejanske temperature in psihrometske razlike, izmerjene s psihrometrom v komori, od načrtovane oziroma nastavljene na sušilnem programu.	29
Slika 30: Primerjava poteka dejanske relativne zračne vlažnosti (— izmerjena s psihrometrom) z načrtovano oziroma nastavljeno po sušilnem programu (—).	30
Slika 31: Odstopanja dejanske relativne zračne vlažnosti od izmerjene s psihrometrom.	31
Slika 32: Porazdelitev začetne lesne vlažnosti po prerezu žaganic.	32
Slika 33: Primerjava sušilnih krivulj določenih z gravimetričnimi meritvami lesne vlažnosti in z meritvami vlažnosti z uporovnimi merilnimi sondami.	33
Slika 34: Primerjava natančnosti merjenja vlažnosti s posameznimi sondami (♦) in s sporedno gravimetrično metodo (□).	34
Slika 35: Porazdelitev hitrosti zraka po višini sušilne komore na vstopu in na izstopu zraka iz zložaja. .	35
Slika 36: Porazdelitev vlažnosti po prerezu žaganic in odvisnost od časa sušenja: t = 4 dni (levo zgoraj), t = 17 dni (desno zgoraj), t = 29 (sredina levo), t = 56 dni (sredina desno), t = 94 (spodaj levo), t = 109 dni (spodaj desno).	36
Slika 37: Razvoj vlažnotnega gradienta v odvisnosti od časa sušenja.	37
Slika 38: Povprečna deformacija vilic ($\pm 95\%$ int. zaupanja) na sledilnih vzorcih takoj po razžagovanju (t = 0 h) in po 48 urnem kondicioniranju.	38
Slika 39: Povprečna velikost reže ($\pm 95\%$ int. zaupanja) na sledilnih vzorcih takoj po razžagovanju (t = 0 h) in po 48 urnem kondicioniranju.	38
Slika 40: Izguba mase zložaja lesa, izločanje vode iz lesa ter poraba električne energije v odvisnosti od časa sušenja hrastovine, debeline 50 mm.	39
Slika 41: Odvisnost specifične porabe energije od vlažnosti lesa pri sušenju hrastovine 50 mm.	40

1. UVOD

Sušenje lesa spada med časovno dolgotrajne postopke z veliko porabo energije. Zaradi nizke porabe energije se v praksi vse bolj uporablja kondenzacijski način sušenja. Kondenzacijsko sušenje se je uveljavilo za sušenje svežega lesa, za doseganje nizkih končnih vlažnosti pa so časi v praksi predolgi. Pri debelejših sortimentih in gostejših lesnih vrstah je težko doseči vlažnosti pod 20 %. Pri sušenju lesa na končno vlažnost pod 15 % se sušenje zelo upočasni, temu je vzrok nizka temperatura, stroški sušenja pa zelo narastejo. Kondenzacijsko sušenje je primerno za sušenje trdega in debelejšega lesa, ki ima visoko začetno vlažnost, ki se suši počasi in kjer ne smemo dvigovati temperature. Sušenje iglavcev in mehkih listavcev, ki se pri višjih temperaturah hitro in kakovostno posušijo, v kondenzacijskih sušilnicah ni smiselno, ker je čas sušenja v tem primeru daljši, stroški sušenja pa večji. Zaradi počasnega sušenja pri nizkih temperaturah se lahko pojavijo, ob nezadostnem kroženju zraka, bakterijske in glivične okužbe. Pomanjkljivosti nizkotemperaturnega kondenzacijskega agregata odpravljajo visokotemperaturni agregati. Pri teh agregatih sušimo s temperaturo do 70 °C.

1.1 HIPOTEZE

Predpostavljamo, da nizke temperature kondenzacijskega sušenja ne bodo bistveno podaljšale postopka sušenja svežega lesa bukovine in hrastovine v začetni vazi, ko hitrost sušenja določata psihrometrski razlika in hitrost gibanja zraka. Trajanje naj bi bilo primerljivo z ostalimi tehnikami in hitrejše od sušenja na prostem. Pri sušenju pod točko nasičenja celičnih sten pričakujemo upočasnitev procesa hkrati pa bo težje doseči tudi nizke končne vlažnosti. Dolgo trajanje postopka pripisujemo nizkim temperaturam, ki ne pospešujejo dovolj transporta vezane vode. Zaradi relativno dolgega postopa pričakujemo manj tipičnih sušilnih napak (razpok in veženj) in višjo kakovost osušenega lesa.

1.2 CILJI NALOGE

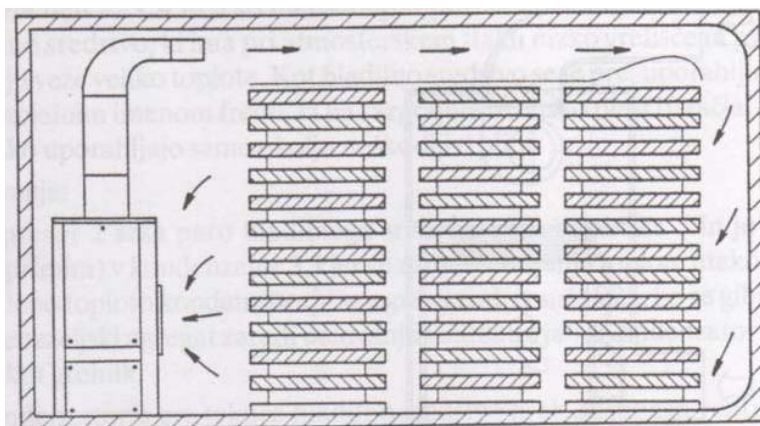
Na konkretnem primeru industrijskega sušenja bukovine in hrastovine v kondenzacijskih komorah bomo ovrednotili sušenje z naslednjih vidikov:

- Hitrost sušenja v posameznih fazah procesa, ter skupni čas sušenja;
- Kakovost sušenja med postopkom (vizualno, z merjenjem vlažnostnega gradienta in zaskorjenja);
- Dosežene končne kakovosti osušene hrastovine in bukovine;
- Specifične porabe energije.

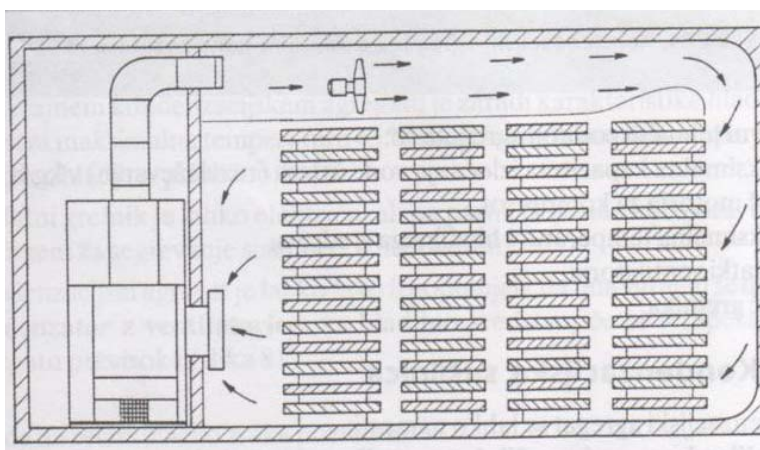
2. PREGLED LITERATURE

2.1. KONDENZACIJSKA SUŠILNA KOMORA

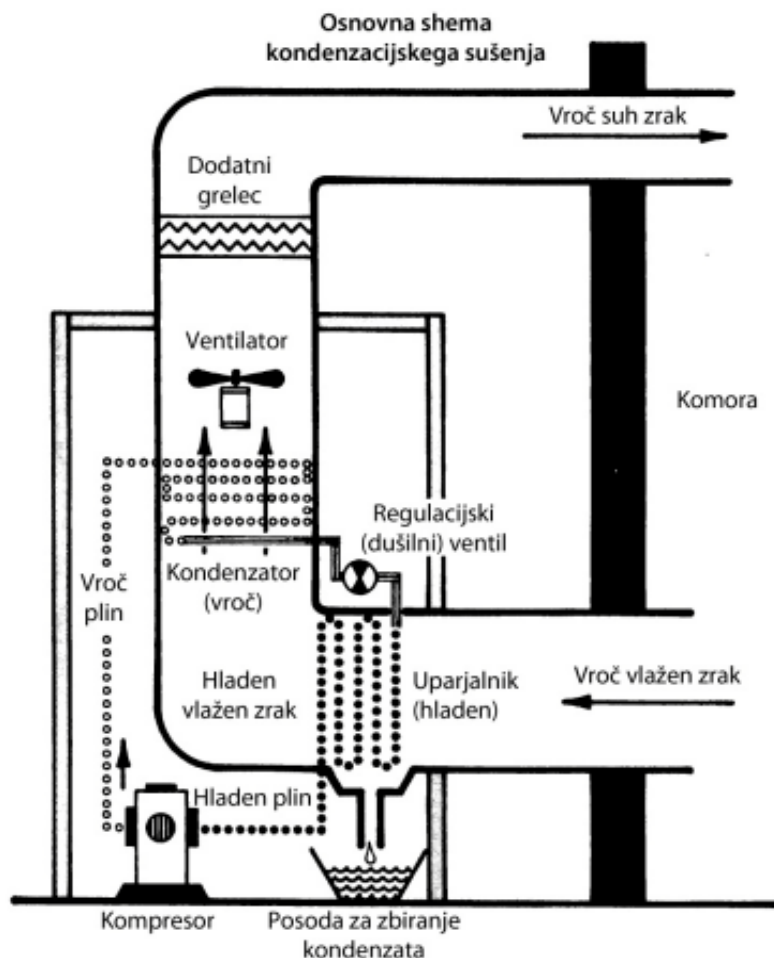
Sušenje v kondenzacijskih sušilnih komorah poteka po principu toplotne črpalke. Osnovna naprava kondenzacijskih sušilnih komor je kondenzacijski agregat, ki pa je lahko v sušilni komori (slika 1) ali izven sušilne komore (slika 2). (M – R d.o.o., 2011, Geršak in Velušček, 2003) Zrak iz sušilne komore, vstopa v kondenzacijski agregat, kjer se ohladi pod temperaturo nasičenja. Del vode s tem kondenzira in odteče, razvlažen zrak se na kondenzatorju ponovno segreje in vstopa v sušilno komoro. Kondenzacijska sušilna komora se od konvencionalne razlikuje zelo malo. Razlika je v kondenzacijskem agregatu, ki omogoča razvlaževanje že uporabljenega zraka. (slika3).



Slika 1: Kondenzacijska sušilnica z agregatom v komori. (Geršak in Velušček, 2003).



Slika 2: Kondenzacijska sušilnica z agregatom izven komore in dodatnim ventilatorjem. (Geršak in Velušček, 2003).



Slika 3: Shema delovanja kondenzacijskega agregata (Tomec, 2010, povzeto po Simpson, 1991)

2.2. IZVEDBE KONDENZACIJSKEGA AGREGATA

Pri sušenju lesa uporabljamo kondenzacijski agregat, ki deluje po principu toplotne črpalke. Naloga agregata je razvlaževanje uporabljenega zraka, ki prihaja iz sušilne komore in segrevanje zraka, ki se vrača v sušilno komoro. Toplotna črpalka je naprava za gretje in hlajenje. Toplotna črpalka deluje tako, da odvzema toploto iz okolice (voda, zrak, zemlja) in z dodatno električno energijo segreva vodo ali zrak na kondenzatorju. Za delovanje potrebuje 20 – 30 % električne energije, 80 – 70 % pa pridobi iz okolice (TERMO – TEHNIKA d.o.o.). Sestavljena je iz kompresorja, kondenzatorja in uparjalnika (slika 3), ki so medsebojno povezani. V toplotni črpalki kroži hladilno sredstvo, od katerega je tudi odvisna kapaciteta toplotne črpalke. Hladilna sredstva imajo nizko vrelišče in pri izparevanju veže veliko toplote. Najprej so se za hladilno sredstvo uporabljali freoni (CFC), zaradi škodljivega vpliva na ozonsko plast ozračja pa se zamenjujejo z nadomestnimi plini (Geršak in Velušček, 2003). Uporabnost freonov je bila večinoma omejena na temperaturo 45 °C. Danes se za nizkotemperaturno kondenzacijsko sušenje uporabljajo plini, ki so manj škodljivi (ogljikov dioksid in amonijak). Med novejša hladilna sredstva spadata propan in butan, ki ju lahko

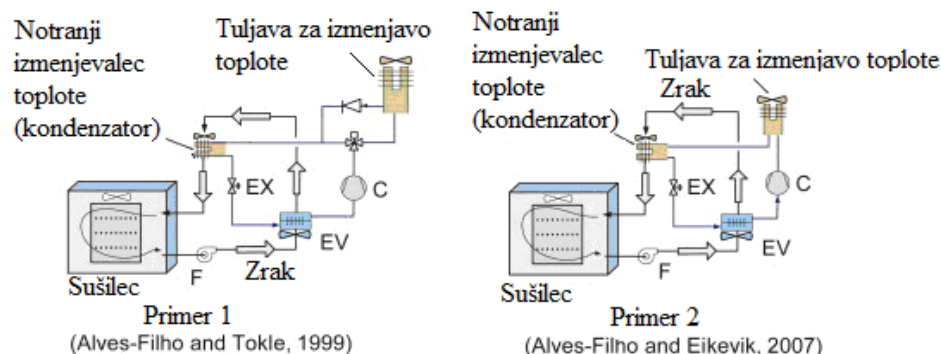
uporabljamo pri temperaturah do 60°C (Tomec, 2010). Hladilno sredstvo mora izpolnjevati določene zahteve: nevnetljivost, netoksičnost in nekorozivnost, ekološka sprejemljivost, termična in kemična stabilnost, velika specifična in izparilna toplota.

Večina strokovnjakov se strinja, da tehnologija toplotne črpalke omogoča boljše kontrolo temperature in relativne vlažnosti v postopku sušenja, le malo pa jih pojasni, kako so dosegli kontrolo temperature in relativne vlažnosti, da bi dosegli sorazmerno visoko učinkovitost razvlaževanja, o kateri so poročali (Minea, 2008).

Veliko izvedb uporablja vzporedne kondenzatorje (Alves-Filho in Tokle, 1999), (slika 4, primer 1) ali zunanje kondenzatorje (Alves-Filho in Eikevik, 2007), (slika 4, primer 2) za izmenjavo zunanje toplote. Najbolj značilna pomanjkljivost teh izvedb so vodi preko uparjalnika in kondenzatorja toplotne črpalke. V obeh primerih lahko vidimo, da je tok zraka skozi izparilnik in kondenzator v istem razmerju, kar lahko pripelje do več težav. Na primer, če je dovod toplote ali temperatura zraka na vstopu v uparjalnik toplotne črpalke prenizka ali, če je porazdelitev zraka skozi zunanji kondenzator slaba, se lahko enota ustavi zaradi nizkega podtlaka. V primeru, ko je hitrost zraka skozi kondenzator prenizka, se lahko enota ustavi zaradi visokega podtlaka. Tudi če je temperatura zraka na vstopu v kondenzator previsoka, kot takrat, ko se vklopi dodatni parni ali električni grelec, se lahko kompresor ustavi zaradi visokega mejnega tlaka.

Primer 1: izmenjevalnik toplote z zunanjim konenzatorjem;

Primer 2: izmenjevalnik toplote;



F – Vntilator

EX – Espanzijski ventil

EV – Uparjalnik

CD – Kondenzator

C – Kompresor

Q – Toplota

E - Energija

Slika 4: Možne izvedbe toplotnih črpalk (Mednarodni dnevnik hlajenja, 2010)

2.3. DELOVANJE KONDENZACIJSKEGA AGREGATA

Kondenzacijsko sušenje poteka v zaprtem krogu, brez izmenjave zraka z zunanjim. Na uparjalniku hladilno sredstvo izpareva, za to pa uporablja toploto vlažnega zraka iz sušilnice. Pri tem se zrak iz sušilnice ohladi pod temperaturo rosišča, iz njega pa se izloči voda kot kondenzat, ki odteče iz kondenzacijskega agregata v zato namenjeno posodo. Naloga uparjalnika je, da vroč vlažen zrak iz sušilne komore ohladi (hladilnik) pod temperaturo rosišča, da se iz njega izloči odvečna voda. Kompresor stiska paro hladilnega sredstva, le – ta pa skozi šobe ekspandira v kondenzatorju. Zaradi znižanja tlaka se ohladi in utekočini. Kondenzator ima v tem primeru vlogo grelnika. Z oddano toploto segreva zrak iz uparjalnika, ki se giblje preko kondenzatorja nazaj v sušilno komoro (slika 3). (Geršak in Velušček, 2003).

V nizkotemperaturnem kondenzacijskem agregatu je zaradi značilnosti hladilnega sredstva najvišja temperatura 45 °C, na uparjalniku pa se zrak ohladi do približno 10°C. Kot dodatni grelnik lahko uporabljamo parni grelnik, če je para na voljo ali tudi električnega, s katerim dodatno segrevamo sušilno komoro (Geršak in Velušček, 2003).

Kondenzacijski agregat je lahko opremljen še z dodatnim ventilatorjem za hladilno sredstvo, če je temperatura agregata previsoka (Geršak in Velušček, 2003).

Kondenzacijski agregat vključimo, ko je temperatura v sušilnici nad 15 °C, pri nižjih temperaturah obstaja nevarnost zaledenitve uparjalnika. Na lamelah cevi se nabere led, ki oteži ali ustavi kroženje zraka. Da do tega ne bi prišlo so sušilnice opremljene z dodatnimi grelci, s katerimi lahko sušilnico ogrejemo. Gretje je prav tako potrebno tudi v prvi fazi sušenja, ker je relativna vlažnost zraka višja, temperature pa nizke. Toplotna črpalka deluje samo kratek čas, ker se zrak hitro razvlaži, to pa pomeni tudi kratek čas segrevanja, kar je problem predvsem pozimi (Geršak in Velušček, 2003).

Hitrost zraka v sušilni komori mora biti vsaj 0,5 m/s, pri manjših hitrostih se pojavijo bakterijske in glivične okužbe. Da do okužb ne pride, v sušilnih komorah namestimo še dodatne ventilatorje, ki poskrbijo za primerno hitrost zraka. V primeru vlaženja zraka pa se lahko namestijo vlažilniki zraka, kot so tudi v konvencionalnih sušilnih komorah (Geršak in Velušček, 2003).

Režime sušenja posreduje proizvajalec, ker je potrebno upoštevati tehnične zmožnosti agregata. Vgrajene so avtomatske naprave za regulacijo klime, vključitev agregata povzroči sušenje in segrevanje zraka, izključitev pa navlaževanje in ohlajanje zraka (Geršak in Velušček, 2003).

2.4.PREDNOSTI IN SLABOSTI KONDENZACIJSKEGA NAČINA SUŠENJA

Prednosti:

- Pri visoki začetni vlažnosti je sušenje počasnejše, kar zmanjšuje možnost nastanka napak;
- Za delovanje sušilne komore lahko uporabimo električni tok, če ni na voljo vroče vode ali pare, kar je prednost pri sušilnicah manjše kapacitete;
- Energija se v kondenzacijskem agregatu zelo dobro izkorišča;
- Nimamo toplotnih izgub zaradi izmenjave zraka;

Slabosti:

- Obratovalni stroški večjih sušilnih komor so višji, če segrevamo z električno energijo;
- Sušenje na nižje končne vlažnosti zelo upočasni postopek sušenja stroški se pa povečajo;
- Zaradi počasnega sušenja pri nižjih temperaturah je povečana možnost bakterioloških okužb;
- Iglavcev in mehkih listavcev ni gospodarno sušiti, ker se dovolj kakovostno posušijo pri višjih temperaturah.

2.5.VISOKOTEMPERATURNO KONDENZACIJSKO SUŠENJE

Pomanjkljivost zgoraj opisanega kondenzacijskega agregata je nizka delovna temperatura. Pomanjkljivost odpravljajo visokotemperaturni kondenzacijski agregati. Pri teh kondenzacijskih agregatih sušimo s temperaturo do 70 °C. Sistem deluje na način,

da lahko razvlaženemu zraku primešamo še zunanji zrak. Postopek imenujemo tudi integrirana tehnologija (IT sušenje), ker zrak posušimo s kondenzacijo in izmenjavo. Zgradba in delovanje te toplotne črpalke je podobna nizkotemperaturni, razlika je samo v tem, da ima visokotemperaturna črpalka notranji in zunanji uparjalnik. Z zunanjim uparjalnikom izkoristimo toploto okoljskega zraka in imamo zato boljši izkoristek. Temperatura zunanjega zraka mora biti vsaj 10 °C, če želimo, da zunanji uparjalnik deluje.

S takim sistemom sušenja lahko les posušimo tudi do 8 % vlažnosti. Vendar je kljub dobremu izkoristku energije, električna energija precej dražja od pridobljene iz lastnih lesnih ostankov. Trenutno se tak sistem sušenja uporablja samo v specifičnih razmerah (Geršak in Velušček, 2003).

2.6. UPORABNOST

S kondenzacijskim načinom sušenja je mogoče gospodarno sušiti samo do vlažnosti 15 %. Les, ki ga želimo osušiti na nižjo končno vlažnost, v naslednji fazi posušimo v konvencionalni sušilni komori.

Prednost predsušenja v kondenzacijski sušilni komori je v tem, da pričakujemo manj poškodb lesa in manj sprememb barve. Kondenzacijske sušilne komore je možno postaviti tudi v tistih podjetjih, ki nimajo svoje kotlovnice, saj za svoje delovanje potrebuje le električno energijo, seveda jo je možno za dogrevanje priključiti tudi na druge vire energije. Dejstvo je, da se pri kondenzacijskem sušenju večinoma uporablja električni vir napajanja. Treba je omeniti tudi to, da tovrstna sušilnica porabi 2 – 3 krat manj energije kot pa klasična sušilna komora. Kapacitete teh sušilnic ali predsušilnic znašajo od 50 do 100 m³.

Pri sušenju mehkih lesnih vrst je možno kondenzacijsko sušenje uporabiti tudi kot sušenje na končno vlažnost, v primeru, da nimamo lastne kotlovnice ali ni dovolj velika. Treba je omeniti, da je časovno sušenje daljše od konvencionalnega sušenja, poraba energije pa tudi manjša (Čop s sod., 1986).

3. MATERIALI IN METODE

3.1. MATERIAL

Analizo sušilnega postopka smo izvedli na primeru dveh lesnih vrst in jih medsebojno primerjalno vrednotili. Učinek kondenzacijskega sušenja smo proučevali na bukovini (*Fagus sylvatica* L.) in hrastovini (*Quercus robur* L.).

3.1.1. Bukev

Bukovino je dostavil naročnik, les je bil sveže žagan in nerobljen, debeline 50 mm, nazivne dolžine 400 cm in različnih širin (povprečno 35,7 cm). Svež les smo zložili v dva zložaja širine 100 cm, ki sta bila zaporedno postavljena v sušilno komoro. Skupno število vseh plohov, ki smo jih sušili, je bilo 80, kar je 6,15 m³ svežega lesa.

3.1.2. Hrast

Hrastovino je dostavil naročnik, les je bil sveže žagan in nerobljen, debeline 50 mm, povprečne dolžine 272 cm (od najmanjše dolžine $L_{min}=207$ cm do najdaljših plohov dolžine $L_{maks}=310$ cm). Povprečna širina žaganic je bila 32 cm in je variirala med 21 cm ter 141 cm (KV=16,3%). Tudi svež les hrastovine je bil naložen v dva zložaja širine 100 cm, ki smo jih zaporedno naložili v sušilno komoro. Skupaj se je sušilo 79 plohov s skupnim volumnom 3,28 m³ svežega lesa.

3.2. METODE

Sušilniški proces se je izvajal z vgrajeno regulacijsko opremo in priporočljivimi sušilnimi programi izdelovalca naprav. 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 izvajanje sušilnega procesa.

Da bi ugotovili možnosti za zagotavljanje optimalnih pogojev sušenja, smo proces sušenja spremljali z več neodvisnimi metodami hkrati. Podatke o temperaturah in relativni zračni vlažnosti smo zajemali čez celotni sušilni proces, periodično pa smo kontrolo poostрили z natančnim umerjenim merilnikom temperature in relativne zračne vlažnosti.

3.2.1. Spremljanje vlažnosti in določanje kinetike sušenja

Vlažnost lesa smo spremljali z standardizirano gravimetrično metodo (SIST EN 13283/1),

Zahteve standarda:

- Vzorec 20 mm dolžine izžagamo 300 mm od čela,
- Vzdrževanje temperature sušenja na 103°C +/- 2°C in zagotovljeno kroženje zraka v sušilni komori,
- Sušimo 2 uri in takoj po osušitvi vzorec stehtamo, cikel ponavljamo toliko časa, dokler se masa vzorca po dveh zaporednih mjenjih ne spremeni ($\Delta m < 0,1\%$)

po formuli izračunamo vlažnost lesa:
$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100$$

m_1 - masa vzorca pred sušenjem [g],

m_0 - masa vzorca po sušenju [g],

ω – vlažnost lesa [%]

vlažnost lesa smo spremljali 14 elementih (Bukev) in 10 elementih pri Hrastu. Na desetih elementih pa smo določali tudi kakovost sušenja med procesom. Vzporedna kontrola je bila opravljena z uporovnim merilnikom po standardizirani metodi SIST EN 13183/2,

Zahteve standarda:

- Metoda je uporabna v vlažnostnem območju od 7 – 30%, kjer je natančnost merjenja 1%,
- Elektrode merilnika morajo biti izolirane,
- Dopuščat mora korekcijo lesne vrste in temperature preizkušanca,
- Postopek izvajamo tako, da 300 mm od čela preizkušanca zapičimo elektrode do 1/3 v preizkušanec in 1/3 od roba preizkušanca v sredino,
- Zaželeno je, da je merilno mesto brez napak,
- Merjenje izvedemo 2 – 3 sekunde po vbodu v preizkušanec.

3.2.2. Spremljanje kakovosti

Kakovost sušenja smo spremljali glede na splošno znana priporočila:

vizualni nadzor smo spremljali vsakodnevno, za natančnejše določanje kakovosti pa smo izbrali vzorce, ki so določali naslednje kriterije:

- zaradi razlike v hitrosti sušenja in razlike v začetni vlažnosti smo izbrali štiri radialno usmerjene in deset tangencialno orientiranih plovov (Bukev) in 5 radialno usmerjeni in pet tangencialno orientiranih plovov (Hrast)
- z izbranimi plohi iz beljavnega dela debla in z vsebovanim rdečim srcem (Bukev) smo zajeli tudi pričakovano variabilnost v šarži;
- sledilne vzorce smo razporedili po celotnem zložaju.

Začetno kontrolo smo izvedli:

- z vizualnim pregledovanjem vseh plohov, zložajev in načina zapolnitve komore;
- z evidentiranjem napak, posebno še poklin in veženj na izbranih sledilnih vzorcih;
- z določevanjem povprečne lesne vlažnosti in vlažnostnega profila,
- s kontrolo notranjih napetosti z viličnim testom in s prežagovalno metodo,
- s preverjanjem obarvanj (diskoloracij) na vzorcih
- z barvno metričnim sistemom Lab,
- s preverjanjem primernosti zlaganja in polnjenja sušilne komore in
- z zapisovanjem vseh opazovanih dejavnikov.

Med potekom sušenja smo kontrolo izvajali:

- z rednim zapisovanjem vseh parametrov sušenja,
- s stalnim preverjanjem naprav,
- z izbiranjem najprimernejših merilnih mest za vodenje procesa,
- z vizualnim preverjanjem razpok na površini, veženj in obarvanj,
- z gravimetričnim določanjem povprečne vlažnosti in vlažnostnih gradientov,
- s kontrolo porazdelitve notranjih napetosti in
- s sledenjem obarvanja vzorcev.

V končni kontroli kakovosti osušenega lesa smo natančneje izvedli še:

- vizualni pregled,
- izmerili smo čelne razpoke, pokline, veženja in kolaps,
- ocenili smo obarvanje vzorcev na prečnem prerezu,
- naredili smo kontrolo napetostnega stanja in
- izmerili smo vlažnostni gradient.

Povprečno vlažnost in vlažnostne gradiente smo določili po gravimetrični metodi, za vzporedno metodo pa smo uporabili uporovni merilnik. Notranje napetosti smo določili z vilično metodo in s prežagovanjem. Barvo smo ocenili vizualno in s sistemom *CIELab*

3.2.3. Poraba energije

S spremljanjem porabe energije čez celoten proces sušenja smo dobili vpogled v porabo energije v posameznih fazah sušenja, ki nam je hkrati omogočila ekonomsko vrednotenje sušilnega procesa.

4. REZULTATI IN RAZPRAVA

4.1. BUKEV

4.1.1. Vpliv zlaganja na učinkovitost in enakomernost sušenja

Zložaji so bili zloženi tako, da je bila maksimalno zapolnjena sušilna komora, po širini in tudi po višini, razen po dolžini, ker so bile žaganice krajše (slika 5). Zložaja sta bila prizmatične oblike, s poravnanimi čeli. Med večje odprtine med zložajema in steno so bila nameščena zastirala, kar je ob pravilno zloženem zložaju še dodatno izboljšalo kroženje zraka čez zložaj.



Slika 5: Natančna priprava in pravilno polnjenje komore je omogočilo optimalno izkoriščanje zračnega toka za sušenje. Žaganice z obarvanimi čeli smo uporabili za sukcesivno spremljanje sušilnega procesa.

4.1.2. Primerjava sušilnih programov in ocena poteka procesnih parametrov

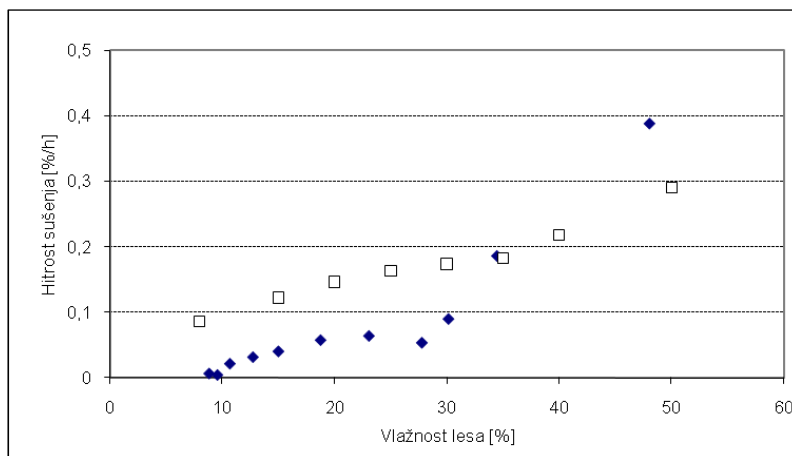
4.1.2.1. Temperatura

Temperatura je bila na začetku sušenja nižja od predpisane v standardnih programih sušenja za bukovino, vendar pa kljub temu ne dovolj nizke, da bi lahko preprečili možnost obarvanja. Temperatura je bila vseeno višja od temperature, ki se uporablja v konvencionalnih normalnotemperaturnih procesih, v programih kjer želimo preprečiti obarvanje sredice (preglednica 1).

Preglednica 1: Primerjava programov sušenja za bukovino debeline 50 mm med standardnim režimom, režimom za preprečevanje obarvanja v konvencionalnih komorah in dejanskim režimom kondenzacijskega sušenja.

	Standardni režim				Režim preprečevanja obarvanja				Režim kondenzacijskega sušenja			
Vlažnost u [%]	T [°C]	ΔT [°C]	t [h]	$\Delta u/\Delta t$ [%/h]	T [°C]	ΔT [°C]	t [h]	$\Delta u/\Delta t$ [%/h]	T [°C]	ΔT [°C]	t [h]	$\Delta u/\Delta t$ [%/h]
segrevanje	8/h		12		24	3,0	8		28	4,0	12	
60	49	1,0	28	0,290	25	3,0			29	5,0		
40	49	2,0	105	0,218	25	3,5	142	0,141	31	6,0	85	0,235
35	49	3,0	27	0,182	25	3,5	47	0,107	35	7,0	50	0,100
30	54	5,0	29	0,174	26	4,0	57	0,096	36	8,0	55	0,091
25	60	14,0	31	0,167	30	6,0	53	0,094	37	9,0	80	0,063
20	66	28,0	34	0,147	39	9,5	50	0,100	44	13,0	80	0,063
15	71	28,0	41	0,123	45	12,5	56	0,089	45	15,0	250	0,020
8	71	28,0	57	0,087	52	22,0	106	0,066	45	16,0	400	0,018
izenačevanje	71	16,0	36		45	9,0	12		45	12,0	8	
Σt			440				526				1020	

Hitrost sušenja je bila v prvi fazi sušenja višja od konvencionalnega načina sušenja (slika 6). Okoli vlažnosti točke nasičenosti celičnih sten se je hitrost sušenja upočasnila in je bila primerljiva s hitrostjo v konvencionalnih komorah. Pri sušenju na končne vlažnosti je hitrost sušenja v kondenzacijskih komorah močno zaostajala za hitrostjo sušenja v konvencionalnih. (preglednica 1, preglednica 2).

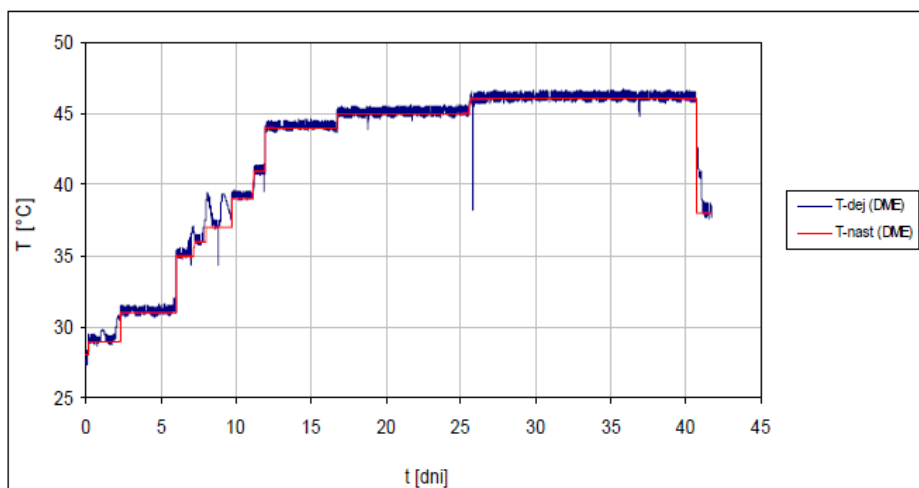


Slika 6: Primerjava odvisnosti hitrosti sušenja od lesne vlažnosti med kondenzacijskim (♦) in konvencionalnim (□) sušenjem

Preglednica 2: Sprememba vlažnosti med postopkom sušenja določena z merilnimi sondami in primerjalno z gravimetrično meritvijo ter izračunane hitrosti sušenja.

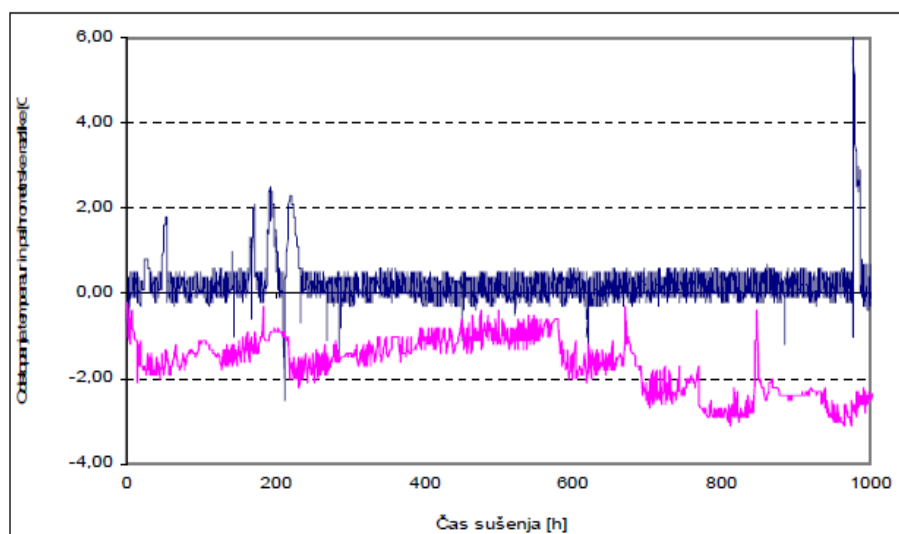
Čas sušenja [dni]	Vlažnost lesa (sonde) [%]	Vlažnost lesa (Gravimetrično) [%]	Hitrost sušenja (Sonde) [%/dan]	Hitrost sušenja (Gravimetrično) [%/dan]
0,0	66,0	57,4		
2,0	60,3	45,2	2,85	6,09
5,0	47,4	35,2	4,23	3,30
7,1	37,4	31,2	4,80	1,92
9,0	28,4	28,3	4,92	1,57
12,0	22,9	23,6	1,85	1,56
15,1	20,9	19,6	0,62	1,27
19,0	18,8	15,7	0,54	0,99
22,0	17,2	14,5	0,53	0,39
25,9	14,8	12,5	0,61	0,53
37,1	10,1	9,2	0,42	0,29
42,1	9,0	8,3	0,22	0,18

Hitrost sušenja v difuzijskem območju se zaradi nespremenjene temperature sušenja manjša, čas sušenja pa se podaljša. Dejanske temperature sušenja so dobro sledile načrtovanim, prišlo je le do manjših motenj zaradi kontrole delovanja in spremljanja stanja sušечеge lesa (odpiranje vrat)(slika 7 in slika 8).

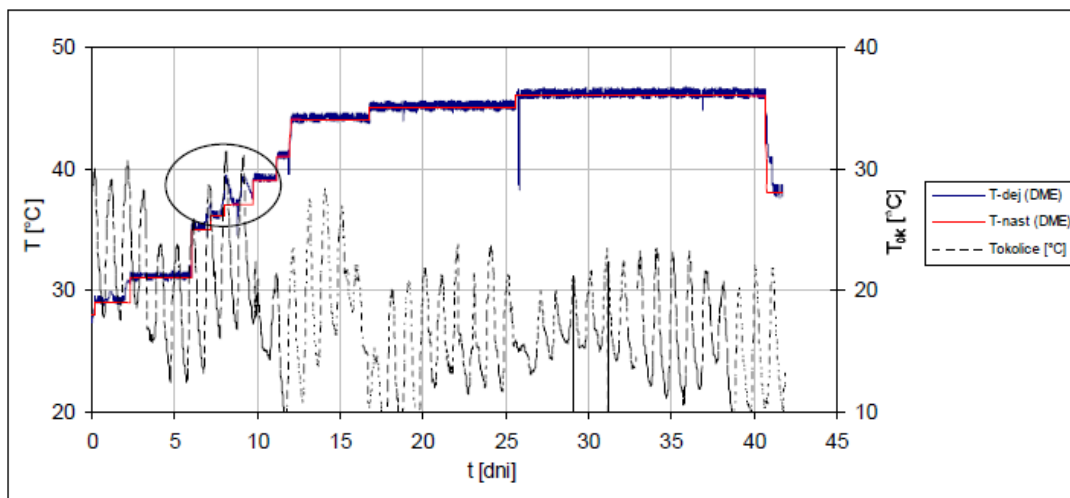


Slika 7: Primerjava poteka dejanske temperature z načrtovano oziroma nastavljen po sušilnem programu.

Do večjega odstopanja temperature je prišlo okrog osmega dneva sušenja, kar pripisujemo (slika 8) povišani temperaturi okolice (slika 9).

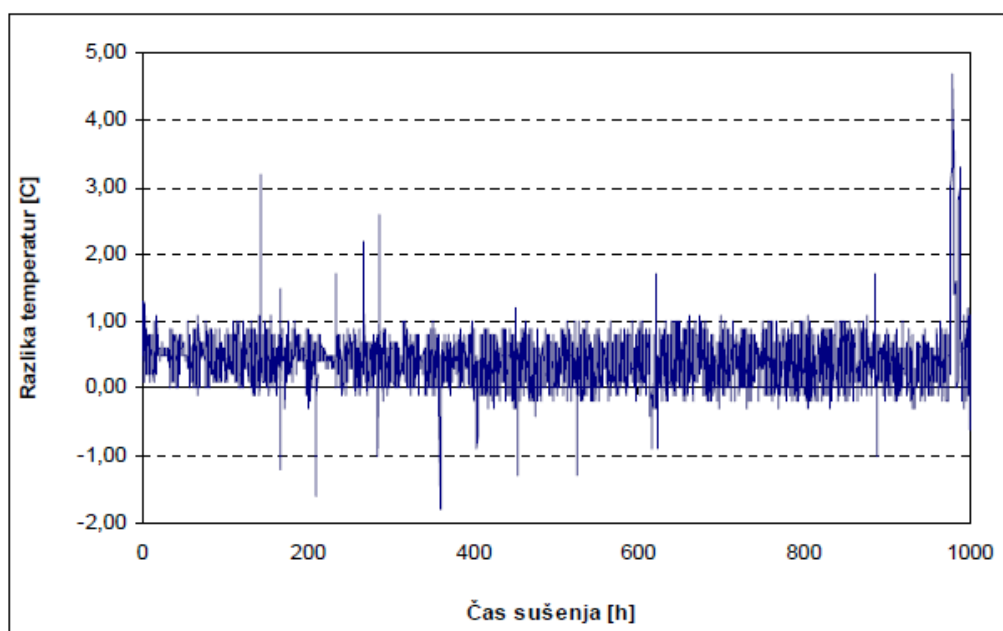


Slika 8: Odstopanja dejanske temperature in psihrometske razlike od načrtovanih oziroma nastavljenih na sušilnem programu. Večje prekoračitve nastavljenih temperatur so bile izmerjene 7., 8. in 9. dan sušenja.



Slika 9: Potek dejanskih in nastavljenih temperatur sušenja ter nihanje temperature v okolici (obkrožene so prekoračitve nastavljenih temperatur v komori 7. 8. in 9).

Temperaturna tipala v komori so se izkazala kot natančna in zanesljiva saj so bila odstopanja izmerjene temperature od dejanske v komori zelo majhna ($0,23^{\circ}\text{C}$) (slika 10).

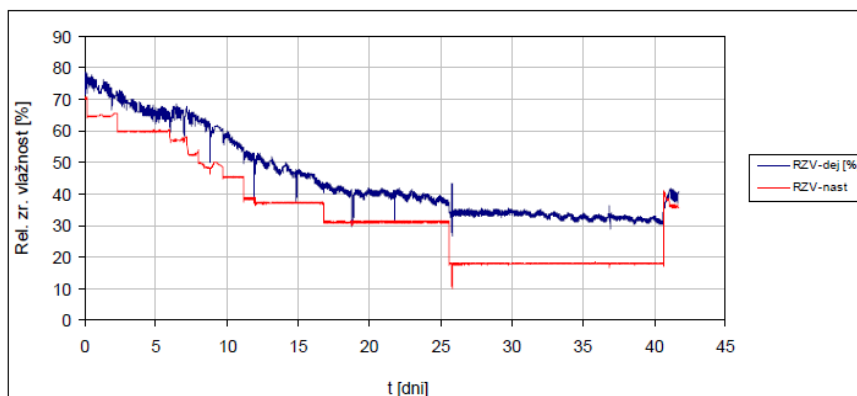


Slika 10: Odstopanja dejanske temperature od izmerjene.

4.1.2.2. Relativna zračna vlažnost

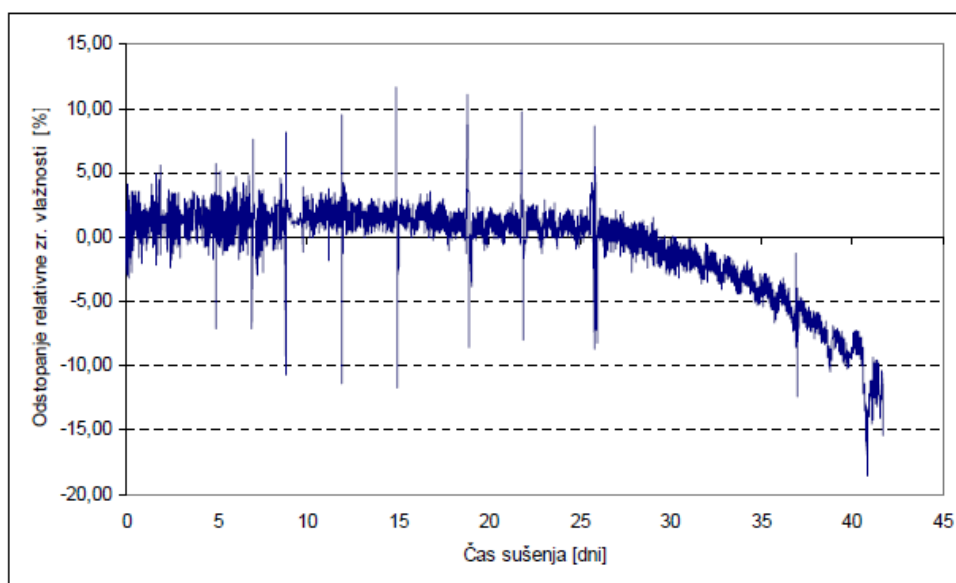
Relativna zračna vlažnost je bila ves čas procesa sušenja višja od nastavljene z režimom (slika 11). Previsoka relativna zračna vlažnosti se je pojavila že takoj po začetku

sušilnega postopka in je ostala povišana čez celoten postopek sušenja, kar pa je še posebej vplivalo na podaljšanje sušenja pod točko nasičenja celičnih sten. Daljše sušenje je pri kondenzacijskih sušilnih komorah nekaj normalnega. Zaradi visoke relativne zračne vlažnosti nismo dosegli zadostne ostrine sušenja, kar je vplivalo na še dodatno podaljšanje sušilnega postopka. Temperaturo mokrega termometra je bila za 3,29 °C višja od načrtovane po režimu, to pomeni, da je bila relativna zračna vlažnost za 11,3 % višja, kot bi morala biti po režimu (slika 11).



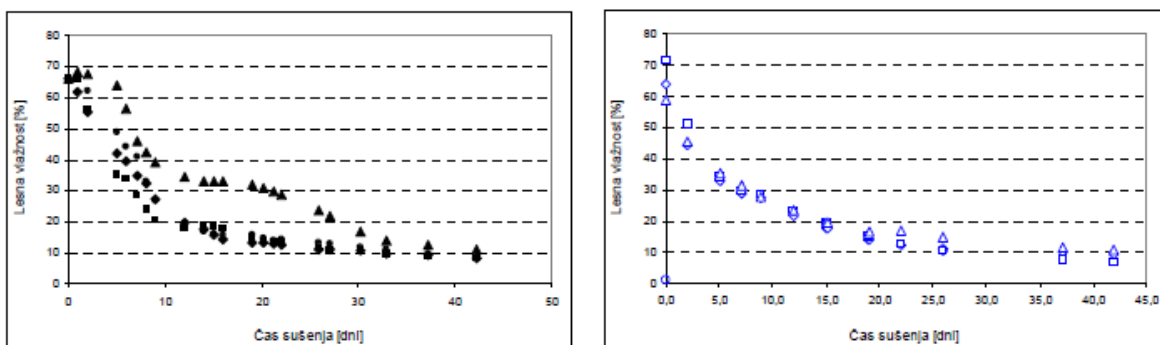
Slika 11: Primerjava poteka dejanske relativne zračne vlažnosti z načrtovano oziroma nastavljeno po sušilnem programu.

V prvi polovici procesa sušenja so bile vrednosti relativne zračne vlažnosti zadovoljivo natančno izmerjene. V drugi polovici so se odstopanja začela povečevati in dosegla na koncu že 10 % odstopanje (slika 12). Težave pri merjenju relativne zračne vlažnosti so verjetno nastale v območju pod točko nasičenja celičnih sten.

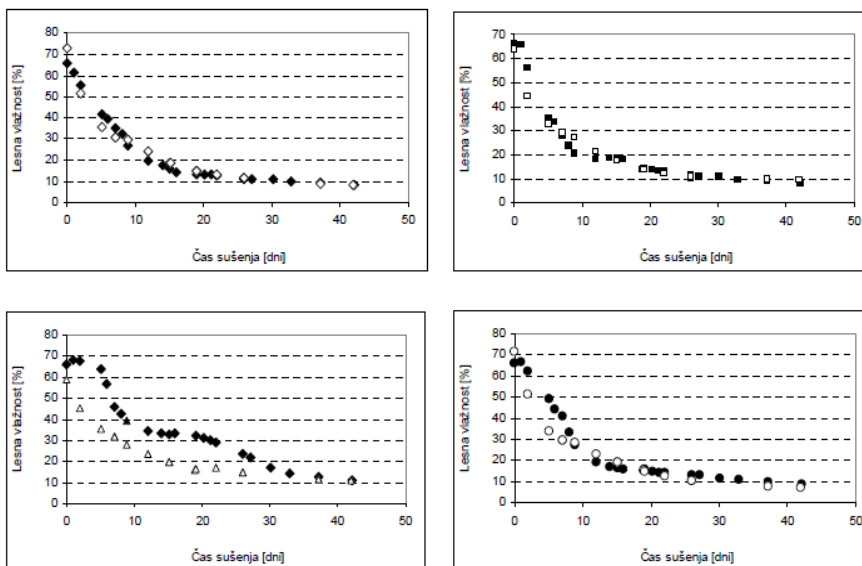


Slika 12: Odstopanja dejanske relativne zračne vlažnosti od izmerjene.

Do večjih odstopanj merjenja vlažnosti med merilnimi mesti prihaja pri merjenju z elektro – uporovno metodo, pri merjenju z gravimetrično metodo pa so ta odstopanja med vzorci manjša (slika 13). Z manjšimi odstopanji je bilo merjenje treh sond zanesljivo (slika 14). Ena od štirih sond (tretja) pri višjih vlažnostih verjetno ni kazala pravih vrednosti, ker gre za napako pri merjenju višjih vlažnosti, napaka ne vpliva na vodenje procesa. V tej fazi je proces sušenja manj odvisen od lesne vlažnosti. Ko preidemo v nasičenja celičnih sten, je odstopanje od dejanske vlažnosti 2%, kar pa je za takšno metodo merjenja sprejemljivo.



Slika 13: Primerjava sušilnih krivulj sušenja bukovine debeline 50 mm z vsemi štirimi sondami (levo) in z gravimetričnimi sledilnimi vzorci (desno)



Slika 14: Primerjava natančnosti merjenja vlažnosti na štirih merilnih mestih (♦) z vzporedno gravimetrično metodo (□).

4.1.3. Analiza kinetike sušenja

4.1.3.1. Vlažnost

Za določanje hitrosti sušenja smo spremljali lesno vlažnost z uporovno metodo, vzporedno pa smo izvajali tudi kontrolo z gravimetrično metodo na izbranih sledilnih vzorcih. Začetne vlažnosti lesa so se gibale med 40,8 % in 73,3% (preglednica 3). V povprečju je bila začetna vlažnost lesa 57,4 %.

Dosežena končna vlažnost 8,3 % je variirala od 6,6 % - 11 %. Na razlike v končni vlažnosti je lahko vplivala velika razlika začetne vlažnosti, različne sušilne karakteristike tkiv, usmerjenost elementov in neenakomerni pogoji v komori. Da bi dobili bolj enakomerno vlažnost, bi bilo potrebno izvesti še fazo izenačevanja vlažnosti. Vlažnost na koncu sušenja, ki smo jo izmerili s sondami, je bila višja, variabilnost pa majhna. V povprečju je bila izmerjena vrednost 0,7 % višja od gravimetrično izračunane vlažnosti (preglednica 3).

Preglednica 3: Povprečne začetne in končne vlažnosti bukovine določene gravimetrično in z uporovno metodo ter osnovna statistika.

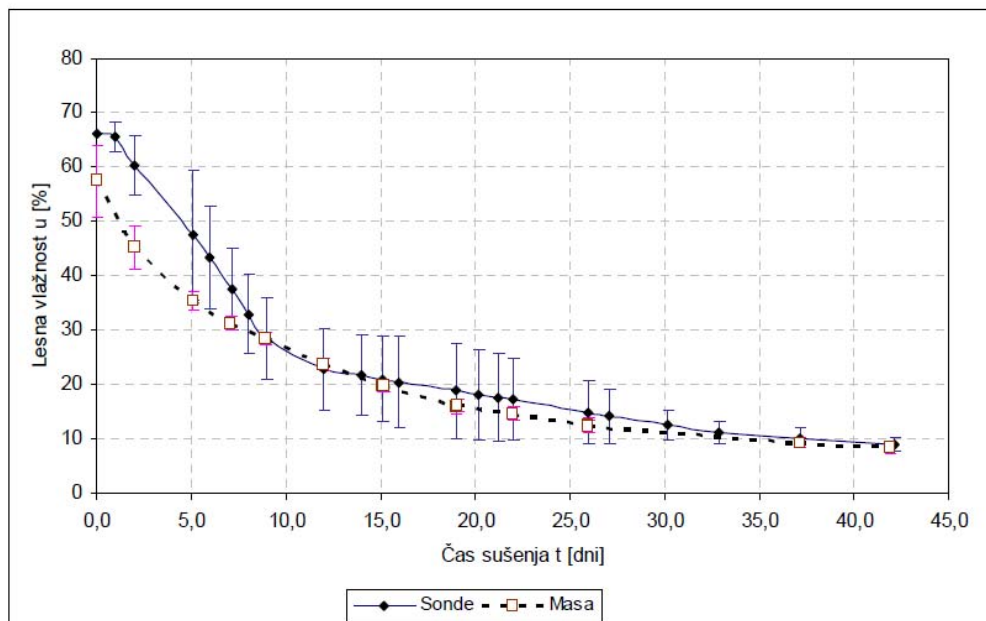
	Gravimetrično		Uporovna metoda	
	Začetna vlažnost u [%]	Končna vlažnost u [%]	Začetna vlažnost u [%]	Končna vlažnost u [%]
Povprečno	57,4	8,3	66	9
Minimalno	40,8	6,6	0	8,1
Maksimalno	73,3	11,4	0	11,1
Sd.odklon	12,5	1,97	0	1,39

4.1.3.2. Kinetika sušenja

Z oblikovanjem sušilne krivulje in diagrama sušenja smo analizirali kinetiko sušenja. Ovrednotili smo tudi podatke dobljene iz merilnih sond uporovnega načina in postopno gravimetrično določitvijo lesne vlažnosti.

Na začetku postopka je bila hitrost sušenja visoka, na to kaže tudi krivulja sušenja, ki je bila na začetku procesa sušenja strma (slika 15). Začetna hitrost sušenja, določena z uporovno metodo, je bila primerljiva z gravimetrično metodo. Odkloni med merilnimi mesti so bili večji kot pa med sledilnimi vzorci. Velike razlike vlažnosti svežega lesa določene z uporovnimi merilniki so se pod točko nasičenja celičnih sten izenačile z vrednostmi gravimetrične metode. Uporovni merilniki so omejeni na merjenje v higroskopskem območju, zato je merjenje višjih vlažnosti z njimi nezanesljivo. Ker pa se v prvi fazi sušenja parametri zelo malo spreminjajo, lahko z uporovnimi merilniki tudi vodimo sušilni proces, čeprav se je potrebno zavedati, da nam sonde ne kažejo pravih podatkov. Kljub temu da so bile hitrosti sušenja v na začetku primerljive s sušenjem v konvencionalnih sušilnicah (če uporabimo enake parametre), je bilo sušenje dolgotrajno, dodatno se je hitrost sušenja še zmanjšala pod točko nasičenja celičnih sten. Po približno 10 dneh smo večji del proste vode v lesu že izločil in smo dosegli

točko nasičenja celičnih sten, zaradi prevladujočega difuzijskega toka se je sušenje začelo podaljševati (slika 15). Difuzijski tok je ostal vse do konca sušenja.



Slika 15: Primerjava sušilnih krivulj določenih z gravimetričnimi meritvami lesne vlažnosti z meritvami vlažnosti t uporovnimi merilnimi sondami.

4.1.3.3. Aerodinamika komore

Hitrost zraka in porazdelitev po prerezu komore je bila primerna, prav tako je bila tudi dobro dosežena aerodinamičnost komore. Pri komorah z večjo kapaciteto bi bilo vzdolžno prepihanje neprimerno, za to napravo pa je bilo še sprejemljivo.

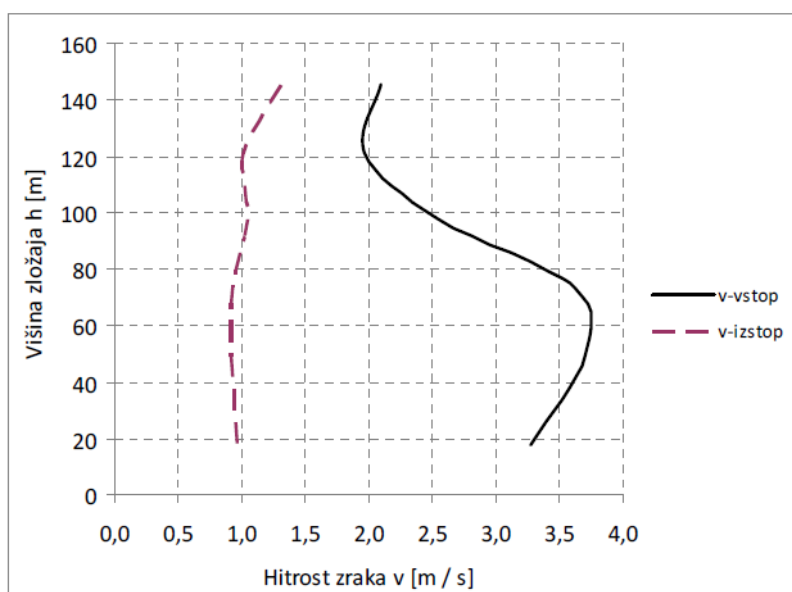
Pri prostem pretoku smo z ventilatorji dosegli povprečno hitrost gibanja zraka 4,49 m/s. Pri izstopu iz zložaja in pred vstopom v agregat je bila hitrost zraka 1,18 m/s, pri vstopu v kondenzacijski agregat pa 2,54 m/s (preglednica 4), zaradi manjšega prereza odprtine v agregatu.

Čeprav so bile distančne letvice relativno tanke, je hitrost v zložaj na vstopu velika, v zgornjih delih pa pričakovano, zaradi preusmeritve dokaj hitrega zračnega toka, nekoliko nižja. Hitrost v zgornjih predelih zložaja (preglednica 4, slika 16) je dosegla okrog 2 m/s in se je proti tlom povečala do maksimalne 3,71 m/s, po višini zložaja pa se hitrosti ne razlikujejo za več kot 20%. Prav tako je enakomerna hitrost dosežena po več kot polovici spodnjega dela komore. V horizontalni smeri je hitrost zraka enakomerna, brez večjih odstopanj, ki nastanejo zaradi neenakomernih prerezov žaganega lesa.

Zrak do izstopa iz zložaja izgubi hitrost, kot je tudi pričakovano. Po celotni višini je hitrost izstopa zraka iz zložaja enakomerna; okrog 1 m/s. Potrebno je pa poudariti, da komora ni bila popolnoma polna, saj dolžine žaganic niso bile 4 m. Pri popolni polnitvi bi hitrost zraka na izstopu iz zložaja še dodatno padla.

Preglednica 4: Porazdelitev hitrosti zraka po višini sušilne komore na vstopu in na izstopu zraka iz zložaja.

	Vstop [m/s]		Izstop [m/s]	
	Povprečno	KV	Povprečno	KV
Prosti tok	4,49	3,2	1,18	22
Višina [cm]				
145,5	2,1	40,6	1,31	9,9
121,5	1,96	23,2	1,01	14,3
97,5	2,55	14,80	1,05	15,8
73,5	3,62	11,6	0,93	28,4
49,5	3,71	6,3	0,92	9,1
17,5	3,27	9,9	0,97	6,7
Vstop v agregat			2,54	25,4



Slika 16: Porazdelitev hitrosti zraka po višini sušilne komore na vstopu in na izstopu zraka iz zložaja.

4.1.4. Kakovost sušenja

4.1.4.1. Končna vlažnost

Končna vlažnost je bila po 42 dneh sušenja, izmerjena z uporabo metode 9%, nekoliko višja od gravimetrično določene, ki je bila 8,3% (preglednica 5). Prav tako tudi primerjava vlažnosti med sledilnimi in končnimi kontrolnimi vzorci ne kaže značilne

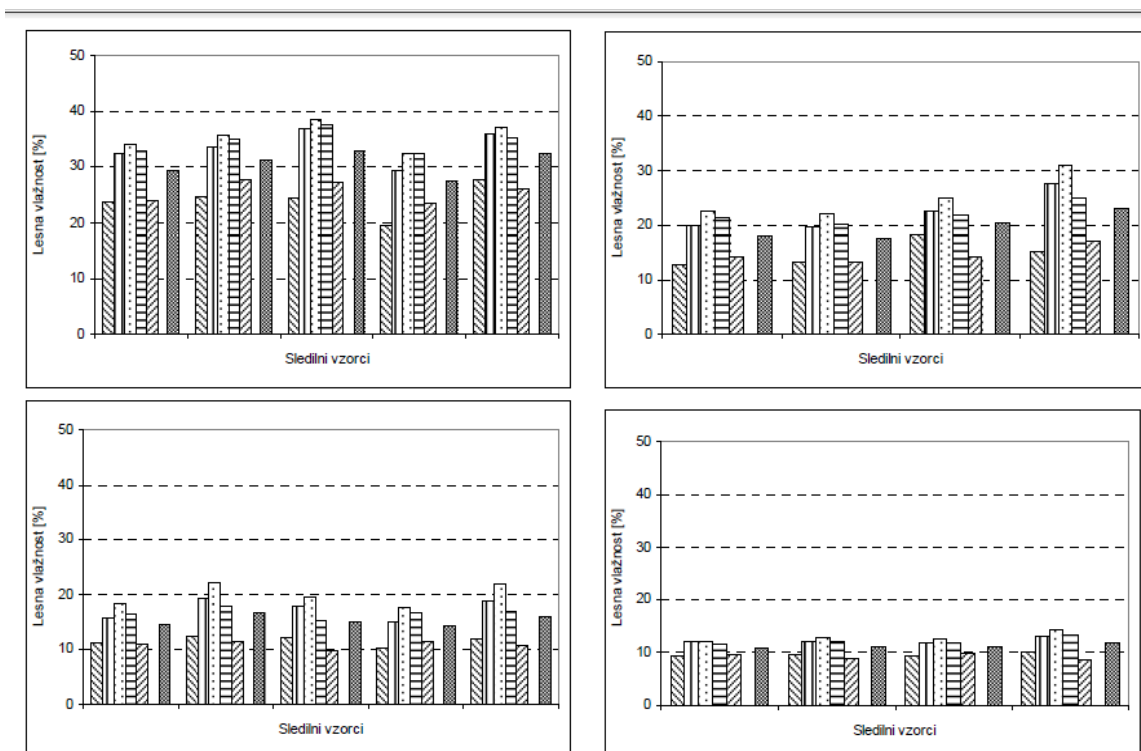
razlike. Ker po širini in višini komore nismo zaznali značilnih razlik med vlažnostjo, lahko rečemo, da je celotna šarža enakomerno posušena.

Preglednica 5: Povprečne vlažnosti določene z gravimetrično metodo in merjenje s sondami ter vlažnostni gradient z odstopanji pri sušenju bukovine debeline 50 mm.

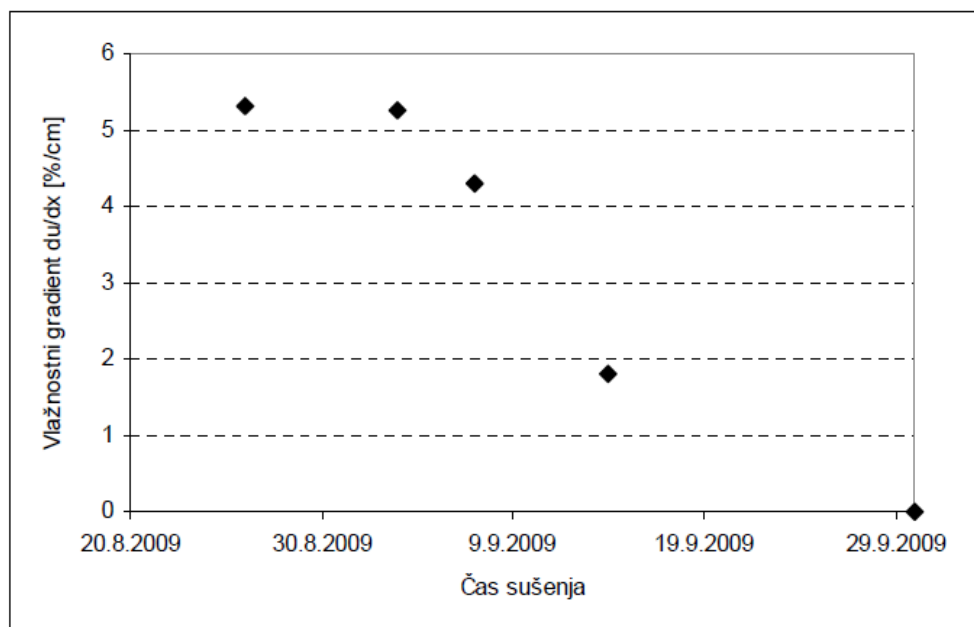
Čas kontrole	Lesna vlažnost - gravimetrično		Lesna vlažnost - sonde		Vlažnostni gradient	
	U [%]	stdev	U sonde [%]	stdev	dU/dx	stdev
26.8.2009	30,7	2,24	35,1	7,21	5,3	0,94
3.9.2009	19,9	2,5	24,4	8,33	5,3	1,51
7.9.2009	15,3	0,99	21,8	8,34	4,3	0,88
14.9.2009	11,3	0,43	15,2	4,6	1,8	0,52
30.9.2009	8,3	1,97	9,1	1,12	0,9	0,33

4.1.4.2. Vlažnostni gradient

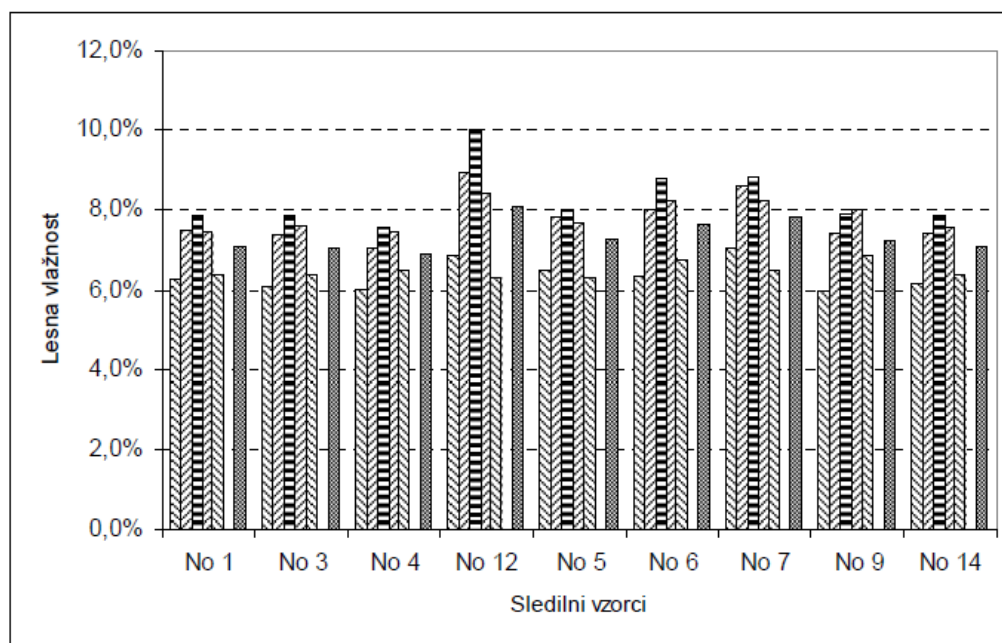
Že na začetku sušenja se je vlažnostni gradient dvignil na približno 5%/cm in se ni spreminjal do dokaj nizkih vlažnosti (slika 17). Relativno konstantna vrednost vlažnostnega gradienta čez celoten potek sušenja je omogočila enakomerno sušenje v območju nasičenja celičnih sten (slika 18). Proti koncu sušenja, v zadnji fazi, se je vlažnostni gradient zmanjšal na sprejemljive vrednosti (0,9%/cm) (slika 19), kar kaže na enakomerno sušenje po celotni debelini lesa. Po dolžini žaganic ni bilo razlik v gradientih.



Slika 17: Razporeditev vlažnosti po debelini žaganic v štirih intervalih sušenja (levo zgoraj – po 7 dneh sušenja; desno zgoraj po 11 dneh sušenja; levo spodaj po 15 dneh sušenja in desno spodaj na koncu sušenja).



Slika 18: Razvoj vlažnostnega gradienta v odvisnosti od časa sušenja.



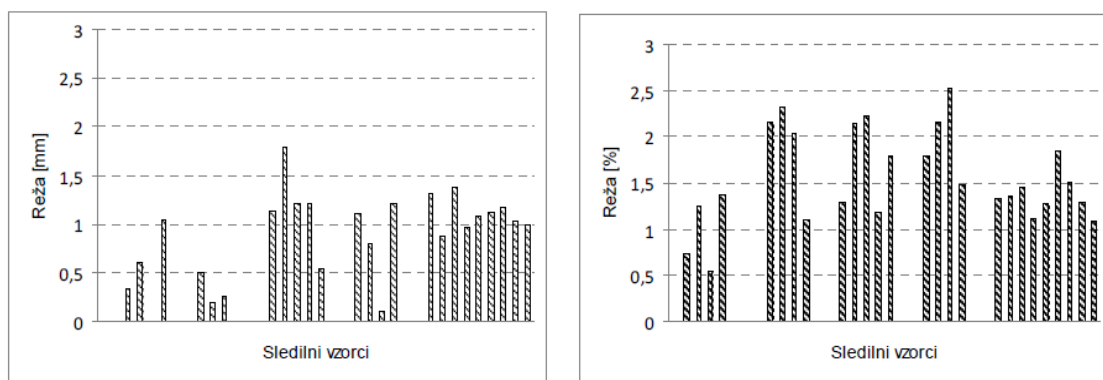
Slika 19: Razporeditev vlažnosti po debelini žaganic na koncu sušenja.

4.1.4.3. Notranje napetosti

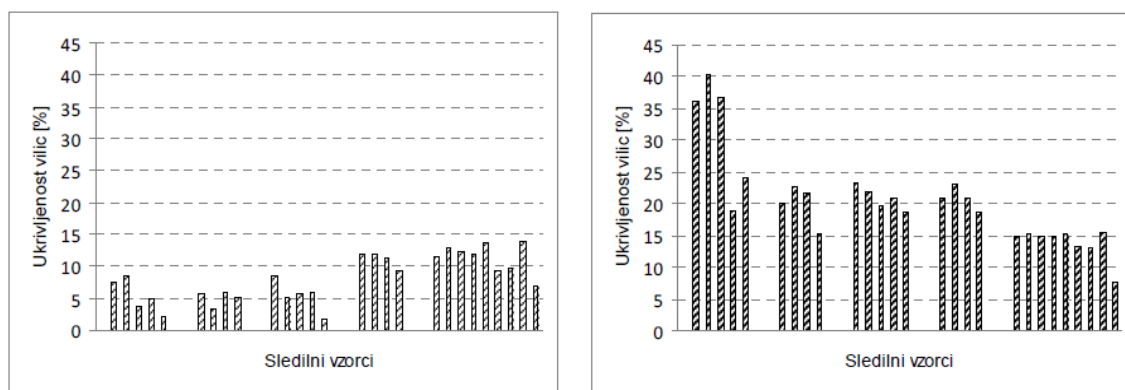
Na začetku sušenja so se z vlažnostnim gradientom ustvarile tudi napetosti, ki smo jih zaznali s viličnim testom in prežagovalno metodo. Metodi sta pokazali primerljive rezultate, čeprav je zaradi debeline vzorcev bolj nazorno vidno pri viličnem testu (slika 20 in slika 21).

Pri prvih treh kontrolah je na deformacijo vilic vplival tudi vlažnostni gradient. Po 48 urah spremljanja so bile vilice bistveno bolj ukrivljene kot pa takoj po razžagovanju. Po končanem sušenju pa so se napetosti izenačile, zaradi gradienta vlažnosti pa tudi ni bilo večjih odstopanj med meritvijo takoj po sušenju in po 48 urah (slika 22).

Napetostno polje po prerezu lesa je bilo v celotnem procesu sušenja v dopustnih mejah, kar kažejo tudi rezultati, zato ni povzročilo nikakršnih posledic, nastalih zaradi morebitnega zaskorjenja. V vzorcih ni bilo zaslediti poklin na začetku sušenja, niti notranjih razpok ali satavosti na koncu sušenja. Kljub temu da ni bilo faze izenačevanje ali kondicioniranja, se kakovost lesa ni poslabšala.

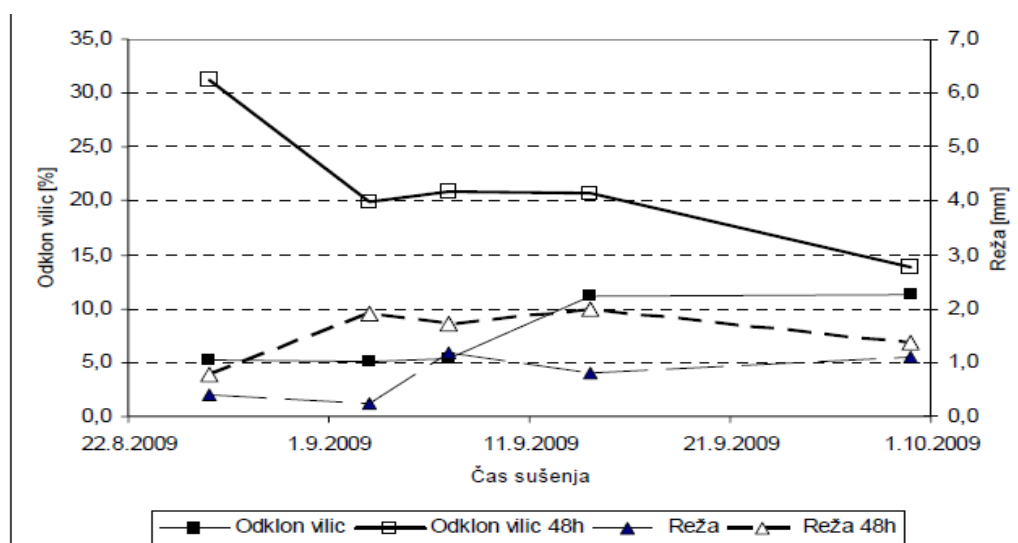


Slika 20: Izmerjene velikosti reže po prežagovalni metodi na sledilnih vzorcih takoj po razžagovanju (levo) in po 48 urnem kondicioniranju (desno).



Slika 21: Deformacije vilic na sledilnih vzorcih takoj po razžagovanju (levo) in po 48 urnem kondicioniranju (desno).

Pričakovano največje napetosti so bile v prvih dveh fazah sušenja, ker se površina relativno hitro osuši pod točko nasičenja celičnih sten in so se tako na površini generirale natezne napetosti. Napetosti na površini pa niso bile tolikšne da bi lahko kazale na možnost zaskoritve. Vse napetosti so bile v mejah trdnosti lesa, zato ni prišlo do nastanka poklin na površini lesa. K povečanemu odstopanju viličnega testa je v prvem intervalu močno vplival tudi vlažnostni gradient. V drugi fazi pa je sušenje potekalo brez večjih zaznanih sprememb v napetostnem stanju, kar je ob ugodnem vlažnostnem gradientu pozitivno vplivalo na prevajanje vode iz notranjosti na površino, hkrati pa so napetosti ostajale v mejah dovoljenega in tako niso imele vpliva na zmanjšanje kakovosti osušitve.



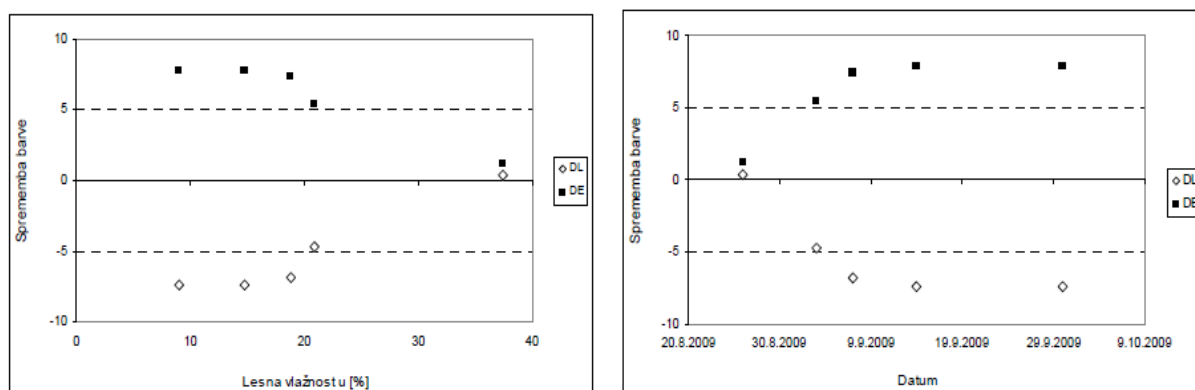
Slika 22: Povprečne deformacije vilic in velikosti rež na sledilnih vzorcih takoj po razžagovanju in po 48 urnem kondicioniranju.

4.1.4.4. Razpoke in veženja

Ocena razpok in veženja na začetku in na koncu sušenja ne kaže na napake, ki bi nastale zaradi nepravilno vodenega sušilnega postopka. Nekatere manjše razpoke in zavrtost, je bilo zaznati na nekaterih sledilnih žaganicah, ampak so bile to posledica zgradbe lesa.

4.1.4.5. Barvne spremembe

Pri svežem lesu barvnih sprememb nismo določali zaradi vpliva velike količine vode. Po šestih dneh, ko smo opravili prvo merjenje, še nismo niti vizualni in niti s sistemom Lab zaznali obarvanj na površini ali sredici (preglednica 6, slika 23). Do intenzivnih sprememb je prišlo pri naslednji meritvi, po 14 dnevnem sušenju. Za 7 enot se je povečala razlika v svetlosti barve med površino in sredico, kar smo zaznali tudi vizualno. Za približno enako vrednost se je spremenila tudi barva. V območju nasičenja celičnih sten je prišlo do največjih barvnih sprememb sredice, v nadaljnjem postopku barva v sredici in tudi na površini ni več značilno spreminjala, kot napaka je ostala tudi na koncu sušenja.



Slika 23: Sprememba svetlosti (ΔL) in celotna barvna razlika (ΔE) v odvisnosti od lesne vlažnosti (levo) in v odvisnosti od časa sušenja (desno) med sušenjem bukovine debeline 50 mm.

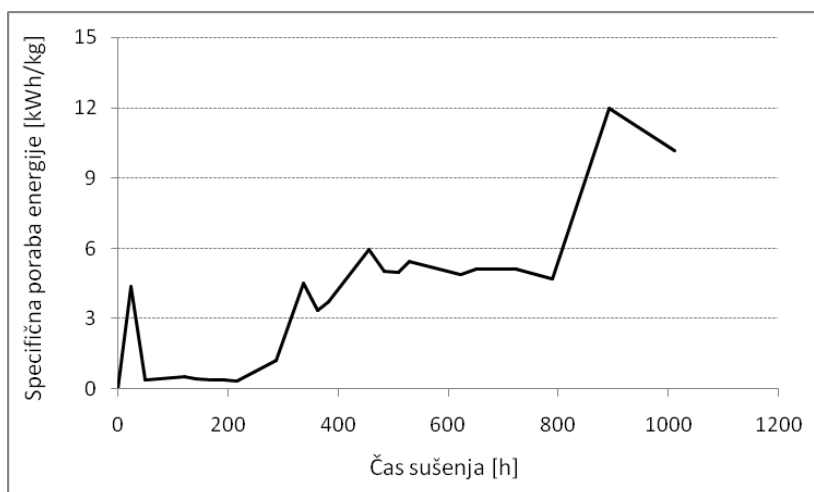
Preglednica 6: Razlika svetlosti in celotna barvna razlika med površino in sredico deske pri sušenju bukovine debeline 50 mm v odvisnosti od časa sušenja in povprečne vlažnosti lesa.

Čas sušenja	Lesna vlažnost U	Razlika v svetlosti ΔL	Celotna razlika barve ΔE
0		0	0
6	37,4	0,36	1,21
14	20,9	-4,71	5,45
18	18,8	-6,85	7,39
25	14,8	-7,38	7,83
41	9	-7,39	7,82

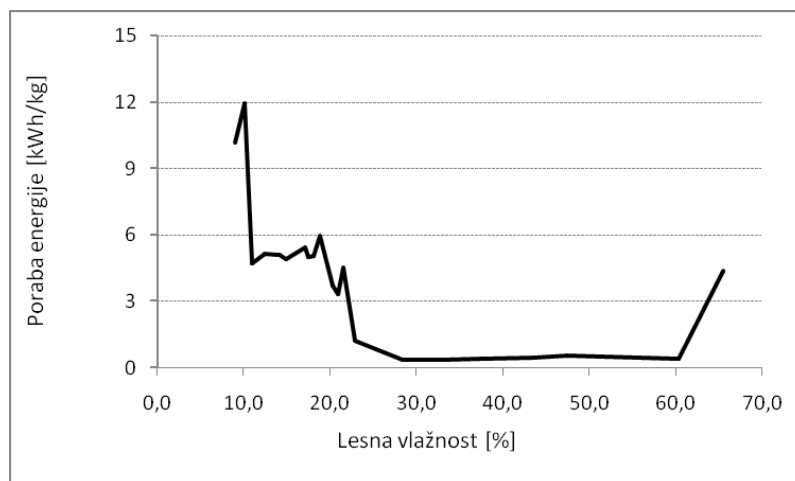
4.1.5. Poraba energije

Kondenzacijsko sušenja štejemo med energijsko varčnejše procese, pomembno pa je vedeti da se pri tem načinu uporablja samo električna energija.

Pri sušenju bukovine smo porabili skupaj 4016 kWh energije, kar je povprečno 3,97 kWh na uro sušenja, to pomeni da smo pri osušitvi iz 57,4% vlažnosti na 8,3% končno vlažnost porabili 2,15kWh na 1 kg izločene vode. Poraba energije je bila na začetku sušenja nekoliko večja, kar lahko pripišemo potrebnemu segrevanju sušilne komore in lesa.(slika 24, slika 25). Poraba je bila izjemno nizka do vlažnosti 25 % in ni dosegla niti 1 kWh na kg izločene vode. Pri kasnejšem sušenju od 20 % do 10 % pa se je poraba povečala na 5 kWh na kg izločene vode. V zadnji fazi je poraba energije nekoliko narasla, kar bi pripisali ustavljanju oziroma kondicioniranju. Za en kubični meter lesa se je porabilo 718 kWh energije.



Slika 24: Specifična poraba energije v odvisnosti od časa za sušenje bukovine debeline 50 mm.



Slika 25: Specifična poraba energije v odvisnosti od lesne vlažnosti lesa za sušenje bukovine debelin 50 mm.

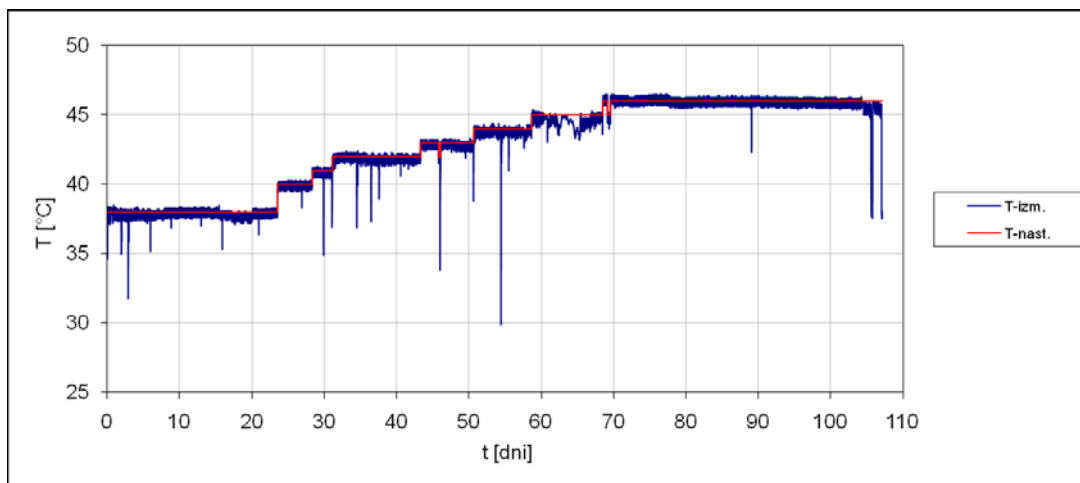
4.2. HRAST

4.2.1. Vpliv načina zlaganja na učinkovitost in enakomernost sušenja

Kljub temu, da so bile žaganice nerobljene, so bili zložaji primerno zloženi je bila zapolnjenost sušilne komore dobra. Z načinom zlaganja in polnjenja je bilo zagotovljeno dobro in enakomerno prepihanje zraka. Zložaja prizmatične oblike, sta zapolnjevala večji del komore, prav tako po višini in širini. Slabša zapolnjenost je bila samo po dolžini in zato polnitev ni bila maksimalna. V komori je bilo 3,28 m³ svežega lesa. Odprtine med zložaji in med zložaji in steno so bile primerno zastrte, kar je ugodno vplivalo na gibanje zraka v sušilnici.

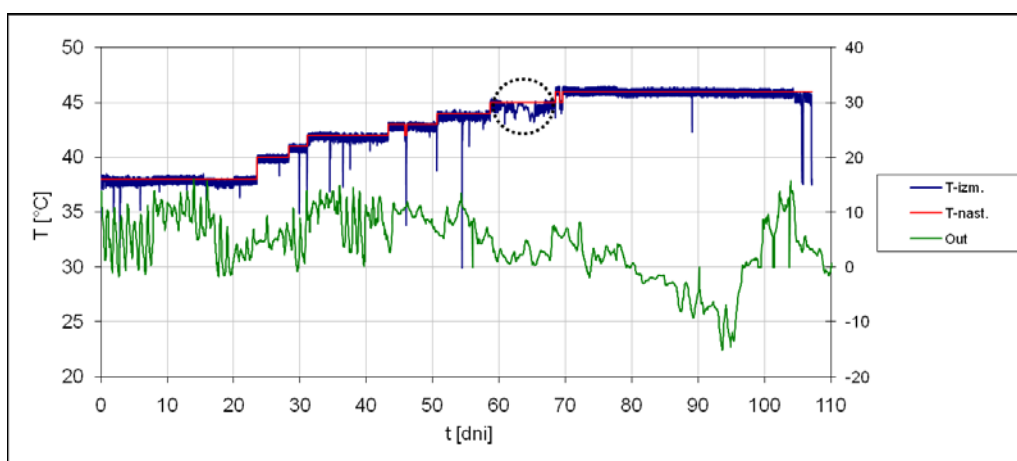
4.2.2. Temperatura

Temperature dosežene v komori so zelo dobro sledile načrtovanim s programom (slika 26). Odstopanja so bila majhna, pojavilo se je nekaj manjših nihanj, katere lahko pripisujemo kontrol delovanja in spremljanja sušечеge lesa, kar pa ni imelo večjih vplivov na sušenje.



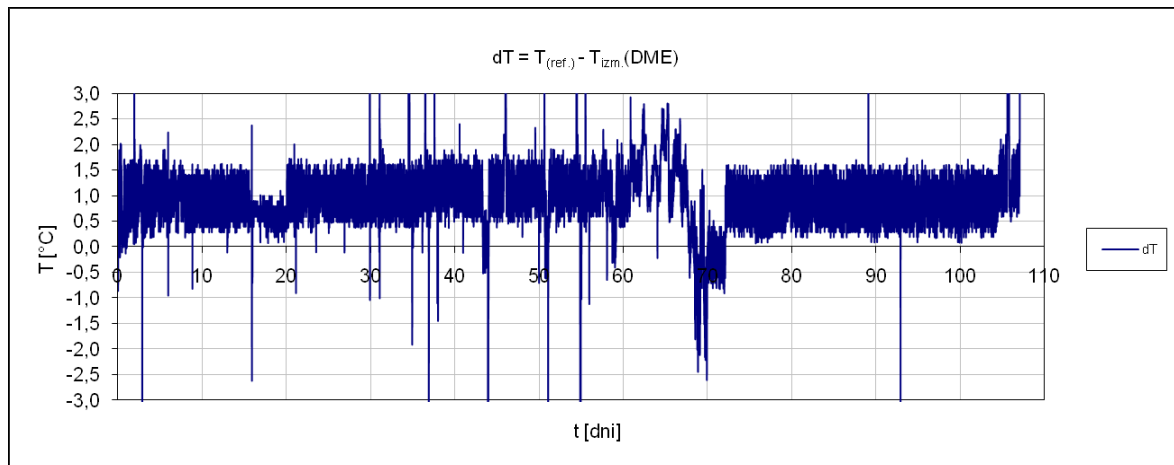
Slika 26: Primerjava poteka dejanske temperature z nsčrtovano oziroma nastavljeno po sušilnem programu.

Glede na nizko temperaturo okolice se je kratkotrajno pojavilo odstopanje od načrtovanega, do 2°C pod nastavljeno temperaturo. Do večjega odstopanja je prišlo med 61. in 69. Dnem sušenja (slika 27), vendar trajanje in sprememba temperature niso bile tako velike in niso vplivale na sušenje.



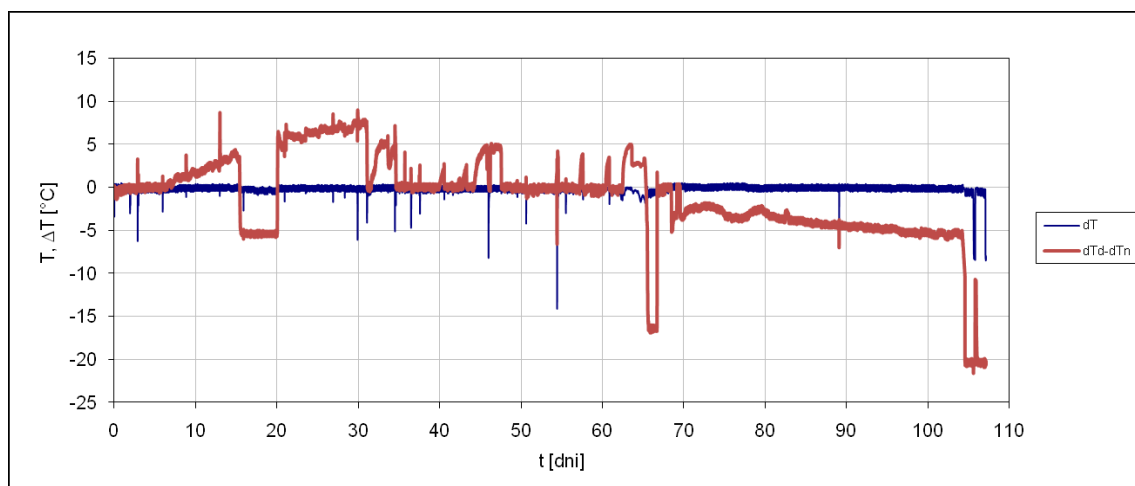
Slika 27: Potek dejanskih in nastavljenih temperatur sušenja ter nihanje temperature v okolici (obkroženo je nedoseganje nastavljene temperature v komori med 61. in 69. dnevom sušenja).

Zanesljivost merjenja je zadovoljiva, saj je povprečno odstopanje od izmerjenih vrednosti $1,13^{\circ}\text{C}$ (slika 28)



Slika 28: Odstopanja dejanske temperature od izmerjene.

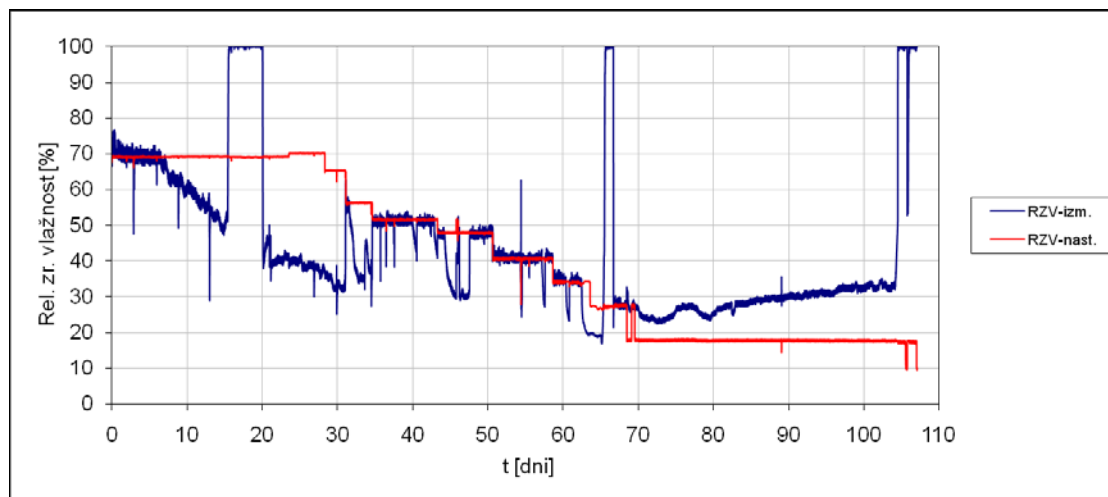
Urnivanje temperature je bilo zanesljivo z odstopanji, ki pa niso vplivala na sušilni proces (slika 29). Manjše odstopanje temperature je vidno med 60. in 70. dnem sušenja. Do najdaljšega odstopanja psihrometske razlike prišlo med 15. in 30. dnem sušenja, zatem je vidno še manjše odstopanje med 60. in 70. dnem sušenja in po 70. lahko vidimo, da se je odstopanje psihrometske razlike povečevalo (slika 29).



Slika 29: Odstopanje dejanske temperature in psihrometske razlike, izmerjene s psihrometrom v komori, od načrtovane oziroma nastavljene na sušilnem programu.

4.2.3. Relativna zračna vlažnost

Manjše odstopanje temperature je sprejemljivo, manj zadovoljivo pa je ujemanje relativne zračne vlažnosti, ki je bila enaka nastavljeni do 8. dneva sušenja. Zatem je je sledila nastavljeni še med 35. in 63. dnem sušenja, z več neujemanji. (slika 30).



Slika 30: Primerjava poteka dejanske relativne zračne vlažnosti (— izmerjena s psihrometrom) z načrtovano oziroma nastavljeno po sušilnem programu (—)

V zadnji tretjini je visoko odstopanje posledica nezanesljivih meritev, pri vlažnosti zraka pod 30%, lahko tudi zaradi predebele krpice na mokrem termometru.

Pri prvem tednu je zniževanje relativne zračne vlažnosti posledica nepravilnega delovanja sistema za navlaževanje, za kar je več možnih vzrokov:

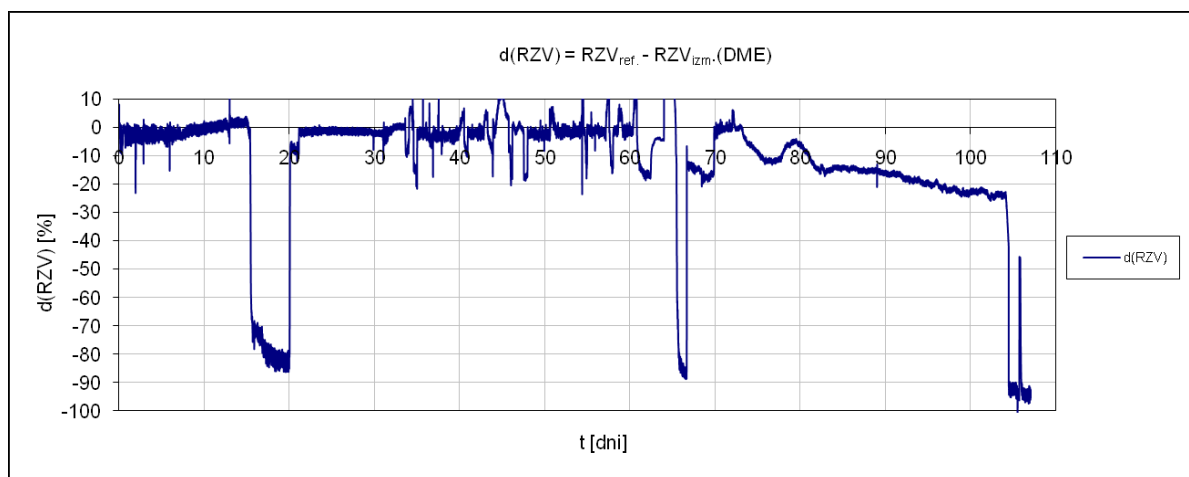
- direktno pršenje vode je neustrezno, ker se kapljice ne razpršijo v fino meglico, to poveča možnost neenakomernega pršenja, kondenzacije kapljic in zastajanje vode na tleh. Šobe se pogosto tudi mašijo, ker je bilo potrebno dodajati velike količine nemehčane vode. Med obratovanjem je prišlo do okvare črpalke, ki je bila zamenjana brez večjih posledic na proces,
- regulacijski sistem, faze navlaževanje, delovanje kompresorja in odpiranje loput si sledijo s prekratnimi zamiki. Kar je posledica nezmožnost prilagajanja klime v komori, zaradi prehitrih sprememb,
- ni bilo mogoče zagotoviti sušenja v popolnoma zaprtem sistemu, kar bi zmanjševalo zahteve po navlaževanju, s tem bi manj trošili vodo, in zagotovili primerno relativno zračno vlažnost.

Med prazniki, ko ni bilo osebnega nadzora, se je osušil mokri termometer, zato so se obdelovali napačni podatki (zmanjšanje psihrometske razlike). To je povzročilo intenzivno sušenje, kar pa je povod za nastanek nekaterih napak (kolaps).

V naslednjih desetih dneh ni bilo mogoče vzpostaviti potrebnih razmer, kljub dodajanju večjih količin vode za navlaževanje. Šele v območju nasičenja lesne vlažnosti so se razmere začele spreminjati, vendar se še niso uredile kot bi bilo potrebno. V nadaljnjih dneh je bil proces sušenja zelo nestabilen, prišlo je do velikih nihanj relativne zračne vlažnosti, zahteve po navlaževanju so bile velike. Potrebno je bilo dodajati vodo za

navlaževanje. Predvidevamo da smo porabili 400 do 600 kg vode za navlaževanje, kar je močno podaljšalo čas sušenja, hkrati pa se je tudi zmanjševala toplotna učinkovitost sušenja.

Odstopanja relativne zračne vlažnosti so bolj ali manj nastale zaradi težav sistema z navlaževanjem (slika 31). Na začetku so bile vrednosti še pravilne, do težav je prišlo predvsem zaradi osušitve mokrega termometra in zaradi primanjkovanja vode za navlaževanje. Kot nezanesljivo, kot že pri bukovini, se je pojavilo merjenje relativne zračne vlažnosti pod 30%. Na koncu sušenja je bila relativna zračna vlažnost povprečno za 25% višja od dejansko dosežene.



Slika 31: Odstopanja dejanske relativne zračne vlažnosti od izmerjene s psihrometrom.

Odstopanja relativne zračne vlažnosti so bila zelo velika, kar pa povzroča težave pri interpretaciji doseženih rezultatov, predvsem glede pogojev režima sušenja oziroma dosežene kakovosti posušenega lesa. Da bi izboljšali proces sušenja bi bilo potrebno več pozornosti nameniti pravilnemu delovanju psihrometra in delovanju sistema za navlaževanje.

4.2.4. Analiza kinetike sušenja

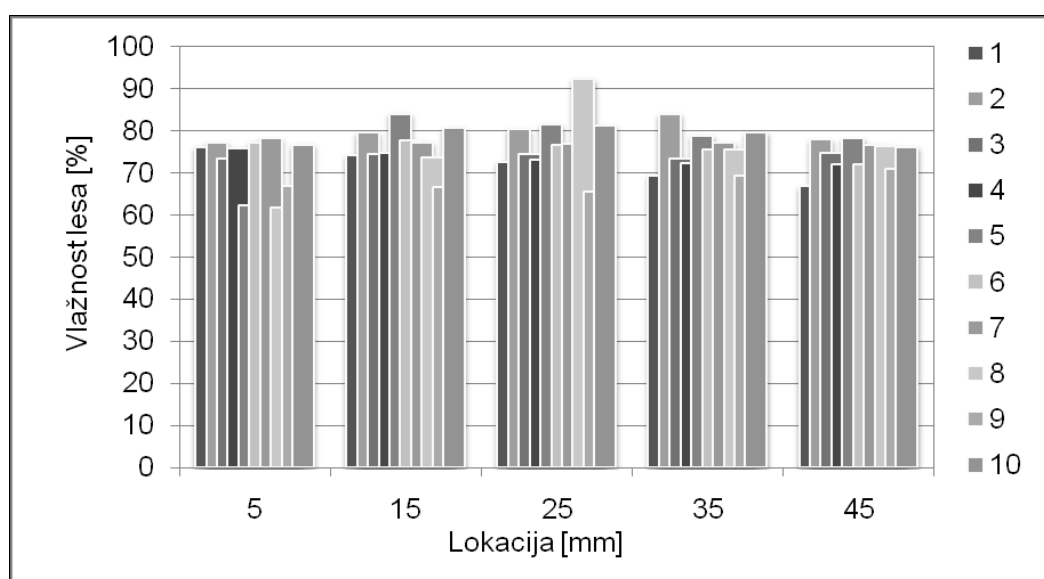
4.2.4.1. Vlažnost

Najpomembnejša za določanje kinetike sušenja je vlažnost, spremljana je bila s štirimi elektro-uporovnimi sondami. Kontrolo smo izvajali tudi gravimetrično na sledilnih vzorcih.

Začetna vlažnost se je gibala od 67,9% do 80,0% (preglednica 7 in slika 32). Vlažnost svežega lesa, določena gravimetrično na desetih vzorcih je bila 75,2%. Po prerezu je bila začetna vlažnost homogeno porazdeljena, brez vlažnostnega gradienta. Ker smo uporabili uporovno metodo s 4 merilnimi mesti, s sondo nismo zaznali variabilnosti začetne vlažnosti lesa. Izmerjena povprečna vrednost vseh sond je bila 67,9% in je nižja od gravimetrično določene (preglednica 7).

Preglednica 7: Povprečna začetna in končna vlažnost hrastovine, določena gravimetrično in z merilnimi sondami ter osnovna statistika.

	Gravimetrično		Sonde	
	Začetna vlažnost u [%]	Končna vlažnost u [%]	Začetna vlažnost u [%]	Končna vlažnost u [%]
Povprečno	75,2	7,8	67,9	9
Minimalno	67,9	6,7	62,9	7,7
Maksimalno	80	9,6	70,3	10,6
Sd.odklon	4,8	11,6	5	1,2



Slika 32: Porazdelitev začetne lesne vlažnosti po prerezu žaganic.

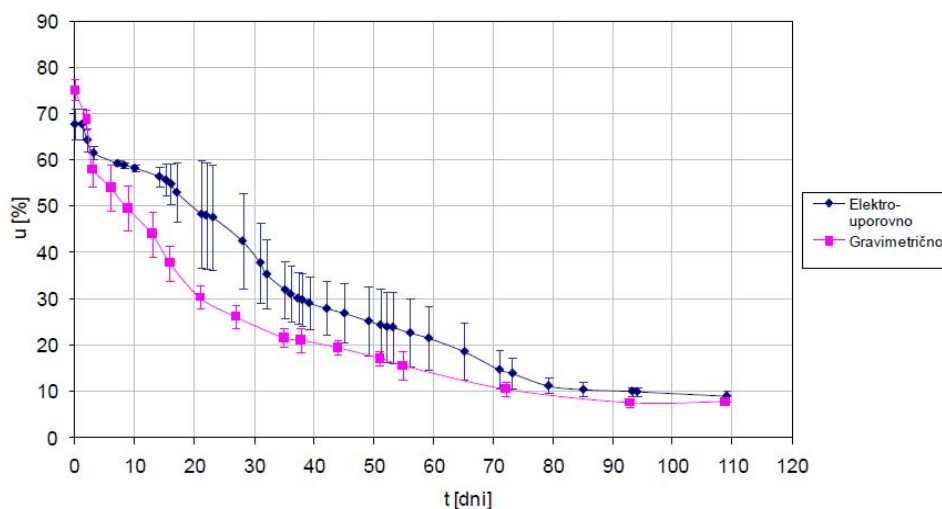
Na koncu smo dosegli ciljno vlažnost 7,8% (Preglednica 7), ki se je med elementi gibala od 6,7% do 9,6%, kar pomeni da je koeficient variabilnosti (KV%) 11,6. Različna končna vlažnost je posledica variabilne začetne vlažnosti, sušilnih karakteristik tkiv, orientacije elementov in neenakomernih pogojev po sušilnic. Da bi dobili enakomernjšo vlažnost lesa bi morali izvesti še fazo izenačevanja. Končna vlažnost izmerjana s sondami (9,0%) je višja od gravimetrično dobljene (preglednica 7). Variabilnost izmerjene vlažnosti je majhna od 8,1% do 11,1%, to pomeni da je koeficient variabilnosti 1,2. Z uporovnim merjenjem smo izmerili povprečno vlažnost za 1,2% višjo od gravimetrično izmerjene, vendar razlika zaradi večje variabilnosti gravimetričnih meritev ni značilna.

4.2.4.2.Kinetika sušenja

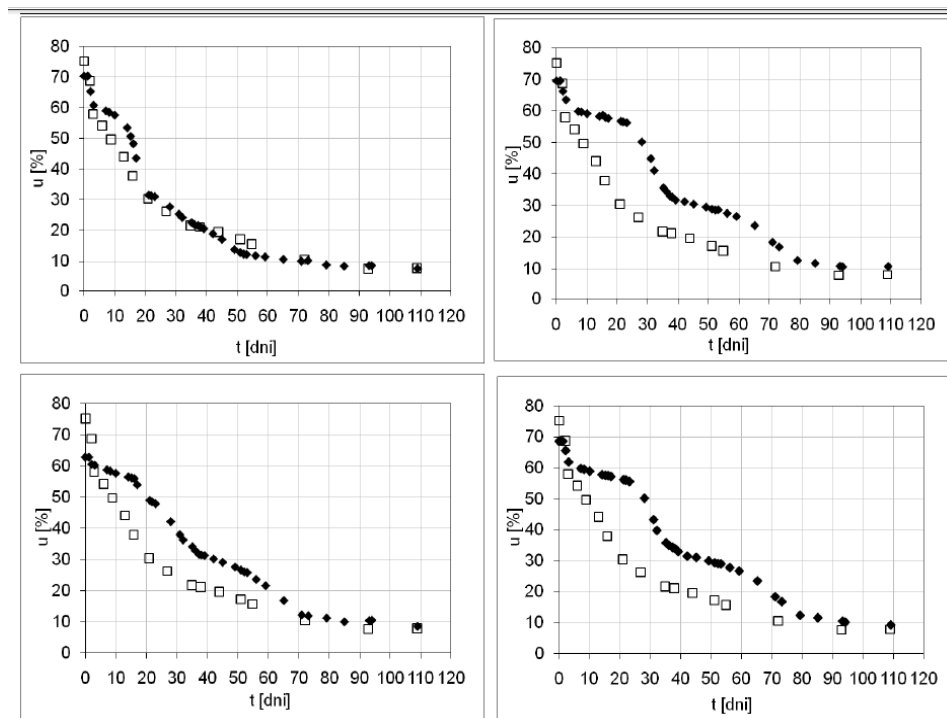
Sušilna krivulja je bila na začetku strma, kar pomeni da je bilo sušenje na začetku procesa hitro, to vidimo prikazano na sliki 33. Začetna hitrost sušenja, določena z uporovno metodo, je bila primerljiva z gravimetrično metodo, s sondami smo izmerili

nižjo začetno vlažnost. Gravimetrično dobljena povprečna sušilna krivulja je v nadaljevanju enakomerno padala do 30% povprečne vlažnosti (po 20 dneh sušenja). Potem se je postopek začel upočasnjevati, vse do dosežene končne vlažnosti lesa. Ves čas se je zmanjševala tudi razlika v vlažnosti med preizkušanci.

Povprečna sušilna krivulja, ki smo jo dobili električno – uporovno, je vse do 30% lesne vlažnosti višja od gravimetrično dobljene (slika 33). Različen je tudi njun naklon. Deloma zaradi položaja sond v elementih, ki so bile v sredini žaganic, in so tako vedno določale maksimalno vlažnost lesa. Krivulji se v nadaljevanju počasi zbližujeta. Pod 20% lesne vlažnosti se razlika med krivuljama skoraj izenači. Če primerjamo sušilne krivulje med sondami, vidimo, da pri visokih lesnih vlažnostih 3 od 4 sond kažejo višje vrednosti od povprečne sušilne krivulje (slika 34). Razlogi za odstopanje so poleg pozicije po debelini tudi v variiranju vsebnosti vode, ki pa je odvisna od fizioloških lastnosti. S tem variira tudi lesna vlažnost na merilnih mestih.



Slika 33: Primerjava sušilnih krivulj določenih z gravimetričnimi meritvami lesne vlažnosti in z meritvami vlažnosti z uporovnimi merilnimi sondami.



Slika 34: Primerjava natančnosti merjenje vlažnosti s posameznimi sondami (♦) in s sporedno gravimetrično metodo (□).

Uporovna metoda je s standardom omejena na higroskopsko območje, pod točko nasičenja celičnih sten, kar pomeni, da je merjenje svežega lesa le orientacijsko. Ker pa se parametri v prvem delu sušenja zelo malo spreminjajo, so te vrednosti primerne za vodenje procesa. V začetnem delu so hitrosti sušenja primerljive s sušenjem v konvencionalnih sušilnicah, če bi sušili s primerljivimi parametri. Učinkovito sušenje je trajalo dolgo, v prvi četrtini se je izločilo približno dve tretjini vode, hitrost pa se je zelo zmanjšala po padcu vlažnosti pod vlažnost nasičenja, kjer je difuzijski upor prevladujoč.

4.2.4.3. Aerodinamika komore

Dosežene hitrosti in porazdelitev po prerezu komore so primerne, aerodinamske lastnosti komore pa zadovoljive, prav tako je zadovoljivo vzdolžno prepihovanje zraka, moramo pa upoštevati, da bi bilo problematično pri večjih kapacitetah komor.

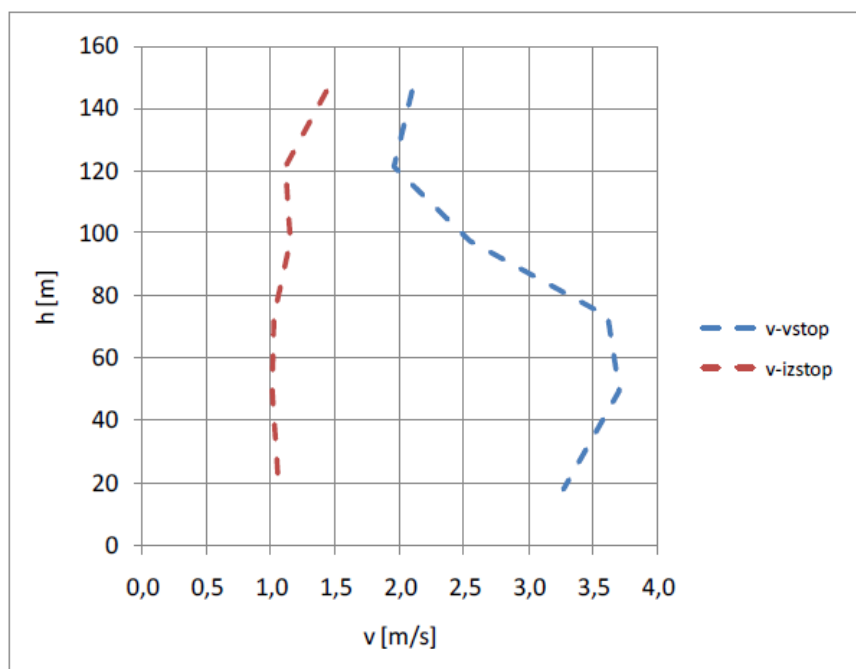
Z ventilatorji smo v prostem pretoku dosegli hitrost zraka 4,51 m/s, v prostoru po izstopu zraka in vstopu v agregat je bila hitrost 1,29 m/s, pri vstopu v agregat pa 2,54 m/s, zaradi manjše velikosti odprtine skozi agregat (preglednica 8).

Čeprav so bile uporabljene dokaj tanke distančne letve, je bila hitrost zraka v zložaju na vstopu visoka. Zaradi preusmeritve hitrega zračnega toka je bila v zgornjih delih pričakovano nižja hitrost zraka, okrog 2 m/s, proti tlom pa se je povečevala do maksimalne 3,71 m/s (preglednica 8, slika 35). Po višini zložaja se hitrosti niso razlikovale za več kot 20%. Enakomerna hitrost je bila dosežena v več kot polovici spodnjega dela komore. V vodoravni smeri je bilo gibanje zraka enakomerno, brez večjih odstopanj, ki nastanejo zaradi neenakomernih oblik nerobljenih plohov.

Zrak je do izstopa iz zložaja izgubil hitrost. Na izstopu je bila hitrost po celotni višini zložaja enakaomerna; približno 1,1 m/s. Pomembno je vedeti, da komora ni bila popolnoma zapolnjena, dolžina plovov je bila povprečno 2,72 m. Če bi imeli popolnoma zapolnjeno komoro, bi hitrost zraka skozi zložaj še dodatno padla do nizkih hitrosti, ki bi lahko bile že kritične. Krajši plohi so tako vplivali na večje izmerjene vrednosti in tudi enakomernejšo porazdelitev hitrosti zraka po celotnem zložaju.

Preglednica 8: Porazdelitev hitrosti zraka po višini sušilne komore in na izstopu zraka iz zložaja.

	Vstop [m/s]		Izstop [m/s]	
	Povprečno	KV	Povprečno	KV
Prosti tok	4,51	6,2	1,29	22,4
Višina [cm]				
145,5	2,06	53,9	1,42	9,2
121,5	1,99	49,2	1,1	16,1
97,5	2,55	14,90	1,14	14,9
73,5	3,63	11,8	1,02	29,8
49,5	3,71	2,2	1	5,7
17,5	3,28	11,9	1,06	9,6
Vstop v agregat			2,54	25,4



Slika 35: Porazdelitev hitrosti zraka po višini sušilne komore na vstopu in na izstopu zraka iz zložaja.

4.2.5. Kakovost sušenja

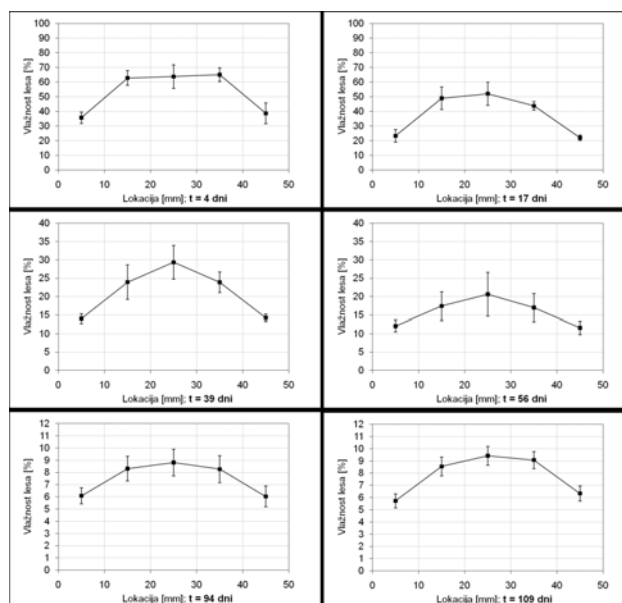
Kakovost smo ocenjevali pred sušenjem, med samim sušenjem in na koncu sušenja.

4.2.5.1. Končna vlažnost

Postopek je skupno trajal 109 dni, dosežena povprečna vlažnost pa je bila 7,8%. Odstopanja niso bila velika, minimalna lesna vlažnost je znašala 6,7%, maksimalna pa 9,6%, kar kaže na dokaj enakomerno razporeditev vlažnosti med žaganicami in tudi po sušilni komori. Razlik po višini in širini komore ni bilo zaznati, kar je znak enakomernega sušenja. Končno vlažnost izmerjeno s sondami smo izmerili 9%, kar je nekoliko višja vlažnost od dobljene gravimetrično, razlike pa vseeno niso tako velike (preglednica 7).

Že na začetku se je pojavil vlažnostni profil, ki je značilen predvsem za drevesne vrste, ki se težje in počasneje sušijo. Površina se je po 4 dneh sušenja že osušila do območja nasičenosti celičnih sten, v notranjosti žaganic pa je bil padec vlažnosti zanemarljiv (slika 37). Po 17 dneh sušenja je bil vlažnostni profil podoben temu po štirih dneh, površina je bila že osušena pot točko nasičenja celičnih sten, v notranjosti pa se je vlažnost še zmeraj gibala med 39% in 64%. Zaradi prehitrega začetnega sušenja so se na površini oblikovale difuzijske bariere, ki so oteževale prehod vode iz notranjosti. Zaradi difuzijskega upora je bilo potrebno tudi več energije. Delno je lahko zato krivo nedelovanje navlaževanja in nedoseganja klimatskih pogojev, nastalih po 8 dneh sušenja.

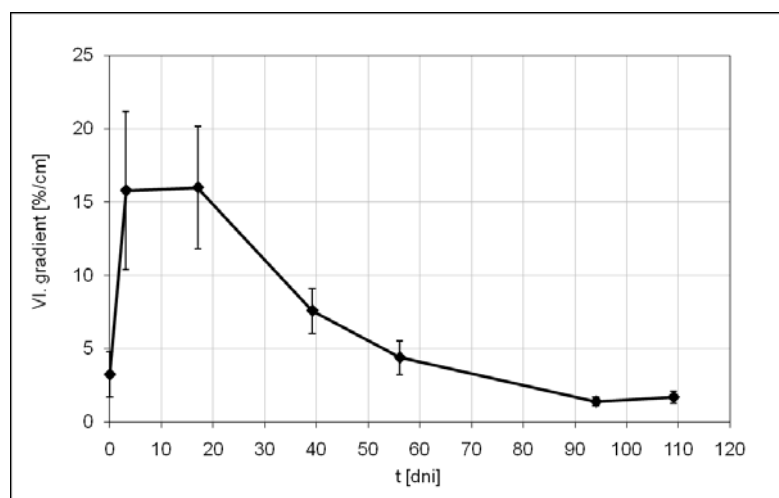
Porazdelitev vlažnosti po prerezu se je v nadaljevanju izboljšalo. Profil vlažnosti je postajal vse bolj paraboličen, razlike po prerezu pa so se zmanjševale (slika 36).



Slika 36: Porazdelitev vlažnosti po prerezu žaganic in odvisnost od časa sušenja: t = 4 dni (levo zgoraj), t = 17 dni (desno zgoraj), t = 29 (sredina levo), t = 56 dni (sredina desno), t = 94 (spodaj levo), t = 109 dni (spodaj desno).

4.2.5.2. Vlažnostni gradient

Gradient vlažnosti smo določali v šestih intervalih, to je 4. dan, 17. dan, 39. dan, 56. dan, 94. dan in 109. dan, na petih slojih debeline lesa. Pojavil se je že kmalu na začetku sušenja, dvignil se je na 16%/cm in zadržal to vrednost tudi do naslednje meritve (17. dan), ko je imel les povprečno vlažnost 35% (slika 37). Vlažnostni gradient je posledica med razliko vlažnosti površine in prvega notranjega sloja. V nadaljevanju sušenja se je gradient vlažnosti začel zmanjševati, ker se je začela sušiti sredica žaganic. Na koncu se je gradient zmanjšal in dosegel sprejemljive vrednosti med 1,4 in 1,7 %/cm. To kaže na enakomerno osušitev lesa po debelini, po dolžini žaganic pa ni bilo zaznati razlik v vlažnostnem gradientu.

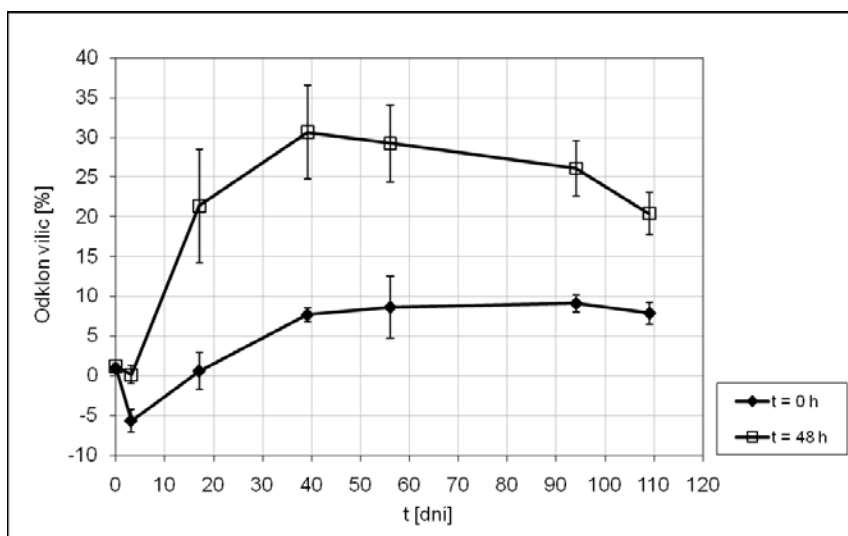


Slika 37: Razvoj vlažnotnega gradienta v odvisnosti od časa sušenja.

4.2.5.3. Notranje napetosti

Z naraščanjem vlažnostnega gradienta se v lesu generirale tudi napetosti, ki smo jih zaznali z viličnim testom in z metodo prežagovanja. Zaradi večje debeline vzorcev je z viličnim testom bolj nazorno prikazano kako so razporejene napetosti na površini, s prežagovalno metodo pa bolje ocenimo povprečne napetosti. Pri obeh metodah je razviden tudi učinek vlažnostnega gradienta in vpliva na rezultate v začetni fazi. Po končanem sušenju, se je zmanjšal tudi vlažnostni gradient in tako ni zaznati večjih odstopanj med napetostjo takoj po vzorčenju in po 48 urah (slika 38, slika 39).

Napetosti so se pričakovano pojavile z vlažnostnim gradientom takoj na začetku sušenja, ko je prišlo do intenzivnega sušenja na površini (slika 36). Vrednosti prve (slika 38) in druge (slika 39) meritve, povedo da so bile na površinskih slojih natezne napetosti, saj so bile izmerjene vrednosti negativne. Bližje površini žaganic je naraščanje napetosti največje, stopnjuje pa se do 39. dneva (slika 38). Napetostno polje se obrne po štiridesetem dnevu sušenja, povprečna vlažnost je padla na 20 %, povprečni vlažnostni gradient pa 7 %/cm.

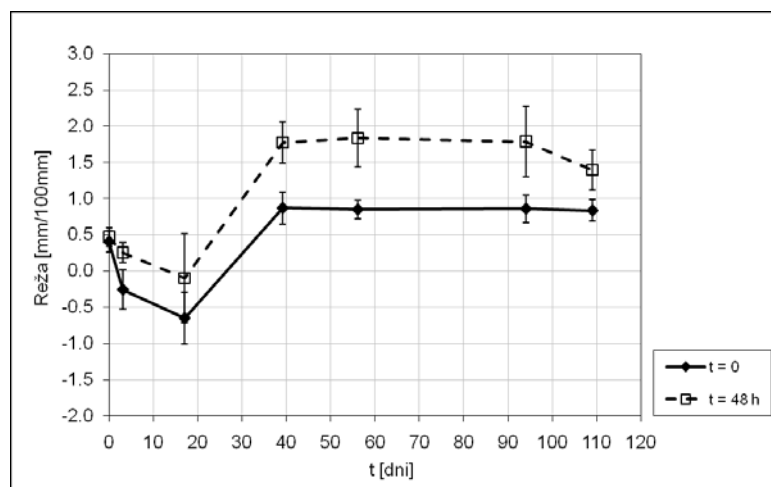


Slika 38: Povprečna deformacija vilič ($\pm 95\%$ int. zaupanja) na sledilnih vzorcih takoj po razžagovanju ($t = 0$ h) in po 48 urnem kondicioniranju.

Enake podatke smo dobili tudi pri uporabi prežagovalne metode (slika 39). Obratno zaskorjenje je blo ugotovljeno do 17. dneva, nato pa obrnitev napetostnega stanja. Največje sušilne napetosti so bile zaznane po 39 dneh in so se ohranile vse do konca sušenja. Na koncu sušenja so se napetosti nekoliko znižale.

Posledica napetosti, ki so hitro naraščale od začetka, pomeni zaskorjenje. Površina lesa se je osušila in je delovala kot blokada za prevajanje vode iz sredine na površino, tako so se pojavile natezne napetosti, ki so prekoračile trdnost lesa v prečni smeri, to pa je vzrok nastanka površinskih razpok in poklin. Hitro izhlapevanje proste vode je v delih pod površino povzročilo tudi kolaps. Posledice tega stanja smo ugotovili pri 39. dnevu sušenja, ko smo odkrili posamične razpoke vzdolž parenhimskih trakov in satavost. Prisotnost satavosti je bila potrjena tudi pri končni kontroli.

Glavni vzrok nastanka satavosti in zaskorjenja je slabo delujoče vlaženje in nedoseganje nastavljenih pogojev sušenja.



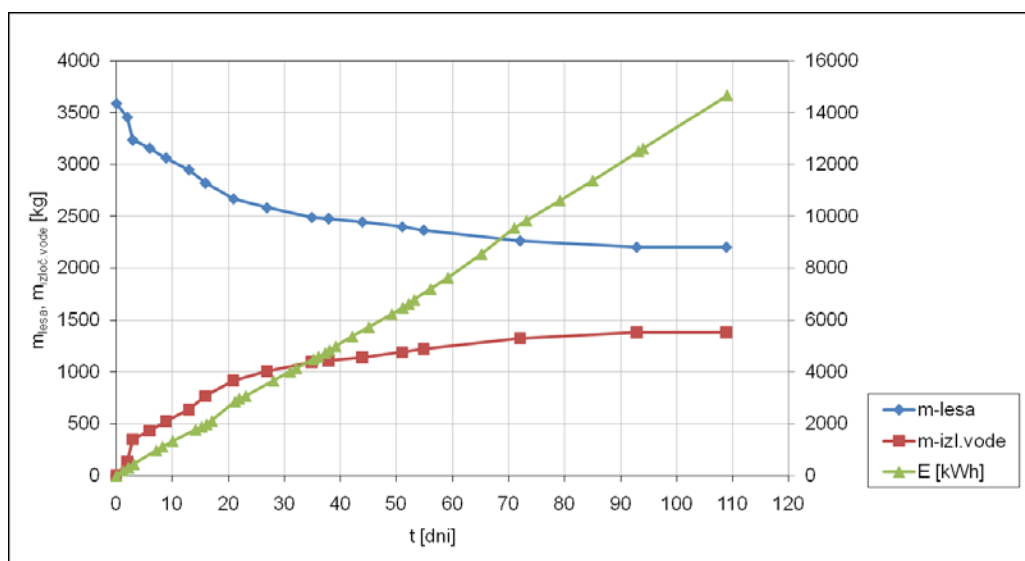
Slika 39: Povprečna velikost reže ($\pm 95\%$ int. zaupanja) na sledilnih vzorcih takoj po razžagovanju ($t = 0$ h) in po 48 urnem kondicioniranju.

4.2.5.4. Razpoke in veženja

Prisotnost satavosti je bila potrjena tudi pri končni kontroli. Glavni vzrok nastanka satavosti in zaskorjenja je slabo delujoče vlaženje in nedoseganje nastavljenih pogojev sušenja.

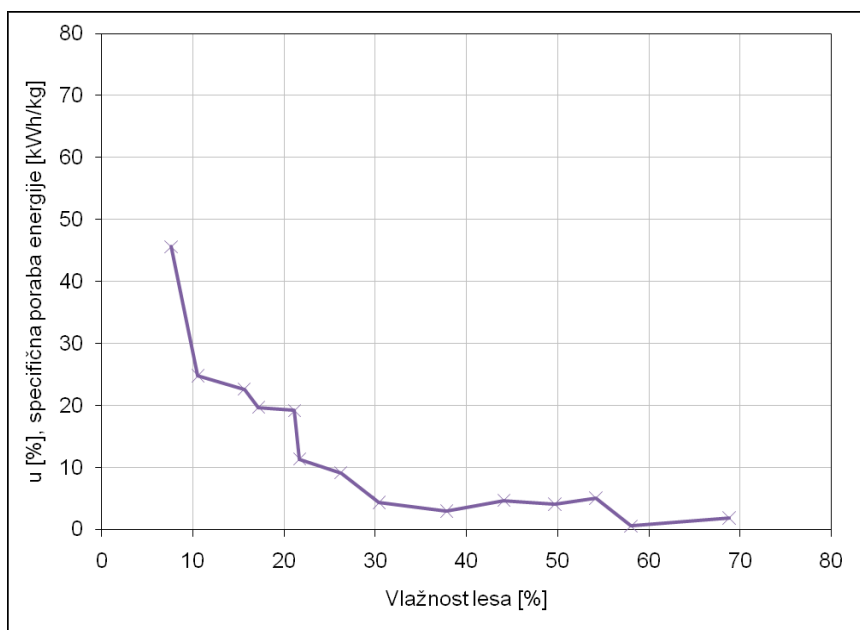
4.2.5.5. Poraba energije

V celotnem procesu sušenja hrastovine je bilo porabljeno 14688 kWh energije, kar pomeni 5,61 kWh na uro sušenja (slika 40). Da smo posušili les iz začetne vlažnosti 75,2% na končno 7,8% pomeni povprečno porabo 10,37 kWh za 1 kg izločene vode. Nizko porabo energije smo dosegli vse do 22% povprečne vlažnosti lesa.



Slika 40: Izguba mase zložaja lesa, izločanje vode iz lesa ter poraba električne energije v odvisnosti od časa sušenja hrastovine, debeline 50 mm.

Do točke nasičenja celičnih sten je bila poraba energije 3,0 kWh/kg, zatem je poraba energije eksponentno naraščala. Pri sušenju od 30% vlažnosti do 20% vlažnosti je bila specifična poraba 11,4 kWh/kg, od 20% do 10% pa 22,8 kWh/kg, pod 10% vlažnosti lesa pa je dosegla ekstremnih 90 kWh/kg (slika 41).



Slika 41: Odvisnost specifične porabe energije od vlažnosti lesa pri sušenju hrastovine 50 mm.

Vzrok tako visoki porabi je bilo tudi neustrezno delovanje naprav za navlaževanje, saj je bilo veliko energije vložene za dodatno izhlapevanje vode, ki smo jo dodali zaradi potreb navlaževanja. Za en kubični meter se je porabilo 4481 kWh energije.

5. SKLEPI

V začetni fazi sušenja je sušenje hrastovine in bukovine primerljivo z ostalimi tehnikami sušenja. Sušenje se močno upočasni pod točko nasičenja celičnih sten, zaradi nizkih temperatur, ki upočasnjujejo transport vezane vode. Sušenje se je dodatno še podaljšalo zaradi težav sistema z navlaževanjem pri sušenju hrastovine. V povprečju so bile začetne vlažnosti hrastovine za 30 % višje od vlažnosti bukovine. Končne vlažnosti so v obeh primerih variirale, kar pa je vzrok v sami sestavi in usmerjenosti plohov in različnih pogojev v komori. Večja variabilnost končne vlažnosti pri bukovini (6,6 do 11 %) je verjetno posledica večje variabilnosti začetne vlažnosti.

V začetku sušenja sta bile sušilne krivulje v obeh primerih zelo strme, kar kaže na hiter začetek sušenja. Sušilna krivulja izmerjena z elektro uporovno metodo je bila vse do 30 % vlažnosti višja od gravimetrično dobljene, v nadaljevanju sta se krivulji zblížali in so bile izmerjene vrednosti primerljive. V začetnem delu sušenja, v prvi fazi, je hitrost sušenja bukovine in hrastovine primerljiva s sušenjem v konvecionalnih sušilnicah, če bi imeli nastavljene iste parametre. Sušenje hrastovine je bilo sicer zaradi zapletov z navlaževanjem zelo dolgo, kar je še dodatno povečalo porabo energije. Hitrost sušenja se je močno podaljšala pod točko nasičenja celičnih sten, ker je v tem območju prevladujoč difuzijski tok.

Zaradi nizkih temperature sušenja v prvi fazi kondenzacijskega sušenja je možnost nastanka napak manjše (razpok in veženj). Pri bukovini smo imeli čez celoten proces sušenja enakomerno razporejen vlažnostni gradient, ki pa se je proti koncu sušenja zmanjšal iz 5 %/cm na 0,9 %/cm. Kljub uporabi programa za preprečevanje obarvanja, je bila temperatura previsoka, da bi preprečili obarvanje bukovine. Pri sušenju hrastovine se je že takoj na začetku pojavil visok vlažnostni gradient (16 %/cm) in je bil tako visok čez celoten postopek sušenja, do vlažnosti 35 %. V nadaljevanju sušenja se je gradient vlažnosti zmanjšal in dosegel sprejemljive vrednosti (1,4 do 1,7 %/cm).

Z naraščanjem vlažnostnega gradienta so se v lesu generirale notranje napetosti, katere smo zaznali tudi z viličnim testom in prežagovalno metodo. Z viličnim testom smo dobili informacije o napetostnem stanju v zunanjih slojih, prežagovalna metoda nam pa pove kakšne so povprečne napetosti v lesu. Napetostno stanje bukovine je bilo pričakovano v začetku večje vendar po celotnem prerezu v dopustnih mejah. Do povečanih odstopanj viličnega testa v prvem delu sušenja bukovine je močno vplival tudi vlažnostni gradient. Pri hrastovini, se je v začetku sušenja pojavil velik vlažnostni gradient, kar pomeni velike notranje napetosti, ki so hitro naraščale že od začetka, to pa pomeni pojav zaskorjenja. Ker je bila površina že osušena je oteževala prevajanje vode iz notranjosti v zunanje sloje, to pa je pripeljalo do nastanka razpok vzdolž parenhimskih trakov in satavost, ki je bila potrjena pri končni kontroli. Pojav razpok in satavosti pri hrastovini pripisujemo napačnemu delovanju sistema za navlaževanje. Pri pravilnem delovanju naprav v sušilni komori, bi bilo sušenje manj intenzivno in manjša možnost nastanka napak. Bukovina se je lepo posušila, brez prisotnih razpok ali veženja na začetku in na koncu sušenja, ki bi nastale zaradi nepravilnosti v vodenju postopka sušenja. Manjša razpoke in zavrtost so posledica zgradbe lesa.

Pri svežem lesu bukovine barvnih sprememb nismo določali, zaradi vpliva velike količine vode. Prvo merjenje smo opravili po šestih dneh in sicer vizualno in s sistemom CIELab, barvnih sprememb na površini ali sredici ni bilo zaznati. Do večjih sprememb je prišlo pri naslednji meritvi po 14 dneh. Za 7 enot se je povečala razlika v svetlosti barve med površino in sredico, kar je bilo zaznati tudi vizualno. Prav tako se je spremenila barva za podobno vrednost. Pod točko nasičenja celičnih sten je prišlo do največjih barvnih sprememb sredice v nadaljevanju pa se barva na površini in sredini ni več značilno spreminjala in je kot napaka ostala tudi po koncu sušenja.

Kljub temu, da se kondenzacijsko sušenje uvršča med energetske varčnejše postopke se je potrebno zavedati, da je električna energija, ki se večinoma uporablja pri tem postopku, dokaj draga. Za sušenje bukovine smo porabili 4016 kWh energije, kar je veliko manj kot pa pri sušenju hrastovine kjer smo dosegli porabo 14688 kWh. Vzrok tako veliki porabi energije pri hrastovi je že prej omenjeno napačno delovanje sistema navlaževanja. Pri sušenju bukovine smo za izločitev enega kubičnega metra vode porabili 718 kWh, pri hrastovini pa se je porabilo 4481 kWh energije. V prvi fazi sušenja je bila poraba energije večja zaradi segrevanja sušilnice in lesa. Pri bukovini smo dosegli nizko porabo energije (1 kWh/kg) vse do 25 % vlažnosti, kasneje se je poraba povečala na 5 kWh/kg, v zadnji fazi pa se je poraba še dodatno dvignila zaradi ustavljanja oz. kondicioniranja. Pri hrastovini smo že v začetku imeli precej višjo porabo energije, vse do točke nasičenja celičnih sten (3 kWh/kg). Pri nadaljnjem sušenju do 20 % vlažnosti je poraba narasla na 11,4 kWh/kg, za osušitev na 10 % vlažnost je poraba narasla na 22,8 kWh/kg pod 10 % pa na 90 kWh/kg izločene vode.

6. VIRI

Alves-Filho, O., Tokle, T., 1999. Heat pumps dry food products in Norway. IEA Heat Pump Centre Newsletter, 17, 4: 22–23

Alves-Filho, O.; Eikevik, T., 2007. Atmospheric freeze drying with heat pumps – new possibilities in drying of biomedical materials. In: The 5th Asia-Pacific Drying Conference, 13–15

Geršak M., Velušček V. 2003. Sušenje lesa. Ljubljana, Zveza lesarjev Slovenije, Lesarska založba: 165 – 170 str.

Geršak M., Čop T., Gorišek Ž., Mrak C., Velušček V. 1986. Sušenje lesa. Ljubljana, Zveza društev inženirjev in tehnikov gozdarstva in lesarstva slovenija: 254 str.

Minea V. 2010. Improvements of high-temperature drying heat pumps. International Journal of Refrigeration, 33, 1: 180 – 195

M- R d.o.o. kondenzacijska sušilnica. 2011. (12. 9. 2011):
<http://www.m-r.si/index.php?link=izdelki/susenje-lesa/kondenzacijska-susilnica&language=sl>

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 13183-1:2003 - Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1: Determination by oven dry method

SIST EN 13183-2:2003 - Delež vlage v žaganem lesu – 2. del: Ocena z metodo električne upornosti

TERMO – TEHNIKA d.o.o. Ogrevalne toplotne črpalke. 2011. (12. 9. 2011):
http://www.termotehnika.com/o_podjetju.php .

Tomec P. 2010. Ljubljana. Diplomski projekt, Optimalno kombiniranje kondenzacijskega in konvekcijskega sušilnega postopka: 48 str.

Wera , P., Raghavan G.S.V., Terdtoon P., 2005. Loop Thermo-Siphon Application for Heat Pumping Drying. In: Proceedings of the 3rd Inter-American Drying Conference (IADC2005), Montre´al, Canada.

ZAHVALA

Rad bi se zahvalil mentorju prof. dr. Željku Gorišku, za strokovno pomoč in potrpežljivost, pri izdelavi diplomskega projekta.

Zahvaljujem se tudi doc. dr. Aležu Stražetu, za recenzijo diplomskega dela.

Iskrena hvala, tudi mojim staršem, ki so me med študijem finančno in moralno podpirali.

Vsem ki ste me v času študija podpirali in spodbujali.

HVALA

PRILOGE

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Rok ZIDAR

**KAKOVOST IN KINETIKA SUŠENJA BUKOVINE IN
HRASTOVINE V KONDENZACIJSKIH SUŠILNIH
KOMORAH**

DIPLOMSKI PROJEKT

Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja

Ljubljana, 2012

